

# Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Curriculum Vitae</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1      | Positions de recherche . . . . .  | 3         |
| 1.2      | Collaborations internationales présentes . . . . .  | 3         |
| 1.3      | Formation & Qualifications . . . . .  | 3         |
| 1.4      | Financements obtenus . . . . .  | 4         |
| 1.5      | Enseignement & Médiation Scientifique . . . . .   | 4         |
| 1.6      | Expertise . . . . .   | 4         |
| <b>2</b> | <b>Publications Scientifiques</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1      | Articles premier auteur dans revues à comité de lecture . . . . .   | 5         |
| 2.2      | Autres articles de revues à comité de lecture . . . . .   | 5         |
| 2.3      | Papiers publiés sans comité de lecture . . . . .  | 6         |
| 2.4      | Posters . . . . .   | 6         |
| 2.5      | Conférences & Séminaires Invités . . . . .  | 6         |
| 2.6      | Participations orales à conférences & workshops . . . . .   | 7         |
| <b>3</b> | <b>Travaux de recherche</b>   | <b>8</b>  |
| 3.1      | Contexte scientifique . . . . .   | 8         |
| 3.2      | Amas de galaxies . . . . .  | 9         |
| 3.3      | Galaxies radios & Jets . . . . .  | 10        |
| 3.4      | Les milieux galactiques . . . . .   | 11        |
| 3.5      | Projet de recherche: Contraindre l'origine cosmologique du champ magnétique cosmique avec LOFAR et NenuFAR à 60 MHz . . . . . | 12        |
| 3.5.1    | LOFAR, NenuFAR, SKA : quelles contraintes observationnelles . . . . .   | 12        |
| 3.5.2    | Stratégie : technique et observation . . . . .  | 13        |
| 3.5.3    | Mise en œuvre du programme de recherche . . . . .   | 14        |
| 3.6      | Liens entre le projet et les galaxies primordiales . . . . .  | 15        |
| 3.7      | Insertion du projet dans le paysage SKA-LOFAR . . . . .   | 15        |
| 3.8      | Impact scientifique . . . . .   | 15        |
| <b>4</b> | <b>Expérience d'enseignement</b>  | <b>16</b> |
| 4.1      | Enseignements effectués . . . . .   | 16        |
| 4.2      | Approche pédagogique . . . . .  | 16        |
| 4.3      | Encadrement de projets de Master et de thèse . . . . .  | 17        |
| 4.4      | Insertion dans la Faculté de Physique . . . . .   | 17        |
| <b>5</b> | <b>Organisation, administration et valorisation de la recherche</b>   | <b>18</b> |
| 5.1      | Organisation de la vie de recherche . . . . .   | 18        |
| 5.2      | Responsabilités Administratives . . . . .   | 18        |
| 5.3      | Valorisation de la recherche . . . . .  | 18        |
| 5.4      | Insertion dans Sorbonne-Université . . . . .  | 18        |
| <b>6</b> | <b>Temps d'observation obtenus sur télescopes</b>   | <b>19</b> |
| <b>7</b> | <b>Références utilisées</b>   | <b>20</b> |

# 1 Curriculum Vitae

DATE DE NAISSANCE: 19/10/1991 | EMAIL: [etienne.bonnassieux@uni-wuerzburg.de](mailto:etienne.bonnassieux@uni-wuerzburg.de)  
LIEU DE NAISSANCE: Noisy-le-Sec | PHONE: +33 6 95 98 33 20

Mes thématiques de recherche concernent l'étude à basses radiofréquences ( $\sim 30 - 144$  MHz) et haute résolution angulaire (sub-arcsec), de la formation et l'évolution des galaxies, de leurs noyaux actifs, et de grandes structures comme les amas de galaxies et les filaments cosmiques avec l'instrument LOFAR (*LOw Frequency ARray*), et son extension française *NenuFAR* et plus tard *SKA*. J'ai développé une compétence technique et observationnelle en VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) et en radiointérométrie avancée, adaptée à l'ère *SKA*, permettant la mise en œuvre de nouvelles techniques et modes d'utilisation de réseaux interférométriques.

## POSITIONS DE RECHERCHE

|                      |  |
|----------------------|--|
| FÉV 2022<br>PRÉSENT  | Poste post-doctoral, portant sur l'étude des jets relativistes de blazars avec LOFAR, à la <i>Julius-Maximilians-Universität</i> de Würzburg, Allemagne, sous la supervision de Matthias Kadler dans le cadre du financement <a href="#">DFG-FOR5195</a> en cotutelle avec l'Université de Hambourg. |
| OCT 2018<br>FÉV 2022 | Poste post-doctoral à l'Université de Bologne portant sur l'étude des amas de galaxies à basses fréquences avec LOFAR, sous la direction d'Annalisa Bonafede dans le cadre de <a href="#">l'ERC DRANOEL</a> .  |

## COLLABORATIONS INTERNATIONALES PRÉSENTES

|                     |   |
|---------------------|---|
| FÉV 2022<br>PRÉSENT | <b>Unité de recherche DFG: "Jets Relativistes dans les Galaxies Actives" (Allemagne)</b><br>Employeur actuel. Je travaille spécifiquement sur l'étude de jets blazars à larges échelles, et ce que nous révèlent les observations radios à basses fréquences sur leur émission hautes-énergies. |
| OCT 2015<br>PRÉSENT | <b>Key Science Projects (KSPs) de LOFAR: Relevés et Magnétisme (International)</b><br>Groupes de travail : <b>Relevés</b> : cartographie le ciel radio Nord à 144 MHz et 60 MHz. <b>Magnétisme</b> : étude de la distribution du champ magnétique mesuré par LOFAR.                             |
| OCT 2017<br>PRÉSENT | <b>NenuFAR (France)</b><br>Extension basse- $\nu$ Française de LOFAR; je suis le PI du programme long-terme LT09 "Filaments d'amas & Magnétisme Cosmique".  |
| OCT 2017<br>PRÉSENT | <b>Groupe de travail LOFAR-VLBI (International)</b><br>But: rendre possible, puis faciliter l'utilisation de l'International LOFAR Telescope (résolution sub-arcseconde à 144 MHz).   |
| JAN 2024<br>PRÉSENT | <b>Groupe de travail SKA-VLBI (International)</b><br>But: développer de futures capacités VLBI pour le SKA.   |

## FORMATION & QUALIFICATIONS

|           |  |
|-----------|--|
| JAN 2020  | <b>Qualification CNU</b><br>Section 34.  |
| 2015-2018 | <b>Doctorat en Astrophysique - Observatoire de Paris &amp; Rhodes University, Afrique du Sud</b><br>Supervisors: Philippe Zarka, Oleg Smirnov, Cyril Tasse. <b>Obtenue en Septembre 2018.</b><br>"Analyse statistique de l'Équation de la Mesure Radio-Interférométrique, un schéma de pondération en découplant, et des applications à une observation LOFAR-VLBI de l' <i>Extended Groth Strip</i> "<br>Co-tutelle: LESIA, Observatoire de Paris (ED127) & RATT-RU, SKA-SA |
| 2013-2015 | <b>M1 &amp; M2R Astronomie, Astrophysique et Ingénierie Spatiale (Observatoire de Paris)</b>   |
| 2009-2013 | <b>Bsc (Hons) in Astrophysics - University of Edinburgh</b>  |

## FINANCEMENTS OBTENUS

---

|          |   |
|----------|---|
| JUL 2023 | <b>Financement API-SKA</b><br>Organisation de la conférence d'été du groupe de travail LOFAR-VLBI (21 personnes) à l'Observatoire de Paris (750 euros). |
|----------|---|

## ENSEIGNEMENT & MÉDIATION SCIENTIFIQUE

---

|          |   |
|----------|---|
| JUN 2019 | <b>Contribution à la première École LOFAR Italienne à Bologne</b><br>Organisation d'un travail pratique sur l'utilisation de logiciels pour la calibration et l'imagerie dépendantes de la direction DDFACET. Participation à l'encadrement de cours de réduction de données avec PREFACTOR.        |
| JUL 2018 | <b>Tuteur au DU-LU de l'OBSM</b><br>Suivi de quatre étudiants durant la deuxième moitié de ma thèse en France.  |
| SEP 2015 | Six étudiants durant la première moitié.  |
| SEP 2017 | <b>Enseignement NASSP (University of Western Cape, 15hTD)</b><br>Cours d'interférométrie: deux cours magistraux d'une heure portant sur l'espace de Fourier, les fonctions de transfert, et le théorème Zernike - van Cittert. Cours destiné à des étudiants en L3.                                 |
| SEP 2016 | Cours d'interférométrie destiné aux M2. 10hTD du suivi en continu.  |
| SEP 2017 | <b>Tutoriel de lecture de données à 3GC4</b><br>Rédaction d'un <a href="#">document interactif</a> montrant l'utilisation d'une librairie python pour la visualisation et la manipulation de données interférométriques.  |
| SEP 2017 | <b>Édition du chapitre "Espace des visibilitées" de <i>Fundamentals of Interferometry</i></b><br>Cours en ligne du RATT-RU (groupe d'interférométrie de <i>Rhodes University</i> ), écrit sur plusieurs notebooks python, et fruit du travail de nombreux contributeurs; <a href="#">lien ici</a> . |
| JAN 2017 | <b>Physics 101 (60 hTD, Rhodes University)</b><br>Cours d'introduction de L1 à la mécanique, pour non-physiciens.   |
| APR 2017 | 30hTD Enseignement magistral pour ~60 étudiants, et 30hTD de suivi d'une quinzaine d'étudiants.   |
| SEP 2016 | <b>Parrainages de l'Observatoire de Paris (3 classes, 15hTD)</b><br>Programme de médiation scientifique de l'OBSM, sous la direction d'Alain Doressoundiram.  |
| JUL 2015 | J'ai parrainé 3 classes allant d'ULIS (primaire) à la seconde.  |

## EXPERTISE

---

- Expertise scientifique extra-galactique: jets galactiques, évolution de galaxies, milieu inter-galactique, grandes structures.
- Spécificité basses fréquences radio: étude de rayonnement "fossile".
- Expertise en réduction de données SKA et précurseurs (Big Data); application de techniques VLBI aux instruments pré-SKA.
- Développement logiciel: implémentation de réponse d'antenne *ATCA* et *NenuFAR* dans des logiciels publics; *containerisation* et déploiement de ces derniers sur de nouvelles architectures de calcul.
- Organisation et commissioning instrumental: développement d'imagerie pour l'instrument *NenuFAR*, organisation du plan de *commissioning* de l'utilisation de NenuFAR en tant que super-station LOFAR.

## 2 Publications Scientifiques

### ARTICLES PREMIER AUTEUR DANS REVUES À COMITÉ DE LECTURE

---

- FEB 2022 | [Spectral analysis of spatially-resolved 3C295 \(sub-arcsecond resolution\) with the International LOFAR Telescope.](#) Etienne Bonnassieux, Frits Sweijen, et al. Feb. 2022, A&A, 658, A10
- NOV 2021 | [Pilot Study and Early Results of the Cosmic Filaments and Magnetism Survey with Nenufar: The Coma Cluster Field.](#) Etienne Bonnassieux, Evangelia Tremou, et al. Nov. 2021, Galaxies, 9, 105
- MAY 2020 | [Decoherence in LOFAR-VLBI beamforming.](#) Etienne Bonnassieux, Alastair Edge, et al. May 2020, A&A, 637, A51
- JUL 2018 | [The variance of radio interferometric calibration solutions. Quality-based weighting schemes.](#) Etienne Bonnassieux, Cyril Tasse, et al. Jul. 2018, A&A, 615, A66

### AUTRES ARTICLES DE REVUES À COMITÉ DE LECTURE

---

- OCT 2023 | [A MeerKAT-meets-LOFAR study of Abell 1413: a moderately disturbed non-cool-core cluster hosting a 500 kpc 'mini'-halo .](#) C. J. Riseley, N. Biava, et al. Oct. 2023, MNRAS, 524, 6052
- JAN 2023 | [Deep low-frequency radio observations of Abell 2256. II. The ultra-steep spectrum radio halo.](#) K. Rajpurohit, E. Osinga, et al. Jan. 2023, A&A, 669, A1
- SEP 2022 | [Radio fossils, relics, and haloes in Abell 3266: cluster archaeology with ASKAP-EMU and the ATCA.](#) C. J. Riseley, E. Bonnassieux, et al. Sep. 2022, MNRAS, 515, 1871
- SEP 2022 | [Diffuse radio emission from non-Planck galaxy clusters in the LoTSS-DR2 fields.](#) D. N. Hoang, M. Brüggen, et al. Sep. 2022, A&A, 665, A60
- JUL 2022 | [The Coma Cluster at LOFAR Frequencies. II. The Halo, Relic, and a New Accretion Relic.](#) A. Bonafede, G. Brunetti, et al. Jul. 2022, ApJ, 933, 218
- JUL 2022 | [Subarcsecond view on the high-redshift blazar GB 1508+5714 by the International LOFAR Telescope.](#) A. Kappes, P. R. Burd, et al. Jul. 2022, A&A, 663, A44
- MAY 2022 | [A MeerKAT-meets-LOFAR study of MS 1455.0 + 2232: a 590 kiloparsec 'mini'-halo in a sloshing cool-core cluster.](#) C. J. Riseley, K. Rajpurohit, et al. May 2022, MNRAS, 512, 4210
- MAY 2022 | [The galaxy group NGC 507: Newly detected AGN remnant plasma transported by sloshing.](#) M. Brienza, L. Lovisari, et al. May 2022, A&A, 661, A92
- APR 2022 | [Spectral study of the diffuse synchrotron source in the galaxy cluster Abell 523.](#) Valentina Vacca, Timothy Shimwell, et al. Apr. 2022, MNRAS, 511, 3389
- MAR 2022 | [Deep Low-frequency Radio Observations of A2256. I. The Filamentary Radio Relic.](#) K. Rajpurohit, R. J. van Weeren, et al. Mar. 2022, ApJ, 927, 80
- MAR 2022 | [The LOFAR Two-metre Sky Survey. V. Second data release.](#) T. W. Shimwell, M. J. Hardcastle, et al. Mar. 2022, A&A, 659, A1
- FEB 2022 | [The resolved jet of 3C 273 at 150 MHz. Sub-arcsecond imaging with the LOFAR international baselines.](#) J. J. Harwood, S. Mooney, et al. Feb. 2022, A&A, 658, A8

|          |  |
|----------|--|
| FEB 2022 | <a href="#">Sub-arcsecond imaging with the International LOFAR Telescope. I. Foundational calibration strategy and pipeline.</a> L. K. Morabito, N. J. Jackson, et al. Feb. 2022, A&A, 658, A1       |
| JAN 2022 | <a href="#">Turbulent magnetic fields in the merging galaxy cluster MACS J0717.5+3745.</a> K. Rajpurohit, M. Hoeft, et al. Jan. 2022, A&A, 657, A2   |
| OCT 2021 | <a href="#">Dissecting nonthermal emission in the complex multiple-merger galaxy cluster Abell 2744: Radio and X-ray analysis.</a> K. Rajpurohit, F. Vazza, et al. Oct. 2021, A&A, 654, A41          |
| JUL 2021 | <a href="#">LOFAR observations of galaxy clusters in HETDEX. Extraction and self-calibration of individual LOFAR targets.</a> R. J. van Weeren, T. W. Shimwell, et al. Jul. 2021, A&A, 651, A115     |
| JUN 2021 | <a href="#">Constraining the AGN duty cycle in the cool-core cluster MS 0735.6+7421 with LOFAR data.</a> Nadia Biava, Marisa Brienza, et al. Jun. 2021, A&A, 650, A170                               |
| FEB 2021 | <a href="#">Physical insights from the spectrum of the radio halo in MACS J0717.5+3745.</a> K. Rajpurohit, G. Brunetti, et al. Feb. 2021, A&A, 646, A135   |
| FEB 2021 | <a href="#">Understanding the radio relic emission in the galaxy cluster MACS J0717.5+3745: Spectral analysis.</a> K. Rajpurohit, D. Wittor, et al. Feb. 2021, A&A, 646, A56                         |
| JAN 2021 | <a href="#">The Coma Cluster at LOw Frequency ARray Frequencies. I. Insights into Particle Acceleration Mechanisms in the Radio Bridge.</a> A. Bonafede, G. Brunetti, et al. Jan. 2021, ApJ, 907, 32 |
| NOV 2020 | <a href="#">A perfect power-law spectrum even at the highest frequencies: The Toothbrush.</a> K. Rajpurohit, F. Vazza, et al. Oct. 2020, A&A, 642, L13   |
| APR 2020 | <a href="#">New mysteries and challenges from the Toothbrush relic: wideband observations from 550 MHz to 8 GHz.</a> K. Rajpurohit, M. Hoeft et al, A&A, Volume 636, id.A30, 20 pp.                  |
| FEB 2019 | <a href="#">The LOFAR Two-metre Sky Survey. II. First data release.</a> T. W. Shimwell, C. Tasse, et al. Feb. 2019, A&A, 622, A1   |

## PAPIERS PUBLIÉS SANS COMITÉ DE LECTURE

|          |   |
|----------|---|
| NOV 2023 | <a href="#">A Collection of German Science Interests in the Next Generation Very Large Array.</a> M. Kadler, D. A. Riechers, et al. Nov. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2311.10056 |
| NOV 2023 | <a href="#">A distributed computing infrastructure for LOFAR Italian community.</a> G. Taffoni, U. Becciani, et al. Jan. 2022. arXiv e-prints, arXiv:2201.11526                 |

## POSTERS

|          |  |
|----------|--|
| JUN 2017 | <a href="#">Broad Impact of Low-Frequency Observing.</a> Poster ( <a href="#">lien ici</a> ) décrivant mon travail de thèse. |
|----------|--|

## CONFÉRENCES & SÉMINAIRES INVITÉS

|          |   |
|----------|---|
| MAR 2024 | Présentation de mes travaux sur les filaments cosmiques avec LOFAR et NenuFAR au séminaire du LERMA, Observatoire de Paris.             |
| MAI 2024 | Présentation de l'état de l'art du LOFAR-VLBI au Max Planck Institute for Radio Astronomy à Bonn, Allemagne.                            |
| NOV 2023 | Présentation de l'état de l'art de LOFAR au Thüringer Landessternwarte à Tautenburg, Allemagne.   |
| NOV 2022 | Présentation de <a href="#">mes travaux sur 3C295</a> au séminaire de la chaire d'astronomie de l'Université de Würzburg, en Allemagne. |
| SEP 2018 | Présentation de mon travail de thèse au séminaire de l'Université de Bologne, Italie.   |

## PARTICIPATIONS ORALES À CONFÉRENCES & WORKSHOPS

---

|          |  |
|----------|--|
| NOV 2023 | <a href="#">GLOW meeting</a> à Bochum. J'y ai présenté mon travail de suivi, avec LOFAR, de relevés aux rayons X effectués par Manami Sasaki et Sara Saeedi autour de M31.   |
| AUG 2023 | <a href="#">FRANCI meeting</a> à Bamberg. J'y ai présenté le projet LOFAR-VLBI dans lequel s'inscrit mon travail post-doctoral de Würzburg, qui porte sur le suivi de blazars à jets émettant en X avec le LOFAR-VLBI.   |
| JUN 2023 | <a href="#">LOFAR Family Meeting</a> à Cologne. J'y ai présenté l'avantage d'une "super-station" NenuFAR au sein du International LOFAR Telescope; elle permettrait d'améliorer nettement la calibration et la mesure de quantités de clôture. J'y ai aussi présenté les avantages de nouvelles extensions de l'ILT. |
| MAR 2021 | <a href="#">6th LOFAR data school</a> . J'y ai présenté la calibration dépendante de la direction pour LOFAR, et organisé un hands-on workshop.  |
| MAR 2021 | <a href="#">RGCW Meeting</a> . J'y ai présenté mes résultats dans le cadre du projet LT09 "Filaments Cosmiques & Champs Magnétiques" de NenuFAR.   |
| APR 2018 | Invited lecturer at <a href="#">the first Italian LOFAR School</a> . J'y ai organisé un workshop sur la réduction dépendante de la direction avec LOFAR, et participé au tutorat dans les workshops de collègues.  |
| SEP 2018 | <a href="#">5th LOFAR data school</a> . J'y ai donné une contribution orale sur la calibration dépendante de la direction, et organisé un tutorial hands-on.   |
| DEC 2017 | <a href="#">SALF IV</a> . J'y ai présenté mes résultats de thèse, un schéma adaptatif de pondération de données interférométriques.  |
| OCT 2016 | <a href="#">3GC4</a> . J'y ai organisé un tutoriel portant sur une librairie python, <a href="#">pyrap</a> . Celle-ci permet de manipuler facilement des données interférométriques.   |



# 3 Travaux de recherche

## 3.1 Contexte scientifique

Ma recherche s'inscrit dans le développement de SKA et ses précurseurs, en particulier à basses fréquences. J'étudie l'évolution des galaxies et des grandes structures à travers les milieux inter-galactiques tels que tracés par le rayonnement radio-synchrotron de rayons cosmiques. Ce rayonnement subit des effets de propagation (e.g. rotation Faraday) mais n'en est pas atténué. La radio-astronomie est donc unique car elle a pour seuls biais observationnels la qualité et maîtrise technique de leurs instruments. La fenêtre basse-fréquence (30 – 144 MHz) de LOFAR et NenuFAR trace les rayons cosmiques les moins énergétiques, qui ont cessé d'être accélérés le plus longtemps avant leur détection. Elle seule peut accéder à de nombreux marqueurs clés pour l'étude des amas de galaxies (e.g. reliques et halos radio d'amas (1)) et de galaxies radio (e.g. bulles fossiles (2)). Cela nécessite l'utilisation d'instruments de pointe tels que LOFAR et NenuFAR, conçus pour fournir sensibilité nécessaire à la détection de ces marqueurs, et à la résolution requise pour les étudier.

Ma recherche se déroule donc sur plusieurs axes: science des *amas de galaxies* (e.g. 3; 4; 5) et de *l'évolution des galaxies* (6; 7), mais aussi *instrumentation, modélisation et algorithmes* (8; 9) permettant à chaque fois de dépasser l'état de l'art actuel pour atteindre les objectifs de sensibilité et de résolution nécessaire à mes projets de recherche, et accessibles avec les instruments existants. Cette expertise a été mise au service de *l'orientation stratégique de plusieurs communautés scientifiques nationales*, pour le développement d'infrastructure de calcul SKA (10) ainsi que la définition de priorités scientifiques (11); *elle est centrale* à plusieurs collaborations et groupes de travail dédiés à *SKA en France et à l'international*.

Ma recherche porte sur l'analyse du *spectre* radio-synchrotron à basses fréquences. La Fig. 3.1 en résume les trois régimes principaux. Aux basses fréquences, deux comportements adviennent au-delà du rayonnement "classique" (régime B), qui suit une simple loi de puissance: si le plasma devient opaque à l'émission synchrotron, celle-ci est "auto-absorbée" dans sa zone d'émission (régime A). Le rayonnement de rayons cosmiques accélérés à un temps  $t$  entraîne une perte d'énergie, et donc une suppression de l'émission synchrotron initiale aux relativement hautes fréquences, en fonction de l'*âge spectral* de cette population de rayons cosmiques (régime C). Les basses fréquences sont donc la **seule fenêtre observationnelle** pour détecter plusieurs types d'émissions fossiles.

Il y a deux intérêts à étudier ce rayonnement à basses fréquences. Le premier est de mesurer son âge radiatif en trouvant la fréquence de basculement entre les régimes B et C, permettant d'étudier directement la diffusion et la (ré)accélération des rayons cosmiques dans les milieux intergalactiques.

Le second intérêt est de détecter de nouvelles populations de rayons cosmiques fossiles, émettant uniquement dans le régime C. Ils ne sont donc détectables qu'à basses fréquences. L'exemple-type de ce type d'émission est celui des reliques radio des amas de galaxies, telles que présentées dans la Fig. 3.2. Ces structures sont des plasma, éjectés tôt dans le processus de formation de l'amas, qui se trouvent réaccélérées par des ondes de choc à très grande échelle générées durant la formation de l'amas-hôte. Leur structure peut être très décentrée par rapport à l'amas, et permet alors de contraindre plusieurs scénarios de formation de structure à grande échelle (e.g. 12). D'autres exemples incluent la détection de bulles de plasma à échelles de Mpc (2). J'ai étudié le rayonnement radio-synchrotron à plusieurs échelles: celles des amas de galaxies, des jets de galaxies, et des structures galactiques.

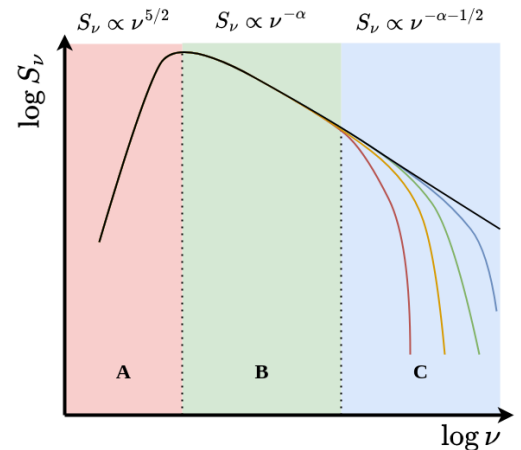


Figure 3.1. *Spectre synchrotron schématique.*

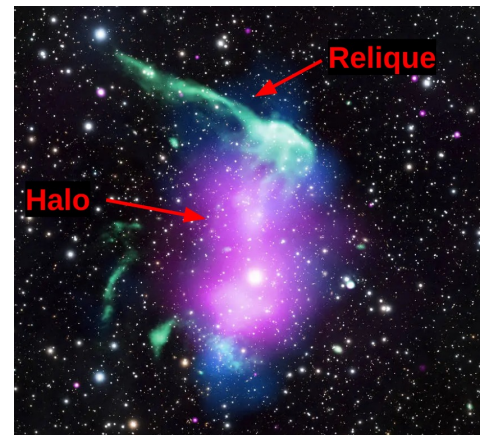
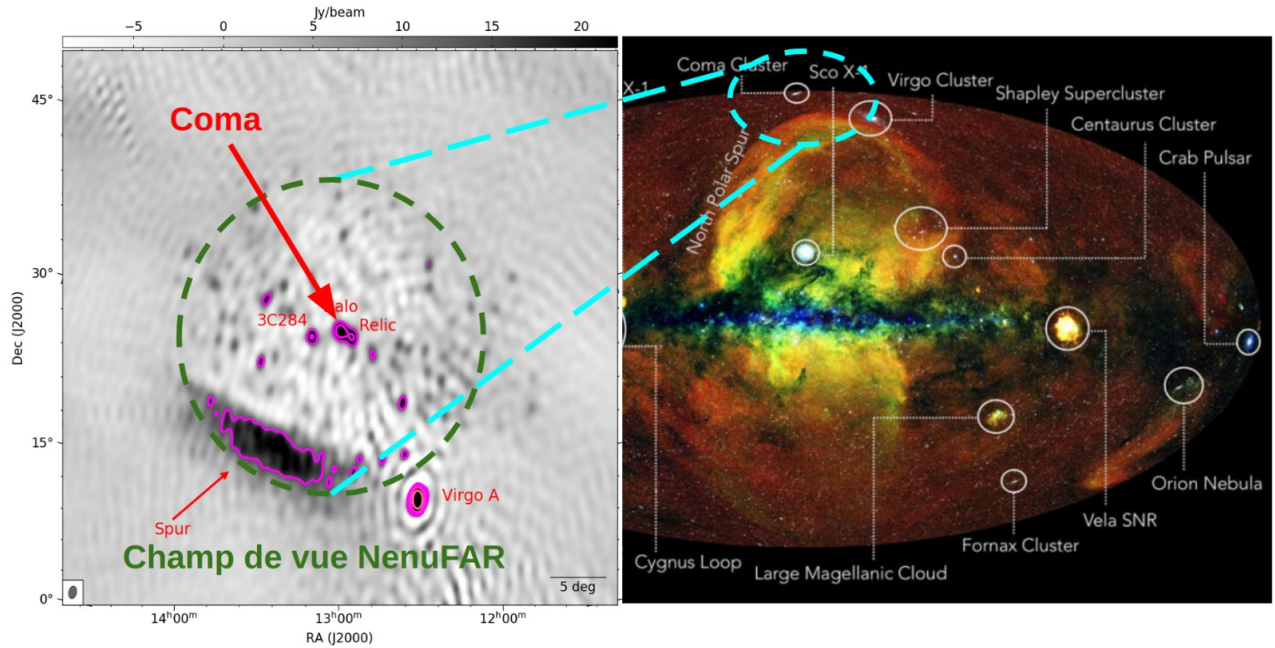


Figure 3.2. *Amas de la "brosse à dents"; radio en vert, X en rose. Crédit image: NASA.*

## 3.2 Amas de galaxies

Mon expertise technique et scientifique a été clé dans le cadre de mon contrat post-doctoral portant sur les amas de galaxies à l'Université de Bologne. J'ai mené les développements instrumentaux ayant permis l'exploitation de données ATCA (13), encadré un travail de thèse portant sur l'étude d'interactions entre jet et milieu intra-amas (14), prêté mon expertise à l'étude d'émission de "pont" entre composantes d'amas de galaxies (5) et effectué la *première et unique réduction dépendante de la direction* d'observations uGMRT d'amas de galaxies (15).

Je suis PI du Projet Long-Terme LT09 de Nenufar, qui est la *première tentative* de détecter **directement** l'émission radio-synchrotron provenant de filaments cosmiques. Cette détection est actuellement limitée par la résolution angulaire de NenuFAR, qui introduit un très haut bruit de confusion (de l'ordre du Jy). L'instrument ne peut pas distinguer entre émission diffuse et pollution par des sources compactes. La Fig. 3.3 montre la *limite actuellement atteignable* par NenuFAR en imagerie: la calibration des données ne permet pas la détection d'émission diffuse autour de l'amas de Coma, situé au centre. J'ai cependant détecté *pour la première fois à 60 MHz* l'émission de la Boucle I du halo Galactique (le North Polar Spur), dont l'étendue est montrée à droite dans la Fig. 3.3.



**Figure 3.3.** Gauche: Champ de Coma, vu par NenuFAR. Droite: Vue eROSITA du ciel, image créée par J. Sanders, H. Brunner & eSASS team (MPE) / E. Churazov, M. Gilfanov (on behalf of IKI).

Je mène les développements techniques et observationnels qui permettront de dépasser les limites actuelles de NenuFAR. Ce travail nécessite le développement et la validation de la réponse instrumentale de NenuFAR sur le ciel ainsi que la calibration de l'ionosphère en fonction de la direction. Ces travaux sont en cours, et seront poursuivis dans les premières phases du projet de recherche proposé pour cette candidature.

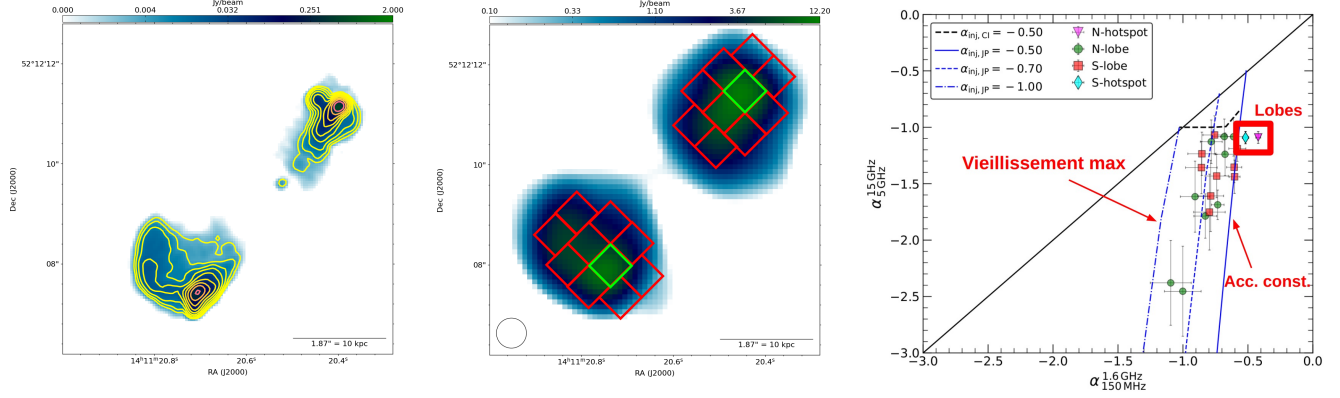
Le projet LT09 de NenuFAR est un relevé éclaircur. Il se concentre sur des amas bien connus, mais descend jusqu'à une fréquence de 30 MHz, où ils n'ont encore jamais été étudiés. Il explore donc un nouvel espace de paramètres, même en l'absence de détection directe du signal recherché. Une fois finalisé, ce relevé pourra être complété, dans sa bande haute (60 MHz) par la soustraction de toutes émissions compactes détectées par LOFAR dans le cadre de ses relevés LoLSS, menés par un co-I du projet (Francesco di Gasperin, UniBo).

Mon expertise en imagerie NenuFAR a permis la détection d'émission radio-synchrotron étendue sur de grands champs, de plusieurs degrés. Les développements techniques et instrumentaux que je réalise me permettent de définir la feuille de route pour la première détection directe des filaments cosmiques.



### 3.3 Galaxies radios & Jets

J'ai mené (6), assisté (16) et encadré (14; 7) plusieurs projets de recherche portant sur l'analyse d'interactions entre jets de galaxies radios et divers milieux inter-galactiques. Leurs résultats ont pu contraindre le cycle d'activité du jet galactique (16), détecter la présence d'instabilités dans le milieu inter-galactique (16), estimer le travail mécanique effectué par le jet en creusant le milieu inter-amas (14), ou encore contraindre l'extinction CMB dans des blazars distants (7). Mon projet principal sur ces interactions (6) a porté sur l'analyse spectrale de 3C295 à 2 paires de fréquences. 3C295 est une des galaxies radio les plus étudiées dans le ciel radio, initialement recensée dans le relevé 3C (17). Je montre sa distribution de flux à 8.5 GHz et 144 MHz dans la Fig. 3.4. Elle est associée à une galaxie-hôte massive de type cD (18), ayant  $z = 0.461$  (19). Son spectre intégré est connu de la bande radio (20; 21; 22; 23) à l'optique (e.g. 24) et jusqu'aux rayons X (e.g. 25; 26). Elle sert de chandelle standard pour la calibration radio (27; 28) grâce à son haut flux intégré (90.87 Jy à 144 MHz, 19.42 Jy à 1.5 GHz) et sa compacité, (étendue angulaire maximale 6''). Cette compacité suggère une interaction entre 3C295 et son environnement.



**Figure 3.4.** *Gauche:* 3C295 vu par le VLA à 8.5 GHz (crédit: M. Hardcastle. *Centre:* 3C295 vu par LOFAR-VLBI à 144 MHz). *Droite:* Courbure spectrale dans les régions de 3C295 identifiées dans la figure centrale.

Mon analyse montre que le spectre des rayons cosmiques change de courbure en fonction de leur diffusion dans le milieu intergalactique. Bien que LOFAR aie une résolution inférieure au VLA, il détecte de nouvelles régions d'émission. La couverture spectrale disponible n'a pas permis d'estimer la fréquence limite entre les régimes synchrotrons **B** et **C**, mais montre que les courbures spectrales des lobes ne sont pas compatible avec une seule accélération mais plutôt une **absorption** à 144 MHz (régime **A** de Fig. 3.1). Ces résultats sont montrés en Fig. 3.4 (6). La majorité de l'émission détectée est compatible avec un modèle radiatif de type KP/JP, c'est-à-dire 1 accélération puis rayonnement, (29). Elle est donc localisée dans la région entre les lignes de la figure de droite de Fig. 3.4. La courbure spectrale mesurée dans les lobes sort de cette région. Elle est donc compatible avec tout scénario d'accélération-émission: injection continue, émission Jaffe-Perola (29), émission Kardashev-Perola (30). Ces lobes sont donc opaques au rayonnement synchrotron à basses fréquences. *Il n'y a pas d'accélération locale de rayons cosmiques aux terminus des jets de 3C295: ce ne sont pas des zones de choc.* Les rayons cosmiques diffusés dans le milieu inter-galactique autour de 3C295 n'ont donc été accélérés que dans le jet.

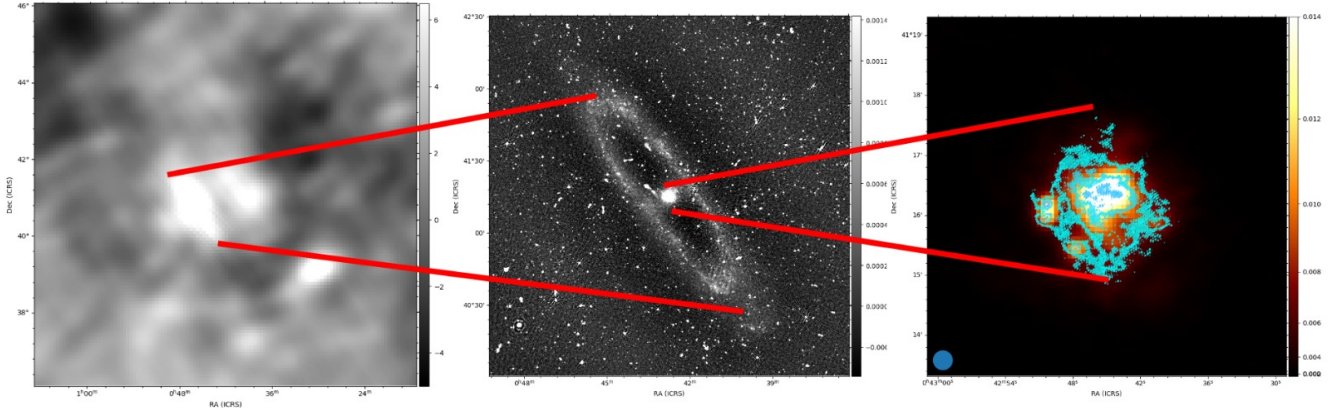
Mon expertise en analyse spectrale du rayonnement radio-synchrotron me permet d'analyser les interactions entre jets galactiques et divers milieux environnants, allant des amas de galaxies aux groupes, en identifiant les propriétés des rayons cosmiques ainsi que des milieux dans lesquels ils rayonnent.

Ce sujet est directement relié à la thématique de recherche du poste pour lequel je candidate. À l'heure actuelle, de très nombreuses sources radio détectées par LOFAR n'ont pas d'information de redshift; des projets tels que **WEAVE-LOFAR** œuvrent à acquérir cette information critique. **Avec le JWST, il sera possible d'associer directement à ces sources leurs contreparties détectées dans les relevés grand-champs de LOFAR, MeerKAT, et le futur SKA.** De nouveaux seuils de sensibilité radio devront être franchis: **je participe activement aux travaux qui rendront cela possible.**

### 3.4 Les milieux galactiques

Une partie importante de mon travail depuis 2021, en collaboration avec Françoise Combes (LERMA-OBSPM), Anne-Laure Melchior (LERMA-OBSPM) et Cyril Tasse (GEPI-OBSPM), porte sur l'étude des champs magnétiques intra-galactiques, et la diffusion des rayons cosmiques dans ces milieux. L'origine et la diffusion des rayons cosmiques au sein des galaxies est une question encore ouverte. Les champs magnétiques galactiques peuvent se diviser en trois composantes principales: **I.** les champs *ordonnés*, dans lesquels l'émission radio-synchrotron sera polarisée, et qui s'alignent avec les structures dominantes d'une galaxie (e.g. "bras magnétiques" entre bras optiques de galaxies spirales, cf (31)); **II.** les champs *turbulents isotropes*, générés par des phénomènes comme les restes de supernovae; et **III.** les champs *turbulents anisotropes*, générés des champs turbulents isotropes par compression ou flux de cisaillement. Selon la taille de la galaxie (32), des effets de dynamo large-échelle peuvent générer, sur des échelles de temps de Gyr, un champ régulier (33). Les champs ordonnés et réguliers jouent un rôle important dans le confinement et la diffusion de rayons cosmiques (34), mais aussi dans l'évolution de la galaxie en contrant l'effet du potentiel gravitationnel sur le gaz (35), participant au refroidissement du milieu interstellaire, et contenant les écoulements de supernovae (36). Les champs magnétiques jouent aussi un rôle dans la formation stellaire (37).

Je travaille donc avec Anne-Laure Melchior et Françoise Combes (LERMA-OBSPM), ainsi que Cyril Tasse (GEPI-OBSPM), sur la réduction de données LOFAR, y compris ses stations internationales, ciblant la galaxie d'Andromède (PI: Anne-Laure Melchior). Cyril Tasse a initialement calibré ces données à une résolution de 5". J'ai réussi la calibration initiale à résolution de 0.4" en été 2023. *J'ai pu, pour la première fois, créer une image LOFAR-VLBI d'un champ aussi complexe.* De nombreux effets de calibration restent à résoudre dans le champ, mais les milieux de cette galaxie dans son ensemble sont désormais accessibles avec une résolution de dizaines de parsecs. La Fig. 3.5 montre Andromède vue par NenuFAR, LOFAR et avec le LOFAR-VLBI: il ne reste plus qu'à réduire les données LOFAR à 60 MHz pour compléter la couverture basses-fréquences d'Andromède, permettant d'étudier les champs magnétiques et populations de rayons cosmiques fossiles dans son champ. Ce travail est donc idéal pour tisser des liens entre les futurs Pôles de recherche de l'Observatoire.



**Figure 3.5.** *Gauche: Andromède vu par NenuFAR. Centre: Andromède avec LOFAR. Droite: Superposition de LOFAR-VLBI sur le cœur d'Andromède tel que vu par LOFAR.*

Fort de ce succès, j'ai obtenu 10h d'observations NenuFAR, et 32h d'observation LOFAR-LBA (sans stations internationales) sur ce même champ. J'ai mené à bien la calibration des données NenuFAR, en attendant les données LOFAR qui seront prises en été 2024. *Les techniques déployées dans le contexte de ce travail résultent d'un véritable travail de recherche technique et observationnel dont je suis le moteur.* Les fruits de ce travail sont généralisables à d'autres projets, dont celui proposé dans le cadre de ma candidature.

Je suis le premier expert LOFAR-VLBI à créer une image LOFAR-VLBI grand-champ d'une galaxie proche. Je mène le développement de nouveaux modes d'utilisation des observations LOFAR et NenuFAR afin d'étudier simultanément l'émission aux plus grandes et aux plus petites échelles. Je fais ainsi d'une pierre deux coups: je permets l'analyse de toutes les sources compactes dans mes champs observés, et je soustrais optimalement leur émission dans ma recherche d'émission diffuse sous-jacente.

### 3.5 Projet de recherche: Contraindre l'origine cosmologique du champ magnétique cosmique avec LOFAR et NenuFAR à 60 MHz

Des champs magnétiques ont été mesurés à presque toutes les échelles physiques de l'astronomie, allant de l'ordre du Gauss (G) sur Terre (38), au  $\mu\text{G}$  dans les galaxies (39) et amas (1). En-dehors des amas, le champ magnétique inter-galactique n'a jamais encore été mesuré directement, bien que l'absence d'émission GeV autour de blazars détectés en TeV (40) suggère qu'il existe. Cette contrainte observationnelle suggère, de surcroît, que ce champ magnétique pourrait rester cohérent jusqu'à des échelles de Mpc. Son origine serait alors difficilement explicable par des mécanismes astrophysiques tels que des jets (41) ou vents galactiques (42), qui opèrent à plus petites échelles. La question est alors : quelle est *l'origine* de ce champ magnétique?

**Problématique de recherche** : contraindre l'origine des champs magnétiques inter-galactiques Mpc.

Elle ne peut pas être contrainte par l'émission diffuse au sein des amas de galaxies, car la dynamique de formation ces structures entraîne de nombreux effets de saturation dynamo : l'intensité du champ magnétique dans les amas tend donc vers une valeur asymptote de l'ordre du  $\mu\text{G}$  (43), indépendamment de l'intensité du champ magnétique initial. Pour contraindre l'origine du champ magnétique inter-galactique aux échelles de Mpc, il faut donc en trouver un traceur en-dehors des amas de galaxies.

L'évolution du champ magnétique dans les filaments cosmiques est dominée par des mécanismes de compressions et de chocs à petites échelles, capables de préserver la mémoire dynamique du système, même sur des temps cosmologiques (44; 45), avec un champ magnétique d'une intensité finale de l'ordre de  $10^{-4} - 0.1 \mu\text{G}$  (46; 47; 48; 44; 49; 50; 51). La détection de rayonnement radio-synchrotron issue de ces régions permettrait alors de contraindre directement l'origine du champ magnétique inter-galactique à grande échelle.

Cette détection est l'un des projets-clés de SKA (52), et les modèles cosmologiques suggèrent qu'elle serait possible pour ses précurseurs (53) dans leurs bandes basses de 30 – 350 MHz, l'indice spectral de son émission radio-synchrotron serait extrêmement pentu ( $\sim -1.2 \gtrsim \alpha \gtrsim -3$  pour  $S_\nu \propto \nu^\alpha$ ); elle serait alors beaucoup plus forte à basse fréquence. Je propose d'anticiper SKA en détectant ce signal avec LOFAR et NenuFAR.

**Projet de recherche** : détecter l'émission radio-synchrotron Mpc dans les filaments cosmiques à 60 MHz.

#### 3.5.1 LOFAR, NenuFAR, SKA : quelles contraintes observationnelles

La détectabilité de l'émission recherchée a été calculée pour LOFAR et SKA1-LOW (53). Ce calcul suppose *une calibration et déconvolution parfaite* avec chaque instrument, ainsi que *la soustraction parfaite de l'émission Galactique en avant-plan* (54). Si ces contraintes sont satisfaites, alors le SKA1-LOW sera capable de détecter l'émission recherchée avec un intervalle de confiance de  $3\sigma$  jusqu'à  $0.17 \mu\text{Jy/arcsec}^2$ ; LOFAR-HBA jusqu'à  $10.59 \mu\text{Jy/arcsec}^2$ ; LOFAR-LBA jusqu'à  $8.473 \mu\text{Jy/arcsec}^2$  (voir Table 2, réf. (53)). Si la magnétisation du milieu inter-galactique dans les filaments est de l'ordre de 1% de l'énergie thermique du gaz (ce gaz étant dans la phase Warm-Hot Interstellar Medium, ou WHIM), il émettra à un niveau de  $\sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ Jy/arcsec}^2$ , quelques ordres de grandeur au-dessus de la limite détection de LOFAR, MWA et SKA-Low. A l'heure actuelle, cette émission n'a pas encore été identifiée : les relevés LOFAR ont atteint une sensibilité de  $2.6 \text{ mJy/arcsec}^2$  à 144 MHz (55) et  $382 \text{ mJy/arcsec}^2$  à 60 MHz (56). LOFAR se trouve donc actuellement 10 fois au-dessus du seuil souhaité à 144 MHz, et 50 fois à 60 MHz.

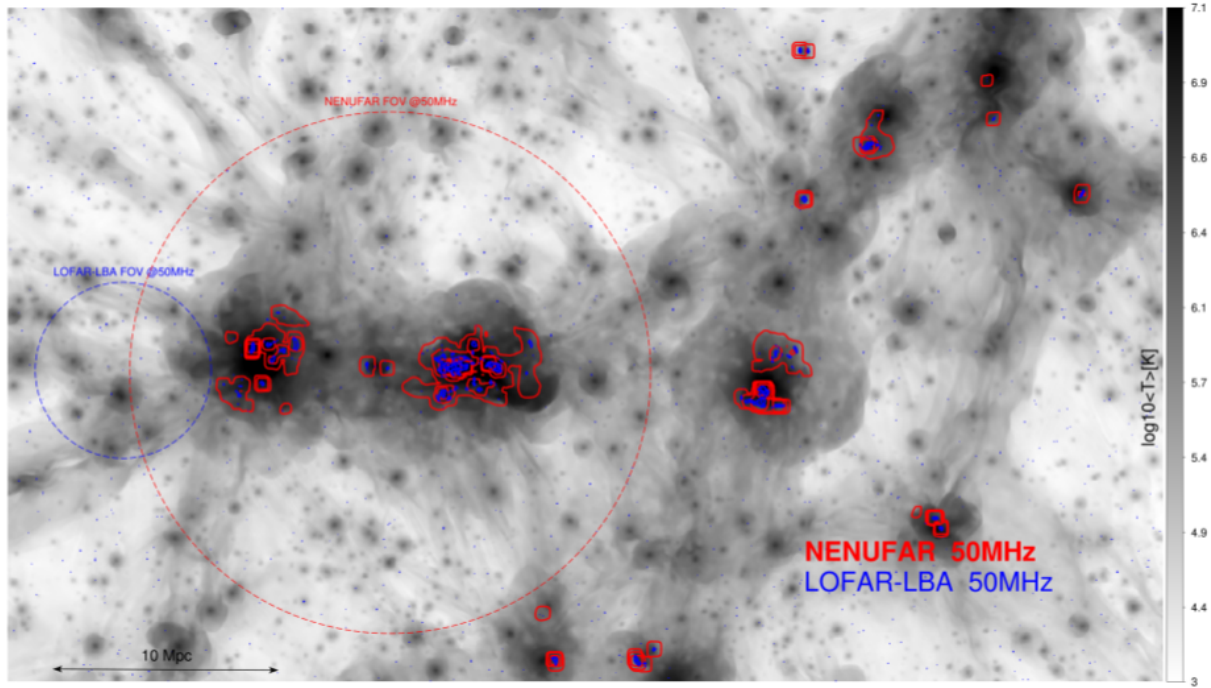
La validation de l'origine de l'émission recherchée, une fois détectée, se fera par deux propriétés : son étendue (émission diffuse) et son indice spectral très pentu (complètement incompatible avec l'émission synchrotron de galaxies radio). Il est donc critique d'améliorer la sensibilité de LOFAR aux basses fréquences. Son extension à Nançay, NenuFAR, est idéale pour cela. La mise en œuvre de cette amélioration mobilisera l'adaptation de techniques connues à ces précurseurs SKA, et nécessite donc une compétence très spécifique. La démonstration de ces techniques permettra le futur développement de SKA.

**Limite observationnelle** : sensibilité LOFAR à 60 MHz. **Solution** : compléter par NenuFAR.

### 3.5.2 Stratégie : technique et observation

Le projet de recherche proposé repose sur une innovation observationnelle qui permettra de dépasser les limites attendues des relevés LOFAR, au moins à basses fréquences. Dans les années à venir, le travail des relevés à 144 MHz portera sur l'utilisation des lignes de bases internationales; avec le déploiement de LOFAR2.0 prévu en été 2025, cela pourra aussi inclure leur utilisation dans les relevés à 60 MHz. La communauté s'attend donc à une amélioration d'un facteur 10 de la résolution des relevés LOFAR existants.

Aux plus basses fréquences (30 – 50 MHz) la réponse instrumentale de LOFAR est fortement dégradée. Cela est dû à la conception des antennes LBA, qui observent dans cette bande. Cette fenêtre est cependant celle où la chance de détection du rayonnement synchrotron dans les filaments cosmiques est maximisée. Les antennes de NenuFAR, basées sur le MWA, ont une réponse instrumentale bien supérieure aux LBA de LOFAR : cet instrument est donc la clé qui permettra d'ouvrir cette fenêtre observationnelle. En 8 heures d'observation, le relevé LOFAR à 60 MHz atteint une sensibilité nominale de  $\sim 1$  mJy; NenuFAR atteint 0.64 mJy avec le même temps d'intégration. L'obstacle principal, pour NenuFAR, est sa faible résolution. Celle-ci entraîne un haut bruit de confusion (57; 58) qui domine largement sur la sensibilité de l'instrument. La Fig. 3.6 montre les niveaux de détection à  $3\sigma$  attendus pour LOFAR et NenuFAR à 50 MHz, en utilisant la limite de confusion pour ce dernier. Le grand champ de vue permet à NenuFAR d'explorer efficacement les larges régions où le rayonnement recherché pourrait se trouver. Cependant, en l'absence de détection, il faudra dépasser le bruit de confusion. Il faut donc augmenter sa résolution, en le combinant avec LOFAR.



**Figure 3.6.** Contours de détection et champ de vue de NenuFAR et LOFAR à 50 MHz. Les contours tracent la détection  $3\sigma$  en l'absence d'autres sources. Figure de simulation (F. Vazza, Unibo).

Mon projet de recherche se déroule donc selon deux axes. D'abord, un développement technique et instrumental novateur, qui permettra incrémentalement d'atteindre de nouveaux seuils en sensibilité à 60 MHz. Nous y visons, chaque fois, la détection du rayonnement radio-synchrotron du milieu inter-galactique dans les filaments cosmiques. Si la sensibilité atteinte ne permet pas cette détection, pendant le développement nécessaire pour atteindre le prochain seuil de sensibilité, nous analyserons les sources détectées ayant un intérêt scientifique (e.g. blazars, populations de galaxies radio starburst, rayonnement fossile galactique). La configuration observationnelle au cœur de mon projet permettra un saut qualitatif dans la sensibilité finale des relevés LOFAR et NenuFAR.



### 3.5.3 Mise en œuvre du programme de recherche

Le cœur de mon projet de recherche repose sur ma compétence technique et instrumentale, que je propose de mobiliser pour contraindre l'origine cosmologique des champs magnétiques des filaments cosmiques. Il faudra, pour ce faire, atteindre des sensibilités qui resteront inégalées dans l'ère SKA. Je propose ainsi le plan suivant :

1. **2025** : Atteindre la limite de confusion de NenuFAR (323 mJy, résolution 3');;
2. **2028** : Atteindre 150  $\mu$ Jy à 60 MHz (LOFAR + NenuFAR, résolution 10");;
3. **2030** : Atteindre 10  $\mu$ Jy à 60 MHz (LOFAR-VLBI + NenuFAR, résolution 1");.
4. **2034** : Atteindre 20  $\mu$ Jy à 30 MHz (LOFAR-VLBI + NenuFAR, résolution 2").

#### Atteindre la limite de confusion de NenuFAR - amas de Coma - fin 2025

Le projet de recherche dans son ensemble se base sur la sensibilité de NenuFAR pour augmenter celle de LOFAR. La maîtrise technique de l'imagerie NenuFAR est donc un prérequis. À l'heure actuelle, nous n'en sommes pas loin : je travaille avec l'équipe NenuFAR pour implémenter sa réponse instrumentale dans des logiciels de calibration et d'imagerie qui permettront, de surcroît, de mitiger l'impact de l'ionosphère sur la mesure. La validation de ces outils est en cours. Ils permettront à NenuFAR d'atteindre sa limite de confusion, de 173 mJy à 66 MHz. Cette étape sera la finalisation du projet pilote NenuFAR-LT09 avant le déploiement d'imagerie en polarisation avec NenuFAR.

#### Atteindre 150 $\mu$ Jy à 60 MHz à 60 MHz - M31 puis Coma - fin 2028

La seconde étape est de combiner dans le plan Fourier des observations LOFAR et NenuFAR. Les données LOFAR permettront de résoudre les sources compactes détectées par NenuFAR, et donc d'en soustraire la contribution. Une technique similaire est utilisée routinement avec le VLA (59) et ses plusieurs configurations d'observation. Cette idée peut sembler triviale, mais une fois validée, pourra permettre aux interféromètres radio du futur de maximiser simultanément leur résolution angulaire et leur sensibilité en exploitant cette option de combinaison hétérogène dans leur conception. La validation s'effectuera sur un champ complexe mais bien étudié, et susceptible d'inclure de l'émission compacte et diffuse : celui de la galaxie d'Andromède. Le but sera de détecter l'émission diffuse de rayons cosmiques dans le halo de cette galaxie. Sa détection imposera de fortes contraintes sur certains modèles d'auto-annihilation de matière noire (e.g. 60; 61). À cette fin, nous avons obtenu, avec Thomas Seigert (JMU Würzburg) 1 Ms d'intégration sur Andromède avec INTEGRAL en rayons- $\gamma$  (62); 32h d'observations LOFAR, et 10h d'observations NenuFAR, à 60 MHz. Je suis le PI de ces dernières observations, qui ont été prises *dans le but* de valider la technique proposée.

Une fois validée, cette technique sera déployée pour accélérer d'un facteur 10.5 la recherche du le rayonnement radio-synchrotron des filaments cosmiques. Nous ferons une demande de temps d'observation NenuFAR afin de compléter la couverture LOFAR du ciel Nord à 60 MHz, dans le but d'atteindre la limite de confusion de LOFAR à 60 MHz dans les champs extragalactiques. Nous poursuivrons ensuite cette approche sur tout le ciel Nord.

#### Atteindre la limite de confusion de LOFAR-VLBI à 60 MHz - ciel Nord - fin 2035

La prochaine étape sera la réduction de données LOFAR-VLBI à 60 MHz, qui est l'un des buts principaux de la collaboration Relevés LOFAR, et de LOFAR2.0. Ce travail se déroulera sur le long terme. Ma contribution sera la prise et réduction de données NenuFAR permettant d'atteindre la limite de confusion sur tout le ciel, et le développement de techniques permettant le LOFAR-VLBI à 60 MHz.

#### Atteindre la limite de confusion de LOFAR-VLBI à 30 MHz - ciel Nord - 2035+

La fenêtre de fréquence 30 – 50 MHz ne sera pas visée par le SKA. Ainsi, sur le long terme, LOFAR pourra basculer sur la cartographie du ciel radio à ces fréquences. Cela nécessitera une amélioration de ses antennes LBA, et pourrait passer par le déploiement de plusieurs stations NenuFAR-LSS dans le réseau LOFAR.

### 3.6 Liens entre le projet et les galaxies primordiales

Le projet décrit s'intéresse directement à des milieux inter-galactiques sur des échelles cosmologiques. Afin de les étudier, il devra atteindre des sensibilités très profondes, et donc modéliser et soustraire les sources ponctuelles présentes dans les champs considérés.

Ces sources ponctuelles ont un intérêt scientifique propre. Généralement, l'élément limitant leur étude est le manque de contrepartie ou d'association dans d'autres bandes. Cependant, avec les avancées actuelles du JWST, les galaxies les moins lumineuses seront détectées à la fois en infra-rouge et en radio basses-fréquences. La résolution optique du JWST est semblable à celle obtenue en LOFAR-VLBI: l'association de sources détectées sera alors tout à fait naturelle. Cela permettra donc l'étude de larges populations de galaxies primordiales, y compris, avec LOFAR, leur budget d'émission dû à des processus de formation d'étoile en plus de leur budget d'émission radio provenant de noyaux actifs.

### 3.7 Insertion du projet dans le paysage SKA-LOFAR

Mon projet de recherche s'inscrit dans les travaux de relevés SKA et précurseurs. Je propose un développement technique qui pourrait accélérer dramatiquement ces relevés, et qui serait applicable à de futurs télescopes radios. Ce développement est nécessaire pour la réalisation de mon projet de recherche.

Ce travail se situe dans le cadre de la collaboration internationale LOFAR, avec le soutien de collègues en Italie (INAF et Université de Bologne), en Allemagne (GLOW, MPFiR, TLS, et JMU Würzburg), au Royaume-Uni (Universités d'Édimbourg, de Durham, et de Manchester) et aux Pays-Bas (Université de Leyde). En France, il s'inscrit dans le cadre du développement de NenuFAR, mené à l'Observatoire de Paris, l'Université d'Orléans, et l'Unité Scientifique de Nançay. Sorbonne Université serait donc le lieu idéal où mener ce projet à bien, de par ses liens étroits avec ces institutions. L'équipe de Françoise Combes, au LERMA (UMR 8112), est particulièrement adaptée à la mise en œuvre des premières étapes proposées; j'y travaille déjà avec Anne-Laure Melchior. Cela serait donc le cadre parfait pour mener la validation à moyen-terme de mon projet de recherche. La fusion des laboratoires actuels du LERMA, LUTH et GEPI sera le cadre idéal dans lequel le finaliser. Mes collaborations existantes avec le personnel de l'Observatoire et de l'USN (Philippe Zarka, Julien Girard, Alan Loh, Jean-Mathias Grißmeier, Cyril Tasse) permettra de faciliter la réalisation de mon programme de recherche en prenant en compte les contraintes d'enseignement et d'organisation de la vie scientifique propres au statut de Maître de Conférences.

### 3.8 Impact scientifique

La détection directe d'émission synchrotron permettra de caractériser directement, pour la première fois, les propriétés non-thermiques du milieu inter-galactique, i.e. celles de ses composantes qui ne sont pas en équilibre thermodynamique avec leurs environnements. Cela permettra d'étudier, en-dehors des amas de galaxies, les interactions entre les jets de galaxies radio et le milieu inter-galactique. Si la magnitude du champ magnétique mesuré dans les filaments cosmiques est compatible avec une origine cosmologique, il sera possible d'inclure de tels champs magnétiques dans les modèles cosmologiques. La cartographie de la structure magnétique du milieu inter-galactique dans la toile cosmique ouvrira de nouveaux horizons scientifiques. Est-ce que le champ du milieu intergalactique est ordonné, et jusqu'à quelles échelles? Sont-elles super-causales, et donc nécessairement formées plus tôt durant l'expansion de l'Univers? À quelles échelles commencent les champs turbulents dans le milieu inter-galactique en-dehors des amas, et à quels phénomènes astrophysiques ou cosmologiques pourraient correspondre ces échelles?

Quant au scénario négatif, de non-détection d'émission radio-synchrotron dans le milieu inter-galactique des filaments cosmiques, il permettra d'affiner la recherche avec SKA, qui a pour un de ses buts la recherche de cette émission. Le projet pivotera alors sur la création d'un relevé profond et efficace du ciel Nord avec la technique développée. Les relevés LOFAR actuels mesurent plus de 4 millions de sources avec la sensibilité actuelle (63) : je propose de décupler la sensibilité finale obtenue. Nous étudierons alors les propriétés des objets recensés, qui inclueront galaxies radio, galaxies starburst, émission fossile, et nouvelles découvertes.



## 4 Expérience d'enseignement

### 4.1 Enseignements effectués

Mon expérience d'enseignement est décrite succinctement dans [Chapter 1](#). J'en résume les caractéristiques dans la [Section 4.1](#); NASSP signifie "National Astrophysics and Space Science Programme", une structure Sud-Africaine. J'ai été chargé d'une mission d'enseignement durant ma thèse, mais celle-ci ne s'est déroulée qu'à moitié en France; je n'ai donc que 96 heures d'ETD à mon actif dans le cadre de cette mission. J'ai complété mon enseignement de ma propre initiative durant mes études en Afrique du Sud.

| Enseignement               | Institution                       | Niveau               | eHTD |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------|------|
| Introduction à la physique | Rhodes University, Afrique du Sud | L1                   | 60   |
| Interférométrie            | NASSP, Afrique du Sud             | M2                   | 15   |
| Lumières sur l'Univers     | Observatoire de Paris             | Diplôme d'Université | 60   |
| TP Observation             | Unité Scientifique de Nançay      | M2                   | 20   |
| Parrainage                 | Observatoire de Paris             | École et collège     | 15   |

### 4.2 Approche pédagogique

J'ai fait mes études dans le cadre de plusieurs systèmes éducatifs: système Français et CNED jusqu'au collège, système Américain au Bac, licence dans le système écossais, et Master à l'Observatoire de Paris en France. Chacun a mobilisé une approche pédagogique propre, en mettant l'emphasis sur différents aspects des concepts enseignés. J'ai de surcroît enseigné dans le secondaire en Afrique du Sud, au niveau de la L1. Cette expérience a compris à la fois encadrement de TDs et cours magistraux.

Fort de ces expériences, je considère qu'un enseignement efficace demande une forte organisation, qui est une condition nécessaire pour rendre les concepts transmis le plus clair possible, naviguer les doutes et confusions des étudiants, et leur permettre de synthétiser efficacement leurs connaissances nouvelles avec leur compréhension existante. Bien qu'une telle organisation demande beaucoup de temps, de travail et de discipline, elle permet de faciliter énormément la tâche d'enseignement pour tous, professeurs et étudiants, une fois menée à bien.

Elle n'est cependant pas suffisante: je considère qu'il est critique de savoir communiquer à ses étudiants notre propre intérêt pour la physique, aussi bien sa technique que sa science. Il existe de nombreuses barrières à l'assimilation efficace de connaissances: celles-ci peuvent relever de l'ordre de contraintes sociales (e.g. projets d'enfants ou responsabilités de garde de dépendants), matérielles (e.g. nécessité de gagner sa vie), psychologiques (e.g. épisodes de dépression chronique), etc. Faire du travail d'assimilation de connaissances un fardeau maximisera les chances que son succès se heurtera à ces barrières. Je pense que la meilleure façon de permettre aux étudiants de s'approprier réellement le contenu de leurs cours est, d'abord, de leur *donner confiance* en leur propres capacités.

La seconde partie du travail d'enseignant revient alors à demander aux étudiants de confronter les limites de leur compréhension dans le but d'apprendre. C'est là que l'intérêt pour les sujets abordés peut être transmis, que ce soit durant les cours, en travaux dirigés ou en travaux pratiques. En communiquant aux étudiants que les problèmes auxquels ils font face sont résolubles, qu'ils sont capables de les confronter, mais que cela demande un travail dont la gratification est le développement de soi et de leurs connaissances, il devient possible de leur communiquer une motivation propre à s'investir dans leur formation, en plus de celles qui les auront poussés à la rejoindre (si ce n'était pas leur motivation principale).

Mon approche pédagogique consiste donc à prendre très au sérieux la demande d'organisation imposée par des devoirs d'enseignement. J'œuvre ensuite à permettre aux étudiants de se sentir en confiance (e.g. oser poser des questions "bêtes", discuter entre eux des sujets enseignés, etc), pour leur communiquer les concepts du cours de façon à les encourager à devenir moteurs de leur travail. Ceci fait, le travail pédagogique devient un travail d'encadrement et de communication. Je note au passage qu'il y aura certainement des étudiants qui se sentiront déjà en confiance, auront la capacité de travail nécessaire pour mener leur formation à bien, et feront des études formidables. Ma priorité est de permettre aux étudiants qui ne font pas encore partie de cette cohorte de la rejoindre en cours de route. Ensuite, personne ne pourra apprendre à leur place: je ne peux que les encadrer.

### 4.3 Encadrement de projets de Master et de thèse

J'ai eu la chance de pouvoir encadrer de nombreux travaux d'étudiants de Master et de thèse. Durant mon premier poste post-doctoral à l'Université de Bologne, je me suis fait confier l'encadrement de la réduction de données LOFAR de plusieurs étudiants en Master, Noemi Labella et Giada Pignatora. Cette dernière a poursuivi sa recherche en thèse dans la même équipe. J'ai de plus eu la responsabilité d'encadrer la réduction de données de deux thésards dans la même période, Nadia Biava (qui a soutenu sa thèse en 2021) et Giada Pignatora.

Dans le cadre de mon second poste post-doctoral à l'Université de Würzburg, je me suis fait confier l'encadrement du projet de thèse de Hrishikesh Shetgaonkar, dont le contrat commençait dans la même période que le mienne. Ma responsabilité relève à la fois de l'encadrement au jour le jour (mise à niveau technique, discussions scientifiques, et aide à la prise de confiance) et du transfert de connaissances et d'expertise technique (développement de pipelines de réduction, capacité de diagnostic d'images radio-interférométriques, et expertise dans la réduction artisanale de données radio). Il entame maintenant sa troisième année de thèse, sur un total de quatre prévues, avec deux publications scientifiques en cours de rédaction, et ayant présenté ses travaux dans de nombreuses conférences nationales et internationales.

Je co-encadre avec Kshitij Thorat une étudiante en M2 à l'Université de Pretoria, Katlego Mogamisi, qui s'intéresse à l'étude des interactions entre galaxies et milieux inter-galactiques. Elle soutiendra son mémoire de master dans un an, et souhaite poursuivre ses études avec une thèse. Je me suis enfin fait confier l'encadrement d'un étudiant en Erasmus à l'Université de Würzburg, qui commencera son mémoire de Master dans notre équipe dans le printemps. J'ai moi-même élaboré son projet, qui portera sur la mise en œuvre d'une technique radio-interférométrique novatrice.

### 4.4 Insertion dans la Faculté de Physique

J'ai contacté plusieurs personnels de la Faculté de Physique (Jérôme Tignon, Pacôme Delva, Gwenaél Boué) afin d'avoir une idée des besoins d'enseignements, ainsi que des projets déjà en place. Si ma candidature est retenue, je me plierai évidemment aux besoins de la Faculté de Physique, en particulier en termes de gestions de groupes de TD et pour l'encadrement du programme de résolution de problèmes. Fort de mon expérience au DU-LU de l'Observatoire, je pense que je serai tout à fait capable de participer aussi à la formation numérique de python sur jupyterhub proposée en L1. Enfin, je peux participer à la rédaction de documents centraux nécessaires à une organisation et une communication efficace entre tout le personnel d'enseignement (polycopiés, bibliothèque de simulations, création d'interfaces utilisateurs agréables, etc), en mettant l'accent sur la centralité des fondamentaux (physique, mathématiques, informatique) qui permettront aux étudiants de la Faculté de poursuivre sereinement leurs projets professionnels, dans la recherche ou l'industrie.

Je suis conscient de la charge de travail que représente la tâche d'enseignement du statut de maître de conférences - même avec la décharge de première année prise en compte. J'espère pouvoir, si possible, utiliser la décharge de 32h ETD des 5 premières années de statut afin de suivre des formations de pédagogie y compris pour l'obtention, si possible et utile, de CAPES et agrégation. Ce projet de formation pédagogique sera poursuivi, évidemment, en fonction des priorités et des besoins de la Faculté de Physique.

Mon profil d'enseignement est adapté aux besoins de la Faculté de Physique de Sorbonne-Université: j'ai à la fois une expérience d'encadrement de TD/TP, de suivi numérique à distance, et d'élaboration de documents pédagogiques de type jupyter notebook. L'investissement de Sorbonne-Université dans des méthodes pédagogiques novatrices (enseignement agile, atelier de recherche encadrée, résolution de problèmes) m'intéresse énormément: j'espère avoir l'occasion de les déployer moi-même.

# 5 Organisation, administration et valorisation de la recherche

## 5.1 Organisation de la vie de recherche

Ma participation à l'organisation de la vie de recherche se divise en trois périodes: ma thèse, mon premier post-doc, et mon second post-doc. Durant ma thèse, je n'ai commencé à être actif sur cet axe que pendant mon séjour en Afrique du Sud, où j'ai été l'un des étudiants moteurs dans des séances de présentation de nos travaux et de discussions scientifiques et techniques entre étudiants, allant des master aux thésards.

Mon post-doc à Bologne a subi de plein fouet la crise du Covid-19, qui a frappé particulièrement durement l'Italie durant la période où j'y ai travaillé. Notre groupe de recherche regroupant trois post-docs, dont j'étais le plus jeune, j'ai participé à nos efforts collectifs d'organiser un semblant de vie scientifique en distanciel, et ensuite nos efforts de reprise de vie normale après le confinement.

Mon second post-doc, à l'Université de Würzburg en Allemagne, est le premier poste de post-doctorant décerné en radio en Allemagne. On m'a donc confié des responsabilités au-delà de celles d'un simple chercheur et relevant plus des activités d'un professeur junior, y compris l'encadrement direct d'un thésard. Pour mener ces nouvelles activités à bien, j'ai pris l'initiative d'organiser pendant un an un journal club au sein du groupe de recherche, en y invitant aussi des étudiants et chercheurs de toute la faculté d'astronomie. J'ai dû ensuite passer la main par manque de temps. J'ai cependant continué à participer à de nombreuses discussions avec les étudiants de la faculté, afin de les aider à s'investir dans leurs projets de thèse.

Enfin, j'ai fait partie du Local Organising Committee (LOC) d'une semaine de travail LOFAR-VLBI à l'Observatoire de Paris en été 2023. Ce dernier a été un succès retentissant auprès des collègues internationaux.

## 5.2 Responsabilités Administratives

Dans le cadre de mon post-doc à Würzburg, l'administratif (tout uniquement en Allemand et en papier) fut l'un des points compliqués à gérer pour toute la faculté. Je me suis coordonné avec le secrétaire à mi-temps chargé de gérer l'administratif pour l'ensemble de la faculté (2 permanents, 3 profs junior, 4 postdocs, 11 thésards) afin de minimiser la lourdeur de la charge. Cela a mobilisé un grand temps de travail, de patience et d'écoute, mais était strictement nécessaire pour pouvoir atteindre un fonctionnement minimum pour la faculté, car l'administratif de l'ensemble de l'Université s'est renouvelé durant cette période.

Enfin, en tant que coordinateur de la mise en œuvre (commissioning) du mode NenuFAR-LSS, j'ai organisé une semaine de travail à l'Observatoire de Paris.

## 5.3 Valorisation de la recherche

Ayant effectué mes travaux post-doctoraux dans des pays dont je ne parlais initialement pas la langue, je n'ai pas pu m'investir autant que je l'aurais souhaité dans des travaux de valorisation de la recherche. J'ai tenté de lancer un club d'astronomie amateur au tout début de mon postdoc en Allemagne, mais les thésards qui étaient motivés pour s'y investir ont vite soutenu leur thèse, et le projet n'a pas pu aboutir. C'est un aspect du travail de chercheur qui me tient à cœur et que j'aimerais mener, en coopération avec les structures associatives et la société civile.

## 5.4 Insertion dans Sorbonne-Université

La fusion des anciennes P4 et P6 a été une opération complexe. L'ensemble du personnel académique continue de se mobiliser pour aider les étudiants à s'y retrouver, et aider les collègues à naviguer ce nouveau paysage administratif efficacement. Les relations avec les autres établissements de recherche en Île-de-France continue d'évoluer; la reformation des laboratoires qui aura bientôt lieu amènera sans doute son lot d'instabilités. Ces dernières seront largement navigables mais demanderont patience, organisation et communication efficace. Je pense posséder ces qualités, et espère ainsi pouvoir participer à ces travaux de rationalisation et de modernisation de la recherche en Île-de-France.

## 6 Temps d’observation obtenus sur télescopes

Mon profil de recherche est celui d’un observateur. J’ai développé une capacité à identifier des besoins observationnels pour divers projets scientifiques, et d’obtenir le temps d’observation nécessaire. J’ai non seulement obtenu du temps d’observation pour mes propres projets scientifiques, mais aussi en soutien à des projets d’étudiants en thèse.

J’ai obtenu le temps d’observation en PI (Primary Investigator) sur les projets suivant:

- Un total de 60h d’observations NenuFAR dans le cadre du projet LT09 “Magnétisme et Filaments Cosmiques”, dont je suis le Principal Investigator.
- Un total de 10h d’observations NenuFAR sur M31 (code RP2A), la galaxie d’Andromède, afin de détecter le rayonnement radio-synchrotron provenant de son halo.
- Un total de 32h d’observations de M31 avec LOFAR dans sa bande LBA, à 60 MHz, afin de compléter la couverture spectrale de cette source.
- Un total de 4h d’observations sur une source mystérieuse afin d’en déterminer la nature. Celle-ci se trouvait en bord de champ d’une observation NenuFAR de M31.
- Un total de 30h d’observations de M31 avec l’uGMRT (proposal ID 46\_082) .
- Un total de 192h sur NenuFAR et sur l’International LOFAR Telescope (ILT, i.e. LOFAR avec lignes de bases internationales) afin de mener à bien le commissioning du mode NenuFAR-LSS.

J’ai de plus été Co-I sur les projets suivants:

- 1Ms d’observations avec INTEGRAL (ID: 2120016) sur M31. Ce projet a été mené par un collègue, Thomas Siegert, dans le but de compléter en gamma la couverture radio obtenue la même année.
- 7h d’observations MeerKAT portant sur des observations de suivi de détections IceCUBE (neutrinos), dans le but d’en déterminer l’origine. Ce projet a été élaboré par moi-même ainsi qu’un étudiant de thèse à l’Université de Würzburg, Florian Rösch.
- 20h d’observations MeerKAT portant sur le suivi d’un sursaut gamma, dans le but d’en déterminer l’origine par imagerie radio. Ce projet a été élaboré et mené par Florian Eppel, un thésard à l’Université de Würzburg: j’ai servi de soutien et d’expert technique.
- 11h d’observations uGMRT sur le blazar 4C+19.44 (proposal ID 46\_081). Ce projet a été mené par mon étudiant en thèse, qui étudie les nœuds du jet de ce blazar à basses fréquences.
- 60h d’observations LOFAR-VLBI de blazars émettant en TeV (ProjID: LC20\_033), pour un projet mené par mon étudiant en thèse, Hrishikesh Shetgaonkar. Ces observations lui permettront d’élaborer une étude de population de la contrepartie radio de ces jets gamma.
- 26h d’observations LOFAR-HBA d’une population d’amas de galaxies à mini-halos (ProjID: LC16\_003), pour un projet mené par mon collègue Christopher Riseley afin de déterminer leurs propriétés spectrales avec LOFAR et MeerKAT.
- 38 d’observations LOFAR-HBA de différents amas (ProjID: LC15\_021), pour un projet mené par ma collègue Kamlesh Rajpurohit dans le but d’étudier une classe de reliques radio dont l’émission serait générée principalement par le mécanisme de Diffusive Shock Acceleration.
- 80h d’observations LOFAR-HBA de l’amas de Coma (ProjID: LC15\_020), pour un projet mené par Annalisa Bonafede, cheffe du groupe de recherche dans lequel j’ai travaillé pour mon premier post-doc à Bologne. J’ai servi d’expertise technique pour ce projet.
- 10h d’observations LOFAR-LBA de l’amas cool-core RXJ1720.1+2638 (ProjID: LC12\_018). Ce projet a été mené par Nadia Biava durant sa thèse à l’Université de Bologne.

Je suis donc capable d’obtenir, de façon fiable, du temps d’observation sur des télescopes de classe précurseurs SKA, pour mes propres projet, en soutien à ceux de mes collègues, ou bien pour des projets de thèses.

## 7 Références utilisées

- [1] R. J. van Weeren, F. de Gasperin, et al. Feb. 2019, *Space Sci. Rev.*, 215, 16
- [2] M. Brienza, T. W. Shimwell, et al. Dec. 2021, *Nature Astronomy*, 5, 1261
- [3] Etienne Bonnassieux, Evangelia Tremou, et al. Nov. 2021, *Galaxies*, 9, 105
- [4] K. Rajpurohit, D. Wittor, et al. Feb. 2021, *A&A*, 646, A56
- [5] A. Bonafede, G. Brunetti, et al. Jan. 2021, *ApJ*, 907, 32
- [6] Etienne Bonnassieux, Frits Sweijen, et al. Feb. 2022, *A&A*, 658, A10
- [7] A. Kappes, P. R. Burd, et al. Jul. 2022, *A&A*, 663, A44
- [8] Etienne Bonnassieux, Alastair Edge, et al. May 2020, *A&A*, 637, A51
- [9] Etienne Bonnassieux, Cyril Tasse, et al. Jul. 2018, *A&A*, 615, A66
- [10] Giuliano Taffoni, Ugo Becciani, et al. Jan. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2201.11526
- [11] M. Kadler, D. A. Riechers, et al. Nov. 2023, arXiv e-prints, arXiv:2311.10056
- [12] K. Rajpurohit, F. Vazza, et al. Oct. 2020, *A&A*, 642, L13
- [13] C. J. Riseley, E. Bonnassieux, et al. Sep. 2022, *MNRAS*, 515, 1871
- [14] Nadia Biava, Marisa Brienza, et al. Jun. 2021, *A&A*, 650, A170
- [15] K. Rajpurohit, M. Hoeft, et al. Apr. 2020, *A&A*, 636, A30
- [16] M. Brienza, L. Lovisari, et al. May 2022, *A&A*, 661, A92
- [17] D. O. Edge, J. R. Shakeshaft, et al. Jan. 1959, *MmRAS*, 68, 37
- [18] R. D. Mathieu & H. Spinrad. Dec. 1981, *ApJ*, 251, 485
- [19] C. P. Ahn & et al. Feb. 2013, *VizieR Online Data Catalog*, V/139
- [20] Chidi E. Akujor, R. E. Spencer, et al. May 1990, *MNRAS*, 244, 362
- [21] R. A. Perley & G. B. Taylor. May 1991, *AJ*, 101, 1623
- [22] P. J. Napier, A. R. Thompson, et al. Nov. 1983, *IEEE Proceedings*, 71, 1295
- [23] R. A. Perley, C. J. Chandler, et al. Sep. 2011, *ApJ*, 739, L1
- [24] G. J. Thimm, H. J. Roeser, et al. May 1994, *A&A*, 285, 785
- [25] D. E. Harris, P. E. J. Nulsen, et al. Feb. 2000, *ApJ*, 530, L81
- [26] G. Brunetti, M. Cappi, et al. Jun. 2001, *A&A*, 372, 755
- [27] Anna M. M. Scaife & George H. Heald. Jun. 2012, *MNRAS*, 423, L30
- [28] R. A. Perley & B. J. Butler. May 2017, *ApJS*, 230, 7
- [29] W. J. Jaffe & G. C. Perola. Aug. 1973, *A&A*, 26, 423
- [30] N. S. Kardashev. Dec. 1962, *Soviet Ast.*, 6, 317
- [31] R. Beck. Nov. 1996, *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen II*, 1996, 262
- [32] T. G. Arshakian, R. Beck, et al. Jan. 2009, *A&A*, 494, 21
- [33] Aleksandr A. Ruzmaikin, Dmitrii D. Sokolov, et al. 1988, *Magnetic Fields of Galaxies*, vol. 133
- [34] Ellen G. Zweibel. May 2013, *Physics of Plasmas*, 20, 055501
- [35] Ahmed Boulares & Donald P. Cox. Dec. 1990, *ApJ*, 365, 544
- [36] C. C. Evirgen, F. A. Gent, et al. Oct. 2019, *MNRAS*, 488, 5065
- [37] Mark R. Krumholz & Christoph Federrath. Feb. 2019, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 6, 7
- [38] G. Hulot, C. C. Finlay, et al. May 2010, *Space Sci. Rev.*, 152, 159
- [39] Rainer Beck & Richard Wielebinski. 2013, *Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 5: Galactic Structure and Stellar Populations*, eds. Terry D. Oswalt & Gerard Gilmore, vol. 5, 641
- [40] Andrii Neronov & Ievgen Vovk. Apr. 2010, *Science*, 328, 73
- [41] Steven R. Furlanetto & Abraham Loeb. Aug. 2001, *ApJ*, 556, 619
- [42] Serena Bertone, Corina Vogt, et al. Jul. 2006, *MNRAS*, 370, 319
- [43] Ruth Durrer & Andrii Neronov. Jun. 2013, *A&A Rev.*, 21, 62
- [44] D. Ryu, H. Kang, et al. May 2008, *Science*, 320, 909
- [45] F. Vazza, M. Brueggen, et al. Feb. 2016, arXiv e-prints
- [46] K. Dolag, M. Bartelmann, et al. Aug. 1999, *A&A*, 348, 351
- [47] M. Brüggen, M. Ruszkowski, et al. Sep. 2005, *ApJ*, 631, L21
- [48] Günter Sigl, Francesco Miniati, et al. Aug. 2003, *Phys. Rev. D*, 68, 043002
- [49] Hao Xu, Hui Li, et al. Jun. 2009, *ApJ*, 698, L14
- [50] J. Donnert, K. Dolag, et al. Jan. 2009, *MNRAS*, 392, 1008
- [51] Federico Marinacci, Mark Vogelsberger, et al. Nov. 2015, *MNRAS*, 453, 3999
- [52] George Heald, Sui Ann Mao, et al. Jul. 2020, *Galaxies*, 8, 53
- [53] F. Vazza, C. Ferrari, et al. Aug. 2015, *A&A*, 580, A119

- [54] Anna Bonaldi & Michael L. Brown. Feb. 2015, MNRAS, 447, 1973
- [55] T. W. Shimwell, M. J. Hardcastle, et al. Mar. 2022, A&A, 659, A1
- [56] F. de Gasperin, H. W. Edler, et al. May 2023, A&A, 673, A165
- [57] M. Ryle. Jan. 1959, URSI Symp. 1: Paris Symposium on Radio Astronomy, ed. Ronald N. Bracewell, vol. 9, 475
- [58] P. A. G. Scheuer. Jan. 1957, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 53, 764
- [59] A. R. Thompson, B. G. Clark, et al. Oct. 1980, ApJS, 44, 151
- [60] N. Leite, R. Reuben, et al. Nov. 2016, J. Cosmology Astropart. Phys., 2016, 021
- [61] Silvia Manconi, Alessandro Cuoco, et al. Sep. 2022, Phys. Rev. Lett., 129, 111103
- [62] C. Winkler, T. J. L. Courvoisier, et al. Nov. 2003, A&A, 411, L1
- [63] T. W. Shimwell, M. J. Hardcastle, et al. Feb. 2022, VizieR Online Data Catalog, J/A+A/659/A1