

LE RADAR SuperDARN KERGUELEN ET LES RELATIONS SOLEIL-TERRE

Jean-Paul Villain¹ et Jean-Claude Cerisier²

1. Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, UMR 6115, Orléans
2. Centre d'études des Environnements Terrestre et Planétaires, UMR 8639, St-Maur-des-Fossés

1. Les relations Soleil-Terre et l'ionosphère aurorale

L'activité solaire est la source première de nombreux processus affectant l'environnement terrestre. En effet, le soleil agit sur l'environnement terrestre, au travers de son rayonnement photonique, mais aussi par son rayonnement corpusculaire. Le rayonnement photonique (en particulier Ultra Violet) est responsable de l'ionisation des molécules et atomes de la haute atmosphère terrestre, créant ainsi l'ionosphère qui s'étend environ de 80 km à plus de 500 km d'altitude. Par contre, le vent solaire, flux permanent de particules chargées issues de la couronne solaire confine le champ magnétique terrestre dans une cavité de grande dimension, la magnétosphère, dont la dimension atteint environ 60.000 km côté jour, et s'étend en une longue queue au-delà de l'orbite de la lune côté nuit.

Les mécanismes qui régissent l'interaction vent solaire-magnétosphère-ionosphère sont à l'origine d'un transfert de matière, d'impulsion et d'énergie du vent solaire vers la magnétosphère et in fine vers l'ionosphère et l'atmosphère terrestre. L'impulsion et l'énergie du vent solaire sont à l'origine d'un mouvement global de convection du plasma à l'intérieur de la magnétosphère et gouvernent l'électrodynamique du système couplé que forment l'ionosphère et la magnétosphère. Ce système est en évolution permanente pour s'adapter aux variations incessantes du milieu interplanétaire. L'interaction d'un plasma magnétisé et d'un corps pourvu d'un champ magnétique, est une situation très générale que l'on rencontre également dans le cas des planètes géantes du système solaire, mais aussi à des échelles différentes, dans le cas des objets astrophysiques. L'observation détaillée des conséquences de ces processus dans l'environnement de la Terre présente donc un double intérêt, d'une part permettre une compréhension approfondie d'une des formes d'interaction entre le soleil et notre planète, d'autre part fournir le support nécessaire à l'étude de situations beaucoup plus lointaines et donc inaccessibles à des mesures détaillées.

L'ionosphère des régions aurorales et polaires est directement couplée, par l'intermédiaire du champ magnétique terrestre, suite à la forte conductivité électrique du plasma parallèlement aux lignes de force, aux régions clés que sont les frontières de la magnétosphère et au milieu interplanétaire. On conçoit donc aisément que les signatures au niveau ionosphérique des processus qui gouvernent l'interaction entre le vent solaire et la magnétosphère en permettent la mise en évidence et l'étude. De plus, l'observation, à partir du sol, de la signature de ces phénomènes dans l'ionosphère et la haute atmosphère fournit, avec une couverture spatiale inégale, le cadre nécessaires aux études in-situ plus détaillées qu'il est possible d'entreprendre par les moyens spatiaux.

L'énergie transférée depuis le vent solaire et mise en jeu par les phénomènes magnétosphériques peut être stockée de façon temporaire sous la forme d'énergie électromagnétique, et d'énergie de dérive des particules du plasma magnétosphérique. La dynamique des processus de stockage et de relaxation de cette énergie n'est pas encore bien comprise. Les sous-orages magnétosphériques sont des événements intenses et à caractère explosif au cours desquels une grande partie de l'énergie stockée dans la queue de la magnétosphère est déversée brutalement le long des lignes de force du champ magnétique terrestre dans l'ionosphère des zones aurorales, entre 100 et 200 km d'altitude, suite à un déséquilibre du couplage vent solaire-magnétosphère-ionosphère. Cette énergie est dissipée d'une part par chauffage par effet Joule dû aux intenses courants ionosphériques qui circulent alors vers 110 km d'altitude, et d'autre part sous la forme de flux intenses de particules précipitées qui modifient de façon

considérable les structures des différentes couches de l'ionosphère et sont aussi à l'origine de spectaculaires émissions lumineuses, dénommées aurores boréales ou australes. Ces aurores sont la manifestation la plus directement accessible aux sens humains des phénomènes magnétosphériques, et des relations Soleil-Terre.

Ces restructurations à grande échelle de la magnétosphère s'accompagnent de modifications rapides du schéma global de convection du plasma magnétosphérique. Le programme SuperDARN (Super Dual Auroral radar Network) est dédié à la mesure globale de ce schéma de convection avec une haute résolution spatiale et temporelle.

2. Le réseau SuperDARN

Le réseau SuperDARN consiste en deux chaînes en longitude de radars cohérents HF ceinturant les zones aurorales et calottes polaires des hémisphères Nord et Sud. Chaque radar est capable de balayer un champ de vue de 52° en azimut en 16 directions prédéterminées et d'effectuer, dans chaque direction, 75 points de mesure répartis entre 180 et 3550 km du radar, couvrant ainsi un champ de vue de plus de 4 millions de km^2 . Le champ de vue est balayé en 1 à 2 minutes. Afin de déterminer par triangulation les vitesses vectorielles de déplacement des irrégularités d'ionisation responsables des échos, chaque zone de mesure est couverte par deux radars situés sur des sites distants d'environ 2000 km. On détermine ainsi, en chaque point de leur champ de vue commun, deux composantes indépendantes du vecteur vitesse dans le plan perpendiculaire au champ magnétique terrestre. La figure 2 présente la disposition et les champs de vue des radars actuellement opérationnels dans les deux hémisphères.

L'organisation du programme multi-national SuperDARN est originale. Tous les radars sont identiques. L'ensemble du réseau est fortement structuré bien que chaque radar reste sous la responsabilité d'un groupe national. Par exemple, le programme de mesure est établi en commun chaque mois et les données sont enregistrées dans un format commun et fusionnées, permettant un accès aisé à toutes les données par tous les membres du réseau. La coordination internationale du projet est sous la responsabilité de l'Applied Physics Laboratory/Johns Hopkins University (USA). Des instituts de recherche des pays suivants : USA, Canada, Grande Bretagne, France, Japon, Afrique du Sud, Australie, Italie, Suède et Finlande sont actuellement impliqués dans le programme.

3. L'instrument : le radar cohérent HF

Les radars cohérents détectent le signal rétro-diffusé par les fluctuations d'ionisation présentes dans l'ionosphère des régions de haute latitude. A cause de la forte conductivité électrique du plasma parallèlement au champ magnétique les irrégularités diffusantes sont alignées avec celui-ci. Afin d'obtenir un écho de rétrodiffusion, le vecteur d'onde radar incident doit donc être perpendiculaire au champ magnétique, c'est à dire pratiquement horizontal dans les régions aurorales et polaires. Cette condition peut être satisfaite en utilisant des ondes de la gamme HF (10-20 MHz) qui subissent une réfraction significative dans l'ionosphère. L'onde rétrodiffusée subit, par effet Doppler, un changement de fréquence proportionnel à la composante radiale de la vitesse du plasma entraînant les irrégularités.

Afin de former un faisceau étroit en azimut, le radar utilise un réseau de 16 antennes phasées électroniquement. La différence de phase introduite d'une antenne à l'autre est contrôlée par une matrice de déphasage permettant un balayage rapide en azimut dans les 16 directions prédéterminées. Le réseau principal est complété par un réseau secondaire de 4 antennes fonctionnant en interféromètre vertical.

Chaque antenne est alimentée par un émetteur de 600 Watts. La puissance totale émise est de l'ordre de 10 kW. Mais la puissance effective rayonnée par le radar en tenant compte des gains des antennes et du réseau est de l'ordre de 4 MW.

Le radar est piloté par un ensemble de micro-ordinateurs. Le système est extrêmement flexible et les paramètres essentiels de fonctionnement du radar peuvent être modifiés par logiciel. Le radar peut être contrôlé et programmé sur le site ou à

distance par une simple ligne téléphonique ou une liaison Internet. Des expériences complexes peuvent ainsi être menées sans la présence d'un opérateur sur site.

Résumé des caractéristiques techniques.

- Bande de fréquence : Bande HF : 10 - 20 MHz
- Puissance d'émission : 16 x 600 Watts
- Couverture en distance : 75 portes de 45 km (de 180 km jusqu'à 3550 km du site radar)
- Couverture en azimut : 52°- 16 directions de faisceaux par pas de 3,3°
- Temps d'intégration : 3 ou 7 secondes dans chaque direction (balayage complet en 1 ou 2 minutes)
- Fonctionnement : Continu sans intervention humaine
- Contrôle : A distance par ligne téléphonique ou Internet

Réseaux d'antennes.

- Réseau principal : Longueur totale : 260 m (16 antennes log-périodiques)
Hauteur mât vertical : 15,50 m.
Longueur poutre horizontale : 13 m
Longueur éléments d'émission : jusqu'à 15,10 m
- Réseau interférométrique: Longueur totale : 60 m (4 antennes identiques à celles du réseau principal)

4. Le radar SuperDARN Kerguelen

Le radar SuperDARN Kerguelen fait suite à la réalisation par la France du radar de Stokkseyri en Islande opérationnel depuis fin 1994. Le radar SuperDARN Kerguelen étend le dispositif hémisphère Sud vers l'Est. Il est appairé avec un radar japonais implanté sur la base antarctique de Syowa. Il permet l'adjonction d'une deuxième paire au réseau hémisphère Sud. La construction du radar SuperDARN Kerguelen a eu lieu pendant la campagne d'été 1999-2000 et le radar est opérationnel depuis le 1er janvier 2000. La figure 4 présente l'ensemble du site.

Le projet Kerguelen, initié par la France, associe plusieurs partenaires européens : France, Italie, Suède et Finlande. La réalisation technique est conjointe entre la France et l'Italie. Le LPCE (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement), le CETP (Centre d'études des Environnements Terrestre et Planétaires) et l'IFSI (Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario) sont associés autour de ce projet. Côté français, le financement du radar a été assuré par l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) et l'IFRTP. La logistique a été assurée par l'IFRTP et les travaux d'infrastructures ont été réalisés par les TAAF (Terres Australes et Antarctiques Françaises). Le suivi du fonctionnement du radar est assuré par l'équipe de Géophysique de Kerguelen. Il consiste en une vérification quotidienne via le réseau Internet avec rapatriement de fichiers sommaires qui sont transférés vers le LPCE. Une visite de contrôle hebdomadaire, sur le site situé à proximité, est effectuée avec changement du CD où sont gravées les données si nécessaire.

La figure 5 présente une carte de vitesses radiales obtenue au cours d'un balayage d'une durée de 2 minutes. Les mesures ne couvrent pas la totalité du champ de vue. L'existence d'un écho radar dépend à la fois de la propagation ionosphérique qui contrôle la condition de perpendicularité de l'onde radar au champ magnétique terrestre, de l'existence d'irrégularités d'ionisation d'amplitude suffisante pour diffuser l'onde radar et de phénomènes d'absorption de l'onde radar qui peuvent se produire dans certaines conditions géophysiques particulières.

5. Les objectifs scientifiques

La convection constitue la réponse primaire de la magnétosphère aux

sollicitations du milieu interplanétaire, et aux divers mécanismes de couplage se produisant à l'interface entre le vent solaire et la magnétosphère. Son étude est l'objectif principal du réseau SuperDARN. Mais par son caractère global, le réseau SuperDARN permet d'aborder de nombreux thèmes de recherche connexes, comme la conjugaison magnétique entre les hémisphères Nord et Sud, les oscillations de la magnétosphère ou les transferts d'énergie depuis l'atmosphère ionisée vers l'atmosphère neutre.

En dehors des objectifs généraux mentionnés ci-dessus, un objectif spécifique du radar Kerguelen (et plus particulièrement de la paire Kerguelen-Syowa) est l'étude des relations de conjugaison magnétique entre les hémisphères Nord et Sud. L'équipotentialité des lignes de force du champ magnétique terrestre, au moins à grande échelle, est source de symétrie entre les caractéristiques électrodynamiques des régions conjuguées. Cependant les sources d'asymétrie entre les hémisphères sont nombreuses et variées. Il s'agit en premier lieu de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre sur le plan de l'écliptique qui induit un effet saisonnier, ainsi que de l'inclinaison de l'axe du dipôle géomagnétique par rapport à l'axe géographique qui induit un effet diurne. La composante azimutale B_y du champ magnétique interplanétaire introduit un déplacement des vortex de convection en sens inverse entre les deux hémisphères. Un effet saisonnier important est dû aux différences de conductivité entre les ionosphères polaires d'été et d'hiver. Ceci se traduit par une forte dissymétrie dans les capacités des ionosphères Nord et Sud à fermer les courants magnétosphériques s'écoulant le long des lignes de force, et crée également une dissymétrie des champs électriques et de la convection du plasma qui leur sont associés.

L'intérêt de la paire Kerguelen-Syowa vis à vis de ces objectifs est considérablement renforcé par le fait que le champ de vue commun est magnétiquement conjugué avec la paire Thykkvibaer-Hankasalmi qui couvre le nord de la Scandinavie, extrêmement riche en moyens d'observation. En particulier, la présence des radars à diffusion incohérente européens EISCAT (European Incoherent Scatter) et ESR (Eiscat Svalbard Radar) permet une étude complète des paramètres de l'ionosphère. Cette concentration d'instruments de diagnostic au sol est aussi d'un grand support pour l'expérience CLUSTER-2 dans la mesure où ces 4 satellites effectuent des mesures détaillées dans la magnétosphère lointaine sur les mêmes lignes de force du champ magnétique terrestre.

Le réseau SuperDARN contribue ainsi à une meilleure connaissance de la haute atmosphère, cette région de notre environnement où s'exercent des activités humaines de plus en plus nombreuses. Dans ce cadre, grâce à leur fonctionnement continu et à leur large couverture spatiale, les radars du réseau SuperDARN participent activement au développement de la "météorologie de l'espace". En effet, tous les radars de l'hémisphère Nord sont maintenant reliés à Internet et envoient toutes les 3 à 7 secondes des informations permettant de calculer en temps réel des cartes de convection et d'en extraire le potentiel électrostatique régnant à travers la calotte polaire entre les cellules de convection. Ce potentiel pouvant atteindre 100 à 150 KV est le reflet de la différence de potentiel entre les deux flancs de la magnétosphère, et est aussi une indication de la quantité d'énergie qui est transférée du vent solaire vers l'environnement terrestre.