



HAL
open science

Instrumentation, analyse, modélisation et publication de données en radioastronomie basses fréquences

Baptiste Cecconi

► **To cite this version:**

Baptiste Cecconi. Instrumentation, analyse, modélisation et publication de données en radioastronomie basses fréquences. Instrumentation et méthodes pour l'astrophysique [astro-ph.IM]. Observatoire de Paris, Université Paris Sciences et Lettres (PSL), 2022. tel-03897412

HAL Id: tel-03897412

<https://theses.hal.science/tel-03897412v1>

Submitted on 13 Dec 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Habilitation à Diriger des Recherches
Observatoire de Paris – PSL

**Instrumentation, analyse, modélisation et
publication de données en radioastronomie basses
fréquences**

Baptiste Cecconi

Soutenue le 7 Janvier 2022

Membres du Jury

Boisson, Catherine	Astronome	<i>Présidente du Jury</i>
Csillaghy, André	Professeur	<i>Rapporteur</i>
Delouille, Véronique	Junior Scientist	<i>Rapportrice</i>
Desgreys, Patricia	Professeure	<i>Examinatrice</i>
Ferrari, Chiara	Astronome	<i>Examinatrice</i>
Genova, Françoise	Directrice de Recherche Émérite	<i>Rapportrice</i>

Table des matières

1	Parcours Synthétique	5
2	Introduction à la radioastronomie basse fréquence	9
2.1	Les émissions radio planétaires	9
2.2	Autres émissions radio basses fréquences	11
2.3	Perspectives	11
3	Instrumentation Radio Spatiale	13
3.1	Goniopolarimétrie	13
3.2	Mesures radio <i>in-situ</i>	19
3.3	Instrumentation Complémentaire	19
4	Modélisation et Propagation	23
4.1	Phénoménologie	23
4.2	Modélisation	28
5	Nouveaux Instruments Spatiaux	31
5.1	Expérience JUICE/RPWI	31
5.2	Nouveaux Récepteurs	32
5.3	Nouvelles Plateformes	34
6	Instrumentation logicielle, outils et base de données	35
6.1	MASER, une boîte à outil pour la radioastronomie basses fréquences	35
6.2	NenuFAR et son Centre de Données	40
7	Perspectives	45
7.1	Planètes Géantes	45
7.2	NenuFAR et SKA	45
7.3	Interférométrie Spatiale	46
7.4	Outils Logiciels et Bases de Données	46
	Bibliographie	46

Chapitre 1

Parcours Synthétique

Les émissions radio basses fréquences (<100 MHz) sont des traceurs des particules accélérées dans les plasmas du système solaire. Les processus physiques à l'œuvre dans les sources radio basses fréquences transfèrent l'énergie libre présente dans le plasma (par exemple, par la présence d'un faisceau de particules énergétiques) en onde électromagnétique. Ces signaux radio, ainsi que leurs origines, sont facilement identifiables par les spécificités de leurs morphologies dans l'espace spectro-temporel, ainsi qu'à travers leurs propriétés de polarisation, d'échelle de fluctuations et de récurrence.

En m'appuyant sur les outils d'analyse et de traitements de données développés pendant ma thèse de doctorat, j'ai étudié les magnétosphères de la Terre, de Jupiter et de Saturne à partir de leurs signatures radio basses fréquences, en utilisant les données produites par les instruments spatiaux Cassini/RPWS/HFR, STEREO/Waves et le Réseau Décamétrique de la Station de Radioastronomie de Nançay (NDA, Nançay Decameter Array).

J'ai développé des méthodes d'analyse pour les instruments radio basses fréquences spatiaux qui permettent de reconstruire les propriétés de l'onde radio observée (direction de propagation, flux, polarisation). Grâce à ces outils, on a pu identifier, localiser et caractériser les sources radio du Rayonnement Kilométrique de Saturne (SKR), et analyser les autres composantes radio produites dans les magnétosphères de Jupiter, Saturne et la Terre. Ces études ont permis de confirmer, par exemple, que le mécanisme d'émission du SKR est l'Instabilité Maser Cyclotron (CMI), le même que celui identifié pour les émissions kilométriques aurorales terrestres. En complément de l'instrumentation et de l'analyse de données, j'ai participé au développement du code ExPRES (Exoplanetary and Planetary Radio Emission Simulator) qui permet de modéliser les émissions radio planétaires selon le processus CMI.

Mon expertise en instrumentation radio spatiale m'a conduit à participer à la préparation de plusieurs instruments radio spatiaux: STEREO/Waves et SolarOrbiter/RPW en tant que Co-I et JUICE/RPWI en tant que Co-PI. J'ai aussi mené une étude avec le CNES sur la faisabilité d'un interféromètre radio basses fréquences sur nanosatellites, projet toujours à l'étude. Je participe aussi aux développements de radioastronomie sol, avec NenuFAR et la préparation à SKA.

J'ai par ailleurs grandement contribué au développement des outils dédiés à la distribution et la diffusion des données liées aux sciences du système solaire (planétaire, héliophysique, plasmas spatiaux, etc.) à travers ma contribution au projet Europlanet/VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access), en tant que représentant du CNES à l'IPDA (International Planetary Data Alliance) et comme coordinateur du Groupe "Système Solaire" de l'IVOA (International Virtual Observatory Alliance). Aujourd'hui, je fais partie du groupe de travail Science Ouverte de l'Observatoire de Paris, et je suis le représentant de l'établissement à l'Association EOSC (European Open Science Cloud). Comme pour les développements instrumentaux et de modélisation, le fil conducteur de mes contributions a toujours été de faciliter la diffusion et l'accès aux données radio basses fréquences, ce qui se concrétise cette année par la labellisation du SNO MASER (Mesure, Analyse et Simulation d'Emission Radio), dont je suis le responsable scientifique.

Enfin, je me suis aussi impliqué dans le fonctionnement de la recherche, à travers plusieurs mandats, en particulier comme élu au conseil de laboratoire du LESIA et aux Conseils d'Administration de l'Observatoire de Paris et de l'Université PSL. J'ai aussi été membre du groupe thématique SHM (Soleil, Héliosphère et Magnétosphères) du CNES.

En résumé, mes activités de recherche et de service s'articulent autour de l'étude des émissions radio basses fréquences planétaires et solaires, en combinant observations, modèles et instrumentation (sol, spatiale et lo-

gicielle). Mes activités couvrent toutes les étapes de la “vie” des données scientifiques : définition, conception, étalonnage des instruments ; inversion de données, interprétation des observations, modélisation ; archivage, distribution, outils d’analyse.

Summary

Low frequency radio emissions (<100 MHz) are tracers of accelerated particles in solar system plasmas. The physical processes at work in low-frequency radio sources transfer the free energy present in the plasma (e.g., with a beam of energetic particles) into electromagnetic waves. These radio signals, and their origins, can easily be identified with their specific morphologies in spectro-temporal space, as well as through their polarisation properties, fluctuations scale and recurrence patterns.

Using the data analysis and processing tools developed during my PhD, I studied the magnetospheres of the Earth, Jupiter and Saturn from their low-frequency radio signatures, using data produced by space instruments (Cassini/RPWS/HFR, STEREO/Waves) and ground observatories (e.g., Nançay Decameter Array).

I have developed analysis methods for space-based low frequency radio instruments that allow the reconstruction of the observed radio wave properties (direction of arrival, flux, polarisation). Thanks to these tools, it has been possible to identify, locate and characterise the radio sources of Saturn’s Kilometric Radiation (SKR), and analyse other radio components produced in the magnetospheres of Jupiter, Saturn and the Earth. These studies have confirmed, for example, that the emission mechanism of the SKR is Cyclotron Maser Instability (CMI), the same as that identified for terrestrial auroral emissions. In addition to instrumentation and data analysis, I participated in the development of the ExPRES code (Exoplanetary and Planetary Radio Emission Simulator) which allows the modelling of planetary radio emissions according to the CMI process.

My expertise in space radio instrumentation led me to participate in the preparation of several space radio instruments: STEREO/Waves and Solar-Orbiter/RPW as a Co-I and JUICE/RPWI as a Co-PI. I also led a feasibility study with CNES on a low frequency radio interferometer on nanosatellites, a project still ongoing. I am also involved in ground-based radio astronomy developments, such as NenuFAR and the preparation for SKA.

I have also deeply contributed to the development of tools dedicated to the distribution and dissemination of data related to solar system sciences (planetary, heliophysics, space plasmas, etc.) through my contribution to the Europlanet/VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access) project, as CNES representative to the IPDA (International Planetary Data Alliance) and as coordinator of the Solar System Group of the IVOA (International Virtual Observatory Alliance). Today, I am part of the Open Science working group of Paris Observatory, and I am the representative of the institution to the EOSC (European Open Science Cloud) Association. As for instrumental and modelling developments, the main thread of my contributions has always been to facilitate the dissemination of and access to low-frequency radio data, which has been concretised this year by the labelling of the MASER (Measurement, Analysis and Simulation of Radio Emission) SNO (Service National d’Observation), for which I am the scientific leader.

Finally, I have also been involved in the management of research, through several mandates, in particular as an elected member of the Council of LESIA and of the boards of directors of the Observatoire de Paris and of the Université PSL. I have also been a member of the SHM (Sun, Heliosphere and Magnetospheres) thematic group of CNES.

In summary, my research and service activities focus on the study of planetary and solar low frequency radio emissions, combining observations, models and instrumentation (ground, space and software). My activities cover all stages of the ‘life’ of scientific data: definition, design, calibration of instruments; data inversion, interpretation of observations, modelling; archiving, distribution, analysis tools.

Services Nationaux d’Observations

ANO2 – Instrumentation des grands observatoires au sol et spatiaux

- **JUICE/RPWI** : Co-PI pour la contribution Française & responsable du SNO; co-responsable scientifique de l’instrument radio JENRAGE (Jovian Environment Radio Astronomy and Ganymede Exploration).
- **BepiColombo/Mio/PWI/SORBET** et **SolarOrbiter/RPW** : Co-I
- **Cassini/RPWS** : Co-I et responsable de l’étalonnage, des algorithmes de traitement de données, et de l’archivage.

ANO3 – Stations d’observation

- **Station de Radio Astronomie de Nançay** : Co-responsable scientifique du CDN (Centre de Données de Nançay).
- **SKATE** : Responsable scientifique du centre de données de NenuFAR (NenuFAR-DC); Représentant Français au Groupe de travail “Archive” (WG4) du SKA Regional Center Steering Committee; Co-représentant Français au SKA-NREN-Forum.

ANO5 – Centres de traitement, d’archivage et de diffusion de données

- **VESPA** : en charge (a) des données héliophysique (Soleil et vent solaire), magnétosphères et plasmas planétaires; et (b) de la coordination scientifique des développements autour des infrastructures numériques (en particulier avec l’utilisation d’EOSC - European Open Science Cloud)
- **CDPP** : en charge des données radio basses fréquences, et de la coordination avec VESPA
- **APIS** : en charge de la coordination avec VESPA, gestion des DOI
- **MASER** : responsable scientifique du service

Actions Science-Ouverte hors SNO

- **IPDA** : Représentant du CNES au Steering Committee de l’IPDA
- **IHDEA** : Membre fondateur et Représentant de l’Observatoire de Paris au Steering Committee de l’IHDEA (International Heliophysics Data Environment Alliance)
- **IVOA** : Responsable du groupe “Système Solaire” de l’IVOA (2017-2021), co-responsable depuis 2021.
- **CoSO** : Membre du Collège Données de la Recherche du Comité National pour la Science Ouverte (CoSO)
- **EOSC** : Représentant de l’Observatoire de Paris à l’Assemblée Générale de l’Association EOSC, et à ce titre membre du Groupe de Travail EOSC-France. Membre du User Group du projet EOSC-Future (depuis Octobre 2021).
- **ESA** : Membre du PSAUG (Planetary Science Archive User Group), de 2013 à 2016. Membre du HAUS (Heliophysics Archives User group) depuis 2020.
- **RDA** : Membre du groupe de travail “Research Metadata Schemas”

Enseignement

Mon service d’enseignement se répartit sur trois activités principales:

- Master Sciences de l’Univers et technologies spatiales (Niveau M1) : TP d’observation sur les télescopes du site de Meudon (imagerie CCD et spectroscopie); TD informatique associée pour la réduction des données.
- Master Physique des Plasmas et de la Fusion (Niveau M2) : TP informatique sur l’utilisation des outils en ligne pour l’analyse des données de la physique des plasmas spatiaux; TP sur l’analyse spectrale de séries temporelles de mesures spatiales in-situ.
- International Research Track du Programme Gradué de l’Université PSL (niveau M2) : cours d’instrumentation radio sol; cours d’instrumentation radio spatiale.

J’ai par ailleurs effectué de nombreuses démonstrations grand public de l’expérience Planeterrella (simulateur d’aurores planétaires, créé par J. Liliensten à l’IPAG) que nous avons construite au LESIA avec Laurent Lamy. J’ai aussi donné un cours de radio astronomie spatiale à Telecom ParisTech pendant 2 ans. J’ai encadré plusieurs stagiaires (Niveau L2 à M2) et participé à l’encadrement de la thèse de Vratislav Krupar (soutenue en 2012). Enfin, j’ai co-encadré plusieurs thèses: Anne-Lise Gautier (soutenue en 2013), Yosra Gargouri (soutenue en 2017, co-direction avec TelecomParisTech), Srivani Inturi (en cours, co-directeur) et Claire Baskevitch (en cours, co-direction avec le LATMOS).

Chapitre 2

Introduction à la radioastronomie basse fréquence

La radioastronomie est une science relativement jeune. En 1932, Karl Jansky détecte et identifie pour la première fois une émission radio extraterrestre [Jansky, 1933] à 20.5 MHz. Il s'agit de la première observation du rayonnement radio décamétrique Galactique. Dès lors, les progrès scientifiques et techniques ont permis d'améliorer considérablement l'instrumentation radio. De l'antenne pivotante de Jansky (conservée sur le site du radio télescope de Greenbank aux États-Unis) aux réseaux interférométriques modernes, les observatoires radio se sont développés jusqu'aux très basses fréquences, avec des capacités techniques toujours plus avancées. La Table 2.1 présente une sélection de quelques étapes marquantes et montre l'évolution de l'instrumentation radioastronomique sol et spatiale. Les observatoires radio terrestres ont gagné des capacités d'imagerie avec l'utilisation de réseaux d'antennes (soit sous forme de réseaux phasés, comme les instruments UTR-2 et NDA, ou par l'interférométrie, comme LOFAR). Les instruments spatiaux en opération sont encore à l'âge de l'antenne simple, mais des études en cours laissent entrevoir la mise en œuvre des technologies d'imagerie radio dans l'espace. Les systèmes d'observation spatiaux sont nécessaires pour observer en dessous de la fréquence de coupure de l'ionosphère terrestre (autour de 10 MHz). Dans l'environnement spatial terrestre, on peut observer le ciel jusqu'à la coupure locale du Vent Solaire, qui est de l'ordre de quelques kHz. Construire des instruments permettant d'obtenir des images résolues dans cette gamme spectrale a longtemps été impossible à cause de la taille de l'instrument qu'il faudrait déployer : la résolution angulaire d'un télescope est de l'ordre de $\sim \lambda/D$, où λ est la longueur d'onde observée, et D le diamètre d'ouverture du télescope. Il faudrait donc pouvoir construire des systèmes orbitaux dont la taille atteindrait plusieurs centaines de kilomètres (une longueur d'onde de 10 km équivaut à une fréquence de 30 kHz). Des techniques d'observation ont été développées pour restaurer une résolution spatiale à partir de simples dipôles électriques placés sur une sonde spatiale, sans avoir recours à de gigantesques instruments, impossibles à construire jusqu'à présent. Ces instruments dit "goniopolarimétriques" [Lecacheux, 1978, Cecconi and Zarka, 2005b, Cecconi, 2011] permettent, avec une hypothèse forte sur l'onde radio observée (source ponctuelle unique et à l'infini), la reconstruction de la direction d'arrivée de l'onde et de sa polarisation. Celles-ci peuvent être déterminées avec une précision de l'ordre de 1° pour les directions et de 10% pour la polarisation. Les instruments radio embarqués sur les missions Cassini et STEREO utilisent ces techniques de mesures et permettent ainsi de caractériser les radio sources basses fréquences solaires et planétaires.

2.1 Les émissions radio planétaires

Le soleil et les planètes magnétisées produisent un champ magnétique intense et organisé à grande échelle. Dans ces environnements dynamiques, les particules chargées sont accélérées et produisent des populations instables. Les paramètres physiques de ces plasmas (densités de quelques particules par cm^{-3} , et vitesses de quelques dizaines à centaines de km/s) ne sont pas compatibles avec un équilibre thermodynamique, car les collisions sont trop peu fréquentes: pour le Vent Solaire, le libre parcours moyen est de l'ordre de 1 UA (Unité Astronomique, la distance Terre-Soleil). Les particules accélérées produisent donc des fonctions de distribution instables. La présence de champ magnétique va faciliter la création de faisceaux de particules qui vont pouvoir s'éloigner rapidement du lieu d'accélération. L'énergie libre produite par ces particules hors équilibre thermo-

Jalon	Références	Fréquence (MHz)	Observatoire	Antenne
Première observation du rayonnement Galactique	Jansky [1933]	20.5	Sol	Simple
Première mesure interférométrique en radioastronomie	Pawsey [1946] McCready et al. [1947]	200	Sol	Simple
Détection des émissions radio Joviennes	Burke and Franklin [1955]	22.2	Sol	Simple
Première lumière du radio-télescope UTR-2 (Ukraine)	Konovalenko et al. [2016]	8 – 40	Sol	Réseau
Première carte du rayonnement radio basse fréquence de la Galaxie (RAE-B)	Novaco and Brown [1978]	< 13.1	Espace	Simple
Première lumière du Réseau Décamétrique de Nançay (NDA, Nançay Decameter Array, France)	Boischot et al. [1980]	8 – 80	Sol	Réseau
Lancement de la mission Cassini-Huygens (NASA-ESA)	Gurnett et al. [2004]	< 16	Espace	Simple
Lancement de la mission STEREO (NASA)	Bougeret et al. [2008]	< 14	Espace	Simple
Ouverture du radio télescope LOFAR en Europe	van Haarlem et al. [2013]	10 – 240	Sol	Réseau
Ouverture du Long Wavelength Array 1 (LWA) aux USA	Ellingson et al. [2009]	10 – 88	Sol	Réseau
Étude NOIRE (France) et projet SunRISE (USA)	Cecconi et al. [2018b] Alibay et al. [2018]	1 – 100	Espace	Réseau

TAB. 2.1 – *Historique rapide (et choisi) de l'instrumentation radio astronomique sol et spatiale*

dynamique pourra se convertir, en fonction des paramètres physiques du milieu, en onde électromagnétique. Dans le cas des magnétosphères planétaires, lorsque que les populations de particules accélérées qui suivent les lignes du champ magnétique planétaire arrivent près des régions polaires, les conditions sont parfois réunies pour transférer leur énergie cinétique en onde électromagnétique. Cette instabilité, décrite à la section 4.2, appelée Instabilité Maser Cyclotron (CMI, Cyclotron Maser Instability) [Wu and Lee, 1979], produit une émission radio à la fréquence cyclotron électronique dans la région source. Du fait de l'intensité des champs magnétiques planétaires, les fréquences cyclotron en jeu couvrent une gamme spectrale de quelques kHz à environ 1 MHz, sauf pour Jupiter, où l'on peut monter à environ 40 MHz. Le champ magnétique décroissant avec la distance à la planète, les émissions à plus haute fréquence correspondent à des sources plus proches de la planète. L'observation des ondes radio basses fréquences permet donc d'étudier à distance certaines régions des magnétosphères planétaires, là où des populations de particules instables sont présentes et où les conditions locales du plasma permettent la conversion en ondes électromagnétiques de l'énergie libre apportée par ces populations instables. La localisation des sources radio est cruciale. Les particules chargées suivent les lignes de champ magnétique. Moyennant un modèle de champ magnétique planétaire fiable, on pourra ainsi remonter aux régions où ces particules ont été accélérées.

L'observation des émissions radio joviennes est possible depuis le sol au delà de 10 MHz (du fait de la coupure ionosphérique terrestre). Les instruments sols sont sensibles et performants (grande résolution spatiale et temporelle), et peuvent opérer pendant de longues périodes. Ils permettent ainsi à la fois des analyses poussées des structures fines des émissions, et aussi des études sur les variabilités à long terme. En deçà de la coupure ionosphérique terrestre, il faut observer depuis l'espace. Les contraintes du spatial (durée de la mission, débit de données, contraintes instrumentales) font que les instruments spatiaux sont moins sensibles et acquièrent des mesures à des débits et des résolutions moindres que leurs homologues terrestres. On peut cependant placer ces instruments à proximité des régions d'émission, et donc effectuer des conditions d'observations plus variées, avec des explorations en distance, latitude et longitude planétaires inaccessibles depuis le sol, comme avec les missions Cassini à Saturne, ou Juno à Jupiter.

2.2 Autres émissions radio basses fréquences

Les émissions radio basses fréquences solaires sont principalement de deux classes: (a) les émissions radio solaires de type II, produites en amont des chocs associés aux éjections coronales de masse; et (b) les émissions radio solaires de type III, produites par des faisceaux de particules accélérées à la surface du Soleil. Ces émissions radio sont émises proche du Soleil, et traversent l'héliosphère interne, milieu magnétisé et turbulent. Les ondes subissent donc un fort effet de diffusion. Un observateur distant observera une source apparente spatialement étendue. Ces effets de propagation rendent difficile la localisation des radio sources. On peut cependant caractériser le diagramme d'émission apparent (avec les effets de propagation), mesurer la dimension apparente depuis plusieurs sondes et trianguler la position apparente de la radio source, comme avec la mission STEREO.

Les atmosphères planétaires sont aussi sources de radiations basses fréquences, en particulier à travers la contrepartie radio fréquence des éclairs d'orages. Les impulsions larges bandes induites par ces décharges sont observées sur Terre et ont été découvertes à Saturne, Uranus et Neptune avec la mission Voyager, et ont été étudiées à Saturne avec la mission Cassini. Malgré des tentatives d'observations, ces contreparties radio n'ont pas été observées autour de Vénus ni de Jupiter.

Au delà du système solaire, le rayonnement radio basse fréquence Galactique forme un fond de radiation qui rend le ciel brillant à ces longueurs d'ondes. Ce rayonnement est provoqué par le rayonnement de freinage des particules énergétiques circulant dans le champ magnétique Galactique. La cartographie de ce rayonnement a été effectué avec des instruments radio sol en deçà de la coupure ionosphérique terrestre, mais il reste mal connu aux très basses fréquences.

Enfin, parmi les principales radio sources astrophysiques basses fréquences, on peut citer, en particulier, les pulsars, qui sont des étoiles à neutron en rotation rapide, et qui émettent un faisceau radio qui croise la Terre à intervalles réguliers.

2.3 Perspectives

Les émissions radio basses fréquences sont des marqueurs de phénomènes d'accélération de particules. Dans le cas des environnements planétaires, elles sont aussi le marqueur de la présence d'un champ magnétique planétaire.

Les applications en Météorologie de l'Espace sont nombreuses: l'étude des émissions radio solaires d'une part, et des émissions radio planétaires de l'autre, permet d'accroître la vision du système "Soleil - Héliosphère" en ajoutant des points de mesures le long du trajet des particules et perturbations dans l'héliosphère: Type III pour les faisceaux de particules; Type II pour les chocs interplanétaires; émissions aurorales pour le passage des perturbations aux planètes. Des capacités d'imageries permettent même d'aller plus loin, par exemple, en fournissant des cartes de rayonnements des ceintures de radiations planétaires. Seule la magnétosphère de Jupiter est actuellement étudiée de cette manière, mais des projets proposent de surveiller l'environnement terrestre avec des imageurs radio basses fréquences positionnés sur ou autour de la Lune [Cecconi et al., 2020, Hegedus et al., 2020]. Ces projets proposent aussi de produire des images des émissions radio solaires, afin de mieux comprendre les mécanismes d'émission des ondes et de leur propagation dans le milieu interplanétaire. Les émissions des pulsars et des autres radio sources (quasars, sources A...) sont utilisées pour surveiller l'héliosphère et l'ionosphère de la Terre en étudiant les modifications de leurs caractéristiques — la scintillation induite par la propagation dans ces milieux. Enfin, pour l'ionosphère terrestre, les techniques d'observation basée sur les perturbations VLF (Sudden Ionospheric Disturbances) commencent à être de nouveau exploitées.

Un autre thème auquel la radio astronomie peut beaucoup apporter est celui des exoplanètes. En effet, les exoplanètes sont actuellement détectées et caractérisées à travers des méthodes sophistiquées, mais aucune ne permet d'en déterminer l'environnement magnétique, qui pourrait être un élément crucial au développement de la vie, par la protection qu'il apporte aux particules énergétiques provenant de l'étoile hôte. Les émissions radio planétaires sont la signature de la présence d'un champ magnétique planétaire. Grâce à leurs caractéristiques spécifiques (polarisation, gamme spectrale, périodicité), on peut théoriquement en déduire la période de rotation sidérale de la planète, ou l'intensité de son champ magnétique [Hess and Zarka, 2011]. C'est donc un domaine très prometteur, même si ces détections sont encore difficiles avec les performances actuelles des instruments radio disponibles.

Chapitre 3

Instrumentation et observables en radioastronomie spatiale

A l'exception du cas de Jupiter, les émissions radio planétaires ne peuvent être observées que depuis l'espace. En effet, l'ionosphère terrestre se comporte comme un miroir pour toute onde radio de fréquence inférieure à 10 MHz. Les émissions radio planétaires étant émises à la fréquence cyclotron locale dans la source, seule la planète Jupiter possède un champ magnétique suffisamment intense pour émettre au dessus de 10 MHz: son spectre s'étend de quelques kHz à ~ 40 MHz. Les autres planètes émettent un rayonnement radio auroral compris entre quelques kHz et 1 MHz.

3.1 Goniopolarimétrie

Les contraintes du spatial nécessitent de développer une instrumentation adaptée à cette gamme de fréquence, en particulier pour obtenir des images, sans pour autant avoir recours à des instruments de tailles démesurées. Pour un télescope classique, la résolution spatiale est donnée par le rapport λ/D (où λ est la longueur d'onde d'observation et D la taille typique de l'ouverture de l'instrument), et il faudrait des instruments plusieurs centaines de kilomètres pour obtenir une bonne résolution spatiale. Il a donc fallu élaborer d'autres techniques d'observation. On utilise des antennes électriques dipolaires de quelques mètres de longueur (voir la Figure 3.1), qui n'ont quasiment aucune résolution angulaire. Aux basses fréquences, leur diagramme de rayonnement possède un lobe qui couvre $8\pi/3$ stéradians. Elles "voient" donc $2/3$ des directions de l'espace en même temps. La Figure 3.2 montre la forme du diagramme d'antenne d'un dipole électrique dans différents régimes de longueur d'onde. Aux grandes longueurs d'ondes (basses fréquences), on parle de régime "antenne courte" ou régime "quasi-statique" quand la longueur d'antenne est d'au moins un ordre de grandeur plus courte que la longueur d'onde observée. Le diagramme d'antenne ne dépend alors plus de la fréquence. Ces antennes sont connectées à des récepteurs radio spécialement conçus pour obtenir des mesures "goniopolarimétriques" [Cecconi, 2014], c'est-à-dire, à partir desquelles on peut reconstruire la direction d'arrivée, le flux, la polarisation voire même la taille de la source. Les récepteurs radio développés au LESIA sont de ce type et j'ai développé les routines d'inversion goniopolarimétriques qui sont utilisées en routine sur les données de l'instrument radio de la sonde Cassini. Les deux récepteurs radio développés pour les sondes STEREO sont du même type.

Méthodologie

Le principe de la goniopolarimétrie est de mesurer le champ électrique d'une onde radio simultanément à l'aide de plusieurs antennes non-colinéaires. Selon le type d'instrument, deux ou trois antennes sont reliées au récepteur. Il existe deux grandes classes d'instruments, selon le type de plateforme spatiale. Sur les plateformes stabilisées trois axes, le récepteur utilise trois antennes orthogonales (ou quasi-orthogonales). Sur les plateformes "spinées", deux antennes suffisent avec une antenne axiale (dans l'axe de spin) et une antenne radiale (dans le plan de spin). Dans le cas stabilisé, le récepteur mesure à chaque instant la puissance reçue sur chaque antenne, ainsi que les corrélations croisées des signaux reçus sur chaque paire d'antenne. Ce second type de mesure donne accès au déphasage entre les signaux mesurés sur chaque antenne. Dans le cas spinné, on utilise généralement la modulation du signal observée sur l'antenne radiale pour déduire les paramètres de l'onde incidente, avec

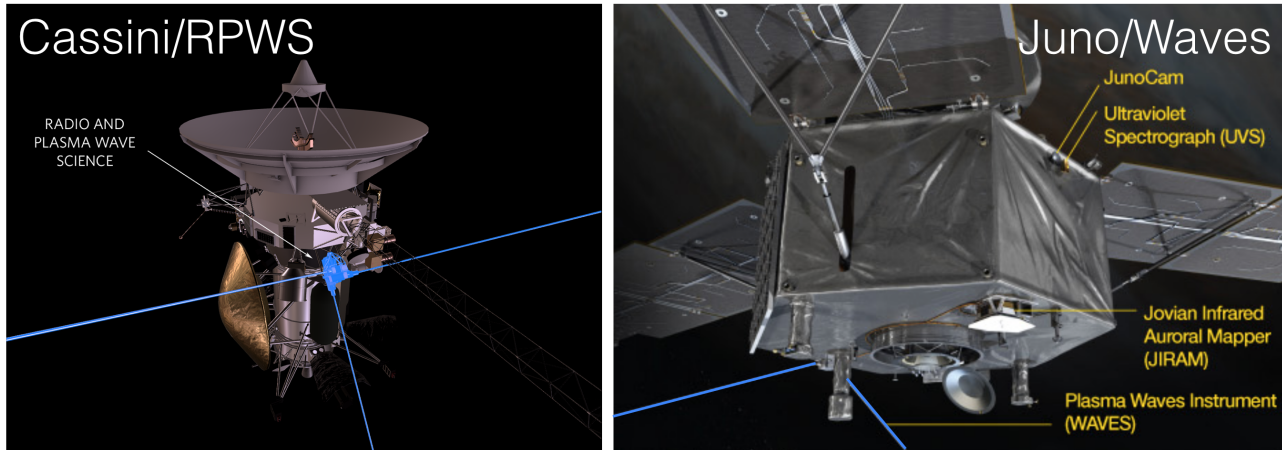


FIG. 3.1 – Les antennes radio basses fréquences des instruments Cassini/RPWS [Gurnett et al., 2004] et Juno/Waves [Kurth et al., 2017]. Les antennes sont surlignées en bleu sur les deux panneaux. Ce sont des monopoles conducteurs et rigides de 10 m pour Cassini et de 2.7 m pour Juno. Dans le cas de Juno, les deux monopoles sont uniquement utilisés en dipole, alors que l’instrument de Cassini permet de sélectionner des monopoles ou d’utiliser un pair d’antennes en dipole.

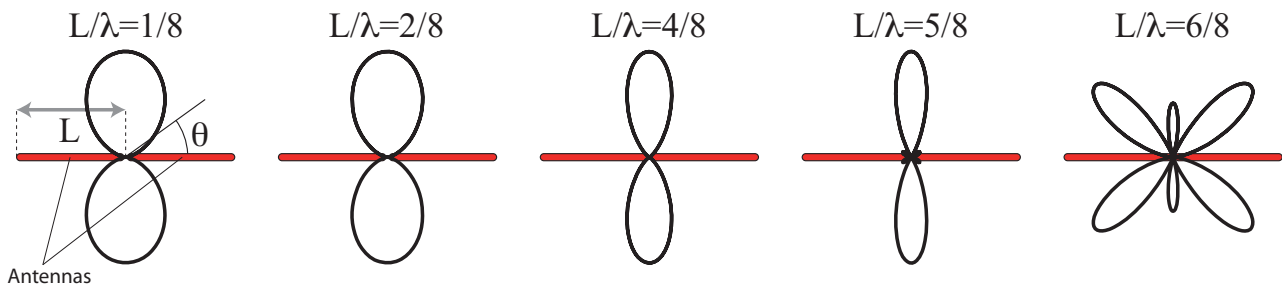


FIG. 3.2 – Diagramme d’antenne (gain de l’antenne en fonction de la direction de propagation de l’onde) pour différents régimes de longueur d’onde. Le diagramme d’antenne d’un dipole possède un axe de symétrie orienté le long de l’axe de l’antenne. Aux grandes longueurs d’ondes, le gain est maximal dans les directions perpendiculaires à l’antenne. Au delà de la résonance d’antenne ($L = \lambda/2$), le diagramme d’antenne devient multipolaire.

l’hypothèse que le signal reste stationnaire pendant la durée d’une rotation du satellite sur lui-même. En d’autres termes, pour les deux classes d’instruments, on mesure simultanément (ou quasi-simultanément) le signal radio avec des capteurs de différentes polarisations instrumentales. Pour une description plus détaillée, voir le chapitre “Goniopolarimetric techniques for low-frequency radio astronomy in space” [Cecconi, 2011] du livre “Observing Photons in Space” (ISSI/ESA/Springer).

Je décris ici le cas de l’instrument sur lequel j’ai le plus travaillé depuis ma thèse, le récepteur radio HFR (High Frequency Receiver) de l’expérience Cassini/RPWS (Radio and Plasma Waves Sciences). Cet instrument et son fonctionnement est décrit en détail dans ma thèse [Cecconi, 2004]. En résumé, l’instrument HFR est composé de deux voies d’analyse et est connecté à trois antennes électriques quasi-orthogonales. Il mesure instantanément la puissance sur deux antennes parmi trois et mesure la corrélation entre ces deux signaux. Le récepteur peut intervertir les antennes connectées en quelques millisecondes, de manière à mesurer sur deux paires d’antennes quasi-simultanément. Il balaye le spectre radio entre 3 kHz et 16 MHz toutes les minutes environ. L’instrument est configurable: la manière dont le spectre est balayé en terme de résolution et de pas d’échantillonnage tant temporel que spectral, ainsi que le mode de mesure (sur 2 ou 3 antennes). A chaque instant et à chaque fréquence mesurée, le récepteur produit ainsi 4 mesures simultanées: $\langle V_i V_j^* \rangle$ où i et j représentent les deux antennes sélectionnées pour cette mesure. Cette série de mesures est aussi appelée matrice de Jones, ou matrice spectrale [Lecacheux, 1978], et notée P_{ij} . Ces mesures de corrélations sont effectuées dans le domaine

temporel. La transformée de Fourier de ces mesures correspond à la densité spectrale de puissance (théorème de Wiener-Khintchine). Les mesures correspondent à la moyenne du signal instantané intégré sur un temps d'intégration et une bande de fréquence sélectionnée par le mode opératoire courant.

$$\langle V_i V_j^* \rangle = P_{ij} = \begin{pmatrix} A_{11} & C_{12} \\ C_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

On parlera maintenant indifféremment de corrélation (domaine temporel) ou de densité spectrale de puissance (domaine spectral). Les deux autocorrélations A_{11} et A_{22} sont les puissances spectrales mesurées sur les antennes et C_{12} l'inter-corrélation complexe entre les signaux reçus sur les deux antennes. Notons que $C_{21} = C_{12}^*$ par définition. Cet ensemble des quatre grandeurs réelles est ce qu'on appelle un enregistrement goniopolarimétrique sur deux antennes. Dans ce cas, le champ électrique de l'onde radio est mesuré dans le plan constitué par les axes des deux antennes. Lorsque trois antennes sont disponibles, la matrice de Jones est alors une matrice d'ordre 3 et les mesures possibles sont les trois autocorrélations (A_{11} , A_{22} et A_{33}), et trois inter-corrélations complexes (C_{12} , C_{23} et C_{13}), soit au total neuf grandeurs réelles. Selon les générations d'instruments, les mesures disponibles peuvent varier. L'instrument Cassini/RPWS/HFR ne peut sélectionner que deux paires d'antennes successivement pour le mode trois antennes : on obtient ainsi les trois autocorrélations et seulement deux inter-corrélations, soit seulement sept grandeurs réelles mesurées à quelques dizaines de millisecondes d'écart. L'instrument STEREO/Waves est très proche de celui de Cassini, mais permet la sélection des trois paires d'antennes successivement : on obtient ainsi toute la matrice de Jones (neuf grandeurs réelles), à quelques dizaines de millisecondes d'écart. Les instruments à venir (dans l'expérience JUICE/RPWI, par exemple), possèdent trois voies d'analyses en parallèle et trois antennes électriques, ce qui permettra d'obtenir la matrice de Jones complète instantanément.

Publications associées — Cecconi [2004], Cecconi and Zarka [2005b], Cecconi [2007b], Cecconi et al. [2008], Cecconi [2011, 2014]

Étalonnage

Pour interpréter ces mesures sur deux ou trois antennes, il faut avoir étalonné les antennes afin d'obtenir les dipôles électriques effectifs équivalents au système de mesure. En effet, les antennes utilisées sont des monopôles ou des dipôles électriques (tiges conductrices) de longueur finie, et parfois commensurables avec la plateforme spatiale qui les supporte. Les antennes électriques de Cassini/RPWS mesurent 10 m, celles de STEREO/Waves, 6 m. Le satellite est recouvert d'une surface conductrice qui altère le diagramme de rayonnement de l'antenne physique.

Il faut donc étalonner la longueur et la direction effective du dipôle électrique équivalent au système constitué de l'antenne électrique physique et du satellite. Cet étalonnage peut se faire de plusieurs manières : par simulation électromagnétique [Fischer et al., 2001, Oswald et al., 2009, Sampl et al., 2015, Fischer et al., 2017, 2021, Vecchio et al., 2021], par mesure sur un modèle réduit en cuve électrostatique [Rucker et al., 1996, Macher et al., 2007], et par des mesures en vol sur des radio sources connues : soit des sources planétaires [Vogl et al., 2004, Cecconi and Zarka, 2005b, Cecconi et al., 2005, Tokarev et al., 2006, Panchenko et al., 2014], soit le rayonnement radio Galactique [Zarka et al., 2004, Zaslavsky et al., 2011]. Les mesures en vol sont celles qui sont les plus fiables, mais les autres méthodes permettent d'évaluer le diagramme d'antenne lors des phases de conception de l'instrument [Fischer et al., 2017]. L'étalonnage permet d'obtenir les longueurs et directions effectives des antennes avec une précision typique de 10% sur les longueurs et de quelques degrés sur les directions.

Publications associées — Zarka et al. [2004], Vogl et al. [2004], Cecconi and Zarka [2005b], Cecconi et al. [2005], Tokarev et al. [2006], Panchenko et al. [2014], Fischer et al. [2017, 2021], Vecchio et al. [2021]

Source ponctuelle à l'infini

Les mesures goniopolarimétriques peuvent être interprétées pour retrouver les paramètres de l'onde radio incidente, en faisant diverses hypothèses. Dans le cas d'une source radio ponctuelle à l'infini, l'onde que l'on observe est plane et transverse tant que l'on est loin des fréquences de coupure ou de résonance électromagnétiques. En faisant l'hypothèse qu'on observe une seule onde électromagnétique plane et transverse pendant

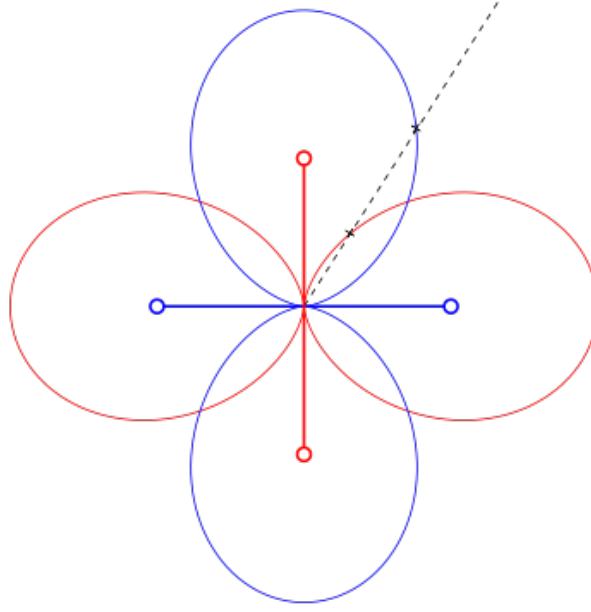


FIG. 3.3 – Représentation simplifiée du fonctionnement d'une analyse goniopolarimétrique. L'onde est symbolisée par le trait pointillé oblique, et les 2 antennes rouge et bleue sont représentées avec leur diagramme d'antenne en trait fin. Le signal reçu sur chaque antenne est indiqué par l'intersection de la ligne pointillée avec le lobe d'antenne. En comparant ces deux mesures, on peut estimer la direction de propagation. Cette figure est très simplifiée, car on ne représente pas l'effet de la polarisation, mais permet de donner une idée simple du mécanisme.

l'enregistrement, on peut inverser les mesures pour déduire la direction d'arrivée, la polarisation et la densité de flux de l'onde incidente [Cecconi and Zarka, 2005b]. La Figure 3.5 montre ces observables dans le cas de Cassini/RPWS. Ces caractéristiques sont décrites à l'aide des paramètres de Stokes (I , Q , U , V) pour l'intensité et la polarisation de l'onde et de deux angles pour sa direction de propagation. On peut exprimer les mesures P_{IJ} en fonction de ces paramètres et de l'orientation des antennes par rapport à la direction de propagation [Cecconi and Zarka, 2005b]:

$$P_{ij} = \frac{Z_0 G h_i h_j I}{2} [(1 + Q)\Omega_i \Omega_j + (U - iV)\Omega_j \Psi_j + (U + iV)\Omega_j \Psi_i + (1 - Q)\Psi_i \Psi_j] \quad (3.2)$$

où on exprime explicitement l'impédance du vide Z_0 et le gain du système d'antenne $G h_i h_j$ [Manning and Fainberg, 1980], et où Ω_i et Ψ_i dépendent de la direction des antennes et du vecteur unitaire pointant dans la direction de la radio source :

$$\Omega_i = \cos \theta_i \sin \theta - \sin \theta_i \cos \theta \cos(\phi - \phi_i) \quad (3.3)$$

$$\Psi_i = \sin \theta_i \sin(\phi - \phi_i) \quad (3.4)$$

avec θ_i et ϕ_i la colatitude et l'azimut de l'antenne \vec{h}_i , et θ et ϕ la colatitude et l'azimut du vecteur pointant dans la direction de la radio source. A partir de cette équation, j'ai développé des inversions analytiques pour inverser les séries de mesures à deux ou trois antennes [Cecconi and Zarka, 2005b]. Une représentation très simplifiée de ces méthodes est présentée à la Figure 3.3.

Si l'on connaît la position de la source (et que la propagation est rectiligne depuis celle-ci), ou bien si l'on connaît la direction de propagation, alors un enregistrement sur deux antennes suffit pour en déduire les paramètres de Stokes. De même, si on fait l'hypothèse que l'onde est polarisée circulairement, on peut aussi utiliser un enregistrement sur deux antennes pour obtenir la direction de propagation, l'intensité et le taux de polarisation circulaire. Il est important de noter que les inversions goniopolarimétriques souffrent d'une indétermination liée à la symétrie du système de mesure. Il est impossible de distinguer deux ondes se propageant dans des directions opposées, avec des polarisations, elles aussi, opposées. La figure 3.4 montre schématiquement

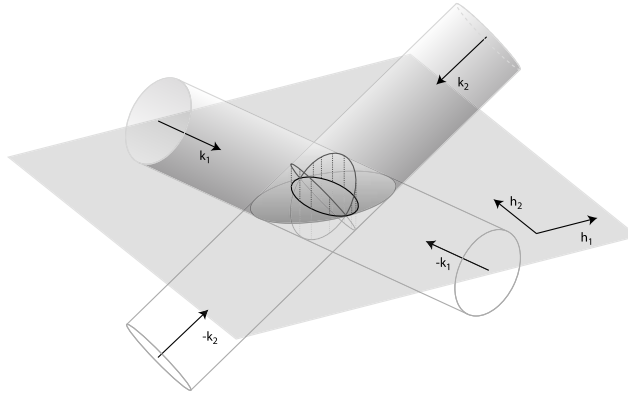


FIG. 3.4 – Illustration des indéterminations pour une inversion goniopolarimétrique à deux antennes. Les ondes sont représentées par des cylindres axés sur leurs vecteurs d’onde et dont les enveloppes sont leurs ellipses de polarisation. Les ondes se propageant en directions opposées et avec un sens de polarisation opposé vont produire la même signature lorsqu’on projette le signal électrique sur le plan défini par les deux antennes électriques. dans ce cas à deux antennes, il est clair que sans une hypothèse a priori sur la direction de propagation ou sur la polarisation de l’onde, une infinité de solution existent. Si on fixe la direction, la solution est unique. Si on fixe la polarisation, il y a deux solutions (\vec{k}_1 et \vec{k}_2 , par exemple). Figure extraite de Fischer et al. [2009]

les indéterminations qui entrent en jeu dans ces inversions. On trouvera plus de détails sur ces inversions et leurs limitations dans le chapitre 3 de ma thèse [Cecconi, 2004], ainsi que dans Cecconi et al. [2008], Cecconi [2011, 2014] et à la section 4.4 de Cecconi [2019].

Source spatialement étendue

Pour les émissions radio solaires, l’hypothèse de source ponctuelle n’est plus valable [Steinberg et al., 1985]. L’adaptation du formalisme goniopolarimétrique développés pour une source ponctuelle à des sources spatialement étendues est présentée dans Cecconi [2007a]. Avec les mesures de sursauts radio solaires effectuées avec Cassini/RPWS, j’ai montré que l’étendue spatiale de ces émissions biaise les résultats goniopolarimétriques [Cecconi et al., 2008]. La complexité du formalisme étendu n’a pas permis de mettre sur pieds une inversion analytique.

J’ai participé à l’encadrement du travail de thèse de Vratislav Krupař [2012] intitulée “*Stereoscopic Observations of Solar Radio Emissions by the S/Waves Instrument onboard the STEREO Spacecraft*”, en cotutelle avec l’institut IAP (Institute of Atmospheric Physics) de Prague (République Tchèque). La mission NASA STEREO (Solar Terrestrial Relation Observatory) est composée de deux satellites dédiés à l’étude des relations Soleil–Terre. A bord de chacune des deux sondes spatiales, se trouve un récepteur radio goniopolarimétrique développé au LESIA. Ce récepteur radio mesure le signal radio dans la gamme spectrale 2.5 kHz à 16 MHz à l’aide de trois antennes quasi-orthogonales. Son mode de mesure “goniopolarimétrie à trois antennes” fournit tous les termes de la matrice spectrale P_{ij} .

Afin d’interpréter ces mesures dans le cas d’une source non-ponctuelle, nous avons adapté une méthode d’analyse développée par l’équipe tchèque pour l’analyse des ondes plasma [Santolík et al., 2003]: par une décomposition en valeurs singulières de la matrice spectrale, on obtient les axes de variance principaux (minimum, intermédiaire et maximum). Dans le cas d’une onde plane transverse, la direction correspondant à la variance minimum (qui doit être très petite devant les deux autres variances dans ce cas) est celle de la direction de propagation, et les deux autres directions définissent le plan de polarisation de l’onde. Pour une source spatialement étendue, les trois variances sont du même ordre de grandeur. Ces trois variances constituent de qu’on appelle “l’ellipsoïde de polarisation” (voir le chapitre 2 de Krupař [2012]). Par défaut, on considère que la direction de variance minimum correspond à la direction de propagation. Dans le cas général, il faut une étape d’interprétation physique supplémentaire, comme une estimation de la direction de propagation (direction d’arrivée proche de la direction du Soleil, par exemple, mais cela n’est pas toujours vrai aux très basses fréquences). La variance dans la direction de propagation permet qualitativement d’évaluer la planarité de l’onde [Santolík et al., 2003]. Les deux autres axes de variance définissent le plan de polarisation de l’onde.

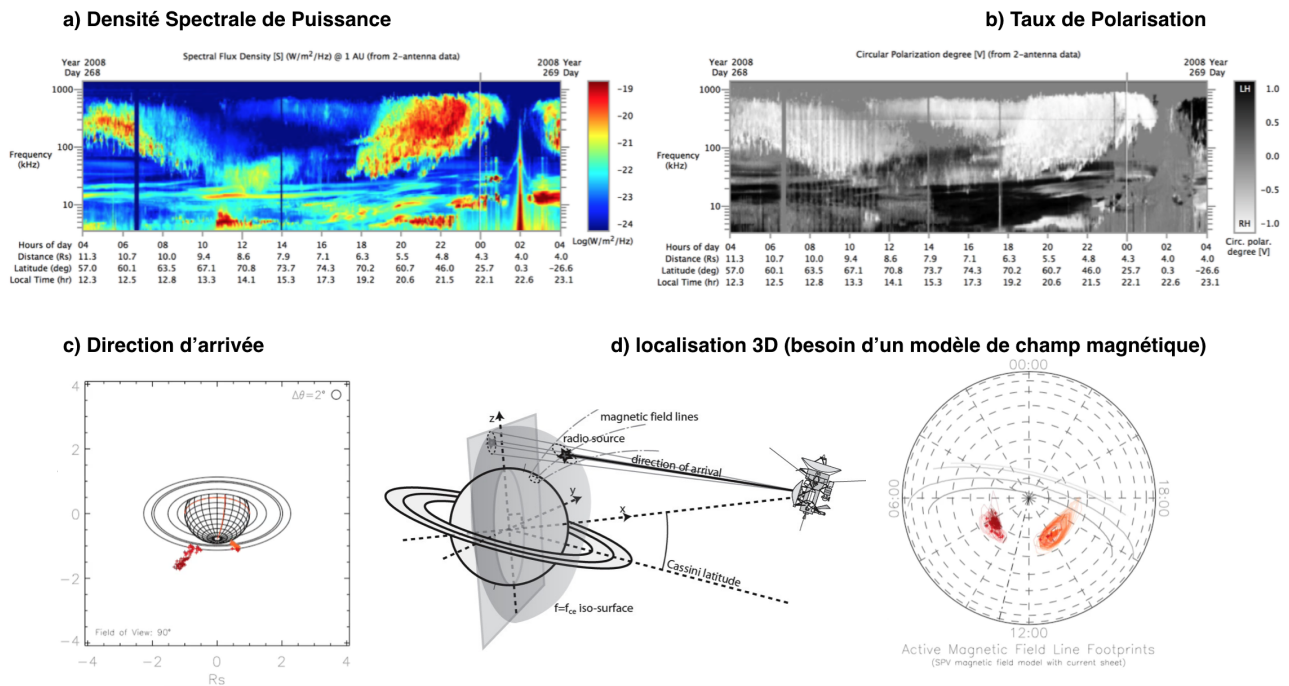


FIG. 3.5 – Observables radio basses fréquences après l'analyse goniopolarimétrique. Les panneaux montrent: (a) la densité spectrale de puissance mesurées par Cassini/RPWS dans l'environnement de Saturne; (b) le taux de polarisation circulaire correspondante; (c) la direction d'arrivée projetée sur le ciel, avec une représentation de la planète Saturne en arrière plan; et enfin, avec un modèle de champ magnétique et avec une hypothèse sur le mécanisme d'émission, un positionnement en 3D des sources radio et leur projection magnétique sur la haute atmosphère de Saturne.

Publications associées — Bougeret et al. [2008], Cecconi and Zarka [2005b], Cecconi [2010, 2013], Cecconi et al. [2013a], Cecconi [2014], Foullon et al. [2010], Krupar et al. [2012, 2014b,a], Magdalenic et al. [2014], Maksimovic et al. [2020], Panchenko et al. [2014], Reiner et al. [2009], Rouillard et al. [2020], Vecchio et al. [2021], Vogl et al. [2004], Waters et al. [2021], Zarka et al. [2011], Zouganelis et al. [2020]
Stage (encadrement) — T. Allain (2012, M1 Physique et Applications, UPMC)
Thèse (accompagnement) — V. Krupar (2009-2012); J. Waters (2019-2022)

3.2 Mesures radio *in-situ*

les instruments radio basse fréquence spatiaux donnent en général accès à des signaux liés au plasma ambiant autour de l’antenne, comme par exemple la “raie plasma”, qui est la signature d’un phénomène électrostatique de résonance des électrons se déplaçant dans le plasma. La mesure de cette raie, ainsi que des caractéristiques spectrales qui l’accompagnent, permet de déduire des caractéristiques du plasma ambiant (densité électronique, température des populations de particules, voire l’intensité du champs magnétique) [Meyer-Vernet and Perche, 1989, Moncuquet et al., 2006, Schippers et al., 2013b]. Il est notable que cette mesure de la densité de particule est une mesure absolue, alors que cette même grandeur mesurée avec des détecteurs de particules est en général biaisée à cause de l’effet répulsif du potentiel électrique du satellite dans l’environnement spatial.

Lorsque la sonde spatiale traverse la source radio ou passe à proximité de celle-ci, on peut mesurer les propriétés de l’onde radio lors de son émission. On utilise alors les mêmes modes instrumentaux et les mêmes techniques d’analyse pour mesurer le flux et la polarisation. En revanche, comme on se trouve alors proche des fréquences caractéristiques du plasma (coupure ou résonance), l’hypothèse de propagation transverse n’est plus valable. On ne peut donc déduire que l’orientation du plan de polarisation de la composante électrique de l’onde. Avec des mesures magnétiques conjointes, on peut reconstruire complètement les propriétés de propagation de l’onde [Cecconi et al., 2013a].

Les mesures radio *in-situ* illustrent une particularité de l’instrumentation radio spatiale basse fréquence: avec le même instrument, on mesure simultanément des phénomènes radio électriques locaux et distants. La gamme spectrale de ces instruments couvre en effet des régimes de propagation libre (la partie haute fréquence, au dessus de la fréquence de coupure locale des modes de propagations radio, fréquence cyclotron électronique f_{RX} pour le mode extraordinaire et fréquence plasma f_p pour le mode ordinaire); l’oscillation plasma qui apparaît à la fréquence hybride haute (f_{UH}); le bruit quasi thermique, qui produit un signal aux caractéristiques spectrales spécifiques [Meyer-Vernet and Perche, 1989, Schippers et al., 2013b]; le bruit d’impact, lié aux impacts de particules sur les antennes ou le corps du satellite [Le Chat et al., 2013]; ou encore les ondes électrostatiques présentes en dessous des fréquences de coupures [Menietti et al., 2017]. La Figure 3.6 illustre les différentes coupures et résonances pour les différents modes de propagation dans le cadre de la théorie magnéto-ionique.

Sur un même spectre radio, on peut donc observer plusieurs types de phénomènes. L’observation d’ondes radio proches de la coupure de leur mode de propagation peut être l’indice que l’on observe ces ondes dans leur lieu d’émission. Dans ce contexte, il y a deux mesures importantes pour la compréhension du mécanisme d’émission: la polarisation (on sait comment l’obtenir) et l’évaluation précise de la fréquence de coupure. Pour cette seconde mesure, la résolution et l’échantillonnage spectral des instruments ne sont pas adaptés en général. On a donc construit un algorithme de “déconvolution” de la réponse des filtres du récepteur radio [Lamy et al., 2010a]. La figure S2 de cet article (supplementary material) est reproduite à la Figure 3.7 et illustre comment la connaissance précise de la réponse instrumentale permet de reconstruire une estimation de la fréquence de coupure avec une bien meilleure résolution spectrale.

Publications associées — Cecconi et al. [2013a], Briand et al. [2016], Lamy et al. [2010a], Menietti et al. [2017], Moncuquet et al. [2005]
Post-Doc (accompagnement) — P. Schippers (2011-2013, LESIA)

3.3 Instrumentation Complémentaire

Les instruments radio basses fréquences permettent l’observation à distance d’instabilités plasma qui résultent de l’interaction de particules accélérées avec le milieu qu’elles traversent. Pour compléter ces mesures, deux types d’instruments peuvent être utilisés: les instruments de mesures *in-situ* de particules (spectrographe

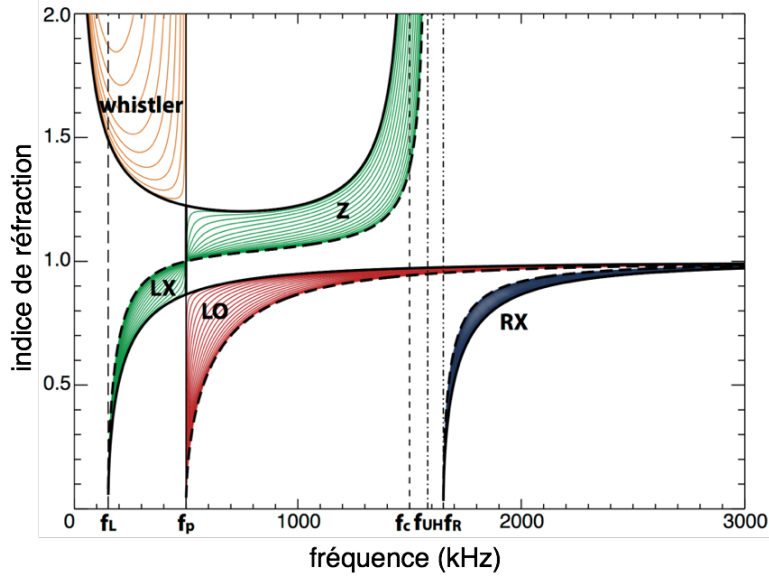


FIG. 3.6 – Diagramme de dispersion pour un plasma dont les fréquences plasma et cyclotron électronique sont: $f_p = 500$ kHz and $f_c = 1500$ kHz. Les lignes verticales, de gauche à droite, sont: f_{LO} , fréquence de coupure du mode LO; f_p , fréquence de coupure plasma; f_c fréquence de résonance cyclotron; f_{UH} fréquence de résonance hybride haute; et f_{RX} , fréquence de coupure du mode RX. Figure extraite de Gautier [2013]

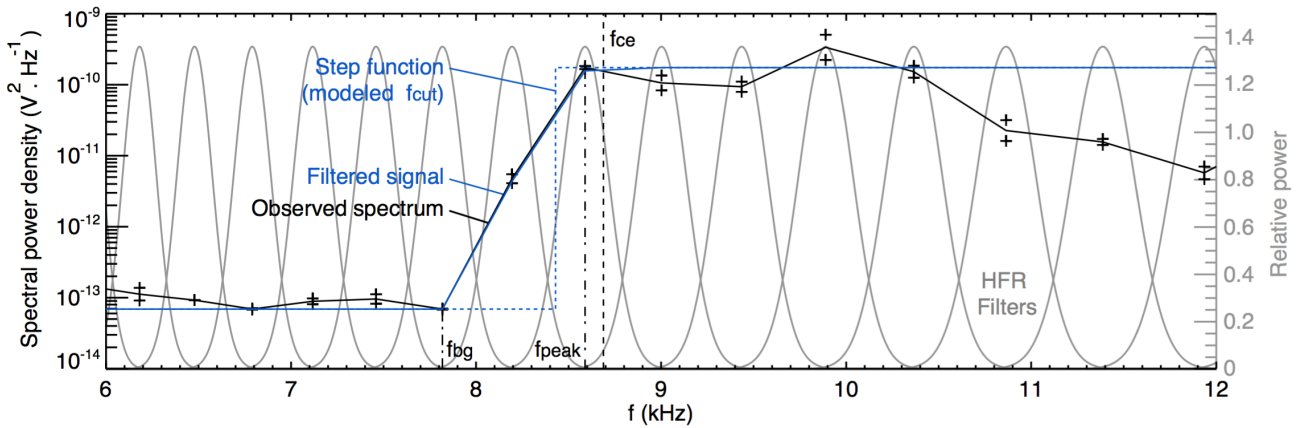


FIG. 3.7 – Spectre d'autocorrélation mesuré sur l'antenne Z de Cassini/RPWS à 08:55 SCET le 16 octobre 2008. Le spectre observé est tracé en noir, et chaque mesure spectrale est dédoublée (symboles +), car l'autocorrélation sur cette antenne est mesurée deux fois par palier de fréquence dans ce mode de mesure. Les lignes en traits pointillés mixtes montrent les fréquences limites où l'on observe le bruit de fond (f_{bg}) et le signal au dessus de la coupure (f_{peak}). La fréquence cyclotron électronique f_{ce} est tracée en tirets noirs. Les niveaux de signal aux fréquences f_{bg} et f_{peak} permettent d'évaluer les niveaux de haut et bas de la fonction de Heaviside qui modélise le spectre naturel observé. Les courbes grises représentent les fonctions de transfert de chacun des filtres individuels du HFR de Cassini/RPWS, exprimées en puissance relative (échelle de droite). La ligne pointillée bleue est la fonction de Heaviside reconstruite, et la courbe bleue en trait plein est le signal reconstruit à partir de ce spectre d'entrée modélisé. Ce spectre reconstruit reprend parfaitement le spectre observé entre les marqueurs f_{bg} et f_{peak} . La fréquence de coupure estimée avec cette méthode est ~ 250 Hz en dessous de f_{ce} . On estime qu'avec cette méthode, on peut reconstruire la position de la fréquence de coupure avec une précision de l'ordre de 0.5%

de masse électronique, ionique ou d'atomes neutres énergétiques) et de champ magnétique, et les instruments de mesure de type *remote sensing* en spectroscopie visible, infrarouge ou ultraviolet. Ces instruments permettent de contraindre et confirmer les modèles et les théories liés à l'émission des ondes radio. A l'inverse, une fois validés les mécanismes d'émissions, les données radio peuvent venir en support de ces observations.

Mesures in-situ

Sur les missions spatiales d'exploration du système solaire qui embarquent un instrument radio basses fréquences, on trouve des instruments de mesures *in-situ* de type magnétomètre continu (instrument MAG sur Cassini [Dougherty et al., 2004]), spectromètre de masse électronique (instrument CAPS sur Cassini [Young et al., 2007]) ionique et parfois d'atomes neutres énergétiques (instrument MIMI sur Cassini [Krimigis et al., 2004]). Ces instruments sont essentiels pour l'analyse des traversées de sources radio (mesures radio *in-situ*) car elles donnent le contexte du plasma ambiant. En particulier, la mesure du champ magnétique local est indispensable pour obtenir la fréquence cyclotron électronique. Lorsque les spectromètres particules produisent des fonctions de distribution des populations de particules, on peut interpréter finement les observations radio et conclure sur les instabilités plasma en jeu.

Les instrument de mesure des atomes neutres énergétiques sont des instruments qui mesurent des particules à distance, même s'ils sont classifiés comme instruments *in-situ* dans les charges utiles scientifiques spatiales (tout comme les instruments radio basses fréquences, d'ailleurs). Ces instruments détectent des atomes neutres qui résultent de la recombinaison d'un ion accéléré et d'un électron. La mesure de la direction d'arrivée de ces atomes énergétiques permet ainsi de voir où se trouvent les populations d'ions accélérés.

Spectro-imagerie

Les populations de particules accélérées dans les magnétosphères planétaires suivent les lignes de champ magnétique et précipitent dans les régions polaires de la planète. Ce sont les émissions aurorales. La gamme spectrale des émissions aurorales dépend de la composition chimique de la haute atmosphère de la planète, car elles résultent de l'interaction entre les particules incidentes et les molécules qui composent l'atmosphère. Pour la Terre, ces émissions sont présentes dans le domaine visible (interaction avec les molécules O_2 et N_2), alors que pour les planètes géantes, celles-ci se produisent dans la gamme ultraviolette (UV), du fait de la présence majoritaire d'hydrogène [Clarke et al., 1981]. Le circuit de précipitation aurorale constitue un circuit de courant qui chauffe la haute atmosphère de la planète. Cette émission thermique caractéristique est observable dans le gamme infrarouge (IR) [Stallard et al., 2007a,b]. Des observations en rayon X sont aussi possibles pour observer les réactions d'échange de charge entre les ions précipitant et les molécules neutres de l'atmosphère [Branduardi-Raymont et al., 2013].

Ces observations peuvent être conduites, soit depuis la Terre (au sol en IR, ou en orbite terrestre avec le télescope spatial Hubble ou la mission Hisaki en UV), soit avec les instruments montés sur la même sonde que l'instrument radio (par exemple, sur Cassini, les instruments UVIS [Esposito et al., 2004] et ISS [Porco et al., 2004]). De nombreuses campagnes d'observation couplant les mesures radio, *in-situ* et de spectrométrie UV, Visible ou IR ont été mises en place pour étudier les aurores planétaires [voir, par exemple : Jackman et al., 2005, Nichols et al., 2007, Lamy et al., 2013].

Publications associées — Branduardi-Raymont et al. [2013], Jackman et al. [2005], Lamy et al. [2010a, 2013], Cecconi et al. [2021]

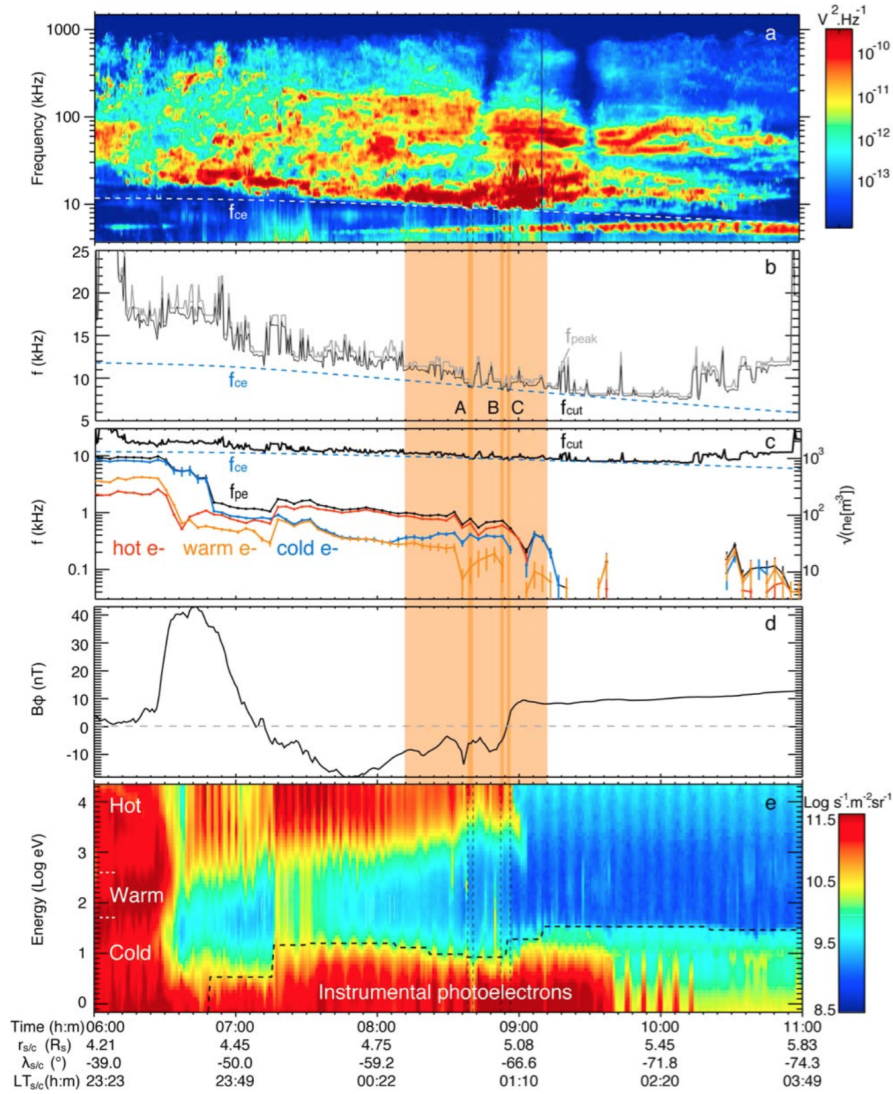


FIG. 3.8 – Observation multi-instruments d’une traversée de source radio du rayonnement kilométrique auroral de Saturne (SKR, Saturn Kilométrique Radiation) observée par la mission Cassini le 16 octobre 2008, de 06:00 à 11:00 SCET. La figure montre: (a) le spectre dynamique Cassini/RPWS/HFR, avec la fréquence cyclotron électronique f_{ce} en pointillé blanc; (b) f_{peak} en gris et f_{cut} en noir (voir légende de la figure 3.7) superposée à f_{ce} (tirets); (c) Tracé de f_{cut} et f_{ce} avec une échelle spectrale logarithmique, ainsi que les fréquences f_{pe} dérivées des observations Cassini/CAPS/ELS; (d) La composante azimutal du champ magnétique B_ϕ , mesuré par Cassini/MAG; et (e) le spectrogramme mesuré par Cassini/CAPS/ELS du flux d’énergie différentiel des électrons, intégrés sur toutes les anodes de l’instrument. Figure extraite de Lamy et al. [2010a]

Chapitre 4

Modélisation du mécanisme d'émissions des ondes radio basses fréquences planétaires et de leur propagation

Jupiter est la plus grosse planète de notre système solaire, et celle possédant le plus fort champ magnétique. C'est aussi un rotateur rapide, avec une période rotation sidérale de 9h 55min. Ainsi, l'environnement spatial de Jupiter est un gigantesque système électro-magnéto-dynamique rempli de plasma. Des particules relativistes spiralent le long des lignes de son champ magnétique. C'est ce qu'on appelle la magnétosphère de Jupiter, qui est la zone d'influence magnétique de la planète et est délimitée par une magnétopause, lieu d'équilibre de pression entre la pression magnétique planétaire et la pression dynamique du Vent Solaire environnant. De plus, la lune Io est le corps du système solaire dont le volcanisme est le plus intense, éjectant environ une tonne de matériel ionisé par seconde dans la magnétosphère de Jupiter. Io est ainsi la principale source de matière dans l'environnement de Jupiter. La dynamique de la magnétosphère de Jupiter est principalement contrôlée par trois sources : Jupiter (son intense champ magnétique qui tourne avec elle), Io (qui éjecte de la matière dans la magnétosphère) et le Vent Solaire (qui contraint les régions externes de la magnétosphère). Ce système produit d'intenses ceintures de radiation ainsi que des précipitations de particules accélérées dans les régions polaires de Jupiter. Ces précipitations produisent des phénomènes auroraux intenses qui peuvent être observés en radio, UV, IR ou en rayons X. Les particules éjectées par Io interagissent avec la magnétosphère de Jupiter en produisant un circuit de courant entre la lune et la planète, qui contribue aussi aux précipitations de particules aux pied magnétique du tube de flux passant par Io. Les émissions radio joviennes sont produites au dessus des régions polaires de la planète, sur les lignes de champ magnétique portant les courants alignés magnétosphériques. Ces émissions radio sont produites par des instabilités plasma, qui transfèrent en énergie électromagnétique l'énergie libre présente dans les fonctions de distributions de particules. La Figure 4.1 présente les émissions radio joviennes et leurs localisation schématique. Toutes les autres planètes magnétisées possèdent une magnétosphère. Dans les cas de la Terre, la physique aurorale et les émissions radio associées sont principalement contrôlées par le Vent Solaire (sa vitesse et l'orientation du champ magnétique interplanétaire). Dans celui de Saturne, un cas intermédiaire entre la Terre et Jupiter, la physique aurorale et les émissions radio varient avec l'activité du Vent Solaire (surtout sa pression dynamique), mais aussi de la dynamique interne de la magnétosphère.

Ce chapitre présente les caractéristiques des émissions radio planétaires, en prenant le cas de Jupiter et celui de Saturne, ainsi que leur interprétation physique. Je présente aussi deux modèles développés pour aider à l'interprétation des observations radio.

4.1 Phénoménologie

Les émission radio basse fréquences planétaires ou solaires présentent des caractéristiques particulières qui les distinguent radicalement des émissions électromagnétiques liées à des transitions atomiques et moléculaires. L'interprétation des émissions radio basses fréquences requiert une analyse à la fois temporelle, spectrale, et en polarisation. Les morphologies spectro-temporelles sont des caractéristiques déterminantes.

Les émissions radio planétaires couvrent une gamme spectrale allant de quelques kHz à environ 1 MHz pour la Terre, Saturne, Uranus et Neptune, et jusque 40 MHz pour Jupiter. Les émissions radio basses fréquences

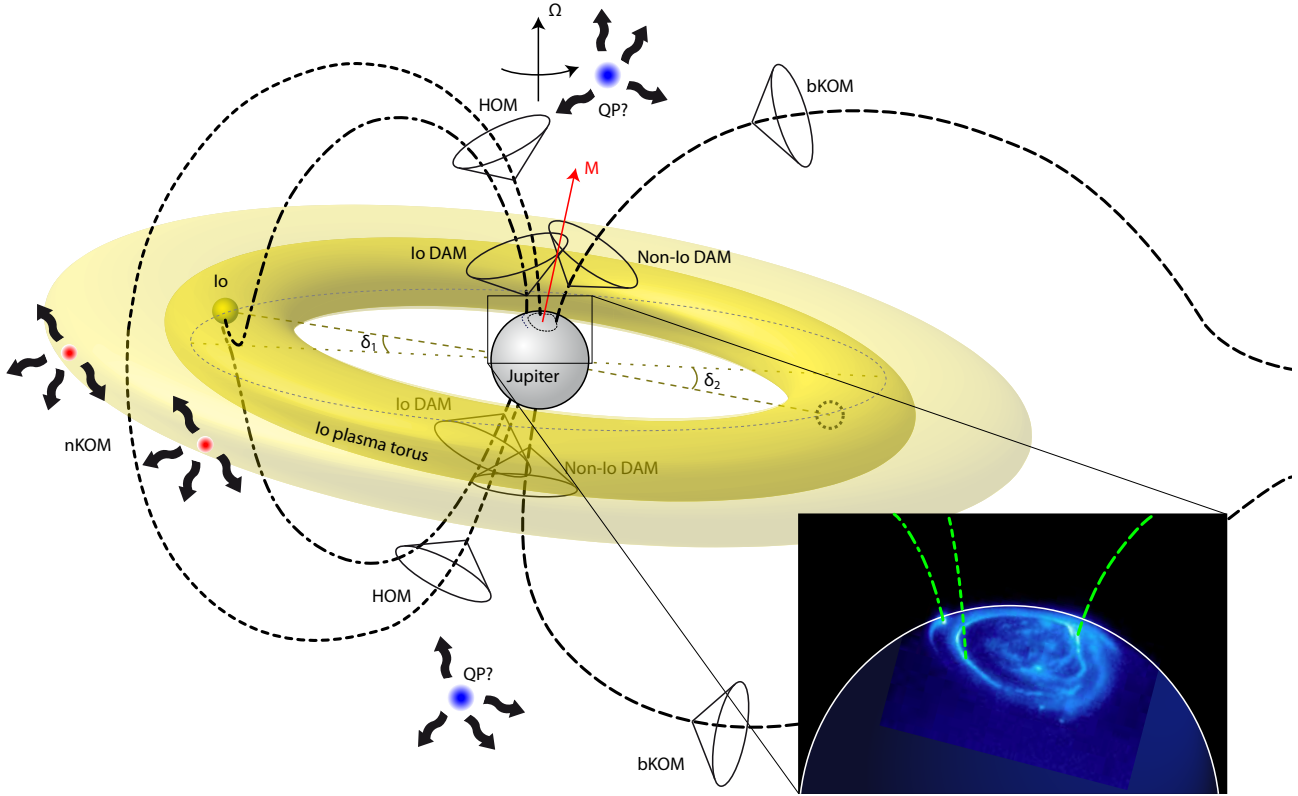


FIG. 4.1 – Portrait radio de Jupiter et de son environnement. Les sources radio sont représentées par des cônes (voir section 4.2). Figure adaptée de Cecconi et al. [2012]

des planètes externes en deçà de 10 MHz ont été découvertes par l'instrument Voyager/PRA (Planetary Radio Astronomy). De telles émissions n'ont pas été détectées dans l'environnement de Mercure pour l'instant. La Figure 4.2 présente les spectres de toutes les émissions radio planétaires connues. Ces spectres sont normalisés à une distance d'observation commune de 1 Unité Astronomique (UA). Les différentes composantes représentées sur ce graphique sont:

- en rouge, l'émission radio kilométrique terrestre (TKR, pour Terrestrial Kilometric Radiation; aussi appelée AKR, pour Auroral Kilometric Radiation);
- en noir, les composantes du spectre de Jupiter, avec, des basses aux hautes fréquences, les sursauts quasi-périodiques (QP), l'émission kilométrique à bande large (bKOM, broad-band Kilometric), l'émission kilométrique à bande étroite (nKOM, narrow-band Kilometric), l'émission hectométrique (HOM) et les composantes décamétriques (Io-DAM, décamétrique contrôlé par Io; non-Io-DAM; et S-bursts, Short-bursts, aussi appelés sursauts millisecondes);
- en vert, les composantes du spectre de Saturne, avec des basses aux hautes fréquences, l'émission myriamétrique à bande étroite (nSMR, narrow-band Saturn Myriametric Radiation), l'émission kilométrique à bande étroite (nSKR, narrow-band Saturn Kilometric Radiation) et l'émission kilométrique (SKR, Saturn Kilometric Radiation);
- en bleu, les spectres des émissions kilométriques d'Uranus et Neptune (UKR et NKR)

Pour comparaison, le spectre typique des sursauts radio de type III (qui sont produits par des faisceaux de particules énergétiques expulsées du Soleil), ainsi que le spectre du rayonnement des ceintures de radiations de Jupiter, et son spectre de corps noir. La coupure de l'ionosphère terrestre est tracée en trait pointillé gris: les émissions à plus basse fréquence que cette limite ne peuvent être observées que depuis l'espace. Seul Jupiter peut ainsi être observé depuis le sol. Les émissions radio planétaires sont qualifiées de "non-thermiques", comme en témoigne la comparaison de leurs intensités relatives avec le spectre thermique de corps noir de Jupiter. Elles résultent d'instabilités plasma et non de phénomènes de transition ou d'agitation atomique ou moléculaire. Ces émissions radio sont variables en temps et en fréquence, et souvent sporadiques. Il est intéressant de constater que toutes ces émissions, en particulier dans la gamme kilométrique, ont des spectres d'intensité absolue très

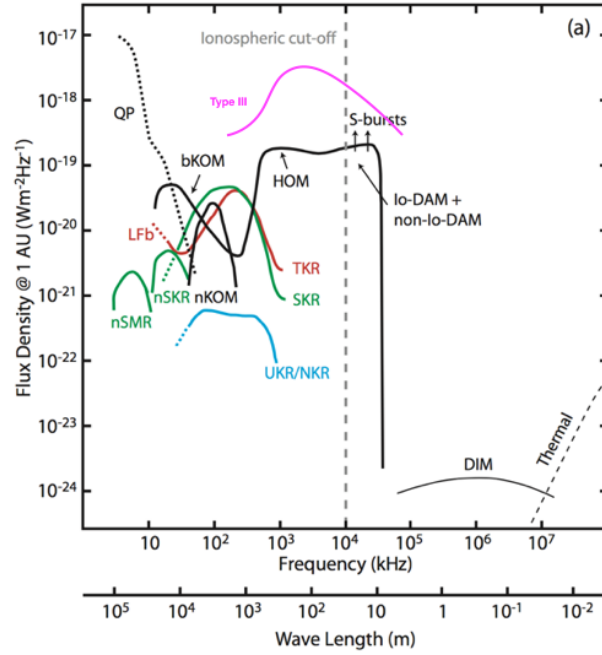


FIG. 4.2 – Spectres des émissions radio du système solaire, normalisés à une distance d'observation de 1 UA. Figure extraite de Cecconi et al. [2018b]

comparable, ce qui indique la présence d'un mécanisme d'émission commun ou très similaire.

Les différentes morphologies caractéristiques des émissions radio de Jupiter sont présentées sur les figures 4.3 et 4.4. Les émissions radio planétaires dans les gammes spectrales hectométriques et décamétriques prennent la forme d'arcs sur les spectrogrammes. Dans la gamme kilométrique, les émissions joviennes (par exemple, l'émission b-KOM, sur la Figure 4.3) et kroniennes (voir la Figure 4.5) sont moins clairement structurées. On observe aussi des émissions à bande étroite (par exemple, celle notée n-KOM sur la Figure 4.3), ou des émissions quasi-périodiques aux très basses fréquences (notées QP sur la Figure 4.3)

Le survol de la sonde Cassini à Jupiter a été l'occasion d'observer les émissions radio joviennes inaccessibles depuis le sol (QP, bKOM, nKOM et HOM) avec un instrument d'une grande sensibilité [Hospodarsky et al., 2004, Zarka et al., 2004, 2021b]. Le survol a duré 6 mois, fin 2000 – début 2001, et pendant les deux semaines d'observations centrées autour du périjoive, le signal radio jovien est quasi-permanent, comme le montre la Figure 4.3 [voir aussi Cecconi et al., 2021b]. Cela contraste avec les observations à grande distance (par exemple depuis la Terre) dans la gamme décamétrique où les émissions sont bien isolées les unes des autres, voir Figure 4.4. Il y a un effet de seuil avec la distance puisque le ciel est brillant aux basses fréquences. Ainsi, l'éloignement ou la moindre sensibilité d'un instrument aura un fort effet sur les observations, les émissions les plus faibles se mélangeant rapidement au rayonnement galactique ambiant.

Les observations ont montré que les émissions radio planétaires sont totalement polarisées, elliptiquement ou circulairement. La polarisation des émissions radio planétaires dépend aussi de la position de l'observateur. La polarisation observée des émissions dépend de la latitude de l'observateur à Jupiter et à Saturne. En deçà de $\pm 30^\circ$ de latitude, la polarisation observée est circulaire, alors qu'elle est elliptique au delà: voir la Figure 9 of Fischer et al. [2009] pour Saturne, et la Figure 3 de Reiner et al. [1995] pour Jupiter. Par ailleurs, les observations de Cassini/RPWS dans ou proche des sources du SKR [voir Figure 5 de Lamy et al., 2011b] montrent que la polarisation des ondes radio est modifiée par les effets de propagation. Cela est compatible avec l'hypothèse de propagation dans les plasma froids (indice de réfraction défini par l'équation d'Appleton-Hartree), mais l'interprétation détaillée reste encore discutée [Budden, 1952, Shaposhnikov et al., 1998, Lecacheux, 1988, Fischer et al., 2009].

Les émissions radio solaires ont longtemps été considérées comme non (ou marginalement) polarisées aux basses fréquences [Dulk and Suzuki, 1980, Reiner et al., 2007], mais des observations haute résolution montrent que des structures polarisées existent à très petites échelles spectrales et temporelles (~ 10 kHz, ~ 10 ms), et précèdent des structures non polarisées et diffuses [voir, par exemple, Pulupa et al., 2020].

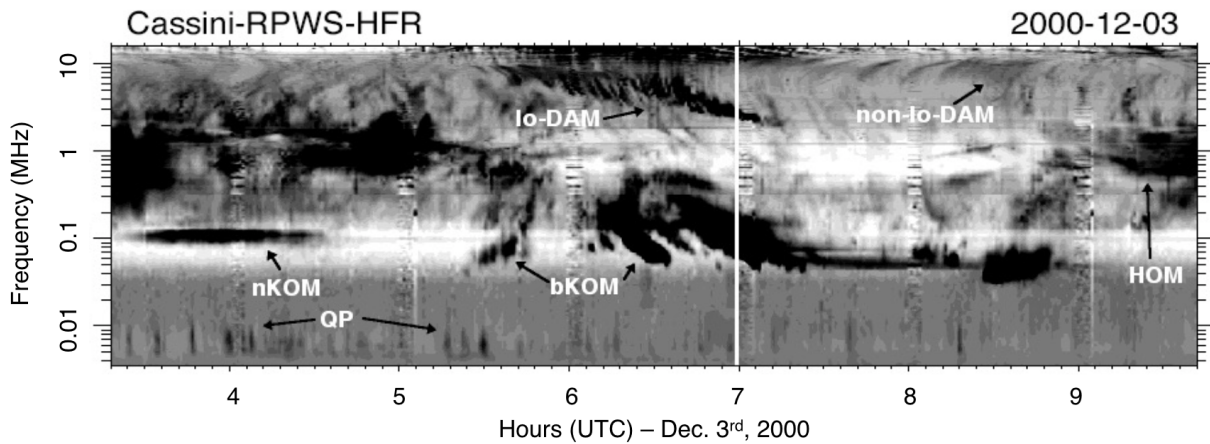


FIG. 4.3 – Les composantes du spectre radio de Jupiter, vues par Cassini/RPWS (extrait de Zarka et al. [2004]) avec des annotations

La Figure 4.5 montre deux spectres dynamiques des émissions radio basses fréquences de Saturne (SKR, nSKR et nSMR), pour des périodes centrées chacune sur un périkrone. Les émissions kroniennes sont moins variées que les émissions joviennes. sur cette figure, on observe que le SKR est polarisé purement circulairement. Le panneau du haut correspond à une période d’observation où Cassini se trouve dans l’hémisphère Sud de Saturne. Les émissions radio sont vues principalement polarisées gauche (LH: Left Handed), sauf dans la partie la plus haute du spectre (vers 800 kHz, et proche du survol de la planète), où la polarisation droite (RH: Right Handed) domine. Sur le panneau du bas, on constate un changement de polarisation observée, lors des passages de l’équateur kronien, en début et fin d’intervalle. Ces observations sont compatibles avec des émissions principalement sur le mode RX (gauche dans l’hémisphère Sud, et droite dans l’hémisphère Nord). Cette phénoménologie est observée pour toutes les émissions radio planétaires.

Le panneau (b) montre aussi une caractéristique importante du SKR, sa modulation à la période planétaire ($\sim 10\text{h}40\text{min}$). Cette modulation à la période de rotation planétaire est aussi une caractéristique commune aux émissions radio planétaires. Pour les planètes dont l’axe magnétique est incliné par rapport à l’axe de rotation planétaire, cela s’explique par l’anisotropie du diagramme d’émission. En revanche, dans le cas de Saturne, le mystère reste entier car l’axe magnétique est aligné avec l’axe de rotation planétaire [Dougherty et al., 2018]. Pour ajouter à la confusion, la période de modulation radio est variable dans le temps [Galopeau and Lecacheux, 2000, Cecconi and Zarka, 2005a], et les composantes Nord et Sud du SKR ne sont pas modulées avec la même périodicité [Lamy, 2010]. Nous avons aussi montré que l’intensité moyenne des composantes Nord et Sud de SKR dépendent de la saison [Kasaba et al., 2017, Nakamura et al., 2019] avec des émissions plus intense d’un facteur 10 pour l’hémisphère en été par rapport à celui en hiver.

Enfin, les observations proche et dans les sources du SKR menées avec l’instrument radio de Cassini ont montré une phénoménologie cohérente avec le mécanisme d’émission CMI [Lamy et al., 2010a, Mutel et al., 2010, Kurth et al., 2011, Lamy et al., 2011b, Menietti et al., 2011, Schippers et al., 2011].

Publications associées — Badman et al. [2008], Branduardi-Raymont et al. [2013], Bunce et al. [2010], Cecconi and Zarka [2005a], Clarke et al. [2009], Christophe et al. [2012], Farrell et al. [2005], Fischer et al. [2009], Gurnett et al. [2005], Hess et al. [2008, 2010], Hospodarsky et al. [2004], Jackman et al. [2005, 2009], Kimura et al. [2012, 2013], Kurth et al. [2005a,b], Lamy et al. [2008a,b, 2009a, 2010a,b, 2012], Louarn et al. [2007], Louis et al. [2017a,b], Menietti et al. [2010a,b, 2017], Moncuquet et al. [2005], Mutel et al. [2010], Mylostna et al. [2013], Nakamura et al. [2019], Nichols et al. [2010], Panchenko et al. [2009], Ryabov et al. [2014], Taubenschuss et al. [2006, 2021b], Wu et al. [2021a], Ye et al. [2009, 2010], Zakharenko et al. [2012], Zarka et al. [2004, 2007, 2012, 2018, 2021b]

Jeux de Données — Cecconi et al. [2017a,b,c,d,f], Cecconi and Zarka [2019], Lamy et al. [2009b, 2011a], Schippers et al. [2013a], Taubenschuss et al. [2021a], Wu et al. [2021b], Zarka et al. [2021a]

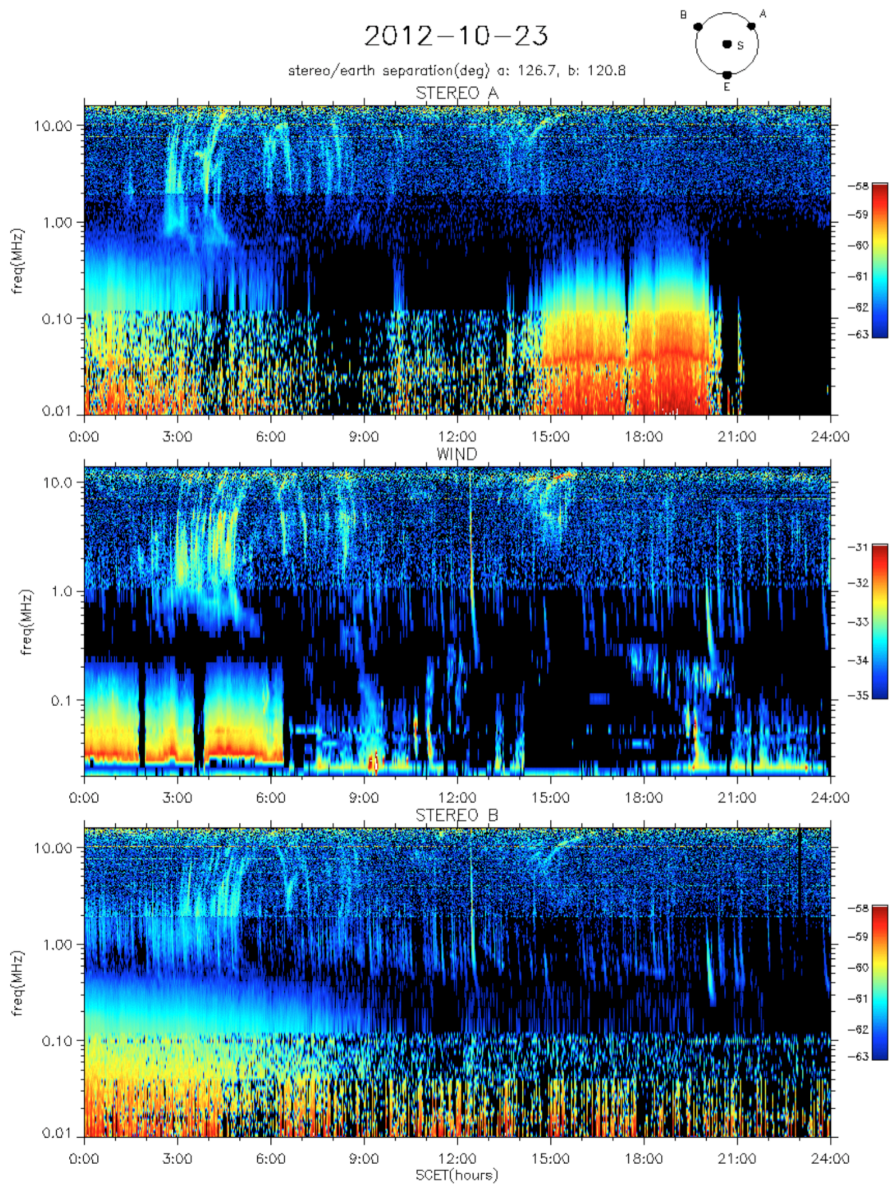


FIG. 4.4 – Emissions radio décamétriques de Jupiter, vues par STEREO-A, WIND et STEREO-B (de haut en bas) (extrait de Cecconi et al. [2013b]). Les positions relatives de ces trois sondes spatiales autour du Soleil sont indiquées en haut à droite.

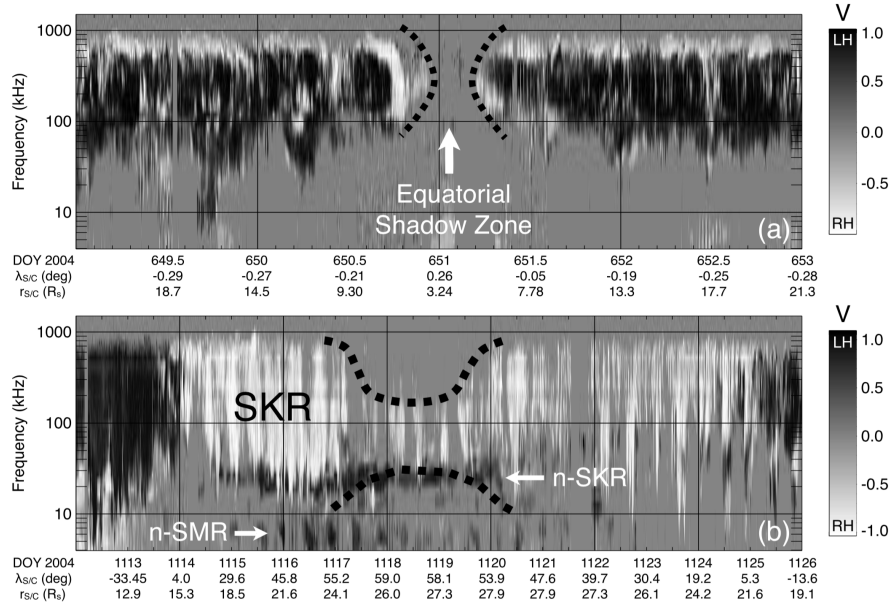


FIG. 4.5 – Deux périodes de Cassini, observés par l’instrument RPWS/HFR. Le taux de polarisation circulaire de l’émission kilométrique de Saturne (SKR) est tracé en fonction du temps et de la fréquence d’observation. Le SKR est polarisé totalement circulairement, mais les deux polarisations peuvent être observées au même instant à des fréquences différentes. Le panneau du bas montre aussi les émissions nSKR et nSMR. La zone d’ombre équatoriale, où la sonde ne voit plus de signal radio est surlignée. Figure extraite de Lamy et al. [2008b]

4.2 Modélisation

Pour étudier l’émission ou la propagation des ondes radio basses fréquences dans les magnétosphères planétaires ou le vent solaire, on se place dans l’hypothèse d’un plasma froid magnétisé [Gautier, 2013, Cecconi, 2019], où l’équation de dispersion des ondes électromagnétiques est donnée par la relation d’Appleton-Hartree:

$$n^2 = 1 - \frac{2X(1-X)}{2(1-X) - Y^2 \sin^2 \theta \pm \sqrt{Y^4 \sin^4 \theta + 4(1-X)^2 Y^2 \cos^2 \theta}} \quad (4.1)$$

Cette relation lie l’indice de réfraction n avec $X = (\omega_p/\omega)^2$, $Y = \omega_c/\omega$ et θ , qui est la séparation angulaire entre le champ magnétique local \mathbf{B}_0 et le vecteur d’onde \mathbf{k} . Cette équation a deux solutions en général, ce qui rend le milieu anisotrope, avec deux modes de propagation distincts. Dans le cas de la propagation des ondes radio, on appelle ces modes : “LO” (pour *Left-handed Ordinary*) “RX” (pour *Right-handed Extraordinary*).

Dans la source radio, le mécanisme d’émission communément invoqué (et confirmé par les observations in-situ autour de la Terre, de Jupiter ou de Saturne) est l’instabilité CMI. Cette instabilité plasma est une résonance onde-particule qui transforme l’énergie libre présente dans le milieu en radiation électromagnétique. La résonance est activée lorsque le mouvement de giration des électrons relativistes instables correspond à la pulsation de l’onde ω décalée par effet Doppler. Cette condition s’écrit de manière générale comme:

$$\omega = \Omega_c + k_{\parallel} v_{\parallel} \quad (4.2)$$

où Ω_c est la pulsation cyclotron électronique relativiste, k_{\parallel} et v_{\parallel} sont les composantes parallèles au champ magnétique ambiant \mathbf{B}_0 du vecteur d’onde et de la vitesse des particules résonnantes. La pulsation cyclotron électronique relativiste est:

$$\Omega_c = \omega_c \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (4.3)$$

où $\omega_c = eB/m_e$ est la pulsation cyclotron électronique, v est la vitesse des électrons résonnants, et c la vitesse de la lumière.

Dans le cas faiblement relativiste ($v \ll c$), la condition de résonance peut s’écrire:

$$v_{\perp}^2 + \left(v_{\parallel} - \frac{k_{\parallel} c^2}{\omega_c} \right)^2 = c^2 \left(\frac{k_{\parallel}^2 c^2}{\omega_c^2} + 2 \left(1 - \frac{\omega}{\omega_c} \right) \right) \quad (4.4)$$

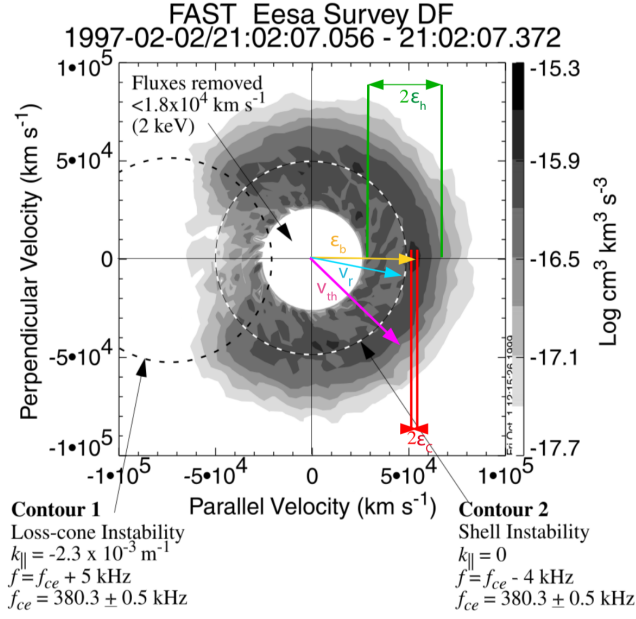


FIG. 4.6 – Fonction de distribution instable, mesurée par FAST dans les régions aurorales terrestres. Extraite de Louis et al. [2019]: voir la légende de la figure 3 de cet article.

Cette condition de résonance définit un cercle dans l’espace des phases, dont le centre est situé sur l’axe des vitesses parallèles à $v_0 = k_{\parallel} c^2 / \omega_c$. En définissant $\theta = \mathbf{k} \cdot \mathbf{B}_0$, on obtient:

$$v_0 = \frac{\omega}{\omega_c} c N \cos \theta \quad (4.5)$$

avec $N = ck/\omega$. En conséquence, la position du centre de résonance dans l’espace des phases fixe la direction de propagation de l’émission produite. Une distribution instable en cône de perte sera en résonance avec un cercle décentré (et donc induira une émission oblique), alors qu’une émission en “shell” (ou fer à cheval) résonnera avec un cercle centré sur l’origine de l’espace des phases (et induira une émission perpendiculaire). La figure 4.6, extraite de Louis et al. [2019], montre une fonction de distribution mesurée par la mission FAST et propose deux cercles de résonances.

J’ai participé au développement de deux codes numériques: le code ExPRES (*Exoplanetary and Planetary Radio Emission Simulator*) qui applique le mécanisme CMI pour prédire l’observabilité d’une radio source; et le code ARTEMIS-P (*Anisotropic Ray Tracer for Electromagnetics in Magnetospheres, Ionospheres and Solar wind - including Polarisation*), qui permet de propager les ondes radio dans les environnements spatiaux.

Le code ExPRES

Le code ExPRES [Louis et al., 2019] permet de prédire le caractère observable d’une radio source en fonction de la géométrie d’observation et des caractéristiques du plasma instable à l’origine de l’émission. L’instabilité CMI prédit un diagramme d’émission très anisotrope qui prend la forme d’un feuillet d’émission conique (quelques degrés d’épaisseur) dont l’axe est aligné avec le champ magnétique local. Pour pouvoir observer une source, il faut non seulement que cette source soit active, mais que l’observateur soit éclairé par ce feuillet d’émission. Le code implémente un modèle de radio source fondé sur l’instabilité CMI, et des modèles d’environnements planétaires (modèles de champs magnétiques, modèles de couche de courant magnétosphères, modèles d’ionosphères, etc.) Le code calcule la géométrie de l’observation et fournit les radio sources observables pour les géométries proposées. Le code a été développé pendant plusieurs années. Il a été initialement développé pour le cas de Jupiter, en préparation de la mission Juno, par S. Hess dès 2006, puis a été adapté pour l’étude de Saturne, ou des exoplanètes. Un historique des versions est disponible sur GitHub, où le code est mis à disposition¹. Ce code a donné lieu à de nombreuses publications [Lamy et al., 2008a, Hess et al., 2010, Cecconi

1. Historique des versions du code ExPRES: <https://github.com/maserlib/ExPRES/blob/1.1.0/VERSIONS.md>

et al., 2012, Hess and Zarka, 2011, Lamy et al., 2011b, 2013, Louis et al., 2017a,b, 2018, Cecconi et al., 2021b, Turner et al., 2021], et est aussi cité par d'autres équipes² [Mottez et al., 2020, Serrano et al., 2020, Dunn et al., 2020, Narang et al., 2020, Serrano et al., 2020, Kao et al., 2019, Martos et al., 2020]. Les aspects de mise à disposition du code sont discutés dans la section 6.1.

Publications associées — Lamy et al. [2008a], Hess et al. [2010], Cecconi et al. [2012], Lamy et al. [2011b], Louis et al. [2017a,b, 2018, 2019], Cecconi et al. [2021b], Turner et al. [2021]
Jeux de Données — Louis et al. [2020], Cecconi et al. [2021c]

Le code ARTEMIS-P

Le code ARTEMIS-P [Gautier, 2013] est un outil de tracé de rayon qui permet de propager des ondes électromagnétiques dans des environnements magnétisés, comme les environnements planétaires. Il a été développé par Anne-Lise Gautier pendant sa thèse de doctorat (2010-2013). L'objectif de ce développement était de se doter d'un outil interne, validé et connu pour analyser les données radio basses fréquences. Lors de sa thèse, de nombreuses pistes d'étude ont été lancées grâce à ce code [Gautier et al., 2013a], comme l'interprétation de l'effet "au delà de l'horizon" observé lors des tempêtes de SED (*Saturn Electrostatic Discharges*), ou bien la réfraction des rayons radio kilométriques dans la magnétosphère interne de Saturne. Ces études n'ont malheureusement pas été toutes publiées, suite au départ d'Anne-Lise pour une carrière d'enseignante. Depuis 2019, Claire Baskevitch, doctorante en cotutelle entre le LATMOS et le LESIA, travaille à nouveau sur le code ARTEMIS-P, avec pour objectif de modéliser les environnements ionisés des lunes Europe et Ganymède de Jupiter (code hybride développé au LATMOS) et d'y propager des ondes radio provenant des sources radio de Jupiter, en préparation des observations qui seront menées dans l'environnement Jovien avec la sonde ESA JUICE. Le code de tracé de rayon

Publications associées — Gautier et al. [2013b,a], Gautier [2013]
Thèse (encadrement) — Anne-Lise Gautier (2010-2013); Claire Baskevitch (2020-2023)

2. Liste obtenues grâce à l'outil Litmaps: <https://app.litmaps.co/seed/2913198961?i=2913198961>

Chapitre 5

Nouveaux Instruments Spatiaux

La mission Cassini s’est terminée en septembre 2017 avec une plongée spectaculaire dans l’atmosphère de Saturne. La mission STEREO est encore en opération, même si le contact avec l’une des deux sondes (STEREO-B) a été perdu en octobre 2014, juste avant le passage de la sonde derrière le Soleil. Je travaille à la préparation de l’instrument radio basses fréquences de la mission ESA JUICE (Jupiter Icy moon Explorer). Cet instrument fait partie de l’expérience JUICE/RPWI. Je fais aussi partie des équipes scientifiques de Bepi-Colombo/MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter, récemment rebaptisée “Mio”) et Solar-Orbiter. J’ai lancé plusieurs études pour renouveler l’instrumentation radio basses fréquences spatiales: en explorant de nouvelles architectures pour ces récepteurs radio, et de nouvelles plateformes spatiales.

5.1 Expérience JUICE/RPWI

L’expérience JUICE/RPWI (Radio and Plasma Waves Investigation) [Wahlund, 2013] inclut un instrument radio (JENRAGE, pour Jovian Environment Radio Astronomy and Ganymede Exploration) [Cecconi et al., 2015a] composé d’un trièdre orthogonal de dipôles électriques (RWI, Radio Waves Instrument) et d’un récepteur radio (HFR, High Frequency Receiver). L’expérience JUICE/RPWI comporte aussi un magnétomètre (Search-Coil) triaxe [Retinò et al., 2019] et quatre sondes de Langmuir. Ces sondes, le search-coil et les antennes radio RWI peuvent être utilisés par le récepteur LFR (Low Frequency Receiver) et par l’instrument MIME (Mutual Impedance Probe) [Rauch et al., 2017]. L’instrument radio est conçu pour couvrir la gamme spectrale de 80 kHz à 45 MHz, afin de pouvoir observer les émissions kilométriques, hectométriques et décamétriques de Jupiter. Le système de mesure est composé de trois dipôles électriques chacun relié à une voie d’échantillonnage. Cela permet de mesurer instantanément toute la matrice spectrale électrique. Les antennes électriques sont assez courtes (2.5 m bout à bout) comparées à celle de Cassini. L’instrument sera donc moins sensible, mais cette longueur réduite permet d’effectuer des mesures goniopolarimétriques à plus haute fréquence. En effet, l’approximation “antenne courte” sera valable sur une gamme spectrale étendue.

Activités instrumentales RPWI

Lors de la phase de définition de la mission JUICE (appelée Laplace puis EJSM, Europa Jupiter System Mission, lorsqu’une mission conjointe ESA/NASA était envisagée), j’ai mené une étude sur les capteurs électromagnétiques pour l’exploration de la magnétosphère de Jupiter [Cecconi et al., 2010]. Je suis co-PI de l’instrument JUICE/RPWI. Je suis responsable scientifique de l’instrument radio JENRAGE (Jovian Environment Radio Astronomy and Ganymede Exploration) de cette expérience, et je coordonne le développement de l’instrument entre les équipes (Japon, Suède et Pologne) qui construisent l’instrument. Je suis aussi membre du groupe de travail EMC (Electro Magnetic Compatibility) où je veille à ce que les autres instruments et la plateforme ne polluent pas la gamme d’observation de l’expérience JENRAGE. Je suis aussi membre du groupe de travail WG3 “Magnetosphere and Plasma Science” du SWT (Science Working Team) de la mission JUICE, où sont préparés et discutés les scénarios de séquençage orbital en fonction des objectifs scientifiques, ainsi que la répartition de la puissance et de la télémesure entre les instruments. Je participe au groupe de travail de préparation de l’archive de la mission, le DHAWG (Data Handling and Archive Working Group), où mon expérience avec les standards CDF et PDS4 est appréciée.

Ma responsabilité de co-PI sur l’instrument RPWI/JENRAGE m’a amené à définir la géométrie des antennes, avec l’aide de Julien Girard et de Gary Quinsac [Fischer et al., 2017], une partie des modes instrumentaux du sous-système, des traitements de bord et de sa chaîne de traitement au sol (étalonnage, inversion, distribution), en collaboration avec l’équipe japonaise de l’Université de Tohoku, à Sendai, qui a développé et réalisé la partie analogique de l’instrument JENRAGE. Un des traitements de bord à l’étude pour l’instrument RPWI/JENRAGE particulièrement innovant devrait permettre de séparer avant intégration les signaux provenant des sources radio des hémisphères Nord et Sud de Jupiter. Cette technique de “Smart Averaging” a été imaginée lors de l’analyse des données de l’instrument Cassini/RPWS et consiste simplement à séparer à pleine résolution les échantillons de polarisation circulaire opposés et de les intégrer séparément. Ceci est possible grâce à une propriété de l’intercorrélacion des signaux mesurés: sa partie imaginaire est proportionnelle à V (le taux de polarisation circulaire de l’onde). On séparera donc trois catégories d’échantillons: $V < -0.1$, $|V| < 0.1$ et $V > 0.1$.

Il est aussi prévu d’utiliser les sources radio de Jupiter pour sonder et caractériser l’ionosphère des lunes galiléennes (Europe, Ganymède et Callisto). Pour cela nous avons prévu d’utiliser le code ExPRES pour prédire et sélectionner les opportunités d’observation [Cecconi et al., 2021b]. Nous prévoyons aussi d’utiliser le code ARTEMIS-P pour préparer l’analyse de ces observations.

Collaboration avec l’équipe JUICE/RIME

En collaboration avec l’équipe JUICE/RIME (Radar for Icy Moon Exploration) [Cecconi et al., 2012, Kumamoto et al., 2017, Cecconi et al., 2021b, Gassot et al., 2021], nous préparons des modes de mesures permettant d’utiliser le rayonnement radio naturel de Jupiter comme une source externe pour un sondage des lunes glacées en mode “radar bistatique” (utilisation d’une source externe connue et non contrôlée pour faire des mesures radar). Conceptuellement, cela revient à interpréter le champ d’interférence présent proche de la surface des lunes, et qui résulte de l’interférence entre l’onde radio incidente (venant des sources radio basses fréquences de Jupiter) et de sa contrepartie réfléchiée par la surface et les interfaces sous la surface. Cet effet a été observé autour de la Lune avec l’instrument LRS de la sonde Kaguya [Ono et al., 2010] et l’idée a été reprise et développée par plusieurs équipes [voir par exemple, Romero-Wolf et al., 2015, Kumamoto et al., 2017, Peters et al., 2020].

Les équipes JUICE/RPWI et JUICE/RIME travaillent ensemble pour s’assurer de la faisabilité de ce type de mesure et des éventuelles performances. J’ai accompagné deux stages avec Woldek Kofman et Alain Hérique (IPAG, Grenoble), intitulés “Étude d’un radar passif pour le sondage de Ganymède et d’Europe” [Taupin, 2018] et “Passive Probing Galilean Moons” [Gassot et al., 2021]. Comme pour l’étude de 2012, la principale difficulté rencontrée réside dans les usages instrumentaux différents entre les communautés “radio” et “radar”. L’évaluation des performances de ce type de mesure nécessite de bien connaître les données utilisées dans les modèles de mesure. Pour les émissions radio de Jupiter, il existe plusieurs collections de données d’intérêt: les données de l’instrument Voyager/PRA (Planetary Radio Astronomy), celles de Cassini/RPWS lors de son survol de Jupiter, les données enregistrées au sol dans la gamme décimétrique (par exemple à Nançay avec le Réseau Décimétrique, ou *Nançay Decameter Array*) et les données de l’instrument Juno/Waves. Si on compare les performances instrumentales et les distances d’observations de ces instruments, on constate que le jeu de données Cassini/RPWS est le plus sensible (voir Figure 5.1) à 10 MHz, la fréquence d’opération de JUICE/RIME.

Publications associées — Cecconi et al. [2010, 2012, 2015a], Kasaba et al. [2016], Fischer et al. [2017], Kumamoto et al. [2017], Cecconi et al. [2021b], Fischer et al. [2021], Gassot et al. [2021]
Stage (encadrement) — Gary Quinsac (2013, LESIA)
Stage (accompagnement) — Quentin Taupin (2018, IPAG); Oriane Gassot (2021, IPAG)

5.2 Nouveaux Récepteurs

Lors de la préparation de la proposition instrumentale pour la mission Juno, le LESIA s’était positionné pour fournir un récepteur radio, comme on l’avait fait précédemment pour la mission Cassini. Pour des raisons programmatiques et stratégiques coté agences spatiales, cette contribution n’a pas pu voir le jour. Ensuite, pour la mission JUICE, il est apparu que l’équipe radio du LESIA n’avait pas de forces disponibles pour s’impliquer dans une fourniture instrumentale, à cause des développements alors en cours pour les missions Bepi-Colombo (maintenant en route pour Mercure), et Solar Orbiter (lancée en 2020). Le fait de n’avoir pu fournir d’instrument

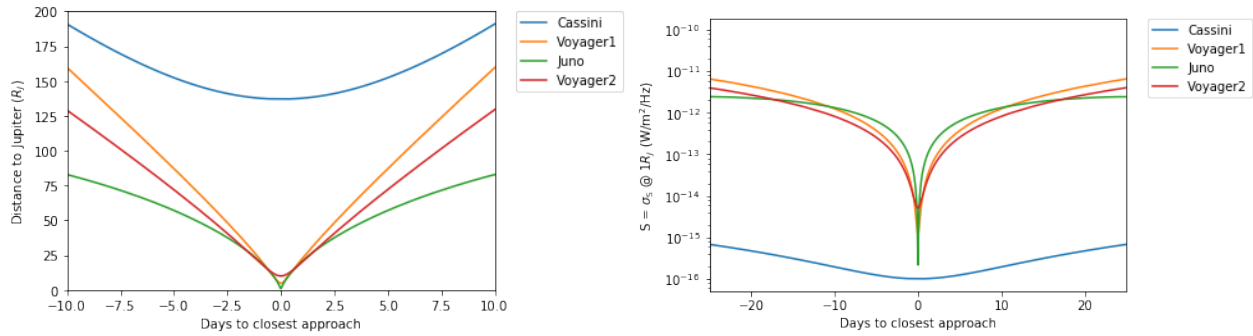


FIG. 5.1 – *A gauche: Distance de sondes Voyager, Cassini et Juno sur un intervalle de 20 jours autour de leur survol de Jupiter (pour Juno, le périjove du 19 mai 2017). A droite, la sensibilité à 10 MHz pour chaque instrument. La sensibilité est définie comme la puissance spectrale du bruit (récepteur ou ciel, selon le bruit limitant pour l'instrument) divisée par $\sqrt{\delta f \cdot \delta t}$ où δf and δt sont les bandes passantes spectrales et temps d'intégration typique pour l'instrument. Cette valeur est une estimation de l'amplitude des fluctuations de la mesure pour un signal à la limite de détection.*

pour Juno, puis JUICE (et aussi pour la sonde NASA Parker-Solar-Probe) a laissé la place à d'autres équipes (Uppsala en Suède, Berkeley en Californie) qui ont développé des instruments radio sur de nouvelles technologies.

Avec Moustapha Dekkali, ingénieur de recherche CNRS au LESIA, nous avons donc décidé de lancer un programme de recherche instrumentale pour d'abord tenter de rattraper le retard, mais surtout pour inventer de nouvelles architectures innovantes permettant de mieux répondre aux besoins des équipes scientifiques. Nous avons commencé en 2012, avec un stage en collaboration avec le L2E (Laboratoire d'électronique et électromagnétisme, de Sorbonne Université). Pendant ce stage, Hassan Awadin a étudié et comparé plusieurs architectures de récepteurs radio hétérodynes. Avec l'impulsion initiale de Milan Maksimovic, nous avons ensuite lancé une collaboration avec l'équipe C2S (Circuits et Systèmes de Communication) du département COMELEC (Communication et Electronique) de TelecomParisTech. Cette collaboration a permis de mener plusieurs études. Le stage de Mathilde Dupart (Stage de Master, Technical Universität München) a permis de développer un prototype d'analyseur rapide embarqué (sur FPGA – Field Programmable Gate Arrays – des puces programmables permettant d'implémenter des fonctions de calculs dédiés et optimisés) pour l'analyse de spectres radio basse fréquence, en particulier pour la détection de la raie plasma (voir section 3.2). Cette étude a été une étape importante pour le projet CIRCUS (*Characterization of the Ionosphere using a Radio receiver on a CUbeSat*), un projet de nanosatellite pour l'étude de l'ionosphère avec un récepteur radio embarqué. Avec le soutien du CNES et du Labex ESEP, nous avons lancé l'étude et la conception de nouvelles architectures pour des instruments radio spatiaux: la R&T STAR (Stacked ADC Receiver) [Mohellebi et al., 2014] et co-encadrement de la thèse de Yosra Gargouri sur l'échantillonnage comprimé appliqué à la radio astronomie spatiale basses fréquences [Gargouri et al., 2016a,b, Gargouri, 2017].

Enfin, depuis 2018, une nouvelle action de R&T CNES a été lancée au LESIA : le projet PERLS — *Plateforme d'Etude Radio-Logicielle Spatiale* — dont Moustapha Dekkali est le responsable technique et je suis le responsable scientifique. Ce projet a pour objectif de concevoir une plateforme de développement de récepteurs radio configurables et modulaires, en utilisant les technologies radio-logicielles. Cette architecture permet d'avoir à disposition toute une série de bibliothèques logicielles dédiées et optimisées pour les applications spatiales de radio astronomie: décimateur, transformée de Fourier, transformées en ondelettes, corrélateur, forme d'onde...

Publications associées — Mohellebi et al. [2014], Gargouri et al. [2016a,b], Gargouri [2017]

Thèse (encadrement) — Yosra Gargouri (2017, CNES-TelecomParistech-ObsParis)

Post-Doc (encadrement) — Reda Mohellebi (CNES-TelecomParistech-ObsParis-ESEP)

Stage (accompagnement) — Hassan Awadin (2012, LESIA-L2E); Mathilde Dupard (2015, TelecomParistech)

Projets — STAR (CNES R&T); PERLS (CNES R&T)

5.3 Nouvelles Plateformes

L'innovation que l'on doit à mes développements sur la goniopolarimétrie fait qu'il est maintenant possible de "voir" la radio: on peut construire des films des sources radios, au lieu des classiques spectres dynamiques (diagramme où l'intensité est tracée en fonction du temps et de la fréquence) [Cecconi, 2009]. Cela permet de mieux comprendre ce qui est observé et facilite aussi l'accès à ces données par des chercheurs non spécialistes de l'instrumentation en radioastronomie. Les développements instrumentaux que je mène actuellement visent permettre à terme de passer à l'étape suivante: une véritable imagerie par interférométrie ou formation de faisceau.

A partir de 2014, j'ai approché les équipes néerlandaises du projet OLFAR (Orbiting Low Frequency Array), en particulier celle de l'Université de Nijmegen, avec qui nous avons obtenu un financement sur le programme PHC Van Gogh. Lors de mon mandat au groupe SHM (groupe de travail *Soleil, Héliophère, Magnétosphères* du CNES), j'ai participé à l'organisation de plusieurs ateliers sur les nanosatellites, en défendant l'idée que la plateforme nanosat pouvait être une plateforme scientifique adaptée pour certains types d'instruments, indépendamment des programmes de formation nanosat-étudiants. C'est sur cette ligne que j'ai mené l'étude NOIRE (*Nanosatellites pour un Observatoire Interférométrique Radio dans l'Espace*) avec le groupe PASO (Plateforme Architecture des Systèmes Orbitaux) du CNES, afin d'étudier la faisabilité d'un essaim de nanosatellites pour un interféromètre radio basses fréquences. Pour cette étude, nous avons fait des choix ambitieux sur l'architecture de l'essaim: homogénéité (tous les noeuds de l'essaim sont identiques), positionnement autonome (l'essaim ne doit pas dépendre d'un système de positionnement externe), "low-control" (pas de contrôle fort des configurations géométriques ou orbitales, mais connaissance de celles-ci, par des mesures), etc. Les résultats de cette étude sont très encourageants et ont été publiés [Cecconi et al., 2018a]. Ils ont démontré l'intérêt de ce concept en appelant à des études approfondies, en particulier sur la capacité à orienter l'essaim dans un référentiel inertiel (par exemple J2000), mais aussi sur la capacité de reconstruire la conformation géométrique de l'essaim, par exemple. Les aspects liés aux fonctions systèmes (communication, puissance, calcul, stockage, lien bord-sol, etc.) ont été ébauchés lors de l'étude PASO, mais beaucoup reste à faire pour arriver à un concept opérationnel.

C'est en partie grâce à ces implications que j'ai été approché par deux équipes américaines (Univ. Michigan et Univ. Californie-Berkeley) lors du dernier appel d'offre NASA pour des projets d'interféromètres radio spatiaux. J'ai choisi de participer au projet SunRISE (Univ. Michigan) et celui-ci a été très récemment sélectionné. Je compte sur ces collaborations (USA et Pays Bas) et sur les résultats de l'étude NOIRE pour lancer un grand projet international qui permettra à terme de construire un tel instrument.

En 2021, j'ai encadré un stage de fin d'études d'un étudiant de l'ISAE-SupAéro (Erwan Rouillé), sur la faisabilité d'un "Radio Star-tracker" sur une plateforme distribuée de type NOIRE. Les résultats du stage, effectué en collaboration avec le centre spatial universitaire de l'Observatoire de Paris (CENSUS – *CEntre pour les Nanosatellites en Sciences de l'UniverS*), sont très prometteurs et ont permis d'explorer les différentes méthodes d'imageries applicables sur ce type de plateforme.

Publications associées — Boonstra et al. [2015, 2016], Cecconi et al. [2018a], Chen et al. [2019], Hegedus et al. [2020], Prinsloo et al. [2017], Yan et al. [2017]

Stage (encadrement) — Erwan Rouillé (2021, ISAE-SupAéro/ENS-Cachan)

Projets — PHC-VanGogh (2014); Etude NOIRE CNES/PASO (2016–2018); SunRISE (2018–)

Chapitre 6

Instrumentation logicielle, outils et base de données

Jusqu'à récemment, les caractéristiques des données produites par les instruments radio sol ou spatiaux étaient directement liées aux performances des instruments. La résolution temporelle ou spectrale, le bruit de mesure, etc., étaient fixés par des contraintes instrumentales physiques (limitation des capteurs ou des échantillonneurs). On peut maintenant produire des données numériques de très bas niveau, en réduisant au minimum la section analogique de la chaîne instrumentale. Typiquement, alors qu'on fabriquait classiquement des instruments radio avec des filtres analogiques et des mélangeurs radio-fréquences, on déporte maintenant ces fonctions dans la partie numérique des instruments, après une phase de numérisation à haute cadence. C'est ce qu'on appelle la radio-logicielle. Ces instruments peuvent ainsi produire des quantités de données "astronomiques" et on se retrouve à devoir "décider" sur ce que l'on veut (ou peut) garder de ces flux de données. Les caractéristiques des produits de données sont alors définies par des décisions et des paramètres d'un logiciel qui réduit le flux de données brutes. C'est déjà la situation de l'instrumentation spatiale, où des contraintes spécifiques (masse, consommation électrique, débit de données) vont limiter les performances de mesures. C'est aussi flagrant pour SKA (Square Kilometre Array) [Scaife, 2020], dont le corrélateur produira jusqu'à ~ 500 To/s de données en temps réel. Mais cette problématique est aussi présente pour des instruments sols en exploitation, et de taille plus modeste, comme le Réseau Décamétrique de Nançay ou le projet NenuFAR. C'est alors à l'équipe scientifique de définir les performances de la mesure, non plus sur des contraintes physiques matérielles, mais par un compromis sur les capacités de traitement et de stockage. Pour l'instrumentation spatiale, les agences demandent aux équipes de produire une documentation projet qui décrit la manière dont la science est traitée avec ces contraintes, comment les mesures répondent aux objectifs scientifiques, ou comment les données produites et archivées pourront être réutilisées. Pour les projets non-spatiaux, ces problématiques étaient pour l'instant réduites au minimum. Depuis quelques années, les lauréats de projets européens doivent rédiger des plans de gestion de données. La problématique des agences de financement est claire: l'investissement est tel qu'elles tentent de s'assurer de cette manière que les produits seront valorisés, accessibles et réutilisables. C'est dans ce contexte que le terme "FAIR" (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) est apparu [Wilkinson et al., 2016].

Pour la radioastronomie basses fréquences, la problématique devient criante. Il faut donc inventer de nouveaux outils et adapter nos manières de concevoir et développer nos projets. Dans cette partie, deux grandes actions sont décrites: le projet MASER (Mesures, Analyse et Simulation d'Emissions Radio), et les développements autour du Centre de Données du projet NenuFAR.

6.1 MASER, une boîte à outil pour la radioastronomie basses fréquences

L'archivage et la valorisation des données scientifiques sont des étapes essentielles de leur "cycle de vie". De la même manière que l'on décide de développer un outil d'observation (par exemple un instrument de mesure sur une mission spatiale), on développe des outils logiciels pour permettre la découverte et l'analyse de données fournies par différentes équipes. La comparaison entre un système de mesure physique et un "observatoire virtuel" va même plus loin: une fois les données enregistrées, il faut les comprendre et les analyser, ce qui est

le propre du travail de recherche et ne sera pas remplacé par un instrument dédié. En astronomie, les outils du Centre de Données Astronomiques de Strasbourg (CDS) permettent la fouille de catalogues, de surveys et centres d'archive, grâce à l'infrastructure développée par l'International Virtual Observatory Alliance (IVOA). Les outils du Centre de Données de la Physique des Plasmas (CDPP) permettent le même type d'actions sur les données plasma in-situ et le centre MEDOC (Multi Experiment Data & Operation Center) sur les données spatiales de physique solaire. Pour la radioastronomie basses fréquences, le besoin devient particulièrement fort: d'une part des données sols ou spatiales souvent enregistrées et archivées dans des formats non standards et d'autre part, des volumes de données qui explosent pour les radio observatoires sols.

Je me suis investi dans le développement de ces outils et des standards nécessaires à l'interopérabilité, c'est-à-dire le fait de pouvoir facilement connecter des outils et des bases de données par des interfaces standardisées. La radioastronomie basses fréquences permet d'observer le Soleil (les émissions radio dans la Couronne Solaire et le Vent Solaire), les magnétosphères planétaires (émissions aurorales, ceintures de radiations), les atmosphères planétaires (éclaircs d'orages), le rayonnement galactique, les pulsars et peut-être bientôt les exoplanètes. Il faut donc développer des outils pour les communautés héliophysique, planétaire et astrophysique.

L'infrastructure Europlanet/VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access) [Erard et al., 2014a,b, 2018] est un premier outil développé dans ce sens. Elle permet de partager et découvrir des données scientifiques à partir de critères liés au contexte scientifique de la donnée (couverture temporelle, spectrale ou spatiale, moyen de mesure, objet de la mesure, etc.). Un deuxième outil est le système client-serveur basé sur le protocole *Das2*, développé avec l'Université d'Iowa, qui permet un accès facilité et à résolution adaptative aux données dépendantes du temps. Ces deux outils sont rassemblés dans MASER, qui propose un ensemble cohérent d'outils pour la radioastronomie basse fréquence, ainsi que l'accès aux données à travers ces interfaces. Ce travail se place dans un cadre international, à la croisée de plusieurs alliances d'interopérabilité sur les thématiques astronomie, planétologie et héliophysique.

CDPP

Depuis mon recrutement, je collabore avec le CDPP à travers mon service d'observation CNAP. J'y tiens officiellement un rôle d'expertise radio astronomie pour les jeux du CDPP. Mon rôle a cependant évolué pour devenir un membre à part entière du centre, avec une coloration gestion de la données plus marquée, et une participation au Comité Directeur, en tant que représentant de l'Observatoire de Paris. Mon implication dans différents projets nationaux et internationaux font que mon expertise est écoutée. J'ai ainsi présenté régulièrement les outils du CDPP à des réunions scientifiques et conférences internationales. Le CDPP a mis en place les interfaces interopérables VESPA et HAPI sous mon impulsion. Ces développements sont emblématiques de la méthode que j'applique pour déployer ces réseaux interopérables: je présente le projet, en mettant en avant les avantages méthodologiques et scientifiques; ensuite, avec quelques collègues, nous lançons le développement d'un prototype fonctionnel qui permet de démontrer la pertinence de l'approche; enfin, l'équipe finalise le développement et l'intègre à son outil. Cette méthode qui implique une participation active à l'élaboration d'un premier prototype et qui accompagne les équipes dans l'implémentation finale fonctionne très bien.

Europlanet/VESPA

VESPA est constitué d'un réseau de fournisseurs de données qui partagent des catalogues de données en utilisant un vocabulaire commun. Cela permet de mettre en place un système efficace de découverte de données, en utilisant les éléments du dictionnaire de métadonnées développé par VESPA [Erard et al., 2021]. Ce dictionnaire de métadonnées est composé de mots-clés qui permettent de décrire le contenu d'un objet de données avec des paramètres utiles à la découverte de données à des fins d'analyse scientifique: la couverture temporelle, spatiale ou spectrale, la résolution ou l'échantillonnage sur ses mêmes axes, les conditions d'illumination, la cible d'observation, l'instrument, les paramètres physiques mesurés, le niveau de traitement, les droits d'accès, le format de données utilisé, un lien vers la donnée, etc. Tous les paramètres ne sont pas pertinents pour tous les jeux décrits, mais l'homogénéité des descriptions permet de construire des interfaces de recherche unifiées, facilitant la découverte de données sur des thématiques voisines.

L'infrastructure VESPA utilise les standards de l'IVOA afin d'assurer sa pérennité. Les catalogues de métadonnées sont distribués à travers TAP (Table Access Protocol) [Dowler et al., 2019], qui propose une interface d'interrogation de type base de données relationnelle en utilisant ADQL (Astronomical Data Query Language) [Osuna et al., 2008]. Chaque service est déclaré dans le Registre IVOA (l'annuaire des services IVOA), afin que les clients d'interrogations puissent découvrir les services compatibles VESPA. Pour la mise

Nom du service	Serveur	Table	Pays	Statut
HELIO HFC-T3	http://voparis-tap-helio.obspm.fr	hfc1t3.epn_core	France	Opérationnel
Cassini/RPWS	http://voparis-tap-maser.obspm.fr	cassini_rpws.epn_core	France	En test
ExPRES	http://voparis-tap-maser.obspm.fr	expres.epn_core	France	Opérationnel
RadioJOVE	http://voparis-tap-maser.obspm.fr	radiojove.epn_core	France	Projet
STEREO/Waves	http://voparis-tap-maser.obspm.fr	stereo_waves.epn_core	France	En test
Voyager/PRA	http://voparis-tap-maser.obspm.fr	voyager_pra.epn_core	France	Opérationnel
Wind/Waves	http://voparis-tap-maser.obspm.fr	wind_waves.epn_core	France	Opérationnel
NDA	http://vogate.obs-nancay.fr	nda.epn_core	France	Opérationnel
NRH	http://vogate.obs-nancay.fr	nrh.epn_core	France	Prototype
ORFEES	http://vogate.obs-nancay.fr	orfees.epn_core	France	Prototype
AMDA	http://psws-epntap.irap.omp.eu	amdadb.epn_core	France	Opérationnel
Iitate-HF	http://thebe.gp.tohoku.ac.jp	IitateHF.epn_core	Japon	Opérationnel
IPRT/AMATERAS	http://thebe.gp.tohoku.ac.jp	IPRT.epn_core	Japon	Opérationnel
E-Callisto	http://tap.cs.technik.fhnw.ch	ecallisto.epn_core	Suisse	En test
NASA/PDS/PPI	https://vo-pds-ppi.igpp.ucla.edu	—	Etats-Unis	Projet
LOFAR-PL/Jupiter	http://vespa.cbk.waw.pl	—	Pologne	Projet
Kharkov/UTR2	—	—	Ukraine	Projet

TAB. 6.1 – Services de données de radio basses fréquence accessibles dans VESPA.

en œuvre d’un service VESPA, l’équipe recommande d’utiliser une suite logicielle développée par une équipe du German Astronomy Virtual Observatory (GAVO) à l’Université d’Heidelberg: DaCHS (Data Centre Helper Suite) [Demleitner et al., 2014]. Cette suite logicielle propose tous les standards IVOA, y compris l’enregistrement du service dans le Registre global. Nous avons développé plusieurs tutoriels et exemples de services qui permettent à des fournisseurs de données de préparer plus facilement leur service.

Pendant les programmes Europlanet-RI-2020 (2015-2019) et EPN-2024-RI (2020-2024), l’équipe du projet VESPA a organisé chaque année un atelier d’implémentation de service, où des équipes sélectionnées sur appel d’offre viennent apprendre à mettre en place l’interface sur leur catalogue de données. Plusieurs services liés à la radioastronomie y ont été proposés et sont à divers niveaux de développement (voir table 6.1). Cet ensemble de bases de données est diffusé via un protocole de recherche commun à d’autres disciplines voisines, comme la base de données APIS (Auroral Planetary Imaging and Spectroscopy), les bases de données d’observations solaires comme BASS2000 (Base de données Solaire Sol), CLIMSO (Christian Latouche Imageur Solaire), MEDOC ou encore la base AMDA (Automated Multi Dataset Analysis) du CDPP, services qui ont aussi été mis en ligne sur VESPA sous mon impulsion.

Ma contribution à Europlanet/VESPA ne se limite pas à la mise en place de catalogues de données en radio basses fréquences. Au cours des différents programmes Europlanet (Europlanet-RI, EPN2020RI, EPN2024RI), j’ai été l’initiateur de nombreux développements: j’ai fait les études préliminaires, avec Michel Gangloff (CDPP) pour ce qui est devenu le protocole EPN-TAP; j’ai ensuite participé à toutes les étapes de l’élaboration de l’interface EPN-TAP (modélisation des métadonnées, définition du dictionnaire de mot-clef, choix du protocole, etc.); j’ai aussi initié, avec mes collègues de PADC et du CDPP, les ateliers annuels VESPA, où des équipes externes sont invitées pendant une semaine pour apprendre à installer et configurer un service EPN-TAP sur leur base de données; j’ai aussi été l’éditeur d’un numéro spécial dans la revue *Planetary and Space Sciences* en 2018, sur le thème de l’interopérabilité en sciences du système solaire; enfin, j’ai mené une étude pour connecter Europlanet/VESPA à l’infrastructure EOSC (European Open Science Cloud), avec le soutien du projet EOSC-Hub.

Cette dernière étude est une étape majeure pour deux raisons. Elle permet d’abord de montrer que l’on peut déployer sur EOSC des services VESPA, alors que l’usage actuel était de maintenir les services dans les équipes. Les petites équipes, sans service informatique dédié, n’arrivent pas à maintenir ces services sur le long terme. La solution d’hébergement sur EOSC est donc très prometteuse, car elle déporte la maintenance des serveurs à des équipes expertes, et l’équipe scientifique ne garde que la charge de la maintenance du contenu scientifique. Cette étude de déploiement sur EOSC est aussi une étape importante pour l’Observatoire de Paris et PADC, car cela a permis de former des ingénieurs à ce type d’infrastructure distribuée. Ces nouvelles compétences vont devenir de plus en plus utiles, en particulier, dans un avenir immédiat pour le développement du centre de données NenuFAR-DC (voir section dédiée, page 40) mais aussi pour la participation aux futurs centres de traitement SKA (SKA Regional Centres).

Publications associées — André et al. [2018], Erard et al. [2014c,a,b, 2018], Nass et al. [2021], Génot et al. [2014, 2017a,b, 2021], Hughes et al. [2017], Trompet et al. [2017]
Projects — Europlanet-RI (FP7); Europlanet-RI-2020 (H2020); Europlanet-RI-2024 (H2020); VESPA-Cloud (EOSC-Hub Early Adopter programme)

Accès par flux de données à résolution adaptative

Les données en radioastronomie basse fréquence font partie de ce qu'on appelle le “big data” (ou “masses de données”), terme générique et qui recouvre de nombreux cas d'usage: grandes quantités de données; gros volumes de données; données à grande densité; données très hétérogènes, etc. Ici, on couvre plusieurs aspects (nombre de fichiers, taille des fichiers, haute résolution) avec pour conséquence que les données ne peuvent pas être facilement utilisées. Le nombre de fichiers et les durées d'observation des collections (plusieurs décennies) sont les premiers freins. Pour les collections de données plus récentes obtenues par des radio-télescopes au sol (comme NenuFAR ou le NDA), c'est le volume des données (plusieurs To par session d'observation) qui empêche leur transfert pour analyse.

Pour faciliter l'accès à ces collections de données, nous avons sélectionné un outil appelé *das2* [Piker et al., 2019] qui se compose d'un serveur qui diffuse les données commandées par un client (Autoplot, *das2py*, etc.). Dans la requête envoyée par le client, on trouve le paramètre du jeu à tracer, l'intervalle et la résolution temporelle. Le serveur diffuse sa réponse après ré-échantillonnage des données à la résolution voulue. L'avantage est donc d'optimiser la bande passante du réseau pour ne transmettre que les données nécessaires au client pour effectuer le tracé. Cet outil est développé par l'Université d'Iowa, où j'ai effectué mon Post-Doc. Il a été conçu pour faciliter l'accès aux collections radio basses fréquences spatiales de l'équipe. Il était donc parfaitement adapté aux collections MASER. De plus, ce protocole est aussi bien adapté pour les données à haute résolution issues des données radio sol. Un dernier avantage de ce système est la standardisation de l'interface. Le client interroge un serveur qui renvoie des données dans un format connu et dédié à l'affichage. Ainsi, dans le cadre de MASER, on peut diffuser facilement des données stockées dans des formats hétérogènes de manière transparente pour l'utilisateur.

Le couplage du protocole *das2* et du client Autoplot facilite grandement l'analyse des données radio basses fréquences, grâce à la possibilité de se promener dans les données de manière fluide. Suite à cette étude dans le cadre de MASER, cette architecture a été sélectionnée pour la visualisation des données du mode “réseauphasé” de NenuFAR, ou encore pour celle des données Solar Orbiter RPW.

Il existe un autre protocole de diffusion de données dédié aux mesures plasmas in-situ spatiales: le protocole HAPI (Heliophysics API) [Weigel et al., 2021]. Son implémentation est plus facile que celle de *das2* et utilise un format de sortie plus facile à consommer. Cependant, il n'inclut pas la fonctionnalité de ré-échantillonnage à la volée, ce qui exclut son usage pour MASER.

Publications associées — Cecconi et al. [2013b, 2020, 2015b], Piker et al. [2019], Weigel et al. [2021]

Rôle dans les alliances internationales

Je participe à de nombreux projets et consortia pour ces trois communautés:

- pour l'héliophysique: le CDP, le programme européen FP7 Heliophysics Integrated Observatory (HELIO), le projet H2020 LOFAR4SW (LOFAR for Space Weather), le consortium international SPASE (Space Physics Archive Search and Extract), l'alliance IHDEA (International Heliophysics Data Environment Alliance, où je représente l'Observatoire de Paris) et ma participation au groupe de travail RDA “Research Metadata Schemas” pour le mapping du modèle SPASE;
- pour la planétologie: l'International Planetary Data Alliance (IPDA), où je représente le CNES à son comité de pilotage, les équipes de l'archive NASA/PDS (Planetary Data System) et en particulier son nœud Planetary Plasma Interactions (PDS/PPI), et surtout le projet Europlanet/VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access);
- enfin pour l'astronomie: l'IVOA où je coordonne le groupe “Solar System Interest Group”, et participe aux groupes de travail “Semantics”, “Radioastronomy Interest Group” “Time Domain Interest Group”.

Publications associées — Arviset et al. [2015], Bonnin et al. [2014], Génot et al. [2010], Louys et al. [2015a,b], Pérez-Suárez et al. [2012], Preite-Martinez et al. [2021], Roberts et al. [2018]
Standards — EPN-TAP [Erard et al., 2021]; UCD-List [Cecconi et al., 2021]; HAPI [Weigel et al., 2021]

Catalogues d'Événements Radio Basse Fréquence

Depuis l'époque de la mission Voyager, les équipes scientifiques ont répertorié les émissions radio de Jupiter dans des catalogues publiés, en particulier dans la revue *Astronomy & Astrophysics*, par Leblanc et al. [1981, 1983, 1989b,a, 1990, 1993], et plus récemment par Marques et al. [2017]. D'autres catalogues d'émissions radio solaires (comme celui diffusé par le HELIO Feature Catalogue), ou planétaires sont disponibles, mais sans effort de standardisation, ce qui rend leurs ré-analyse plus complexe.

Avec l'équipe MASER, j'ai récemment proposé un format unifié pour décrire et diffuser ces catalogues. Les événements décrits dans ces catalogues sont essentiellement des géométries (polygones) dans le plan spectro-temporel. Chaque polygone correspond à un événement identifié, et est souvent associé à des métadonnées d'observations (contextuelles ou interprétatives). Après une étude des différentes solutions, nous avons choisi d'adapter un format de catalogue de géométrie développé pour l'observation de la Terre: le format GeoJSON. A la définition des coordonnées près (spectro-temporelles, au lieu de géographique), le format est bien adapté, et est compatible avec un écosystème de bibliothèques logicielles bien développé. La spécification TFCat (Time-Frequency Catalogue) [Cecconi et al., 2021] est disponible avec une bibliothèque Python qui permet d'écrire et lire ces catalogues. Plusieurs catalogues ont déjà été publiés en 2021 avec ce format [Cecconi et al., 2021a, Louis et al., 2021, Taubenschuss et al., 2021a, Wu et al., 2021b] en tant que *supplementary material* et sont disponibles à travers le service MASER.

Publications associées — Marques et al. [2017], Cecconi et al. [2021], Cecconi et al. [2021a], Louis et al. [2021], Taubenschuss et al. [2021a], Wu et al. [2021b]
Standards — TFCat [Cecconi et al., 2021]

Radio-Archéologie

Malgré la relative courte histoire de la Radioastronomie, les jeux de données anciens sont déjà en péril. La documentation de ces jeux est souvent lacunaire voire inexistante ou perdue. Les métadonnées sont très limitées et se restreignent à un contexte technique du support physique de la donnée au lieu du contexte de la mesure elle-même. J'ai travaillé sur la restauration de trois jeux données que je qualifie d'ancien: projet ISEE3-Reboot, Voyager-PRA et Film 35mm du Réseau Décamétrique de Nançay (NDA).

ISEE3-Reboot

La sonde ISEE3 (International Sun-Earth Explorer 3), lancée en 1978 par la NASA est dédiée à l'étude de l'interaction du vent solaire avec la magnétosphère terrestre. Elle embarque un instrument radio, Radio Mapping Experiment, nommé SBH et fabriqué au DESPA (Département de Recherches Spatiales, devenu aujourd'hui le LESIA). La mission est reprogrammée en 1982 pour rejoindre la comète de Giacobini-Zinner en 1986. Elle est alors rebaptisée ICE (International Cometary Explorer). ICE produit les premières mesures effectuées dans la queue d'une comète. La mission est officiellement terminée en 1997.

Placée en orbite autour du Soleil, la sonde spatiale ISEE3/ICE continue son périple jusqu'en 2014, où sa trajectoire croise à nouveau celle de la Terre. La Space College Foundation obtient le droit de tenter de reprendre le contrôle de la sonde pour en faire une plateforme dédiée à l'astronomie amateur. Le projet s'appelle ISEE3-Reboot. L'équipe parvient à reprendre le contrôle de la sonde et récupère les données produites par les instruments encore en fonctionnement. L'instrument SBH en fait partie. Avec l'aide de Sang Hoang (chercheur retraité), et de Gérard Epstein et René Knoll (ingénieurs retraités), nous avons pu fournir à l'équipe ISEE3-Reboot les informations nécessaires à reprogrammer l'instrument SBH et ainsi pouvoir interpréter les paquets de télémessures associés à cet instrument. L'équipe ISEE3-Reboot n'a malheureusement pas pu activer les propulseurs pour mettre la sonde en orbite terrestre. La sonde est repartie sur une orbite qui croisera à nouveau l'orbite de notre planète en 2029.

La documentation nécessaire à la décommutation des données n'était plus au laboratoire, mais Gérard Epstein en avait gardé une copie dans ses archives personnelles. Elles ont maintenant été versées aux archives

de l’Observatoire. L’analyse des données SBH reçues lors de ce survol de quelques semaines n’est pas encore finalisée. Il apparaît que l’instrument n’était pas synchronisé correctement avec le multiplexeur de bord. La documentation permettant de modifier ce mode instrumental n’a pas été retrouvée, ni au laboratoire, ni dans les archives de la NASA. Le mode de balayage spectral spécifique de l’instrument (pseudo-aléatoire, pour mieux échantillonner les hautes fréquences) rend la tâche encore plus difficile. Le travail est en cours.

Voyager/PRA

En préparation de projets d’exploration des planètes géantes (mission JUICE, mais aussi projets de missions vers Neptune et Uranus), j’ai commencé une ré-analyse des données de l’instrument Voyager PRA (Planetary Radio Astronomy). L’objectif est de produire des mesures en flux et en polarisation à partir des archives disponibles. Cette tâche a été initiée suite à une demande du CNES qui cherchait à valoriser les jeux de données “orphelines” (des collections archivées, mais avec une documentation lacunaire).

Une première étape du travail a été le décodage des données. La documentation disponible au CNES n’était pas suffisante. Grâce à Fran Bagenal, chercheuse au LASP, Boulder, Colorado, j’ai pu entrer en contact avec Doc Evans, ingénieur à la retraite, qui avait participé à la conception de l’instrument dans les années 1970. Il m’a envoyé une copie d’un document de travail qu’il gardait chez lui et qui rassemblait toutes les informations nécessaires au décodage des paquets de données. Un travail préliminaire a été publié [Cecconi et al., 2017e]. Cette publication décrit les méthodes d’inversion à mettre en œuvre sur ces données. Mais une étude approfondie (menée grâce aux outils sélectionnés pour MASER) a finalement montré que ces données manquaient de fiabilité, avec des erreurs de datation dans les paquets de données brutes. Depuis, nous avons retrouvé une version plus fiable de ce jeu de données au NSSDC (archive NASA Space Science Data Center). Avant de pouvoir produire un jeu dérivé en flux et en polarisation, il faut reprendre les étalonnages des antennes de l’instrument.

Données NDA 35mm

Le réseau décimétrique de Nançay (NDA) observe de façon quasi-continue les émissions radio basse fréquence de la couronne solaire et de Jupiter (et occasionnellement d’autres sources radio intenses) dans la gamme spectrale 10-100 MHz depuis 1977 [Boischot et al., 1980, Lecacheux, 2000, Lamy et al., 2017]. Au cours de la décennie précédente, des observations décimétriques avaient déjà été réalisées à l’aide d’un interféromètre (Interféromètre Décimétrique de Nançay, NDI) composé d’une paire d’antennes Yagi log-périodiques. Ces observations ont été acquises avec une série de récepteurs, analogiques avant 1990 et numériques après 1990. Les données analogiques étaient enregistrées sur divers supports, dont des rouleaux de films 35 mm, que l’on a retrouvés dans les salles d’archives du LESIA en 2016. Sous la direction de L. Lamy, une action de numérisation des ~ 30 km de films a été réalisée.

Ma participation à ce projet a été de définir les formats de données, et d’encadrer la qualité des numérisations (métadonnées, échantillonnage, gamme dynamique, continuité des clichés, etc.). Le jeu numérisé (au format TIFF, pour les images brutes) est à la disposition de la communauté, mais il reste encore un gros travail de mise en forme pour produire un jeu de données facilement exploitable.

Publications associées — Cecconi et al. [2017e, 2018c], Cecconi et al. [2021], Lamy et al. [2017]

Stage (encadrement) — A. Pruvot (2015, M1)

Projets — Voyager/PRA ; ISEE3-Reboot ; NDA-35mm

6.2 NenuFAR et son Centre de Données

L’instrument NenuFAR (New Extension in Nançay Upgrading LOFAR) est un réseau compact géant avec autant d’antennes basse fréquence à Nançay que dans l’ensemble de LOFAR (~ 2000 antennes, divisées en 102 mini-réseaux de 19 antennes), optimisé pour couvrir la gamme 10-85 MHz avec une sensibilité 2 à 8 fois supérieure à LOFAR, tout en étant compatible avec LOFAR (les signaux peuvent être corrélés, NenuFAR jouant le rôle d’une super-station LOFAR). En mode autonome, la très haute sensibilité instantanée de NenuFAR lui permet d’aborder de manière innovante une quinzaine de thèmes scientifiques, de la détection du signal cosmologique de l’aube cosmique aux émissions radio des exoplanètes. En mode super-station, NenuFAR améliorera significativement la sensibilité de LOFAR pour l’imagerie basse fréquence à haute résolution angulaire.

NenuFAR a été labellisé conjointement avec LOFAR “Infrastructure de recherche” du MESRI, et a été officiellement labellisé “éclaireur” par le SKA Office. Il s’agit d’un instrument original, de classe mondiale, avec un fort potentiel d’impact international, car il sera à terme l’instrument le plus sensible au monde dans sa gamme de fréquences (même à l’avènement du SKA, NenuFAR restera unique dans la gamme 10-50 MHz, et complémentaire en termes de fréquences et d’hémisphère sur toute sa gamme). En plus de ses propres objectifs scientifiques, distincts et complémentaires de ceux de LOFAR et SKA, la mission de NenuFAR est de préparer la communauté radio nationale à une exploitation optimale de SKA.

NenuFAR est actuellement en phase de recette instrumentale, avec un quinzaine de projets clés qui couvrent les objectifs scientifiques de l’instrument, et qui permettent de le tester dans toutes les conditions d’observation. Les premiers résultats scientifiques commencent à être publiés. Cette phase doit se terminer en 2022, et sera suivie par une phase d’exploitation, où le temps d’observation sera ouvert sur appel d’offre scientifique. À l’ouverture de la phase actuelle de recette, l’équipe NenuFAR m’a demandé de concevoir un centre de données pour l’instrument. La première étape a été de jeter les bases de son plan gestion de données et de rechercher des partenaires et des financements pour sa mise en œuvre.

Les différents modes de fonctionnement de NenuFAR produisent un flux massif de données. Le volume des données brutes (niveau 0 ou L0) peut dépasser 10 To/jour, soit plusieurs Po/an. Elles doivent être réduites localement au Centre de Données de Nançay (CDN), pour obtenir des données de niveau L1 (données réduites, ou de niveau 1), d’un volume de ~ 1 PB/an. Ces données ne peuvent pas être stockées à Nançay sur le long terme, car le Centre de Données de Nançay dispose d’une capacité de stockage tampon de ~ 3 PB pour le traitement et la réduction des données L0. Les équipes des projets clés construisent actuellement leurs outils et méthodes de réduction de données adaptées à leurs objectifs scientifiques. Ils les consignent dans le plan de gestion de données, qui permet de bien prévoir le cycle de vie de leurs données (y compris les conditions d’effacement des données L0), de préparer des traitements plus automatisés et de prévoir leurs besoins en stockage et en calcul. L’équipe du CDN se sert de ce document pour fournir un service adapté aux besoins actuels des équipes, et qui suivra leur évolution.

Le stockage et le post-traitement des données s’échelonnent en deux phases. Dans la première phase (~ 3 ans), les données L1 seront transférées à l’Observatoire de Paris (site de Meudon), où les premières données NenuFAR seront hébergées en attendant la mise en place du centre de données NenuFAR (NenuFAR-DC). L’espace de stockage à Meudon est physiquement co-localisé avec de puissantes infrastructures de traitement (le mésocentre *Meso-PSL*, et la grappe de calcul *Tycho*) auxquelles NenuFAR aura accès. Des tests de déploiement de containers logiciels (utilisant la technologie *Singularity*) ont été réalisés et ont montré l’intérêt de cette solution: on peut déployer à la demande un environnement logiciel adapté au traitement des données NenuFAR à Nançay, à Meudon (MesoPSL et Tycho), ainsi que sur le super-calculateur Jean-Zay à l’IDRIS. Cette possibilité de déployer un même environnement à la demande, et sur des infrastructures numériques hétérogènes, est un premier pas vers la mise en place d’un centre de calcul distribué. Cette étude a été menée en collaboration avec GENCI et l’INRIA, sous l’égide de la Maison-SKA-France. A l’échelle européenne, nous travaillons en étroite collaboration avec LOFAR, par une participation “externe” (non-financée) au projet H2020-EOSC ESCAPE.

En parallèle, NenuFAR-DC est en préparation, en collaboration avec le BRGM (Bureau des Ressources Géologiques et Minières) à Orléans, qui hébergera le centre. NenuFAR-DC sera construit sur des concepts de type “cloud” (Infrastructure as a Service, IaaS, et Platform as a Service, PaaS). Il est l’un des rares précurseurs grandeur nature d’un centre de traitement SKA actuellement à l’étude dans le monde, et le seul en France. Cette solution devrait être opérationnelle à la fin de l’année 2022.

La figure 6.1 présente l’architecture prévue pour NenuFAR-DC. Dans la partie haute de cette figure, le flot de données (L0: données brutes; et L1: données réduites) va de l’instrument (à gauche) jusqu’au centre de données NenuFAR-DC (à droite). Pour les traitements ultérieurs (L2: données traitées et dérivées), les utilisateurs auront différents moyens de calculs à leur disposition: au sein de NenuFAR-DC, avec des environnements virtuels dédiés, ou bien sur des centres de calcul distants, où les données devront être pré-téléchargées, selon des directives déduites du plan de gestion de données. L’accès et le déplacement des données seront gérés à travers une infrastructure de gestion de données distribuées, et l’authentification des utilisateurs se fera à travers une infrastructure de gestion des autorisations et des authentifications (comme eduTEAMS, proposé par GÉANT, que nous utilisons déjà pour les services VESPA). Dans cette architecture, on pourra ajouter des centres de stockage froid (sur bande magnétique), qui permettront de renforcer le centre de données et de réduire les risques de perte de données. Cette infrastructure composée de plusieurs centres possiblement hétérogènes est appelée “Datalake”. Elle est rendue nécessaire par les volumétries des jeux de données, et imposera des changements de méthodes de travail pour l’analyse et le traitement des données.

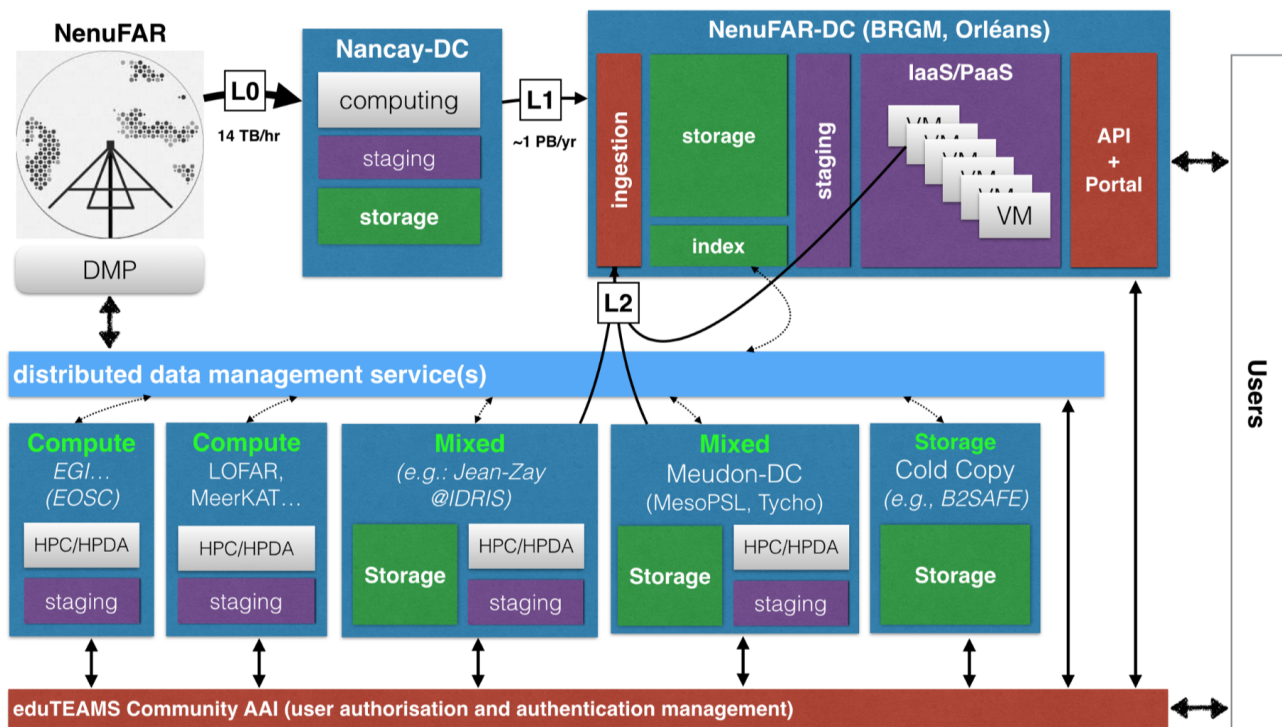


FIG. 6.1 – NenuFAR Datalake. Architecture de stockage et de traitements distribués pour NenuFAR. Le flux de données de NenuFAR vers NenuFAR-DC est géré dans le document DMP (Data Management Plan). Les utilisateurs ont accès aux ressources nécessaires au traitement de leur produit de données conformément au DMP et à l'accord avec les fournisseurs de services. L'authentification des utilisateurs, l'autorisation et l'accès aux ressources sont gérés par un AAI communautaire (par le biais d'eduTEAMS, un service fourni par GÉANT). Les ressources informatiques seront accessibles via NenuFAR-DC. Le datalake est composé de différents types de ressources (calcul seul, stockage et calcul, ou stockage seul), couvrant tous les besoins du projet.

<p>Publications associées — Agar et al. [2021], Bondonneau et al. [2021], Bonnassieux et al. [2021], Carley et al. [2021], Tiburzi et al. [2021], Turner et al. [2021]</p> <p>Projets — NenuFAR; LOFAR; H2020-ESCAPE; SKA</p>

Chapitre 7

Perspectives

Dans un avenir immédiat, mon activité scientifique va se répartir sur trois grands projets: la préparation de JUICE (avec la mise en place du segment sol pour l'instrument JENRAGE, la préparation des modes d'observations de l'instrument, et l'encadrement de la thèse de Claire Baskevitch); l'instrument NenuFAR (à la fois avec l'analyse des données qu'il produit, mais surtout pour la conception et le déploiement du centre de données NenuFAR); et enfin la poursuite des études autour du projet NOIRE, avec une thèse sur le sujet qui commencerait en 2022.

7.1 Planètes Géantes

La mission JUICE devrait être lancée en 2023, pour une arrivée en 2030. Les antennes radio RWI de l'instrument JENRAGE vont être déployées pendant la phase de recette en vol, juste après le lancement (Near Earth Commissioning Phase — NECP). Ensuite, il est prévu d'effectuer plusieurs étalonnage en vol de ces antennes, lors des survols de la Terre, pendant le transfert orbital vers Jupiter, et lors de l'approche de la planète géante. Les outils nécessaires à la réception et l'analyse des données doivent donc être prêts dès 2023. Il faut à la fois préparer les outils d'analyse goniopolarimétrique, mais aussi ceux qui permettront de sonder passivement l'ionosphère des lunes de Jupiter (tracé de rayon, et inversion du profil d'occultation), ou ceux dédiés aux études en mode "radar passif", qui sont nouveaux et qui demanderont une interaction forte avec des équipes dont c'est la spécialité, à l'IPAG (Grenoble), par exemple.

Je souhaite aussi revenir sur les données enregistrées par la sonde Cassini. Les études déjà publiées sur les diagrammes d'émission et de la polarisation du rayonnement kilométrique de Saturne ne couvrent pas toutes les données, en particulier les données enregistrées lors des dernières orbites, très inclinées, qui ont permis de s'approcher au plus près des sources radio de Saturne. À la suite de la réhabilitation des données Voyager/PRA que j'ai effectuée, on pourra étendre sur une année kronienne (29 ans) les études sur la périodicité du rayonnement kilométrique de Saturne.

A plus long terme, une mission conjointe NASA/ESA d'exploration de la planète Uranus semble se profiler. Avec Laurent Lamy, nous militons depuis plusieurs années pour que la charge utile d'une telle mission embarque un instrument radio basse fréquence. Une coordination préalable à l'ouverture d'un appel d'offre instrumental est nécessaire, afin de maximiser nos chances. Un récepteur radio dérivé de l'étude PERLS serait parfaitement adapté à l'enjeu.

7.2 NenuFAR et SKA

L'instrument NenuFAR devrait entrer en phase d'opération officielle courant 2022. Pour cela le centre de données NenuFAR-DC doit être prêt, afin de fournir une infrastructure d'accès et de calcul aux équipes qui seront sélectionnées sur appels d'offres scientifiques. Le travail de prototypage devait commencer en 2021, mais a été retardé. Le projet doit démarrer au plus vite avec le BRGM et l'Observatoire de Paris. Les travaux en cours dans le groupe de travail "Archive" du *SKA Regional Centre Steering Committee* visent à définir les exigences techniques applicables aux futurs *SKA Regional Centres*. La mise en œuvre de NenuFAR-DC sera l'occasion d'un test grandeur nature de ces travaux. Enfin, dans la foulée du programme Européen LOFAR4SW (*LOFAR for Space Weather*), une opportunité semble s'ouvrir pour développer une infrastructure distribuée

dédiée à la radio astronomie sol en Europe (autour de LOFAR4SW, des stations internationales de LOFAR, et de NenuFAR). Cela permettrait de financer et possiblement de pérenniser ce que nous voulons développer autour de NenuFAR.

7.3 Interférométrie Spatiale

Enfin, l'interférométrie radio astronomique spatiale n'en est qu'à ses débuts. Le projet NOIRE va continuer de vivre, avec une thèse qui commencerait en 2022. La mission NASA SunRISE devrait rapidement apporter un souffle nouveau sur la thématique instrumentale, avec des images des émissions radio solaires, mais aussi une cartographie du rayonnement galactique aux très basses fréquences. A moyen terme, l'ESA a mis en priorité le déploiement d'un observatoire radio sur la face cachée de la Lune dans son programme EL3 (ESA Large Lunar Lander). La troisième mission de ce programme devrait embarquer un réseau interférométrique radio basse fréquence deployable (projet ALO — Astronomy Lunar Observatory), dont l'étude est actuellement menée par nos collègues du Radboud Radio Lab (RRL) de l'Université de Nijmegen, aux Pays Bas. L'étude de phase A/B1 (études préparatoires, développements technologiques, dans le but d'obtenir une sélection de la mission) serait menée par le RRL, en étroite collaboration avec l'équipe de Meudon que je mène pour la partie scientifique, et Moustapha Dekkali pour la partie technique.

Il faut aussi poursuivre les études de R&D pour concevoir les récepteurs radio du futur, si on veut espérer voir un jour un instrument de type NOIRE. Avec la miniaturisation des récepteurs actuels, l'imagerie interférométrique spatiale semble accessible. En décembre 2021, une collaboration entre le LESIA, le LUPM (Laboratoire Univers et Particules de Montpellier), le CSUM (Centre Spatial Universitaire de Montpellier) et CENSUS a été initiée et devrait aboutir à la conception de plateformes nanosatellites adaptées à la radio astronomie (c'est-à-dire compatibles avec des mesures radio basses fréquences). Avec ce type de plateforme et d'instrumentation, la cartographie du ciel radio aux basses fréquences (jusqu'à quelques centaines de kHz) fournira de nouvelles mesures de la répartition de la matière dans notre Galaxie. Cette carte de l'arrière-plan du ciel permettra d'améliorer les observations radio goniopolarimétriques (passées et futures) à travers un meilleur étalonnage de ces instruments. L'imagerie des sources radio du système solaire (émissions solaires ou planétaires) seront accessibles, y compris pour les planètes les plus lointaines (Uranus et Neptune), qui n'ont pas été observées depuis le passage de la sonde Voyager 2. Cependant, pour les observations les plus difficiles, comme celles du rayonnement fossile des âges sombres de l'Univers, il faudra développer des récepteurs encore plus performants: le signal recherché est une absorption isotrope de quelques dizaines de mK, sur un fond de ciel dont la température de brillance est six ordres grandeurs plus intense. Actuellement, il n'existe pas de récepteur radio spatial suffisamment stable dans le temps pour faire ce type de mesure.

7.4 Outils Logiciels et Bases de Données

Suite à sa récente labellisation, l'activité autour du service MASER va s'accélérer. De nouveaux jeux seront ajoutés régulièrement et mis à disposition de la communauté à travers le service, en particulier les jeux produits au LESIA. Les outils logiciels seront aussi consolidés, avec, par exemple, le développement prévu d'un validateur pour le format TFCat. Le code de tracé de rayon ARTEMIS-P sera aussi mis en ligne sur la même interface que le code ExPRES.

Nous allons aussi chercher à étendre le périmètre de MASER en dehors de son domaine scientifique initial. En effet, d'autres domaines scientifiques utilisent des données radio basses fréquences: l'étude des pulsars, ou des Fast Radio Bursts (FRB) pour l'astronomie; ou encore l'étude des traînées radio de météores. Les outils développés ou sélectionnés dans MASER peuvent aussi être utiles dans ces contextes: l'utilisation du système *das2* pour diffuser les données semble relativement universel; le format TFCat est aussi agnostique en terme scientifique. La coordination du service, ainsi que son comité utilisateur (qui doit être formé en 2022), se positionneront sur ces questions.

Bibliographie

- C. H. Agar, P. Weltevrede, L. Bondonneau, J.-M. Grießmeier, J. W. T. Hessels, W. J. Huang, A. Karastergiou, M. J. Keith, V. I. Kondratiev, J. Künsemöller, D. Li, B. Peng, C. Sobey, B. W. Stappers, C. M. Tan, G. Theureau, H. G. Wang, B. Cecconi, J. N. Girard, A. Loh, and P. Zarka. A broadband radio study of PSR J0250+5854: the slowest-spinning radio pulsar known . *MNRAS*, accepted:1–14, July 2021.
- F. Alibay, A. M. Hegedus, J. C. Kasper, T. J. W. Lazio, and T. Neilsen. SunRISE status: Concept development update. *IEEE Aerospace Conference*, pages 1–4, March 2018. doi: 10.1109/AERO.2018.8396371.
- N. André, M. Grande, N. Achilleos, M. Barthélemy, M. Bouchemit, K. Benson, P. L. Blelly, E. Budnik, S. Caussarieu, B. Cecconi, T. Cook, V. Génot, P. Guio, A. Goutenoir, B. Grison, R. Hueso, M. Indurain, G. H Jones, J. Lilensten, A. Marchaudon, D. Matthiä, A. Opitz, A. Rouillard, I. Stanislawska, J. Soucek, C. Tao, L. Tomasik, and J. vaubaillon. Virtual Planetary Space Weather Services offered by the Europlanet H2020 Research Infrastructure. *Planetary and Space Science*, 150:50–59, 2018.
- Christophe Arviset, Mark Allen, Alessandra Aloisi, Bruce Berriman, Catherine Boisson, B. Cecconi, D. A.vid Ciardi, Janet Evans, Giuseppina Fabbiano, Françoise Genova, Tim Jenness, Bob Mann, Tom McGlynn, William OMullane, Felix Stoehr, and Andrea Zacchi. The VO: A powerful tool for global astronomy . *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 512:65, November 2015.
- S. V. Badman, S. W. H. Cowley, L. Lamy, B. Cecconi, and P. Zarka. Relationship between solar wind corotating interaction regions and the phasing and intensity of Saturn kilometric radiation bursts. *Ann. Geophys.*, 26: 3641–3651, 2008.
- A. Boischot, C. Rosolen, M. G. Aubier, G. Daigne, F. Genova, Y. Leblanc, A. Lecacheux, J. de la Noë, and B. M. Pedersen. A new high-gain, broadband, steerable array to study Jovian decametric emissions. *Icarus*, 43:399–407, 1980.
- Louis Bondonneau, Jean-Mathias Griesmeier, Gilles Theureau, Ismael Cognard, M. Brionne, V. Kondratiev, A. Bilous, J. W. McKee, P. Zarka, C. Dumez-Viou, L. Guillemot, S. Chen, R. Main, M. Pilia, A. Possenti, M. Serylak, G. Shaifullah, C. Tiburzi, Verbiest J P W, Z. Wu, O. Wucknitz, S. Yerin, C. Briand, B. Cecconi, S. Corbel, R. Dallier, J. N Girard, A. Loh, L. Martin, and C Tasse. Pulsars with NenuFAR: backend and pipelines . *Astronomy and Astrophysics*, 652(A34), 2021.
- E. Bonnassieux, E. Tremou, J. N. Girard, A. Loh, V. Vacca, S. Corbel, B. Cecconi, J.-M. Grießmeier, L. V. E. Koopmans, M. Tagger, G. Theureau, and P. Zarka. Pilot study and early results of the Cosmic Filaments and Magnetism Survey with Nenufar: the Coma cluster field. *Galaxies - MDPI*, page under review, November 2021.
- X. Bonnin, N. Fuller, C. Renié, J. Abouadarham, B. Cecconi, R. D Bentley, and A Csillaghy. The Heliophysics Feature Catalogue, A. tool for the study of solar features. In B. Schmieder, J. M Malherbe, and S. T Wu, editors, *Nature of Prominences and their Role in Space Weather*, pages 512–514, 2014.
- Albert-Jan Boonstra, M. A Garrett, Marc Klein-Wolt, P. Zarka, Jingye Yan, Ji Wu, Graham Woan, Michael W Wise, Hanna Rothkaehl, Garrelt Mellema, Leon V Koopmans, Leonid Gurvits, Eberhard Gill, Heino Falcke, B. Cecconi, and Mark Bentum. Long Wavelength Radio Astronomy & Lunar Exploration. In *Moon 2020 - 2030*, pages 1–1, December 2015.
- Albert-Jan Boonstra, Michael Garrett, Gert Kruithof, Michael W Wise, Arnold van Ardenne, Xiaoyu Hong, Tao An, Hanna Rothkaehl, Jingye Yan, Ji Wu, Jianhua Zheng, Heino Falcke, Marc Klein-Wolt, Xuelei Chen, Maohai Huang, Linjie Chen, Eberhard Gill, Jian Guo, Shufan WU, Wen Chen, Leonid Gurvits, Mark Bentum, Leon V Koopmans, P. Zarka, B. Cecconi, J. N Girard, and Hans de Haan. Discovering the Sky at the Longest Wavelengths (DSL). In *IEEE AC 2015*, pages 1–20, January 2016.
- J.-L. Bougeret, K. Goetz, M. L. Kaiser, S. D Bale, P. J. Kellogg, M. Maksimovic, N. Monge, S. J. Monson, P.-L. Astier, S. Davy, M. Dekkali, J. J. Hinze, R. M. Manning, E. Aguilar-Rodriguez, X. Bonnin, C. Briand, I. H.

- Cairns, C. A. Cattell, B., Cecconi, J. P. Eastwood, R. E. Ergun, J. Fainberg, S. Hoang, K. E. J. Huttunen, S. Krucker, A. Lecacheux, R. J. MacDowall, W. Macher, A. Mangeney, C. A. Meetre, X. Moussas, Q.-N. Nguyen, T. H. Oswald, M. Pulupa, M. J. Reiner, P. A. Robinson, H. O. Rucker, C. Salem, O. Santolik, J. Silvis, R. Ullrich, P. Zarka, and I. Zouganelis. S/Waves: The radio and Plasma Wave Investigation on the STEREO Mission. *Space Sci. Rev.*, 1–4(136):487–528, 2008.
- G. Branduardi-Raymont, P. G. Ford, K. C. Hansen, L. Lamy, A. Masters, B. Cecconi, A. J. Coates, M. K. Dougherty, G. R. Gladstone, and P. Zarka. Search for Saturn’s X-ray aurorae at the arrival of a solar wind shock. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118(5):2145–2156, May 2013.
- C. Briand, P. Henri, V. Génot, N. Lormant, N. Dufour, B. Cecconi, Q-N Nguyen, and K Goetz. STEREO database of interplanetary Langmuir electric waveforms. *J. geophys. Res. Space Physics*, 121:1062–1070, 2016.
- K. G. Budden. The theory of limiting polarization of radio waves reflected from the ionosphere. *Proc. Roy. Soc.*, 215(1121):215–233, 1952.
- E. J. Bunce, S. W. H. Cowley, D. L. Talboys, M. K. Dougherty, L. Lamy, W. S. Kurth, P. Schippers, B. Cecconi, P. Zarka, C. S. Arridge, and A. J. Coates. Extraordinary field-aligned current signatures in Saturn’s high-latitude magnetosphere: Analysis of Cassini data during Revolution 89. *J. Geophys. Res.*, 115(A10238), 2010.
- B. F. Burke and K. L. Franklin. Observations of a Variable Radio Source Associated with the Planet Jupiter. *J. Geophys. Res.*, 60:213, June 1955.
- E. P. Carley, B. Cecconi, H. Reid, C. Briand, K. Sasikumar Raja, S. Masson, V. Dorovskyy, C. Tiburzi, N. Vilmer, P. Zucca, P. Zarka, M. Tagger, J.-M. Grießmeier, S. Corbel, G. Theureau, Alan Loh, and J. N. Girard. Observations of shock propagation through turbulent plasma in the solar corona. *Astrophys. J.*, pages 1–12, August 2021.
- B. Cecconi. *Étude Goniopolarimétrique des émissions radio de Jupiter et Saturne à l’aide du récepteur radio de la sonde Cassini*. PhD thesis, Univ. Paris 7, Meudon, France, April 2004.
- B. Cecconi. Influence of an extended source on Goniopolarimetry (or Direction Finding) with Cassini and STEREO radio receivers. *Radio Sci.*, 42(RS2003):1–17, 2007a.
- B. Cecconi. Mesures Radio Spatiales: Goniopolarimétrie. In *Proceedings of the XXXth Spring School of Goutelas, Marcoux, France*, pages 285–316, 2007b.
- B. Cecconi. Goniopolarimetry for radio astronomy. In M. C. E. Huber, J. L. Culhane, A. Pauluhn, J. G. Timothy, and A. Zehnder, editors, *Observing Photons in Space: A Guide to Experimental Space Astronomy*, pages 263–277. ISSI/ESA, May 2009.
- B. Cecconi. Correction to “Influence of an extended source on Goniopolarimetric (or Direction Finding) with Cassini and STEREO radio receivers”. *Radio Sci.*, 45, 2010.
- B. Cecconi. Goniopolarimetric techniques for low-frequency radio astronomy in space. In M. C. E. Huber, A. Pauluhn, J. L. Culhane, J. G. Timothy, K. Wilhelm, and A. Zehnder, editors, *Observing Photons in Space*, pages 263–277. ISSI/ESA/Springer, January 2011.
- B. Cecconi. Goniopolarimetry: Space-borne Radio Astronomy with Imaging Capabilities. *Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, pages 1–4, 2013.
- B. Cecconi. Goniopolarimetry: Space-borne radio astronomy with imaging capabilities. *Comptes Rendus Physique*, 15(5):441–447, May 2014.
- B. Cecconi. Polarization in Low Frequency Radio Astronomy. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1901.03599, January 2019.
- B. Cecconi and P. Zarka. Model of a variable radio period for Saturn. *J. Geophys. Res.*, 110(A12203), December 2005a.
- B. Cecconi and P. Zarka. Direction finding and antenna calibration through analytical inversion of radio measurements performed using a system of 2 or 3 electric dipole antennas. *Radio Sci.*, 40:RS3003, May 2005b.
- B. Cecconi and P. Zarka. Cassini RPWS/HFR Jupiter Encounter Calibrated Dataset (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2019. doi: 10.25935/H98J-MA66.
- B. Cecconi, P. Zarka, W. S. Kurth, and D. A. Gurnett. Cassini-RPWS Electrical Antenna Calibration. Saturn Inbound Update. Technical report, LESIA, Observatoire de Paris, 2005.
- B. Cecconi, X. Bonnin, S. Hoang, M. Maksimovic, S. D. Bale, J.-L. Bougeret, K. Goetz, A. Lecacheux, M. J. Reiner, H. O. Rucker, and P. Zarka. STEREO/Waves Goniopolarimetry. *Space Sci. Rev.*, 136(1–4):549–563, 2008.

- B. Cecconi, J.-L. Bougeret, M. Dekkali, L. Lamy, P. Zarka, and N. André. Ejsm electro-magnetic sensor study, September 2010. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.2532436>.
- B. Cecconi, S. L. G. Hess, A. Hérique, M. R. Santovito, D. Santos-Costa, P. Zarka, G. Alberti, D. D. Blankenship, J.-L. Bougeret, L. Bruzzone, and W. Kofman. Natural radio emission of Jupiter as interferences for radar investigations of the icy satellites of Jupiter. *Planet. Space Sci.*, 61:32–45, 2012.
- B. Cecconi, A.-L. Gautier, J. E. S. Bergman, T. Chust, A. Marchaudon, C. Cavoit, and O. Santolík. Goniopolarimetry with Coupled Electric and Magnetic Measurements. *Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, pages 1–4, 2013a.
- B. Cecconi, S. L. G. Hess, P. Le Sidaner, A. Coffre, E. Thétas, and N. André. Sharing Planetary Radio Emission Dataset in the Virtual Observatory. *Proceedings of the PV-2013 Conference*, pages 1–10, October 2013b.
- B. Cecconi, Y. Kasaba, J. E. S. Bergman, P. Zarka, L. Lamy, S. L. G. Hess, and H. Rothkaehl. JUICE/RPWI/JENRAGE: a low frequency radio imager at Jupiter. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2015–919, October 2015a.
- B. Cecconi, Renaud Savalle, Pierre Le Sidaner, P. Zarka, Stéphane Erard, Sébastien L. G. Hess, Andrée Coffre, Emmanuel Thétas, Nicolas André, Vincent Génot, James R Thieman, D. A.ve Typinski, Jim Sky, and Charles A Higgins. Virtual Observatory Tools and Amateur Radio Observations Supporting Scientific Analysis of Jupiter Radio Emissions. *PV-2015*, pages 1–8, November 2015b.
- B. Cecconi, L. Lamy, and P. Zarka. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos N2 Data Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2017a. doi: 10.25935/XS9J-ND90.
- B. Cecconi, L. Lamy, and P. Zarka. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos N3b Data Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2017b. doi: 10.25935/F8NS-0911.
- B. Cecconi, L. Lamy, and P. Zarka. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos N3d Data Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2017c. doi: 10.25935/5JFX-DH49.
- B. Cecconi, L. Lamy, and P. Zarka. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos N3e Data Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2017d. doi: 10.25935/9ZAB-FP47.
- B. Cecconi, A. Pruvot, L. Lamy, P. Zarka, C. Louis, S. L G Hess, D. R. Evans, and D Boucon. Refurbishing Voyager 1 & 2 Planetary Radio Astronomy Data. *Planetary Radio Emissions*, 8:1–9, 2017e.
- B. Cecconi, P. Zarka, L. Lamy, and P. Schippers. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2017f. doi: 10.25935/1SXH-AQ56.
- B. Cecconi, M. Dekkali, C. Briand, B. Segret, J. N. Girard, A. Laurens, A. Lamy, D. Valat, M. Delpech, M. Bruno, P. Gelard, M. Bucher, Q. Nenon, J.-M. Grießmeier, A.-J. Boonstra, and M. Bentum. NOIRE Study Report: Towards a Low Frequency Radio Interferometer in Space. *2018 IEEE Aerospace Conference*, pages 1–19, March 2018a.
- B. Cecconi, M. Dekkali, C. Briand, B. Segret, J. N. Girard, A. Laurens, A. Lamy, D. Valat, M. Delpech, M. Bruno, P. Gélard, M. Bucher, Q. Nenon, J.-M. Grießmeier, A.-J. Boonstra, and M. Bentum. NOIRE Study Report: Towards a Low Frequency Radio Interferometer in Space. *IEEE Aerospace Conference*, pages 1–19, March 2018b. doi: 10.1109/AERO.2018.839674.
- B. Cecconi, Laurent Lamy, Laurent Denis, P. Zarka, Agnès Fave, Marie-Pierre Issartel, Marie-Agnès Dubos, Corentin Louis, Pierre Le Sidaner, and Véronique Stoll. Digitizing analogic spectrograms recorded by the Nançay Decameter Array on 35 mm film rolls from 1970 to 1990. *Proceeding to the PV2018 conference*, pages 1–4, April 2018c.
- B. Cecconi, Alan Loh, Pierre Le Sidaner, Renaud Savalle, Xavier Bonnin, Quynh Nhu Nguyen, Sonny Lion, Albert Shih, Stéphane Aicardi, P. Zarka, Corentin Louis, Andrée Coffre, Laurent Lamy, Laurent Denis, Jean-Mathias Grießmeier, Jeremy Faden, Chris Piker, Nicolas André, Vincent Génot, Stéphane Erard, Joseph N Mafi, Todd A King, Jim Sky, and Markus Demleitner. MASER: A Science Ready Toolbox for Low Frequency Radio Astronomy. *Data Science Journal*, 19(18):1062, March 2020.
- B. Cecconi, X. Bonnin, and A. Loh. JSON Implementation of Time-Frequency Radio Catalogues: TFCat. Version 1.0. *PADC/MASER*, 2021. doi: 10.25935/6068-8528.
- B. Cecconi, L. Debisschop, and L. Lamy. A catalogue of Jovian decametric radio observations from January 1978 to December 1990 (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2021a. doi: 10.25935/1FQM-FS07.
- B. Cecconi, C. K. Louis, C. Muñoz Crego, and C. Vallat. Jovian Auroral Radio Source Occultation Modelling and Application to the JUICE mission planning. *Planetary and Space Science*, 209, August 2021b.
- B. Cecconi, C. K. Louis, C. Muñoz-Crego, and C. Vallat. Jovian Auroral Radio Source Occultation Modeling

- and Application to the JUICE Science Mission Planning. Supplementary Material: Galileo Flyby Movies (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2021c. doi: 10.25935/8ZFF-NX36.
- B. Cecconi, M. Louys, A. Preite Martinez, S. Derrière, F. Ochsenbein, S. Erard, and M. Demleitner. UCD1+ controlled vocabulary – Updated List of Terms Version 1.4. IVOA Endorsed Note 16 June 2021, 2021.
- B. Cecconi, O. Witasse, Caitriona M. Jackman, B. Sánchez-Cano, and M. L. Mays. Effect of an interplanetary coronal mass ejection on saturn’s radio emission, 2021.
- Xuelei Chen, J. A Burns, L. V E Koopmans, H. Rothkaehl, Joseph Silk, Ji Wu, A. J Boonstra, B. Cecconi, Cynthia H Chiang, Linjie Chen, Li Deng, Maurizio Falanga, Heino Falcke, Quanlin Fan, Guangyou Fang, Anastasia Fialkov, Leonid Gurvits, Yicai Ji, Justin C Kasper, Kejia Li, Yi Mao, Benjamin McKinley, Raul A Monsalve, Jeffrey B Peterson, Jinsong Ping, Ravi Subrahmanyam, Harish Vedantham, Marc Klein-Wolt, Fengquan Wu, Yidong Xu, Jingye Yan, and Bin Yue. Discovering the Sky at the Longest Wavelengths with Small Satellite Constellations. *ISSI-BJ Forum Report*, pages 1–61, July 2019.
- B. Christophe, L. J. Spilker, J. D. Anderson, N. André, S. W. Asmar, J. Aurnou, D. Banfield, A. Barucci, O. Bertolami, R. Bingham, P. Brown, B. Cecconi, J. M. Courty, H. Dittus, L. N. Fletcher, B. Foulon, F. Francisco, P. J. S. Gil, K.-H. Glassmeier, W. Grundy, C. Hansen, J. Helbert, R. Helled, H. Hussmann, B. Lamine, C. Lämmerzahl, L. Lamy, R. Lehoucq, B. Lenoir, A. Levy, G. Orton, J. Páramos, J. Poncy, F. Postberg, S. V. Progrebenko, K. R. Reh, S. Reynaud, C. Robert, E. Samain, J. Saur, K. M. Sayanagi, N. Schmitz, H. Selig, F. Sohl, T. R. Spilker, R. Srama, K. Stephan, P. Touboul, and P. Wolf. OSS (Outer Solar System): a fundamental and planetary physics mission to Neptune, Triton and the Kuiper Belt. *Experimental Astronomy*, 34(2):203–242, July 2012.
- J. T. Clarke, H. W. Moos, S. K. Atreya, and A. L. Lane. IUE detection of bursts of H Ly-alpha emission from Saturn. *Nature*, 290:226, March 1981. doi: 10.1038/290226a0.
- J. T. Clarke, J. D. Nichols, J.-C. Gérard, D. Grodent, K. C. Hansen, W. S. Kurth, G. R. Gladstone, J. Duval, S. Wannawichian, E. J. Bunce, S. W. H. Cowley, F. J. Crary, M. K. Dougherty, L. Lamy, D. G. Mitchell, W. R. Pryor, K. Retherford, T. S. Stallard, B. Zieger, P. Zarka, and B. Cecconi. The Response of Jupiter’s and Saturn’s Auroral Activity to the Solar Wind. *J. Geophys. Res.*, 114:A05210, 2009.
- M. Demleitner, M. C. Neves, F. Rothmaier, and J. Wambsganss. Virtual observatory publishing with DaCHS. *Astronomy and Computing*, 7:27–36, November 2014. doi: 10.1016/j.ascom.2014.08.003.
- M. K. Dougherty, S. Kellock, D. J. Southwood, A. Balogh, E. J. Smith, B. T. Tsurutani, B. Gerlach, K.-H. Glassmeier, F. Gleim, C. T. Russel, G. Erdos, F. M. Neubauer, and S. W. H. Cowley. The Cassini Magnetic Field Investigation. *Space Sci. Rev.*, 114:331–383, 2004.
- M. K. Dougherty, H. Cao, K. K. Khurana, G. J. Hunt, G. Provan, S. Kellock, M. E. Burton, T. A. Burk, E. J. Bunce, S. W. H. Cowley, M. G. Kivelson, C. T. Russell, and D. J. Southwood. Saturn’s magnetic field revealed by the Cassini Grand Finale. *Science*, 362:aat5434, October 2018. doi: 10.1126/science.aat5434.
- P. Dowler, G. Rixon, D. Tody, and M. Demleitner. Table Access Protocol Version 1.1. IVOA Recommendation 27 September 2019, September 2019.
- G. A. Dulk and S. Suzuki. The position and polarization of Type III solar bursts. *Astron. Astrophys.*, 88: 203–217, 1980.
- W. R. Dunn, R. Gray, A. D. Wibisono, L. Lamy, C. Louis, S. V. Badman, G. Branduardi-Raymont, R. Elsner, G. R. Gladstone, R. Ebert, P. Ford, A. Foster, C. Tao, L. C. Ray, Z. Yao, I. J. Rae, E. J. Bunce, P. Rodriguez, C. M. Jackman, G. Nicolaou, J. Clarke, J. Nichols, H. Elliott, and R. Kraft. Comparisons Between Jupiter’s X-ray, UV and Radio Emissions and In-Situ Solar Wind Measurements During 2007. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 125(6):e27222, June 2020. doi: 10.1029/2019JA027222.
- S. W. Ellingson, T. E. Clarke, A. Cohen, J. Craig, N. E. Kassim, Y. Pihlstrom, L. J. Rickard, and G. B. Taylor. The Long Wavelength Array. *IEEE Proceedings*, 97:1421–1430, August 2009. doi: 10.1109/JPROC.2009.2015683.
- S. Erard, B. Cecconi, P. Le Sidaner, J. Berthier, F. Henry, C. Chauvin, N. André, V. Génot, C. Jacquy, M. Gangloff, N. Bourrel, B. Schmitt, M. T Capria, and G Chanteur. Planetary Science Virtual Observatory architecture . *Astronomy and Computing*, 7-8:71–80, November 2014a.
- S. Erard, B. Cecconi, P. Le Sidaner, J. Berthier, F. Henry, M. Molinaro, M. Giardino, N. Bourrel, N. André, M. Gangloff, C. Jacquy, and F Topf. The EPN-TAP protocol for the Planetary Science Virtual Observatory. *Astronomy and Computing*, 7-8:52–61, August 2014b.
- S. Erard, P. Le Sidaner, J. Berthier, B. Cecconi, F. Henry, L. Lamy, C. Chauvin, R. Savalle, and Ivan Zolotukhin. A Planetary Science VO prototype. *PV-2013*, pages 1–10, March 2014c.

- S. Erard, B. Cecconi, Pierre Le Sidaner, Angelo Pio Rossi, M. T Capria, Bernard Schmitt, V. Génot, N. André, Ann Carin Vandaele, Manuel Scherf, Ricardo Hueso, Anni Maatanen, William Thuillot, Benoît Carry, N. Achilleos, Chiara Marmo, Ondrej Santolík, K. M Benson, Pierre Fernique, L. Beigbeder, Batiste Rousseau, François Andrieu, Cyril Chauvin, M. Minin, Stavro L Ivanovski, Andrea Longobardo, D. A.mien Albert, M. Gangloff, Nathanael Jourdane, M. Bouchemit, Jean-Michel Glorian, Loïc Trompet, Tarek Al-Ubaidi, Jon Juaristi, Josselin Desmars, P. Guio, Omar Delaa, Anthony Lagain, Jan Souček, and D. A.vid Pisa. VESPA: a community-driven Virtual Observatory in Planetary Science . *Planet. Space Sci.*, 150:65–85, 2018.
- S. Erard, B. Cecconi, P. Le Sidaner, M. Demleitner, and M. Taylor. EPN-TAP: Publishing Solar System Data to the Virtual Observatory – Version 2.0. IVOA Proposed Recommendation 12 October 2021, 2021. URL [url{https://ivoa.net/documents/EPNTAP/20211012/PR-EPNTAP-2.0-20211012.pdf}](https://ivoa.net/documents/EPNTAP/20211012/PR-EPNTAP-2.0-20211012.pdf).
- S. Erard, B. Cecconi, P. Le Sidaner, M. Demleitner, and M. Taylor. EPN-TAP:Publishing Solar System Data to the Virtual Observatory Version 2.0. IVOA Proposed Recommendation 22 October 2021, October 2021. URL <https://ivoa.net/documents/EPNTAP>.
- L. W. Esposito, C. A. Barth, J. E. Colwell, G. M. Lawrence, W. E. McClintock, A. I. F. Stewart, H. U. Keller, A. Korth, H. Lauche, M. C. Festou, A. L. Lane, C. J. Hansen, J. N. Maki, R. A. West, H. Jahn, R. Reulke, K. Warlich, D. E. Shemansky, and Y. L. Yung. The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. *Space Sci. Rev.*, 115:299–361, December 2004. doi: 10.1007/s11214-004-1455-8.
- W. M. Farrell, M. D. Desch, M. L. Kaiser, A. Lecacheux, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, B. Cecconi, and P. Zarka. A nightside source of Saturn’s kilometric radiation: Evidence for an inner magnetosphere energy driver. *Geophys. Res. Lett.*, 32:L18107, September 2005.
- G. Fischer, W. Macher, H. O. Rucker, H.-P. Ladreiter, D. F. Vogl, and the Cassini/RPWS team. Wire-grid modelling of Cassini spacecraft for the determination of effective length vectors of the RPWs antennas. In H. O. Rucker, M. L. Kaiser, and Y. Leblanc, editors, *Planetary Radio Emissions V*, pages 347–356. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 2001.
- G. Fischer, B. Cecconi, S.-Y. Ye, P. Zarka, A. Lecacheux, L. Lamy, W. S. Kurth, and D. A. Gurnett. Elliptical polarization of Saturn Kilometric Radiation observed from high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 114:A08216, 2009.
- G. Fischer, B. Cecconi, J. Bergman, J. Girard, G. Quinsac, and J.-E. Wahlund. Short antennas on a large spacecraft. In *Planetary Radio Emissions VIII*, pages 515–523, January 2017. doi: 10.1553/PRE8s515.
- G. Fischer, B. Cecconi, J. Bergman, J. N. Girard, G. Quinsac, and J.-E. Wahlund. Short Antennas on a Large spacecraft. In *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII)*, pages 515–523, Graz, 2017.
- G. Fischer, M. Panchenko, W. Macher, Y. Kasaba, H. Misawa, M. Tokarz, L. Wisniewski, B. Cecconi, J. Bergman, and J.-E. Wahlund. Calibration of the JUICE RWI antennas by numerical methods. *Radio Sci.*, page review, August 2021.
- C. Foullon, L. N. Fletcher, I. G. Hannah, E. Verwichte, B. Cecconi, V. M. Nakariakov, K. J. H. Phillips, and B. L. Tan. From large-scale loops to the sites of dense flaring loops: preferential conditions for long-period pulsations in solar flares. *Astrophys. J.*, 719:151–165, 2010.
- P. H. M. Galopeau and A. Lecacheux. Variations of Saturn’s radio rotation period measured at kilometer wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 105:13089–13102, 2000.
- Y. Gargouri. *Nouveau récepteur radio numérique pour les observations astrophysiques spatiales dans la bande de fréquence 1 kHz à 50 MHz*. Thèse, Telecom Paris Tech, Paris, France, 2017.
- Y. Gargouri, H. Petit, P. Loumeau, B. Cecconi, and P. Desgreys. Compressive Sampling for Efficient Astrophysical Signals Digitizing: From Compressibility Study to Data Recovery. *Journal of Astronomical Instrumentation*, 05(04):1641020, December 2016a.
- Y. Gargouri, H. Petit, P. Loumeau, B. Cecconi, and P. Desgreys. Echantillonnage Comprimé pour les Signaux Astrophysiques. In *11ème colloque du GDR SoC-SiP 2016*, Nantes, France, June 2016b. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01358618>.
- O. Gassot, A. Hérique, W. Kofman, B. Cecconi, and O. Witasse. Passive Probing of the Galilean Moons. *TGRS*, July 2021.
- A.-L. Gautier. *Propagation of radio waves through planetary environments*. Thèse, Observatoire de Paris, September 2013. URL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01145651>.
- A.-L. Gautier, B. Cecconi, and P. Zarka. ARTEMIS-P: A general Ray Tracing code in anisotropic plasma for radioastronomical applications. *Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory*, pages 1–4, 2013a.

- A.-L. Gautier, B. Cecconi, and P Zarka. ARTEMIS-P: A general Ray Tracing code in anisotropic plasma for radioastronomical applications. *Journées scientifiques URSI-France 26/27 mars 2013*, pages 1–4, April 2013b.
- V. Génot, C. Jacquy, M. Bouchemit, M. Gangloff, A. Fedorov, B. Lavraud, N. André, L. Broussillou, C. C. Harvey, E. Pallier, E. Penou, E. Budnik, R. Hitier, B. Cecconi, F. Dériot, D. Heulet, and J.-L. Pinçon. Space Weather applications with CDPP/AMDA. *Adv. Space. Res.*, 45:1145–1155, 2010.
- V. Génot, N. André, B. Cecconi, M. Bouchemit, E. Budnik, N. Bourrel, M. Gangloff, N. Dufourg, S. L. G. Hess, R. Modolo, B. Renard, N. Lormant, L. Beigbeder, D. Popescu, and J. P Toniutti. Astronomy and Computing. *Astronomy and Computing*, 7-8:62–70, November 2014.
- V. Génot, L. Beigbeder, D. Popescu, N. Dufourg, M. Gangloff, M. Bouchemit, S. Caussarieu, J. P Toniutti, J. Durand, R. Modolo, N. André, B. Cecconi, C. Jacquy, F. Pitout, A. Rouillard, R. Pinto, S. Erard, N. Jourdane, L. Leclercq, S. L. G. Hess, M. Khodachenko, T. Al-Ubaidi, M. Scherf, and E Budnik. Science data visualization in planetary and heliospheric contexts with 3DView . *Planetary and Space Science*, pages 1–20, July 2017a.
- V. Génot, B. Renard, N. Dufourg, M. Bouchemit, N. Lormant, L. Beigbeder, D. Popescu, J. P Toniutti, N. André, F. Pitout, C. Jacquy, B. Cecconi, and M Gangloff. Planetary and Space Science. *Planetary and Space Science*, pages 1–5, July 2017b.
- V. Génot, E. Budnik, C. Jacquy, M. Bouchemit, B. Renard, N. Dufourg, N. André, B. Cecconi, F. Pitout, B. Lavraud, A. Fedorov, M. Ganfloff, I. Plotnikov, R. Modolo, N. Lormant, H. Si Hadj Mohand, C. Tao, B. Besson, D. Heulet, D. Boucon, J. Durand, N. Bourrel, Q. Brzustowski, N. Jourdane, R. Hitier, P. Garnier, B. Grison, N. Aunai, A. Jeandet, and F. Cabrolie. Planetary and Space Science. *Planetary and Space Science*, 201:105214, July 2021.
- D. A. Gurnett, W. S. Kurth, D. L. Kirchner, G. B. Hospodarsky, T. F. Averkamp, P. Zarka, A. Lecacheux, R. M. Manning, A. Roux, P. Canu, N. Cornilleau-Werhlin, P. H. M. Galopeau, A. Meyer, R. Bostrom, G. Gustafsson, J.-E. Wahlund, L. Åhlen, H. O. Rucker, H.-P. Ladreiter, W. Macher, L. J. C. Woolliscroft, H. Alleyne, M. L. Kaiser, M. D. Desch, W. M. Farrell, C. C. Harvey, P. Louarn, P. J. Kellogg, K. Goeth, and A. Pedersen. The Cassini radio and Plasma wave science investigation. *Space Sci. Rev.*, 114(1–4):395–463, 2004.
- D. A. Gurnett, W. S Kurth, G. B. Hospodarsky, M. Persoon, T. F. Averkamp, B. Cecconi, A. Lecacheux, P. Zarka, P. Canu, N. Cornilleau-Werhlin, P. H. M. Galopeau, A. Roux, C. C. Harvey, P. Louarn, R. Bostrom, G. Gustafsson, J.-E. Wahlund, M. D. Desch, W. M. Farrell, M. L. Kaiser, K. Goetz, P. J. Kellogg, G. Fischer, H.-P. Ladreiter, H. O. Rucker, H. Alleyne, and A. Pedersen. Radio and Plasma Wave Observations at Saturn from Cassini’s Approach and First Orbit. *Science*, 307(5713):1255–1259, February 2005.
- Alexander Hegedus, Quentin Neron, Antoine Brunet, Justin Kasper, Angélica Sicard, B. Cecconi, Robert MacDowall, and D. A.niel Baker. Measuring the Earth’s Synchrotron Emission From Radiation Belts With a Lunar Near Side Radio Array. *Radio Sci.*, 55(2):127, February 2020.
- S. L. G. Hess and P. Zarka. Modeling the radio signature of the orbital parameters, rotation, and magnetic field of exoplanets. *Astronomy and Astrophysics*, 531:A29, June 2011.
- S. L. G. Hess, B. Cecconi, and P. Zarka. Modeling of Io-Jupiter Decameter Arcs, Emission Beaming and Energy Source. *Geophys. Res. Lett.*, 35(L13107), 2008.
- S. L. G. Hess, A. Pétin, P. Zarka, B. Bonfond, and B. Cecconi. Lead angles and emitting electron energies of Io-controlled decameter radio arcs. *Planet. Space Sci.*, 58(10):1188–1198, 2010.
- G. B. Hospodarsky, W. S. Kurth, B. Cecconi, D. A. Gurnett, M. L. Kaiser, M. D. Desch, and P. Zarka. Simultaneous observations of Jovian quasi-periodic radio emissions by the Galileo and Cassini spacecraft. *J. Geophys. Res.*, 109:A09S07, 2004.
- J. Steven Hughes, D. A.niel J Crichton, Anne C Raugh, B. Cecconi, Edward A Guinness, Christopher E Isbell, Joseph N Mafi, Mitchell K Gordon, Sean H Hardman, and Ronald S Joyner. Enabling interoperability in planetary sciences and heliophysics: The case for an information model. *Planetary and Space Science*, pages 1–0, April 2017.
- C. M. Jackman, N. Achilleos, E. J. Bunce, B. Cecconi, J. T. Clarke, S. W. H. Cowley, W. S. Kurth, and P. Zarka. Interplanetary conditions and magnetospheric dynamics during the Cassini orbit insertion fly-through of Saturn’s magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 110:A10212, October 2005.
- C. M. Jackman, L. Lamy, P. M. Freeman, P. Zarka, B. Cecconi, W. S Kurth, S. W. H. Cowley, and M. K. Dougherty. On the character and distribution of lower-frequency radio emissions at Saturn and their relationship to substorm-like events. *J. Geophys. Res.*, 114(A08211), 2009.
- K. G. Jansky. Electrical phenomena that apparently are of interstellar origin. *Popular Astronomy*, 41:548, December 1933.

- M. M. Kao, J. S. Pineda, P. Williams, R. Yadav, D. Shulyak, J. Saur, D. J. Stevenson, S. Schmidt, A. Burgasser, G. Hallinan, and K. Cruz. Magnetism in the Brown Dwarf Regime (Decadal survey 2020 science white paper), 2019.
- Y. Kasaba, T. Kimura, D. Maruno, A. Morioka, B. Cecconi, L. Lamy, C. M. Jackman, C. Tao, H. Kita, H. Misawa, F. Tsuchiya, and A. Kumamoto. A Flux Comparison of Northern and Southern Saturn Kilometric Radio Bursts During Southern Summer. In *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII)*, pages 205–215, 2017.
- Yasumasa Kasaba, Hiroaki Misawa, Fuminori Tsuchiya, Yoshiya Kasahara, Tomohiko Imachi, Tomoki Kimura, Masato Kato, Atsushi Kumamoto, Hiroshi Kojima, Satoshi Yagitani, Mitsunori Osaki, Keigo Ishizaka, Chihiro Tao, Yoshizumi Miyoshi, Takumi Abe, B. Cecconi, Michiko Morooka, Jan-Erik Wahlund, and JUICE-RPWI team. Back to Jupiter, and then to the icy satellites, Part 4 - To the Radio-Plasma Wave Instrument (RPWI). *Journal of the Japanese Society of Planetary Science*, 25(3):96–107, September 2016.
- T. Kimura, B. Cecconi, P. Zarka, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, H. Misawa, and A. Morioka. Polarization and direction of arrival of Jovian quasiperiodic bursts observed by Cassini. *J. Geophys. Res.*, 117(A11):A11209, November 2012.
- T. Kimura, L. Lamy, C. Tao, S. V. Badman, S. Kasahara, B. Cecconi, P. Zarka, A. Morioka, Y. Miyoshi, D. Maruno, Y. Kasaba, and M. Fujimoto. Long-term modulations of Saturn’s auroral radio emissions by the solar wind and seasonal variations controlled by the solar ultraviolet flux. *J. Geophys. Res.*, 118:7019–7035, November 2013.
- A. Konovalenko, L. Sodin, V. Zakharenko, P. Zarka, O. Ulyanov, M. Sidorchuk, S. Stepkin, P. Tokarsky, V. Melnik, N. Kalinichenko, A. Stanislavsky, V. Koliadin, V. Shepelev, V. Dorovskyy, V. Ryabov, A. Koval, I. Bubnov, S. Yerin, A. Gridin, V. Kulishenko, A. Reznichenko, V. Bortsov, V. Lisachenko, A. Reznik, G. Kvasov, D. Mukha, G. Litvinenko, A. Khristenko, V. V. Shevchenko, V. A. Shevchenko, A. Belov, E. Rudavin, I. Vasylieva, A. Miroshnichenko, N. Vasilenko, M. Olyak, K. Mylostna, A. Skoryk, A. Shevtsova, M. Plakhov, I. Kravtsov, Y. Volvach, O. Lytvinenko, N. Shevchuk, I. Zhouk, V. Bovkun, A. Antonov, D. Vavriv, V. Vinogradov, R. Kozhin, A. Kravtsov, E. Bulakh, A. Kuzin, A. Vasilyev, A. Brazhenko, R. Vashchishin, O. Pylaev, V. Koshovyy, A. Lozinsky, O. Ivantyshin, H. O. Rucker, M. Panchenko, G. Fischer, A. Lecacheux, L. Denis, A. Coffre, J.-M. Grießmeier, M. Tagger, J. Girard, D. Charrier, C. Briand, and G. Mann. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT. *Experimental Astronomy*, pages 1–38, April 2016.
- S. M. Krimigis, D. G. Mitchell, D. C. Hamilton, S. Livi, I. Dandouras, S. Jaskulek, T. P. Armstrong, J. D. Boldt, A. F. Cheng, G. Gloeckler, J. R. Hayes, K. C. Hsieh, W.-H. Ip, E. P. Keath, E. Kirsch, N. Krupp, L. J. Lanzerotti, R. Lundgren, B. H. Mauk, R. W. McEntire, E. C. Roelof, C. E. Schlemm, B. E. Tossman, B. Wilken, and D. J. Williams. Magnetosphere Imaging Instrument (MIMI) on the Cassini Mission to Saturn/Titan. *Space Sci. Rev.*, 114(1-4):233–329, 2004.
- V. Krupar, O. Santolík, B. Cecconi, M. Maksimovic, X. Bonnin, M. Panchenko, and A. Zaslavsky. Goniopolarimetric inversion using SVD: An application to type III radio bursts observed by STEREO. *J. Geophys. Res.*, 117(A6), June 2012.
- V. Krupar, M. Maksimovic, O. Santolík, B. Cecconi, and O. Kruparova. Statistical Survey of Type III Radio Bursts at Long Wavelengths Observed by the Solar TERrestrial RELations Observatory (STEREO)/Waves Instruments: Goniopolarimetric Properties and Radio Source Locations. *Sol. Phys.*, 289(12):4633–4652, October 2014a.
- V. Krupar, M. Maksimovic, O. Santolík, E. P. Kontar, B. Cecconi, S. Hoang, O. Kruparova, J. Soucek, H. Reid, and A. Zaslavsky. Statistically Survey of Type III Radio Bursts at Long Wavelengths Observed by the Solar Terrestrial Relations Observatory/Waves Instruments: Radio flux and Density Variations with Frequency. *Sol. Phys.*, 289:3121–3135, May 2014b.
- V. Krupař. *Stereoscopic Observations of Solar Radio Emissions by the S/Waves Instrument onboard the STEREO Spacecraft*. PhD thesis, Observatoire de Paris, Meudon, France, 2012.
- A. Kumamoto, Y. Kasaba, F. Tsuchiya, H. Misawa, H. Kita, W. Puccio, J.-E. Wahlund, J. Bergman, B. Cecconi, Y. Goto, J. Kimura, and T. Kobayashi. Feasibility of the Exploration of the Subsurface Structures of Jupiter’s Icy Moons by Interference of Jovian Hectometric and Decametric Radiation. In *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII)*, pages 127–136, 2017.
- W. S. Kurth, D. A. Gurnett, J. T. Clarke, P. Zarka, M. D. Desch, M. L. Kaiser, B. Cecconi, A. Lecacheux, W. M. Farrell, P. H. M. Galopeau, J.-C. Gérard, D. Grodent, R. Prangé, M. K. Dougherty, and F. J. Crary. An

- Earth-like correspondence between Saturn's auroral features and radio emission. *Nature*, 433(7027):722–725, February 2005a.
- W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, D. A. Gurnett, B. Cecconi, P. Louarn, A. Lecacheux, P. Zarka, H. O. Rucker, M. Y. Boudjada, and M. L. Kaiser. High Spectral and Temporal Resolution Observations of Saturn Kilometric Radiation. *Geophys. Res. Lett.*, 32:L20S07, July 2005b.
- W. S. Kurth, D. A. Gurnett, J. D. Menietti, R. L. Mutel, M. G. Kivelson, E. J. Bunce, S. W. H. Cowley, D. L. Talboys, M. K. Dougherty, C. Arridge, A. Coates, S. Grimald, L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, P. Schippers, N. André, P. Louarn, D. Mitchell, J. Leisner, and M. Morooka. A Close Encounter with a Saturn Kilometric Radiation Source Region. In *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VII)*, pages 75–85, 2011.
- W. S. Kurth, G. B. Hospodarsky, D. L. Kirchner, B. T. Mokrzycki, T. F. Averkamp, W. T. Robison, C. W. Piker, M. Sampl, and P. Zarka. The Juno Waves Investigation. *Space Sci. Rev.*, 213:347–392, July 2017.
- L. Lamy. Variability of Southern and Northern SKR Periodicities. *PRE* 7, pages 1–11, November 2010.
- L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, S. L. G. Hess, and R. Prangé. Modeling of Saturn kilometric radiation arcs and equatorial shadow zone. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 113(A10), 2008a.
- L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, R. Prangé, W. S. Kurth, and D. A. Gurnett. Saturn Kilometric Radiation: average and statistical properties. *J. Geophys. Res.*, 113(A07201), 2008b.
- L. Lamy, B. Cecconi, R. Prangé, P. Zarka, J. D. Nichols, and J. T. Clarke. Correction to “An auroral oval at the footprint of Saturn's kilometric radio sources, colocated with the UV aurorae”. *J. Geophys. Res.*, 114(A12299), 2009a.
- L. Lamy, B. Cecconi, and P. Zarka. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos SKR Data Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2009b. doi: 10.25935/ZKXB-6C84.
- L. Lamy, P. Schippers, P. Zarka, B. Cecconi, C. S. Arridge, M. K. Dougherty, P. Louarn, N. André, W. S. Kurth, R. L. Mutel, D. A. Gurnett, and A. J. Coates. Properties of Saturn kilometric radiation measured within its source region. *Geophys. Res. Lett.*, 37(L12104), 2010a.
- L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, and R. Prangé. AKR diurnal, semi-diurnal and shorter term modulations disentangled by Cassini/RPWS observations. *J. Geophys. Res.*, 115(A09221), 2010b.
- L. Lamy, B. Cecconi, and P. Zarka. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos Northern and Southern SKR Phase Systems (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2011a. doi: 10.25935/6D16-BM97.
- L. Lamy, B. Cecconi, P. Zarka, P. Canu, P. Schippers, W. S. Kurth, R. L. Mutel, D. A. Gurnett, D. Menietti, and P. Louarn. Emission and propagation of Saturn kilometric radiation: Magnetoionic modes, beaming pattern, and polarization state. *J. Geophys. Res.*, 116(A04212), April 2011b.
- L. Lamy, R. Prangé, K. C. Hansen, J. T. Clarke, P. Zarka, B. Cecconi, J. Abouadarham, N. André, G. Branduardi-Raymont, R. Gladstone, M. Barthélemy, N. Achilleos, P. Guio, M. K. Dougherty, H. Melin, S. W. H. Cowley, T. S. Stallard, J. D. Nichols, and G. Ballester. Earth-based detection of Uranus' aurorae. *Geophys. Res. Lett.*, 39(7), April 2012.
- L. Lamy, R. Prangé, W. R. Pryor, J. Gustin, S. V. Badman, H. Melin, T. Stallard, D. G. Mitchell, and P. C. Brandt. Multispectral simultaneous diagnosis of Saturn's aurorae throughout a planetary rotation. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118(8):4817–4843, August 2013.
- L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, K-L Klein, S. Masson, L. Denis, A. Coffre, and C Dumez-Viou. 1977–2017: 40 Years of Decametric Observations of Jupiter and the Sun with the Nançay Decameter Array. *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII)*, pages 1–11, 2017.
- G. Le Chat, A. Zaslavsky, N. Meyer-Vernet, K. Issautier, S. Belheouane, F. Pantellini, M. Maksimovic, I. Zouganelis, S. Bale, and J. Kasper. Interplanetary Nanodust Detection by the Solar Terrestrial Relations Observatory/WAVES Low Frequency Receiver. *Sol. Phys.*, 286:549–559, May 2013.
- Y. Leblanc, J. de la Noë, F. Genova, A. Gerbault, and A. Lecacheux. A catalogue of jovian decametric radio observations from January 1978 to December 1979. *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 46:135–149, 1981.
- Y. Leblanc, A. Gerbault, M. Rubio, and F. Genova. A catalogue of Jovian decametric radio observations from January 1980 to December 1981. *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 54:135–148, 1983.
- Y. Leblanc, A. Gerbault, and A. Lecacheux. A Catalogue of Jovian decametric radio observations from January 1982 to December 1984 (Erratum). *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 79:154, July 1989a.
- Y. Leblanc, A. Gerbault, and A. Lecacheux. A Catalogue of Jovian decametric radio observations from January 1982 to December 1984. *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 77:425–438, March 1989b.

- Y. Leblanc, A. Gerbault, A. Lecacheux, and M. Y. Boudjada. A catalogue of Jovian decametric radio observations from January 1985 to December 1987. *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 86:191–207, December 1990.
- Y. Leblanc, A. Gerbault, L. Denis, and A. Lecacheux. A catalogue of Jovian decametric radio observations from January 1988 to December 1990. *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.*, 98:529–546, 1993.
- A. Lecacheux. Direction Finding of a Radiosource of Unknown Polarization with Short Electric Antennas on a Spacecraft. *Astron. Astrophys.*, 70:701–706, 1978.
- A. Lecacheux. POLARIZATION ASPECTS FROM PLANETARY RADIO EMISSIONS. In *Planetary Radio Emissions II*, pages 299–314, Graz, Austria, 1988.
- A. Lecacheux. Decameter Array: A Useful Step Towards Giant, New Generation Radio Telescopes for Long Wavelength Radio Astronomy. In *Radio Astronomy at Long Wavelength*, pages 321–328. AGU, 2000. URL <http://www.agu.org/books/gm/v119/GM119p0321/GM119p0321.pdf>.
- P. Louarn, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, G. B. Hospodarsky, A. M. Persoon, B. Cecconi, A. Lecacheux, P. Zarka, P. Canu, A. Roux, H. O. Rucker, W. M. Farrell, M. L. Kaiser, N. André, C. C. Harvey, and M. F. Blanc. Observation of similar radio signatures at Saturn and Jupiter: implications for the magnetospheric dynamics. *Geophys. Res. Lett.*, 34(L20113), 2007.
- C. K Louis, L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, and S. L G Hess. Detection of Jupiter decametric emissions controlled by Europa and Ganymede with Voyager/PRA and Cassini/RPWS. *J. geophys. Res. Space Physics*, 122:1–20, September 2017a.
- C. K Louis, L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, M. Imai, W. S Kurth, G. Hospodarsky, S. L G Hess, X. Bonnin, S. J Bolton, J. E P Connerney, and S. M Levin. Io-Jupiter decametric arcs observed by Juno/Waves compared to ExPRES simulations. *Geophys. Res. Lett.*, pages 1–17, 2017b.
- C. K. Louis, L. Lamy, P. Zarka, B. Cecconi, S. L. G. Hess, and X. Bonnin. Simulating Jupiter-Satellite Decametric Emissions with ExPRES: A Parametric Study. In *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VIII)*, pages 59–72, August 2018.
- C. K. Louis, S. L. G. Hess, B. Cecconi, P. Zarka, L. Lamy, S. Aicardi, and A. Loh. ExPRES: an Exoplanetary and Planetary Radio Emissions Simulator. *Astronomy and Astrophysics*, 627:A30, May 2019.
- C. K. Louis, B. Cecconi, and A. Loh. ExPRES Jovian Radio Emission Simulations Data Collection (Version 01) [Data set]. *PADC/MASER*, 2020. doi: 10.25935/KPGE-ZB59.
- C. K. Louis, P. Zarka, and B. Cecconi. Catalogue of Jupiter radio emissions identified in the Juno/Waves observations (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2021. doi: 10.25935/nhb2-wy29.
- M. Louys, B. Cecconi, S. Derriere, S. Erard, N. André, A. Preite-Martinez, F. Ochsenbein, C. Jacquy, V. Génot, F. Henry, X. Bonnin, P. Le Sidaner, C. Chauvin, N. Fuller, V. F Braga, and J Abouadarham. Planetary and Solar Data Labeled with IVOA Unified Content Descriptors. In A. R Taylor and E Rosolowsky, editors, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIV (ADASS XXIV)*, page 579, 2015a.
- Mireille Louys, B. Cecconi, Sébastien Derriere, and Pierre Le Sidaner. Unique identifiers for facilities and instruments in astronomy and planetary science . In *ASP Conference Series*, pages 1–4, November 2015b.
- W. Macher, T. H. Oswald, G. Fischer, and H. O. Rucker. Rheometry of multi-port spaceborne antennas including mutual antenna capacitances and application to STEREO/WAVES. *Meas. Sci. Technol.*, 18:3731–3742, 2007.
- J. Magdalenic, C. Marqué, V. Krupar, M. Mierla, A. N Zhukov, L. Rodriguez, M. Maksimovic, and B. Cecconi. TRACKING THE CME-DRIVEN SHOCK WAVE ON 2012 MARCH 5 AND RADIO TRIANGULATION OF ASSOCIATED RADIO EMISSION. *The Astrophysical Journal*, 791(2):115, August 2014.
- M. Maksimovic, S. D Bale, T. Chust, Yu. V. Khotyaintsev, V. Krasnoselskikh, M. Kretzschmar, D. Plettemeier, H. O. Rucker, J. Soucek, M. Steller, Š Štverák, P. Travnicek, A. Vaivads, S. Chaintreuil, M. Dekkali, O. Alexandrova, P. A Astier, G. Barbary, D. Bérard, X. Bonnin, K. Boughedada, B. Cecconi, F. Chapron, M. Charriet, C. Collin, Y. de Conchy, D. Dias, L. Guéguen, L. Lamy, V. Leray, S. Lion, L. R Malac-Allain, L. Matteini, Q-N Nguyen, F. Pantellini, J. Parisot, P. Plasson, S. Thijs, A. Vecchio, I. Fratter, E. Bellouard, E. Lorfèvre, P. Danto, S. Julien, E. Guilhem, C. Fiachetti, J. Sanisidro, C. Laffaye, F. Gonzalez, B. Pontet, N. Quéruel, G. Jannet, P. Ferreau, J-Y Brochot, G. Cassam-Chenai, T. Dudok de Wit, M. Timofeeva, T. Vincent, C. Agrapart, G. T Delory, P. Turin, A. Jeandet, P. Leroy, J. C Pellion, V. Bouzid, B. Katra, R. Piberne, W. Recart, O. Santolík, I. Kolmašová, V. Krupar, O. Kruparova, D. Píša, L. Uhlř, R. Lán, J. Baše, L. Åhlen, M. andré, L. Bylander, V. Cripps, C. Cully, A. Eriksson, S. E Jansson, E. P G Johansson, T. Karlsson, W. Puccio, J. Břínek, H. Öttacher, M. Panchenko, M. Berthomier, K. Goetz, P. Hellinger, T. S horbury, K. Issautier, E. Kontar, S. Krucker, O. Le Contel, P. Louarn, M. Martinovic, C. J Owen, A. Retino,

- J. Rodríguez-Pacheco, F. Sahraoui, R. F. Wimmer-Schweingruber, A. Zaslavsky, and I. Zouganelis. The Solar Orbiter Radio and Plasma Waves (RPW) instrument. *Astronomy and Astrophysics*, 642:A12, September 2020.
- R. Manning and J. Fainberg. A new method of measuring radio source parameters of a partially polarized distributed source from spacecraft observations. *Space Science Instrumentation*, 5:161–181, 1980.
- M. S. Marques, P. Zarka, E. Echer, V. B. Ryabov, M. V. Alves, L. Denis, and A. Coffre. Statistical analysis of 26 yr of observations of decametric radio emissions from Jupiter. *Astronomy and Astrophysics*, 604:A17, August 2017. doi: 10.1051/0004-6361/201630025.
- Y. M. Martos, M. Imai, J. E. P. Connerney, S. Kotsiaros, and W. S. Kurth. Juno reveals new insights into io-related decameter radio emissions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(7):e2020JE006415, 2020. doi: <https://doi.org/10.1029/2020JE006415>. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JE006415>.
- L. L. McCready, J. L. Pawsey, and R. Payne-Scott. Solar Radiation at Radio Frequencies and Its Relation to Sunspots. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 190:357–375, August 1947. doi: 10.1098/rspa.1947.0081.
- J. D. Menietti, S.-Y. Ye, C. W. Piker, and B. Cecconi. The influence of Titan on Saturn kilometric radiation. *Ann. Geophys.*, 28:395–406, 2010a.
- J. D. Menietti, P. H. Yoon, S.-Y. Ye, B. Cecconi, and A. M. Rymer. Source mechanism of Saturn narrowband emission. *Ann. Geophys.*, 28:1013–1021, 2010b.
- J. D. Menietti, R. L. Mutel, P. Schippers, S. Y. Ye, O. Santolík, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, L. Lamy, and B. Cecconi. Saturn Kilometric Radiation Near a Source Center on Day 73, 2008. In *Planetary, Solar and Heliospheric Radio Emissions (PRE VII)*, pages 87–95, 2011.
- J. D. Menietti, T. F. Averkamp, W. S. Kurth, S. Y. Ye, D. A. Gurnett, and B. Cecconi. Survey of Saturn electrostatic cyclotron harmonic wave intensity. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 122, August 2017.
- N. Meyer-Vernet and C. Perche. Tool kit for antennae and thermal noise near the plasma frequency. *J. Geophys. Res.*, 94:2405–2415, 1989.
- Reda Mohellebi, Hervé Petit, Patrick Loumeau, Hussein Fakhoury, B. Cecconi, and Milan Maksimovic. A high dynamic range Stacked ADCs receiver for long wavelength radio astronomy observations. In *IEEE International NEWCAS Conference*, pages 1–4, Trois-Rivières, Canada, 2014.
- M. Moncuquet, A. Lecacheux, N. Meyer-Vernet, B. Cecconi, and W. S. Kurth. Quasi thermal noise spectroscopy in the inner magnetosphere of Saturn with Cassini/RPWS: Electron temperatures and density. *Geophys. Res. Lett.*, 32:L20S02, June 2005.
- M. Moncuquet, N. Meyer-Vernet, A. Lecacheux, B. Cecconi, and W. S. Kurth. Quasi Thermal Noise in Bernstein Waves at Saturn. In *Planetary Radio Emissions VI*, pages 93–100, Garz, Austria, June 2006.
- F. Mottez, P. Zarka, and G. Voisin. Repeating fast radio bursts caused by small bodies orbiting a pulsar or a magnetar. *Astronomy and Astrophysics*, 644:A145, December 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202037751.
- R. L. Mutel, J. D. Menietti, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, P. Schippers, C. Lynch, L. Lamy, C. S. Arridge, and B. Cecconi. CMI growth rates for Saturnian Kilometric Radiation. *Geophys. Res. Lett.*, 37(L19105), 2010.
- K. Mylostna, V. Zakharenko, A. Konovalenko, V. Kolyadin, P. Zarka, J.-M. Grießmeier, G. Litvinenko, M. Sidorchuk, H. Rucker, G. Fischer, B. Cecconi, A. Coffre, L. Denis, V. Nikolaenko, and V. Shevchenko. STUDY OF SATURN ELECTROSTATIC DISCHARGES IN A WIDE RANGE OF TIME SCALES. *Odessa Astronomical Publications*, 26(2):1–3, 2013.
- Yuki Nakamura, Yasumasa Kasaba, Tomoki Kimura, Laurent Lamy, B. Cecconi, Georg Fischer, Ayumu Sasaki, Chihiro Tao, Fuminori Tsuchiya, Hiroaki Misawa, Atsushi Kumamoto, and Akira Morioka. Seasonal variation of north–south asymmetry in the intensity of Saturn Kilometric Radiation from 2004 to 2017. *Planet. Space Sci.*, 178:104711, November 2019.
- M. Narang, P. Manoj, C. H. Ishwara Chandra, J. Lazio, T. Henning, M. Tamura, B. Mathew, N. Ujwal, and P. Mandal. In search of radio emission from exoplanets: GMRT observations of the binary system HD 41004. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 500(4):4818–4826, 11 2020. doi: 10.1093/mnras/staa3565. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3565>.
- A. Nass, K. Asch, S. van Gasselt, A. P. Rossi, S. Besse, B. Cecconi, A. Frigeri, T. Hare, H. Hargitai, and N. Manaud. Planetary and Space Science. *Planetary and Space Science*, 204:105269, September 2021.

- J. D. Nichols, E. J. Bunce, J. T. Clarke, S. W. H. Cowley, J.-C. Gérard, D. Grodent, and W. R. Pryor. Response of Jupiter's UV auroras to interplanetary conditions as observed by the Hubble Space Telescope during the Cassini flyby campaign. *J. Geophys. Res.*, 112(A02203):1–18, 2007.
- J. D. Nichols, B. Cecconi, J. T. Clarke, S. W. H. Cowley, J.-C. Gérard, A. Grocott, D. Grodent, L. Lamy, and P. Zarka. Variation of Saturn's UV aurora with SKR phase. *Geophys. Res. Lett.*, 37:L15102, 2010.
- J. C. Novaco and L. W. Brown. Nonthermal galactic emission below 10 MHz. *Astrophys. J.*, 221:114–123, 1978.
- T. Ono, A. Kumamoto, Y. Kasahara, Y. Yamaguchi, A. Yamaji, T. Kobayashi, S. Oshigami, H. Nakagawa, Y. Goto, K. Hashimoto, Y. Omura, T. Imachi, H. Matsumoto, and H. Oya. The Lunar Radar Sounder (LRS) Onboard the KAGUYA (SELENE) Spacecraft. *Space Sci. Rev.*, 154(1-4):145–192, August 2010.
- P. Osuna, I. Ortiz, J. Lusted, P. Dowler, A. Szalay, Y. Shirasaki, M. A. Nieto-Santisteban, M. Ohishi, W. O'Mullane, VOQL-TEG Group, and VOQL Working Group. IVOA Astronomical Data Query Language Version 2.00. IVOA Recommendation 30 October 2008, October 2008.
- T. H. Oswald, W. Macher, H. O. Rucker, G. Fischer, U. Taubenschuss, J.-L. Bougeret, A. Lecacheux, M. L. Kaiser, and K. Goetz. Various methods of calibration of the STEREO/Waves antennas. *Adv. Space. Res.*, 43:355–364, 2009.
- M. Panchenko, M. L. Khodachenko, A. G. Kislyakov, H. O. Rucker, J. Hanasz, M. L. Kaiser, S. D. Bale, L. Lamy, B. Cecconi, P. Zarka, and K. Goetz. Daily variations of auroral kilometric radiation observed by STEREO. *Geophys. Res. Lett.*, 36:L06102, 2009.
- M. Panchenko, W. Macher, H. Rucker, G. Fischer, T. H. Oswald, B. Cecconi, and M. Maksimovic. In-flight calibration of STEREO-B/Waves antenna system. *Radio Sci.*, 49:146–156, April 2014.
- J. L. Pawsey. Observation of Million Degree Thermal Radiation from the Sun at a Wavelength of 1.5 Metres. *Nature*, 158:633–634, November 1946. doi: 10.1038/158633a0.
- D. Pérez-Suárez, S. A. Maloney, P. A. Higgins, D. S. Bloomfield, P. T. Gallagher, G. Pierantoni, X. Bonnin, B. Cecconi, V. Alberti, K. Bocchialini, M. Dierckxsens, A. Opitz, A. Blanc, J. Abouadarham, R. B. Bentley, J. Brooke, B. Coghlan, A. Csillaghy, C. Jacquy, B. Lavraud, and M. Messerotti. Studying Sun–Planet Connections Using the Heliophysics Integrated Observatory (HELIO). *Sol. Phys.*, 280(2):603–621, September 2012.
- S. T. Peters, D. M. Schroeder, and A. Romero-Wolf. Passive radio sounding to correct for Europa's ionospheric distortion of VHF signals. *Planetary and Space Science*, 187:104925, August 2020.
- C. Piker, L. Granroth, J. Mukherjee, D. A. Pisa, B. Cecconi, A. Kopf, and J. Faden. Lightweight federated data networks with das2 tools. *Earth and Space Science Open Archive*, page 1, 2019. doi: 10.1002/essoar.10500359.1. URL <https://www.essoar.org/doi/abs/10.1002/essoar.10500359.1>.
- C. C. Porco, R. A. West, S. Squyres, A. McEwen, P. Thomas, C. D. Murray, A. Del Genio, A. P. Ingersoll, T. V. Johnson, G. Neukum, J. Veverka, L. Dones, A. Brahic, J. A. Burns, V. Haemmerle, B. Knowles, D. Dawson, T. Roatsch, K. Beurle, and W. Owen. Cassini imaging science: Instrument characteristics and capabilities and anticipated scientific investigations at saturn. *Space Sci. Rev.*, 115:363–497, 2004. doi: 10.1007/s11214-004-1456-7.
- A. Preite-Martinez, M. Louys, B. Cecconi, S. Derriere, F. Ochsenbein, S. Erard, and M. Demleitner. UCD1+ controlled vocabulary - Updated List of Terms Version 1.4. Technical Report EN-UCDlist-1.4-20210616, IVOA, June 2021.
- D. S. Prinsloo, M. Ruiter, M. A. Arts, J. van der Marel, A. J. Boonstra, Gert Kruithof, M. Wise, H. Falcke, M. Klein-Wolt, Hanna Rothkaehl, B. Cecconi, and J. Ping. EMI Modelling of en 80 kHz to 80 MHz Wideband Antenna and Low-Noise Amplifier for Radio Astronomy in Space. In *EuCAP-2018*, October 2017.
- M. Pulupa, S. D. Bale, S. T. Badman, J. W. Bonnell, A. W. Case, T. Dudok de Wit, K. Goetz, P. R. Harvey, A. M. Hegedus, J. C. Kasper, K. E. Korreck, V. Krasnoselskikh, D. A. Larson, A. Lecacheux, R. Livi, R. J. MacDowall, M. Maksimovic, D. A. M. Malaspina, J. C. Martínez Oliveros, N. Meyer-Vernet, M. Moncuquet, M. Stevens, and P. Whittlesey. Statistics and Polarization of Type III Radio Bursts Observed in the Inner Heliosphere. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 246(2):0–0, January 2020.
- J. L. Rauch, P. Henri, J. E. Wahlund, O. Le Duff, O. Sene, F. Colin, D. Lagoutte, N. Gilet, L. Ahlen, J. Bergman, R. Gill, and W. Puccio. Electron Density Measurement on JUICE Mission by Mutual Impedance Technique: MIME Instrument as a Part of RPWI Consortium. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2017–518, September 2017.
- M. J. Reiner, M. D. Desch, M. L. Kaiser, R. M. Manning, J. Fainberg, and R. G. Stone. Elliptically polarized bursty radio emissions from Jupiter. *Geophys. Res. Lett.*, 22(4):345–348, 1995.

- M. J. Reiner, J. Fainberg, M. L. Kaiser, and J.-L. Bougeret. Circular Polarization Observed in Interplanetary Type III Radio Storms. *Sol. Phys.*, 241(2):351–370, 2007.
- M. J. Reiner, K. Goetz, J. Fainberg, M. L. Kaiser, M. Maksimovic, B. Cecconi, S. Hoang, S. D. Bale, and J.-L. Bougeret. Multipoint Observations of Solar Type III Radio Bursts from STEREO and Wind. *Sol. Phys.*, 259:255–276, 2009.
- A. Retinò, M. Mansour, T. Chust, O. Le Contel, P. Canu, F. Sahraoui, D. Alison, L. Varizat, M. Lebossard, A. Jeandet, N. Geyskens, C. Berthod, M. Charriet, V. Leray, J.-D. Techer, G. Sou, B. Cecconi, J. Bergman, and J.-E. Wahlund. The Search-Coil Magnetometer onboard ESA JUICE mission. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU General Assembly Conference Abstracts, page 9398, April 2019.
- D. Aaron Roberts, James Thieman, Vincent Génot, Todd King, Michel Gangloff, Chris Perry, Chiu Wiegand, D. A. Rren De Zeeuw, Shing F Fung, B. Cecconi, and Sebastian Hess. The SPASE Data Model: A Metadata Standard for Registering, Finding, Accessing, and Using Heliophysics Data Obtained From Observations and Modeling. *Space Weather*, 16(12):1899–1911, December 2018.
- A. Romero-Wolf, S. Vance, F. Maiwald, E. Heggy, P. Ries, and K. Liewer. A Passive Probe for Subsurface Oceans and Liquid Water in Jupiter’s Icy Moons. *Icarus*, 248:463–477, 2015.
- A. P. Rouillard, R. F. Pinto, A. Vourlidis, A. De Groof, W. T. Thompson, A. Bemporad, S. Dolei, M. Indurain, E. Buchlin, C. Sasso, D. Spadaro, K. Dalmasse, J. Hirzberger, I. Zouganelis, A. Strugarek, A. S. Brun, M. Alexandre, D. Berghmans, N. E. Raouafi, T. Wiegelmann, P. Pagano, C. N. Arge, T. Nieves-Chinchilla, M. Lavarra, N. Poirier, T. Amari, A. Aran, V. Andretta, E. Antonucci, A. Anastasiadis, F. Auchère, L. Bellot Rubio, B. Nicula, X. Bonnin, M. Bouchemit, E. Budnik, S. Caminade, B. Cecconi, J. Carlyle, I. Cernuda, J. M. Davila, L. Etesi, F. Espinosa Lara, A. Fedorov, S. Fineschi, A. Fludra, V. Génot, M. K. Georgoulis, H. R. Gilbert, A. Giunta, R. Gómez-Herrero, S. Guest, M. Haberleiter, D. Hassler, C. J. Henney, R. A. Howard, T. S. horbury, M. Janvier, S. I. Jones, K. Kozarev, E. Kraaikamp, A. Kouloumvakos, S. Krucker, A. Lagg, J. Linker, B. Lavraud, P. Louarn, M. Maksimovic, S. Maloney, G. Mann, A. Masson, D. Müller, H. Önel, P. Osuna, D. Orozco Suarez, C. J. Owen, A. Papaioannou, D. Pérez-Suárez, J. Rodríguez-Pacheco, S. Parenti, E. Pariat, H. Peter, S. Plunkett, J. Pomoell, J. M. Raines, T. L. Riethmüller, N. Rich, L. Rodriguez, M. Romoli, L. Sanchez, S. K. Solanki, O. C. St Cyr, T. Straus, R. Susino, L. Teriaca, J. C. del Toro Iniesta, R. Ventura, C. Verbeeck, N. Vilmer, A. Warmuth, A. P. Walsh, C. Watson, D. Williams, Y. Wu, and A. N. Zhukov. Models and data analysis tools for the Solar Orbiter mission. *Astronomy and Astrophysics*, 642:A2, September 2020.
- H. O. Rucker, W. Macher, R. M. Manning, and H.-P. Ladreiter. Cassini model rheometry. *Radio Sci.*, 31: 1299–1312, 1996.
- V. Ryabov, P. Zarka, S. L. G. Hess, A. Konovalenko, G. Litvinenko, V. Zakharenko, V. Shevchenko, and B. Cecconi. Fast and slow frequency-drifting millisecond bursts in Jovian decametric radio emissions. *Astronomy and Astrophysics*, pages 1–13, June 2014.
- M. Sampl, W. Macher, C. Gruber, T. Oswald, M. Kapper, H. O. Rucker, and M. Mogilevsky. High-frequency performance of electric field sensors aboard the RESONANCE satellite. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 4(1):81–88, 2015.
- O. Santolík, M. Parrot, and F. Lefeuvre. Singular value decomposition methods for wave propagation analysis. *Radio Sci.*, 38(1):1010, 2003.
- A. M. M. Scaife. Big telescope, big data: towards exascale with the Square Kilometre Array. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 378(20190060):1–6, January 2020.
- P. Schippers, C. S. Arridge, J. D. Menietti, D. A. Gurnett, L. Lamy, B. Cecconi, D. G. Mitchell, N. André, W. S. Kurth, S. Grimald, M. K. Dougherty, A. J. Coates, N. Krupp, and D. T. Young. Auroral electron distributions within and close to the Saturn kilometric radiation source region. *J. Geophys. Res.*, 116(A5): 3600, May 2011.
- P. Schippers, M. Moncuquet, and B. Cecconi. Cassini/RPWS/HFR LESIA/Kronos QTN Data Collection (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2013a. doi: 10.25935/B9NF-9558.
- P. Schippers, M. Moncuquet, N. Meyer-Vernet, and A. Lecacheux. Core electron temperature and density in the innermost Saturn’s magnetosphere from HF power spectra analysis on Cassini. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118(11):7170–7180, November 2013b.
- L. M. Serrano, M. Oshagh, H. M. Cegla, S. C. C. Barros, N. C. Santos, J. P. Faria, and B. Akınanmi. Can we detect the stellar differential rotation of WASP-7 through the Rossiter–McLaughlin observations? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493(4):5928–5943, 03 2020. doi: 10.1093/mnras/staa553. URL <https://doi.org/10.1093/mnras/staa553>.

- V. E. Shaposhnikov, V. V. Kocharovskiy, V. V. Kocharovskiy, H.-P. Ladreiter, H. O. Rucker, and V. V. Zaitsev. Effect of limiting polarization in the jovian inner magnetosphere. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 41 (2):177–193, 1998.
- T. S. Stallard, S. Miller, H. Melin, M. Lystrup, M. K. Dougherty, and N. Achilleos. Saturn’s auroral/polar H_3^+ infrared emission. (I) General morphology and ion velocity structure. *Icarus*, 189:1–13, 2007a.
- T. S. Stallard, C. G. A. Smith, S. Miller, H. Melin, M. Lystrup, A. D. Aylward, N. Achilleos, and M. K. Dougherty. Saturn’s auroral/polar H_3^+ infrared emission. (II) A comparison with plasma flow models. *Icarus*, 191:678–690, 2007b.
- J.-L. Steinberg, S. Hoang, and G. A. Dulk. Evidence of scattering effects on the sizes of interplanetary Type III radio bursts. *Astron. Astrophys.*, 150:205–216, 1985.
- U. Taubenschuss, H. O. Rucker, W. S. Kurth, B. Cecconi, P. Zarka, M. K. Dougherty, and J. T. Steinberg. Linear prediction studies for the solar wind and Saturn kilometric radiation. *Annales Geophysicae*, 24:3139–3150, 2006.
- U. Taubenschuss, B. Cecconi, and L. Lamy. Catalogue of Faraday Rotation patches identified in Saturn Kilometric Radiation (SKR) observations by Cassini/RPWS/HFR (Version 1.0) [Data Set]. *PADC/MASER*, 2021a. doi: 10.25935/R11G-6J63.
- U. Taubenschuss, L. Lamy, G. Fischer, D. Pisa, O. Santolík, J. Souček, W. S. Kurth, B. Cecconi, P. Zarka, and H. O. Rucker. The Faraday rotation effect in Saturn Kilometric Radiation observed by the CASSINI spacecraft. *Icarus*, 370:114661, 2021b. doi: 10.1016/j.icarus.2021.114661.
- Q. Taupin. Etude d’un radar passif pour le sondage de Ganymède et d’Europe . Technical report, IPAG & INP/PHELMA, Grenoble, France, October 2018.
- C. Tiburzi, L. Bondonneau, M. T. Lam, G. M. Shaifullah, J.-M. Grießmeier, Verbist J., R. A. Main, T. S. Bastian, E. P. Kontar, I. Cognard, J. Y. Donner, L. Guillemot, N. K. Porayko, P. Zucca, M. A. Krishnakumar, J. W. McKee, G. Theureau, B. Cecconi, P. Zarka, S. Corbel, J. N. Girard, A. A. Konovalenko, V. V. Zakharenko, O. Ulyanov, and P. L. Tokarsky. Frequency-dependent dispersion measure detected during the Solar approach of PSR J1022+1001. *Astronomy and Astrophysics*, pages 1–8, June 2021.
- Y. Tokarev, B. Cecconi, J.-L. Bougeret, A. Lecacheux, M. L. Kaiser, and W. S. Kurth. SURA-WAVES experiments: calibration of the Cassini/RPWS/HFR instrumentation. In *Planetary Radio Emissions VI*, pages 531–541, Graz, Austria, 2006. Graz, Austria, Planetary Radio Emissions VI.
- L. Trompet, Y. Geunes, T. Ooms, A. Mahieux, V. Wilquet, S. Chamberlain, S. Robert, I. R Thomas, S. Erard, B. Cecconi, P. Le Sidaner, and A. C Vandaele. Planetary and Space Science. *Planetary and Space Science*, pages 1–0, April 2017.
- J. D. Turner, P. Zarka, J.-M. Grießmeier, J. Lazio, B. Cecconi, J. Emilio Enriquez, J. N. Girard, R. Jayawardhana, L. Lamy, J. D. Nichols, and I. de Pater. The search for radio emission from the exoplanetary systems 55 Cancri, ν Andromedae, and τ Boötis using LOFAR beam-formed observations. *Astronomy and Astrophysics*, 645(A59):1–28, January 2021.
- M. P. van Haarlem, M. W. Wise, A. W. Gunst, G. Heald, J. P. McKean, J. W. T. Hessels, A. G. de Bruyn, R. Nijboer, J. Swinbank, R. fallows, M. Brentjens, A. Nelles, R. Beck, H. Falcke, R. Fender, J. Hörandel, L. V. E. Koopmans, G. Mann, G. Miley, H. Röttgering, B. W. Stappers, R. A. M. J. Wijers, S. Zaroubi, M. van den Akker, A. Alexov, J. Anderson, K. Anderson, A. van Ardenne, M. Arts, A. Asgekar, I. M. Avruch, F. Batejat, L. Bähren, M. E. Bell, M. R. Bell, I. van Bemmell, P. Bennema, M. J. Bentum, G. BERNARDI, P. Best, L. Birzan, A. Bonafede, A. J. Boonstra, R. Braun, J. Bregman, F. Breitling, R. H. van de Brink, J. Broderick, P. C. Broekema, W. N. Brouw, M. Bruggen, H. R. Butcher, W. van Cappellen, B. Ciardi, T. Coenen, J. Conway, A. Coolen, A. Corstanje, S. Damstra, O. Davies, A. T. Deller, R. J. Dettmar, G. van Diepen, K. Dijkstra, P. Donker, A. Doorduyn, J. Dromer, M. Drost, A. van Duin, J. Eislöffel, J. van Enst, C. Ferrari, W. Frieswijk, H. Gankema, M. A. Garrett, F. de Gasperin, M. Gerbers, E. de Geus, J.-M. Grießmeier, T. Grit, P. Gruppen, J. P. Hamaker, T. Hassall, M. Hoeft, H. A. Holties, A. Horneffer, A. van der Horst, A. van Houwelingen, A. Huijgen, M. Iacobelli, H. Intema, N. Jackson, V. Jelic, A. de Jong, E. Juette, D. Kant, A. Karastergiou, A. Koers, H. Kollen, V. I. Kondratiev, E. Kooistra, Y. Koopman, A. Koster, M. Kuniyoshi, M. Kramer, G. Kuper, P. Lambropoulos, C. Law, J. van Leeuwen, J. Lemaitre, M. Loose, P. Maat, G. Macario, S. Markoff, J. Masters, R. A. McFadden, D. McKay-Bukowski, H. Meijering, H. Meulman, M. Mevius, E. Middelberg, R. Millenaar, J. C. A. Miller-Jones, R. N. Mohan, J. D. Mol, J. Morawietz, R. Morganti, D. D Mulcahy, E. Mulder, H. Munk, L. Nieuwenhuis, R. van Nieuwpoort, J. E. Noordam, M. Norden, A. Noutsos, A. R. Offringa, H. Olofsson, A. Omar, E. Orru, R. Overeem, H. Paas, M. Pandey-Pommier, V. N. Pandey, R. Pizzo, A. Polatidis, D. Rafferty, S. Rawlings, W. Reich, J. P. de Reijer,

- J. Reitsma, G. A. Renting, P. Riemers, E. Rol, J. W Romein, J. Roosjen, M. Ruiter, A. Scaife, K. van der Schaaf, B. Scheers, P. Schellart, A. Schoenmakers, G. Schoonderbeek, M. Serylak, A. Shulevski, J. Sluman, O. Smirnov, C. Sobey, H. Spreeuw, M. Steinmetz, C. G. M. Sterks, H. J. Stiepel, K. Stuurwold, M. Tagger, Y. Tang, C. Tasse, I. Thomas, S. Thoudam, M. C. Toribio, B. van der Tol, O. Usov, M. van Veelen, A. J. van der Veen, S. ter Veen, J. P. W. Verbiest, R. Vermeulen, N. Vermaas, C. Vocks, C. Vogt, M. de Vos, E. van der Wal, R. van Weeren, H. Weggemans, P. Weltevrede, S. White, S. J. Wijnholds, T. Wilhelmsson, O. Wucknitz, S. Yatawatta, P. Zarka, A. Zensus, and J. van Zwieten. LOFAR: The LOW-Frequency ARray. *Astron. Astrophys.*, 556:A2, August 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201220873.
- A. Vecchio, M. Maksimovic, V. Krupar, X. Bonnin, A. Zaslavsky, P.-L. Astier, M. Dekkali, B. Cecconi, S. D Bale, T. Chust, E. Guilhem, Yu. V. Khotyaintsev, V. Krasnoselskikh, M. Kretzschmar, E. Lorfèvre, D. Plettemeier, J. Souček, M. Steller, Š. Stverák, P. Travnicek, and A. Vainas. The Solar Orbiter/RPW antenna calibration in the radio domain and application to type III burst observations. *Astronomy and Astrophysics*, pages 1–12, June 2021.
- D. F. Vogl, B. Cecconi, W. Macher, P. Zarka, H.-P. Ladreiter, P. Fédou, A. Lecacheux, T. F. Averkamp, G. Fischer, H. O. Rucker, D. A. Gurnett, W. S. Kurth, and G. B. Hospodarsky. In-flight calibration of the Cassini-Radio and Plasma Wave Science (RPWS) antenna system for direction-finding and polarization measurements. *J. Geophys. Res.*, 109:A09S17, 2004.
- J. E. Wahlund. The Radio & Plasma Wave Investigation (RPWI) for JUICE. In *European Planetary Science Congress*, pages EPSC2013–637, September 2013.
- J. E. Waters, C. M. Jackman, L. Lamy, B. Cecconi, D. K. Whiter, X. Bonnin, and K. Issautier. Empirical selection of Auroral Kilometric Radiation during a multipoint remote observation with Wind and Cassini. *J. geophys. Res. Space Physics*, pages 1–38, August 2021.
- R. S. Weigel, J. Vandegriff, J. B. Faden, T. A. King, D. A. Roberts, B. Harris, R. M. Candey, N. Lal, S. A. Boardson, D. Lindholm, C. Lindholm, T. Baltzer, L. E. Brown, E. W. Grimes, B. Cecconi, V. Génot, B. Renard, A. Masson, and B. Martinez. Hapi: An api standard for accessing heliophysics time series data. *J. Geophys. Res.*, 126(e2021JA029534), 2021. doi: 10.1029/2021JA029534.
- M. D. Wilkinson, M. Dumontier, I. J. Aalbersberg, G. Appleton, M. Axton, A. Baak, N. Blomberg, J.-W. Boiten, L. B. da Silva Santos, P. E. Bourne, J. Bouwman, A. J. Brookes, T. Clark, M. Crosas, I. Dillo, O. Dumon, S. Edmunds, C. T. Evelo, R. Finkers, A. Gonzalez-Beltran, A. J. G. Gray, P. Groth, C. Goble, J. S. Grethe, J. Heringa, P. A. C. t Hoen, R. Hooft, T. Kuhn, R. Kok, J. Kok, S. J. Lusher, M. E. Martone, A. Mons, A. L. Packer, B. Persson, P. Rocca-Serra, M. Roos, R. van Schaik, S.-A. Sansone, E. Schultes, T. Sengstag, T. Slater, G. Strawn, M. A. Swertz, M. Thompson, J. van der Lei, E. van Mulligen, J. Velterop, A. Waagmeester, P. Wittenburg, K. Wolstencroft, J. Zhao, and B. Mons. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(160018), March 2016.
- C. S. Wu and L. C. Lee. A theory of the terrestrial kilometric radiation. *Astrophys. J.*, 230:621–626, 1979.
- S. Y. Wu, S. Y. Ye, G. Fischer, J. Wang, M. Long, J. D. Menietti, B. Cecconi, and W. S. Kurth. Statistical Study of Spatial Distribution and Polarization for Saturn Narrowband Emissions. *The Astrophysical Journal*, 0(0):1–14, July 2021a.
- S. Y. Wu, S. Y. Ye, Fischer G., J. Wang, M. Long, J. D. Menietti, B. Cecconi, and W. S. Kurth. Statistical Study of Spatial Distribution and Polarization for Saturn Narrowband Emissions. Supplementary material: Event catalogue (Version 1.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2021b. doi: 10.25935/ZMMZ-CA38.
- Jingye Yan, Ji Wu, Xiaoyu Hong, Tao An, Jianhua Zheng, Ding Chen, Xiangping Wu, Xuelei Chen, Di Li, Yihua Yan, Maohai Huang, Linjie Chen, Albert-Jan Boonstra, Michael Garrett, Leonid Gurvits, Heino Falcke, Marc Klein-Wolt, Leon V Koopmans, Mark Bentum, B. Cecconi, P. Zarka, Reza Ansari, Andrea Ferrara, Hanna Rothkaehl, J. Bergman, and Graham Woan. DSL: A concept of Low Frequency radio Telescope at Lunar Orbit. In *Moon 2020 - 2030*, January 2017.
- S.-Y. Ye, D. A. Gurnett, G. Fischer, B. Cecconi, J. D. Menietti, W. S. Kurth, Z. Wang, G. B. Hospodarsky, P. Zarka, and A. Lecacheux. Source Location of Narrowband Radio Emissions Detected at Saturn. *J. Geophys. Res.*, 114:A06219, 2009.
- S.-Y. Ye, J. D. Menietti, G. Fischer, Z. Wang, B. Cecconi, D. A. Gurnett, and W. S Kurth. Z mode waves as the source of Saturn narrowband radio emissions. *J. Geophys. Res.*, 115:A08228, 2010.
- D. T. Young, J.-J. Berthelier, M. F. Blanc, J. L. Burch, A. J. Coates, R. Goldstein, M. Grande, T. W. Hill, R. E. Johnson, V. Kelha, D. J. McComas, E. C. Jr Sittler, K. R. Svenes, K. Szego, P. Tanskanen, K. Ahola, D. Anderson, S. Bakshi, R. A. Baragiola, B. L. Barraclough, R. K. Black, S. J. Bolton, T. Booker, R. Bowman,

- P. Casey, F. J. Crary, D. Delapp, G. Dirks, N. Eaker, H. Funsten, F. D. Furman, J. T. Gosling, H. Hannula, C. Holmlund, H. Huomo, J. M. Illiano, P. Jensen, MA Johnson, DR Linder, T. Luntama, S. Maurice, KP McCabe, K. Mursula, B. T. Narheim, J. E. Nordholt, A. Preece, J. Rudzki, A. Ruitberg, K. Smith, S. Szalai, MF Thomsen, K. Viherkanto, J. Vilppola, T. Vollmer, T. E. Wahl, M. Wüest, T. Ylikorpi, and C. Zinsmeyer. Cassini plasma spectrometer investigation. *Space Sci. Rev.*, 114:1–112, 2007.
- V. Zakharenko, C. Mylostna, A. Konovalenko, P. Zarka, G. Fischer, J.-M. Grießmeier, G. Litvinenko, H. O. Rucker, M. Sidorchuk, B. P. Ryabov, D. Vavriv, V. Ryabov, B. Cecconi, A. Coffre, L. Denis, C. Fabrice, L. Pallier, J. Schneider, R. Kozhyn, V. Vinogradov, D. Mukha, R. Weber, V. Shevchenko, and V. Nikolaenko. Ground-based and spacecraft observations of lightning activity on Saturn. *Planetary and Space Science*, 61(1):53–59, February 2012.
- P. Zarka, B. Cecconi, and W. S. Kurth. Jupiter’s low-frequency radio spectrum from Cassini/Radio and Plasma Wave Science (RPWS) absolute flux density measurements. *J. Geophys. Res.*, 109:A09S15, 2004.
- P. Zarka, L. Lamy, B. Cecconi, R. Prangé, W. S. Kurth, and H. O. Rucker. Modulation of Saturn’s radio clock by solar wind speed. *Nature Physics*, 450(7167):265–267, 2007.
- P. Zarka, M. Tagger, and B. Cecconi, editors. *Radioastronomie Basses Fréquences, Ecole thématique du CNRS, Goutelas (Loire)*, 2011. Radioastronomie Basses Fréquences, Ecole thématique du CNRS, Goutelas (Loire), Proceedings of the conference held 4 - 8 juin 2007. Edited by P. Zarka, M. Tagger, and B. Cecconi. Paris: Observatoire de Paris et Société Française d’Astronomie et d’Astrophysique (SF2A), 2011.
- P. Zarka, J.-L. Bougeret, C. Briand, B. Cecconi, H. Falcke, J. Girard, J.-M. Grießmeier, S. L. G. Hess, M. Klein-Wolt, A. Konovalenko, L. Lamy, D. Mimoun, and A. Aminaei. Planetary and exoplanetary low frequency radio observations from the Moon. *Planetary and Space Science*, 74(1):156–166, December 2012.
- P. Zarka, M. S Marques, C. Louis, V. B Ryabov, L. Lamy, E. Echer, and B. Cecconi. Jupiter radio emission induced by Ganymede and consequences for the radio detection of exoplanets. *Astronomy and Astrophysics*, 618:A84, October 2018.
- P. Zarka, B. Cecconi, F. Magalhaes, C. K. Louis, and L. Lamy. Cassini RPWS/HFR Jupiter Encounter Calibrated Dataset (Version 2.0) [Data set]. *PADC/MASER*, 2021a. doi: 10.25935/2F8G-C505.
- P. Zarka, F. P. Magalhães, M. S. Marques, C. K. Louis, E. Echer, L. Lamy, B. Cecconi, and R. Prangé. Jupiter’s auroral radio emissions observed by Cassini: rotational versus solar wind control, and components identification. *J. geophys. Res. Space Physics*, pages 1–44, August 2021b.
- A. Zaslavsky, N. Meyer-Vernet, S. Hoang, M. Maksimovic, and S. D. Bale. On the antenna calibration of space radio instruments using the galactic background: General formulas and application to STEREO/WAVES. *Radio Sci.*, 46, 2011.
- I. Zouganelis, A. De Groof, A. P Walsh, D. R Williams, D. Müller, O. C St Cyr, F. Auchère, D. Berghmans, A. Fludra, T. S horbury, R. A Howard, S. Krucker, M. Maksimovic, C. J Owen, J. Rodriguez-Pacheco, M. Romoli, S. K Solanki, C. Watson, L. Sanchez, J. Lefort, P. Osuna, H. R Gilbert, T. Nieves-Chinchilla, L. Abbo, O. Alexandrova, A. Anastasiadis, V. Andretta, E. Antonucci, T. Appourchaux, A. Aran, C. N Arge, G. Aulanier, D. Baker, S. D Bale, M. Battaglia, L. Bellot Rubio, A. Bemporad, M. Berthomier, K. Bocchialini, X. Bonnin, A. S Brun, R. Bruno, E. Buchlin, J. Büchner, R. Bucik, F. Carcaboso, R. Carr, I. Carrasco-Blázquez, B. Cecconi, I. Cernuda Cangas, C. H K Chen, L. P Chitta, T. Chust, K. Dalmasse, R. D’Amicis, V. Da Deppo, R. De Marco, S. Dolei, L. Dolla, T. Dudok de Wit, L. Van Driel-Gesztelyi, J. P Eastwood, F. Espinosa Lara, L. Etesi, A. Fedorov, F. Félix-Redondo, S. Fineschi, B. Fleck, D. Fontaine, N. J Fox, A. Gandorfer, V. Génot, M. K Georgoulis, S. Gissot, A. Giunta, L. Gizon, R. Gómez-Herrero, C. Gontikakis, G. Graham, L. Green, T. Grundy, M. Haberreiter, L. K Harra, D. M Hassler, J. Hirzberger, G. C Ho, G. Hurford, D. Innes, K. Issautier, A. W James, N. Janitzek, M. Janvier, N. Jeffrey, J. Jenkins, Yu. V. Khotyaintsev, K-L Klein, E. P Kontar, I. Kontogiannis, C. Krafft, V. Krasnoselskikh, M. Kretschmar, N. Labrosse, A. Lagg, F. Landini, B. Lavraud, I. Leon, S. T Lepri, G. R Lewis, P. Liewer, J. Linker, S. Livi, D. M Long, P. Louarn, O. Malandraki, S. Maloney, V. Martinez-Pillet, M. Martinovic, A. Masson, S. Matthews, L. Matteini, N. Meyer-Vernet, K. Moraitis, R. J Morton, S. Musset, G. Nicolaou, A. Nindos, H. O’Brien, D. Orozco Suarez, M. Owens, M. Pancrazzi, A. Papaioannou, S. Parenti, E. Pariat, S. Patsourakos, D. Perrone, H. Peter, R. F Pinto, C. Plainaki, D. Plettemeier, S. P Plunkett, J. M Raines, N. Raouafi, H. Reid, A. Retino, L. Rezeau, P. Rochus, L. Rodriguez, L. Rodriguez-Garcia, M. Roth, A. P Rouillard, F. Sahraoui, C. Sasso, J. Schou, U. Schühle, L. Sorriso-Valvo, J. Soucek, D. Spadaro, M. Stangalini, D. Stansby, M. Steller, A. Strugarek, Š Štverák, R. Susino, D. Telloni, C. Terasa, L. Teriaca, S. Toledo-Redondo, J. C del Toro Iniesta, G. Tsiropoula, A. Tsounis, K. Tziotziou, F. Valentini, A. Vaivads, A. Vecchio, M. Velli, C. Verbeeck, A. Verdini, D. Verscharen, N. Vilmer, A. Vourlidas, R. Wicks, R. F Wimmer-Schweingruber, T. Wiegmann, P. R Young,

and A. N Zhukov. The Solar Orbiter Science Activity Plan. *Astronomy and Astrophysics*, 642:A3, September 2020.