



**HAL**  
open science

# Le Centre Galactique : un noyau de galaxie à haute résolution

Thibaut Paumard

► **To cite this version:**

Thibaut Paumard. Le Centre Galactique : un noyau de galaxie à haute résolution. Astrophysique [astro-ph]. Observatoire de Paris, 2018. tel-01969078

**HAL Id: tel-01969078**

**<https://theses.hal.science/tel-01969078v1>**

Submitted on 7 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Le Centre Galactique : un noyau de galaxie à haute résolution**

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches

**Thibaut Paumard**

*LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université,  
Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, 5 place Jules Janssen, 92195  
Meudon, France*

Soutenu le 18 janvier 2018 à l'Observatoire de Paris, section de Meudon

Composition du jury :

Alain Riazuelo

Andrea Goldwurm (rapporteur)

Daniel Rouan

Delphine Porquet (rapporteuse)

Éric Gourgoulhon (président)

Gilles Duvert

Jihane Moulta

Karine Perraut



## TABLE DES MATIÈRES

|  |           |
|--|-----------|
| <u>1-Curriculum vitæ.....</u>  | <u>4</u>  |
| 1.1Cursus.....   | 4         |
| 1.1.1-Formation initiale.....  | 4         |
| 1.1.2-Formation permanente.....  | 4         |
| 1.2Expérience Professionnelle.....                                       | 5         |
| 1.2.1-Recherche.....   | 5         |
| 1.2.2-Enseignement.....  | 5         |
| 1.2.3-Administration.....  | 6         |
| 1.3Vie associative.....  | 6         |
| <u>2-Dossier de synthèse.....</u>  | <u>9</u>  |
| 2.1Contexte scientifique et problématique.....                           | 9         |
| 2.2Origine et dynamique des étoiles massives du parsec central.....      | 15        |
| 2.2.1-Les étoiles massives du parsec central.....                        | 16        |
| 2.2.2-L'amas compact GCIRS 13E.....                                      | 18        |
| 2.2.3-GCIRS 7.....   | 20        |
| 2.3Structure et dynamique du milieu interstellaire.....                  | 21        |
| 2.4Contraindre observationnellement la nature de Sgr A*.....             | 25        |
| 2.4.1-Le Centre Galactique et la Relativité Générale.....                | 25        |
| 2.4.2-L'instrument GRAVITY.....  | 26        |
| 2.4.3-Modélisation des sursauts de Sgr A*.....                           | 29        |
| 2.4.4-Direction scientifique du projet GRAVITY.....                      | 29        |
| 2.4.5-GYOTO : Logiciel de simulation relativiste.....                    | 32        |
| 2.5Bibliographie.....  | 36        |
| <u>3-Note d'accompagnement.....</u>                                      | <u>40</u> |
| 3.1Participation à des collaborations.....                               | 40        |
| 3.1.1-Le projet GRAVITY.....   | 40        |
| 3.1.2-Observations du Centre galactique.....                             | 40        |
| 3.1.3-GYOTO.....   | 40        |
| 3.2Place de ma recherche au sein du laboratoire.....                     | 41        |
| 3.3 Enseignement, formation et diffusion de la culture scientifique..... | 41        |

|  |                    |
|--|--------------------|
| <a href="#">3.3.1-Encadrement de thèses.....</a>                             | <a href="#">41</a> |
| <a href="#">3.3.2-Enseignement.....</a>                                      | <a href="#">42</a> |
| <a href="#">3.3.3-Diffusion de la culture scientifique.....</a>              | <a href="#">42</a> |
| <a href="#">3.4Encadrement, animation et management de la recherche.....</a> | <a href="#">43</a> |
| <a href="#">4-Summary.....</a>   | <a href="#">44</a> |

## 1- CURRICULUM VITÆ

### 1.1 CURSUS

#### 1.1.1- FORMATION INITIALE

- 1997-2001** Élève à l'École Normale Supérieure (ENS) de Cachan ;
- Jan. 2001** Délivrance du magistère de Mathématiques et d'Informatique, ENS de Cachan/Université Paris VII ;
- 1998-1999** DEA Méthodes Instrumentales en Astrophysique et leurs Applications Spatiales à l'Université Paris VI, mention assez bien ;
- 1997-1998** Maîtrise de Mathématiques à l'Université Paris VII, mention bien. Poursuite de plusieurs modules de la licence de Mathématiques de l'ENS ;
- Sept. 1997** Entrée à l'École Normale Supérieure de Cachan, pour quatre ans ;
- Juin 1997** Licence de Mathématiques à l'Université Paris VII, mention assez bien ;
- 1996-1997** Classe de Mathématiques Spéciales, option MP\* (lycée Charlemagne, Paris) ;
- Juillet 1996** Admissibilité à l'école Polytechnique, donnant équivalence du DEUG ;
- 1995-1996** Classe de Mathématiques Spéciales, option M' (lycée Charlemagne, Paris) ;
- 1994-1995** Classe de Mathématiques Supérieures (lycée Charlemagne, Paris) ;
- Juin 1994** Baccalauréat, série C, mention assez bien.

#### 1.1.2- FORMATION PERMANENTE

- Avril-mai 2009** Formation *Débuter en C++* organisée par le CNRS, quatre jours
- Jan. 2009** Module post-master *Description fluide et cinétique des plasmas*, proposée par l'école doctorale Astronomie & Astrophysique d'Île-de-France, une semaine ;

- Juin 2008** Formation au langage de programmation interprété *Yorick*, deux jours ;
- Mars-mai 2008** Formation de formateurs occasionnels, quatre jours ;
- Nov. 2007** Formation devenir Guide des visites de l'Observatoire sur le site de Meudon, une journée ;
- Oct. 2004** École thématique *VLT / MIDI School for Data Reduction, Analysis and Science*, Lorentz Center, Université de Leiden, Pays-Bas.

## 1.2 EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE

### 1.2.1- RECHERCHE

- Depuis 2006** Chargé de recherche 2<sup>ème</sup> puis 1<sup>ère</sup> classe (depuis le 1er octobre 2010) au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (LESIA, UMR-8109 du CNRS) de l'Observatoire de Paris ;
- 2003-2006** Stage post-doctoral au *Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik* (MPE), à Garching, Allemagne ;
- 1999-2003** **Thèse de doctorat** à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP), sous la direction de Jean-Pierre Maillard, sur l'*Étude de la dynamique et de la population stellaire de la région interne du Centre Galactique* ;
- Sept. 1999** Stage de quatre semaines au département d'Astrophysique de l'Université de Californie - Los Angeles (UCLA) sous la direction de Mark Morris, sur la « dynamique des flots d'hydrogène dans la région interne du Centre galactique » ;
- Mars-juin 1999** Stage de DEA à l'IAP sur l'« Étude de la dynamique de la population d'Étoiles à Hélium dans la région interne du Centre Galactique », sous la direction de Jean-Pierre Maillard.

### 1.2.2- ENSEIGNEMENT

- Sept. 2017** Module « Optique - imagerie » du master 2 professionnel « Outils et Systèmes de l'Astronomie et de l'Espace » de l'Observatoire de Paris (11h)
- Sept. 2015** Cours magistral lors de l'école thématique VLT
- 2012-2014** TD/TP d'algorithmique et de programmation, L3, Université Paris Diderot.

**2010-2011** Cours particuliers de mathématiques, sciences physique et chimie pour des élèves de lycée.

**2001-2003** Moniteur à l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6) :  
• travaux pratiques d'observation astronomique en maîtrise de physique ;  
• travaux dirigés d'astronomie en DEUG MIASS ;  
• travaux dirigés et pratiques d'informatique en DEUG SPI ;  
• travaux pratiques d'analyse spectrale en DEUST télécom ;

**1998-2001** Interrogateur en Mathématiques dans des classes de Mathématiques Supérieures MPSI et Mathématiques Spéciales PC, Lycée Charlemagne, Paris.

### 1.2.3- ADMINISTRATION

**Depuis 2013** **Président du comité scientifique** du Centre Jean-Marie Mariotti (JMMC)

**Depuis 2009** Membre du comité éditorial du site web du LESIA

**Depuis 2006** **Scientifique du projet GRAVITY** (*Project Scientist*) ;

**Jan.-juin 2015** Membre du comité scientifique d'organisation de la Journée de la communauté VLTI qui s'est tenue le 25 juin 2015 lors de la Semaine européenne de l'astronomie et de la science spatiale (EWASS 2015)

**Jan.-Fév. 2015** Organisation de l'atelier GYOTO (cf. infra) de deux jours regroupant une vingtaine de développeurs et utilisateurs de quatre pays

**Jan.-Juin 2014** Organisation de la session de deux après-midi dédiée à l'instrument GRAVITY lors de la Semaine de l'Astrophysique Française

**2010-2014** Responsable de la Commission communication du LESIA

**Avril 2006** Membre du comité local d'organisation de la conférence *Galactic Center Workshop 2006: From the Center of the Milky Way to Nearby Low-Luminosity Galactic Nuclei* (<http://www.ph1.uni-koeln.de/GC06/>) ;

**Jan.-juin 2004** Membre du comité local d'organisation de la conférence *Growing Black Holes: Accretion in a Cosmological Context* tenue à Garching (Allemagne) du 20 au 25 juin 2004 (<http://www.mpa-garching.mpg.de/~bh-grow/>).



### 1.3 VIE ASSOCIATIVE

**Depuis 2006** Mainteneur puis Développeur Debian GNU/Linux et le projet MacPorts

**2008-2011** Responsable de l'activité *capoeira* du CLAS de l'Observatoire ;

**1998-1999** Responsable du club de danse rock de l'École normale supérieure de Cachan.

## 2- DOSSIER DE SYNTHÈSE

L'ensemble de ma carrière a porté sur l'étude du centre de la Voie lactée. Après avoir introduit ce sujet, je détaillerai mes travaux.

### 2.1 CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET PROBLÉMATIQUE

Étudiant les sources naturelles d'ondes radio qui pourraient nuire aux télécommunications, Karl Jansky fit en 1933 la première découverte d'une source radio astrophysique. Il s'agissait de Sgr A, une région complexe qui occupe les quelques parsecs centraux de la Voie Lactée. Dans les années 1970, cette région a été étudiée plus en détails par interférométrie radio, de sorte que la source ponctuelle Sgr A\* (Fig.1) a pu être isolée de l'émission interstellaire (Balick & Brown 1974). Elle fut rapidement suspectée de coïncider avec un trou noir supermassif.

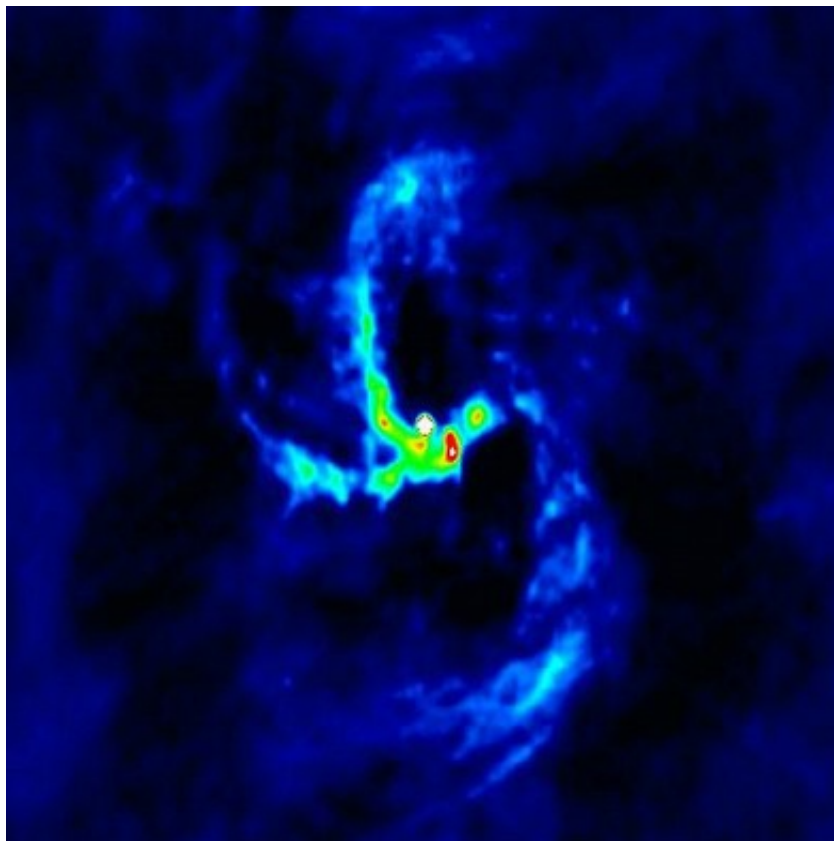


Figure 1: la région ionisée Sgr A Ouest observée en dans le continuum radio à 2,6 cm par Roberts, Yusef-Zadeh et Goss en 1992. La source brillante qu au centre est Sgr A\*. Le champ de vue fait une quarantaine de secondes d'angle, soit environ deux parsecs de côté. Image courtesy of NRAO/AUI.

Les premières cartes en infrarouge du parsec central furent obtenues en scannant la région au moyen d'un détecteur mono-pixel (Fig.2, Becklin & Neugebauer 1975). En raison de 30 magnitudes d'extinction dans le domaine visible, il est impossible d'observer le Centre galactique dans ce domaine de longueur d'onde. Ces cartes, à la résolution limitée par la turbulence atmosphérique, permirent de détecter une poignée d'étoiles très brillantes (les étoiles IRS pour *infrared source*, surtout des supergéantes), mais pas de contre-partie à la source Sgr A\*. Dans les années 1990, les techniques d'imagerie des tavelures et d'optique adaptative ont permis de résoudre l'amas nucléaire en des milliers d'étoiles plus faibles autour de ces supergéantes, en particulier dans la seconde d'angle entourant Sgr A\* (Fig. 3, Eckhart et al. 1995). Les mouvements propres de ces étoiles les plus centrales, nommées étoiles « S » comme *star*, ont été rapidement détectés de sorte que l'orbite autour de Sgr A\* de la plus célèbre d'entre elles, S2 ou S0-2, a pu être contrainte en 2002 (Schödel et al. 2002), alors que l'objet central lui-même échappait encore à toute détection en infrarouge. S2 a une période orbitale d'une quinzaine d'années et passe au périapse à environ 2000  $R_s$  seulement, à une vitesse quasi-relativiste ( $\approx 1\%$  de la vitesse de la lumière). La détermination des orbites des étoiles S est ce qui contraint le mieux la distance et la masse de l'objet compact

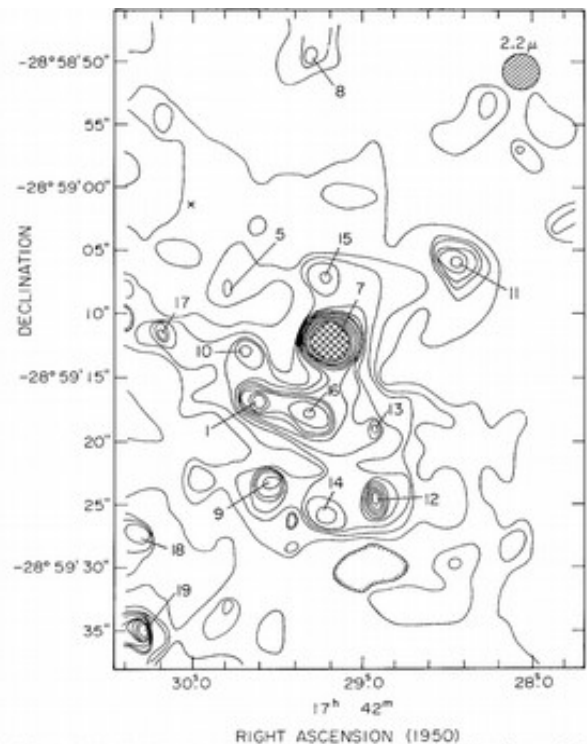


Figure 2: une des premières cartes infrarouges du parsec central Becklin & Neugebauer 1975

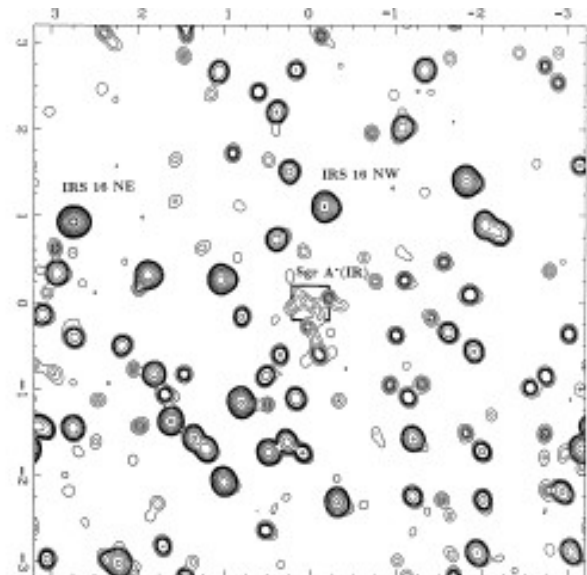


Figure 3: Le centre de la Galaxie observé par imagerie des tavelures en infrarouge. Eckhart et al. (1995)

supermassif qui occupe le centre de la Voie lactée :  $M = 4.28 \pm 0.1|_{\text{stat}} \pm 0.21|_{\text{sys}} \times 10^6 M_{\odot}$  et  $R_0 = 8.32 \pm 0.07|_{\text{stat}} \pm 0.14|_{\text{sys}}$  kpc (Gillessen et al. 2017). La démonstration était alors faite que siège au cœur de la Voie lactée un objet supermassif ( $\approx 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ ), compact (au plus une centaine d'unités astronomiques de rayon) et sombre (moins lumineux qu'une étoile de la séquence principale en infrarouge). Ces observations corroborent fortement l'hypothèse selon laquelle cet objet compact est un trou noir.

Une source infrarouge non-stellaire coïncidente avec la position du corps central a finalement été détectée en 2003, près de trente ans après la détection de Sgr A\* dans le domaine radio (Genzel et al. 2003, Fig. 4). En infrarouge comme en X, l'émission de Sgr A\* est variable et se manifeste par des sursauts brillants (un à quelques-uns par jour) qui durent environ 1 h. Selon certains auteurs, ces sursauts ou *flares* sont liés à des événements énergétiques individuels dont la nature exacte n'est pas encore claire, soit dans les régions internes d'un disque d'accrétion autour de l'objet compact, soit dans un jet en émanant. Selon d'autres auteurs, on ne peut pas parler d'événements car Sgr A\* montrerait des variations de diverse amplitude à diverses échelles de temps suivant un spectre de bruit rouge (e.g. Do et al. 2009). Selon eux, les « sursauts » ne sont finalement que les plus énergétiques de ces variations.

En tout état de cause, les temps caractéristiques des variations des courbes de lumières des sursauts (Fig. 4) indiquent qu'ils proviennent de zones peu étendues, de l'ordre de la taille de l'horizon des événements du trou noir, et probablement à proximité de cet horizon. De par sa proximité et malgré sa masse modérée pour un trou noir supermassif, Sgr A\* est le trou noir présumé sous-tendant l'angle le plus grand sur le ciel. En effet son rayon de Schwarzschild ( $R_s$ ), c'est à dire le rayon de l'horizon des événements d'un trou noir de Schwarzschild de même masse, est d'environ  $17 R_{\odot}$  (en supposant une masse de  $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$ ). À une distance de 8 kpc, cela sous-tend un angle de  $\approx 10 \mu\text{as}$ . Le second trou noir par ordre de rayon de Schwarzschild projeté est celui au cœur de la galaxie M82, deux fois plus petit en projection.

S'il est maintenant considéré comme acquis que Sgr A\* est un trou noir, cette conclusion dépend dans une large mesure du fait que la relativité générale est elle-même considérée comme valide même dans des conditions extrêmes. Si l'hypothèse « trou noir » est à considérer comme la moins exotique et la plus simple permettant à ce jour de rendre compte des données, il est important de la vérifier de manière observationnelle irréfutable en apportant la preuve que l'objet compact possède bien un horizon des événements. De même, les

conditions qui règnent à proximité immédiate de l'objet sont si extrêmes que la validité de la théorie de la gravitation devra être, dès que possible observationnellement, vérifiée et non admise comme juste *a priori*. Certains de mes travaux ont pour but d'effectuer ces vérifications, qu'il était impossible d'effectuer avec l'instrumentation existante il y a encore deux ans. Par souci de simplicité, j'utiliserai le terme de trou noir indépendamment de ces considérations, exception faite des passages où la nature exacte de l'objet central est importante.

La sphère d'influence de Sgr A\*, c'est à dire le domaine au sein duquel le potentiel gravitationnel est dominé par le trou noir, s'étend sur environ 3 pc de rayon (Melia 2007, p. 87). Elle contient l'amas nucléaire d'étoiles ainsi que de complexes structures de gaz et de poussière et constitue un laboratoire de premier ordre pour étudier les phénomènes en jeu autour des trous noirs centraux, y compris dans les noyaux actifs de galaxie, tels que dynamique de l'amas stellaire, dynamique du milieu interstellaire, formation stellaire et rétro-action du noyau galactique vers la galaxie hôte et le milieu intergalactique à travers par exemple les vents stellaires et les supernovæ.

L'amas nucléaire est dominé en nombre et en masse par une population d'étoiles âgées, de faible masse, aux orbites aléatoires formant un ensemble dynamiquement relaxé. Mais ce sont une centaine d'étoiles massives de formation récente (quelques millions d'années) qui dominent sa fonction de luminosité. Il apparaît que les orbites de ces étoiles ne sont pas aléatoires : elles sont confinées dans un ou deux disques relativement minces. La présence d'étoiles jeunes dans le parsec central de la Voie lactée est

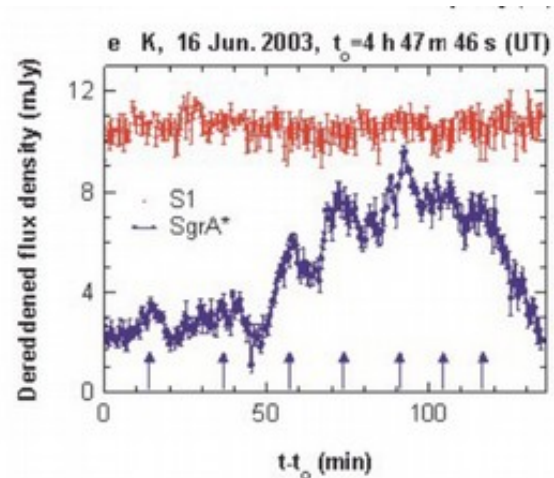


Figure 4: Courbe de lumière d'un des premiers sursauts observés de Sgr A\* (Genzel et al. 2003).

surprenante car les forces de marée dues à la présence du trou noir inhibent *a priori* la formation stellaire à cet endroit. Deux visions s'opposent pour expliquer la présence de ces étoiles :

- Les étoiles se sont formées sur place. Le mécanisme standard de formation par contraction d'un nuage moléculaire est très fortement défavorisé en raison des forces de marées (e.g. Sanders 1992). Cependant, les simulations (Nayakshin et al. 2007) montrent que si l'on permet à ce nuage de s'effondrer d'abord en un disque en rotation autour du trou noir, la formation stellaire peut devenir très efficace. On peut rapprocher ce mécanisme de ce qui se passe dans les galaxies à flambée de formation stellaire. On ne peut d'ailleurs pas forcément parler dans ce cas d'un disque d'accrétion, puisque la formation stellaire dans le disque peut être si efficace qu'elle ne permet pas au gaz d'être accrété sur le trou noir. J'ai coordonné au cours de mon post-doc à un article présentant des arguments forts en faveur de ce scénario (Sect. 2.2.1).
- Les étoiles se sont formées dans un amas à distance du parsec central et ont ensuite migré en groupe vers leur destination finale. Ce qui justifie de se pencher sur cette hypothèse est la présence à proximité de deux amas d'étoiles massives : l'amas des Arches et le Quintuplet, chacun à une centaine d'années lumière du CG. La difficulté est qu'il faut ajuster de façon assez contraignante les conditions initiales pour que le cœur de l'amas arrive à rejoindre le parsec central par friction dynamique avant que les étoiles les plus massives n'aient eu le temps d'exploser en supernova. Par ailleurs au cours de cette migration les couches externes de l'amas ont tendance à se disperser rapidement. La présence d'un trou noir de masse intermédiaire dans l'amas progéniteur aide à le stabiliser au cours de la migration. J'ai eu l'occasion au cours de ma thèse et de mon post-doc de travailler sur un petit groupe d'étoiles, GCIRS 13E, qui pourrait contenir un trou noir de masse intermédiaire et de fait être ce qui reste du cœur d'un tel amas (Sect. 2.2.2).

Le cœur de l'amas nucléaire est constitué des étoiles S dont on a parlé plus haut. Contrairement à la population stellaire jeune du parsec central, les étoiles S ont des orbites aléatoires et forment une population relaxée dynamiquement. On appelle également ce groupe d'étoiles dans la seconde d'angle centrale de la Galaxie le *cusp* par identification avec le pic de densité stellaire qui, selon les modèles de dynamique d'amas stellaires, devrait exister au centre de l'amas. En fait, dans le cas du Centre Galactique, ce pic de

densité n'existe pas pour la population stellaire dans son ensemble. Pour voir un pic apparaître, il faut ne considérer que les étoiles les plus chaudes. De fait, la population stellaire du *cusp* est particulièrement jeune, alors même qu'ici plus que nulle part ailleurs les forces du marée du trou noir devraient empêcher la formation stellaire. Ce fait observationnel a été appelée, non sans humour, « paradoxe de jeunesse » et n'est pas résolu plus de vingt ans après sa découverte. De nombreux auteurs se sont penchés sur la question, avec des propositions plus ou moins exotiques dont aucune n'est parfaitement satisfaisante et que l'on peut regrouper en deux grandes familles :

- Les étoiles du *cusp* se sont formées avec le reste de la population stellaire, mais ont subi des interactions gravitationnelles qui ont profondément changé leurs orbites. Le mécanisme le plus efficace suppose une interaction entre un corps unique et une étoile binaire. Dans ce cas, l'une des composante de l'étoile binaire est éjectée à grande vitesse alors que l'autre voit son moment d'inertie décroître. Cette hypothèse implique donc l'existence d'une population d'étoiles s'éloignant du parsec central à grande vitesse, population restant à découvrir.
- Les étoiles du *cusp* sont faussement jeunes : il s'agit en fait d'étoiles plus anciennes qui ont pris l'aspect d'étoiles massives par un mécanisme ou un autre, par exemple :
  - Suppression par effet de marées des couches externes de l'étoile, laissant à nu un cœur chaud.
  - Collision et coalescence de précurseurs de faible masse.
  - Chauffage additionnel dû au forces de marées.

Aucune de ces hypothèse n'est très convaincante, en raison du fait que les étoiles du *cusp* ont un spectre parfaitement normal et en accord avec la photométrie de ces étoiles.

L'amas nucléaire s'étend sur une vingtaine de secondes d'angle, soit l'échelle du parsec. Il est baigné par un complexe de nuages de poussière et de gaz dont la surface est ionisée et qui a en projection l'apparence d'une spirale à trois bras. Cet ensemble est nommé Sgr A ouest et surnommé la Minispirale (Fig. 1 ; Sect. 2.3). Il est entouré par un tore de gaz moléculaire, le Disque circumnucléaire (CND), qui marque la frontière de la région à laquelle je m'intéresserai ici.

Voici les deux questions clefs qui structurent mon activité :

- Mécanismes à l'œuvre au cœur d'une galaxie : comment le gaz et la poussière des régions internes de la galaxie évoluent-ils ? Le CND a-t-il vocation à s'effondrer pour former un disque d'accrétion ? Sont-ce les étoiles jeunes qui, par leur vent stellaire, empêchent cet effondrement ? La Minispirale provient-elle du CND ? J'étudie ses questions sous l'angle de la structure et de la dynamique du milieu interstellaire du CG.
- Mesure de la métrique autour d'un trou noir : les trajectoires des points matériels et des photons autour de Sgr A\* correspondent-elles à ce que prévoit la théorie de la relativité générale autour d'un trou noir ?

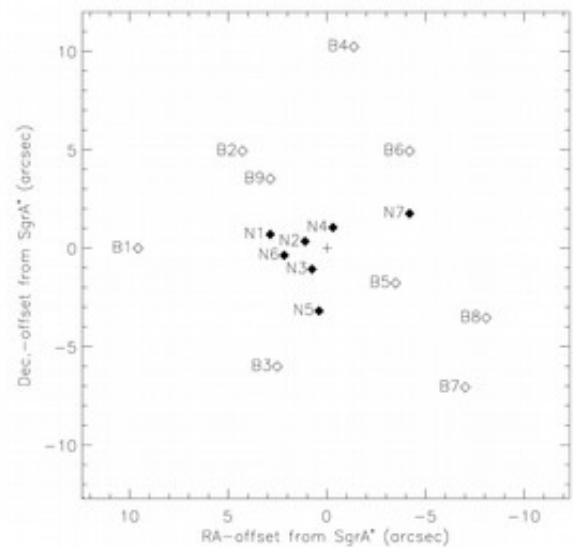


Figure 5: Distribution spatiale des deux classes d'étoiles à hélium dans le parsec centrale (Paumard et al. 2001). La croix marque la position de SgrA\*. Symboles vides : étoiles à profil large (Broad). Symboles pleins : étoiles à profil étroit (Narrow).

## 2.2 ORIGINE ET DYNAMIQUE DES ÉTOILES MASSIVES DU PARSEC CENTRAL

La vaste majorité des étoiles de l'amas nucléaire sont de type tardif et constitue une population relaxée dynamiquement. Cependant les étoiles les plus remarquables sont de type précoce. Lorsque j'ai commencé mes premiers travaux de recherche en stage de DEA sous la direction de Jean-Pierre Maillard à l'IAP en 1999, les premières images à la limite de diffraction venaient de paraître. On n'avait caractérisé spectroscopiquement que les étoiles les plus brillantes (Hall et al. 1982, Najarro et al. 1997). On ne connaissait donc que deux types d'étoiles, toutes évoluées : une poignée de supergéantes rouges (dont IRS 7, l'étoile de loin la plus brillante du parsec central), et les « étoiles à Hélium » de l'amas IRS 16, des étoiles massives évoluées, de type Wolf-Rayets (WR) ou transitionnel (Ofpe/WN ou candidates *Luminous Blue Variables*, LBV). Il n'était pas certain si l'absence d'étoiles



moins évolués, en particulier d'étoiles OB, constituait un effet de sélection ou était la trace de processus propres à l'environnement exceptionnel du CG.

### 2.2.1- LES ÉTOILES MASSIVES DU PARSEC CENTRAL

C'est tout d'abord à ces « étoiles à hélium » que je me suis intéressé au cours de mon stage de DEA et de ma thèse. Jean-Pierre Maillard m'a donné l'occasion de travailler sur des données exceptionnelles issues de l'instrument BEAR<sup>1</sup> (Maillard 2000), qui n'était autre que le spectromètre à transformée de Fourier du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) couplé avec une caméra infrarouge. Ces données autour de la raie Br $\gamma$  de l'hydrogène atomique et d'une raie de He I m'ont permis d'identifier clairement deux classes séparées spatialement parmi les étoiles à hélium (Fig. 5, Paumard et al. 2001) : la population centrale était constituée d'étoiles très lumineuses présentant des raies en émission étroites ( $\approx 150$  km/s), probablement proches du stade de LBV, alors que la périphérie comportait des étoiles plus évoluées encore, plus faibles et ayant des raies nettement plus larges ( $\approx 1000$  km/s), au stade WR. Au cours de mon post-doc, j'ai participé à l'analyse et à l'interprétation de plusieurs ensembles de données d'imagerie et de spectro-imagerie d'une de ces sources (GCIRS 34W, N7 sur la Fig. 5) qui confirment qu'elle est effectivement proche du stade LBV (Trippe et al. 2006). La séparation spatiale de ces deux classes d'étoiles massives n'est toujours pas expliquée.

Après ma thèse, j'ai été engagé au MPE à Garching afin de me pencher sur la détection d'étoiles massives moins évoluées dans le parsec central à travers la recherche de leur raies d'absorption dans des données SPIFFI, spectro-imageur installé comme instrument visiteur au VLT. J'ai mis au point une méthode afin de soustraire l'intense émission interstellaire en Br $\gamma$  sur les données à moyenne résolution spatiale (limitée par la turbulence atmosphérique) fournies par cet instrument (Paumard et al. 2004a). J'ai pu ainsi identifier pour la première fois la raie Br $\gamma$  de l'hydrogène ionisé en absorption dans un certain nombre d'étoiles du CG. Plus tard, SPIFFI a été couplé au système d'optique adaptative MACAO pour donner l'instrument final SINFONI. La fonction de réponse impulsionnelle spatiale (PSF) de SINFONI étant meilleure que celle de SPIFFI seul, nous avons été en mesure de découvrir encore plus d'étoiles possédant la raie Br $\gamma$  en absorption, en particulier des étoiles plus faibles que celles qui avaient été mises en évidence par SPIFFI (Paumard et al. 2006, Fig. 6).

---

<sup>1</sup>Le nom « BEAR » n'est pas un acronyme. La meilleure remotivation que j'ai entendue pour le justifier est « *Best Experiment of Astrophysical Research* ».

Au total, nous avons trouvé une quarantaine de ces étoiles à raies d'absorption. Outre Bry, elles présentent plusieurs raies d'He I et de N III. Il s'agit des étoiles OB « manquantes » : leur non-détection jusqu'à présent était donc un effet de sélection. Nous avons trouvé des spécimens allant de la séquence principale à la classe des supergéantes. L'identification spectrale d'autant d'étoiles nous a permis de contraindre l'âge de cette population qui semble s'être formée lors d'un unique événement de formation stellaire vieux de  $\approx 6 \pm 2$  Myr.

Nous avons associé les vitesses radiales mesurées pour ces étoiles aux vitesses propres déterminées grâce au projet d'imagerie du MPE utilisant NACO/VLT depuis 2002 et SHARP/NTT depuis 1993. L'analyse statistique de l'ensemble des vecteurs vitesse permet de confirmer la conclusion déjà

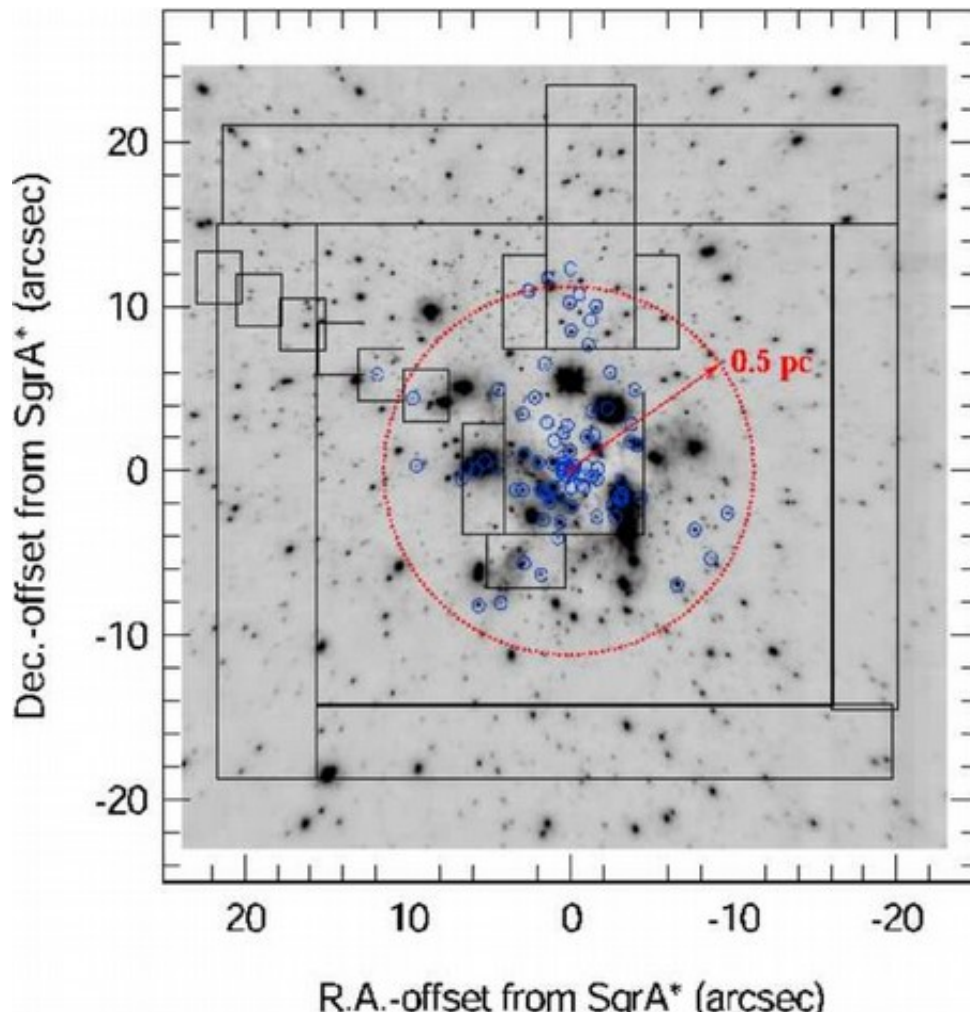


Figure 6: Les différents champs (lignes noires) observés par SPIFFI et SINFONI de 2003 à 2005 sur une image en bande L du centre galactique. 90 étoiles massives (OB I-V, Ofpe/WN9, WR) sont dénotées par des cercles bleus.

avancée en 2003 par l'équipe du MPE : toutes ces étoiles massives (OB, LBV, WR) en dehors de la seconde d'angle centrale semblent résider dans deux disques presque orthogonaux. Ces deux disques comprennent une population très similaire en étoiles évoluées. Ils sont par conséquent du même âge. J'ai calculé l'excentricité des orbites de ces étoiles en fonction de leur position sur la ligne de visée, en prenant en compte l'incertitude sur tous les paramètres au moyen d'une approche de type Monte-Carlo. Cela m'a permis de conclure que les étoiles de l'un des deux disques ont des excentricités modestes, alors que celles du second disque ont des excentricités élevées. Un travail détaillé de modélisation reste à faire pour utiliser ces excentricités comme contraintes sur l'histoire de ces deux disques (en particulier leur mode de formation).

De par le nombre d'étoiles massives alors connues ( $\approx 90$  étoiles OB I-V, Ofpe/WN9/LBV, WR), on peut affirmer que la masse de chacun de ces systèmes n'excède pas  $\approx 10^4 M_{\odot}$ , même en intégrant prudemment une fonction de masse de Salpeter plutôt que la fonction de masse que nous dérivons et qui, étant dominée par les étoiles massives, prévoit une masse encore inférieure. Au contraire, les modèles qui tentent d'expliquer cette population d'étoiles massives au moyen d'un amas formé à distance nécessitent une masse totale  $\geq 10^5 M_{\odot}$ . Nos observations sont donc très défavorables à ce type de modèles. Le mode de formation *in situ* semble finalement plus à même de reproduire les observations.

Cet article a suscité une vive controverse, l'équipe d'Andrea Ghez (UCLA) cherchant à démontrer qu'il n'existe qu'un seul disque (Lu et al. 2009).

### 2.2.2- L'AMAS COMPACT GCIRS 13E

Au cours de notre travail sur les étoiles à Hélium du parsec central (Paumard et al. 2001), nous avons remarqué que l'une de ces étoiles, GCIRS 13E à  $\approx 3''$  du trou noir Sgr A\*, était multiple avec trois composantes serrées ayant des vitesses propres très similaires. Il est également apparu que ce groupe coïncidait avec une source ponctuelle brillante du domaine submillimétrique à celui des rayons X.

Afin d'étudier cette source plus en détails, j'ai analysé dans Maillard et al. (2004) des images HST, Gemini et ESO 3.6m de celle-ci à l'aide du logiciel StarFinder (Diolaiti et al. 2000) d'une part et de l'algorithme de déconvolution MCS (Magain et al. 1998). Nous avons ainsi montré que cette source était probablement un amas compact d'étoiles massives, contenant plusieurs étoiles WR, une supergéante OB et d'autres étoiles dont le type spectral demeure à déterminer, dans un diamètre de  $\approx 0,5''$  ( $\approx 4000$  UA). Dans Paumard et al. (2006), nous montrons une image NACO/VLT en bande H très profonde de cet

amas (Fig. 7). Le nombre de sources présentes dans un rayon de 0,68" autour de GCIRS 13E (46 sources avec  $m_H \leq 20,4$ ) correspond à une densité projetée  $\approx 2,4$  fois plus élevée que la densité moyenne environnante. Par un argument statistique rigoureux, j'ai rejeté à plus de  $3\sigma$  la possibilité que cette surdensité corresponde à un alignement fortuit d'étoiles.

Nous sommes amenés à en conclure que GCIRS 13E est bien un amas compact nécessairement stable. Sa densité ( $>3 \cdot 10^8 M_\odot/\text{pc}^3$ ) est même parmi les plus élevées connues, surpassée seulement par celle autour de Sgr A\*. La dispersion des vitesses en son sein ainsi que la nécessité de résister aux forces de marées dues au trou noir supermassif Sgr A\* indiquent que GCIRS 13E a une masse totale  $>10^{3-4}$  masses solaires. À l'heure actuelle, les étoiles ne semblent contribuer à cette masse qu'à hauteur de  $<10^3 M_\odot$ , ce qui suggère l'éventualité qu'un trou noir de masse intermédiaire pourrait constituer l'essentiel de la masse de l'amas.

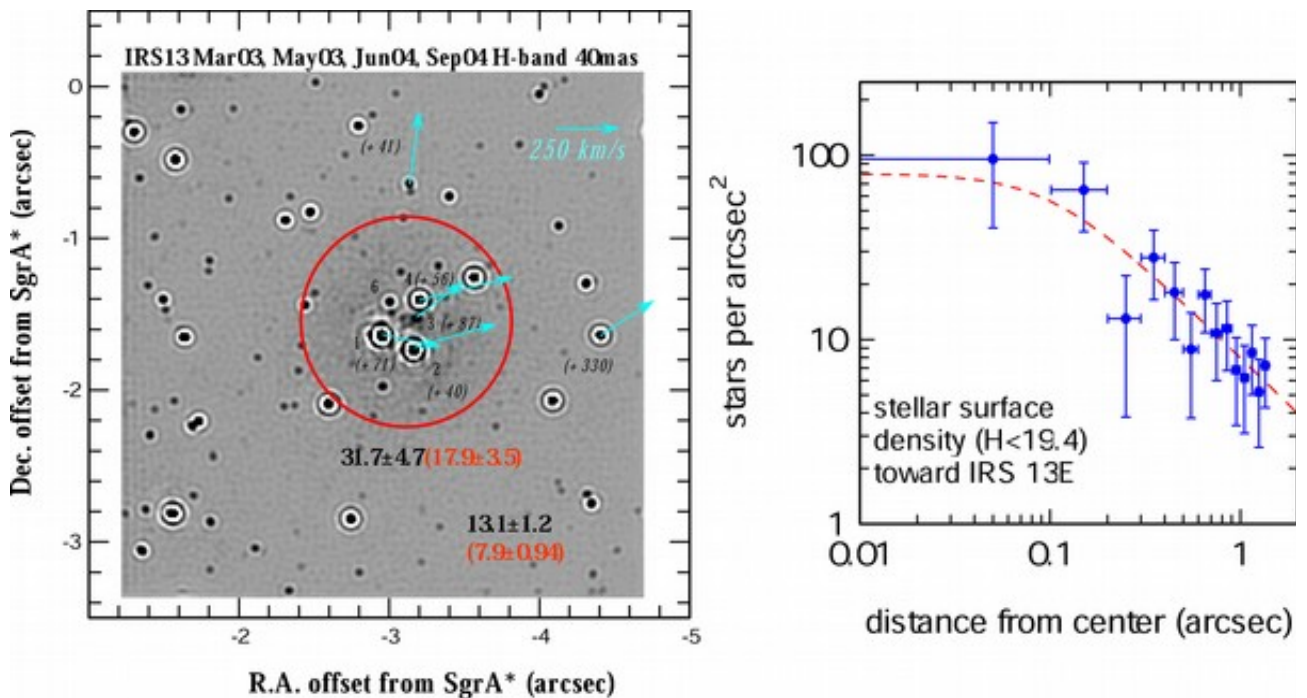


Figure 7: Gauche : image profonde de GCIRS 13E en bande H. L'image a une dynamique de 9 magnitudes. Le cercle central a un rayon de 0,68". Les nombres en noir indiquent les densités surfaciques d'étoiles détectées par StarFinder jusqu'à la magnitude  $m_H = 20.4$  et entre parenthèses jusqu'à la magnitude 19.4, à l'intérieur et à l'extérieur du cercle. Droite : densité surfacique d'étoiles en fonction de la séparation au centre de GCIRS 13E. La courbe est un ajustement de modèle où la densité est proportionnelle à  $1/(r^2 + r_{\text{core}}^2)$  avec  $r_{\text{core}} = 0.17''$ . Paumard et al. (2006).

L'amas lui-même fait partie du second des deux disques stellaires du parsec central et est sur une orbite excentrique autour de Sgr A\*. Bien qu'il soit tentant d'interpréter GCIRS 13E comme le cœur résiduel d'un amas qui aurait migré vers le parsec central après une formation à distance (comme nous le faisons dans Maillard et al. 2004), il apparaît tout à fait plausible que l'amas se soit formé directement au sein d'un disque d'accrétion dans le parsec central.

Ces conclusions sont toutefois encore débattues. Elles se basent en effet sur l'hypothèse selon laquelle les 46 sources ponctuelles observées en bande H sont bien des étoiles. Un travail indépendant (Fritz et al. 2010) suggère qu'il pourrait en fait s'agir de globules de poussière issus de l'interaction entre les vents des trois étoiles massives bien connues. Si tel était le cas, le raisonnement montrant la probable présence d'un trou noir intermédiaire serait moins solide.

### 2.2.3- GCIRS 7

Parmi les milliers d'étoiles du Centre Galactique, GCIRS 7 revêt une importance particulière à plus d'un titre. Dix fois plus lumineuse que toute autre étoile du parsec central, cette étoile variable est l'unique représentante de la classe des supergéantes rouges au sein de l'amas nucléaire. De ce fait, sa seule présence permet de contraindre fortement l'âge du dernier événement de formation stellaire qui a eu lieu dans le parsec central.

Outre son intérêt scientifique, cette étoile est importante pour des raisons techniques. Rappelons que 30 magnitudes d'extinction nous cachent le centre de la Voie lactée en lumière visible. Par conséquent, il n'y a pas d'étoile à proximité immédiate de Sgr A\* qui permettrait d'asservir un système d'optique adaptative dans ce domaine de longueur d'onde. GCIRS 7 est l'étoile qui sert de référence naturelle pour tous les senseurs de fronts d'onde infrarouges utilisés pour mener des études haute résolution dans le parsec central. De la même manière, c'est la seule étoile de la région qui permette l'asservissement du suiveur de franges de GRAVITY lorsqu'on utilise cet instrument avec les télescopes auxiliaires (ATs) du VLTI (Sect. 2.4.2).

Afin de mieux connaître cette étoile aussi bien pour la qualifier en tant qu'étoile de référence pour le suiveur de franges de GRAVITY que pour dater l'amas d'étoiles massives du Centre Galactique, j'ai acquis en 2013 des données avec l'instrument interférométrique PIONIER sur le VLTI (Le Bouquin et al. 2011) sur cette étoile. Il est apparu qu'elle était plus faible lors des observations que ce que nous escomptions. De plus, le contraste des franges de l'étoile ne correspondait pas à ce qui avait préalablement été publié (Pott

et al. 2008). Cela nous a amené à revisiter la courbe de lumière de cette étoile (connue depuis les années 1970) ainsi que toutes les données spectroscopiques et interférométriques disponibles dans l'archive ESO. Pour la première fois, nous avons pu mettre en évidence la régularité de la courbe de lumière de l'étoile, qui contient deux fréquences principale, une période courte autour de 470 jours et une période longue autour de 2800 jours. Cela nous a permis de placer l'étoile précisément sur le diagramme Hertzsprung–Russel et de conclure qu'il s'agit d'une étoile M1 supergéante, d'une masse initiale comprise entre 20 et 25  $M_{\odot}$  et âgée de 6,5 à 10 millions d'années. La taille et les fréquences de pulsation que nous trouvons sont en parfait accord avec ce type stellaire (Fig. 8, Paumard et al. 2014a).

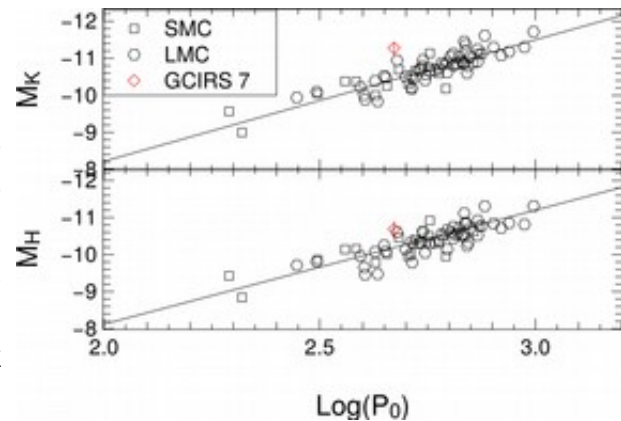


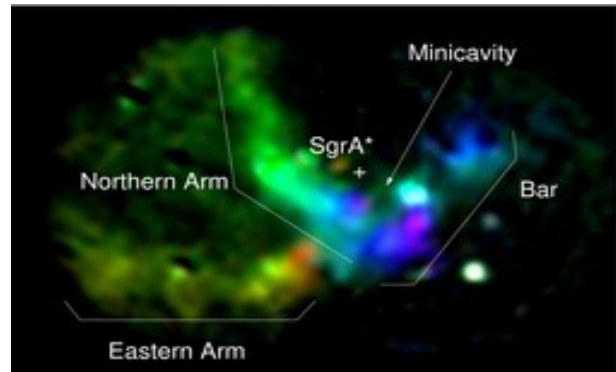
Figure 8: Position de GCIRS 7 (symbole rouge) sur le diagramme période-luminosité établi pour les supergéantes rouges des Petit et Grand Nuages de Magellan par Yang & Jiang (2012).

### 2.3 STRUCTURE ET DYNAMIQUE DU MILIEU INTERSTELLAIRE

Au cours de mes recherches, je ne me suis pas intéressé qu'à la population stellaire du parsec central, mais également au milieu interstellaire qui baigne les étoiles. J'ai commencé en thèse par m'intéresser à la structure de gaz ionisé que l'on appelle la « Minispirale ». J'ai là encore utilisé des données BEAR du parsec central autour de raies d'hydrogène et d'hélium atomique (Fig. 9, Paumard et al. 2004b). Après avoir développé une méthode de décomposition du cube de spectro-imagerie en composantes continues dans la direction spectrale, j'ai démontré que le gaz ionisé qui constitue la Minispirale est la surface de plusieurs nuages de poussière qui orbitent autour du trou noir central dans plusieurs plans et proposé un modèle tridimensionnel de la composante la plus étendue, le Bras nord. Ce travail met en évidence le fait que la « Minispirale » n'est pas une spirale : elle doit son aspect à un effet de projection, mais n'est pas une structure plane parcourue par une onde de densité.

Modéliser la structure tridimensionnelle du parsec central est à la fois ardu et utile. On sait maintenant que les étoiles jeunes (cf. section précédente) ont

des orbites quasi-circulaires et coplanaires, essentiellement dans un plan. Cela semble indiquer que ces étoiles se sont formées au sein d'un disque d'accrétion de quelques dizaines de milliers de masses solaires qui aurait été en orbite autour du trou noir à cette époque. La Minispirale n'est pas assez massive pour former à elle seule un tel disque d'accrétion. En revanche, le CND qui entoure à l'heure actuelle tout le parsec central pourrait atteindre la masse de  $10^4$  masses solaires. Il est possible que certains morceaux du CND dont l'orbite aurait été perturbée. Mieux comprendre sa



*Figure 9: Carte trois couleurs de la Minispirale dans la raie Bry de tout le parsec central pourrait atteindre la masse de  $10^4$  masses solaires. Il est possible que certains morceaux du CND dont l'orbite aurait été perturbée. Mieux comprendre sa*

dynamique permettra d'élucider son origine et, par là même, d'étudier la stabilité du CND. En outre, la connaissance de la structure du gaz permettra d'affiner celle du positionnement des étoiles le long de la ligne de visée. En effet, certaines étoiles sont en interaction avec le gaz (notamment celles qui sont responsables de son ionisation et d'autres qui traversent le gaz en formant des ondes de choc, Tanner et al. 2005). Par ailleurs, en déterminant le taux d'extinction qui affecte le spectre d'une étoile, on peut déterminer si elle se trouve en avant plan ou en arrière plan de la Minispirale, ce qui permet de contraindre sa position le long de la ligne de visée à condition de connaître celle du nuage de gaz.

J'ai participé en mai 2010 (depuis Los Angeles) et juillet 2011 (depuis Meudon) à des observations du CND avec l'équipe de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA) : Mark Morris, Andrea Ghez et Tuan Do. Ce dernier s'est chargé de la réduction des données. Pour ma part, j'ai mené l'effort d'analyse en vue de résoudre les deux principales difficultés :

- le rapport signal sur bruit des raies étudiées est relativement faible, en particulier en présence d'étoiles sur la ligne de visées qui ajoutent du bruit de photons ;
- la résolution spectrale d'OSIRIS varie d'un pixel à l'autre tout en étant du même ordre que la largeur intrinsèque des raies observées (tous deux varient dans la gamme  $\simeq 30-60 \text{ km.s}^{-1}$ ).

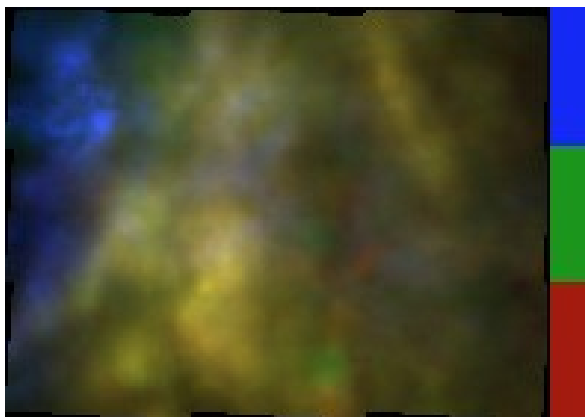


Figure 10: Carte de flux d'une partie du CND, extraite d'un ajustement de modèle incluant de la régularisation. Le flux de la raie Bry est représenté en bleu, deux raies de  $H_2$  sont représentées en vert et rouge. On devine des grumeaux de taille variée, des filaments, et ce qui semble être un front d'ionisation entre les deux espèces.

J'ai été amené à développer une méthode d'analyse originale s'appuyant sur le concept de régularisation, comme en déconvolution, en vue d'extraire les cartes de flux, de largeur intrinsèque des raies et de vitesse radiale du gaz en exploitant l'information de continuité attendue sans pour autant perdre en résolution spatiale (Paumard et al. 2014b). Ce travail d'analyse est en cours de finalisation. Il nous reste à interpréter les structures qui apparaissent sur ces cartes et à mesurer la signification statistique de ces structures (Fig. 10). L'ensemble de ce travail donnera lieu à une publication en premier auteur avec une probable soumission en 2018.

Cet article a été retardé car je souhaitais avoir une confirmation robuste de la validité du code d'ajustement 3D. C'est ce qu'a apporté la thèse de doctorat de Anna Ciurlo, intitulée « *Physical and dynamical conditions of the molecular gas in the central parsec of the Galaxy* » et soutenue en décembre 2015. Avec la méthode d'ajustement global de raies sur un cube de données décrite ci-dessus, Anna a réanalysé les données SPIFFI que j'avais utilisées pour étudier la population stellaire du parsec central dans Paumard et al. (2006 ; Sect. 2.2.1) en se concentrant sur le milieu interstellaire.

Au cours de cette thèse que j'ai co-dirigée avec Daniel Rouan et Yann Clénet, Anna a reconstruit les cartes d'intensité, vitesse radiale et largeur de raie pour plusieurs raies spectrales. Elle a complété cette analyse par une étude plus classiques dans certaines région du champs de quelques raies trop faibles pour être détectées sur tout le champ pixel par pixel.



Ces cartes démontrent que l'hydrogène moléculaire est présent partout dans le parsec central, un environnement réputé complètement ionisé. De façon encore plus surprenante, on s'aperçoit que l'extinction et l'intensité du rayonnement sont corrélées : l'intensité intrinsèque du rayonnement est plus grande là où l'extinction est plus grande. Les diagrammes d'excitation montrent que certaines régions (notamment le CND) sont thermalisées avec des températures extrêmement élevées alors que d'autres ne sont pas thermalisées.

L'ensemble de ces observations nous amène aux conclusions suivantes :

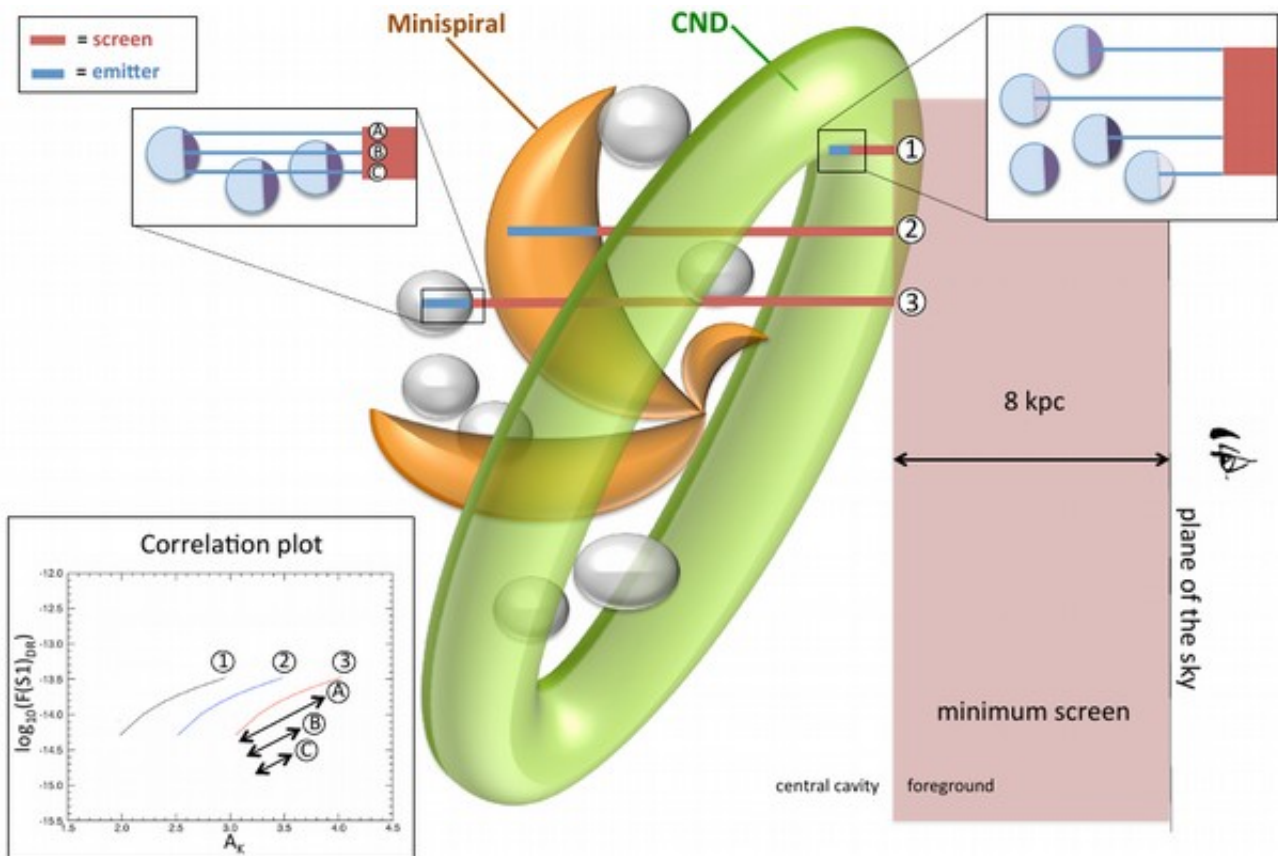


Figure 11: Schéma du parsec central d'après Ciurlo et al. (2017). Des corrélations locales apparaissent sur le graphe traçant le flux dérougi en fonction de l'extinction (en bas à gauche). L'interprétation que nous proposons est que l'absorbeur et l'émetteur sont en partie mélangés dans le parsec central, avec des contributions du CND, dense et relativement froid (en vert), de la Minispirale plus chaude (en orange), et d'autres grumeaux de milieu interstellaire (en gris). Le tout se trouve derrière un écran en avant-plan (en mauve). Le milieu est partout grumeleux, l'émission de  $H_2$  en bande K se faisant à la surface des grumeaux.

- de la poussière est présente partout dans le parsec central, aussi bien au sein des structures bien connues du milieu interstellaire qu'en dehors ;
- à la surface des grains de poussière se forme en permanence de l'hydrogène moléculaire qui, en fonction de l'intensité du champ de radiation, peut être dissocié plus ou moins rapidement ;
- les raies observables dans la bande K ne permettent d'accéder qu'aux zones où l'hydrogène moléculaire est le plus chaud : en ce qui concerne le CND, elles ne permettent d'étudier que la surfaces des fragments de nuage exposée au champ ionisant ;
- le rayonnement ionisant pénètre plus profondément dans le nuage de poussière associé au Bras Nord de la Minispirale que dans les fragments du CND ;
- toute carte d'extinction du parsec central est imparfaite, car les sources d'émissions sont mélangées avec une quantité de poussière suffisante pour faire varier significativement l'extinction en fonction de la position sur la ligne de visée.

Ces résultats font l'objet de deux publications : Ciurlo et al. (2016, 2017).

## **2.4 CONTRAINDRE OBSERVATIONNELLEMENT LA NATURE DE SGR A\***

### **2.4.1- LE CENTRE GALACTIQUE ET LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE**

La première source radio astrophysique (Sgr A) a été découverte par hasard en 1933 dans la direction du Sagittaire. Dans les années 1970, il a été possible par interférométrie radio de distinguer au sein de cette région une source ponctuelle, Sgr A\*. Très vite, cette source a été soupçonnée de correspondre à un trou noir supermassif. Cependant il a fallu attendre les années 1990 pour détecter les mouvements d'étoiles très proches de cet objet compact, les étoiles « S », comme *star*, ce qui a permis de mesurer avec précision à la fois la distance et la masse de l'objet (Schödel et al. 2002).

Les étoiles les plus proches du trou noir connues actuellement ont des orbites parfaitement képlériennes (dans les limites des erreurs de mesure) avec des périodes de l'ordre de la décennie. La plus célèbre d'entre elles, S2 ou S0-2, a une période de  $\approx 15$  ans et est passée au périapse en 2002 à une vitesse de plusieurs milliers de kilomètres par seconde. Son prochain passage au périastre est donc attendu pour le premier semestre 2018. On s'attend cependant à ce que ces orbites ne soient pas des ellipses parfaites. D'une part,

la composante de masse étendue nécessairement présente au cœur de la Galaxie sous la forme d'étoiles, de résidus stellaires (trous noirs stellaires entre autres) et peut-être de matière noire plus exotique doit avoir pour effet une précession allant dans le sens d'un recul du périapse. Cet effet permet de donner des contraintes sur cette composante étendue (Rubilar & Eckhart 2001). En outre, les orbites doivent être affectées par plusieurs effets relativistes, en particulier une avancée du périapse (comparable à celle du périhélie de Mercure) et une précession supplémentaire hors du plan orbital due à l'entraînement du référentiel par le trou noir si celui-ci est en rotation ; si l'objet n'est pas un trou noir ou si la relativité générale perd de sa validité en champ fort, des perturbations d'ordre élevé des orbites peuvent apparaître.

Ces perturbations seront très difficiles à observer car elles sont d'une amplitude faible à cette distance du trou noir et ne s'exprimeront qu'après plusieurs périodes orbitales, donc après plusieurs dizaines d'années. Mesurer les orbites d'autres étoiles nettement plus proches du trou noir, c'est-à-dire dans la tache de diffraction du VLT ( $\approx 60$  millisecondes d'angle, mas), amènerait à mesurer ces effets beaucoup plus rapidement, d'une part parce qu'ils seront plus prononcés (en particulier les effets relativistes), d'autre part parce que les périodes orbitales seront beaucoup plus courtes (de l'ordre de l'année !).

Une deuxième opportunité de sonder l'espace-temps à proximité de l'horizon des événements du trou noir est apportée par la présence de ses sursauts. En effet, ce n'est pas le trou noir lui-même qui brille, mais son environnement. On pense en effet que la source des sursauts est compacte et se situe à seulement quelques rayons de Schwarzschild de l'objet massif. Par conséquent, la matière qui produit le rayonnement des sursauts est animée d'une vitesse relativiste. Il est certes encore impossible de produire des images à cette résolution, en particulier en infrarouge proche, longueur d'onde à laquelle se produisent les sursauts. Le VLTI devrait cependant permettre de mesurer l'astrométrie de leur photocentre. Son déplacement apparent contiendra la signature de la métrique à travers les effets de lentille gravitationnelle dus à l'objet central. Enfin, les effets de lentille gravitationnelle seront également sensible sur l'ensemble des étoiles qui orbitent autour de Sgr A\*.

#### **2.4.2- L'INSTRUMENT GRAVITY**

L'observation d'objets faibles depuis le sol est limitée par la présence de l'atmosphère terrestre en raison de plusieurs phénomènes physiques, au nombre desquels la turbulence atmosphérique, qui perturbe le front d'onde en provenance des astres. À l'échelle d'un télescope unique, la solution désormais classique à ce problème est l'optique adaptative : l'analyse en

temps réel du front d'onde d'une étoile de référence (naturelle ou artificielle) permet de corriger cet effet au moyen d'un miroir déformable, le plus souvent en boucle fermée. On peut formuler le problème et sa solution en disant que l'atmosphère induit une non-uniformité de la phase de l'onde à travers la pupille d'entrée du télescope, et que le système d'optique adaptative permet de co-phaser l'onde sur l'ensemble de la pupille. Cependant ce co-phasage se fait à une constante près, variable dans le temps, ce qui fait que les ondes planes reconstituées au sein de deux télescopes distincts sont indépendantes l'une de l'autre. Dans le contexte de l'interférométrie, l'optique adaptative laisse donc un terme de phase appelé piston atmosphérique. Ce sont les variations temporelles de ce terme de piston qui limitent le temps d'intégration possible avec un interféromètre.

Afin d'augmenter sensiblement le temps d'intégration, on peut recourir à un procédé similaire à l'optique adaptative : en observant une étoile de référence suffisamment brillante, on peut détecter les franges d'interférences en un laps de temps court par rapport à la fréquence typique de fluctuation du piston atmosphérique. On peut alors contrôler en temps réel une ligne à retard afin de recentrer ces franges en boucle fermée. Il devient possible d'intégrer plusieurs minutes sur une cible scientifique proche. Un tel système s'appelle un suiveur de franges. Outre le fait de permettre les poses longues en interférométrie, un suiveur de frange permet également de mesurer de façon très précise l'astrométrie de la source scientifique par rapport à la source de référence.

Au début des années 2000, l'ESO a entrepris la construction d'un tel système sous le nom de PRIMA. Au cours de mon post-doc au MPE, j'ai écrit la section *Galactic Center* du document *ESO Reference missions for PRIMA* (Delplancke et al. 2004, ESO STC-362). J'ai démontré qu'avec la précision astrométrique promise par PRIMA (10  $\mu$ as), il devenait possible d'une part de détecter des effets relativistes dans les orbites d'étoiles proches du trou noir central de la Galaxie, et d'autre part de détecter le mouvement des sursauts du trou noir lui-même. J'ai également démontré que les performances de PRIMA ne permettraient pas de mener à bien cette science. En effet, la mesure des mouvements propres des sursauts du trou noir doit se faire à une résolution temporelle bien inférieure à l'échelle de temps dynamique à proximité de celui-ci, c'est à dire à l'échelle de quelques minutes. Or l'incertitude de la mesure astrométrique dans un tel système à référence de phase dépend du temps d'intégration et de la séparation entre les deux sources (source de référence et source scientifique) de telle sorte qu'une précision de 10  $\mu$ as ne peut être atteinte en quelques minutes de temps que si la séparation entre les

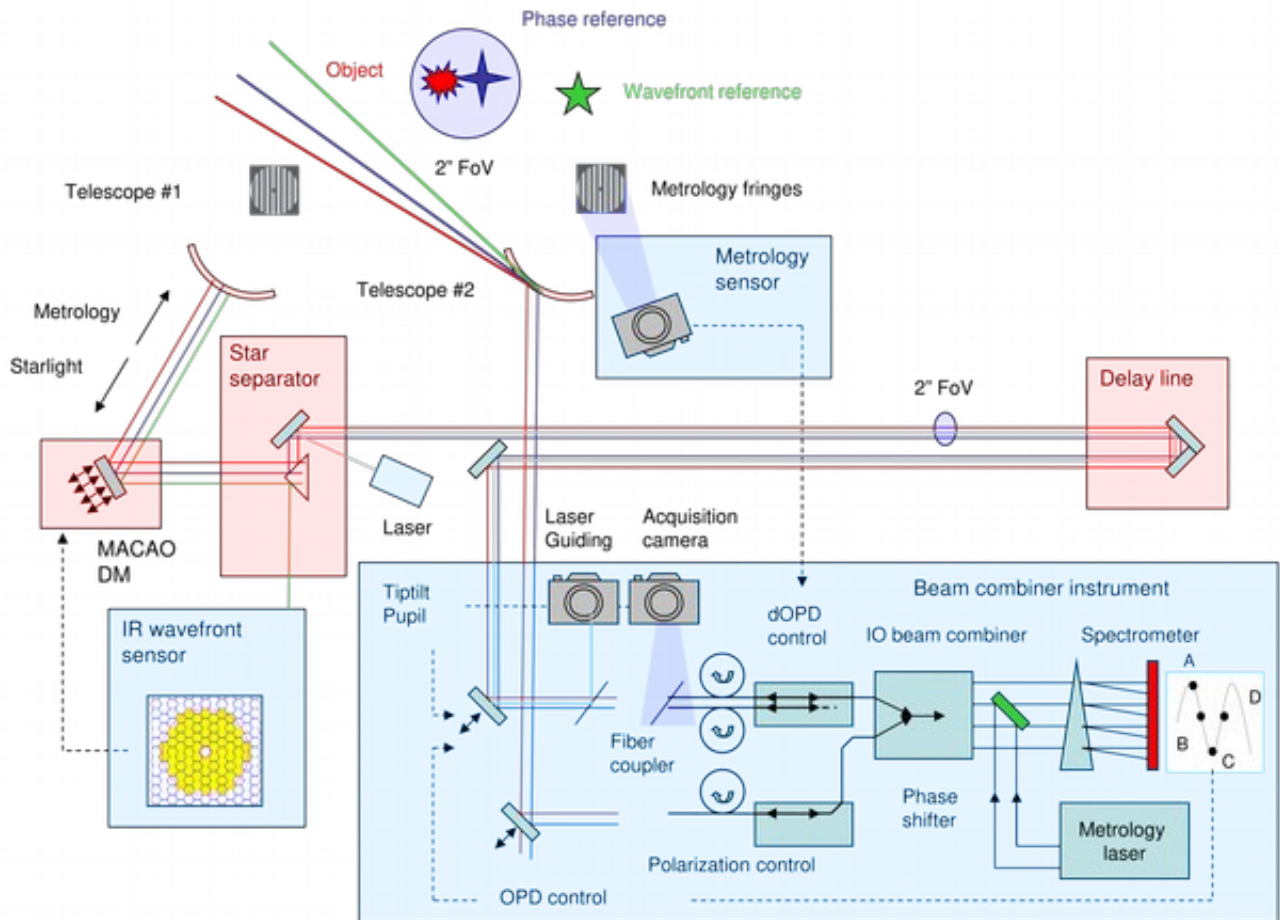


Figure 12: Schéma de principe de GRAVITY. Les séparateurs d'étoiles de PRIMA (star separators, STS) peuvent être utilisés pour sélectionner une étoile de référence hors axe pour le senseur de front d'onde infrarouge CIAO fourni dans le cadre du projet GRAVITY. L'autre champ de 2" sur les UTs (4" sur les ATs) est envoyé vers les lignes à retard du VLTi. GRAVITY y sélectionne deux sources (qui peuvent être la même grâce à un séparateur de faisceau) dans deux fibres optiques par télescope. Ces fibres optiques transportent le faisceau vers deux recombineurs en optique intégrée (un par source) qui délivrent quatre échantillons de la figure d'interférence pour chacune des six paires de télescopes. Un spectromètre disperse alors ces 24 sorties sur un détecteur. L'une des voies fonctionne à 1 kHz pour servir de suiveur de franges. GRAVITY collaboration (2017a).

deux sources n'est que de quelques secondes d'angles. Les contraintes instrumentales de PRIMA ne permettait pas de faire cette mesure.

De là est partie l'idée d'une collaboration entre le MPE et le LESIA autour d'un instrument inspiré de l'instrument PRIMA, mais plus performant pour le CG. Petit à petit, cette idée est devenue le projet GRAVITY, impliquant six

laboratoires de trois pays différents : l'institut Max-Planck pour la physique extraterrestre (MPE, Garching) ; le LESIA ; l'institut Max-Planck pour l'astronomie (MPIA, Heidelberg) ; l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble (IPAG) ; l'Université de Cologne ; et le Laboratoire pour les systèmes, l'instrumentation et le modélisation en science et technologie pour l'espace et l'environnement (SIM, Lisbonne). GRAVITY (Fig. 12) est un instrument complexe : c'est un instrument interférométrique à quatre faisceaux pour l'Interféromètre du très grand télescope (*Very Large Telescope Interferometer*, VLTI). Il contient, entre autres sous-systèmes, un senseur de front d'onde infrarouge et un suiveur de franges (élaboré et fabriqué par le LESIA) pour aplanir et mettre en phase de le front d'onde, un recombineur quatre faisceaux en optique intégrée, un système de guidage, de télémétrie laser et un spectro-polarimètre. GRAVITY opère en bande K.

#### **2.4.3- MODÉLISATION DES SURSAUTS DE SGR A\***

Afin de simuler le cas scientifique d'abord pour PRIMA puis pour le projet qui allait devenir GRAVITY, j'ai contacté Thomas Müller de l'Université de Tübingen. En effet cette personne était en mesure de me fournir des images d'une sphère en orbite autour d'un trou noir, prenant en compte les effets de lentille gravitationnelle et donnant l'information nécessaire pour remonter à des effets tels que l'effet Doppler. J'ai travaillé sur ces images pour produire les courbes de lumière et les trajectoires apparentes du sursauts du trou noir (Fig. 13), en fonction de l'inclinaison du disque d'accrétion et de la couleur de l'émission. J'ai ajouté un bruit de mesure de 10  $\mu$ s à ces simulations et montré qu'un instrument comme GRAVITY pourrait accéder à des informations précieuses concernant aussi bien la nature des sursauts que la métrique de l'espace-temps. J'ai en outre également simulé l'observation interférométrique d'un groupe d'étoiles plus proches du trou noir que les étoiles S et montré que la couverture du plan u-v offert par les quatre UT était suffisante pour suivre l'évolution d'un petit nombre d'étoiles se déplaçant de mois en mois et ainsi observer la précession relativiste sur leurs orbites.

J'ai présenté ces travaux lors de l'atelier VLTI 2005 (Paumard et al. 2008). J'ai également écrit un article de rang A concernant les simulations relativistes que j'avais menées avec Thomas Müller. Pour des raisons personnelles, je n'ai pas été en mesure de pousser cet article jusqu'à sa publication et ai donc cédé la place de premier auteur à un jeune étudiant prometteur, Nico Hamaus (Hamaus et al. 2009).

#### 2.4.4- DIRECTION SCIENTIFIQUE DU PROJET GRAVITY

Étant donnée ma place dans la gestation du projet GRAVITY, c'est tout naturellement que j'ai été appelé à en être le Scientifique du projet (*Project Scientist*). Je consacre à ce projet une part considérable de mon temps. J'ai notamment passé environ un quart de mon temps à Paranal au cours des deux années de commissioning. Il m'incombait, aidé du groupe scientifique (une vingtaine de chercheurs des six instituts du consortium) de définir les objectifs scientifiques de l'instrument, y compris pour toute la science que la communauté voudra étudier en dehors du CG et de vérifier que les compromis qui ont dû être faits lors de la phase de design définitif n'allaient pas à l'encontre de l'intérêt de la Science. GRAVITY a passé avec succès la revue d'acceptation préliminaire en Europe (PAE), ce qui lui a permis de partir au Chili en juillet 2015. La mise en service (*commissioning*) de l'instrument continue, en particulier pour ce qui concerne les erreurs systématiques pour l'astrométrie. Il est cependant offert au public depuis octobre 2016. L'instrument est fonctionnel. On rapporte notamment la détection de Sgr A\* et de S2, démontrant la capacité de l'instrument à suivre les franges sur des sources de magnitude  $m_K = 10$  pour intégrer la figure d'interférences pendant des minutes entières sur la voie scientifique et former des franges sur des objets 100 fois plus faibles que possible auparavant ( $m_K = 15.5$ ), avec une limite de détection dans le champ de  $m_K = 18$ . On démontre également une précision de mesure de la phase spectro-différentielle (c'est à dire par exemple l'astrométrie dans une raie relativement au continuum) de 2  $\mu$ as. L'instrument ainsi que ses performances et de premiers résultats scientifiques ont été présentés dans GRAVITY

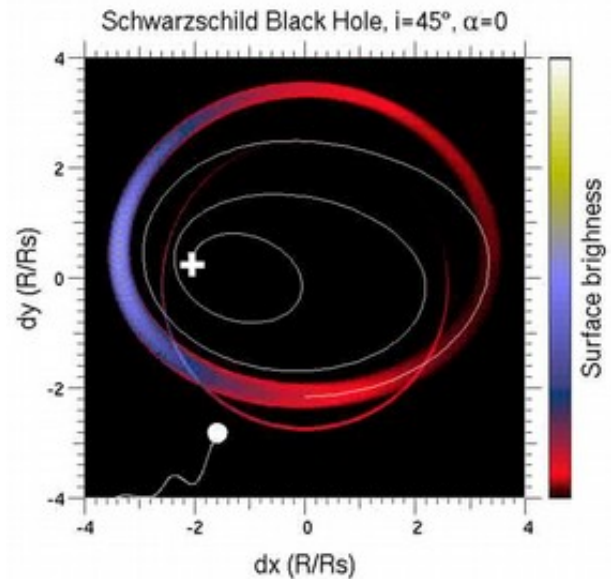


Figure 13: Modèle géométrique de sursaut (image extraite d'une animation) que j'ai réalisé en post-traitement à partir d'images individuelles d'une sphère en orbite. Dans ce modèle, le sursaut s'étire à partir d'un point pour finalement illuminer toute la dernière orbite stable. On voit l'image primaire de cette orbite déformée par effet de lentille ainsi que son image secondaire qui prend l'apparence d'un cercle presque parfait en arrière plan. La spirale blanche représente la trajectoire du centroïde. la courbe en bas terminée par un point blanc représente la courbe de lumière.

Collaboration (2017a, b, c, d, e). J'ai coordonné ce cinquième article et en suis le premier auteur correspondant. L'instrument s'apprête à passer la revue d'acceptation préliminaire au Chili (PAC) pour les modes qui sont déjà offerts au public, c'est à dire tous sauf l'application à l'astrométrie.

Depuis le début du projet, j'ai organisé divers réunions internes au consortium, mais également la session de deux après-midi dédiée à GRAVITY lors de la Semaine de l'astrophysique française (SF2A 2014). J'ai coordonné la préparation du document de justification scientifique de l'instrument (*GRAVITY Science Cases & Observing Strategies*) et élaboré le plan de mise

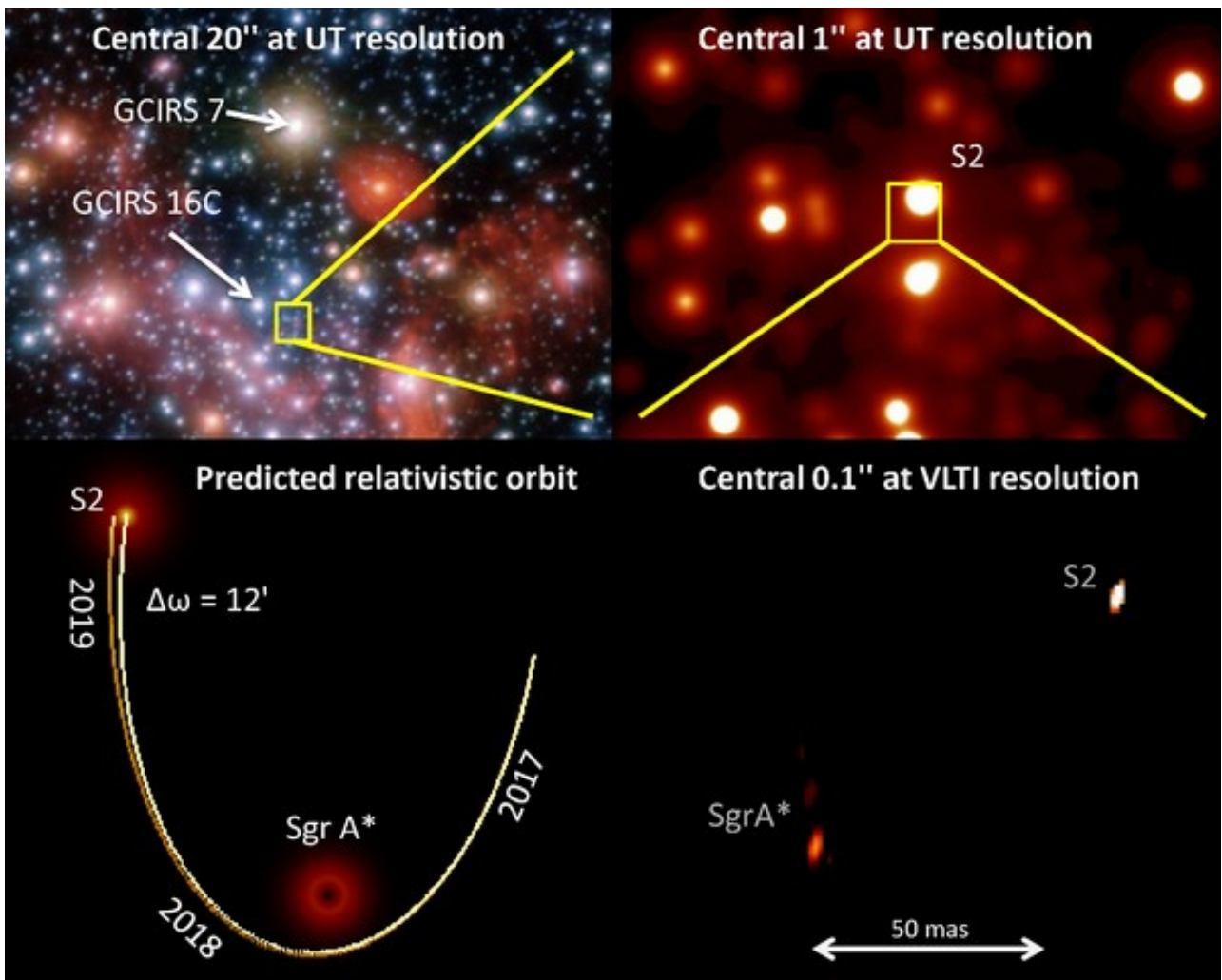


Figure 14: Première détection interférométrique de Sgr A\* par GRAVITY. En haut à gauche : le parsec central et les étoiles de référence pour l'optique adaptative et le suivi de franges. En haut à droite : la seconde d'angle centrale vue par NACO. En bas à droite : Sgr A\* et S2 vus par GRAVITY. En bas à gauche : la précession relativiste de S2 sera démontrée dès 2019. GRAVITY collaboration (2017e).



en service (*Commissioning Plan*) de l'instrument, ensemble de tests qui ont été effectués de 2015 à 2017 afin de vérifier que l'instrument se comporte correctement et de mesurer ses caractéristiques fondamentales (transmission, résolution spectrale, sensibilité à la précision du pointage...) lors d'observations réelles. Pour la PAE de GRAVITY, j'ai également préparé le Manuel de l'utilisateur (*User Manual*) ainsi que le Manuel des modèles (*Template Manual*), qui constituent les deux documents les plus visibles par l'utilisateur final, l'un expliquant ce que l'on peut faire avec l'instrument et l'autre documentant l'interface utilisateur au format ESO. Je suis maintenant très impliqué dans le commissioning et je coordonne les observations en temps garanti.

#### **2.4.5- GYOTO : LOGICIEL DE SIMULATION RELATIVISTE**

Les cas scientifiques clef du projet GRAVITY concernent tous deux la mesure de la métrique de l'espace-temps autour du trou noir central de la Galaxie : d'une part en mesurant le déplacement d'étoiles en orbite dans cette métrique, d'autre part en analysant les effets de lentille gravitationnelle sur des rayons émis au plus près de l'horizon des événements du trou noir. Lors de mes premiers travaux sur le sujet en tant que post-doc au MPE et peu après, j'ai utilisé une approximation post-newtonienne pour calculer les orbites d'étoiles et j'ai sous-traité la question du calcul des effets de lentilles gravitationnelles du trou noir à un collaborateur de l'Université de Tübingen (Hamaus et al. 2009). Cette façon de travailler n'apporte pas la souplesse nécessaire au développement approfondi d'idées neuves. Par conséquent, une fois que j'ai été recruté, j'ai profité de la richesse de l'Observatoire de Paris pour rencontrer plusieurs personnes dont les intérêts convergeaient avec les miens mais qui avaient des profils différents, notamment Guy Perrin et Éric Gourgoulhon.

Ensemble, nous avons lancé le projet GYOTO<sup>2</sup> de calcul de géodésiques en relativité générale. Ce code permet de calculer des orbites d'étoiles entièrement relativistes aussi bien que des images affectées d'effets de lentille forts. On peut choisir une ou plusieurs longueurs d'ondes d'observation et ainsi calculer le spectre apparent de l'objet. Ces calculs peuvent se faire, naturellement, dans le cadre de la métrique de Kerr, qui décrit l'espace-temps entourant un trou noir (en rotation ou non). Ce projet est à l'interface entre les trois composantes de l'astrophysique : instrumentation, observation et théorie.

La première spécificité de GYOTO est de permettre les mêmes calculs dans des métriques alternatives, correspondant à des objets compacts exotiques

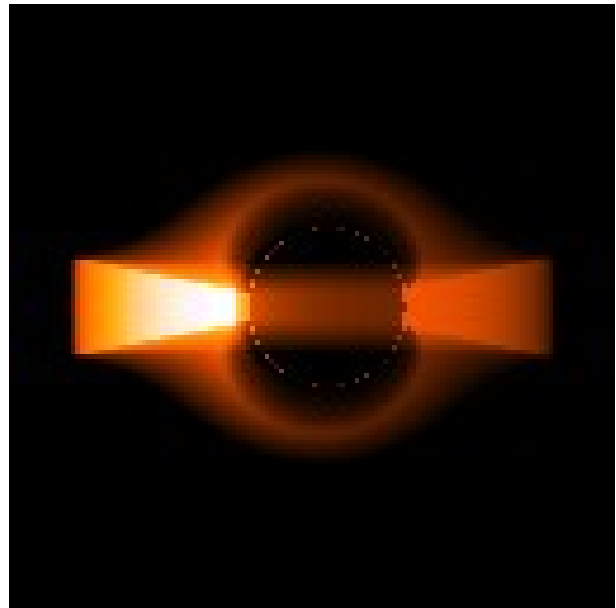
---

2 <http://gyoto.obspm.fr/>

n'ayant pas nécessairement d'horizon des événements (par exemple l'étoile bosonique). Ainsi nous pouvons simuler une variété d'orbites et d'images afin de déterminer comment l'on pourra différencier observationnellement entre ces différentes métriques.

La deuxième spécificité de GYOTO est le choix qui a été le nôtre dès le départ de le publier comme logiciel libre, en tâchant au maximum de le rendre facile d'utilisation. Dès sa publication, GYOTO proposait trois interfaces programmatiques : une bibliothèque C++, une interface dans le langage interprété Yorick<sup>3</sup> qui permet d'implémenter facilement des algorithmes complexes, et un outil en ligne de commande qui prend en entrée la description d'une scène au format XML et produit en sortie une image au format FITS. Un système de greffons permet de dissocier l'implémentation de cas particuliers (objets astrophysiques et métriques) de l'infrastructure générale. Nous utilisons un greffon privé pour nos développements internes sous embargo. Depuis, GYOTO s'est enrichi notamment avec une interface Python que j'ai écrite et qui permet aussi bien de prototyper une métrique dans ce langage haut niveau que de commander GYOTO pour développer des algorithmes complexes (ajustements de modèles...).

GYOTO est principalement développé à quatre mains : Frédéric Vincent, que j'ai co-encadré pendant sa thèse et qui a maintenant été recruté au LESIA, mène de nombreuses collaborations d'application de GYOTO, pendant que je me charge des développements structurant le code. Mon ambition pour GYOTO est d'en faire la référence du tracé de rayon relativiste. À cette fin,



*Figure 15: Résultat du tracé de rayons GYOTO sur un objet astrophysique implémenté dans le langage interprété Python. L'objet astrophysique « disque épais » est implémenté au moyen d'une douzaine de lignes de code Python qui peuvent être insérées directement dans une description de scène au format XML. L'équivalent en C++ aurait nécessité de créer ou modifier au moins quatre fichiers pour un total de plusieurs dizaines de lignes et la recompilation du greffon contenant cette nouvelle classe.*

<sup>3</sup> <https://github.com/dhmunro/yorick>

GYOTO doit répondre à trois critères : (1) calculer les quantités dont ont besoin les astrophysiciens ; (2) être précis et rapide ; et (3) être facile d'accès et d'utilisation.

De 2013 à 2016, j'ai co-encadré la thèse de Marion Grould, intitulée *From integration to first light with GRAVITY: focus on the environment of black holes*. Le but de cette thèse est l'élaboration d'un code d'ajustement d'orbites relativistes apparentes sur les futures données GRAVITY. Il s'agit d'un problème complexe : les orbites intrinsèques des étoiles doivent être calculées en tenant compte des effets relativistes ; la projection des orbites intrinsèques sur le plan du ciel doit tenir compte tout d'abord de la finitude de la vitesse de la lumière (effet Römer), mais également des effets de lentille gravitationnelle ; la précision astrométrique requise pour l'exploitation des données est très élevée : nous avons fixé la limite à 1  $\mu$ as afin de garantir que l'analyse des données de GRAVITY ne sera pas limitée par la précision du modèle.

Le travail de Marion est un bon exemple d'utilisation des fonctionnalités que j'ai implémentées au sein de GYOTO, d'ailleurs ce travail a été la motivation immédiate pour nombre de ces développements. En effet, afin que Marion puisse se concentrer sur l'algorithme d'ajustement d'orbites et sa validation, il a été décidé que Marion ne s'impliquerait pas du tout dans le code C++. Elle utilise exclusivement l'interface que j'ai développée pour le langage interprété Yorick. Ce qui signifie que c'est moi qui ai fait tous les développements bas niveau au sein du code rendu nécessaires par le travail de Marion.

En outre, Marion a été en mesure de trouver les limites de la précision de GYOTO en étudiant des cas divers et variés à travers ses scripts Yorick. Initialement, la précision de GYOTO n'était pas suffisante pour satisfaire nos besoins scientifiques. J'ai donc modifié GYOTO pour dépasser les limitations exhibées par Marion, par exemple en utilisant les intégrateurs numériques d'ordre élevé de la bibliothèque C++ réputée Boost ou en utilisant des calculs sur 100 bits au lieu de 64 dans des portions clés du code. Enfin, le code d'ajustement d'orbites de Marion demande une puissance de calcul élevée. C'est afin de limiter le temps de calcul de cet ajustement que j'ai parallélisé le code de sorte qu'il puisse utiliser plusieurs nœud d'une grappe de calcul.

Marion a démontré que même dans des cas difficiles, la précision astrométrique de GYOTO est désormais meilleure que la nanoseconde d'angle, et que les effets de lentille ne peuvent jamais être négligés pour l'ajustement d'orbites autour du trou noir central (Grould et al. 2016). On peut résumer le résultat de la sorte : quel que soit son demi-grand-axe, toute orbite vue de

face autour du trou noir central apparaît plus grande de  $10 \mu\text{as}$  qu'elle n'est réellement, dans toutes les directions. Pour des orbites inclinées, l'effet de lentille dépasse  $1 \mu\text{as}$  presque partout, et  $100 \mu\text{as}$  pour les points les plus éloignés de l'observateur. Dans un second article qui utilise massivement GYOTO, Marion montre que l'étude de l'orbite de S2 permettra de détecter un certain nombre d'effets relativistes (notamment le taux de rotation du trou noir), et surtout elle met en évidence les effets qui peuvent ou ne peuvent pas être négligés par un logiciel d'ajustement d'orbites pour décrire correctement les données (Grould et al. 2017).

Pour finir, voici une liste de fonctionnalités que j'ai codées dans ou avec GYOTO :

- architecture générale du code, très modulaire et fondée sur un système de greffons ;
- définition et implémentation des formats d'entrée (XML) et de sortie (FITS) ;
- parallélisation au moyen des *threads* POSIX ;
- optimisation et généralisation des classes implémentant des objets astrophysiques, implémentation de modèles géométriques génériques ;
- implémentation d'une interface exposant les fonctionnalités de GYOTO dans le langage interprété de haut niveau Yorick permettant de commander GYOTO au moyen de scripts complexes, ce qui a grandement simplifié l'implémentation d'outils de haut niveau :
  - simulations instrumentales d'observations (GRAVITY) ;
  - ajustement de modèle sur des données existantes ;
  - tests de non régression du code ;
  - réalisation d'une interface graphique, Gyotoy, permettant à un utilisateur de calculer une orbite d'étoile en métrique de Kerr en choisissant les paramètres de la métrique et les conditions initiales du mouvement ;
  - réalisation d'animations...
- système de construction du logiciel, production de paquets Macports et Debian GNU/Linux ;

- Parallélisation multi-processus (et multi-nœuds) au moyen de l'interface de passage de message (MPI), ce qui permet d'utiliser GYOTO efficacement sur les grappes de calcul ;
- Interfaces bidirectionnelles pour le langage interprété Python : j'ai implémenté une extension GYOTO pour le langage interprété Python et un greffon Python pour GYOTO. Ces deux développements sont complémentaires mais indépendants l'un de l'autre. Le premier rend possible l'utilisation de GYOTO depuis un script Python, afin de développer facilement des algorithmes complexes fondés sur GYOTO. Le second permet d'écrire une nouvelle classe d'objet astronomique, de métrique ou de spectre dans le langage Python. Ce développement rend envisageable par exemple le prototypage d'une nouvelle classe d'objet astrophysique par un étudiant de master dans le cadre d'un stage de trois mois, alors que de tels travaux nécessitaient un investissement en temps bien plus important auparavant (Fig. 15).

GYOTO est déjà incontournable. En effet, tout article parlant de calcul de géodésique se doit de citer GYOTO. C'est en partie ce qui explique le taux de citation élevé du code : parmi les 43 articles de rang A en six ans qui citent GYOTO (Vincent et al. 2011), une moitié mentionnent GYOTO parmi les codes pertinents pour la discipline, l'autre moitié étant essentiellement des applications du code dans lesquelles nous sommes co-auteurs. Seulement deux articles sont des utilisations indépendantes du code, ce qui montre que nous avons encore un effort de pédagogie à fournir pour favoriser ce genre de travaux.

## 2.5 BIBLIOGRAPHIE

- Balick & Brown 1974, *Intense sub-arcsecond structure in the galactic center*, APJ 194:265
- Ciurlo, A.; Paumard, T.; Rouan, D.; Clénet, Y., 2016, A&A 594:A113
- Ciurlo, A.; Paumard, T.; Rouan, D.; Clénet, Y., 2017, A&A, accepté
- Diolaiti, E., Bendinelli, O., Bonaccini, D., Close, L., Currie, D. & Parmeggiani, G. 2000, A&AS, 147:335
- Do, T.; Ghez, A. M.; Morris, M. R.; Yelda, S.; Meyer, L.; Lu, J. R.; Hornstein, S. D.; Matthews, K., 2009, ApJ 691:1021
- Eckart, A.; Genzel, R.; Hofmann, R.; Sams, B. J.; Tacconi-Garman, L. E., 1995, APJ 445:23

- Fritz, T. K.; Gillessen, S.; Dodds-Eden, K.; Martins, F.; Bartko, H.; Genzel, R.; Paumard, T.; Ott, T.; Pfuhl, O.; Trippe, S.; Eisenhauer, F.; Gratadour, D., 2010, ApJ 721:395
- Genzel, R.; Schödel, R.; Ott, T.; Eckart, A.; Alexander, T.; Lacombe, F.; Rouan, D.; Aschenbach, B., 2003, Nature 425:934
- Gravity Collaboration, 2017a, A&A 602:A94
- Gravity Collaboration, 2017b, A&A 602:L11
- Gravity Collaboration, 2017c, ApJ 844:72
- Gravity Collaboration, 2017d, A&A accepté
- Gravity Collaboration, 2017e, the ESO Messenger, sous presse
- Grould, M.; Paumard, T.; Perrin, G., 2016, A&A 591:A116
- Grould, M.; Vincent, F. H.; Paumard, T.; Perrin, G., 2017, A&A, sous presse
- Hall, D.N.B, Kleinman, S.G., Scoville, N.Z., 1982, ApJ 260:L53  
Le Bouquin, J. - B.; Berger, J. -P.; Lazareff, B.; Zins, G.; Haguenaer, P.; Jocu, L.; Kern, P.; Millan-Gabet, R.; Traub, W.; Absil, O.; Augereau, J. -C.; Benisty, M.; Blind, N.; Bonfils, X.; Bourget, P.; Delboulbe, A.; Feautrier, P.; Germain, M.; Gitton, P.; Gillier, D. Kiekebusch, M.; Kluska, J.; Knudstrup, J.; Labeye, P.; Lizon, J. -L.; Monin, J. -L.; Magnard, Y.; Malbet, F.; Maurel, D.; Ménard, F.; Micallef, M.; Michaud, L.; Montagnier, G.; Morel, S.; Moulin, T.; Perraut, K.; Popovic, D.; Rabou, P.; Rochat, S.; Rojas, C.; Roussel, F.; Roux, A.; Stadler, E.; Stefl, S.; Tatulli, E.; Ventura, N., 2011, A&A 535:A67
- Hamaus, N.; Paumard, T.; Müller, T.; Gillessen, S.; Eisenhauer, F.; Trippe, S.; Genzel, R., 2009, ApJ 692:902
- Lu, J. R.; Ghez, A. M.; Hornstein, S. D.; Morris, M. R.; Becklin, E. E.; Matthews, K., ApJ 690:1463
- Magain, P., Courbin, F. & Sohy, S. 1998, ApJ, 494:472
- Maillard, J. P., 2000, dans *Imaging the Universe in Three Dimensions*, Proceedings from ASP Conference Vol. 195. Edited by W. van Breugel and J. Bland-Hawthorn. ISBN: 1-58381-022-6 (2000), p.185
- Maillard, J. P.; Paumard, T.; Stolovy, S. R.; Rigaut, F., 2004, A&A 423:155

- Melia 2007, *The Galactic Supermassive Black Hole*, Princeton University Press, Princeton et Oxford, ISBN 978-0-691-09535-6
- Najarro, F., Krabbe, A., Genzel, R., Lutz, D., Kudritzki, R.P., 1997, *A&A* 325:700
- Nayakshin, Sergei; Cuadra, Jorge; Springel, Volker, 2007, *MNRAS* 379:21
- Paumard, T.; Maillard, J.-P.; Morris, M.; Rigaut, F., 2001, *A&A* 366:466
- Paumard, T.; Genzel, R.; Maillard, J. P.; Ott, T.; Morris, M. R.; Eisenhauer, F.; Abuter, R., 2004a, dans *Young Local Universe*, Proceedings of XXXIXth Rencontres de Moriond, La Thuile, Aosta Valley, Italie, March 21-28, 2004a, Eds: A. Chalabaev, T. Fukui, T. Montmerle, and J. Tran-Thanh-Van, Editions Frontieres, Paris, p. 377-388
- Paumard, T.; Maillard, J.-P.; Morris, M., 2004b, *A&A* 426:81
- Paumard, T.; Genzel, R.; Martins, F.; Nayakshin, S.; Beloborodov, A. M.; Levin, Y.; Trippe, S.; Eisenhauer, F.; Ott, T.; Gillessen, S.; Abuter, R.; Cuadra, J.; Alexander, T.; Sternberg, A., 2006, *ApJ* 643:1011
- Paumard, T.; Perrin, G.; Eckart, A.; Genzel, R.; Léna, P.; Schödel, R.; Eisenhauer, F.; Müller, T.; Gillessen, S., dans *The Power of Optical/IR Interferometry: Recent Scientific Results and 2nd Generation Instrumentation, Eso Astrophysics Symposia*. ISBN 978-3-540-74253-1. Springer, 2008, p. 313
- Paumard, T.; Pfuhl, O.; Martins, F.; Kervella, P.; Ott, T.; Pott, J.-U.; Le Bouquin, J. B.; Breitsfelder, J.; Gillessen, S.; Perrin, G.; Burtscher, L.; Haubois, X.; Brandner, W., 2014a, *A&A* 568:A85
- Paumard, Thibaut; Morris, Mark R.; Do, Tuan; Ghez, Andrea, 2014b, Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 303, pp. 109-113
- Pott, J.-U.; Eckart, A.; Glindemann, A.; Kraus, S.; Schödel, R.; Ghez, A. M.; Woillez, J.; Weigelt, G., 2008, *A&A* 487:413
- Rubilar, G. F.; Eckart, A., 2001, *A&A* 374:95
- Sanders, R. H., 1992, *Nature* 359:131
- Schödel, R.; Ott, T.; Genzel, R.; Hofmann, R.; Lehnert, M.; Eckart, A.; Mouawad, N.; Alexander, T.; Reid, M. J.; Lenzen, R.; Hartung, M.; Lacombe,

F.; Rouan, D.; Gendron, E.; Rousset, G.; Lagrange, A.-M.; Brandner, W.; Ageorges, N.; Lidman, C.; Moorwood, A. F. M.; Spyromilio, J.; Hubin, N.; Menten, K. M., 2002, *Nature* 419:694

- Tanner, A.; Ghez, A. M.; Morris, M. R.; Christou, J. C., 2005, *ApJ* 624:742
- Trippe, S.; Martins, F.; Ott, T.; Paumard, T.; Abuter, R.; Eisenhauer, F.; Gillessen, S.; Genzel, R.; Eckart, A.; Schödel, R., 2006, *A&A* 448:305
- Vincent, F. H.; Paumard, T.; Gourgoulhon, E.; Perrin, G., 2011, *Classical and Quantum Gravity*, Volume 28, Issue 22, id. 225011
- Yang, Ming; Jiang, B. W., 2012, *ApJ* 754:35



### 3- NOTE D'ACCOMPAGNEMENT

#### **3.1 PARTICIPATION À DES COLLABORATIONS**

##### **3.1.1- LE PROJET GRAVITY**

Le projet GRAVITY (Sect. 2.4) est une collaboration entre six instituts : le MPE (Garching, Allemagne) ; le LESIA ; le MPIA (Heidelberg, Allemagne) ; l'IPAG ; l'Université de Cologne (Allemagne) ; SIM (Lisbonne, Portugal).

Le projet est fondé sur mes simulations au MPE en 2004. Je suis le scientifique du projet. J'ai animé le groupe scientifique d'une vingtaine de personnes pendant toute la phase de design de l'instrument. J'ai écrit le plan de commissioning avec l'aide de Jean-Baptiste le Bouquin et Oliver Pfuhl ainsi que les nombreux rapports de commissioning. Je coordonne maintenant les observations en temps garanti.

##### **3.1.2- OBSERVATIONS DU CENTRE GALACTIQUE**

Dans le cadre de mes activités observationnelles du Centre galactique, je collabore avec les deux équipes dominantes sur ce sujet : celle de Reinhard Genzel au MPE (Garching) et celle d'Andrea Ghez à UCLA (à travers le Prof. Mark Morris). De nombreux articles de ma bibliographie ont été écrits en collaboration avec le MPE.

##### **3.1.3- GYOTO**

GYOTO (Sect. 2.4.5) est au cœur de 8 thèses passées, présentes et futures, dont trois que j'ai co-encadrées ou que je co-encadre : Frédéric Vincent (2008-2011), Observatoire de Meudon ; Claire Somé (2012-2015), Observatoire de Meudon ; Marion Grould (2013-2016), Observatoire de Meudon ; Gustavo Rodriguez-Coira (2017-), Observatoire de Meudon ; Marie Leroy, Université de Namur ; Pedro Caetano, Instituto Superior Técnico, Lisbonne ; Alejandro Cardenas Avendano, National Astronomical Observatory of Colombia ; Thomas Schönembach, Frankfurt Institute for Advanced Studies.

Au sens large, la collaboration GYOTO compte 11 laboratoires dans 7 pays différents : France : LESIA (Observatoire de Paris), LUTH (Observatoire de Paris), AstroParticule et Cosmologie, Université de Strasbourg ; Belgique : Université de Namur ; Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Varsovie ; Frankfurt Institute for Advanced Studies ; Instituto Superior Técnico, Lisbonne ; National Astronomical Observatory of Colombia ; Physics and Astronomy College of Charleston.

Afin de fédérer cette communauté, j'ai organisé avec Frédéric Vincent en janvier 2015 un atelier international de deux jours intitulé *GYOTO mini-workshop* qui a réuni une vingtaine de participants.

### **3.2 PLACE DE MA RECHERCHE AU SEIN DU LABORATOIRE**

Le LESIA est organisé en cinq pôles scientifiques : Haute résolution angulaire en astronomie (HRAA) ; Étoile ; Planétologie ; Plasmas ; Solaire.

J'ai été recruté au 1er octobre 2006 pour rejoindre le pôle HRAA. Elle regroupe les activités de recherche instrumentale du laboratoire dans le domaine de l'optique adaptative, de l'interférométrie optique et de la coronographie notamment. Outre le développement d'instruments haute résolution, l'équipe mène des recherches astrophysiques dans de nombreux domaines servis par ces instruments. Mon recrutement correspond au besoin de renforcement de ces activités scientifiques. En particulier, de nombreux membres du pôle sont impliqués dans le projet GRAVITY.

Mon rôle est donc de structurer l'activité Centre Galactique du laboratoire. Je suis le seul chercheur spécialiste exclusivement de ce domaine. J'interagis de très près avec mes collègues, en particulier les chercheurs Yann Clénet, spécialiste des Noyaux actifs de galaxies (NAG), Guy Perrin, co-investigateur du projet GRAVITY, Daniel Rouan, spécialiste entre autres des NAG et du Centre Galactique, et depuis son récent recrutement Frédéric Vincent que j'ai formé. Ensemble, nous co-encadrons régulièrement des doctorants.

### **3.3 ENSEIGNEMENT, FORMATION ET DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE**

#### **3.3.1- ENCADREMENT DE THÈSES**

J'ai à ce jour participé à l'encadrement de six étudiants en thèse et co-signé 10 articles de rang A avec eux. Ces encadrements sont toujours effectués avec au moins un autre co-encadrant et en bonne entente avec l'École doctorale. (*Les noms des étudiants ont été anonymisés dans cette section*).

#### DEVENIR DES ANCIENS

**X** (2005–2009), Imagerie interférométrique infrarouge et perspectives pour l'observation interférométrique du Centre Galactique : le projet GRAVITY, 20 %, prix le Monde de la recherche universitaire 2010. À partir de mon recrutement en 2006, j'ai participé à l'encadrement de X sous la direction de Guy Perrin. Dans le cadre du projet GRAVITY, il a effectué des études préliminaires au moyen d'imagerie interférométrique et participé à une campagne d'observations multi-longueur d'onde de Sgr A\* qui lui a permis de

déterminer la limite supérieure d'émissivité du trou noir la plus basse jamais enregistrée à 8,6  $\mu\text{m}$ . X est actuellement Post-Doctoral Fellow à l'ESO au Chili pour quatre ans. Il continue de travailler sur GRAVITY. Nous espérons qu'il sera prochainement recruté sur un poste permanent français afin de rejoindre notre équipe.

**Y** (2008–2011), *Test de la relativité générale en champ fort au centre de la Galaxie grâce à l'instrument GRAVITY*, 50 % avec Guy Perrin et Éric Gourgoulhon (LUTH). Y a participé à l'élaboration des cas scientifiques de GRAVITY en menant des simulations d'observation. Il a notamment évalué la précision astrométrique de l'instrument dans son mode imageur ce qui a permis de consolider l'argumentation scientifique. Nous avons écrit le code GYOTO ensemble et lancé plusieurs collaborations. Après un an en post-doc au laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC) à Paris puis deux au Centre Copernic à Varsovie dans l'équipe du Prof. Marek Abramowicz. Y est de retour au LESIA dans le cadre d'un post-doc Observatoire de Paris depuis juillet 2015 et a été recruté comme chargé de recherches en 2016.

**Z** (2008–2012), *Dynamique autour du trou noir central de la Galaxie*, 40 % avec Yann Clénet et Daniel Rouan. Fort d'un diplôme d'ingénieur, Z a quitté le domaine de la recherche pour un poste en entreprise sans soutenir.

**T** (2012-2015), *Dynamique du milieu interstellaire autour du trou noir au centre de la Voie lactée*, 50 % avec Yann Clénet et Daniel Rouan, Sect. 2.3. T est en post-doc à UCLA.

**U** (2013-2016), *From integration to first light with GRAVITY: focus on the environment of black holes*, 75 % avec Guy Perrin, cf. Sect. 2.4.5. À l'issue d'une première année de post-doc et malgré un potentiel indéniable, U a choisi de cesser la recherche.

**V** (2017-), exploitation de GRAVITY sur le Centre Galactique, 30 % avec Guy Perrin et Frédéric Vincent.

### **3.3.2- ENSEIGNEMENT**

J'ai participé à l'encadrement des TD/TPs d'Algorithmique et programmation niveau L3 à l'Université Paris Diderot au premier semestre 2012–2013 et 2013–2014 à raison (3h par semaine).

J'ai depuis cette année repris les cours d'optique de Guy Perrin en master 2 pro OSAE.

### **3.3.3- DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE**

Je conseille régulièrement des journalistes pour des revues de vulgarisation, par exemple un dossier de dix pages intitulé *Zoom sur le centre de la Galaxie*, publié dans Ciel et Espace n°526, p. 48-57, mai 2013, ou pour Sciences et Avenir de septembre 2017.

Je donne également régulièrement des conférences publiques et intervins lors des manifestations liées aux fêtes de la science. Enfin, j'intervins parfois dans des établissements scolaires (tout niveaux). Par exemple, le 20 mars 2015 à l'occasion d'une éclipse de Soleil j'ai organisé des observations du Soleil dans une école primaire en province (école Saint-Lazare, Compiègne) et présenté quatre séances d'une conférence grand public pour des classes allant du CP au CM2.

### **3.4 ENCADREMENT, ANIMATION ET MANAGEMENT DE LA RECHERCHE**

Je suis le scientifique (*Project Scientist*) du projet GRAVITY, cf. Sect. 2.4.4.

Je préside le Conseil scientifique du Centre Jean-Marie Mariotti (JMMC) depuis novembre 2013. Le JMMC est un réseau d'établissements français (CNRS-INSU, CRAL, LAGRANGE, IPAG, LESIA et ONERA) dont la mission est de favoriser le meilleur environnement opérationnel possible pour les utilisateurs des infrastructures interférométriques telles que le VLTI. Ainsi, le JMMC produit des outils de haut niveau pour aider les utilisateurs non-spécialistes dans tout le cycle de vie des données interférométriques, depuis la préparation des observations jusqu'à l'archivage des données en passant, bien entendu, par leur analyse. Ce rôle de président du CS m'amène à rester en contact avec les équipes du JMMC afin de garder une vision claire des activités du centre, nécessaire à l'élaboration avec les membres du CS de notre avis et de nos recommandations annuelles.

De 2010 à 2014, j'ai été responsable de la Commission communication du LESIA (ComCom) qui comprend neuf membres. Le rôle de la ComCom est avant tout d'assurer la circulation de l'information à l'intérieur du LESIA. En outre, j'étais correspondant communication envers nos tutelles et étais chargé de relayer les informations entre celles-ci et les membres du LESIA. Le Conseil de laboratoire a chargé la ComCom d'élaborer la nouvelle plaquette institutionnelle du LESIA et j'ai porté ce projet jusqu'à sa réalisation.

## 4- SUMMARY

The first astrophysical radio source has been detected serendipitously in 1933 by Karl Jansky: it was the Galactic Center region, since then resolved into several components, among which Sgr A\*, a point-like source hypothesized to coincide with a supermassive black-hole since the seventies. At that time, seeing-limited images of the central parsec only revealed a limited number of very bright and massive stars, the *infra-red sources* (IRS). By the nineties, high angular resolution techniques had progressed enough to resolve this nuclear star cluster into thousands of fainter stars, among which the *stars* (S) within one arcsecond of the central object. Their orbits (in particular that of S2, first determined in Schödel et al. 2002) yield the tighter constraint on the mass and distance of the central supermassive compact object. Around the same time, an infrared counterpart to Sgr A\* was finally detected as a flaring source coinciding with the focus of the S stars' orbits (Genzel et al. 2003).

I have dedicated my career to various studies of the Galactic Center (GC) region in the near infrared, in order to understand the links between the central object and the stars and interstellar medium in its environment. I have started by studying the stellar population as a whole as well as individual stars and their dynamics during my PhD at IAP and post-doc at MPE where I have led an article that reports the first detection of main sequence OB stars formed together with the massive stars 6 million years ago. Our findings strongly suggest that this star formation event occurred within a thin disk similar to an AGN disk.

I have also studied the interstellar medium dynamics since my PhD thesis, where I have shown that the ionized emission originates from the thin surface of thick clumps stretched in the tidal field from the black-hole, through to the recent PhD thesis by Anna Ciurlo, where we have detected molecular hydrogen throughout the central parsec, hereby demonstrating the presence of dust clumps in the entire region, and showing how the absorbing material is distributed in three dimensions within the nuclear cluster.

Finally, I have led in 2004 a general relativistic modeling effort showing that detection of lensing effects on Sgr A\*'s flares was within reach of the VLTI through narrow angle interferometric astrometry at an accuracy of 10  $\mu$ as, which motivated the GRAVITY project. I have been the project scientist of GRAVITY since then. GRAVITY is in operation since 2015, already bringing its harvest of science results. In order to analyze the motion of stars as detected with GRAVITY, I have co-written with a former PhD student GYOTO, the General relativity Orbit Tracer of Observatoire de Paris.