



'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150- 1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Observations radio du Soleil à Nançay: résultats récents et développements

K.-L. Klein, A. Kerdraon**, A. Lecacheux c****

LESIA, UMR 8109, Observatoire de Paris, CNRS, Universités Pierre & Marie Curie et Paris-Diderot, 92195 Meudon

** ludwig.klein@obspm.fr*

*** alain.kerdraon@obspm.fr*

**** alain.lecacheux@obspm.fr*

Mots-clefs: radioastronomie – Soleil – météorologie de l'espace ; radio astronomy – Sun – space weather.

Résumé

Cette contribution donne un aperçu d'observations radioastronomiques du Soleil. Il présente des travaux récents mettant en évidence la différence des températures des électrons et protons dans la couronne et illustre les premières observations d'un sursaut solaire par un nouveau spectrographe. La station de Nançay dispose d'un ensemble unique d'instruments pour la recherche en physique des relations Soleil-Héliosphère et ses applications à la météorologie de l'espace.

Introduction

La recherche sur la physique de la couronne solaire et ses relations avec l'Héliosphère revêt un intérêt croissant aussi bien pour des questions d'astrophysique que pour la compréhension des interactions entre perturbations solaires et l'environnement spatial de la Terre. Le projet *Solar Orbiter* de l'ESA, avec une sonde qui s'approchera du Soleil à 0,3 unités astronomiques, en témoigne.

Les émissions radio du Soleil, à des longueurs d'onde allant du millimètres à plusieurs mètres, ont plusieurs origines : une émission permanente, le rayonnement de freinage des électrons thermiques de la chromosphère et de couronne solaires, le rayonnement en ondes décimétriques-métriques des électrons accélérés dans les régions actives et le rayonnement sporadique, par sursauts, produit lors d'événements éruptifs. En ondes décimétriques-métriques, ces émissions proviennent de la couronne, dans une gamme d'altitudes entre environ 0,1 et un rayon solaire (R_{\odot}) au-dessus de la couche visible, la photosphère. Ces régions sont à la charnière entre le champ magnétique fermé de la basse atmosphère solaire et les structures ouvertes vers l'espace interplanétaire.

1. Observations du Soleil à Nançay

La radioastronomie utilise deux techniques d'observation : par la spectrographie du Soleil dans son ensemble, sans résolution spatiale, on observe les sursauts solaires, émis par des électrons accélérés à des énergies suprathermiques, occasionnellement relativistes. Puis, d'autres instruments, fonctionnant la plupart du temps en mode interférométrique, permettent la cartographie du Soleil à des fréquences choisies. La station de radioastronomie de Nançay dispose de deux types d'instruments : le Radiohéliographe (NRH, [2]), faisant de l'imagerie à certaines fréquences entre 450 et 150 MHz et le Réseau Décamétrique (NDA, [3]), qui observe des spectres à haute sensibilité et haute dynamique dans la gamme 70-20 MHz. Il manquait, jusqu'en 2012, un spectrographe à plus haute fréquence couvrant le domaine du Radiohéliographe.

2. Quelques illustrations

2.1. Emission thermique et température de la couronne solaire

La couronne calme est un plasma composé d'électrons, protons et quelques ions lourds. L'émission radioélectrique, par rayonnement de freinage des électrons, met en évidence sa structure en densité et sa température. Les Figures 1.a, b montrent deux cartes de la couronne, un jour donné, à deux fréquences différentes. Mercier et Chambe [1], grâce à un grand effort de calibration du Radiohéliographe, ont obtenu ces images de haute qualité utilisant la rotation de la Terre pendant plusieurs heures pour améliorer la couverture du plan (u, v) . A 432 MHz, la couronne est clairement structurée en zones brillantes, montrant le plasma dans des régions à champ magnétique fermé, et quelques régions sombres, de

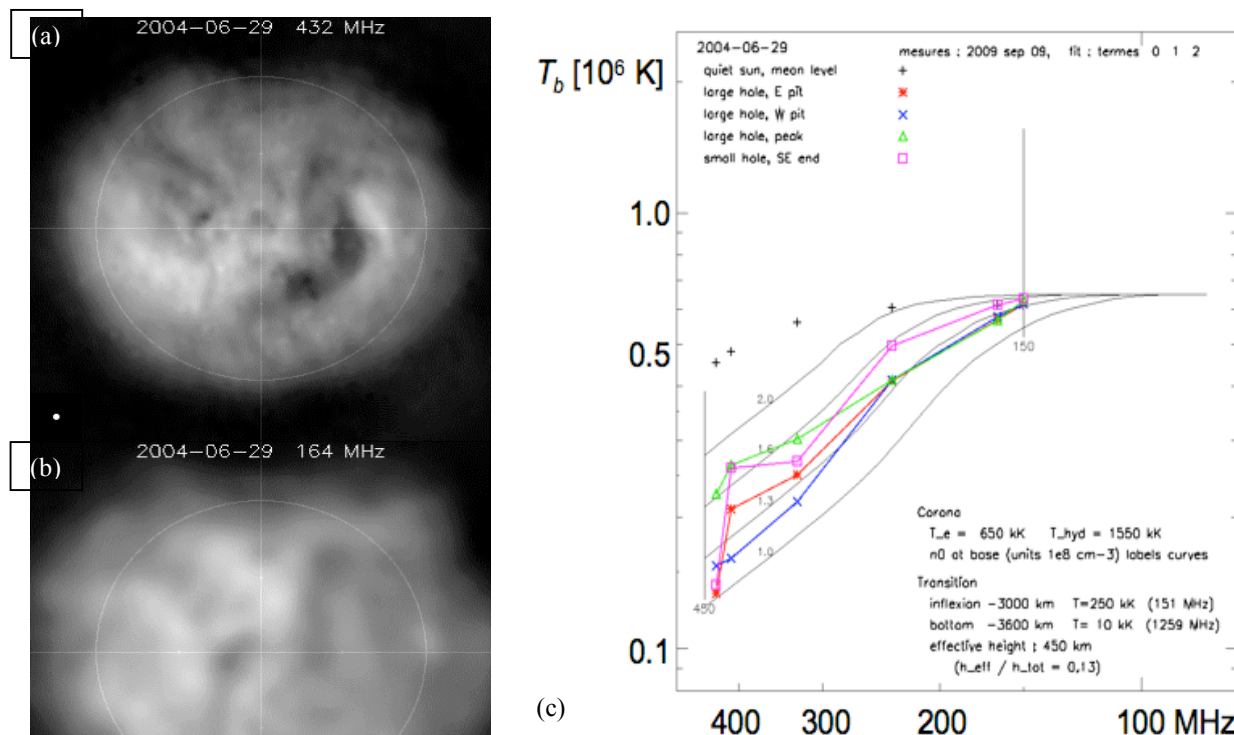


Fig.1 : Observations de la couronne solaire calme en ondes dm-m, avec le Radiohéliographe de Nançay : (a), (b) : cartes à deux fréquences (432 et 164 MHz) ; (c) : Spectres de température de brillance de différentes structures. Mercier et Chambe [1].

faible densité. Les régions les plus sombres sont deux trous coronaux, où le champ magnétique est ouvert vers l'espace interplanétaire et laisse s'échapper le plasma coronal. L'image à 164 MHz, émission produite plus haut dans la couronne qu'à 432 MHz, ne montre pas les trous coronaux, probablement du fait de la réfraction et réflexion du rayonnement.

La cartographie à plusieurs fréquences (de 5 à 10) a permis de déterminer la densité et la température de la couronne. Les spectres de température de brillance de différentes structures coronales (Fig. 1.c) sont typiques du rayonnement de freinage, avec une partie décroissante vers les hautes fréquences (partie optiquement mince) et une partie plate aux basses fréquences. Puisque les différentes fréquences sont émises à différentes altitudes de la couronne, ce spectre requiert un modèle de l'évolution de la densité électronique avec l'altitude. En accord avec d'autres observations, on choisit un modèle hydrostatique avec une température moyenne, supposée constante dans la couronne, de $1,5 \times 10^6$ K. La partie basses fréquences du spectre en température de brillance révèle la température électronique, avec un résultat surprenant : elle est de seulement $0,65 \times 10^6$ K, nettement inférieure à la température moyenne, donc à la température des protons. Ce déséquilibre entre les températures des deux constituants majoritaires de la couronne n'avait pas encore été mis en évidence par d'autres techniques. Il témoigne du caractère faiblement collisionnel de la couronne.

2.2. Surveillance de l'activité éruptive du Soleil et météorologie de l'espace

Les sursauts radio montrent des signatures d'électrons accélérés au cours des éruptions et éjections de masse, par des processus à petite échelle dans les régions actives et des ondes de choc. Ils sont de ce fait des traceurs de processus dynamiques dont les conséquences interplanétaires peuvent aussi affecter la Terre. L'interférence possible de perturbations d'origine solaire notamment avec la technologie embarquée dans l'espace fait que la compréhension des processus éruptifs n'est plus l'enjeu exclusif de la recherche astrophysique. Un nombre croissant d'acteurs en dehors de la recherche fondamentale s'intéresse au développement de capacités prédictives dans le cadre de la météorologie de l'espace.

Un nouveau radio spectrographe a été mis en service à Nançay en 2012, avec un soutien de l'Armée de l'Air pour la construction du récepteur. Le spectrographe ORFEES (*Observations Radio pour FEDOME et l'Etude des Eruptions Solaires*) opère entre 130 et 1000 MHz. L'Armée de l'Air travaille en effet sur un démonstrateur de météorologie de l'espace (projet FEDOME : *Fédération de données pour la météorologie de l'espace*). L'Observatoire de Paris fournit des données de surveillance du Soleil et de l'expertise pour leur interprétation. L'instrument possède une antenne parabolique de 5 m de diamètre et un système focal de dipôles log-périodiques. Le domaine spectral est séparé en dix bandes de 200 MHz. Dix spectres sont enregistrés par seconde (intensité totale et polarisation circulaire). Cet instrument a été conçu pour observer le Soleil même en présence de perturbations fortes, provenant notamment de la télévision et des téléphones portables. Les observations seront disponibles publiquement.

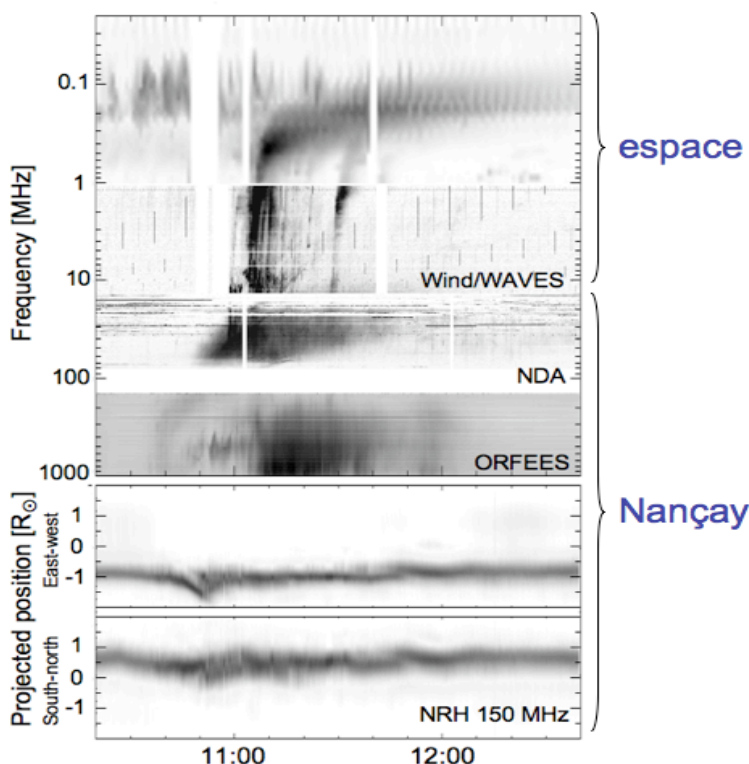


Fig. 2 : Evolution temporelle d'un sursaut radio observé avec plusieurs instruments. Du bas en haut : (1), (2) images 1D dans les directions est-ouest et sud-nord obtenues à partir des images du Radiohéliographe (NRH); (3) spectre décimétrique-métrique (ORFEES); (4) spectre métrique (Réseau Décimétrique, NDA); (5), (6) spectre décimétrique-kilométrique observé depuis l'espace (expérience WAVES sur le satellite Wind). Echelle inverse de couleurs : les tons sombres indiquent les émissions brillantes.

La première observation d'un sursaut radio majeur avec plusieurs instruments, y compris ORFEES, est montrée en Fig. 2 : les spectrographes ORFEES (1000-130 MHz) et décimétrique (NDA) couvrent le spectre en ondes décimétrique-métriques, observable depuis le sol, tandis que le spectrographe WAVES embarqué sur le satellite Wind [4] observe les sursauts dans la haute couronne et l'espace interplanétaire. La combinaison de ces trois instruments permet de suivre les électrons énergétiques entre la basse couronne (1000 MHz) et l'orbite terrestre (20 kHz). Ces spectres montrent plusieurs types de sursauts : vers 10 :40 TU, une bande initiale, de faible intensité, de 1000 à 300 MHz qui dérive ensuite graduellement dans la bande 20-70 MHz (NDA), où elle est l'émission dominante. L'évolution de l'intensité projetée sur les directions est-ouest et sud-nord du Soleil (Radiohéliographe ; deux panneaux du bas) montre une source qui se déplace vers l'est (sursaut de type IV mouvant), témoignant de la restructuration à grande échelle du champ magnétique de la couronne (éjection de masse). Dans la bande d'ORFEES, cette émission est suivie entre 11 et 12 TU d'une émission complexe, limitée essentiellement aux fréquences au-dessus de 200 MHz et de ce fait probablement due aux électrons énergétiques confinés dans le champ magnétique coronal. Aux basses fréquences (~40-0,2 MHz) le caractère de l'émission est différent : on voit notamment une succession de sursauts de durée d'environ 1 minute, émis par des faisceaux d'électrons qui s'échappent de la couronne et traversent l'espace interplanétaire. L'existence de ces faisceaux montre que des particules de haute énergie peuvent s'échapper du Soleil. C'est une indication importante que de telles particules pourraient se propager vers la Terre. La surveillance du Soleil en ondes radio, au travers des émissions illustrées par cet événement, fournit des indications précieuses pour la prévision des événements à particules et des éjections de masse, deux phénomènes de grande importance pour la météorologie de l'espace.

3. Conclusions

Avec trois instruments complémentaires dédiés à la surveillance solaire, la station de radioastronomie de Nançay occupe une position unique au monde. Elle devrait ainsi continuer à fournir un soutien sol essentiel aux grands projets spatiaux de la physique du Soleil et de ses relations avec l'Héliosphère. Elle le fait actuellement pour les missions SoHO (ESA/NASA), STEREO (NASA, avec une forte contribution Européenne), SDO (NASA) et Hinode (ISAS). Le projet Solar Orbiter de l'ESA consistera à envoyer une sonde dans l'Héliosphère interne (périhélie vers 0,25-0,3 UA), ouvrant de nouvelles perspectives d'observations près du Soleil. Le soutien sol, notamment par des observations radio-astronomiques, restera un élément clef pour relier les mesures interplanétaires aux origines coronales.

Références bibliographiques

- 1- Mercier C., Chambe G., 2012, *Astron. Astrophys.* 540, A18
- 2- Kerdraon A., Delouis J.-M., 1997, dans *Coronal Physics from Radio and Space Observations*, Springer LNP 483, 192
- 3- Lecacheux A., 2000, dans *Radio Astronomy at Long Wavelengths*, AGU Monograph 119, 321
- 4- Bougeret, J.-L. et al., 1995, *Spa. Sci. Rev.* 71, 231