

Réunion « Imagerie à grand contraste »

Nice, 11-13 Mai 2016.

1. Contexte, objectif et contenu de la réunion

Cette réunion est un atelier national sur l'imagerie à très haute dynamique (ITHD) organisé par le conseil scientifique de l'ASHRA. Il réunit des acteurs de l'imagerie à grand contraste, des chercheurs et ingénieurs participant à la R&D amont nécessaire à ce mode d'observation, aux observateurs révélant des nouveaux objets ainsi observables et leur propriétés, les plus à mêmes les enjeux et les priorités des instruments du futurs, en passant par les développeurs d'instruments pour la communauté. La liste des participants est bien sûr non exhaustive mais représente les principaux instituts actifs sur ce domaine, permettant de porter la vision de chacun de ces instituts (avec un travail amont de synthèse) et de porter en retour les autres points de vue et les échanges. Les programmes nationaux de Planétologie et de Physique Stellaire sont informés et invités à participer. Leur point de vue est exprimé d'une part par la voix de participants observateurs issus des instituts, ainsi que es qualité par Alessandro Morbidelli pour le PNP.

En termes de contexte, cette réunion se situe après la mise en service de SPHERE qui a structuré pendant un temps long des efforts importants de notre communauté sur ce thème. Le succès des performances obtenues permet d'aborder les étapes suivantes, motivées par des motivations scientifiques riches et ambitieuses, jusqu'à des objectifs à long terme tels que l'imagerie à grand contraste sur l'E-ELT ou depuis l'espace. La communauté française est potentiellement bien placée du fait de ces succès et de l'expertise en présence, mais la diversité et la complexité des solutions à mettre en oeuvre pour les performances futures visées demande une coordination, et la définition d'une feuille de route commune.

Cet atelier est une première étape, avec en premier lieu (avant de chercher à aboutir à des conclusions fermes) l'échange d'information sur les pistes de recherches en cours, les échanges sur les priorités d'action à mettre séquence, l'analyse des points durs. En sortie doivent émerger les points d'accord clairs, à communiquer vers l'extérieur (instituts et agence) et aussi les possibles points divergents ou confus, devant être muris et clarifiés.

L'agenda inclut :

- Sur la première journée, un recensement de la vision des instituts
- A la suite de cette première journée, préparée de manière indépendante dans chaque institut, une analyse de thèmes stratégiques de discussion est identifiée. Ces points de discussions sont abordés de manière complémentaires dans deux groupes de travail distincts sur la deuxième journée.
- La dernière demi-journée consiste en une mise en commun synthétique de points essentiels émergents.

Participants : François Ménard, Alexis Carlotti, Gael Chauvin, Jean-Luc Beuzit, David Mouillet, Michel Tallon, Maud Langlois, Eric Thiébaud, Raphael Galicher, Pierre Baudoz, Gérard Rousset, Jean-François Sauvage, Laurent Mugnier, Thierry Fusco, Arthur Vigan, Marc Ferrari, Kjetil Dohlen, Patrice Martinez, Philippe Bério, Lyu Abé, Christophe Vérinaud, Alessandro Morbidelli

2. Point de vue des laboratoires

Chaque laboratoire a effectué un exercice de synthèse préalable à cet atelier, indiquant des éléments factuels sur ses activités, mais aussi un point de vue subjectif sur ses priorités (ou même éventuellement les éléments qu'il pense important que d'autres portent). Cette synthèse doit donc couvrir :

- Les actions de R&D amont en cours dans l'institut
- les participations à projets de réalisation d'instrument passées, en cours ou envisagées
- la vision prospective de l'institut sur cette thématique, en termes d'actions envisagées, de priorités et d'enjeux.

Elle est présentée successivement pour chaque laboratoire. Les présentations sont accessibles sur : <https://ashra.oca.eu/spip.php?rubrique335> . En outre, la perception du PNP des enjeux astrophysiques de cette approche observationnelle est également présentée.

Dans le cadre proposé, les éléments présentés spontanément par les différents instituts montrent à la fois :

- une grande cohérence sur l'analyse de enjeux prioritaires sur le moyen et long terme, et en particulier les principaux défis, et le besoin de procéder en développement par étapes successives
- une bonne complémentarité des pistes de R&D abordées, résultant en une large couverture très significative et visible au niveau international.

Les sujets les plus marqués, demandant éventuellement une reprise plus approfondie pour identifier les accords ou besoins de clarification sont identifiés et proposés à discussion pour le lendemain.

3. Discussions thématiques

Les thèmes suivants sont identifiés et motivent des discussions au sein de 2 groupes :

- **Cas scientifiques** pour les instruments futurs : priorités, étapes, inputs pour design dédié...
- **Instruments intermédiaires** : SPH upgrade (lesquels), PRIS2M, HC+HRS, ... (+ERIS, ScexAO+, ...), E-ELT 1e generation, ...
- **Objectifs plus long terme** (PCS, Colossus, + ?) : quoi, comment, quelle étapes, quelle science, quels pbs ? Positionnement international
- **Espace** : lien sol ? Prepa ? Opportunités ? Stratégie ?...
- **Les verrous** : sont-ils bien identifiés et bien attaqués ? (concept, composants, ...) dont senseur plan focal ? Senseur rapide ?

- **Moyens de demo** (labo, acces ciel) : complementarite, completude, collaborations, lisibilité
- **Science des données** : axes identifiés, comment, autres axes , moyens a mettre en oeuvre, enjeux, lien avec conception et instruments non parfaits

Les échanges sont riches, chaque point peut faire l'objet d'études approfondies. Sans être exhaustif, nous soulignons ici quelques idées fortes, ressortant le plus directement.

1. Motivations astrophysiques

Rapidement et facilement, la discussion met en avant un nombre important de motivations astrophysiques fortes, associées à des capacités observationnelles (« top level requirements ») d'ambition croissante, avec plusieurs étapes intermédiaires, pouvant motiver des instruments distincts, et jusqu'à des performances très hautes. On note en particulier, en comparaison par exemple aux capacités de SPHERE, comme référence :

- Intérêt de grands relevés plus profonds (à des séparations similaires : ≥ 200 mas) : révéler les planètes moins massives, et/ou autour d'étoiles moins jeunes, en plus grand nombre et donc avec davantage de statistiques. La bande d'observation L est très appropriée ici (et devrait être couverte par le futur instrument ERIS). Intérêt d'améliorer la capacité d'observation d'étoiles plus faibles, rouges.
- Intérêt d'aller à plus courte séparation < 200 mas (pour des contrastes similaires). Cela peut demander des développements de techniques spécifiques nouvelles (l'approche par rotation de champ ou diversité spectrale étant beaucoup moins efficace à très courte séparation)
- Caractérisation plus fine, en terme de précision photométrique, ou haute résolution spectrale pour les exoplanètes ou naines brunes déjà connues, ou bien encore dans le futur pour aider à la détection d'exoplanètes encore plus faibles
- Polarisation : intérêt comme moyen d'augmenter la capacité de détection de lumière réfléchi (disque, exoplanètes très proches), mais aussi de caractérisation (surtout si il s'agit de mesure absolue de polarisation !)
- Coupler ultimement les différentes capacités ensemble, avec très grand contraste à très courte séparation : vers les planètes telluriques à courte séparation. (nécessite ELT ou télescope de grande taille dans l'espace)

Sur cette base, on note pour la suite :

- L'intérêt d'une présentation qui gagnerait à replacer une telle liste de « TLR » en lien et sur la motivation de grandes questions astro (réellement les « science cases » qui supportent ces capacités astrophysiques) , l'ensemble dans un diagramme qui permet de relier les objectifs aux moyens.
- Le nombre d'étapes intermédiaires astrophysiquement utiles permet de considérer des étapes intermédiaires intéressantes scientifiquement (en plus d'être instrumentalement indispensables : voir partie suivante).

2. Possibilité de séquence d'instruments futurs

Les trois thèmes de discussion suivants peuvent être rapportés ensemble ici.

Les acteurs français réaffirment une forte volonté et un dynamisme dans les actions de R&D pour être un acteur majeur du **développement à long terme d'un instrument ambitieux pour la détection et caractérisation de planètes telluriques (tel que le concept de PCS sur E-ELT)**.

Dans ce cadre, notre expérience nous rend aussi conscient de difficultés nécessaires avant l'obtention de telles performances (dans l'absolu, en termes de défis instrumentaux pour des contrastes accrus à très courte séparation demandant des solutions qualitativement nouvelles, mais aussi dans le contexte actuel d'incertitudes importantes sur les choix de design et d'interfaces pour l'E-ELT, et l'implication de ressources sur d'autres projets, aussi pour l'E-ELT). La réserve correspondante a sans doute induit une position française trop en retrait dans le passé sur cette perspective PCS. A contrario il est identifié souhaitable de plutôt

- renforcer et rendre davantage visible cette volonté de participation majeure sur une perspective à relativement long terme (voir/suivre par exemple les ateliers de concertation au niveau européen tel que atelier NL, ESO, Fr ...)
- identifier les points de R&D nécessaires (en interne) et rendre visible la cohérence de telles actions R&D mises en œuvre actuellement, avec un phasage prévu dans l'avenir.
- Identifier un ou des instruments « intermédiaires », permettant d'appuyer scientifiquement la motivation de ce type de développement instrumental et de consolider l'expertise : voir paragraphe suivant.

Dans le cadre de projets futurs sol, des perspectives plus ambitieuses sont mentionnées, telles que COLOSSUS (grand nombre de miroirs de 8-m cophasés) avec la possibilité d'études de dimensionnement et d'approches. Les efforts correspondants, les technos et le contexte politique correspondants, pointent vers des échéances bien plus lointaines.

Des liens importants en termes d'objectifs astronomiques, d'échelles de temps et de besoins de R&D apparaissent entre la perspective ELT/PCS et des possibilités **d'imagerie à grand contraste depuis l'espace**. Concernant l'espace, il est essentiellement acté que des instruments de coût restreint avec un miroir de « petite taille » ($\leq 1.5\text{-m}$) ne passe pas les sélections avec des risques de surcout et de difficulté technique restant trop importants, associés à un cas scientifique trop restreint. Les perspectives restent ouvertes, et sont largement relancées côté US (voir WFIRST comme opportunité, puis les concepts étudiés Habex ou LUVOIR) sur des missions majeures plus ambitieuses. Au niveau de performance visées, des questions essentielles abordées pour le sol sont aussi pertinentes pour l'espace, comme les besoin de mesures fines de front d'onde, notion de mesure/correction de formes de pupille, coronographie extrême, chromatisme, ... Une position de poursuite de R&D, veille et possibilité de contribution selon les opportunités est à conserver de manière active. Des possibilités de collaboration ponctuelles, ou en lien entre agences (US-Europe) sont à surveiller.

Pour ce qui est des « **étapes intermédiaires** » pour l'imagerie à grand contraste entre SPHERE et PCS typiquement, ce besoin fait unanimité des participants, sur un base à la fois de besoin observationnel, et de validation instrumentale de nouveaux concepts, avec une large fenêtre temporelle, typiquement entre maintenant et ~ 2030 . Dans cette fenêtre, il convient sans doute de distinguer des cadres distincts.

Nous avons rappelé un premier jeu d'instruments ou modes instrumentaux, dont la définition est essentiellement lancée :

- Ajustements de SPHERE (ou « SPHERE upgrade ») : sans être des modifications majeures, des actions sont en cours ou sont considérées pour la correction, la pérennisation ou l'amélioration de l'utilisation de SPHERE. On peut noter
 - la perspective de remplacement du miroir déformable (l'enjeu ici n'est pas l'amélioration des performances mais la maintenance préventive du risque de dégradation des actuateurs, ainsi que la maturation techno pour la perspective de besoins de miroir dans le futur pour l'ELT),
 - la réduction ou correction du « low wind effect »
 - la mesure meilleure et plus systématique d'aberrations statiques avec le senseur ZELDA
 - la possibilité d'ajout de mode observationnel potentiellement possible avec les techno actuelles telles que SAM, ou d'autres composants coronographiques.

Ces actions, scientifiquement utiles et justifiées, n'apportent néanmoins pas un apport majeur en termes d'expertise ou validation instrumentale nouvelle dans un cadre prospectif à plus long terme.

- Instrument en bande L : l'intérêt astro est fort ; le régime de fonctionnement, à très faible phase résiduelle, est aussi très intéressant pour le traitement d'image. Il est supposé ici que ce développement est couvert par ERIS.
- Instruments ELT de première lumière en SCAO sur objets brillants : seront précieux pour appréhender dans le détail la capacités/spécificités/interfaces d'une optique adaptative sur E-ELT (il y a sans doute beaucoup à apprendre !). Au-delà de cette expertise, des acteurs français sont actifs pour des modes à grand contraste, avec des ajustements permettant une science spécifique (en particulier à contraste modéré mais séparation plus faible) en particulier pour MICADO et HARMONI. METIS pourra aussi offrir des capacités très intéressantes, sur lesquelles nous sommes néanmoins moins présent actuellement. Ces instruments, généralistes, restent toutefois très loin de ce qui serait faisable, y compris tôt, sur l'ELT en contraste.

Ces points précédents étant notés dans le paysage, la réflexion prospective note que ces points sont loin de combler le gouffre entre SPHERE et PCS et confirment le besoin d'une étape d'instrument abordant réellement les nouveaux concepts et nouvelles techno, conceptuellement envisagées mais non encore testé en contexte opérationnel. Plus spécifiquement, les thématiques instrumentales suivantes sont identifiées comme incontournables pour un instrument très ambitieux du futur et suffisamment complexes pour demander un gain en expérience passant par le ciel :

- Couplage imagerie à grand contraste avec la haute résolution spectrale (intérêt astro ET questions instrumentales majeures quant aux problématiques d'injection, d'optimisation système, extraction signal, effets de deuxième ordre sur la contamination des speckles ?)
- Pousser l'AO vers un régime de très faible phase, gestion des effets de NCPA rapide, possibilité d'optimisation du contraste très performante sur des zones réduites, senseurs à plusieurs étages dont les FPWFS (focal-plane sensor) ; coronographes optimisés pour les très petites séparation ; modulation en cohérence
- Gestion de pupille 'inamicale' (telle que la pupille segmentée de l'E-ELT, avec segments manquants, obstruction centrale importante ou très importante, ...)

Plusieurs approches et opportunités peuvent être considérées, avec en balance les questions de disponibilité du télescope, taille, pupille segmentée (permettant de tester certaines des difficultés = dernier point) ou non (plus favorables à explorer dans de bonnes conditions les autres aspects d'abord !), possibilité de servir l'exploitation astrophysique, ...

Ainsi, en particulier, est souligné que un instrument pas très tardif pourrait se concevoir pour l'E-ELT avec des performances intéressantes abordables dès maintenant si l'instrument est optimisé pour le grand contraste, mais sans viser le niveau PCS. Cette voie, instrumentalement argumentable, paraît néanmoins difficile à défendre ab initio politiquement maintenant.

Un instrument de type VLT-3^e génération semble assez largement dans la discussion être la voie la plus prometteuse pour un tel instrument. Cela pourrait être conçu comme un instrument nouveau mais plus probablement être fondé sur la base de SPHERE actuel, comme un développement majeur de type « towards PCS » incluant : une montée en puissance de la correction d'OA (avec en particulier une bande passante poussée, assortie d'un changement de type de senseur pour limiter la propagation du bruit vers les bas ordres, possibilité d'adaptation de lois de contrôle), des concepts nouveaux de mesures et compensations de NCPA (avec la possibilité d'un port IR pour un senseur dédié), la possibilité de couplage vers de la spectroscopie haute résolution (vers des spectromètres existants tels que CRIRES+ ou ESPRESSO, ou bien des concepts dédiés). Il est noté par ailleurs que la R&D en labo à Nice aborde explicitement la problématique de pupille segmentée de manière complémentaire.

L'objectif d'une implication forte et sérieuse sur un instrument dédié à moyen terme motive tous les participants, avec un intérêt commun, et la volonté de se concerter pour cohérencier les forces, les intérêts et le retour d'expérience.

3. Verrous technologiques ?

Il est rappelé qu'au lancement de SPHERE, certains composants technologiques indispensables n'étaient pas disponibles et des actions proactives avec l'industrie ont été vitales au succès de l'instrument. Quelle est la situation actuelle ?

Au premier ordre, même si il est clair que l'imagerie grand contraste demande et bénéficie de composants poussés, les premières discussions ne font pas apparaître de point bloquant majeur pour raison technologique (les difficultés étant sans doute d'abord au niveau de la maîtrise de concept et système). Sur cette base, nous soulignons les points suivants :

- Miroirs déformables : une technologie mature et fiable de DM est bien sûr nécessaire. Le nombre d'actuateur nécessaire va croissant (besoin de développement) mais pas nécessairement de manière dramatique au-delà des besoins de l'ELT en général. Une revisite (post étude de phase EPICS) serait importante pour préciser les nombres clé.
- Détecteur science : ici aussi, comme pour les autres instruments, des mosaïques grand format et faible bruit sont nécessaires, mais il n'est pas clair à ce stade si les besoins sont plus forts que pour d'autres modes observationnels.
- Détecteurs senseurs : ici aussi, oui les développements en cours seront très utiles, pour ce qui est des détecteurs rapides et faible bruit (visible ou IR) sans identifier à ce stade de point bloquant (en particulier le passage de senseur de type Shack-Hartmann à pyramide relaxe le besoin en nombre de pixels). De manière

qualitativement nouvelle, si les développements de type MKIDS (sans bruit, avec résolution spectrale intégrée, sur une large bande spectrale) sont confirmés et matures, cela peut ouvrir des concepts de senseur nouveaux et avantageux, mais le potentiel de ce type d'ouverture n'est pas totalement établi actuellement.

- Composants optiques et coronographiques : la R&D sur les concepts et composants et actives et s'accompagne d'efforts significatifs sur la fabrication des composants eux-mêmes (par exemple pour des questions de qualité de surface, déphasages achromatiques, vortex, apodiseurs adaptatifs, ...) mais sans avoir identifié de point bloquant à ce stade
- Puissance de calcul : idem : le contrôle temps-réel montre des besoins importants mais sans point bloquant identifié si l'on se place dans la suite des développements actuels. A confirmer ?

4. Moyens de démonstration

En amont d'instruments d'observation accessible à la communauté, seraient-ils d'étape intermédiaire avant PCS, la capacité de démonstration de nouveaux concepts, de leur potentiel ou de leurs limites, est essentielle, de manière complémentaire en laboratoire ou sur télescope. Face à ce besoin, les moyens (financiers et humains) correspondants sont significatifs, et doivent être à la fois rationalisés et lisibles.

Un passage en revue rapide est abordé, avec le double objectif de s'assurer d'une bonne information entre les acteurs haut-contraste (pour bénéficier au mieux de ces moyens), et aussi pour discuter de manière critique de la justification de ces moyens.

A haut niveau, ce passage en revue conclut sur une situation assez saine et bien justifiable des moyens de démonstration accessibles. Pour consolider ce point de vue, la présentation d'une telle revue des moyens de démonstration initiée dans le document ASHRA devrait être revisitée et clarifiée (PBa/PMa), et pourrait en particulier factuellement lister les moyens en présence et souligner les points suivants :

- Moyens de test de laboratoires
 - Les bancs ont des spécificités, essentiellement complémentaires, en appui à une recherche et validation avec des forces vives actives en local, et donc un bon niveau d'utilisation
 - Des échanges entre équipes effectifs dans le réalité, permettant la valorisation de ces spécificités. Ainsi des ateliers ont été animés dans le passé pour partager les retours d'expérience, échanger sur les difficultés rencontrées, les potentialités, et les possibilités de nouvelles expériences (eg : visite-atelier du banc FFREE, du banc ITHD-LESIA, et du banc de test senseur XAO-CRAL prévu en 2017). Aussi des accueils d'expérience sont faits sur ces bancs (tests de corono au LESIA, échange sur le banc du LAM)
 - En termes de spécificités, on note par exemple la non duplication des questions de très haut contraste (LESIA), autres senseur (LAM), pupille segmentée (SPEED@Nice, collaboration HiCAT)
 - Dans la majorité des cas (sauf Nice), les besoins en termes de manpower sont plus aigus que les besoins en nouveau matériel
- En capacité d'accès à des tests sur ciel :
 - La plateforme SPHERE, avec sa stabilité et l'accès aux différents plans, est un moyen privilégié, envié par les collègues au niveau international (bien

qu'avec un accès restreint) : voir aussi la discussion sur les opportunités pour des développements d'instruments futurs

- De manière complémentaires, noter des collaborations actives et ouvertes : SCExAO avec les tests de différents concepts, Palomar (test SCC), Keck (pupille segmentée, possibilité ouverte de tests de nouveaux concepts)
- Noter télescopes en local avec MeO et CIAO
- Info : opportunité du projet PLANET avec la spécificité de configuration de 2-m hors-axe

5. Sciences des données

De manière générale, la thématique de science des données est reconnue d'importance croissante pour les différents axes HRA, et cela est particulièrement clair dans les développements pour le haut contraste.

En terme de méthodologie, le lien entre connaissance de l'instrument, l'exploitation astro et les compétences en science des données apparaît explicite à différents niveaux :

- Pour le **post-traitement** proprement dit : reconstruction (dont autocalibrée), détection
- **Pendant l'acquisition** : contrôle et estimation de paramètres (ex: r_0 , D_{ϕ})
- **Retour d'expérience** : Études systématiques des speckles en fonction des conditions d'observations (mesures paramètres AO et turbulence): dsp temporelle, spatiale et spectrale. Objectifs = comprendre limites actuelles et éventuellement arriver à des stratégies d'observations qui s'adaptent aux conditions
- **Co-conception de l'instrument et du traitement** : pour un projet donné, très précieux pour accompagner la conception, l'établissement des specs, les trade-off. Un premier exemple peut être SPHERE, avec la prise en compte du traitement des données au moment de l'établissement des specs et trade-offs. D'autres exemples : dans phase A epics, comparaison de coronas etc...
- **Même très en amont** : selon les traitements envisagés, permet d'ouvrir totalement les concepts envisagés (avant un projet particulier), ex: HR spectrale. Peut être utile d'avoir une lecture croisée instrument-signal des hypothèses sous-jacentes fondant les designs, les R&D.

L'échange entre concept instrumental et science des données est donc essentiel, dès les phases initiales de conception et le groupe recommande d'inclure cette dimension, au même titre que d'autres sous-systèmes.

En termes de contenu, plusieurs axes de réflexion sont soulignés, dont :

- cas important dès maintenant : bon traitement x, y, λ, t (et se rapprocher des données les plus brutes possibles)
- Des besoins potentiellement assez différents dans le futur (ex : proche de l'axe où spectral et ADI marchent pas ; ou dans le cas HRS)
- Problématique de contrôle-commande. Lien avec des compétences dans communauté automatique (estimation, en particulier pour le cas grand nombre de degrés de liberté, et commande)

- Utilisation des données front d'onde , "reconstruction de PSF" : oui i/ en particulier pour D_phi (mais attention, question différente des estimations approximatives de coeur PSF pour besoins extragalactiques), et ii/ futur, ex. pour METIS, utilisation de données exhaustives et synchrones WFS et caméra voie science.