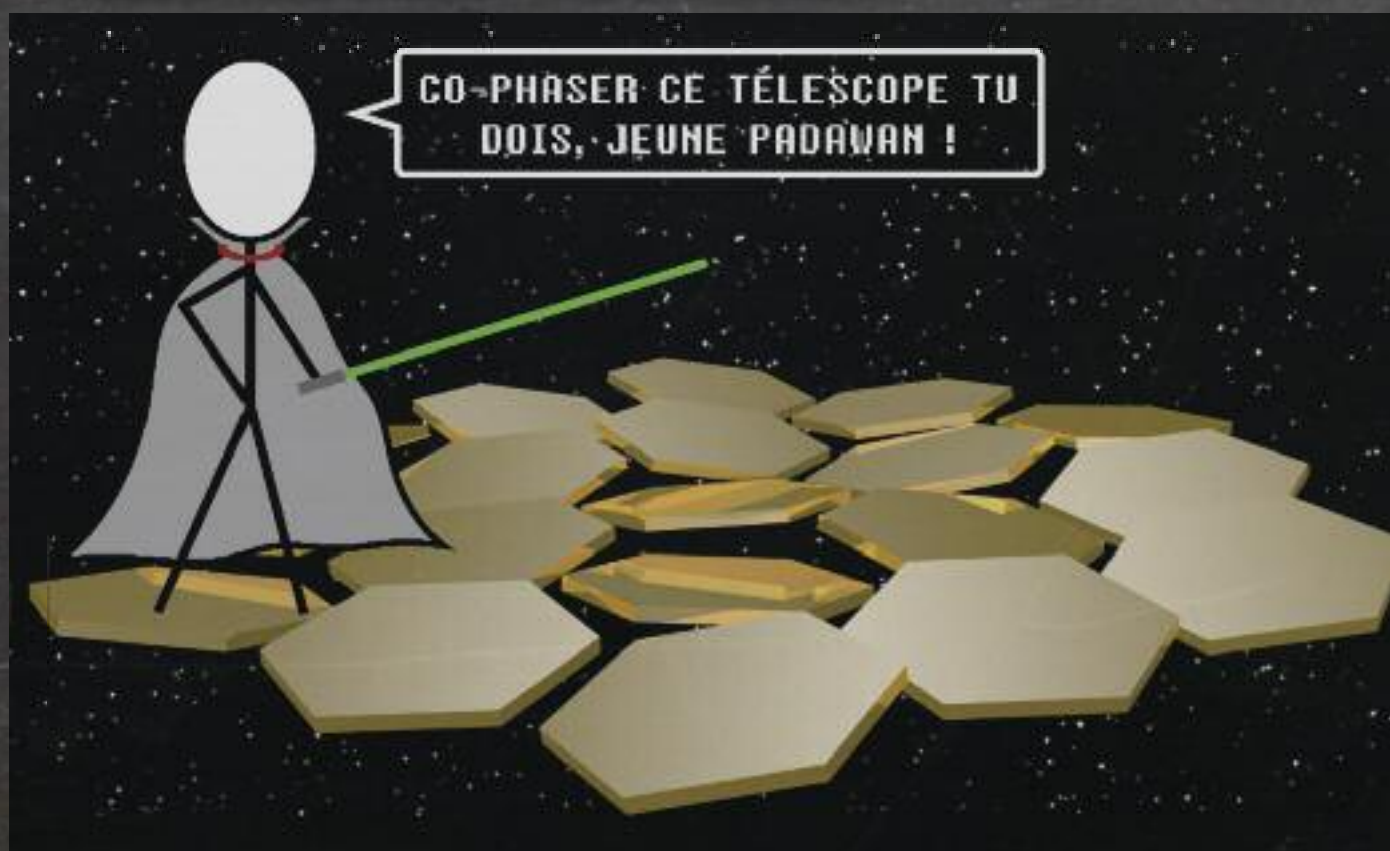


COPHASAGE DE TRES GRANDS TELESCOPES SEGMENTES

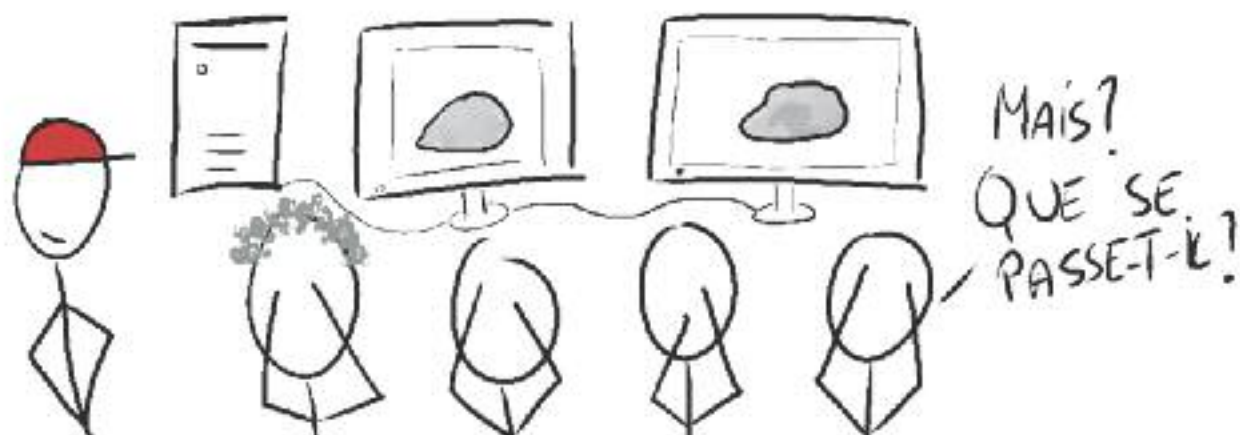
* « RENDRE LEURS POUVOIRS AUX FUTURS YEUX LES PLUS PUISSANTS DE LA PLANÈTE »



L'ESSENTIEL

L'article présenté en zoom ce mois-ci « cophasage de très grands télescopes segmentés » est sous-titré « rendre leurs pouvoirs aux futurs yeux les plus puissants de la planète ». En effet, il décrit le développement de télescopes fournissant des résolutions angulaires supérieures à celles obtenues à l'heure actuelle, ce qui sous-entend des miroirs primaires de diamètre dépassant 30 mètres ; leur conception est alors inévitablement basée, pour des raisons techniques et technologiques, sur une géométrie segmentée, ce qui implique une complexification des structures pupillaires du télescope. Ce développement est l'un des enjeux de l'astrophysique moderne (recherche de planètes extrasolaires, identification d'étoiles doubles, par exemple).

L'auteur, Pierre Janin-Potiron, décrit les résultats qu'il a obtenus à l'aide de simulations numériques ainsi que de tests faits sur un banc d'optique d'essai. Ces travaux représentent son travail de thèse, effectué au Laboratoire Lagrange de Nice. Ils sont présentés de manière claire et originale par un jeune chercheur passionné qui a obtenu le prix de la thèse SF2A 2018 ; Pierre Janin-Potiron est actuellement chercheur postdoctoral au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.



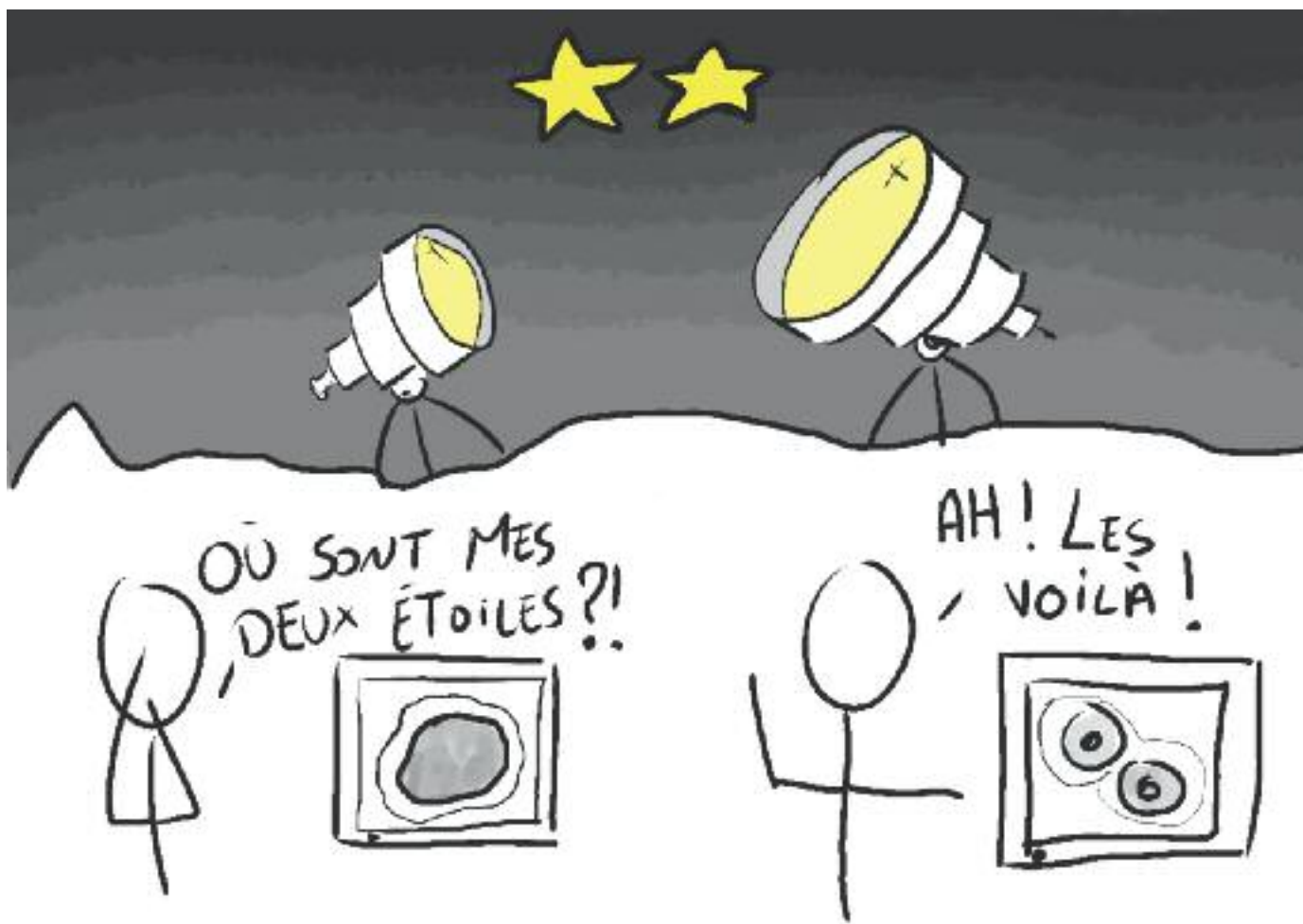
Le Télescope Géant Européen (ou Extremely Large Telescope – ELT) est prêt à effectuer la première observation de sa toute jeune existence ! Quel moment incroyable que celui que nous sommes en train de vivre ! Les scientifiques de tous horizons, ainsi que de nombreux journalistes et personnalités invités pour l'événement, retiennent leur souffle.

Le télescope tiendra-t-il ses promesses ? 3... 2... 1... 0... La première image s'affiche sur les multiples écrans de la salle de contrôle ! Une vague d'effroi parcourt l'assemblée. « Mais... comment cela est-il possible ? », s'exclame un éminent planétologue aux cheveux grisonnants. Une grande partie de l'assemblée, livide d'incrédulité, se tourne alors vers un homme tapi dans l'ombre, sourire narquois à demi masqué : « Par Newton, qu'avons-nous omis dans la construction de ce télescope, mon cher Astor ? ». Ce à quoi Astor, l'instrumentaliste à la tête de ce projet pharaonique, répond calmement : « Quelqu'un s'est appuyé sur le bouton qui désactive le cophasage du télescope, mes

chers collègues. Pas de panique, je vais arranger cela. » Un immense sentiment de soulagement semble gagner l'assemblée, les visages se décrispent alors. Le planétologue, si inquiet il y a peu de temps, demande, d'un air apaisé, à Astor : « Mais au fait, très cher, pourriez-vous expliquer aux personnes ici présentes ce qu'est réellement le cophasage ? Cela me permettrait également de rafraîchir ma mémoire ». Astor saute sur l'occasion et convie l'assistance à venir écouter son récit : « Le cophasage, mes amis... c'est rendre leurs pouvoirs aux télescopes segmentés, comme celui avec lequel vous essayez d'observer. Laissez-moi vous conter l'époque où j'étais étudiant en thèse et me creusais les méninges sur ce sujet. Prenez place ! ».

Accompagné de son fidèle tableau noir et de ses craies, Astor se lance dans une grande démonstration. Voici peu ou prou son discours rapporté :

« Commençons, si vous le voulez bien, mes amis, par la base. Depuis des décennies, mes prédécesseurs et moi-même courons après le même but : le télescope le plus grand possible. » « Mais dans quel but ? » me diront certains. Eh bien ! c'est très simple. Un télescope dont le miroir primaire est plus grand va permettre à la fois d'observer des objets astrophysiques – telles des étoiles ou des galaxies – dont la luminosité est plus faible, mais aussi de faire ces observations avec une plus grande finesse du détail.



En regardant par exemple deux étoiles très proches – que les scientifiques appellent étoiles doubles – avec un télescope de petit diamètre, nous ne verrions qu'une seule et même tache sur notre image et nous en déduirions erronément qu'il n'y a qu'une seule étoile. Maintenant, observez le même système avec un télescope plus grand... surprise ! Les deux étoiles apparaissent distinctement ! Il en va de même de l'observation de détails comme les cratères d'un astéroïde, les structures atmosphériques de planète du Système solaire et même pour la séparation d'une exoplanète et de son étoile hôte !

– Mais si tout n'est qu'une question de diamètre, quel est donc le problème ? Faisons des télescopes géants ! dit une jeune thésarde assise au premier rang.

– Très chère, tout n'est malheureusement pas qu'une question de volonté dans ce cas précis..., répond tristement Astor. En fait, à l'époque, les plus grands

Pourquoi ne pas faire plein de petits miroirs que l'on imbriquerait pour en faire un seul aussi grand que l'on voulait ?

télescopes construits d'un seul morceau ne dépassaient pas la dizaine de mètres de diamètre. On comptait parmi eux le Very Large Telescope, que nous apercevons au-dehors, sur la montagne d'en face. Cette limitation du diamètre était due notamment à l'extrême difficulté technique de construire de plus grands miroirs, mais aussi au fait qu'en cas de casse – et ces grands miroirs auraient été fragiles et difficile à manipuler – il aurait fallu tout recommencer et cela aurait coûté très cher.

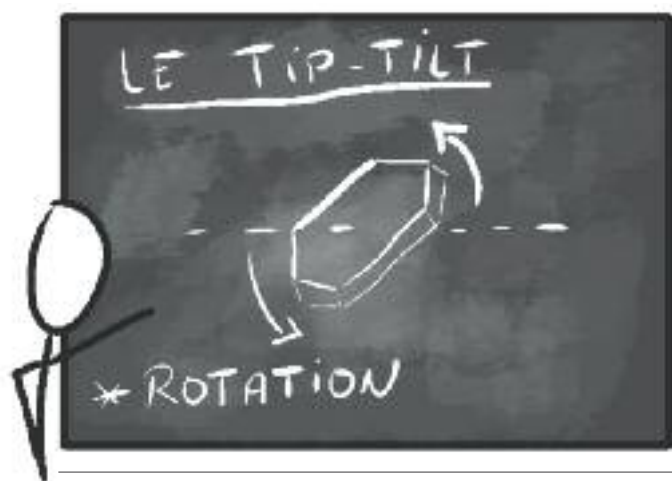
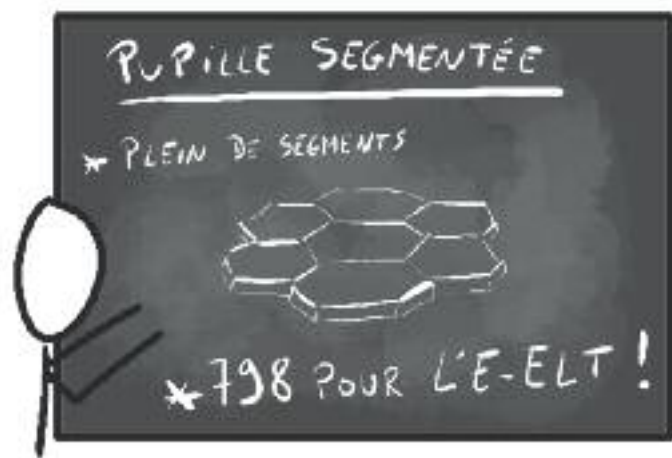
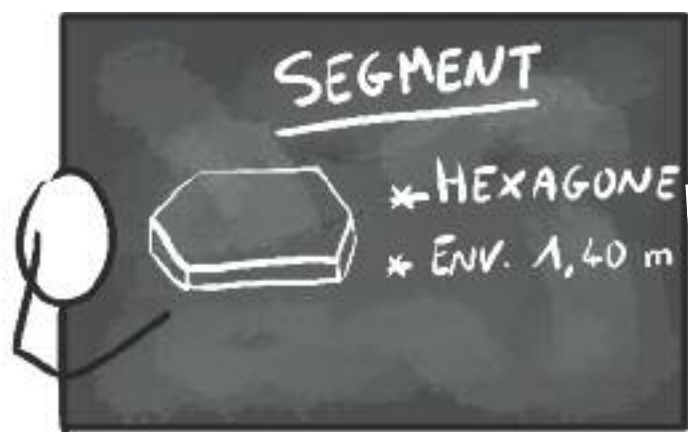
– J'ai compris, dit la jeune thésarde.

Mais alors, quelle solution avez-vous apportée à ce problème ?

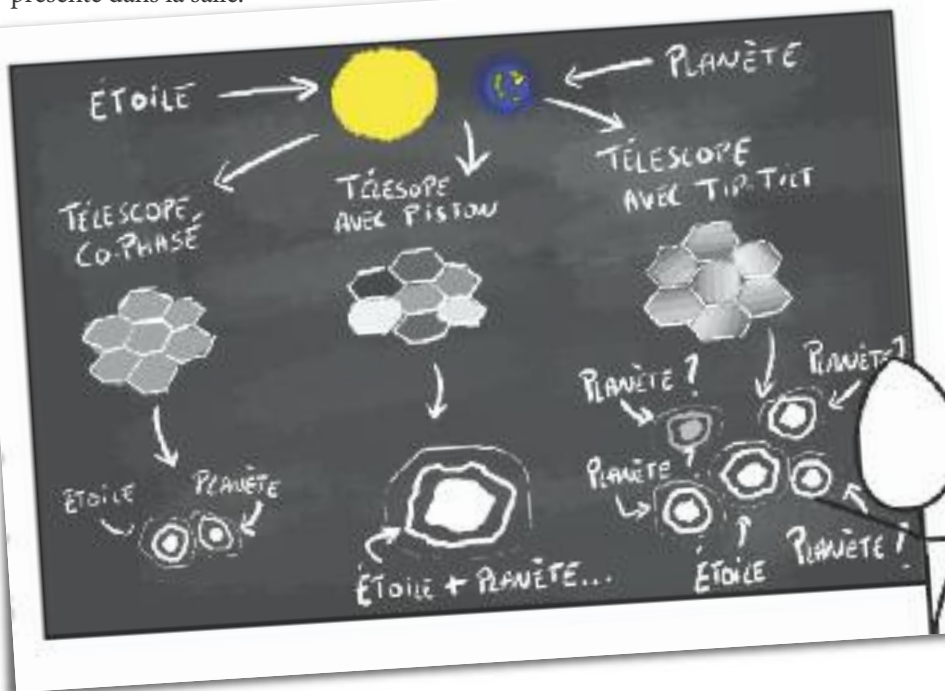
– Eh bien ! si l'on ne pouvait pas le construire d'un seul morceau, pourquoi ne pas faire plein de petits miroirs que l'on imbriquerait ensuite pour en faire naître un seul et unique, aussi grand que l'on voulait ? »

Sur ces mots, Astor laisse alors planer le silence sur son auditoire avant de reprendre le cours de son exposé :

« C'est évidemment le choix que nous avons fait ! Et pour cela, nous nous sommes décidés à construire, pour l'Extremely Large Telescope, 798 segments hexagonaux chacun d'environ 1,40 mètre de pointe à pointe : mes petites briques Lego, comme je me plais à les appeler. Et de ces petites briques, que nous assemblerions alors, naîtrait un télescope segmenté, que je nomme souvent pupille par déformation professionnelle, un peu comme celle de notre œil ! » Astor prend sa craie et dessine au tableau un modèle réduit d'une pupille segmentée.



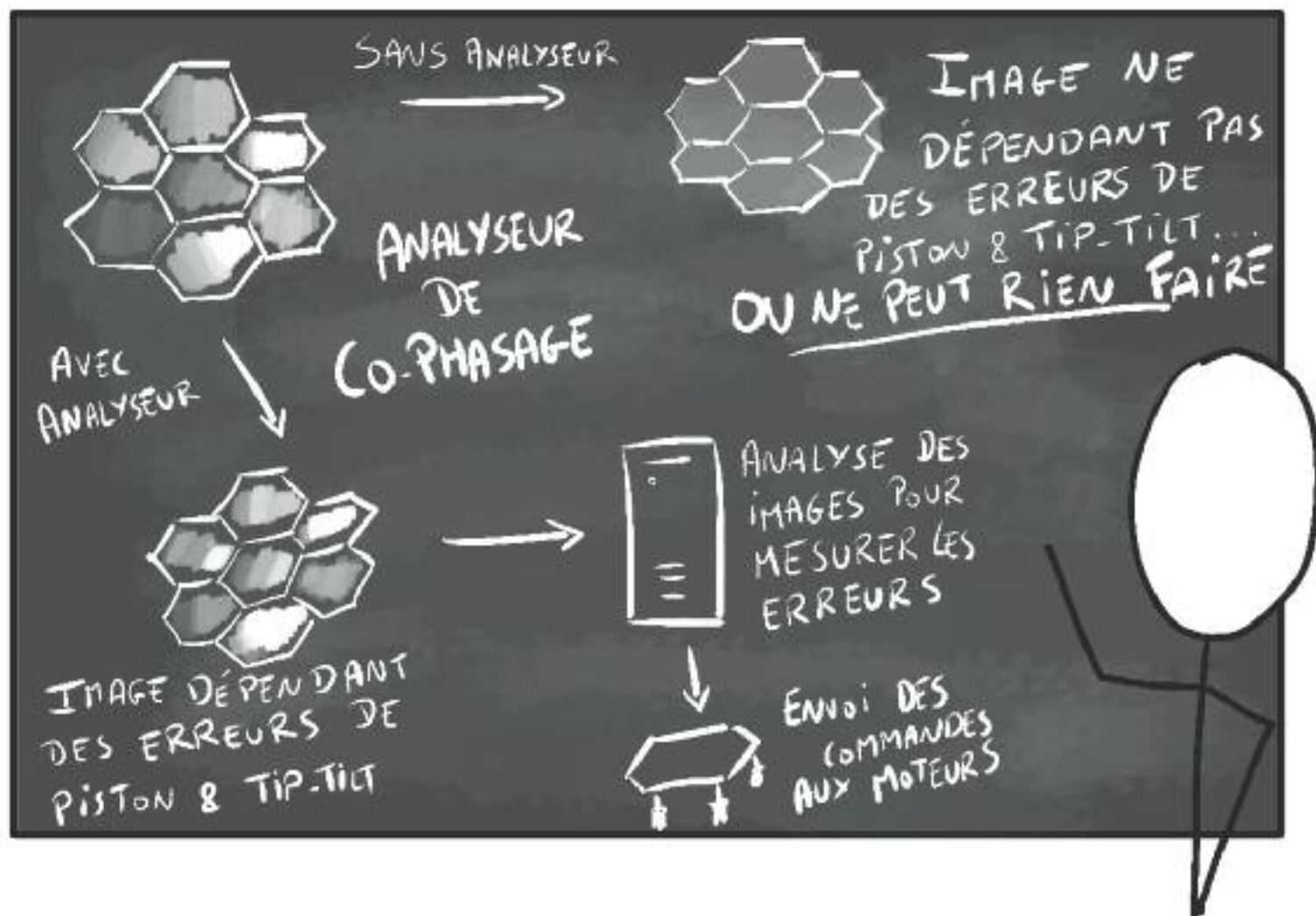
« Mais que vient faire le cophasage dont vous nous parliez tout à l'heure dans tout ça ? La question est ainsi réglée non ? demande une journaliste présente dans la salle.



– Malheureusement non, les plus gros obstacles sont à venir. En fait, lorsqu'on assemble toutes ces briques, il est nécessaire de le faire de manière très précise, afin de reproduire un télescope semblable à celui que l'on obtiendrait si on le construisait d'un seul tenant. Chaque segment possède trois possibilités de se mouvoir dans l'espace ; nous les appelons communément les degrés de liberté. Un segment peut donc se déplacer verticalement en suivant un chemin rectiligne de haut en bas, c'est ce que l'on appelle le piston. Mais il peut également effectuer une rotation selon les deux axes contenus dans le plan de sa surface, c'est ce que l'on appelle le tip et le tilt, dit Astor en dessinant sur le tableau avant de continuer son monologue. Et si quelqu'un venait à avoir la mauvaise idée de laisser le télescope sans avoir contrôlé chacun de ses segments, je ne lui prédirais pas de très bons résultats ! En fait, la conséquence des erreurs de piston est de dégrader la résolution intrinsèque du télescope. Vous souvenez-vous lorsque je vous ai parlé d'observer deux objets très proches dans le ciel ? demande Astor, et bien la résolution d'un télescope dont les segments seraient sujets à de forts pistons est équivalente à celle d'un télescope qui ne serait formé que d'un seul de ces segments... Dommage d'avoir construit 797 miroirs hexagonaux qui ne serviront plus à rien [1] n'est-ce pas ? Finalement, mes amis, lorsque les segments sont soumis à du tip-tilt et que l'on observe une étoile qui possède un seul compagnon, on peut voir apparaître sur l'image des artefacts ressemblant comme deux gouttes d'eau à ce qui pourrait être le signal d'une ou plusieurs autres planètes... Il serait fâcheux d'annoncer une découverte qui n'en serait pas une, n'est-ce pas ? conclut finalement Astor.

– Oui, mais maintenant nous savons que vous avez la solution ! Quelle est-elle ? Par pitié délivrez-nous de notre candeur ! s'exclame un homme resté silencieux jusque-là.

– Bien, bien, j'y viens, répond Astor. A-NA-LY-SEUR DE CO-PHA-SA-GE, épelle-t-il alors tout en écrivant au tableau. Ne vous inquiétez surtout pas, sous ces mots qui peuvent vous paraître effrayants, il ne se cache en fait que de gentils outils développés pour corriger les erreurs d'alignements dont nous avons parlé tout à l'heure.



En fait, nous nous servons de la lumière pour faire les mesures. Les précisions que nous souhaitons atteindre sont tout de même de l'ordre de la dizaine de fois la taille d'un atome... Cela équivaut à des distances de quelques nanomètres. S'agissant de l'étape de correction de ces erreurs, chaque segment du télescope possède des moteurs de haute précision afin qu'ils puissent se positionner à l'endroit que nous souhaitons. Enfin, plutôt à l'endroit auquel nos analyseurs de cophasage nous ordonnent de les mettre ! s'exclame en rigolant Astor. Et nous répétons ensuite ce processus régulièrement entre les observations – voire durant celles-ci –, afin de garder ces erreurs de cophasage en dessous d'un certain seuil qui nous permet d'être sûrs de ne pas être gênés au cours de nos observations.

– Mais Astor, demande alors la jeune thésarde, quel était exactement votre travail durant votre thèse ? Je suis très curieuse !

– Eh bien, lors de ma thèse, j'ai fait ce que l'on nomme grossièrement des simulations numériques. Cela consiste à reproduire par ordinateur les effets physiques produits sur les images par les erreurs d'alignement des segments, et ce dans le but de développer des méthodes qui permettent de les mesurer et de les corriger. J'ai développé à cette époque deux analyseurs de cophasage : l'un nommé SCC-PS et l'autre ZELDA-PS, le PS voulant dire Phasing Sensor. Somme toute, deux acronymes rigolos pour désigner deux analyseurs très différents. Je vous invite à regarder le poster que j'ai fait il y a quelques années et qui se trouve au fond de la salle (voir encadré).

– Les simulations numériques, c'est bien beau ! renchérit l'éminent planétologue, mais ce n'est pas concret, voyons.

Astor réengage le processus de cophasage du télescope et sous yeux ébahis de l'assemblée, l'exoplanète fait une entrée triomphale.

– Vous avez entièrement raison, mon cher monsieur, mais comme je le dis toujours, mieux vaut s'apercevoir des problèmes devant son ordinateur que devant son télescope ! Et même en procédant de la sorte, sachez qu'il y a encore nombre de petits détails à régler avant de pouvoir faire les premières observations.

– Mais alors, vos deux analyseurs fonctionnent vraiment ? demande la jeune thésarde.

– Eh bien, j'ai eu l'occasion de tester le premier – la SCC-PS – sur un banc d'optique au laboratoire Lagrange de Nice, dans l'équipe SPEED.

– Quel super nom ! lance en rigolant un technicien.

– Je ne vous le fais pas dire, répond Astor en souriant, avant de poursuivre son explication. J'ai finalement réussi, à la fin de ma thèse, en utilisant un modèle réduit de l'ELT composé « seulement » de 169 segments, à reproduire les résultats que j'avais obtenus à l'aide de mes simulations numériques. Ce travail marquait alors le top-départ de l'intégration expérimentale des techniques de cophasage qui allaient être utilisées sur le banc d'essai de l'équipe. Nous connaissons tous le succès qu'a eu ensuite ce projet et les connaissances techniques nécessaires au déploiement d'un instrument tel que l'ELT qu'il nous a apportées.

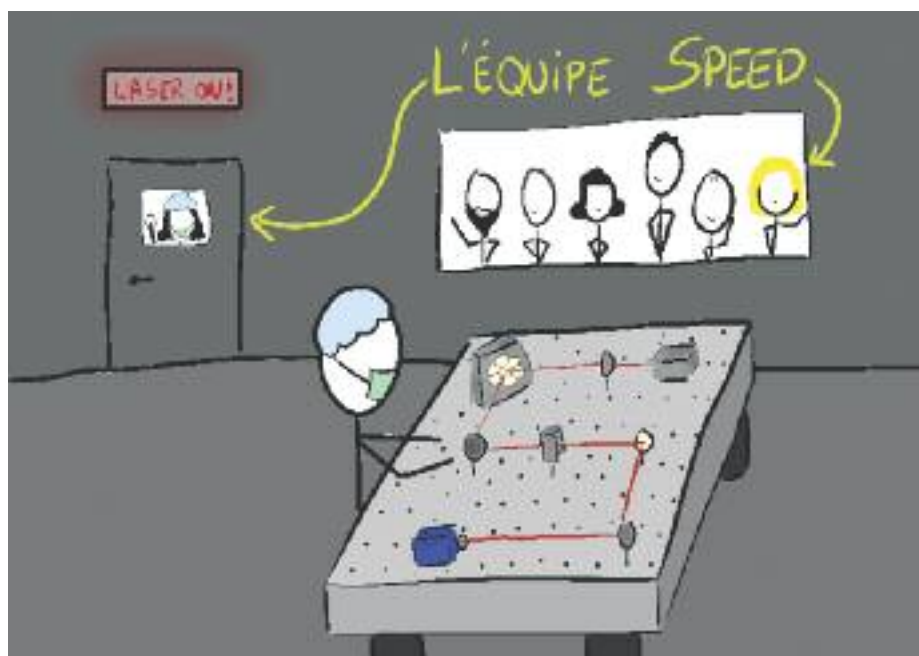
– Ça, c'est sûr ! Sans vous, nous n'aurions pas eu d'aussi belles images ! s'exclame le planétologue avant de conclure. Mes amis, je pense qu'il est l'heure de remercier Astor pour ces explications et de retourner à nos occupations. La recherche de la vie extra-terrestre n'attend pas ! »

Astor réengage alors le processus de cophasage du télescope, et sous les yeux ébahis de toute l'assemblée, l'exoplanète tant attendue fait une entrée triomphale ! ■

[1] Cette affirmation n'est pas tout à fait juste, pardonnons-le à ce brave Astor, puisque le pouvoir collecteur du télescope, c'est-à-dire la quantité de lumière qu'il capte, est toujours celui d'un miroir de 40 mètres de diamètre.

[2] Étoile guide artificielle créée en excitant grâce à un puissant laser les couches d'atomes de sodium présentes dans la mésosphère.

[3] Une vidéo montrant l'image obtenue avec la SCC-PS lors de l'actionnement en piston, tip et tilt de chacun des segments du miroir segmenté du banc SPEED peut être visionnée à l'adresse suivante : <https://youtu.be/rNCPVtpNj6o>

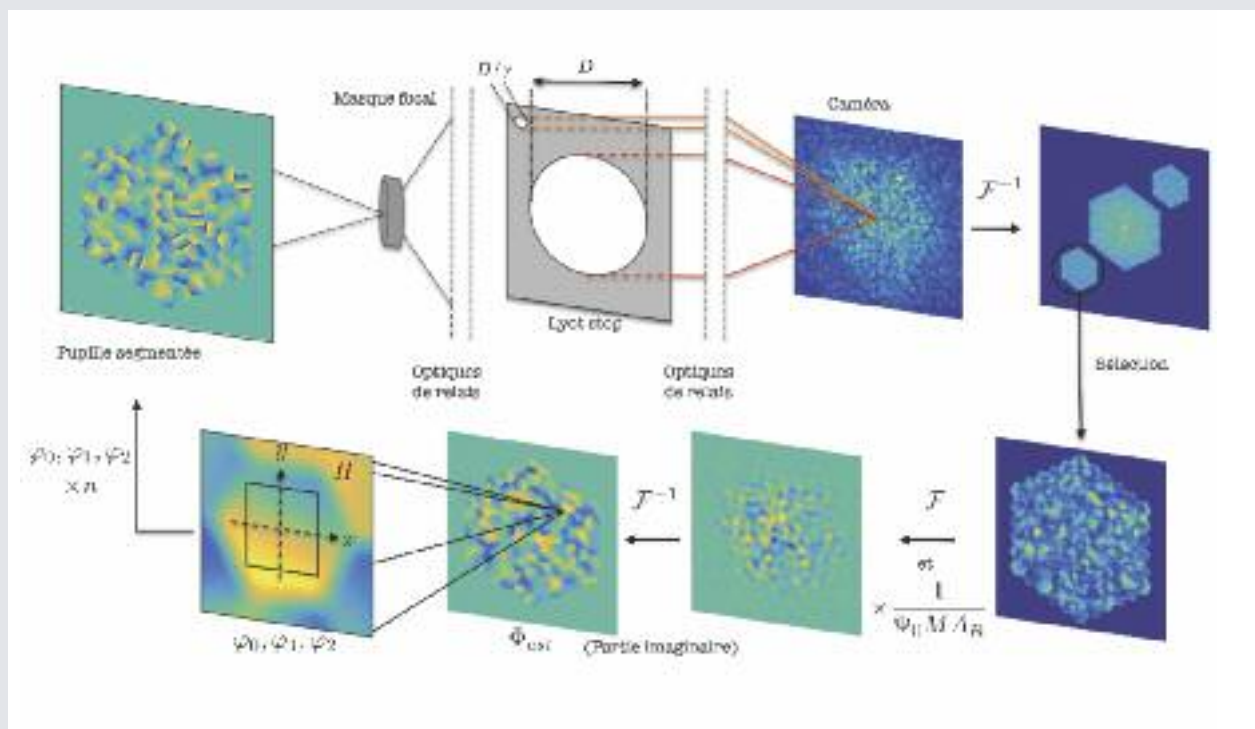


L'IDEE DE FABRIQUER DES TÉLESCOPES SEGMENTÉS N'EST PAS NOUVELLE

Plusieurs télescopes en fonctionnement sont d'ailleurs construits de cette manière. On peut notamment citer les télescopes Keck I et Keck II, situés sur le mont Mauna Kea à Hawaï, véritables pionniers en la matière. Avec leurs 10 mètres d'envergure et leurs 36 segments chacun, ils scrutent le ciel depuis le milieu des années 1990. Plus récemment, au milieu des années 2000, ont vu le jour des télescopes comme le Gran Telescopio Canarias, à la Palma, sur les îles Canaries, ou le Southern African Large Telescope, dans le désert du Kalahari, en Afrique du Sud.

Le cophasage va de pair avec les télescopes segmentés et permet de corriger les défauts d'alignement de chacun des segments afin de limiter les effets de diffraction que ceux-ci introduisent. En effet, pour un télescope non cophasé, chacun des segments modifie localement la phase du front d'onde, ce qui produit sur l'image des petites taches nommées tavelures (speckles en anglais), dégradant ainsi sa qualité. Le premier système de cophasage fut mis en place sur les télescopes Keck en adaptant des méthodes déjà connues de mesure de phase, notamment une méthode dénommée analyseur Shack-Hartmann. Les précisions de cophasage obtenues, ainsi que l'applicabilité à des télescopes composés d'un plus grand nombre de segments, constituent les principales limitations de telles techniques. Dans le cadre des futurs projets de très grands télescopes segmentés, dont le nombre de segments va augmenter de manière considérable (jusqu'à 798 pour l'Extremely Large Telescope), il est nécessaire de proposer de nouvelles méthodes de cophasage.

Les deux analyseurs de cophasage présentés rapidement par Astor permettent de remonter aux informations de piston et tip-tilt pour chacun des segments, et ce pour toutes configurations de télescopes segmentés. Les mesures obtenues peuvent atteindre des précisions sub-nanométriques (un millionième de millimètre), qui permettront notamment de garantir une qualité d'image optimale lors des observations les plus exigeantes – l'imagerie directe d'exoplanètes.



1. Schéma de principe de la SCC-PS. On retrouve de la pupille segmentée à la caméra un système coronagraphique classique. La partie située après la caméra correspond à un traitement numérique de l'image pour déduire les erreurs de cophasage.

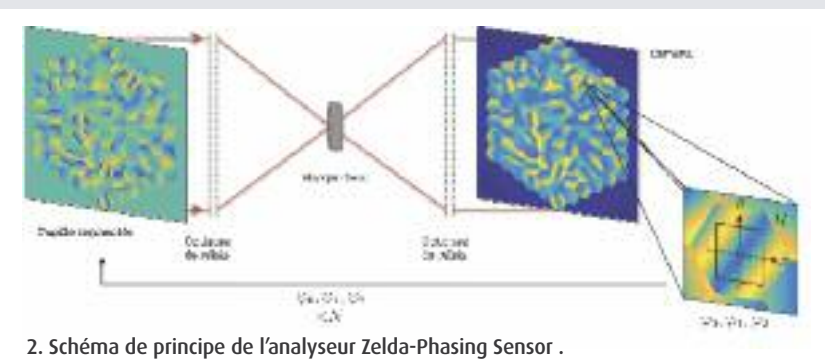
La Self-Coherent Camera-Phasing Sensor (SCC-PS, voir figure 1) effectue sa mesure derrière un coronographe (masque focal qui occulte la lumière de l'étoile afin d'observer son ou ses compagnons), et ce directement sur l'image scientifique prise sur la caméra. Grâce à une série de traitements d'images, la phase est retrouvée. Cette méthode permet donc un suivi en direct des erreurs de cophasage. Le « défaut » de la SCC-PS est la magnitude limite de l'étoile guide avec laquelle elle peut travailler. En effet, le coronographe rejette une majeure partie de la lumière de l'étoile et nous fait perdre de précieux photons.

L'analyseur Zelda-Phasing Sensor (voir figure 2, ci-dessous) est un analyseur placé dans ce que l'on nomme un plan pupille.

Le plan pupille, c'est en fait le miroir primaire du télescope ré-imagé plus loin dans le système. Dans le plan focal du télescope, on place un dispositif, dénommé masque de Zernike, permettant de transformer les variations de phase dans la pupille en variation d'intensité. Les variations d'intensité, contrairement à celles de la phase de l'onde, sont facilement mesurables avec une caméra. Avec Zelda-PS, tous les photons peuvent être utilisés, ce qui permet de faire du cophasage sur des étoiles guides moins brillantes. Cependant, pour fonctionner, cet analyseur doit avoir sa voie dédiée et grappiller quelques photons qui feront alors défaut aux observations scientifiques. On

ne peut pas être gagnant sur tous les plans ! On pourrait néanmoins penser à utiliser une étoile guide laser [2] comme cela est fait en optique adaptative, mais dans le cas d'un ELT, celle-ci ne serait plus un point source supposé situé à l'infini, mais bien, pour ce télescope capable d'analyser des détails très fins, un objet résolu et étendu. Et la stratégie à adopter dans ces conditions reste encore à étudier.

Comme le souligne le planétologue, les simulations numériques ne constituent que la première étape du chemin vers un système de cophasage opérationnel sur le ciel. La seconde étape est généralement un test en laboratoire. Le banc SPEED de Nice propose un cadre de recherche et développement pour l'imagerie à haut contraste dans un environnement de type ELT. À l'aide d'un modèle réduit de télescope segmenté, des mesures telle celle de la réponse du système au piston et tip-tilt ont pu être effectuées et comparées aux résultats obtenus en simulation [3]. L'étape suivante est de cophaser cette reproduction de l'ELT et de mesurer les performances de la correction obtenue. ■



2. Schéma de principe de l'analyseur Zelda-Phasing Sensor .