

## CAMPAGNE 2019

Après la campagne 2018 et la saison de travail à Calern en hiver et au printemps 2018/2019, le programme d'essais et d'observations sur l'étoile brillante Vega a été repris dans le vallon de la Moutière, à 2100m d'altitude, pendant l'été 2019.

Ceci a été possible par le renouvellement de l'autorisation de tendre le câble porteur en travers du vallon, qui a fait l'objet de l'autorisation annuelle de la DGAC et de celle de la direction de la circulation aérienne militaire. Pour mémoire la convention avec le Parc du Mercantour a fait l'objet d'un renouvellement pour 3 ans en 2018 (du 1<sup>er</sup> juillet 2018 au 1<sup>er</sup> novembre 2020).

Durant l'hiver et le printemps, les divers éléments de l'Hypertelescope ont subi des modifications et améliorations sur le site de Calern à l'OCA.

Il s'est agi essentiellement:

- d'améliorer le contrôle du mouvement des miroirs M1 par
  - une intégration logicielle des commandes d'orientation par action sur les trois vis micrométriques motorisées (la livraison de ce dispositif en 2018 n'avait eu lieu que quelques semaines avant le départ à la Moutière, ce qui n'avait pas permis de faire suffisamment de tests),
  - le développement et la mise au point de scan automatique autour d'une position pour pouvoir chercher l'étoile quand on approche de la bonne position du miroir,
- de modifier radicalement le viseur étoile nacelle,
  - en passant du système utilisé jusque là, où le petit télescope du viseur suivait la nacelle (mouvement quasi anti sidéral mais pas tout à fait) et récupérait l'image de Vega réfléchi par le miroir M1
  - à un nouvel arrangement où le petit télescope suit Vega (mouvement sidéral) et récupère maintenant l'image de la nacelle réfléchi par le miroir M1. Cette disposition a de nombreux avantages optiques et simplifie l'entraînement devenu sidéral donc.

Dans ces conditions le lien entre le miroir M1 et la nacelle se fait grâce au laser vert embarqué dans la nacelle, qui doit illuminer les deux miroirs M1 grâce à la fois au bon positionnement géométrique de la nacelle et à sa bonne orientation, ainsi qu'aux LEDs blanches installées sur la périphérie des deux miroirs M1.

- de mettre en place, dans l'ancien laboratoire optique du GI2T que l'OCA nous a autorisés à utiliser, un dispositif de test à plat, avec montage optique complexe permettant de simuler la nacelle suspendue à 101 m au dessus du miroir M1 Nord.



Figure 1 Vallon de la Moutière



Figure 2 Calern. Dispositif de test à plat.1



Figure 3 Calern. Dispositif de test à plat.2

- de réaliser des tests de mise en œuvre et de contrôle de ces améliorations (contrôle du miroir et nouvel arrangement du viseur), grâce à ce montage à plat, qui ont permis :
  - de vérifier l'effet du scan automatique du miroir
  - de déterminer le nombre de pas des moteurs des vis micrométriques nécessaires pour traverser la fenêtre d'entrée de la nacelle suspendu à 101m au-dessus (les proportions du montage de Calern ont bien été vérifiées à la Moutière)
  - grâce à la mise en place de lasers appropriés, d'obtenir des images représentatives, dans le viseur étoile nacelle, des positions de Vega vue en direct par le petit télescope et de la nacelle réfléchi par le miroir M1, quand la caméra Mako embarquée dans la nacelle recevait le laser correspondant au faisceau réfléchi sur le miroir M1. En théorie, les deux images dans le viseur étoile nacelle devraient être superposées quand le miroir M1 est correctement orienté, en pratique elles ne le sont pas car le coin de cube du viseur n'est pas parfait. Le montage a permis d'étalonner cette erreur.



Figure 4 Calern. Tests. Poste de contrôle/commande



Figure 5 Tests. Laser rouge étoile

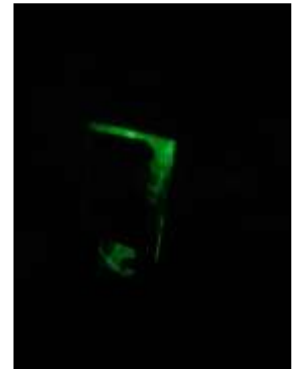


Figure 6 Tests. Laser vert nacelle

- d'améliorer le banc optique de la nacelle pour mieux répartir la lumière reçue entre les deux caméras embarquées. **Calern. Tests. poste de controle/commande**
- de définir et mettre en œuvre les moyens de visualisation et d'enregistrement des deux viseurs étoile nacelle (Nord et Sud)

Par ailleurs, une collaboration développée avec le Shanghai Astronomical Observatory a abouti à la production d'un logiciel élaboré par Xinyang Chen, venu quelques jours à Calern avec trois collègues, et qui prévoyait de revenir à la Moutière en Juillet, ce qui n'a malheureusement pas pu se faire pour des problèmes de visa. Ce logiciel permet de transmettre facilement au sol (via la liaison WiFi) les images des caméras embarquées dans la nacelle et fournit un certain nombre de fonctionnalités pour le traitement en temps réel.



La campagne a débuté le 15 juillet et s'est achevée le 21 septembre, avec une interruption de quatre semaines due aux disponibilités des uns et des autres.

Durant 5 semaines 11 personnes (dont une qui a rejoint l'équipe cette année et un stagiaire de l'OCA) se sont relayées sur le site, avec la présence quasi permanente d'Antoine Labeyrie, Denis Mourard et Roger Croix.

La première équipe (six les trois premiers jours, puis huit ensuite, cinq au minimum, incluant deux personnels techniques de l'OCA en mission pour le projet) a ramené le 15 juillet le matériel qui était à Calern depuis la campagne 2018, avec le pickup de l'OCA.



Figure 11 Chargement du matériel à Calern



Figure 12 Le pick up de l'OCA prêt au départ

Elle a aussi récupéré et transporté à la Moutière le matériel stocké à Bayasse, essentiellement les tentes, abris et atelier, et leur mobilier. Tout le matériel a été déployé et installé la première semaine. Le matériel Nordnet 2019 est mis en place et en service sans difficulté, le site a un contact avec le monde extérieur via la liaison satellite, téléphone et internet.

Les posters du panneau d'information sur le bord du chemin sont mis à jour. Comme l'an dernier, un abri démontable (tente barnum) a été mis en place au point Canaveral. Les toilettes sèches ont été installées. Le treuil principal, stocké à Bayasse l'hiver dernier, a été remis en fonctionnement. Les trois tronçons du câble porteur ont été déroulés après intervention des grimpeurs dans les éboulis adret et ubac pour l'accrochage à l'ancrage Sud et le passage dans la poulie de l'ancrage Nord, restée à poste depuis la campagne 2018. Les cablettes de la nacelle ont été déroulées et raccordées. Le câble porteur a été équipé de trois avertisseurs lumineux, les feux rouges des ancrages Nord et Sud ont été vérifiés et remis en service.

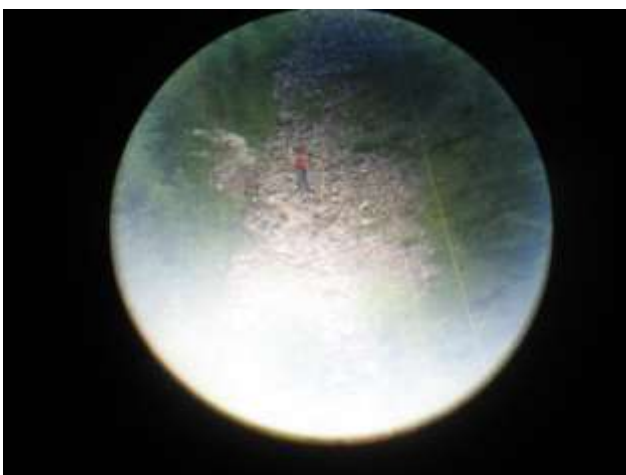


Figure 13 Depuis le tipi on vérifie que tout se passe bien dans l'éboulis Sud



Figure 14 Le câble porteur et un jeu d'avertisseur



Figure 16 La nacelle est prête à prendre son envol



Figure 15 Le câble porteur en cours d'installation



Figure 17 Derniers préparatifs pour les toilettes sèches



Figure 18 Il y a toujours la flore à regarder

Le samedi 20 juillet, la première montée de la nacelle a été entamée, elle a été achevée le lendemain. Comme d'habitude, cette première montée est difficile car le câble, posé au sol, doit franchir les branches de mélèzes à rebrousse poil en s'élevant. De plus, le câble, déroulé au sol, n'est pas aligné de façon impeccable avec sa position en l'air et les « zigzags » sont autant de points d'accroche sur les mélèzes. Dimanche soir et lundi soir, nous avons pu mettre la nacelle en suivi et très facilement apprendre à utiliser le nouveau viseur (ETX sur Vega et coin de cube sur nacelle). Le résultat est extrêmement satisfaisant avec une facilité déconcertante du réglage du M1 (avec les vis micrométriques motorisées) et une stabilité remarquable du suivi de la nacelle (laser vert) qui permet d'avoir pendant de très longues périodes un écart relatif Nacelle/Vega très stable. Une caméra ATIK a été installée derrière l'ETX, ses images (une image par seconde) sont visualisées sur un moniteur dédié.



Figure 19 Abri démontable à Canaveral



Figure 20 Viseurs mi base



Figure 21 Viseur Nord en cours d'installation



Figure 22 Viseur Sud



Figure 23 Caméra ATIK montée sur viseur Nord



Figure 24 Vega dans Viseur Nord

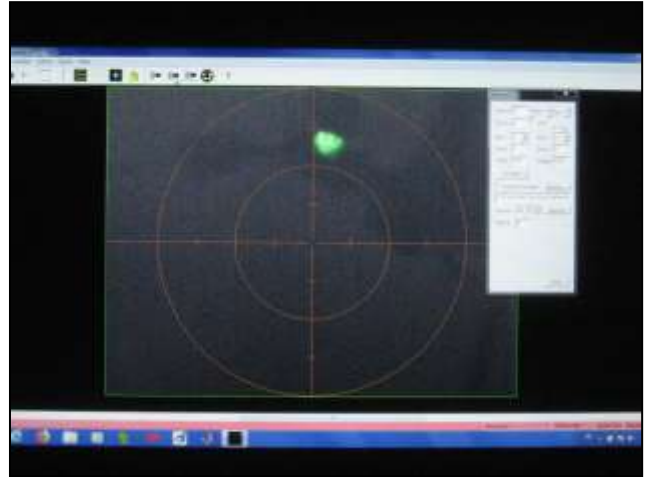


Figure 25 Laser vert nacelle dans Viseur Nord



Figure 26 Vega et laser vert dans Viseur Nord, le laser se déplace dans le viseur avec le positionnement du miroir

Mardi, l'humidité et les problèmes caméras ne nous ont pas permis d'observer. Nous avons du redescendre la nacelle le mercredi suite à l'identification pénible d'un problème qui nous empêchait d'avoir la vidéo des caméras nacelles. Il s'est avéré que le câble réseau antenne de la nacelle était écrasé par une cablette Sud passée au mauvais endroit. Nous en avons profité pour renforcer les poulies des cablettes du ravitailleur, qui était très dur à remonter.



Figure 27 Nacelle et ravitailleur. Manoeuvres du ravitailleur de batteries.



Figure 28 Descente de la nacelle



Figure 29 Examen et réparation

Mercredi, après la descente et la remontée, nous n'avons pas eu le temps de tester correctement l'entraînement nacelle et un problème de contrepoids Est nous a gêné toute la nuit.

Jeudi enfin nous avons pu de nouveau observer avec un bon suivi nacelle et nous nous sommes donc retrouvés enfin en situation de chercher l'injection de l'image de Vega par le M1 Nord dans la nacelle (contrôlé par la caméra Mako embarquée) mais nous n'y sommes pas parvenus.

La journée suivante est occupée à descendre le câble au sol, démonter et mettre en sécurité le matériel pour la période d'interruption comme nous l'a demandé le Parc National du Mercantour pour la période d'absence sur le site.

Après l'interruption, le matériel est réinstallé la dernière semaine d'août, avec peu de monde, ce qui a pris du temps.

Durant cette interruption, une solution a été trouvée pour remplacer la caméra des viseurs étoiles nacelle par de petits appareils photos qui peuvent produire une vidéo, ce qui élimine l'inconvénient d'une image par seconde produite auparavant par la caméra en juillet. De plus des LED ont été réinstallées (comme en 2018) près du miroir M1 Nord pour aider à pointer la caméra Mako de la nacelle.

La nuit du 4 septembre, un objet très lumineux a traversé le champ de la Mako, malheureusement l'enregistrement n'était pas lancé.

Suivent 3 soirées difficiles (météo et/ou matériel) où, malgré une bonne image dans le viseur étoile nacelle et des scans avec les vis micrométriques du miroir M1 Nord, il n'a pas été possible d'acquérir Vega dans la Mako.

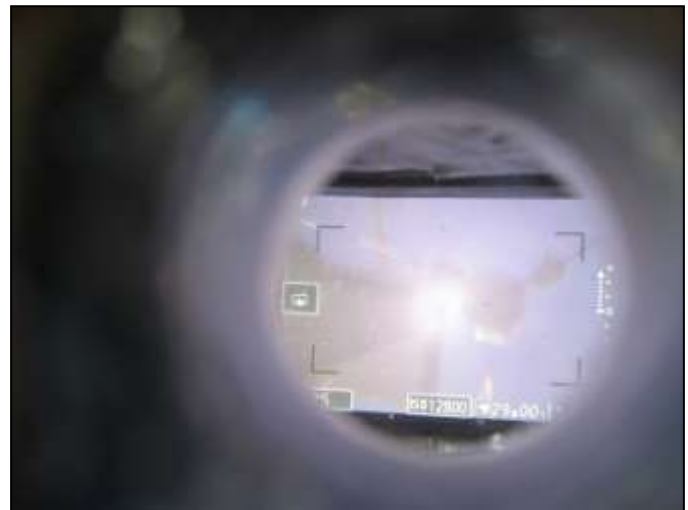


Figure 30 Le viseur mi base "-30", réglé lors d'une nuit précédente, permet de positionner la nacelle au point de démarrage du suivi



Figure 31 Dernière vérification de la position et de l'orientation de la nacelle avec le C8



Figure 32 Les deux ordinateurs de pilotage de l'opération et de visualisation des caméras de la nacelle. A l'extérieur, le moniteur de visualisation de la caméra du viseur Nord

Enfin, le 8 septembre, après une préparation très minutieuse du positionnement (et de la hauteur) de la nacelle, du réglage du laser vert de la nacelle pour illuminer au mieux le miroir M1 Nord, et de l'alignement

de la nacelle pour voir les LED du M1 Nord dans la caméra Mako, on acquiert assez facilement Vega dans la nacelle (image dans la Mako) en pilotant les vis micrométriques du miroir M1 Nord. On la garde ainsi pendant 25 minutes, en éteignant les LED du M1 quand on a eu suffisamment confiance dans le suivi, ce qui permet d'avoir une image (caméra Mako) de Vega ainsi que de la pupille (image du miroir M1 éclairé par Vega).



Figure 33 Vega dans Visneur Nord



Figure 34 Vega et laser vert nacelle dans Visneur Nord

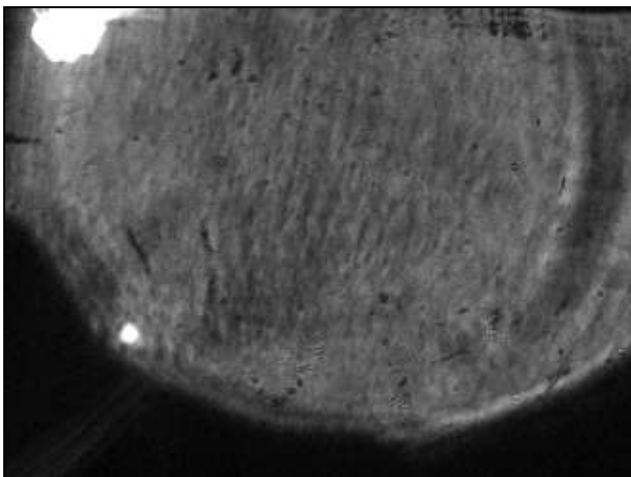


Figure 35 Vega dans caméra Mako de la nacelle, LED du miroir Nord allumées



Figure 36 Vega dans caméra Mako de la nacelle, LED du miroir Nord éteintes

Les nuits suivantes, à part quelques mauvaises météo, l'acquisition de Vega s'est faite dans les mêmes conditions et le suivi a duré avec des séquences de 10 minutes à 30 minutes.

L'acquisition de Vega dans la caméra science de la nacelle s'est révélée plus ardue que prévue, probablement lié à un souci d'alignement du banc et à un mauvais repérage du point de fonctionnement lors des essais à Calern.

Malgré de nombreux essais, il n'a pas été possible d'obtenir la deuxième image de Vega réfléchi par le miroir Sud lors des dernières nuits du fait de l'absence de motorisation de la lunette d'alignement au Sud, des défauts mal étalonnés du coin de cube de pré-alignement, et des difficultés de transfert des images de la caméra de la lunette Sud vers le centre de contrôle. Les essais de parabolisation active sur les motorisations des M1 ont montré qu'il était nécessaire de poursuivre d'abord les tests en laboratoire.



Figure 37 Va-t-on pouvoir observer ce soir?



Figure 38 On peut toujours observer autre chose



Figure 39 Vues de la nacelle à poste

C'est donc une grande étape qui vient d'être atteinte grâce aux efforts de tous depuis de nombreuses années et à l'aide précieuse de tous ceux qui sont venus sur site cet été. Nous avons beaucoup à apprendre encore des données enregistrées, et leur dépouillement et analyse sera un travail à réaliser dans les semaines à venir. Les premières analyses montrent déjà une stabilité, sur des séquences de 30s environ, meilleure que la turbulence atmosphérique. Il est clair cependant que la complexité du contrôle d'ensemble de l'expérience nécessite de pousser encore plus loin les automatismes et asservissements vidéo par exemple.

Le démontage s'est effectué en deux journées, à cinq personnes. Le site a été libéré le 21 septembre après rangement et nettoyage. Une partie du matériel a été stockée à Bayasse, l'autre a été ramenée à Calern grâce au pickup de l'OCA et à une nouvelle mission des deux personnels techniques de l'OCA. Comme l'an dernier nous avons laissé sur place le tronçon haut ubac du câble au sol. Il descend de son attache au 2/3 de

la hauteur du couloir jusqu'au point Sud et a été arrimé en rive droite du couloir au sol, à la base des petits mélèzes de façon à le protéger des descentes de pierre dans le couloir. Ceci permettra de remettre plus facilement en position le câble porteur l'an prochain.

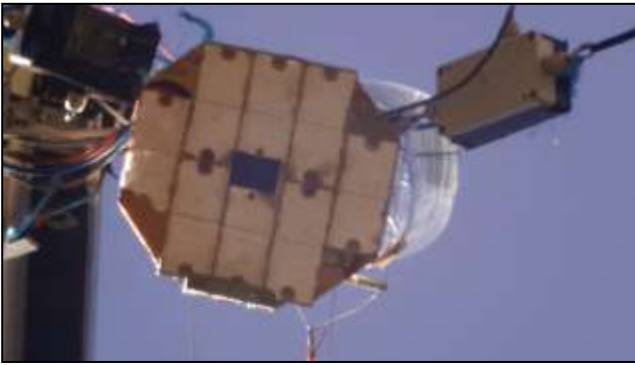


Figure 40 Le C8 permet de voir le trou d'entrée de la nacelle



Figure 41 On oriente la nacelle pour que le laser vert illumine le miroir Nord



Figure 42 LED rouges autour du trou d'entrée de la nacelle



Figure 43 LED rouges et laser vert allumés

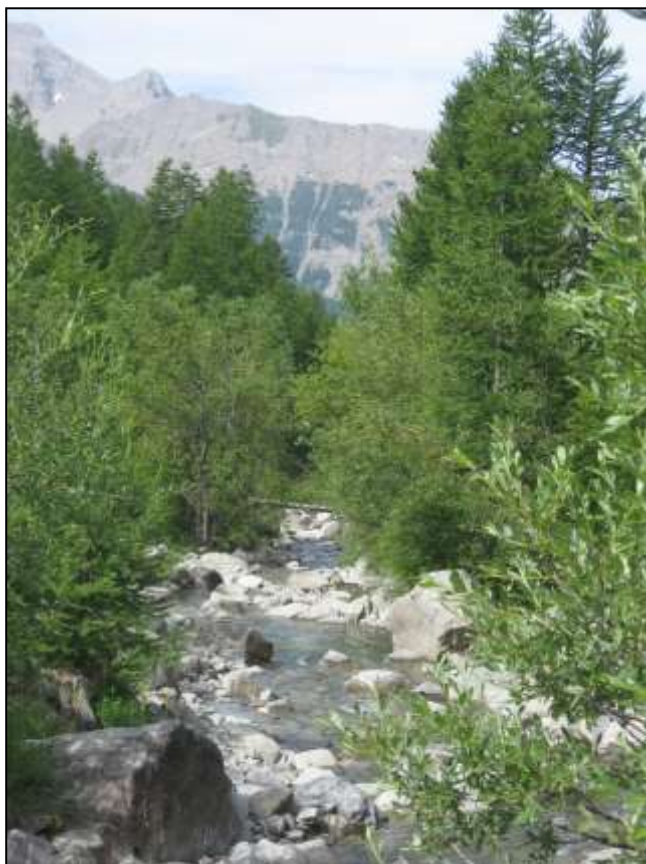


Figure 44 La passerelle supporte vaillamment le poids des ans



Figure 45 La nacelle ne craint pas la neige



Figure 46 Temps bouché



Figure 47 Mais ça ne dure pas

### **Evolution du projet à la Moutière**

La campagne 2019 a permis pour la première fois d'acquérir Vega dans la nacelle pendant des périodes de quelques dizaines de minutes. Elle a confirmé la bonne maîtrise du mouvement et de l'orientation de la nacelle pour suivre l'étoile au cours de son observation, et la capacité d'orienter correctement et rapidement le miroir M1 Nord.

Elle a mis en évidence, par les vidéos enregistrées depuis la nacelle, une oscillation de la nacelle dans le sens Est/Ouest 3 fois plus importante que dans le sens Nord/Sud très certainement liée à l'entraînement par les moteurs Est et Ouest et l'interaction sur les contrepoids. Les corrections Nord/Sud effectuées par l'action des moteurs Sud entraînent également des à coup, que nous pourrions certainement diminuer par un mode de fonctionnement plus adapté de ces moteurs.

L'acquisition de Vega par la caméra science de la nacelle reste à obtenir, il faut trouver les causes de l'insuccès de cette année et y apporter des remèdes.

Il reste encore des améliorations à apporter au fonctionnement du viseur étoile nacelle et il faut acquérir simultanément les deux miroirs M1 Nord et Sud.

La poursuite des tests à la Moutière reste donc d'actualité.

L'optique focale définitive, dite " $N > 2$ " car elle doit permettre d'exploiter une centaine de miroirs ou plus, partiellement construite, n'a fait l'objet en 2019 que d'essais en laboratoire. Le travail de construction continue en parallèle avec le perfectionnement du modèle optique Zemax.

### **Journée "Enseignants-Chercheurs " à Barcelonnette**

A l'initiative du rectorat d'Aix-Marseille, nous avons renouvelé la rencontre Enseignants-Chercheurs le 24 mai 2019 au centre Séolane à Barcelonnette grâce à la participation d'Alain Grimaud, d'Antoine Labeyrie et de Denis Mourard. Nous avons également pu ouvrir cette journée aux astronomes amateurs de la région de Barcelonnette. Denis Mourard a donné une conférence sur place sur les grands développements en Astronomie aujourd'hui. Cette présentation a été suivie par un dialogue en visio-conférence avec le Professeur Antoine Labeyrie. La météo ne nous a pas permis de monter sur site, les rencontres se sont alors poursuivies au Centre Séolane sur des échanges directs entre Denis Mourard, Alain Grimaud et les participants.



**Association HYPERTÉLESCOPE LISE**  
 Laboratoire d'Interférométrie Stellaire et Exoplanétaire  
 Association loi 1901, reconnue d'intérêt général à caractère scientifique  
[hypertelescope.org](http://hypertelescope.org)

## Prototype d' Hypertélescope dans le Parc du Mercantour (Vallée de l'Ubaye)

Collaboration  
 Pro/Am avec :



COLLEGE  
 DE FRANCE



Observatoire  
 de Côte d'Azur



INSTITUT  
 d'OPTIQUE  
 CARNEGIE  
 ParisTech



Principe : Utiliser une vallée comme miroir dilué de télescope optique géant (54m extensible à 200m)

- Depuis sa première description théorique (Labeyrie 1996), le concept a fait l'objet de vérifications à l'échelle d'instruments miniatures, d'abord en laboratoire (Gillet et al.), puis sur le ciel (Pedretti et al.). Le concept est une extension des interféromètres de Fizeau et de Michelson, comportant des ouvertures nombreuses et un densifieur de pupille qui permet d'utiliser efficacement la lumière reçue d'une source compacte, même faiblement lumineuse.  
 - L'étape préliminaire d'un prototype terrestre en vraie grandeur est apparue utile pour démontrer la faisabilité à bas coût, par modularité et infrastructures légères respectant un environnement en zone naturelle protégée. Une opération de science citoyenne, avec une forte participation d'astronomes amateurs ayant des compétences en calcul optique, électronique, informatique et mécanique



Miroir M2 sol



Telemétrie Sol/nacelle



Antoine Labeyrie



Zoom sur Nacelle

- Des petits miroirs au sol (2 jusqu'à 10) séparés de 16 m (54 m possible, 200 m éventuellement). On parle donc de miroir géant dilué
- Une nacelle optique mobile recombinaison des faisceaux réfléchis par les miroirs au sol, suspendue 101 m au dessus des miroirs permet de suivre une étoile brillante au mm durant une heure
- Un câble kevlar long de 800 m ancré au sommet de l'éboulis Nord et Sud porte la nacelle optique
- Des cablottes kevlar, contre-poids variables et treuils asservis facilitent le contrôle de position de la nacelle
- Un tipi atelier et sa liaison satellite, des liaisons wifi multiples, des panneaux solaires permettent aux opérateurs de tester et observer d'un point central
- Un télescope à mi pente pour observer la position initiale de la nacelle vis-à-vis de points de repère dans la falaise, des viseurs à chaque miroir pour régler le pointage

- Contraintes :**
- Manip de terrain (pas de 220V sur place : installation solaire)
  - **Nacelle de recombinaison** des faisceaux à 101m de haut
  - Site protégé
  - **Nacelle de recombinaison** des faisceaux positionné au mm pendant le transit de l'étoile



Nacelle alignée par laser au cours d'un transit de l'étoile Visée



laser nacelle étoile erreur

### Un installation respectueuse du Parc Naturel du Mercantour

- Protection de l'avifaune (les oiseaux) avec un câble en l'air balisé jour et nuit pour les aigles, vautours, gypaètes, coq de bruyère, hibou grand duc ou fixé au fond du torrent quand la nacelle est baissée au sol pour les bergeronnettes des ruisseaux, cirque plongeur. Pas de drone.
- Protection des végétaux (aucun cheminement côté Parc, aucun arbre coupé)
- Borniers électriques et antennes wifi camo, tipi atelier kaki, toilettes sèches, zéro déchet, fourniture en énergie photovoltaïque, aucun feu, lumières de vie minimales, effectif faible
- Aide au ramassage d'anciens déchets avec Mountain Wilderness, recyclage aluminium pour nacelle
- « Green Science » et science citoyenne publique, logiciels libres



Une partie de l'équipe projet



Réglage de l'asservissement nacelle

Actuellement le laboratoire Lagrange de l'OCA (contact Denis Mourard), épaulé par une association loi 1901 reconnue d'intérêt général à caractère scientifique, Hypertélescope LISE, et différents autres labos sous convention (LOMA à Bordeaux, Institut d'Optique d'Orsay...), avec l'autorisation du Parc National du Mercantour, de l'Aviation Civile, du Ministère de la Défense, poursuit le projet en collaboration Pro-Am en été dans le parc du Mercantour et en hiver sur le plateau de Calern au G2T.  
 Donc une équipe mixte d'astronomes et chercheurs professionnels et de bénévoles jeunes ou moins jeunes, souvent ingénieurs mais parfois simples passionnés de toute nationalité (Chine, Inde, Algérie, Suisse...)