

Jets nucléaires dans les AGN et blazars : une double approche astrométrique et astrophysique

Proposants : Sébastien Lambert (SYRTE), Hélène Sol (LUTH)

Contexte élargi

Ce projet, bien que relatif aux AGN, est porté par un laboratoire, le SYRTE, spécialisé dans la définition des références d'espace et de temps. Il est l'un des acteurs majeurs de la construction des repères fondamentaux de l'Union Astronomique Internationale des vingt dernières années (voir Charlot et al. 2020). Les AGN servent aujourd'hui de points de repères spatiaux pour définir le repère céleste (quasi-inertiel) idéal. Outre l'astronomie, ce repère – quand il est très stable – sert les géosciences (mesures de la rotation terrestre, de ses déformations et tout ce que cela peut avoir de géophysique) et la physique fondamentale. La partie radio de ce repère, réalisée par VLBI, est l'un des piliers de la géodésie moderne ; de sa précision et de sa stabilité dépendent d'autres produits géodésiques comme les mesures de rotation terrestre (Bizouard et al. 2019) et le repère terrestre dont l'enjeu actuel est une mesure au millimètre près (Altamimi et al. 2016) et de très nombreuses applications en géosciences et navigation. Le SYRTE et le porteur principal de ce projet ont contribué également à des tests de physique fondamentale (voir p.e. Lambert et Le Poncin-Lafitte 2009, 2011 ; Le Poncin-Lafitte et al. 2016 sur les tests de relativité et de symétrie de Lorentz). La stabilité du repère, dont a évoqué le fait qu'on souhaite atteindre le millimètre en position, soit la microseconde de degré en position angulaire, est la condition sine qua non à la poursuite des progrès dans les domaines évoqués : géodésie (et géosciences), astrométrie, physique fondamentale basée sur les mesures célestes. Par ailleurs, parler d'AGN sans parler d'astrophysique semble une inanité. C'est pourquoi le SYRTE propose aujourd'hui d'associer deux domaines que sont l'astrométrie absolue des repères de référence et l'astrophysique des jets nucléaires pour mieux comprendre le fonctionnement des objets sous-jacents aux points de référence des repères extragalactiques. Ce projet bénéficie aux deux communautés : l'astrophysique permet de mieux comprendre les processus déterminant la stabilité des points de référence et l'astrométrie de fournir des données encore inexploitées dans le domaine de la modélisation des AGN.

Contexte

Les positions données par l'astrométrie absolue (e.g. l'ICRF3 réalisé par VLBI, Charlot et al. 2020, et Gaia EDR3, Prusti et al. 2016, Brown et al. 2021) sont actuellement disponibles pour un échantillon de quelques centaines (4 fréquences 8, 22, 32 GHz et optique) à quelques milliers (8 GHz et optique) de radiosources extragalactiques avec une précision de l'ordre de 0.1 millisecondes d'arc (mas). Cette précision a permis de lever le doute quant à l'existence de différences entre les positions des centroïdes radio et optiques : ces positions peuvent différer parfois de plusieurs mas ! Rappelons que ce sont ces objets célestes, AGN ou quasars, qui forment le repère de référence céleste international (ICRF). Les AGN (Active Galactic Nuclei en anglais) sont des noyaux actifs de galaxies hébergeant un trou noir central supermassif entouré d'un disque d'accrétion émetteur optique-UV, et d'où émergent parfois de grands jets de plasmas relativistes observés en particulier en radio. Comprendre quels mécanismes interviennent dans ces différences radio-optiques est capital tant pour mieux cerner les tendances de cette population d'objets que pour mieux rattacher les repères radios et optiques.

On l'a dit, les centroïdes optiques et radios ne coïncident pas et il y a à cela plusieurs raisons :

- Les erreurs systématiques dues à l'instrument d'observation. Les positions de l'ICRF3 sont tributaires d'erreurs systématiques et plus particulièrement à 22 et 32 GHz. Ces erreurs systématiques sont causées par l'asymétrie nord-sud du réseau VLBI et, dans le cas de 32 GHz, un réseau trop faible (Charlot et al. 2020, Liu et al. 2021). Les positions et mouvements propres donnés par Gaia ne sont pas non plus exempts d'erreurs systématiques qui pourraient, à un certain point, jouer dans l'interprétation des écarts radio-optiques.

- Les causes intrinsèques aux sources. Des études récentes, comparant astrométrie absolue, imagerie VLBI et propriétés photométriques, ont permis de dresser un premier tableau général (Kovalev et al. 2017, Plavin et al. 2018, Lambert et al. 2021) :
 - Les centroïdes radios à 8, 22 et 32 GHz sont proches les uns des autres (< 0.1 mas) et rangés en ordre de fréquences croissantes vers l'intérieur du jet, i.e. vers le trou noir central, en cohérence avec un modèle d'opacité du plasma du jet dépendant de la fréquence,
 - Les centroïdes optiques sont en général en aval du jet et souvent significativement éloignés des centroïdes radios (> 0.1 mas jusqu'à plusieurs mas),
 - Il arrive que ces centroïdes optiques coïncident avec une composante radio dans le jet. Cette composante, souvent stationnaire, peut posséder un degré élevé de polarisation linéaire en radio et en optique, témoignant d'un champ magnétique bien organisé typique d'une émission synchrotron ; à l'inverse, lorsque le centroïde Gaia est en amont du jet par rapport au centroïde radio, on a plutôt une polarisation optique faible appelant à penser qu'on voit la signature du disque d'accrétion.

Dans une étude plus récente, Pierron et al. (2021) ont tenté d'identifier de façon systématique le centroïde optique de Gaia à une composante radio. Ce travail a montré trois groupes de sources (figure ci-dessous) :

- Les sources dont le centroïde optique s'identifie avec une composante du jet (45% de l'échantillon) ; pour ces sources, la composante radio en question n'est pas dominante et la position VLBI (généralement la base du jet) est donc significativement différente de la position optique,
- Les sources dont le centroïde optique s'identifie à la base du jet (45%) ; pour ces sources, le centroïde optique est donc proche du centroïde radio de l'ICRF. L'examen de l'indice B-R (par exemple donné par Gaia EDR3) suggère une contribution du disque dans certains cas,
- Les sources où l'optique est loin de toute composante radio (10%) ; l'examen de ces sources montre que l'optique pourrait coïncider avec une composante du jet non détectée en radio ou bien résulter de plusieurs contributions du jet ou du disque.

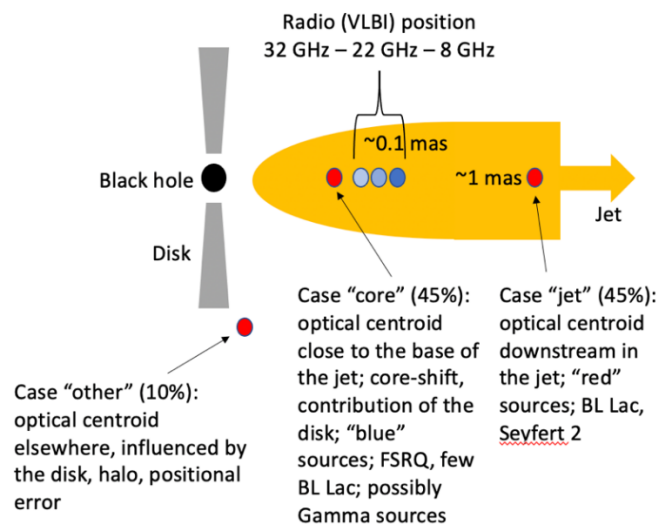


Schéma des composantes principales d'un AGN et des configuration radio-radio et radio-optiques (Lambert et al. 2021, Pierron et al. 2021).

Ces études ont permis d'approcher les mécanismes d'émission expliquant la distance radio-optique et d'envisager des conséquences intéressantes pour le rattachement des repères de référence. En effet, si l'optique était émise par la même zone de l'AGN que le radio, l'alignement des repères radio et optique ne dépendrait que de la précision des observations (qui s'améliore au fur et à mesure qu'on engrange de nouvelles mesures). Or, la présence de décalages avérés fait que le rattachement n'est pas évident et que,

en quelques sortes, les repères radio et optique « vivent leur vie » chacun de leur côté. Toutefois, l'identification des mécanismes régissant les émissions radio et optique et l'identification de l'optique avec une éventuelle composante radio VLBI permet de lever une certaine ambiguïté et de modéliser les écarts radio-optique mesurables, favorisant ainsi un alignement plus précis des repères.

Travail proposé

A l'issue de ces études, des zones d'ombre subsistent toutefois. Kovalev, Plavin et al. ont travaillé sur un échantillon de plusieurs milliers de sources mais n'ont pas fait un travail aussi poussé que Lambert et al. (2021) et Pierron et al. (2021) en termes d'identification précise malgré un échantillon dix fois plus petit. Le but de cette thèse est donc d'étendre les travaux précédents à un échantillon plus grand et d'obtenir une vision synthétique de comment se répartissent les écarts radio-optique en termes de mécanismes d'émission sous-jacents, d'établir des liens entre la coïncidence ou non du centroïde optique et radio, le type de source, l'indice de couleur, l'existence d'un mouvement propre en optique ou en radio, l'émission ou non en gamma...

Premièrement, les tendances observées demandent à être affinées sur des échantillons plus grands pour renforcer la statistique reliant les écarts radio-optique et le type d'activité de l'AGN. MOJAVE (Lister et al. 2019) a fait un travail précieux de « modelfitting » des composantes radio qui a rendu possible les travaux de Lambert et al. (2021) et Pierron et al. (2021) mais les limitant à moins de 400 sources dont on a les contreparties Gaia EDR3 et ICRF3. Il existe des cartes de structures disponibles par milliers au sein de diverses bases de données d'instituts partenaires comme le service international de la rotation terrestre et des systèmes de référence (IERS) ou la BVID (Bordeaux VLBI Image Database) ou encore les cartes du projet TANAMI (Australie) sur lesquelles on pourrait refaire l'étude de Pierron et al. (2021) sur un échantillon de plusieurs milliers de sources. Il faudrait pour cela utiliser ou développer un outil permettant d'ajuster les coordonnées de composantes VLBI sur ces cartes (format FITS ou données de visibilité ; un outil de type DIFMAP convient mais d'autres outils peuvent être plus adaptés surtout dans un contexte d'automatisation). Le cas échéant, du temps d'observation pourra être demandé auprès du Joint Institute for VLBI in Europe (JIVE), du Very Large Baseline Array (VLBA, USA) ou du réseau Australie-Nouvelle Zélande (AuScope), si on juge des images manquantes nécessaires. Par ailleurs, l'ICRF3 sera remplacé par des solutions VLBI plus récentes réalisées à l'Observatoire de Paris et contenant plus de sources.

Deuxièmement, il sera essentiel d'adresser la variabilité temporelle. On a noté dans Pierron et al. (2021) une incohérence entre les mouvements propres des centroïdes optiques de Gaia et ceux des centroïdes radios très clairement détectés et ajustés de façon précise par MOJAVE. Bien que ces mouvements propres soient petits voire peu significatifs dans le cas de Gaia, il faut se poser la question des causes et conséquences s'ils se confirment en optique grâce aux prochaines releases de Gaia. Des séries temporelles de position des centroïdes radio sont faites de façon routinière au SYRTE grâce aux données de VLBI géodésique et constituent une mesure absolue et indépendante de Gaia ou de MOJAVE. Ces séries révèlent une signature complexe reflétant la variabilité en structure et en flux radio (Gattano et al. 2018). On propose ici d'examiner le lien entre cette variabilité astrométrique (décrite par exemple par des outils traditionnels comme l'écart-type mais aussi moins traditionnels comme la variance d'Allan ou les fonctions splines par morceaux (Karbon et al. 2016) rendant compte de la complexité du mouvement du centroïde) et le type d'activité de la source. Cela permettrait de cerner le rôle que peuvent avoir des phénomènes transitoires (par exemple l'apparition d'une nouvelle composante VLBI) induisant des dominations successives du jet ou du disque sur les centroïdes radio ou optique et les divergences de comportement entre l'optique et le radio selon le type de source.

Troisièmement, une approche très complémentaire nous permettra d'avancer vers une vision synthétique des sources grâce à l'application de modèles de jet relativiste capables de reproduire les populations identifiées plus haut. Du point de vue pratique, cela signifie par exemple l'assimilation des données astrométriques ou statistiques obtenues ci-dessus dans la constitution de modèles globaux de jets qui s'appuieront sur les codes développés au LUTH, incluant des codes hydrodynamiques et MHD permettant de décrire la géométrie des jets et l'évolution de leur structure, et des codes radiatifs et de

transfert de rayonnement permettant de reproduire les spectres observés. Il faudra ici « traduire » la sortie des codes numériques en observables astrométriques (e.g. densité de flux, centroïde, mouvement propre) et astronomiques (couleurs, spectres) afin de comparer les modèles aux observations (VLBI imageur et géodésique en radio, Gaia en optique, et les données d'archive disponibles sur les différentes sources en rayons X et gamma) et de contraindre ainsi les paramètres physiques des sources. Lorsque des modèles « statiques » satisfaisants seront trouvés, leur application aux sources concernées devrait permettre de résoudre entièrement le problème des écarts radio-optique et d'améliorer significativement l'alignement des deux systèmes de référence (ICRF et Gaia). Dans le cas des sources pour lesquelles suffisamment de séries temporelles de position seront disponibles, des codes « dynamiques » de jets seront aussi utilisés pour reproduire le mouvement propre des centroïdes, ce qui devrait alors permettre d'améliorer la précision même de chaque système de référence (pris individuellement) en modélisant l'évolution des effets de structures.

Dans toute cette étude, une attention particulière sera donnée aux sources gamma qui contraignent particulièrement bien les modèles, incluant en particulier les AGN répertoriés dans TeVCat, ainsi que ceux du nouveau 4LAT catalogue du satellite Fermi (Abdollahi et al. 2020). Dès que les statistiques sur les éruptions d'AGN le permettront, l'étude des corrélations entre éruptions gamma et déplacements des centroïdes VLBI sera particulièrement intéressante à conduire. Elle devrait permettre de confirmer par une approche statistique différente les récents résultats de Kramarenko et al. (2021) sur la localisation de l'émission gamma et confirmer ou infirmer un scénario très débattu actuellement selon lequel l'émission très puissante en gamma serait liée à l'apparition d'une nouvelle composante à la base du jet VLBI, et permettre de vérifier si la réciproque est vraie pour certains types de sources. Ces recherches sont également pertinentes dans le contexte de la mission SVOM du CNES qui va être bientôt lancée (2022) pour traquer les sursauts gamma, étudier les phénomènes "transitoires", incluant les flares d'AGN en gamma et diffuser en particulier des alertes par les réseaux aux autres télescopes pour permettre les suivis multi-longueur d'onde.

Références

- Abdollahi S., F. Acero, M. Ackermann, et al. Fermi large area telescope fourth source catalog. 247(1):33, 2020.
- Altamimi Z., P. Rebischung, L. M. Métivier, and X. Collilieux. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8):6109–6131, 2016.
- Bizouard C., S. Lambert, C. Gattano, J.-Y. Richard, and O. Becker. The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014. *Journal of Geodesy*, 93:621, 2019.
- Brown A. G. A., A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, et al. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy & Astrophysics*, 649:A1, 2021.
- Charlot P., C. S. Jacobs, D. Gordon, S. Lambert, J. Boehm, A. de Witt, A. Fey, R. Heinkelmann, E. Skurikhina, O. Titov, E. F. Arias, S. Bolotin, G. Bourda, C. Ma, Z. Malkin, A. Nothnagel, R. A. Gaume, D. Mayer, and D. S. MacMillan. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry. *Astronomy & Astrophysics*, 644:A159, 2020.
- Gattano C., S. Lambert, and K. Le Bail. Extragalactic radio source stability and VLBI celestial reference frame: insights from the Allan standard deviation. *Astronomy & Astrophysics*, 2018.
- Karbon M., R. Heinkelmann, J. Mora-Diaz, M. Xu, T. Nilsson, and H. Schuh. The extension of the parametrization of the radio source coordinates in geodetic VLBI and its impact on the time series analysis. *Journal of Geodesy*, 91:755, 2016.
- Kovalev Y. Y., L. Petrov, and A. V. Plavin. VLBI-Gaia offsets favor parsec-scale jet direction in active galactic nuclei. *Astronomy & Astrophysics*, 598, 2017.
- Kramarenko I., A. Pushkarev, Y. Kovalev, M. Lister, T. Hovatta, and T. Savolainen. A decade of joint MOJAVE\$-Fermi AGN monitoring: localisation of the gamma-ray emission region. 06 2021.
- Lambert S. and C. Le Poncin-Lafitte. Determining the relativistic parameter γ using very long baseline interferometry. *Astronomy & Astrophysics*, 499:331–335, 2009.

- Lambert S. and C. Le Poncin-Lafitte. Improved determination of γ by VLBI. *Astronomy & Astrophysics*, 529:A70, 2011.
- Lambert S., N. Liu, E. F. Arias, C. Barache, J. Souchay, F. Taris, J.-C. Liu, and Z. Zhu. Parsec-scale alignments of radio-optical offsets with jets in AGNs from multifrequency geodetic VLBI, Gaia EDR3, and the MOJAVE program. *Astronomy & Astrophysics*, 651:A64, 2021.
- Le Poncin-Lafitte C., A. Hees, and S. Lambert. Lorentz symmetry and very long baseline interferometry. *Phys. Rev. D*, 94:125030, 2016.
- Lister M. L., D. C. Homan, T. Hovatta, K. I. Kellermann, S. Kiehlmann, Y. Y. Kovalev, W. Max-Moerbeck, A. B. Pushkarev, A. C. S. Readhead, E. Ros, and T. Savolainen. MOJAVE. XVII. jet kinematics and parent population properties of relativistically beamed radio-loud blazars. *Astrophysical Journal*, 874(1):43, 2019.
- Liu N., S. Lambert, P. Charlot, Z. Zhu, J.-C. Liu, N. Jiang, X.-S. Wan, and C.-Y. Ding. Comparison of multifrequency positions of extragalactic sources from a global geodetic VLBI monitoring program and Gaia EDR3. *Astronomy & Astrophysics*, 652:A87, 2021.
- Pierron, A., S. Lambert, and H. Sol. Insights into AGN parsec-scale emission from radio to GeV gamma rays from VLBI, Gaia EDR3, and Fermi-LAT. *Journées du Programme National Hautes Energies (PNHE)*, Paris, 2021
- Plavin A. V., Y. Y. Kovalev, and L. Y. Petrov. Dissecting the AGN disk–jet system with joint VLBI-Gaia analysis. *The Astrophysical Journal*, 871(2):143, 2019.
- Prusti T., J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D. W., et al. The Gaia mission. *Astronomy & Astrophysics*, 595:A1, 2016.

Programme de travail

2022-2023

- Familiarisation avec les données d’astrométrie absolue : manipulation des catalogues VLBI et Gaia, incertitudes et systématiques et données connexes (photométrie, courbes de lumière, données GeV),
- Familiarisation avec la cartographie des sources par VLBI, bases de données existantes et exploration des méthodes possibles de traitement de ces données,
- Premières comparaisons entre radio, optique, structures et données photométriques et mise en route des traitements des cartes,
- Familiarisation avec la dynamique des jets dans les AGN et les modèles MHD/radiatifs.

2023-2024

- Poursuite des traitements et des comparaisons radio-optique,
- Mise en route de tests de modèles de jet et développements afférents,
- Ecriture d’un article sur les conclusions liées aux comparaisons radio-optiques.

2024-2025

- Poursuite et conclusions,
- Ecriture d’un article sur les conclusions liées au modèles numériques de jets.

Laboratoires et équipes d’accueil

Le SYRTE est un laboratoire spécialisé dans la réalisation des références de temps et d’espace, cruciales à l’heure actuelle dans plusieurs domaines scientifiques (astrométrie, géosciences) et sociétaux (surveillance de l’environnement). Il est moteur dans la réalisation du repère céleste international, l’ICRF, par VLBI. Par ailleurs, le SYRTE est également intégré dans le consortium de la mission

spatiale Gaia qui a délivré en 2018 la troisième version de son catalogue (EDR3) avec une précision comparable à celle du VLBI pour l'échantillon de sources communes. Parallèlement, le SYRTE mène plusieurs programmes d'observations VLBI systématiques et de suivi photométrique des radiosources de l'ICRF en partenariat avec l'USNO (projet FRAMEx) et plusieurs stations robotiques dans le monde et participe à des programmes observations spécifiques en collaboration avec divers instituts (Geoscience Australia par exemple). Au SYRTE, l'étudiant évoluera au sein de l'équipe « Systèmes de référence célestes » dont les membres travaillent en partie au sein du consortium de Gaia et qui héberge des services internationaux dédiés à l'analyse VLBI (IVS) et à la maintenance du repère céleste international (IERS), et sera rapidement appelé à collaborer avec les institutions partenaires de ces services internationaux (notamment l'USNO et l'ensemble des instituts abritant les composantes de l'IERS et de l'IVS). Le SYRTE porte le projet de construction d'un télescope robotique à Saint-Véran (Hautes-Alpes) dont deux buts principaux étant le monitoring régulier photométrique des sources de l'ICRF (PI François Taris, SYRTE) et la réponse aux alertes SVOM (PI Stéphane Basa, LAM).

Le LUTH possède une équipe spécialisée dans l'étude des phénomènes à haute énergie dans les objets compacts et particulièrement investie sur la modélisation des noyaux actifs de galaxies et des jets relativistes. Tout un éventail de descriptions analytiques et de codes est disponible, tant sur les mécanismes de formation de jet que sur les simulations hydrodynamiques et MHD de flots d'accrétion et d'éjection, les rayonnements non-thermiques en rayons gamma et en multi-longueur d'onde, et l'accélération des particules dans la magnétosphère des trous noirs. L'équipe est partenaire (co-I) de l'expérience H.E.S.S. en rayons gamma de très haute énergie, et membre du consortium du projet Cherenkov Telescope Array (CTA) de nouvelle génération, que l'étudiant pourra rejoindre. Des travaux sur la classification des AGN et blazars sont également en cours, qui pourront fournir un fil conducteur pour l'analyse des populations de sources radio observées en VLBI.

Profil du candidat

Le profil du candidat est typiquement celui d'un M2 d'astronomie ou de physique. Beaucoup de notions (statistiques, etc.) s'acquièrent « sur le tas. »