



HAL
open science

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon Nostradamus

Jean François Degurse, Jean-Philippe Molinié, Véronique Rannou, Sylvie
Marcos

► **To cite this version:**

Jean François Degurse, Jean-Philippe Molinié, Véronique Rannou, Sylvie Marcos. Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon Nostradamus: Un fleuron technologique français au service de la science. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2015, REE 2015 (4), 10.23723/1301:2015-4/14194 . hal-01227941

HAL Id: hal-01227941

<https://hal.science/hal-01227941>

Submitted on 2 Jul 2020

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.

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Le 08 juillet 2015

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Un fleuron technologique français au service de la science

Jean-François Degurse

Ingénieur d'études, Direction Technique, THALES Systèmes Aéroportés

Jean-Philippe Molinié, Véronique RANNOU

Ingénieurs de recherche, Département Electromagnétisme et Radar, ONERA

Sylvie MARCOS

Directeur de recherche, L2S, UMR 8506, CNRS-CentraleSupélec-Université Paris-Sud

Introduction

Le radar Nostradamus est un radar transhorizon à ondes de ciel. Il utilise la réflexion des ondes basses fréquences sur l'ionosphère pour voir au-delà de l'horizon. Sa fonction première est la veille lointaine, c'est-à-dire la surveillance de grands secteurs à très longue distance. Cependant, la conception originale du système a rendu possible son utilisation dans divers autres domaines scientifiques. En effet, le radar a été utilisé pour mener entre autres des recherches sur l'ionosphère, en océanographie et en sismologie.

Plus récemment, le radar a été utilisé à des fréquences trans-ionosphériques de manière active pour des applications d'astronomie radar, ainsi que de manière passive pour de la radioastronomie. Peu d'instruments opèrent aux longueurs d'ondes décimétriques, principalement à cause des interférences d'origine humaine qui gênent l'observation des sources cosmiques, bien plus faibles. Cependant, l'intérêt pour ces longueurs d'ondes grandit et de nouveaux instruments tels que LOFAR [1] ont récemment été construits. Par rapport aux radiotélescopes, le radar peut aussi observer de manière active en émettant des ondes radar, et ainsi effectuer de l'astronomie radar, ce que très peu d'instruments sont capables de faire [2].

Après une brève présentation du radar Nostradamus, nous présenterons une application du système en astronomie radar, puis, nous étudierons des observations passives du Soleil et de Jupiter en bande HF.

Les radars transhorizon et les sciences de l'espace

La portée des systèmes de détection radar classiques est, comme les systèmes optiques, limitée par l'horizon radioélectrique, due à la sphéricité de la Terre. En utilisant la réflexion des ondes basse fréquence (< 20 MHz) sur l'ionosphère, les radars transhorizon à ondes de ciel, également appelés OTH-B pour *Over-The-Horizon Backscatter* sont capables de voir bien au-delà de l'horizon, jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres, les rendant particulièrement utiles pour effectuer des missions de veille lointaine et d'alerte précoce [3]. Vers la fin des années 60, les États-Unis et l'URSS ont conçu et déployé de tels systèmes avec pour but la détection d'éventuels lancements de missiles balistiques, ainsi que la poursuite d'aéronefs à très longue distance. Plus récemment, l'Australie, la Chine et la France ont aussi développé de tels systèmes, étendant aussi leur domaine d'emploi à la détection de bateaux.

D'autres systèmes radars fonctionnant en bande HF ont aussi été développés pour des activités de recherche et d'étude de l'ionosphère : le réseau de radar superDARN aux pôles [4] ainsi que les radars russe SURA [5] et américain HAARP [6]. Ces deux derniers ont été utilisés conjointement avec d'autres instruments, le radiotélescope ukrainien UTR-2 et la sonde WIND respectivement, pour détecter les éjections de masse coronale solaire (CME) ainsi que l'écho radar rétrodiffusé par la Lune [1].

Jusqu'à présent, les radars OTH n'ont été que très rarement utilisés en astronomie, à l'exception du radar américain AN/TPS-71 ROTHOR pour la détection de CME [7]. En dépit du fait que la radioastronomie HF reste largement inexplorée, d'une part à cause de la pollution radioélectrique liée aux activités humaines et des effets de dispersion dus à l'ionosphère, d'autre part à cause du faible rapport signal à bruit des sources cosmiques à ces fréquences et de la nécessité de disposer d'instruments de grande taille pour obtenir une bonne résolution angulaire à ces longueurs d'onde, peu de tentatives ont été faites pour détecter des sources cosmiques par les radars transhorizon. La principale raison à cela, en dehors des aspects liés aux applications militaires, est que la plupart de ces systèmes sont des réseaux monodimensionnels d'antennes (pouvant mesurer plusieurs kilomètres), ce qui leur permet d'avoir une très bonne résolution angulaire en azimut mais pas en élévation. Pour une application de veille lointaine, cela n'est pas important parce qu'ils disposent généralement de sondeurs verticaux ionosphériques situés approximativement à mi-distance de la zone à couvrir. Ces sondeurs verticaux permettent de connaître les conditions de propagation. La connaissance de ces conditions associées à la mesure du retard temporel de l'écho de sol, permettent d'estimer la distance au sol de cet écho. En ajoutant la direction azimutale du signal, les coordonnées géographiques d'un objet détecté peuvent ainsi être estimées. La conception originale du radar français NOSTRADAMUS ne souffre pas de cette limitation pour l'observation de l'espace. L'objectif de cet article est de présenter les capacités de ce radar dans ce domaine.

Nous présenterons dans une première partie les expérimentations qui ont été effectuées en mode actif avec le radar NOSTRADAMUS, c'est-à-dire avec l'émission active. Dans ce mode, le radar fonctionne de la même façon que lorsqu'il est utilisé pour sa fonction principale qui est la détection d'objets mobiles à grande distance.

Dans une deuxième partie, nous présenterons des observations qui ont été faites en mode passif, c'est-à-dire où l'émission du radar est désactivée. Le radar fonctionne alors de la même manière qu'un radiotélescope.

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Le radar NOSTRADAMUS

Le réseau d'antennes

Le radar Nostradamus est un système constitué de 288 antennes biconiques distribuées le long de 3 bras disposés en étoile, séparés de 120°. Chaque bras mesure environ 400 mètres de long. Les antennes sont aléatoirement distribuées dans les 80 mètres de largeur de chaque bras. Une partie seulement des antennes est utilisée à l'émission tandis que toutes sont utilisées à la réception. Il fonctionne en bande HF (de 6 MHz à 28 MHz). En tant que radar de veille lointaine, sa fonction principale est la détection d'aéronefs à des distances allant de 700 à 2000 km. Alors que les radars transhorizon sont généralement des grands réseaux linéaires bistatiques, la conception particulière du radar NOSTRADAMUS lui permet de contrôler le faisceau d'émission et de réception en azimut et en élévation. Cette répartition d'antennes permet une couverture de 360° en azimut. La configuration monostatique limite les problèmes de propagation puisqu'il n'y a qu'un point de réflexion sur l'ionosphère à considérer. Le radar n'utilise aucun sondeur ionosphérique externe, il effectue lui-même un sondage de l'ionosphère à partir des échos rétrodiffusés par le sol. Ces sondages sont faits périodiquement en alternance avec le mode de veille radar.



Figure 1: les antennes du radar NOSTRADAMUS

Les systèmes d'émission et de réception

Une centaine d'émetteurs, reliés à chaque antenne d'émission constitue le système d'émission du radar. Les émetteurs sont installés dans des tunnels souterrains parcourant chaque bras du réseau. Chaque émetteur est piloté par le système de gestion qui permet de contrôler le gain et la focalisation du faisceau.

La totalité du réseau est utilisée pour la réception. Les antennes sont regroupées en sous-réseaux afin de réduire la quantité de données qui doivent être numérisées et transmises au calculateur de traitement du signal et de l'information. Le faisceau de réception y est alors formé par le calcul.

Le radar opère sur une bande instantanée de réception de quelques dizaines de kilohertz et possède un système de gestion de fréquence complexe. Afin de déterminer les fréquences optimales à utiliser, une évaluation de l'occupation des canaux fréquentiels ainsi que du niveau de bruit est effectuée. Cette recherche de fréquences claires est active en permanence et est accomplie en utilisant une antenne indépendante du réseau d'antennes principal. Une statistique basée sur les niveaux de bruit est faite pour chaque canal fréquentiel qui sont alors classifiés selon leur degré d'occupation. La fréquence d'émission est finalement choisie en fonction de cette classification, des résultats du sondage ionosphérique précédent ainsi que de la direction et de la distance du secteur surveillé. L'utilisation de sondages ionosphériques périodiques permet de suivre les évolutions des conditions de propagation et d'assurer la permanence de la veille sur le secteur choisi par l'opérateur radar.

Applications en géoscience

En plus de sa mission première, le radar a aussi été utilisé à des fins de recherches scientifiques :

- Mesure de la hauteur des vagues et des vents marins, à partir des raies de Bragg rétrodiffusés par la mer [8],
- Détection de tremblement de terre, en mesurant les variations de l'ionosphère [9]
- Analyse des sols en étudiant le retour de l'écho de sol,
- Etude de l'ionosphère à partir des sondages ionosphériques en élévation en et fréquence [10]

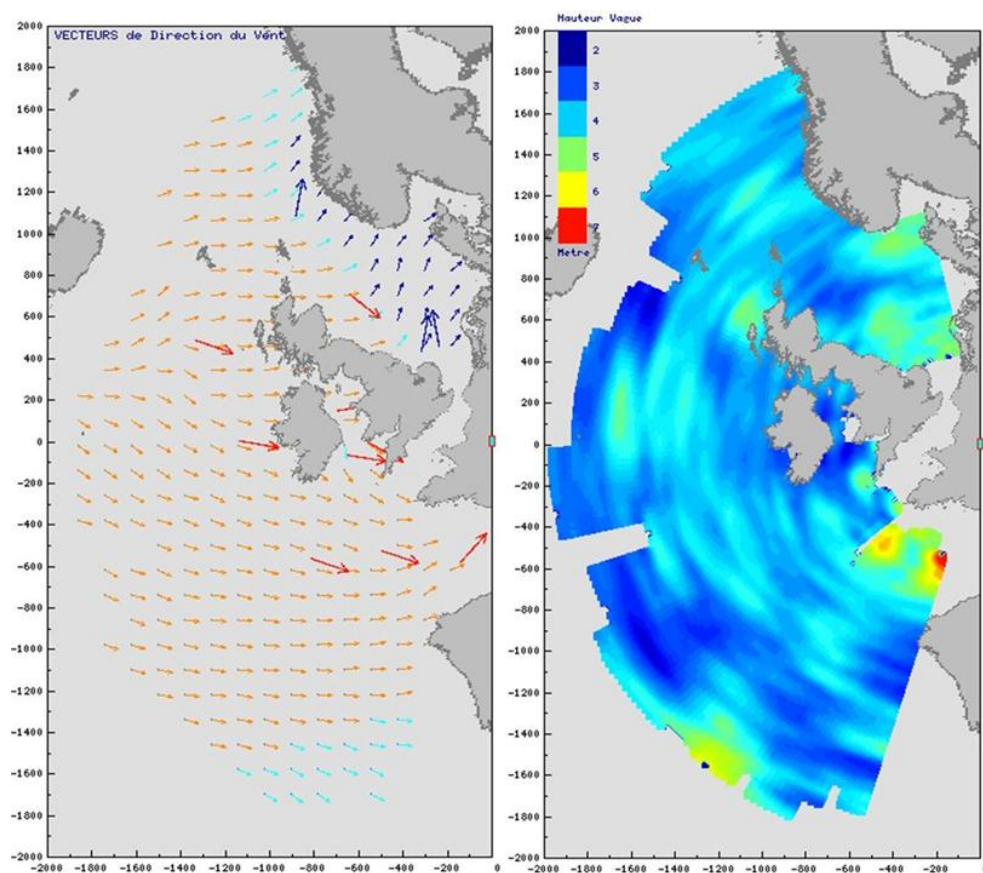


Figure 2: carte représentant la hauteur des vagues (à droite) et la direction des vents (à gauche) reconstruite à partir des observations du radar NOSTRADAMUS

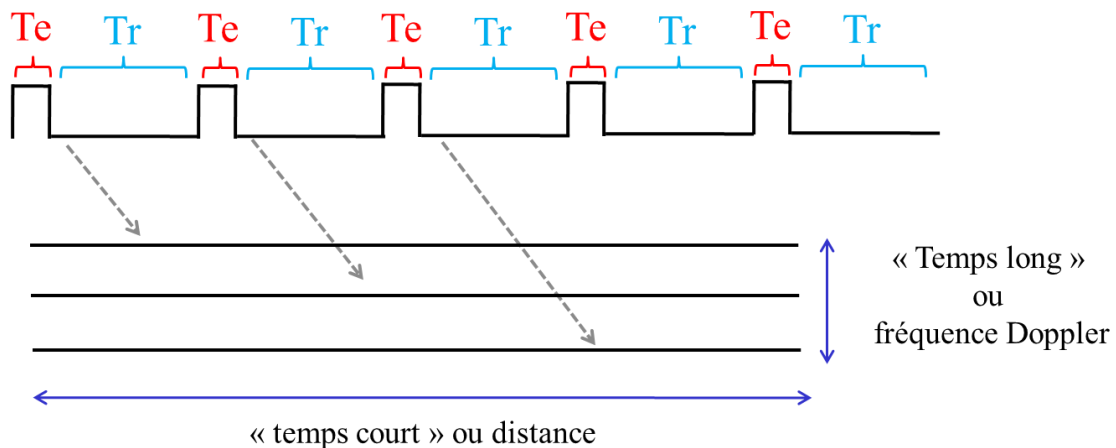
Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Astronomie radar à l'aide du radar NOSTRADAMUS

Préambule : le mode actif

Nous rappelons ici très brièvement le principe de fonctionnement d'un radar. Un radar émet une série de M impulsions correspondant au temps d'émission suivies d'un temps de réception, ces signaux répétitifs sont appelés également récurrences. Les impulsions contiennent le code radar qui est typiquement une rampe fréquentielle montante de bande B centrée sur une fréquence porteuse F_p transmise dans un temps T_e et est reçue pendant un temps de réception T_r qui suit le temps d'émission. On définit la durée de la récurrence par $T_{recu} = (T_e + T_r)$. Le rapport T_e/T_{recu} est appelé « facteur de forme ». La fréquence de répétition, également appelée F_r , est égale à $1/(T_e + T_r)$. Pour chaque récurrence, le signal reçu est échantillonné à une fréquence F_{ech} qui est généralement égale à B . Chaque case ainsi échantillonnée correspond au temps d'aller-retour du signal et donne donc une information sur la distance de l'objet. La résolution distance d'un radar est égale à $\delta R = \frac{c}{2B}$. Afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, le signal reçu est corrélé avec le signal émis, cette étape étant appelée « compression distance ».

Le temps long, de récurrence à récurrence, correspond quant à lui au temps d'intégration cohérente. Une transformée de Fourier sur cette dimension produit un spectre Doppler pour chaque case distance et donne ainsi une information sur la vitesse de l'objet. Enfin, en disposant de plusieurs antennes de réception, nous obtenons une information spatiale sur l'objet puisque la différence de phase entre les antennes dépend de l'angle d'arrivée du signal. Pour former un faisceau dans une direction donnée, un terme de phase est appliqué aux signaux de chaque antenne de réception pour compenser le déphasage dû à la direction d'arrivée du signal et ainsi maximiser le gain du réseau dans cette direction.



Pour qu'une onde électromagnétique puisse pénétrer dans un milieu ionisé, sa fréquence porteuse doit être supérieure à la fréquence plasma du milieu. La pulsation plasma du milieu est définie par :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

Où n_e est la densité d'électrons, e est la charge élémentaire, m_e est la masse de l'électron et ϵ_0 est la permittivité du vide. On en déduit la fréquence plasma qui est approximée par $f_{plasma} \approx 9\sqrt{n_e}$.

En fonctionnement normal, le radar Nostradamus utilise les couches de l'ionosphère pour réfracter ses signaux vers le sol et détecter des cibles au-delà de l'horizon. Les couches ionosphériques sont des plasmas froids créés par le rayonnement solaire. Pour les applications radar, les fréquences porteuses de Nostradamus sont choisies afin de ne pas traverser l'ionosphère. Pour les applications d'astronomie radar et de radioastronomie, les fréquences porteuses utilisées (aux alentours de 25MHz en journée) traversent les couches ionosphériques. Cependant cette traversée introduit des déformations. Les principales sont un retard de propagation supplémentaire, un biais sur la localisation angulaire et un décalage en fréquence Doppler. Ces défauts sont présents dans les mesures obtenues sur les objets détectés.

Détection de la Lune en basse fréquence

En utilisant les fréquences de fonctionnement les plus hautes du radar, il est possible de détecter des objets se trouvant au-delà de l'atmosphère terrestre. La puissance d'émission du radar permet d'envisager la détection de la Lune qui se situe à environ 384 000 km de la Terre. Cette distance implique un temps d'aller-retour des ondes radar de plus de 2 secondes, ce qui est bien supérieur à la période de répétition maximale autorisée par le système, dimensionnée pour observer des distances de quelques milliers de kilomètres. Le signal rétrodiffusé par la Lune est alors dit ambigu en distance. La fréquence de répétition du radar (F_r), c'est à dire la fréquence à laquelle sont transmises les impulsions, a dû être judicieusement choisie pour que les échos lunaires reviennent entièrement dans une période d'écoute du radar, et non d'émission. La fréquence d'émission a été fixée à 20,5 MHz ce qui permet au signal de traverser l'ionosphère avec de faibles biais. La bande d'émission est de 20 kHz, ce qui implique une résolution en distance de 7,5 km, le temps d'émission est de $T_e=3ms$ et la période de répétition $T_{recu}=30ms$. Le facteur de forme est donc de 10%. Le temps d'intégration est de 7,68 s, c'est à dire 256 impulsions.

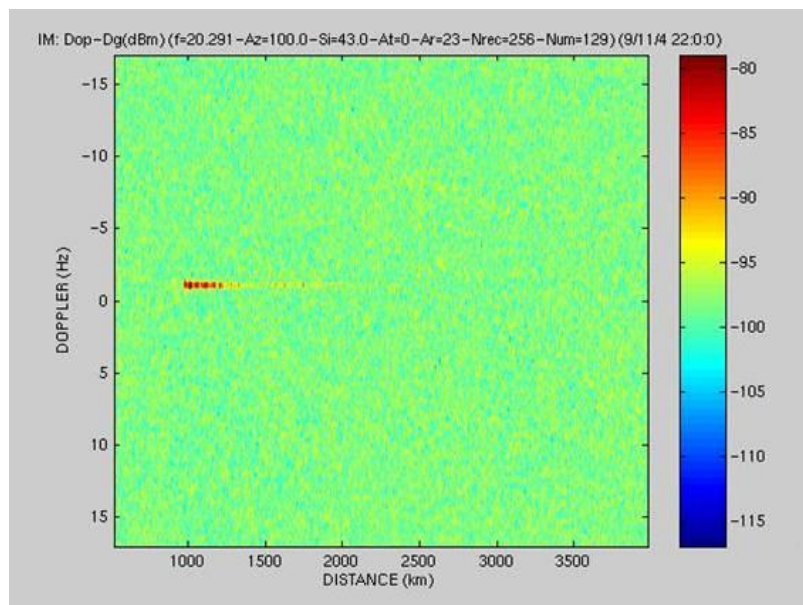


Figure 3: image distance-Doppler de la Lune

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

L'écho lunaire reçu par le radar est nettement observable sur l'image distance-Doppler sur la Figure 3. Le signal de la Lune revenant après plusieurs impulsions radar, la distance est ambiguë et l'axe distance ne correspond pas à la distance réelle entre le système et la Lune. En revanche, il est possible de mesurer le rayon de notre satellite. Chaque anneau de surface iso-distance renvoie un signal décalé en temps du fait de sa distance avec le radar (voir schéma de la Figure 4). La longueur de l'écho correspond ainsi au rayon du satellite. Le rayon mesuré à l'aide du radar Nostradamus est d'environ 1800 km, pour une valeur réelle de 1734 km. Le léger décalage en fréquence Doppler des ondes réfléchies est dû au biais ionosphérique. La Lune ou des satellites artificiels pourraient être utilisés afin de mesurer ce biais dans ces bandes de fréquence. On peut également voir une ondulation de l'écho reçu sur l'axe distance, elle est due à la diffraction de Fresnel.

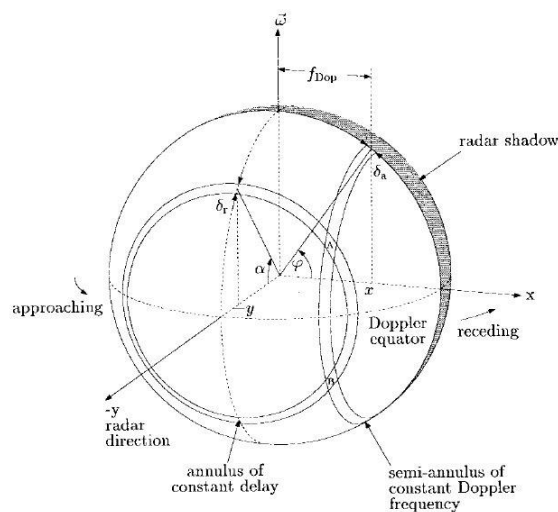


Figure 4: Schéma présentant les anneaux iso-distance renvoyant le signal radar de la Lune

L'autre intérêt de cette expérience tient au fait que les ondes HF pénètrent dans le régolithe lunaire et permettraient ainsi de sonder le sous-sol de la Lune. On estime ainsi la profondeur de pénétration des ondes, ce qui procure des renseignements sur la composition du sous-sol, où certains scientifiques espèrent encore trouver de l'eau en bonne quantité. Par ailleurs, les mesures de la Lune en ondes HF permettraient de connaître certains paramètres de la surface lunaire, comme la permittivité diélectrique et la conductivité de la surface. Des études plus poussées pourraient utiliser le mouvement de la Lune par rapport à la Terre (principe de l'ISAR) et obtenir une image bien plus précise du satellite en bande HF.

Détection de météorites

Le radar NOSTRADAMUS est capable de détecter les météores qui entrent continuellement dans l'atmosphère terrestre. Ces météorites constituent en réalité une gêne pour le radar en fonctionnement normal et un traitement d'excision de signaux impulsions est effectué en permanence afin de supprimer ces échos qui perturbent la détection des cibles d'intérêt. Les échos rétrodiffusés lors de la rentrée atmosphérique d'un objet ne viennent pas de l'objet lui-même. Ils proviennent du canal ionisé créé par l'objet. La densité du plasma, et donc sa fréquence, détermine la durée et l'évolution du plasma créé. Deux types d'échos sont observés: les trainées sous-denses, où

seule une partie du rayonnement est rétrodiffusé, et les trainées sur-denses qui réfléchissent toutes les ondes transmises.

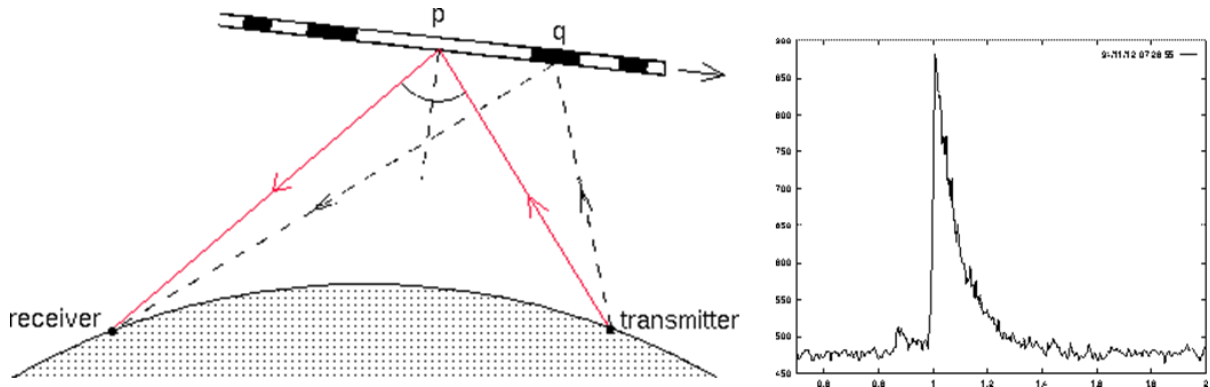


Figure 5: principe de réflexion sur une traînée de météore (à gauche) et profil temporel d'une réflexion sur une traînée « sous-dense » (à droite)

La Figure 6 ci-dessous montre une image distance-récurrance obtenue grâce au radar NOSTRADAMUS sur laquelle apparaissent deux traînées de météores. Il n'est pas nécessaire d'effectuer une intégration par transformée de Fourier pour détecter les échos de météores. Le profil temporel permet de déterminer la nature de la traînée et ainsi donner une indication sur la taille de l'objet entrant dans l'atmosphère.

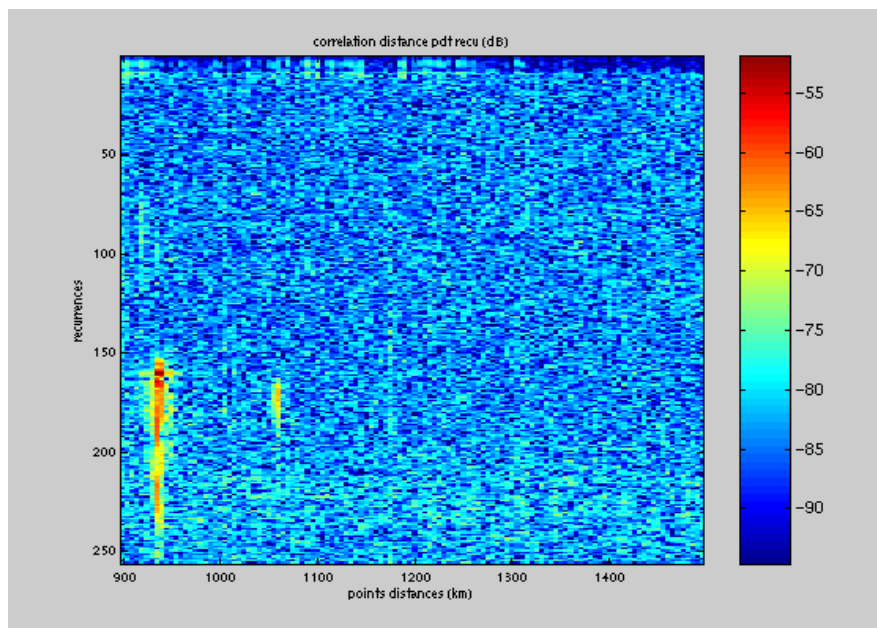


Figure 6: Carte temps-distance d'une observation à fréquence trans-ionosphérique

Les rayons cosmiques, en interagissant avec l'atmosphère, créent des gerbes de plasma similaires à celles créées par les météores bien que les traînées créées soient plus brèves et moins importantes. Une étude statistique de ces signaux constituerait un nouveau moyen d'étudier ces rayons cosmiques.

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Perspectives

L'observation de l'espace en mode radar est limitée aux objets proches de la Terre. En effet, le rapport signal à bruit décroît en $1/D^4$ où D est la distance entre le radar et la cible ce qui rend difficile l'observation d'objets situés au delà de la distance Terre-Lune. Il est néanmoins envisageable d'utiliser NOSTRADAMUS pour détecter directement l'écho renvoyé par le plasma éjecté lors d'une éruption solaire (voir Figure 7) bien que plusieurs conditions doivent être satisfaites :

- La matière éjectée doit se déplacer en direction de la Terre
- La densité de matière doit être suffisamment élevée pour réfléchir les ondes émises par le radar. En effet, la fréquence de fonctionnement du radar doit être supérieure à la fréquence plasma de l'ionosphère mais inférieure à la fréquence plasma de la matière éjectée qui elle diminue avec l'éloignement par rapport au Soleil. Typiquement, cela donne des fréquences allant de 10 à 80 MHz pour des distances de 1 à 5 rayons solaires.
- Un temps d'intégration important pour obtenir un rapport signal à bruit satisfaisant
- Le système de réception du radar doit être reconfiguré pour décaler la bande de réception afin de recevoir les ondes fortement décalées en Doppler à cause de la vitesse très élevée des particules de matière. Le décalage Doppler est $Fd = -\frac{2V}{\lambda}$ où V est la vitesse radiale vers la Terre des particules éjectées. La vitesse des particules pouvant aller de 100 km/s à 1500 km/s, cela implique des décalages Doppler positifs de 13 kHz à 100 kHz

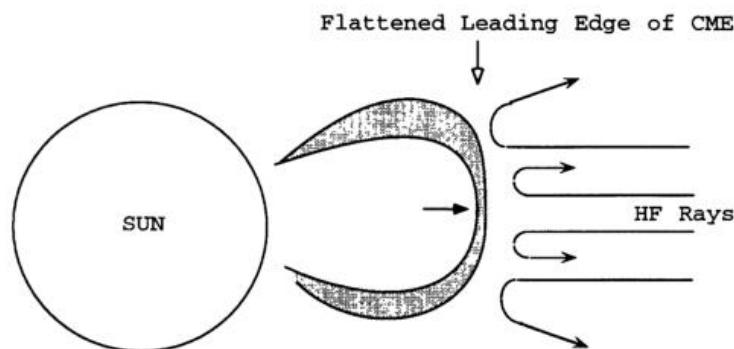


Figure 7: Principe de réflexion des ondes HF sur une éjection de masse coronale. Source [7]

Radioastronomie

Le radar Nostradamus peut aussi être utilisé en mode passif pour écouter l'espace en bande HF comme le font les radiotélescopes. Dans ce cas, l'émission du radar est désactivée, mais du fait de la conception du système, il n'est pas possible d'enregistrer des données pendant la période correspondant à l'émission du radar si elle était active. L'acquisition des signaux n'est donc pas continue.

Dans notre système solaire, le Soleil et Jupiter émettent dans le spectre HF. Nous verrons que la sensibilité du radar NOSTRADAMUS n'est pas suffisante pour détecter le bruit continu émis par le Soleil

à ces fréquences mais qu'il est capable de détecter les sursauts, dits « bursts », émis notamment lors des éjections de masses solaires. Les émissions en bande HF de Jupiter sont plus directives et leur observation depuis la Terre dépend de la position de son satellite Io. Il est ainsi possible de connaître à l'avance les périodes où ces émissions vont avoir lieu.

Observation du Soleil

Deux observations du Soleil ont été effectuées pour tenter de détecter le bruit émis en continu par le Soleil. L'expérience a consisté à pointer le faisceau du radar dans une direction fixe, à une fréquence de 25,6 MHz, afin d'observer si le passage du Soleil dans le faisceau produit une élévation du plancher de bruit. La fréquence de 25,6 MHz a été choisie parce qu'elle se trouve dans la bande 25.55 - 25.67 MHz qui est l'une des deux bandes réservée à la radioastronomie en HF, l'autre étant la bande 13.36 - 13.41 MHz. La première séquence d'enregistrement n'a montré aucune augmentation du niveau de bruit. En revanche, lors de la deuxième séquence d'enregistrement, deux augmentations très importantes du niveau de bruit ont été observées pendant un court moment lors du passage du Soleil dans le faisceau. Ce dernier a été effectué le 14/10/2011 entre 11h10 TU et 12h00 TU avec un passage du Soleil au centre du lobe principal à 11h38'20'' TU. Le faisceau du radar a été fixé à un azimut de 179,0° et une élévation de 33,0°.

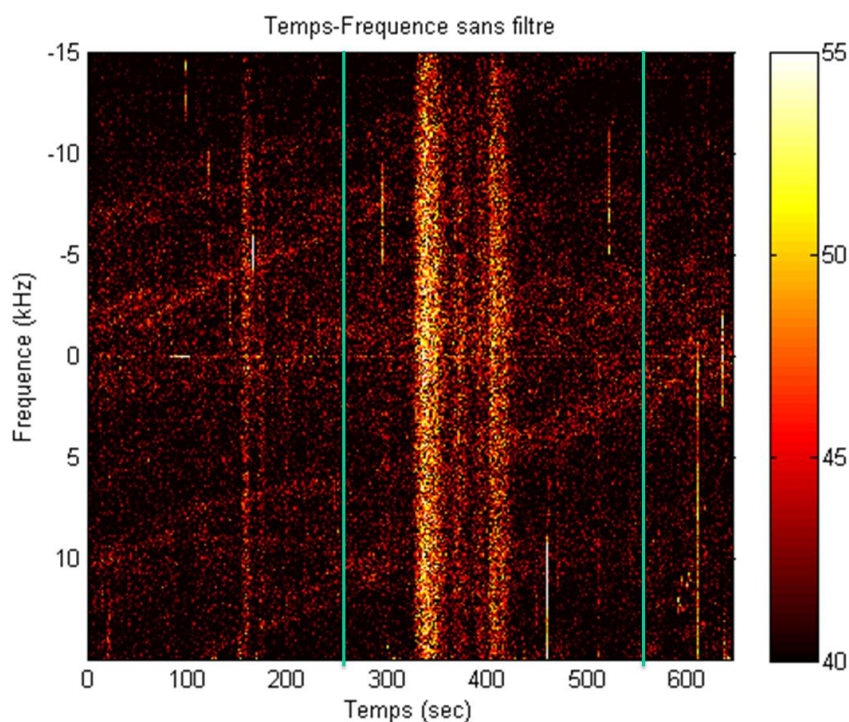


Figure 8: Carte temps-fréquence obtenue lors du passage du Soleil dans le lobe principal. Les barres verticales vertes marquent l'entrée et la sortie du Soleil dans le faisceau du radar

La Figure 8 montre une image temps-fréquence de la puissance du signal reçue lors du deuxième enregistrement. Les deux traits verts délimitent l'intervalle de temps dans lequel le Soleil se trouve dans le lobe principal. On y voit les deux sursauts qui occupent toute la bande de réception. Des raies verticales très fines parcourant toute la bande de fréquence apparaissent régulièrement sur la carte temps-fréquence. Après une analyse plus poussée, ces raies semblent provenir de sondes ionosphériques.

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Pour confirmer que ces sursauts proviennent bien du Soleil, les données ont été comparées aux données enregistrées par le réseau décimétrique de l'observatoire de Nançay [11] (pour les fréquences allant d'environ 13 MHz à 40 MHz) et par le satellite WIND qui enregistrent en permanence les signaux provenant du Soleil en bande HF (pour les fréquences de 5 à 13 MHz). Ces données sont librement accessibles à tous [12].

La Figure 9 qui présente la superposition de l'enregistrement effectué par NOSTRADAMUS avec les données observées par ces deux instruments. Elle montre que les deux pics détectés par NOSTRADAMUS ont aussi été observés par le RDN et WIND. Les émissions que montre le spectrographe sont les émissions caractéristiques des faisceaux d'électrons qui traversent la couronne vers l'espace interplanétaire. Elles sont caractéristiques des bursts solaires [13].

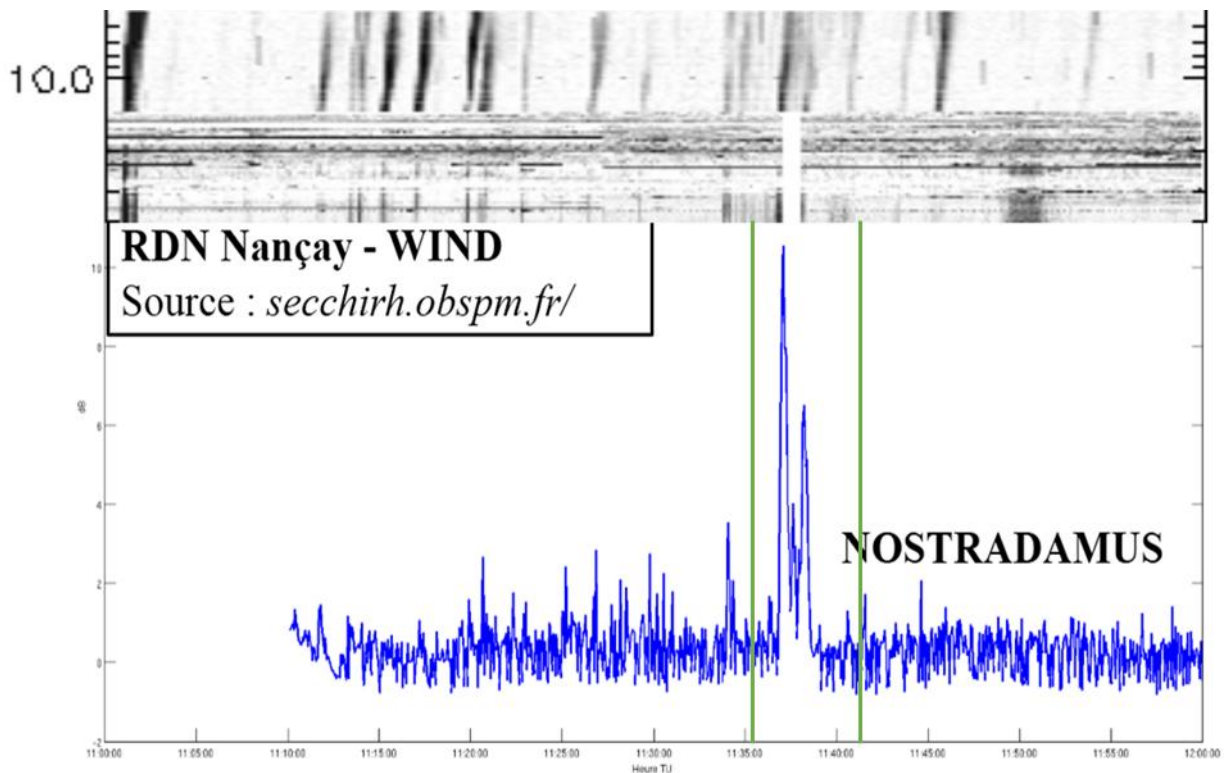


Figure 9: Superposition du spectrogramme fourni par l'observatoire de Nançay (en haut) et de la mesure de la puissance reçue par le radar NOSTRADAMUS (en bas). En vert, l'entrée du disque solaire dans le lobe du radar débute à 11h35'30'' et le disque solaire quitte le lobe à 11h43'15''.

Du fait de sa configuration en plusieurs sous-réseaux de réception, le radar NOSTRADAMUS permet, en plus, de mesurer la direction d'arrivée des signaux dans les lobes de sous-réseaux. Pour cela, nous utilisons la méthode de formation de voies par le calcul. Elle consiste à appliquer une phase différente au signal de chaque sous-réseau de manière à maximiser le gain dans une direction donnée. La figure suivante présente une imagerie du premier sursaut, avec un temps d'intégration de 2,56 secondes, réalisée par formation de voie par le calcul sur tout le domaine angulaire des sous-réseaux. On y voit que l'énergie ne vient pas du soleil mais d'une zone de la couronne solaire située à plusieurs rayons solaires. Les bursts solaires sont en généralement causés par l'éjection d'électrons à haute énergie lors d'éruptions solaires, l'émission radio peut donc se trouver à plusieurs rayons solaires du Soleil.

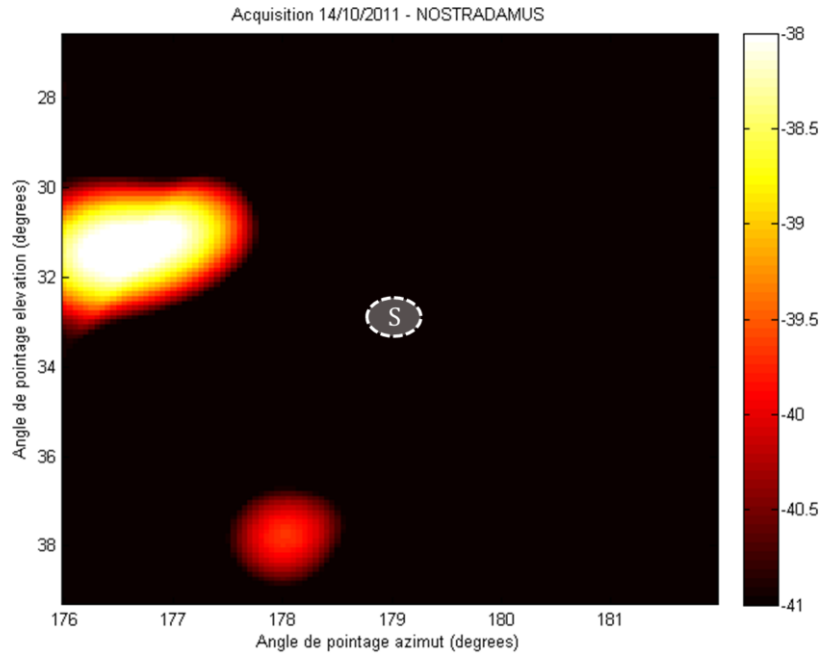


Figure 10: Imagerie angulaire d'un sursaut solaire à 25,6 MHz observé à 11h38 TU

L'image présentée sur la Figure 11 provient du coronographe C2 de l'instrument LASCO de la sonde SoHo qui se trouve au point de Lagrange L1. On y voit une importante éjection de masse coronale à 11h36 TU soit deux minutes avant le sursaut observé en basse fréquence par le radar NOSTRADAMUS. Les images ne peuvent cependant pas être directement comparées, le coronographe de la sonde SoHo, utilise des coordonnées solaires. C'est-à-dire que l'axe vertical est la projection de l'axe de rotation du Soleil sur le ciel, l'axe horizontal est donc la direction est-ouest solaire. Il faut appliquer une rotation angulaire d'environ -26 degrés environ à l'image radio pour les comparer.

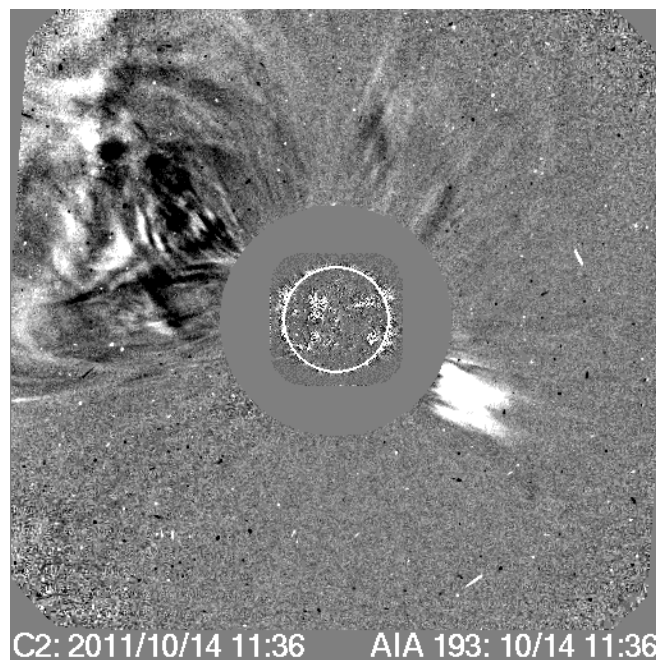


Figure 11: Image capturée par la sonde Soho le 14/10/2011 à 11h36 TU. Source NASA.gov

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

Observation de Jupiter

En plus du Soleil, une autre source de rayonnement HF peut être observée dans le système solaire, il s'agit de la planète Jupiter. Des particules tournant en spirale le long des lignes de champ magnétique de Jupiter émettent de l'énergie sous forme de rayonnement cyclotron et synchrotron. Ces émissions sont généralement directives et certaines d'entre elles sont corrélées avec la position du satellite Io par rapport à Jupiter et à la Terre. Il est donc possible de connaître à l'avance les périodes au cours desquelles nous nous attendons à observer certaines des plus fortes émissions HF. Une base de données donnant les probabilités d'émission de différentes sources est disponible sur le site de la station de radioastronomie de Nançay [12]. La date et l'heure de la campagne d'enregistrement ont été choisies en fonction de ces probabilités. L'acquisition du signal a été effectuée le 14/12/2012 entre 21h15 TU et 23h30 TU. Pendant l'acquisition, le faisceau est continuellement pointé sur Jupiter. La fréquence de réception est constante à 21,437 MHz.

Les 3 courbes de la Figure 12 présentent les puissances reçues en fonction de l'heure. La courbe noire est obtenue sans aucun traitement de réduction du bruit, tandis que les courbes rouge et bleue sont obtenues avec deux traitements de réduction des interférences différents. Les résultats sont sensiblement les mêmes et mettent en évidence une période allant de 21h30 TU à 22h10 TU où nous observons de nombreux sursauts d'énergie. La Figure 13 présente une image temps-fréquence de cette période de sursaut sur laquelle nous pouvons voir que ces sursauts occupent toute la bande de 30 kHz de réception.

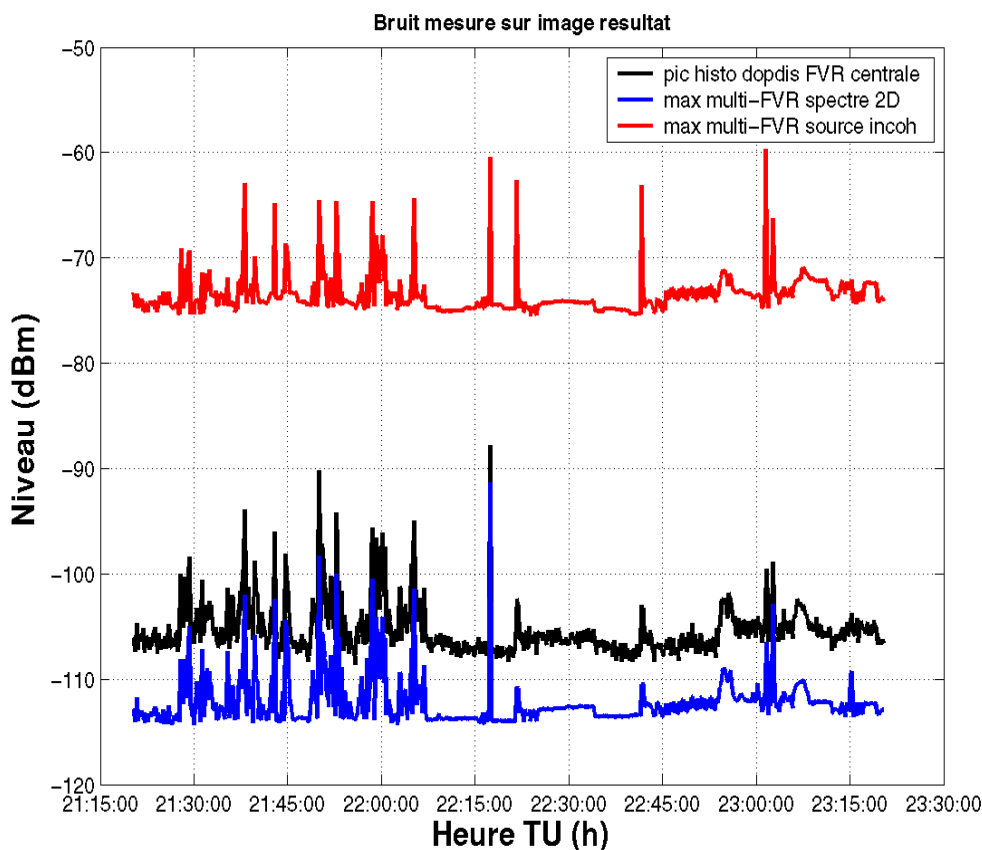


Figure 12: Puissance mesurée par le radar NOSTRADAMUS sur toute la bande de réception en fonction du temps sans traitement de réduction du bruit (en noir) et avec deux techniques de réduction du bruit différentes (rouge et bleu)

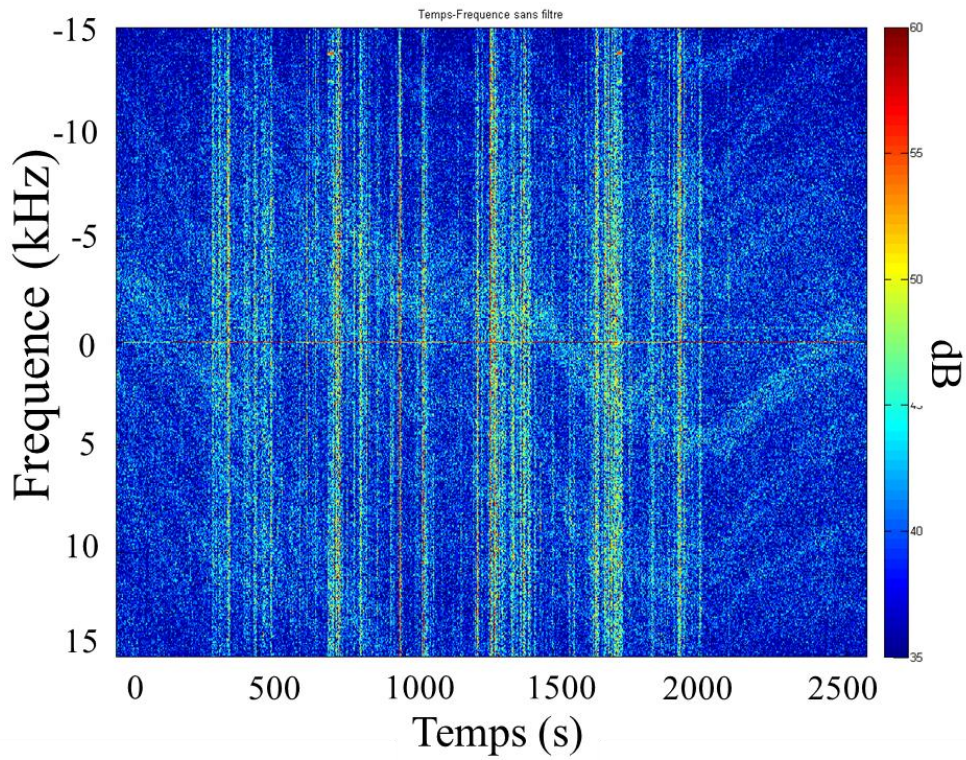


Figure 13: Carte temps-fréquence reçue par le radar NOSTRADAMUS en observant Jupiter

Ces résultats ont eux aussi été comparés aux enregistrements effectués par le radiotélescope RDN de l'Observatoire de Nançay. La figure ci-dessous montre les spectrogrammes de 10 à 40 MHz obtenus en polarisation circulaire droite et circulaire gauche par le RDN. Le radar NOSTRADAMUS reçoit lui en polarisation verticale uniquement, mais la polarisation des ondes HF lors de la traversée des couches ionosphériques est modifiée par l'effet Faraday.

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS

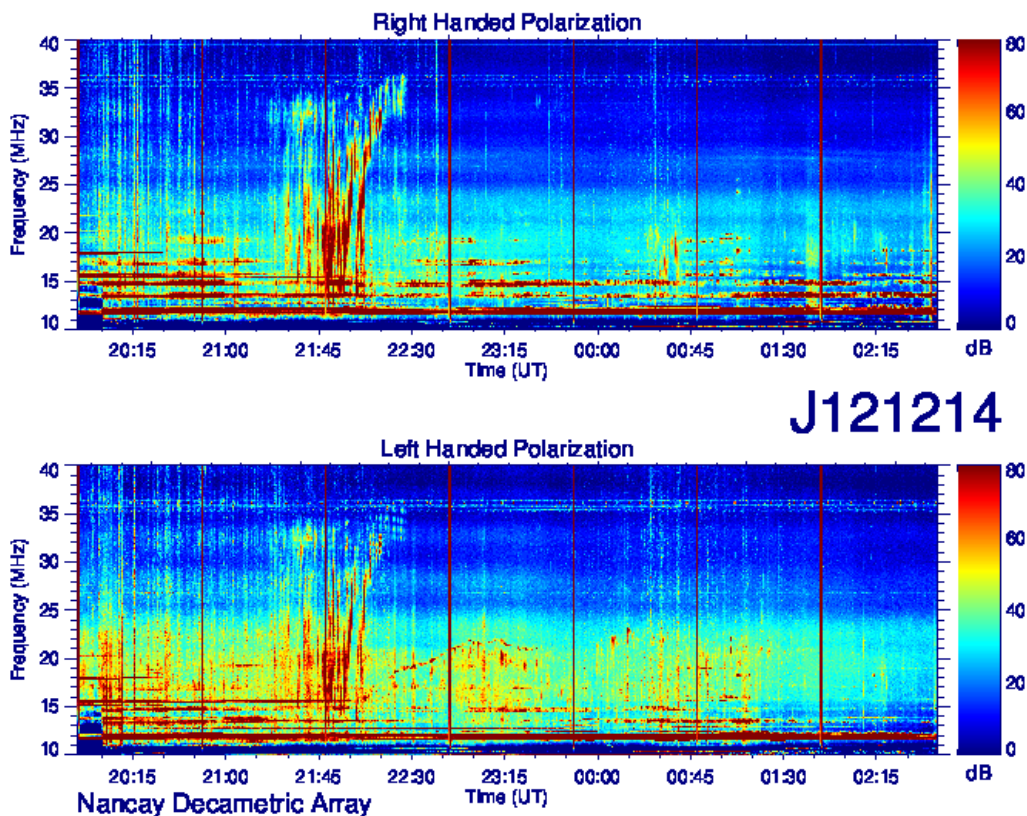


Figure 14: Spectrogrammes enregistrés par le Réseau Décamétrique de Nançay. *Source Obs. Nançay*

Les sursauts observés par le radar NOSTRADAMUS entre 21h30 TU et 22h30 TU sont clairement visibles et s'étendent sur une bande de fréquence allant de 15 MHz à plus de 30 MHz.

Perspectives

D'autres sources pourraient être observées en mode passif avec le radar.

Une des voies les plus prometteuses est l'observation de pulsars en bande HF. Un enregistrement du pulsar PSR0804+74 a été effectuée en avril 2013 et attend d'être traité. Le traitement est plus complexe dans ce cas parce que le faible rapport signal sur bruit du pulsar demande un temps d'intégration long et une correction de la dispersion fréquentielle du signal.

Conclusion

Bien qu'étant conçu pour des applications militaires et de sécurité, le radar NOSTRADAMUS est un instrument unique permettant d'explorer de nombreux domaines scientifiques allant de l'océanographie à la sismologie.

Dans cet article, nous avons présenté quelques expériences en sciences de l'espace et montré que le radar pouvait être utilisé en astronomie radar et en radioastronomie. Bien que n'ayant pas la sensibilité des radiotélescopes, il possède d'autres avantages comme sa structure en sous-réseaux et sa capacité d'émission.

Références

- [1] Rodriguez, P., Kennedy, E., & Kossey, P. (2003). High frequency radar astronomy with HAARP.
- [2] Van Haarlem, M. P., Wise, M. W., Gunst, A. W., Heald, G., McKean, J. P., Hessels, J. W. T., ... & Brouw, W. N. (2013). LOFAR: The low-frequency array. *Astronomy & astrophysics*, 556, A2.
- [3] Headrick, J. M., & Skolnik, M. (1974). Over-the-horizon radar in the HF band. *Proceedings of the IEEE*, 62(6), 664-673.
- [4] Greenwald, R. A., Baker, K. B., Dudeney, J. R., Pinnock, M., Jones, T. B., Thomas, E. C., ... & Yamagishi, H. (1995). Darn/superdarn. *Space Science Reviews*, 71(1-4), 761-796.
- [5] Karashtin, A. N., Komrakov, G. P., Tokarev, Y. V., & Shlyugaev, Y. V. (1999). Radar studies using the “sura” facility. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 42(8), 674-686.
- [6] Cohen, J. A., Pradipta, R., Burton, L. M., Labno, A., Lee, M. C., Watkins, B. J., ... & See, B. Z. (2010). Generation of ionospheric ducts by the HAARP HF heater. *Physica Scripta*, 20 Rodriguez, P. (1996). High frequency radar detection of coronal mass ejections. In *Solar Drivers of the Interplanetary and Terrestrial Disturbances* (Vol. 95, p. 180).10(T142), 014040.
- [7] Rodriguez, P. (1996). High frequency radar detection of coronal mass ejections. In *Solar Drivers of the Interplanetary and Terrestrial Disturbances* (Vol. 95, p. 180).
- [8] Gurgel, K. W., Antonischki, G., Essen, H. H., & Schlick, T. (1999). Wellen Radar (WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing. *Coastal Engineering*, 37(3), 219-234.
- [9] Occhipinti, G., Kherani, E. A., & Lognonné, P. (2008). Geomagnetic dependence of ionospheric disturbances induced by tsunamigenic internal gravity waves. *Geophysical Journal International*, 173(3), 753-765.
- [10] Benito, E., Bourdillon, A., Saillant, S., Rannou, V., & Molinie, J. P. (2008, May). Inversion of OTH radar backscatter ionograms obtained by scanning in elevation. In *Proc. IEEE Radar Conf.*
- [11] Lecacheux, A., Konovalenko, A. A., & Rucker, H. O. (2004). Using large radio telescopes at decametre wavelengths. *Planetary and Space Science*, 52(15), 1357-1374.
- [12] <http://www.obs-nancay.fr>
- [13] Cane, H. V., Erickson, W. C., & Prestage, N. P. (2002). Solar flares, type III radio bursts, coronal mass ejections, and energetic particles. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978–2012), 107(A10), SSH-14.

Astronomie radar et radioastronomie à l'aide du radar transhorizon NOSTRADAMUS



Jean-François Degurse est diplômé de l'université de Toulouse en astrophysique et instrumentation spatiale. En 2014, il obtient un doctorat en physique de l'université Paris-Sud. Ses travaux, réalisés au sein de l'ONERA en collaboration avec le Laboratoire des Signaux et des Systèmes (CNRS-UnivParisSud-CentraleSupélec), portent sur des traitements spatio-temporels adaptatifs en environnement hétérogène dans un contexte de radar aéroporté. Il est aujourd'hui ingénieur d'études radar chez Thales Systèmes Aéroportés, où il travaille sur les modes air-air et air-sol des futurs radars d'avions de combat.