

# RAPPORT SCIENTIFIQUE 2014

Document séparé de la fiche de synthèse

**Texte libre focalisé sur la contribution scientifique du projet, les résultats saillants et la liste des publications communes réalisées dans cette période.**

Acronyme et titre long du projet : <b>COMOTEX</b> <b>COM</b> mande temps réel de systèmes d' <b>Optique</b> adaptative à très grand nombre de degrés de liberté pour les <b>Télescopes EX</b> trêmement grands
Nom et prénom du porteur : GRAY Morgan
Site Web du projet : <a href="http://projects.lam.fr/projects/comotex/">http://projects.lam.fr/projects/comotex/</a>

## I] Rappel général de notre problématique

La résolution des grandes questions de l'astrophysique du XXIème siècle est très fortement liée aux moyens instrumentaux d'observation et nécessite le développement de télescopes ayant toujours plus de sensibilité et de résolution. Cette course aux moyens observationnels a conduit l'ESO (European Southern Observatory) à proposer la construction d'un télescope extrêmement grand (E-ELT : 39 m de diamètre, coût total de plus d'un milliard d'euros) qui sera le plus grand au monde lors de sa mise en service début 2020. Les systèmes d'Optique Adaptative (OA) permettent d'améliorer la qualité des images fournies aux astronomes en corrigeant la turbulence atmosphérique et seront indispensables sur ce futur télescope. Ceux utilisés actuellement en astronomie nécessitent l'intégration de techniques d'identification en temps réel de la phase turbulente atmosphérique. Mais pour ce futur E-ELT, des systèmes très complexes d'OA (grand champ, reconstruction tomographique, utilisation d'étoiles laser) nécessiteront un très grand nombre de paramètres à calculer en temps réel (toutes les 0.001 sec) avec environ 80 000 mesures et 40 000 coordonnées pour le vecteur d'état à chaque itération ! Il sera impossible d'adapter directement les algorithmes classiques utilisés sur les plus grands télescopes actuels (diamètres de 8-10 m) en raison du saut quantitatif du nombre de paramètres et par conséquent du coût numérique et informatique.

Dans une communauté internationale ou peu d'équipes travaillent sur cette problématique pourtant fondamentale, nous proposons une nouvelle approche originale basée sur un algorithme intrinsèquement parallèle (développé en géophysique depuis 20 ans) et qui permettra de faire sauter ce verrou théorique en calcul scientifique et technologique dans la conception du système.

## III] Problématique adressée en 2014 et résultats saillants obtenus

### 1) Rédaction d'un article de référence

Les premières études théoriques sur cette problématique spécifique de la commande pour l'OA des futurs ELTs a débuté fin 2010 au LAM sous l'initiative de Morgan Gray. Différentes rencontres ont été effectuées courant 2011 et 2012 avec des spécialistes de l'Optique Adaptative (ONERA) et des méthodes mathématiques basées sur le Local ETKF (NERSC et CERE) afin de mettre en place cette collaboration quadripartite aux compétences complémentaires. Les résultats scientifiques successifs obtenus entre 2011 et 2013 ont été présentés chaque année lors des 3

colloques internationaux dédiés à l'OA ou à l'instrumentation future des ELTs (voir notre rapport scientifique de 2013). Fin 2013, il a été établi que l'approche originale que nous proposons afin de résoudre ce problème d'une commande temps réel avec un très grand nombre de degrés de liberté, avait de nombreux avantages : optimalité, gestion de la non stationnarité, parallélisation intrinsèque pour les calculateurs hautes performances... Il a donc été décidé de rédiger un article 'fondateur' ( <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-22-17-20894> ) présentant à la communauté des spécialistes en OA cet outil mathématique nouveau et les premiers résultats de simulations numériques dans le cas d'un système OA *simplement conjuguée*. Notre article souligne aussi les nombreuses perspectives offertes par notre méthode dont l'un des prochains aspects théoriques à étudier sera son utilisation pour l'OA *tomographique* des ELTs. Cette rédaction a nécessité plus de 3 mois de travail avec des échanges réguliers entre les différents partenaires de cette collaboration (4 laboratoires). L'article a été soumis à la prestigieuse revue américaine d'optique 'Optics Express' et a été accueilli très favorablement par les rapporteurs.

## 2) Code de simulation SCAO (Single Conjugate Adaptive Optics)

Le travail de collaboration LAM / ONERA sur des codes de simulation SCAO avait débuté au cours de l'année 2011, afin d'avoir différents codes développés au sein même du LAM et permettre ainsi d'avoir des outils uniques de simulations numériques autour de différentes lois de commande (dont celle basée sur le Local ETKF). Fin 2013, il est apparu que pour faire des comparaisons efficaces, il fallait unifier les différents codes de commande disponibles au LAM, pour le très grand nombre de degrés de liberté en OA, et donc de les réunir en un unique code Matlab complexe et performant en terme de rapidité. Ce travail de 2-3 mois a donc été réalisé et permet de disposer actuellement d'un outil modulable, offrant de nombreuses possibilités pour des simulations de configurations instrumentales et de lois de commande. Il sera bien sûr encore développé et pourra servir aussi pour les futurs codes de simulations en OA tomographique, qui sera la prochaine grande étape à réaliser après une étude approfondie des aspects théoriques.

## 3) Réalisation d'un code sur GPUs pour une plateforme de simulation OA des ELTs

Dans le cadre de l'ANR COMPASS ( <http://lesia.obspm.fr/compass/> ), nous avons obtenu un financement pour embaucher un IR sur un CDD de 14 mois (décembre 2013-janvier 2015). Notre tâche était de développer en C++ et en CUDA une nouvelle loi de commande sur GPU de type 'Kalman' et 'Local ETKF', puis de l'intégrer à cette plateforme COMPASS de simulation de différents systèmes complexes d'OA pour les ELTs. Lors de la première étape, une version 'standalone' a été développée, nécessitant la création puis les tests de différentes classes 'template' C++. Cela a permis de manier les vecteurs et les matrices utilisés sur GPU, afin de rendre toute la gestion de mémoire CPU et GPU implicite, et de faciliter l'utilisation des calculs matriciels par la création de différentes méthodes utilisant de nombreux kernels sur GPU. D'autres classes (utilisant les précédentes) ont été conçues de manière à pouvoir utiliser cette loi de commande dans différentes configurations: version CPU/GPU, matrices pleines/creuses, base zonale/modale et calculs simple/double précision. L'étape suivante a été de comparer les performances obtenues en terme de temps d'exécution et de précision des résultats (qualité d'image), par rapport à celles obtenues avec une version existante sous Matlab, dans les mêmes conditions de paramétrage pour la simulation.

Par la suite, il a fallu intégrer ces lois de commande dans la plateforme elle-même. En réalisant un interfaçage avec le langage spécifique 'Yorick' utilisé dans COMPASS, de nombreux

scripts ont été modifiés et des 'wrappers' ont été créés: cela permet de passer de 'Yorick' au code C++ avec toutes les conversions d'unités nécessaires et les différentes conventions utilisées entre la version 'standalone' et la plateforme. Enfin, plusieurs semaines ont été nécessaires pour résoudre différents 'bugs', en particulier au niveau de la mémoire GPU dont la gestion est très spécifique dans ce type de matériel et d'architecture. Un des principaux 'bugs' a été difficile à localiser car il venait d'un kernel que notre équipe n'avait pas codé, et une partie de la mémoire partagée qui était allouée et utilisée n'avait pas été initialisée correctement.

#### 4) Parallélisation OpenMP / MPI

En plus du travail de développement d'un code sur cartes GPUs, nous avons déjà mis en place en 2013 un code parallélisé sous OpenMP pour le cluster de calcul mis à la disposition de toutes les équipes du LAM par le CeSAM (Centre de données en Astrophysique de Marseille). Le financement MASTODONS a d'ailleurs permis d'augmenter en fin d'année les capacités de ce cluster en lui donnant sa configuration 'optimale' : 328 cœurs (1.2 To de RAM au total) dont 192 en InfinyBand (QLE7340CK), permettant des échanges à 40 Gb/s (chaque serveur a 12 cœurs Xeon 2.6 Ghz et 48 Go de RAM). Un travail de mise à jour du code en version OpenMP a été effectué en fonction de certaines évolutions du code initial développé sous Matlab. Une prochaine étape sera de développer une version du code parallélisée sous MPI.

#### 5) Implantation et premiers tests sur banc optique

Dans le rapport scientifique de l'année 2013, il avait été envisagé pour cette année 2014 de commencer à réfléchir et à mettre en place un banc optique au sein du LAM (Marseille) ou de l'ONERA (Chatillon) dédié aux premiers tests réels sur l'application du 'Local ETKF' à l'OA des ELTs. Plusieurs raisons ont amené à repousser cette décision. Ce travail sur banc nécessite une réflexion préliminaire afin de bien définir les premiers objectifs scientifiques à valider en fonction du matériel optique déjà disponible et celui à acheter. D'autre part, monter un banc optique et le développer pour une validation spécifique nécessite d'affecter une personne suffisamment disponible à cette tâche. Ces différents critères budgétaires et humains n'étant pas réunis, cette étape de notre travail, bien que fondamentale, a été repoussée à 2015 mais reste bien sur fortement envisagée (cf § III-4).

### **III] Objectifs pour l'année 2015**

L'ESO, organisme européen maître d'œuvre de la réalisation de ce télescope extrêmement grand E-ELT, vient d'officialiser en décembre 2014 le financement et le lancement de ce grand projet concurrent du TMT américain. De nombreux aspects instrumentaux et théoriques restent cependant à résoudre et représentent de véritables défis, en particulier ceux liés à la commande de l'OA pour le très grand nombre de degrés de liberté, un domaine fondamental à explorer.

#### 1) La non stationnarité

A cet aspect calculatoire du très grand nombre de données à traiter en temps réel pour la commande, s'ajoute un défi supplémentaire : la gestion de la non-stationnarité de la turbulence.

Des études récentes montrent que les caractéristiques de la turbulence atmosphérique changent très rapidement au cours d'une observation : il sera alors absolument nécessaire d'avoir des modèles dans les lois de commande dont les paramètres puissent être estimés en temps réel et remis à jour régulièrement de manière automatique et *sans accroître le coût de calcul*. Notre algorithme basé sur le Local ETKF est, de par sa structure mathématique, intrinsèquement parallélisable et permet justement la gestion de cette non-stationnarité, ce qui est unique.

Cependant, les travaux que nous avons réalisés jusqu'à présent se sont concentrés sur la faisabilité de cette implantation et les performances scientifiques dans le cas d'une turbulence stationnaire afin de faire passer un premier message. Il sera donc maintenant nécessaire de définir et réaliser des simulations numériques dans ce cas d'une turbulence non-stationnaire. Un autre versant de cette problématique spécifique est la réalisation d'un démonstrateur (voir § 4).

## 2) OA tomographique

Le phénomène d'anisoplanétisme de l'atmosphère introduit une dégradation rapide de la qualité d'image lorsqu'on augmente le champ d'observation qui est requis pour l'intérêt scientifique des observations astronomiques. Il s'agira donc de réfléchir à la formulation théorique de cette nouvelle OA dite « tomographique », permettant d'observer un champ étendu en analysant et en corrigeant la turbulence atmosphérique dans différentes directions, grâce à l'utilisation d'étoiles naturelles ou d'étoiles laser. Des travaux théoriques existent déjà, mais il faudra les adapter à la problématique du grand nombre de degrés de liberté pour le cas d'un ELT, d'abord en terme de reconstruction spatiale du front d'onde dans différentes couches, puis dans un cadre plus global (aspects spatiaux et temporels) d'une commande reposant sur notre algorithme basé sur le 'Local ETKF'.

## 3) Mise à jour des différentes versions de codes parallélisés

Les deux développements théoriques présentés dans les deux paragraphes précédents (surtout l'OA tomographique) nécessiteront une mise à jour régulière des différentes versions des codes de simulations numériques (Matlab, C++, GPU) en intégrant de nouveaux modules. Nous souhaitons disposer de codes qui permettent de faire des comparaisons de différentes lois de commande pour ce type d'OA grand champ, afin de tester leurs performances respectives dans des configurations instrumentales fixées (nombres d'étoiles guides, types d'OA grand champ ...). Le but est que nos équipes puissent ainsi avoir, dans les années à venir, une expertise dans les différents types de commande en OA, qui sera utile auprès de l'ESO dans ses choix futurs pour l'implantation d'algorithmes sur les clusters de calculs de l'E-ELT.

## 4) Développement d'un démonstrateur sur banc optique

L'algorithme de commande que nous développons depuis 3 ans a seulement été testé dans des simulations numériques, ce qui est la première étape à réaliser pour ce type de projet exploratoire. Néanmoins, nous souhaitons qu'il soit à terme utilisé dans le cadre de la commande de certaines configurations de l'OA de l'ELT : pour cela, il est donc nécessaire de passer de l'étape de validations numériques à celle d'une implantation sur un démonstrateur. L'idée est de réaliser les premières validations sur un banc optique d'une loi de commande basée sur le 'Local ETKF', comme cela avait été évoqué fin 2013 (cf § II-5). Il faut pour cela définir clairement les

aspects scientifiques et technologiques prioritaires à valider pour montrer les avantages de notre méthode : il semble que le premier point important à tester sur ce démonstrateur est la gestion de la non stationnarité qui sera le complément des simulations faites parallèlement (cf § III-1). Le LAM et l'ONERA possède déjà une expertise dans la réalisation de bancs optiques en OA et il faudra donc définir le matériel à acheter pour compléter ces bancs disponibles et les personnes compétentes qui seront affectées sur cette partie instrumentale du projet.

## **IV] Conclusions**

Pendant cette année 2014, notre collaboration entre les 4 laboratoires a permis de poursuivre les premiers travaux entrepris sur cette thématique de recherche exploratoire du grand nombre de degrés de liberté pour la commande en OA de l'ELT, et surtout de donner une visibilité internationale à nos résultats obtenus en simulations numériques.

Nous avons aussi mis en place un atelier de travail réunissant les différentes personnes impliquées sur ce projet. Cela a permis de faire le point sur les avancées réalisées, et surtout de définir les deux développements théoriques principaux à venir : étude de la non stationnarité (simulations et mise en place d'un démonstrateur) ; étude de l'utilisation du 'Local ETKF' à l'OA tomographique pour l'ELT (ce qui accroît *encore* considérablement la masse de données à traiter en temps réel). Cet atelier sera bien sûr renouvelé en fin d'année 2015.

La signature en fin d'année 2014 par l'ESO du lancement de ce grand projet européen marque le départ officiel pour la construction de ce télescope extrêmement grand, pour lequel de nombreux défis théoriques et instrumentaux restent encore à explorer. Nous souhaitons que la collaboration entre nos 4 laboratoires puisse développer suffisamment d'expertise afin de répondre favorablement aux futurs appels d'offre de l'ESO pour la partie commande de l'OA de l'E-ELT, et donc se positionner au niveau international sur ce domaine complètement ouvert.

Afin de pouvoir réaliser cet objectif sur le long terme, nous souhaitons ainsi continuer à bénéficier du financement MASTODONS, qui nous permettra de mettre en place les déplacements de travail, les participations au colloque, l'achat de matériel informatique et optique pour cette année 2015. Nous avons aussi demandé pour l'année prochaine auprès de la Mission d'Interdisciplinarité du CNRS un financement « Instrumentation aux limites » : notre projet, dans sa partie instrumentale qui doit se mettre en place, correspond exactement à ce type de défi.

## **VI Publications**

Les 4 publications et 4 communications antérieures à l'année 2014 sont indiquées dans le rapport scientifique de l'année 2013. Pour cette année 2014 :

1) Article accepté dans la **revue à comité de lecture 'Optics Express'** (Vol. 22 Issue 17, pp. 20894-20913 (2014)): "Local Ensemble Transform Kalman Filter, a fast non-stationary control law for adaptive optics on ELTs: theoretical aspects and first simulation results", Morgan Gray, Cyril Petit, Sergey Rodionov, Marc Bocquet, Laurent Bertino, Marc Ferrari, Thierry Fusco.

2) Communication à la **conférence internationale SPIE « Astronomical Telescope + Instrumentation »** (Montreal, juin 2014): "Local Ensemble Transform Kalman Filter, a fast non-stationary control law for adaptive optics on ELTs", Morgan Gray, Cyril Petit, Sergey Rodionov, Marc Bocquet, Laurent Bertino, Marc Ferrari, Thierry Fusco.