

Bilan scientifique - II- ACTIVITES SCIENTIFIQUES

II.1. Pôle Plasmas

1. Radioastronomie basses fréquences spatiale et sol	1
1.1. Radioastronomie solaire	2
1.2. Radioastronomie planétaire	3
1.2.1. La Terre	3
1.2.2. Jupiter	3
1.2.3. Saturne	4
1.3. Exoplanètes	5
1.4. Expérience d'astro-particule CODALEMA à Nançay	5
2. Mesure in situ des plasmas spatiaux et travaux théoriques ou de modélisation associés ..	5
2.1. Mesure in situ des plasmas spatiaux	6
2.1.1. Spectroscopie du bruit quasi-thermique (QTN)	6
2.1.2. La réalisation du récepteur SORBET pour BepiColombo/MMO	6
2.1.3. Théorie des antennes dans les plasmas poussiéreux	6
2.2. Structure et accélération du vent solaire	7
2.2.1. Structure à grande échelle du vent solaire	7
2.2.2. Evolution radiale des fonctions de distributions	8
2.2.3. Couplage d'ondes dans le vent solaire	9
2.2.4. Turbulence dans le milieu interplanétaire	9
2.3. Structure des magnétosphères et plasmas planétaires	9
2.3.1. Turbulence dans la Magnétogaine	9
2.3.2. Structure du tore de plasma à Saturne	10
3. Théorie et Simulations numériques	10
3.1. Théorie et Modélisation	11
3.1.1. Modèles exosphériques du vent solaire et vents stellaires de type solaire	11
3.1.2. Gerbes cosmiques	12
3.2. Simulations cinétiques : « particles-test » et N-corps	12
3.3. Simulations cinétiques sans collision : Vlasov	13
3.4. Simulations : Environnements planétaires	13
Prospective du pôle plasmas	14
I. Vent solaire et milieu interplanétaire	15
II. Environnements plasmas planétaires	16
III. Théorie et Simulations	17

II.1. Pôle Plasmas

Le pôle "Plasmas" du LESIA étudie l'ensemble des plasmas héliosphériques par l'observation, la théorie, et la simulation numérique. Cette approche cohérente est appliquée au diagnostic local et à distance d'environnements variés. Plus particulièrement, nous étudions le vent solaire (expansion de la zone de transition au milieu interplanétaire, turbulence et mécanismes de transport d'énergie) et ses relations avec les autres objets du système solaire. Par ailleurs, nous étudions les mécanismes de générations des émissions radio solaires (chocs, éjections de matière coronales), ainsi que les magnétosphères planétaires (interaction avec le vent solaire, structure et dynamique, réservoirs de plasma et physique aurorale). Notre activité s'articule autour de trois thèmes principaux :

- **Radioastronomie basses fréquences, spatiale et sol**
- **Mesure in situ des plasmas spatiaux et travaux théoriques ou de modélisation associés**
- **Théorie et Simulations numériques**

Les observations spatiales concernent les ondes électrostatiques in-situ et les émissions radio basses fréquences (≤ 15 MHz). Elles sont fondées sur l'expertise instrumentale du pôle, qui consiste en la conception et réalisation de récepteurs d'onde radio à très faible bruit. Ces récepteurs sont embarqués sur de nombreuses missions spatiales telles que Ulysse, Wind, Image, Cassini, Cluster. Par ailleurs, leur exploitation scientifique a abouti à de nombreux résultats développés ci-dessous. Lancée en 2006, STEREO est la dernière mission « phare » du pôle plasmas. En tant que PI de l'instrument S/WAVES, le pôle plasmas a la responsabilité de la diffusion des données radio, via la base de données du CDPP. La responsabilité scientifique et technique de S/WAVE a marqué une grande partie des activités du pôle entre 2004-2008. Les observations radio "sol" sont réalisées avec les réseaux décimétriques de Nançay et Kharkov, ainsi que par le spectrographe Artémis/Hécate. L'archivage des données en exploitation, à travers des bases de données (CDPP, BASS2000), constitue une autre activité importante du pôle. Les travaux théoriques sont quant à eux liés à l'interprétation des observations et à la modélisation des plasmas héliosphériques. Ces travaux sont confrontés à une approche par simulation numérique (codes Vlasov, hybrides, particulières), et donnent au pôle "Plasmas" une position de premier plan dans ce domaine.

La synergie entre les équipes technique et scientifique du pôle est un atout fort pour l'exploitation optimale des missions spatiales et confère au pôle plasmas une position internationale (PI et Co-I sur de nombreuses missions spatiales). Plusieurs propositions de missions futures d'exploration du milieu interplanétaire et des environnements planétaires ont été proposées dans le cadre notamment de la prospective Cosmic Vision de l'ESA (Phoibos, Mona), mais aussi avec la NASA (avec Laplace/JMO, Sentinels), JAXA ou encore avec la Chine. Notre activité sur la période 2004-2008 s'est également concentrée sur la conception de l'instrument SORBET sur BepiColombo ainsi qu'à la participation à l'AO de Solar Orbiter en proposant en tant que PI un instrument « ondes ».

Les thématiques développées au pôle plasmas font appel à des collaborations internationales plus spécifiques (mentionnons par exemple les USA, l'Italie, la République Tchèque, la Serbie ou encore la Belgique). Elles ont abouti également à la formation par la recherche d'étudiants en thèse. Nous présentons ci-dessous les résultats les plus marquants obtenus ces quatre dernières années.

1. Radioastronomie basses fréquences spatiale et sol

La radioastronomie est un outil primordial pour l'analyse à distance des plasmas naturels. Les ondes radio sont en effet la signature de processus plasma énergétiques (interactions ondes-particules ou ondes-ondes) observés dans divers contextes astrophysiques. Ces émissions radio basses fréquences sont produites sur une gamme étendue (de quelques kHz à quelques dizaines de MHz). L'envoi de récepteur radio dans l'espace permet de s'affranchir de la coupure ionosphérique à 10 MHz, et de sonder le milieu interplanétaire et les magnétosphères planétaires.

1.1. Radioastronomie solaire

La période 2002-2008 a été marquée par la réalisation de l'instrument radio S/WAVES (PI : J.-L. Bougeret) de la mission STEREO dont le lancement a été le 26 octobre 2006. L'objectif principal de cette mission est l'étude stéréoscopique (deux sondes) du milieu interplanétaire ainsi que des éjections de masse coronale (EMC), structures de plasma magnétisé qui prennent naissance dans la couronne solaire et qui sont éjectées vers le milieu interplanétaire. L'instrument S/WAVES offre la possibilité de localiser, avec moins d'ambiguïté qu'auparavant, la position des sources radio (Type II) qui sont parfois associées aux EMC. Couplé à l'instrument Secchi qui fournit des observations en lumière blanche sur un large champ de vue englobant à la fois le Soleil et la Terre, S/WAVES permettra, une fois que le cycle solaire sera reparti et que l'occurrence des type II sera suffisante, d'affiner la physique des EMC.

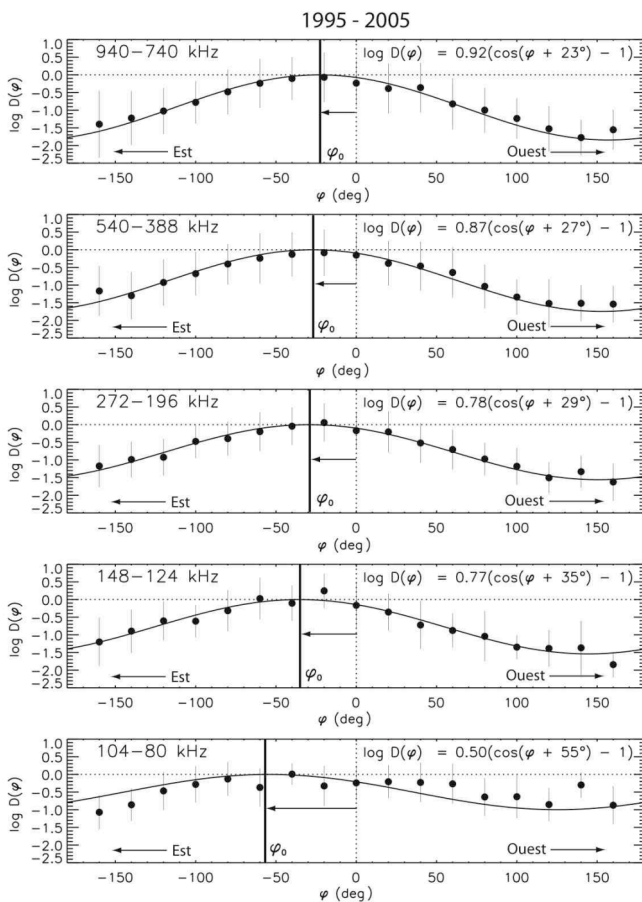


Figure 1.1 Evolution en fonction de la fréquence et de la longitude du diagramme d'émission de types III à partir des mesures radio de Wind et Ulysse (Bonnin et al., 2008).

Les sursauts de types II et III sont les émissions radio solaires les plus fréquemment observées dans le milieu interplanétaire. Leur étude est l'un des objectifs de la mission STEREO (Bougeret et al., 2008). Les sursauts de type III sont émis par des électrons énergétiques ($v \approx 0.03-0.3 c$) éjectés de certaines régions actives solaires. L'étude de leur directivité nous renseigne sur les différents processus physiques mis en jeu ainsi que sur les propriétés des régions émissives. L'observation simultanée par les récepteurs radio à bord des sondes Wind et Ulysse a permis de **mesurer avec une précision inégalée leur diagramme d'émission** moyen en dessous de 1 MHz (Bonnin et al. 2008) (voir Figure 1.1), confirmant les résultats obtenus avec Ulysse et le radio spectrographe au sol ARTEMIS. Cette mesure a permis d'étudier l'évolution de l'énergie radio des types III avec la fréquence, conjointement

avec Wind, Ulysse et STEREO (Bonnin, thèse 2008). Les sursauts de type II, observés aux ondes hectométriques et kilométriques, sont dus à des électrons accélérés au voisinage d'ondes de choc interplanétaires associées à des éjections de matière coronale. L'analyse approfondie du choc traversé par Ulysse en mai 2001 a permis d'identifier définitivement la source du type II dans la région du pré-choc amont et de mesurer précisément sa température de brillance au fondamental et à l'harmonique, ce qui a une grande importance pour la théorie de l'émission (Hoang et al. 2007).

Les observations décennales de la couronne solaire révèlent la présence de nombreuses émissions de faible intensité dérivant dans le plan temps-fréquence. Un spectropolarimètre numérique à haute sensibilité et haute résolution temporelle et spectrale a été développé dans le passé à l'Observatoire et installé sur les radiotélescopes de Nançay et de Kharkov. L'étude statistique des dérives en fréquence (observations de 1998 à 2002) permet d'identifier trois

populations de structures, différenciées par leur dérive dans le plan temps-fréquence. Aucune relation spécifique n'a pu être mise en évidence entre l'apparition de ces émissions et le cycle solaire ou l'activité solaire (Briand et al., 2008). Des simulations numériques ont montré qu'un chauffage localisé et dépendant du temps pouvait engendrer de telles ondes. Si cette interprétation est correcte, ces structures dérivantes seraient la signature de chauffage local dans la couronne solaire, et devraient être observables indépendamment de la phase du cycle ou de l'activité solaire.

1.2. Radioastronomie planétaire

Toutes les planètes magnétisées possèdent une magnétosphère qui résulte de l'interaction du champ magnétique planétaire avec le vent solaire. Ces magnétosphères sont de gigantesques accélérateurs de particules. En suivant les lignes de champ magnétique, les particules accélérées vont précipiter aux pôles magnétiques. L'observation de l'activité aurorale (dans le domaine radio, mais aussi ultraviolet ou infrarouge) donne un indicateur des processus énergétiques de la magnétosphère.

La goniopolarimétrie est une technique d'analyse des données radio permettant de retrouver la direction d'arrivée, la polarisation et le flux d'une onde électromagnétique incidente. Dans le cadre de la mission Cassini/RPWS/HFR, puis STEREO/Waves, de nombreuses études instrumentales ont été menées pour développer de nouvelles techniques goniopolarimétriques, estimer les barres d'erreurs et les conditions d'applications de ces techniques (thèse de B. Cecconi, 2004; Cecconi et Zarka, 2005; Cecconi, 2007; Cecconi et al., 2007), dont les résultats sont développés ci-dessous.

1.2.1. La Terre

Les émissions radio terrestres (dont la composante principale est le rayonnement kilométrique auroral) ont été largement étudiées depuis leur découverte à la fin des années 50. Parmi elles, les sursauts basses fréquences (LF-bursts) sont un type d'émission particulier dont la phénoménologie observée a pu être comprise grâce à la simulation des effets de **propagation d'une onde radio dans la magnétosphère et le vent solaire** (Steinberg et al., 2004). En outre, grâce aux données enregistrées par la sonde Cassini lors de son survol de la Terre en 1999 et aux données provenant des sondes STEREO, une **modulation à 24 heures de l'émission radio aurorale terrestre** a été observée pour la première fois. Deux articles sont soumis pour cette étude.

1.2.2. Jupiter

La magnétosphère de Jupiter, beaucoup plus complexe que celle de la Terre, est sous l'influence dominante d'un disque de plasma équatorial en rotation, mais ses régions les plus externes doivent rester couplées au vent solaire sur le modèle de la magnétosphère terrestre. L'analyse de données du télescope spatial Hubble en UV a permis de **découvrir une calotte et un cornet polaires** (Pallier et Prangé, 2004, Flasar et al., 2004), modélisés par Cowley et al. (2005), et leur relation aux variations des paramètres du vent solaire mesurés simultanément par les sondes Galileo et Cassini.

Lors du survol de Jupiter par Cassini fin 2000-début 2001, un spectre de référence des émissions radio joviennes a été établi à partir de 6 mois de données continues (Zarka et al., 2004), actualisant celui établi par Voyager. Par ailleurs, les sursauts quasi-périodiques (QP) dont l'origine reste inconnue a été particulièrement étudiée. Une étude conjointe avec la sonde Galileo (Hospodarsky et al., 2004) a montré que le diagramme d'émission instantané de cette composante radio est très étendu. La localisation des sources radio correspondantes, rendue possible par le développement de techniques goniopolarimétriques, montre qu'elles sont situées à haute latitude.

Les observations radio sol (au Réseau Décamétrique de Nançay ou depuis le radiotélescope de Kharkov) permettent des mesures à haute résolution spectrale et temporelle, tout particulièrement adapté à l'étude des sursauts millisecondes (ou S-bursts). Ces émissions sont produites par des électrons circulant dans le circuit Io-Jupiter (Hess et al., 2007) dont on mesure l'énergie. Les mécanismes de production de ces émissions, l'origine des structures fines et les mécanismes d'accélération des électrons ont fait l'objet d'une thèse (S. Hess, 2008 et références incluses). Par

ailleurs, l'analyse d'observations radio décamétriques sol (Nançay et Kharkov) a abouti à **la découverte de sauts de potentiel électrique** de l'ordre du kV alignés avec le champ magnétique **dans le tube de flux Io-Jupiter** (Hess et al., 2007).

1.2.3. Saturne

La magnétosphère de Saturne possède une dynamique intermédiaire entre celles de la Terre et de Jupiter. Son étude a un intérêt tout particulier dans un cadre de planétologie comparée. Ainsi, il a été possible de suivre la propagation d'un choc interplanétaire du Soleil à Saturne lors d'un alignement des trois planètes, et de montrer que la Terre, Jupiter, puis Saturne, répondaient successivement au passage de ce choc par une intense activité aurorale, observée en UV et/ou en radio (Prangé et al., 2004). Plus particulièrement, les études à Saturne concernent : la structure et dynamique magnétosphérique, les caractéristiques et variabilité du rayonnement kilométrique auroral (SKR), et la variabilité de la période du SKR.

Caractérisation du SKR : Le récepteur radio RPWS sur Cassini a permis une étude extensive du SKR (Gurnett et al. 2004; thèse de L. Lamy, 2008). L'analyse de 4 ans de données a permis de confirmer et caractériser statistiquement les propriétés du SKR déduites des études Voyager : le spectre du SKR s'étend de 3.5 kHz à ~1300 kHz (avec un plateau situé entre 100 et 400 kHz) et l'émission de type R-X est dominante (polarisation à gauche ou à droite pour les radiosources situées dans l'hémisphère sud ou nord respectivement). La variabilité du SKR le long de la trajectoire de l'observateur est compatible avec des sources radio plus intenses côté matin (Farrell et al., 2005). L'anisotropie de l'émission engendre l'existence d'une zone d'ombre équatoriale, ainsi qu'une disparition systématique de l'émission à haute latitude nord ($\lambda \geq 55^\circ$).

Structure et activité magnétosphérique : L'activité magnétosphérique de Saturne est fortement liée à celle du vent solaire. Une forte corrélation entre l'intensité du SKR et la pression dynamique du vent solaire a été observée avec Cassini (Jackman et al., 2005), confirmant les résultats obtenus par Voyager. Des événements de type sous-orages semblent avoir lieu dans la queue de la magnétosphère de Saturne, comme sur Terre (Mitchell et al., 2005). L'observation du SKR par le récepteur forme d'onde a révélé des structures fines similaires à celles observées près de la Terre (Kurth et al., 2005).

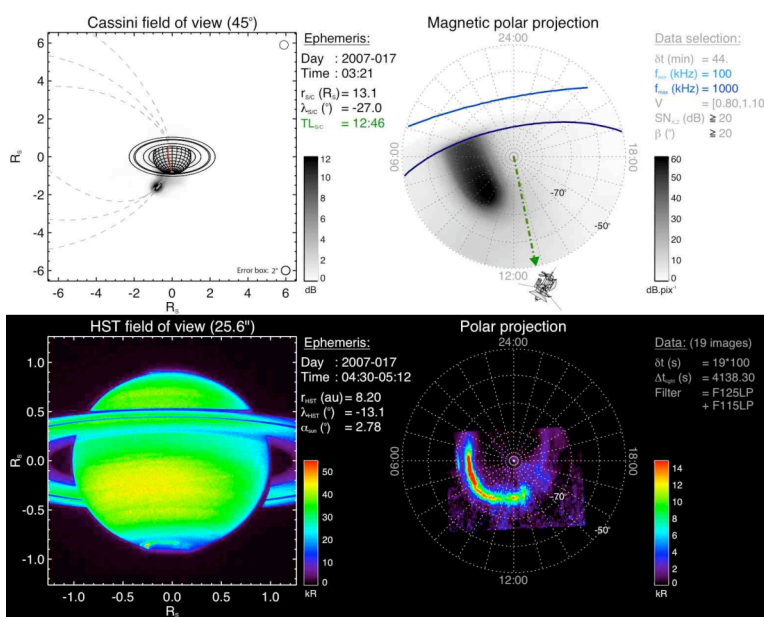


Figure 1.2 Images radio et UV du 17/01/2007 observées par Cassini et Hubble respectivement. (Gauche) Plan d'observation de chacun des satellites. (Droite) Projection polaire de l'émission organisée en temps local. Cette figure illustre que les sources radio et UV sont portées par les mêmes lignes de champ magnétique malgré l'anisotropie de l'émission radio (Lamy 2008).

Période de rotation : Il n'est pas possible de mesurer directement la période de rotation sidérale des planètes gazeuses. Pour cela, on étudie la modulation des émissions radio aurorales, liée à la rotation du

champ magnétique. Les mesures de la période de rotation sidérale de Saturne, mesurée par Voyager puis Ulysse ont montré que cette période radio est variable (Galopeau et Lecacheux, 2000). Les données Cassini ont confirmé cette variabilité (Gurnett et al., 2005). Des **variations à court terme**

de la période du SKR ont été découvertes, périodiques à 20-30 jours, et d'origine externe à la magnétosphère : elles sont corrélées aux variations de la vitesse du vent solaire au niveau de la magnétosphère kronienne (Zarka et al., 2007). Ce résultat confirme le modèle proposé par Cecconi & Zarka (2005) pour expliquer les variations de Pskr.

Éclairs d'orages : L'atmosphère de Saturne est aussi une source de rayonnements radio. Les éclairs d'orages produisent de brèves impulsions électromagnétiques à très large bande appelée SED (Saturn Electrostatic Discharges). Le récepteur RPWS permet leur détection et l'étude de leurs caractéristiques sur le long terme. Les orages de SED ont été corrélés avec des événements atmosphériques : les SED sont visibles alors que les orages atmosphériques correspondants sont encore situés derrière le limbe. Cela montre que les SED se propagent sous l'ionosphère avant de s'échapper dans l'espace. Une polarisation circulaire est mesurée aux basses fréquences et peut être expliquée par des effets de propagation (Fischer et al., 2006a,b; Zarka et al., 2008).

1.3. Exoplanètes

Un des défis de la radioastronomie basse fréquence est la détection de signaux faibles (c'est-à-dire dont l'amplitude est du même ordre que le bruit de fond). Des outils statistiques ont été développés en collaboration avec des collègues ukrainiens (Ryabov et al., 2004), en particulier pour détecter les émissions radio provenant de systèmes exoplanétaires. Des prédictions théoriques (Zarka et al. 2007; Griessmeier et al., 2007), justifient des observations à partir de récepteurs radio à haute sensibilité et hautes résolutions temporelle et spectrale. Le développement de tels récepteurs couplés à des techniques de déparasitage en temps réel et différé, a été effectué en collaboration avec des ingénieurs de Nançay et de l'Université d'Orléans (Weber et al. 2005).

Dans le cadre du projet ANR Radio-Exopla, un récepteur radio numérique a été développé en collaboration LESIA/Nançay/Kharkov. Deux exemplaires ont été installés au radiotélescope UTR-2 de Kharkov pour observations simultanées. Une cinquantaine de nuits d'observations et de tests ont été effectuées, permettant de détecter pulsars et SED entre 10 et 30 MHz. L'analyse des observations « exoplanètes » est en cours.

1.4. Expérience d'astro-particule CODALEMA à Nançay

Initiée par des chercheurs du laboratoire Subatech et du LESIA en 2003, une expérience de détection d'une signature radio associée aux grandes gerbes de rayons cosmiques de très hautes énergies (primaire d'énergie supérieure à 10^{17} eV) a été développée à partir du Réseau Décamétrique de Nançay (Ardouin et al., 2005a,b ; Ardouin et al., 2006). En 2006-2008, dans le cadre d'une opération financée par l'ANR impliquant plusieurs laboratoires français (LAL Orsay, ESEO Angers, LPSC GRENOBLE, LAOB Besançon, LPCE Orléans), a été développé un démonstrateur radio "opérationnel" sur le site de Nançay (Ardouin et al., 2007). Ce dispositif a permis de **caractériser le signal radio** dans les domaines temporel (impulsions très brèves), spectral (domaine décamétrique) et spatial (par rapport à la localisation de la gerbe atmosphérique) et, en particulier, **de fournir une estimation indépendante de l'énergie du primaire** (Meyer-Vernet et al., 2008). En parallèle avec les simulations numériques effectuées en Allemagne et en France (code AIRES, LPSC Grenoble), une étude analytique des mécanismes d'émission radio a été développée au LESIA. Les résultats sont en bon accord avec les observations, montrant l'importance de la prise en compte de l'indice dans le calcul du champ électrique créé par les secondaires (CODALEMA Team, 2008).

2. Mesure in situ des plasmas spatiaux et travaux théoriques associés

L'expertise instrumentale du pôle consiste en la conception et la réalisation de récepteurs d'onde radio et plasmas à très faible bruit. De tels récepteurs ont été embarqués sur ISEE 1-2-3, Ulysse (expérience URAP, récepteur RAR), Wind (expérience WAVES, récepteurs RAD-TNR), Image, Cassini (expérience RPWS/KRONOS, récepteur HFR), Cluster (récepteur STAFF-SA), STEREO

(expérience Waves/HFR-LFR) et fabriqués pour la mission BepiColombo/MMO (expérience SORBET). Concernant la recherche et le développement de ces récepteurs radio embarqués, une **caractéristique fondamentale du pôle plasma est l'existence d'une collaboration étroite entre chercheurs, ingénieurs et techniciens du LESIA**, permettant une synergie indispensable entre la théorie (des antennes en plasmas) et le design/réalisation (des récepteurs). Nous avons donc distingué dans ce qui suit la recherche liée à la conception/amélioration des instruments radio de mesure in situ et les travaux d'interprétation ou de modélisation qui sont associés à ces mesures divisées en « structure du vent solaire » et « structure des magnétosphères et plasmas planétaires ».

2.1. Mesure in situ des plasmas spatiaux

2.1.1. Spectroscopie du bruit quasi-thermique (QTN)

Une antenne électrique passive reliée à un récepteur radio sensible mesure les fluctuations électrostatiques produites par les mouvements d'agitation thermique des particules chargées du plasma environnant. L'analyse spectrale de ce bruit thermique, développée au LESIA, permet de déterminer avec précision les premiers moments de la fonction de distribution des électrons du vent solaire, comme par exemple la densité électronique, la température des électrons thermiques ou encore, en exploitant le bruit des protons décalé Doppler, la vitesse du vent. Une extension concerne le bruit thermique collecté par les antennes en présence d'un fort champ magnétique environnant (par exemple avec Cassini à Saturne). Dans ce cas, le « pic plasma » est décalé à la fréquence hybride haute et surtout des modes de Bernstein contribuent à la puissance spectrale collectée par l'antenne entre les harmoniques de la gyrofréquence (Moncuquet et al., 2005 & 2006 et références incluses). Outre la densité et température des électrons du cœur obtenus comme dans le cas non magnétisé, la spectroscopie QTN en mode de Bernstein, initiée par le pôle plasma lors du passage d'Ulysse dans le tore de plasma d'Io en 1992, permet un diagnostic des températures des électrons du halo. Enfin, on peut étendre la **méthode de spectroscopie du QTN en tenant compte de distributions non maxwelliennes** plus réalistes. Pour la première fois, nous l'avons implémentée pour des fonctions de distribution Lorentzienne généralisée dans le vent solaire (Zouganelis, 2008). Soulignons que cette méthode produit la plus précise et la plus fiable des mesures in situ de densité électronique et est utilisée pour la calibration des détecteurs de particules.

2.1.2. La réalisation du récepteur SORBET pour BepiColombo/MMO

SORBET (Spectroscopie des Ondes Radio et du Bruit Electrostatique Thermique) est un spectromètre d'ondes radio conçu pour le consortium d'instruments PWI (Plasma Waves Instrument) à bord de BepiColombo/MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter). Techniquement, SORBET comprend un récepteur à deux voies (TNR), dédié principalement à la spectroscopie du bruit thermique, et dont les entrées peuvent être connectées sur les deux dipôles électriques (WPT japonais et MEFISTO suédois) ou sur un dipôle et un senseur magnétique, dans la gamme 2.5-640 kHz. Cette bande de fréquence inclut les fréquences plasma et gyrofréquence attendues sur la plupart des orbites de MMO (Kasaba, Bougeret et al., 2008). SORBET comprend également un récepteur HF pour la radioastronomie à Mercure dans la gamme 500 kHz-10.2 MHz. **SORBET** est l'exemple type d'instrument ayant bénéficié d'une étroite collaboration entre les plasmiciens et électroniciens du LESIA. Le défi à relever pour embarquer sur BepiColombo était de réaliser un instrument avec des performances comparables à celles de Cassini ou STEREO (bas bruit, linéarité, 2 voies et cross-correlation des signaux, grande dynamique) mais avec une bien meilleure résolution spectrale et des spécifications drastiques de masse (<600g), puissance (<2W) et de résistance aux radiations et températures rencontrées à Mercure. Pour cela, des **développements R&D de miniaturisations spécifiques** (ASIC analogique) ont été réalisés (Moncuquet et al. 2006).

2.1.3. Théorie des antennes dans les plasmas poussiéreux

L'expertise du pôle sur la mesure in situ des plasmas spatiaux avec des récepteurs radio a été étendue aux plasmas poussiéreux depuis les résultats pionniers obtenus dans les anneaux de Saturne avec les sondes Voyager. Lorsqu'un grain de poussière rencontre une sonde spatiale, son énergie cinétique est généralement très supérieure à l'énergie de vaporisation et d'ionisation, ce qui produit un nuage de plasma dont la charge résiduelle est détectée par les antennes électriques. Notre méthode d'analyse originale, qui généralise aux antennes radioélectriques des résultats obtenus initialement pour l'étalonnage des détecteurs de poussières, est devenue classique. Actuellement, elle est appliquée à **l'analyse des anneaux dilués de Saturne** à partir des données Cassini (Moncuquet, Meyer, Gkini, Lecacheux, COSPAR, 2008), ainsi qu'à l'analyse des **poussières interplanétaires** à partir de STEREO (Meyer et al., soumis 2008).

2.2. Structure et accélération du vent solaire

2.2.1. Structure à grande échelle du vent solaire

L'étude de la structure tridimensionnelle de l'héliosphère sur plus de 17 ans est l'une des motivations de la mission Ulysse. Lors de son premier passage polaire en minimum solaire en 1994-1995, Ulysse est resté continûment immergé dans le vent rapide stationnaire et unique des hautes latitudes. Nous avons ainsi mis en évidence dans le vent rapide la variation avec la distance de la densité et de la température des électrons, obtenues par la méthode QTN, et vérifier la structure bimodale du vent solaire : vent rapide aux hautes latitudes (supérieures à 40°), vent rapide et lent entre 22°S et 21°N. Dans le cas du maximum solaire de 2001, la structure à grande échelle du vent est complètement modifiée. Le vent solaire est en effet dominé par un mélange de plusieurs types de vents à toutes les latitudes (Issautier et al., 2004).

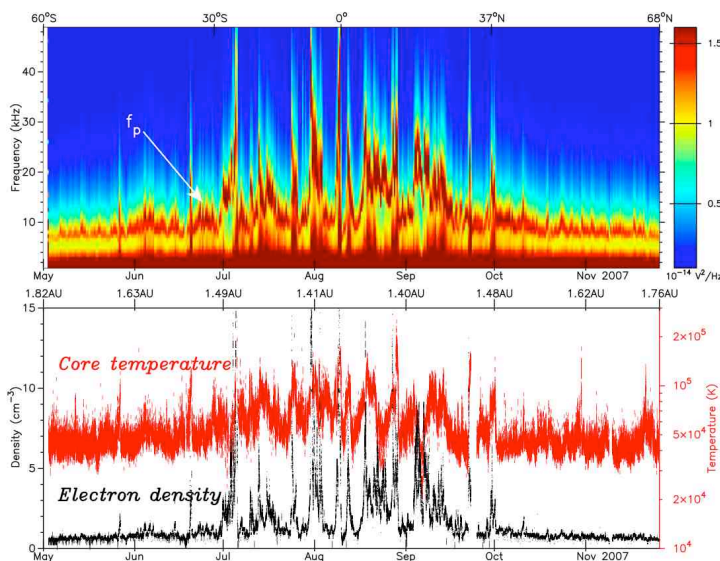


Figure 2.1 Spectre dynamique obtenu par Ulysse/URAP en 2007 en minimum solaire. Les densité et température des électrons sont déduites par la méthode QTN. Le spectre permet d'identifier deux régions distinctes en latitude, reflétant la structure bimodale du vent solaire : vent rapide et lent entre 30°S et 37°N, vent rapide au-delà [Issautier et al., 2008].

En février 2007, Ulysse a entamé son troisième survol rapide hors écliptique à nouveau en période de minimum solaire, mais avec un renversement du champ magnétique solaire comparé au dernier minimum. Les propriétés à grande

échelle du vent rapide ont été étudiées et comparées au premier passage hors écliptique de 1994-1995 en minimum solaire. Contrairement à ce qui était attendu, **le vent rapide** provenant des trous coronaires polaires des deux hémisphères est **moins dense (autour de 20%) et moins chaud (autour de 13%) qu'au dernier minimum**. Les mesures de densité et température des électrons montrent également un élargissement de plus de 10° de la lame neutre (comprise ici entre 30°S et 37°N), confirmée par les mesures de champ magnétique indépendantes. Celui-ci subit par ailleurs une décroissance de plus 35% comparé au dernier cycle alors que la vitesse du vent rapide est restée stable autour de 750 km/s (Issautier et al., 2008). Les variations observées sur les propriétés du vent solaire sur plus d'un cycle solaire pourraient être liées au cycle solaire de 22 ans à cause des fluctuations de la dynamo solaire.

Depuis son lancement en 1994, le récepteur radio de la sonde WIND permet d'étudier la structure à grande échelle dans le plan de l'écliptique en fonction du cycle solaire. A partir de la méthode QTN, les distributions de la densité et température des électrons du vent solaire (échantillon de plus de 2 millions de mesures) ont révélé que le vent solaire est plus froid (autour de 20%) et plus dense (autour de 15%) pendant le minimum d'activité solaire qu'en période de maximum solaire (Issautier et al., 2005). Par ailleurs, une anticorrélation de la densité électronique avec le nombre de taches solaires a été confirmée, pour la population la moins dense de la distribution en densité.

2.2.2. Evolution radiale des fonctions de distributions et interactions ondes/particules

Les modèles exosphériques du vent solaire (Zouganelis et al., 2004) et les simulations cinétiques supposent une distribution d'électrons non thermique à la couronne. Avec cette hypothèse majeure, inspirée par la présence de telles distributions dans le vent solaire, ces modèles expliquent les vitesses du vent rapide observées. Des éléments de réponse ont été apportés par Maksimovic et al. (2005) en étudiant les caractéristiques des distributions électroniques observées dans le vent solaire à partir des sondes Hélios, Wind et Ulysse. Le résultat de ce travail est que les **queues non thermiques** des fonctions de distribution des électrons **deviennent de plus en plus prononcées avec la distance**. Une analyse détaillée du « strahl » montre un comportement opposé, c'est-à-dire que sa densité tend à diminuer avec la distance. Combiné avec le fait que la densité du cœur reste constante avec la distance, cela suggère que les électrons du halo seraient en partie alimentés par ceux du strahl. Étant donné le faible niveau de collision des électrons du strahl, le mécanisme qui expliquerait leur diffusion devrait inclure des interactions ondes-particules ou des inhomogénéités de champ à grande échelle.

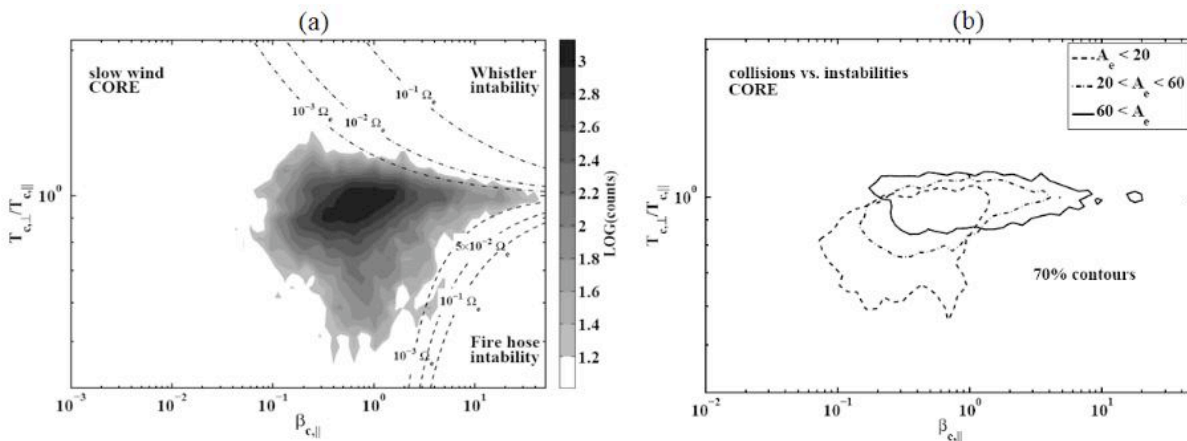


Figure 2.2 Rôles couplés des instabilités et des collisions Coulombienne quant à l'isotropisation du cœur des fonctions de distribution électroniques dans le vent solaire.

Les interactions ondes/particules mentionnées ci-dessus ont par ailleurs été mises en évidence pour la première fois par Stverak et al. (2008) pour les électrons du cœur de la fonction de distribution à partir de l'analyse d'environ 120 000 fonctions de distributions observées par Helios, Cluster et Ulysse. La figure 2.2a montre l'histogramme bi-dimensionnel de l'anisotropie de température du cœur ($T_{c\perp}/T_{c\parallel}$) en fonction du rapport entre les pressions cinétique et magnétique du plasma ($\beta_{c\parallel}$). Centrées autour de l'isotropie ($T_{c\perp}/T_{c\parallel}=1$) les observations montrent que les fortes anisotropies sont contrôlées par des instabilités de type *Whistler* pour $T_{c\perp}/T_{c\parallel} > 1$ et des instabilités de type *Fire-hose* pour $T_{c\perp}/T_{c\parallel} < 1$. La figure 2.2b montre qu'en plus du rôle des instabilités, les collisions coulombiennes jouent également un rôle dans l'isotropisation des électrons du cœur. Sur cette figure, les niveaux à 70% de l'histogramme précédent sont tracés pour différentes populations de vent solaire différenciées par leur âge collisionnel (rapport entre le temps de transit et l'inverse de la

fréquence de collision). On peut clairement voir que plus une population de vent solaire a subi de collisions au cours de son transport et plus elle est proche de l'isotropie de température. On peut donc en conclure que **les collisions Coulombiennes contrôlent le comportement du gros des distributions** et que les instabilités de plasma se déclenchent pour les forts écarts à l'équilibre.

2.2.3. Couplage d'ondes dans le vent solaire

Les théories permettant d'expliquer les émissions radio solaires de Type III liées à des éruptions prévoient des couplages d'ondes électrostatiques. Jusqu'à présent de tels couplages ont été mis en évidence en constatant la simultanéité d'apparition des ondes de plasma et d'un mode basse fréquence, et en comparant les intensités dans les ondes avec les seuils minimums nécessaires pour permettre de tels couplages. Les observations fournies par l'instrument formes d'ondes TDS à bord de STEREO (événements de 130msec en comparaison des 15msec fournis par WIND équipée d'un instrument similaire), nous ont permis pour la première fois **de vérifier les lois fondamentales de conservation du moment et de l'énergie** qu'impliquent de tels couplages. Une étude alliant bicohérence à partir des formes d'onde du champ électrique, analyse spectrale et en ondelettes montre que les ondes de Langmuir (10kHz) présentent une cohérence de phase avec un mode de basse fréquence (200Hz - interprété comme des ondes acoustiques ioniques décalées par effet Doppler). Ces couplages peuvent résulter de deux processus : (1) une instabilité de décroissance des ondes de Langmuir (à la base des processus d'émissions électromagnétiques des sursauts de Type III) ou éventuellement des processus de diffusion des ondes de Langmuir, (2) un piégeage d'ondes préexistantes dans le milieu dans des cavités de densité (Thèse P. Henri).

2.2.4. Turbulence dans le milieu interplanétaire

La turbulence dans les plasmas naturels est un problème ouvert en astrophysique. La présence du champ magnétique brise l'isotropie des fluctuations et impose des échelles et des fréquences caractéristiques. L'absence de collisions pose la question de la dissipation de l'énergie turbulente. Alexandrova (2008) a étudié ces problèmes dans le vent solaire et la magnétogaine terrestre, à partir des données Cluster. La turbulence dans le vent solaire aux échelles MHD est semblable à celle d'un fluide neutre, décrite par la phénoménologie de Kolmogorov. Au voisinage des échelles ioniques, une cassure spectrale est observée. Souvent interprétée comme le début du domaine dissipatif, Alexandrova et al. (2007) ont mis en évidence que cette cassure est liée au contraire à un changement de régime. Une **nouvelle phénoménologie**, basée sur des équations Hall MHD compressibles, a été proposée (Alexandrova et al., 2008) **pour décrire la cascade aux petites échelles**. Actuellement l'objectif est d'identifier les échelles où le domaine dissipatif commence.

2.3. Structure des magnétosphères et plasmas planétaires

2.3.1. Turbulence dans la magnétogaine

La magnétogaine terrestre est l'interface entre le vent solaire et la magnétosphère. Le vent solaire y est ralenti, dévié, comprimé et chauffé; sa pression magnétique s'y accroît. L'étude de l'écoulement turbulent et des transferts énergétiques dans la magnétogaine sont accessibles grâce à la résolution spatiale de Cluster. Dans cette région, on a pu identifier pour la première fois des structures cohérentes intermittentes en forme des vortex d'Alfvén (Alexandrova 2005, Alexandrova et al., 2006). Leur découverte change complètement l'image classique de la turbulence dans un plasma (mélange d'ondes planes avec des phases aléatoires). Par ailleurs, Alexandrova et al. (2008) ont pu mettre en évidence dans les flancs de la magnétogaine l'existence d'une cascade turbulente de type Kolmogorov ($\sim f^{-5/3}$) c'est-à-dire d'une turbulence inertielle au-dessous de 0.3 Hz. La très bonne sensibilité de l'instrument STAFF sur Cluster permet la mesure des formes d'ondes magnétiques jusqu'à 12.5 Hz et la puissance spectrale magnétique et électrique entre 8 Hz et 4 kHz. Ces fréquences correspondent à des échelles comprises entre les échelles ioniques et électroniques du plasma. A ces échelles (1000 km à 1 km) les observations des fluctuations électromagnétiques sont

compatibles avec des fluctuations gelées dans le plasma dont les vecteurs d'onde k sont distribués de façon anisotrope, avec $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$ (Mangeney et al., 2006; Alexandrova et al., 2008, soumis). En revanche, les observations des fluctuations électrostatiques, pour $f > 300$ Hz, sont compatibles avec des vecteurs d'onde tels que $k_{\parallel} \gg k_{\perp}$ (Mangeney et al., 2006; Lacombe et al., 2006). Enfin, nous avons comparé l'anisotropie de température des protons T_{\perp}/T_{\parallel} , observée par Cluster durant quatre traversées des flancs de la magnétogaine, à des simulations numériques MHD 3D. Le bon accord entre les simulations et les observations implique que T_{\perp}/T_{\parallel} est limitée par le seuil des instabilités d'ondes Alfvén et miroir, qui sont observées au-dessous de 0.3 Hz (Samsonov et al., 2007).

2.3.2. Structure du tore de plasma à Saturne

La spectroscopie du bruit thermique a permis de mesurer pour la première fois les plasmas froids (< 1 eV à proximité du plan des anneaux) et mêlés de poussière peuplant la magnétosphère interne de Saturne (depuis $7 \sim R_s$ dans l'anneau de poussière E jusqu'à l'anneau F vers $2.3 R_s$), et dont une bonne partie est due au satellite Encelade (Moncuquet et al. 2005). La figure 2.3 montre ces premiers résultats. L'exploitation systématique par spectroscopie QTN de chacun des périkrones de Cassini de 2004 à 2008 (une vingtaine d'orbites exploitables, entre 3 et 6 R_s), et la modélisation de la structure du tore de plasma (confinement, équilibre diffusif) qu'on peut en déduire sont en cours (Thèse M. Gkini). Comme pour la structure du tore de plasma d'Io à Jupiter, les premiers résultats

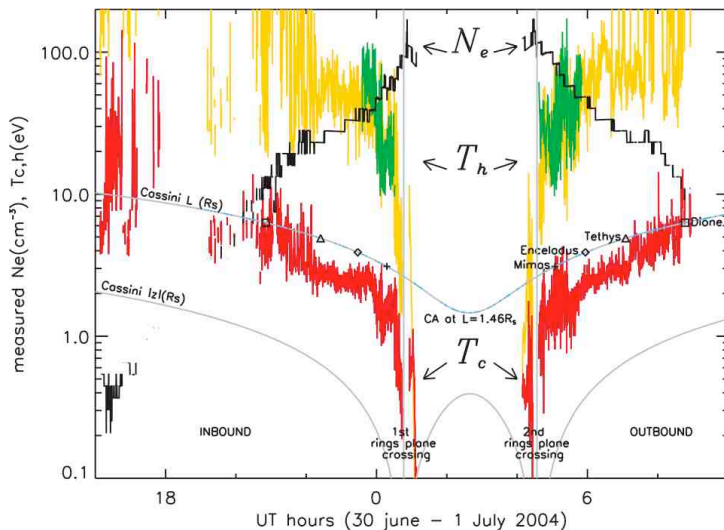


Figure 2.3 Températures (en rouge pour le cœur, jaune et verte pour le halo) et densité (noir) des électrons lors de l'insertion de Cassini dans le système de Saturne en 2004.

montrent une **anti-corrélation densité/température**, suggérant l'existence d'une distribution non thermique pour les ions et des processus associés de filtration des vitesses. Cependant, dans le cas de Saturne, l'équilibre thermodynamique du tore de plasma est considérablement compliqué par la présence de sources de plasma et de poussières variées (d'Encelade, d'autres satellites de glace, et du matériau des anneaux, notamment des grains de poussière). Il semble donc que **l'interaction plasma/poussière**, pour l'instant fort mal comprise/modélisée, **se solde par un net refroidissement du plasma** au moment de la traversée du plan des anneaux (et donc du maximum de poussières).

3. Théorie et Simulations numériques

La simulation numérique est un outil indispensable pour l'étude de processus physiques pour lesquels des solutions analytiques n'existent pas, en particulier pour presque tous les processus non linéaires (couplages d'ondes, interactions onde-particules ...). Pour certains domaines, dont les processus fondamentaux sont encore des questions ouvertes, les calculs purement théoriques constituent un guide inestimable. C'est le cas par exemple des vents stellaires, de la turbulence dans les plasmas naturels, et de l'émission radio des gerbes cosmiques. En ce qui concerne les vents stellaires, nous avons utilisé la théorie pour comprendre le rôle joué par les fonctions de distribution hors équilibre dans l'accélération du vent, tandis que les simulations numériques ont permis de valider la théorie en milieu faiblement collisionnel.

Deux grands axes de recherche sont abordés. Le premier consiste à comprendre comment l'injection d'énergie au niveau des grandes structures spatiales influence les propriétés statistiques locales des particules (fonctions de distribution) et la dynamique du plasma. C'est le domaine des simulations de type « particules-test » et « auto-cohérent ». Cependant, l'énergie déposée dans le plasma doit être dissipée. Dans un plasma collisionnel, la dissipation se produit à l'échelle du libre parcours moyen. Mais dans les plasmas non collisionnels la question reste ouverte. Les processus de piégeage de particules et de couplage d'ondes à des échelles comparables à la longueur de Debye semblent cependant jouer un rôle fondamental. Pour aborder ces questions dans les régions de degré de « collisionnalité » fort différent, des approches complémentaires (N-corps, Vlasov) ont été développées.

Les simulations portant sur les processus physiques eux-mêmes, de nombreux codes et résultats trouvent leur application non seulement en astrophysique mais en physique de laboratoire. Par exemple, le problème de l'expansion d'un plasma dans le vide abordée par les simulations N-corps est un sujet extrêmement porteur dans le cadre de la physique de l'interaction lasers-plasmas et de la recherche sur la fusion inertielle. L'étude de la formation de structures cohérentes dans un plasma sans collisions ou les interactions ondes-particules (via des simulations de type Vlasov) sont d'autres exemples de sujet fondamental en physique des plasmas avec applications de laboratoire. Ces travaux sont le fruit d'une longue expérience en théorie cinétique et en développement de codes numériques. L'évolution des connaissances et des possibilités offertes par les ordinateurs (multiprocesseurs, parallélisation) conduit vers des simulations intégrant de plus en plus de dimensions. Par exemple, parmi les derniers développements, nous pouvons citer celui d'un code « hydride » (2D, 3V) qui permet d'inclure les effets du champ magnétique (Valentini et al. 2007). Nous allons donner quelques exemples pour illustrer les possibilités des différentes approches.

3.1. Théorie et Modélisation

3.1.1. Modèles exosphériques du vent solaire et vents stellaires de type solaire

Le problème fondamental de l'accélération du vent solaire et stellaires du même type est l'absence de théorie du transport de l'énergie en plasma faiblement collisionnel, dans lesquels les fonctions de distribution des particules ne sont pas Maxwelliennes. Ce problème a d'abord été abordé dans le cadre des modèles exosphériques de vent basés sur l'équation de Vlasov. Un **nouveau modèle exosphérique de vent rapide** donne dorénavant la solution transonique complète (Zouganelis et al., 2004). L'accélération du vent est plus importante par rapport aux modèles exosphériques précédents. Ceci résulte de la forme non monotone du potentiel des protons qui oblige certains protons à retourner vers le Soleil, à cause de la basse altitude de l'exobase dans le cas des trous coronaux d'où est issu le vent rapide. Le flux de protons s'échappant étant réduit, le potentiel électrique qui accélère le vent est renforcé. Il faut aussi noter que la vitesse terminale est anticorrélée avec le rapport de la température des protons sur celle des électrons à l'exobase. Cela montre que de grandes températures coronales (irréalistes) et un chauffage supplémentaire de la région externe de la couronne ne sont pas nécessaires pour expliquer les vitesses du vent rapide.

En parallèle, des simulations cinétiques avec des collisions Coulombiennes ont été réalisées en utilisant des fonctions Maxwelliennes ou non (Zouganelis et al., 2005a). Les résultats des simulations sont en bon accord avec les modèles exosphériques malgré la différence fondamentale entre la physique et la méthodologie, ce qui est a priori surprenant. Cet accord résulte dans le faible taux de collisionnalité, hypothèse implicite des modèles exosphériques. En effet, certaines trajectoires de particules, inaccessibles à partir de l'exobase, sont peuplées de façon à minimiser les discontinuités de la fonction de distribution des vitesses. L'existence d'électrons piégés dans les modèles exosphériques est une condition nécessaire pour que le vent soit supersonique, tout comme les collisions dans les simulations cinétiques sont nécessaires pour produire un vent supersonique (Thèse I. Zouganelis, 2005). L'ensemble de ce travail a montré que la **présence d'électrons suprathermiques dans la couronne solaire permet d'accélérer le vent rapide, même en**

présence de collisions. Pour appliquer ces résultats aux vents stellaires, Zouganelis et al. (2005b) ont étudié la variation de la vitesse du vent avec le rapport de la vitesse thermique des ions sur leur vitesse d'échappement du potentiel gravitationnel de l'étoile, et montré dans quel domaine de masse-rayon-température la présence d'électrons suprathermiques augmente la vitesse du vent.

3.1.2. Gerbes cosmiques

Près d'un siècle après la découverte des **rayons cosmiques**, leur origine et leur nature constituent encore un des problèmes majeurs de l'astrophysique. La majorité d'entre eux est détectée à très grande distance par leur rayonnement électromagnétique, mais ceux qui atteignent la Terre jouent un rôle privilégié puisqu'on peut les observer quasi-directement. En particulier, les grandes gerbes produites dans l'atmosphère sont étudiées avec des détecteurs de particules géants de type Auger, ainsi que via la fluorescence et le rayonnement Cerenkov dans le domaine optique. La radioastronomie constitue une technique complémentaire, mais jusqu'à très récemment, les difficultés à la fois théoriques et expérimentales ont empêché d'analyser le phénomène, au point qu'il n'y a pas d'accord sur le mécanisme fondamental de l'émission.

Afin de comprendre le **mécanisme d'émission**, nous avons entrepris une étude analytique basée sur un modèle simplifié (Meyer et al. 2008). L'indice de réfraction de l'air, généralement négligé dans les simulations numériques, joue un rôle majeur, puisque les particules de la gerbe se déplacent à une vitesse proche de la vitesse de phase des ondes. Une conséquence importante est la variation du champ avec les conditions atmosphériques. Nous avons calculé le champ Coulombien amplifié par la contraction relativiste et modifié par l'indice, et montré qu'il contribue de manière importante au signal, avec une amplitude et un spectre correspondant aux valeurs mesurées. Ce résultat est primordial puisque cette contribution est négligée dans les simulations, qui se concentrent sur la contribution synchrotron. Nous avons également calculé le spectre du champ Cerenkov, montré que les estimations basées sur les expressions classiques de l'énergie rayonnée ne sont pas applicables, et indiqué les conditions dans lesquelles la contribution Cerenkov est importante.

3.2. Simulations cinétiques : « particles-test » et N-corps

Depuis quelques années, à côté des traditionnels codes utilisés pour la simulation de plasmas nous avons utilisé des **techniques N-corps pour simuler des plasmas spatiaux** ou de laboratoire dans lesquels les collisions entre les charges constituantes jouent un rôle non négligeable. Ainsi, nous avons pu montrer à l'aide d'un code de type N-corps, développé au LESIA et dépendant d'une seule coordonnée spatiale, que le flux de chaleur dans le vent solaire doit être plus intense que ce qui est généralement admis (Landi et Pantellini, 2003). Plus récemment, en voulant adapter le code à l'étude de l'effet des pertes radiatives sur la structure du plasma de la couronne solaire, nous nous sommes intéressés à la simulation de systèmes granulaires, très répandus dans la vie de tous les jours : le sable, la neige, les tas de pomme de terre en sont des exemples. On les retrouve également en astrophysique : les anneaux astrophysiques, tels les anneaux de Saturne, les nuages protoplanétaires et la matière interstellaire froide en général en sont des exemples concrets. Pantellini & Landi (2008) étudient le processus de formation de conglomerats (grumeaux) de grains denses et froids. La tendance à former des grumeaux est une caractéristique quasi-universelle des systèmes granulaires. Nous avons montré que lors du processus de formation les forces de friction entre les espèces de grains différents pousse les grains les plus lourds vers le centre des grumeaux en expulsant les grains légers vers les bords. Ce travail illustre la versatilité de ce type de code permettant de simuler à la fois des écoulements granulaires et le vent solaire à grande échelle.

En 2002 W. Dehnen publie un nouveau code N-corps 3D pour l'étude des systèmes de corps à interaction gravitationnelle tels l'ensemble des étoiles d'une galaxie. L'extrême efficacité du code nous a incité à l'adapter pour la simulation des plasma collisionnels, ou non collisionnels, pour enfin réaliser des simulations dites "ab initio", c.à.d. ne comportant aucune hypothèse forte sur les propriétés du plasma à simuler. Beck (thèse 2008) a étudié le problème de **l'expansion d'un**

plasma dans le vide, problème difficilement abordable avec d'autres codes à cause de la présence d'une frontière plasma-vide, le degré de collisionnalité variant de manière extrêmement forte dans le milieu. L'expansion d'un plasma dans le vide est un sujet extrêmement porteur dans le cadre de la physique de l'interaction lasers-plasmas et de la recherche sur la fusion inertielle.

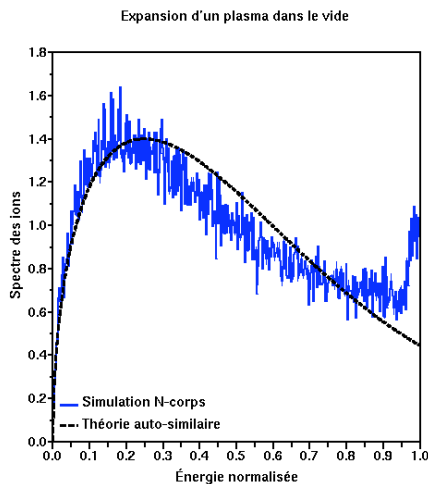


Figure 3.1 Spectre d'énergie des ions obtenus dans une simulation d'expansion dans le vide comparé avec la prédiction d'un modèle théorique (thèse A. Beck, 2008).

3.3. Simulations cinétiques sans collision : Vlasov

La structure «core-halo» de la fonction de distribution des électrons dans le vent solaire peut être interprétée comme produite par des interactions locales ondes/particules, observé dans pratiquement tous les plasmas sans collisions de faible densité. Dans ce scénario, la source des ondes peut être trouvée dans la partie hors d'équilibre de la fonction de distribution. L'étude est basée sur l'idée que la cascade des grandes échelles fluides vers les petites échelles cinétiques est

la source des ondes en interaction avec les électrons. Le modèle a montré que l'interaction du «bruit thermique» du plasma avec les mouvements à basse fréquence était capable de générer une queue suprathermique sur la fonction de distribution d'électron qui ressemble fortement aux observations «core-halo». Califano & Mangeney (2008) ont étudié en détail la dépendance quantitative de l'efficacité de la production des électrons suprathermiques sur différents paramètres pour comprendre leur rôle et comparer les résultats avec les observations dans le vent solaire.

Nous avons simulé **l'évolution d'un plasma stratifié** après injection de particules rapides. Ce type de problème est lié à l'analyse d'observations in-situ comme les ondes associées aux émissions de Type III, la génération des trous de densité dans l'ionosphère terrestre, etc. L'originalité de ce travail a été de proposer un **nouveau modèle** où, au lieu de supposer la présence d'un faisceau quasi monocinétique dans le système, on regarde les **effets dus à un chauffage local** sur le reste du plasma initialement au repos. Nous avons montré que de manière presque naturelle des fluctuations de plasma se développent dans le système sous la forme de paquets d'onde avec un spectre de longueurs d'onde assez large. En même temps, des structures électrostatiques cohérentes avec champ électrique associé de forme dipolaire sont générées (Briand et al., 2007, 2008 – sous presse).

Califano et al. (2007) ont étudié le **rôle et l'influence des effets dissipatifs sur l'évolution du système Vlasov – Poisson**. En particulier différents états asymptotiques du système sont possibles par une simple modification des effets dissipatifs et dispersifs, même si cette échelle dissipative est toujours bien plus petite que n'importe quelle échelle physique du système (longueur de Debye, vitesse thermique...). Nous avons également montré que dans certaines régions critiques, caractérisées par des fluctuations à petite échelle de la fonction de distribution, les corrélations entre particules discrètes deviennent non négligeables et donc le traitement statistique habituel justifiant l'utilisation de l'approximation de Vlasov est remise en cause. Ce problème apparaît donc comme fondamental du point de vue de la physique des plasmas. A plus courte échelle l'objectif est de comprendre le type de phénomène «quasi collisionneur» à ajouter à l'équation de Vlasov pour suivre correctement la formation de structures à petite échelle à comparer avec les observations.

3.4. Simulations d'environnements planétaires

Le code ECLIPS (Emissions CycLotron dues à l'Interaction Planète-Satellite) est un code particules-test 1D (les champs dus aux particules ne sont pas pris en compte), qui permet de simuler

la distribution de particules le long d'une ligne de champ magnétique planétaire, en prenant en compte la présence de champs pouvant éventuellement accélérer les particules. A partir des distributions électroniques simulées, les taux de croissance de l'instabilité MASER-cyclotron (qui est à l'origine des émissions radio planétaires) sont calculés analytiquement pour les divers gradients positifs présents dans la distribution (cône de perte, anneau, coquille). Les diagrammes de rayonnement calculés pour les sources MASER- cyclotron sont alors pris en entrée du code SERPE (Simulateur de la visibilité des Émissions Radio Planétaires et Exoplanétaires), qui calcule les spectres dynamiques produits par une distribution quelconque de sources et détectés par un observateur fixe ou en mouvement (Hess et al., 2007 & 2008). Ces codes ont été appliqués au cas de l'interaction Io-Jupiter et ont permis de clarifier les processus d'accélération à l'origine des émissions liées à cette interaction. Leur application à Saturne permet la simulation des spectres dynamiques mesurés par Cassini et des études multispectrales précises (la distribution des sources UV aurorales peut être injectée dans SERPE pour simuler les observations radio simultanées).

Prospective du pôle plasmas

L'expertise technique et scientifique du pôle plasmas, reconnue internationalement, a permis la réalisation d'instruments radio de sensibilité inégalée, embarqués sur les plus grandes missions internationales. Les résultats de premier plan rapportés dans le document de bilan du pôle montrent l'importance de préserver une équipe technique propre à la conception de récepteur radio de pointe, en synergie avec les chercheurs. La pérennisation de cette expérience en instrumentation doit passer par le recrutement à la fois des doctorants formés à la théorie et à l'instrumentation ainsi que de nouveaux ingénieurs et techniciens. C'est à cette condition que le pôle gardera sa capacité de proposer de nouveaux projets spatiaux pour relever les nouveaux défis scientifiques au sein de la communauté internationale.

L'engagement du pôle dans des instruments spatiaux ou sol de grande envergure a naturellement conduit à un développement important de nos collaborations internationales. Outre nos liens privilégiés avec les laboratoires américains engendrés par les missions spatiales passées (notamment Ulysse, Wind, Cassini, Stéréo), nos collaborations se sont étendues vers des pays Européens (République Tchèque, la Serbie, l'Italie, ...) et le Japon. L'accroissement du nombre de thèses en co-tutelle depuis quatre ans (deux avec la Serbie, une avec la République Tchèque, une avec la Grèce et deux avec l'Italie) est un autre indicateur de l'implication du pôle au niveau européen. L'implication du pôle comme **responsable de l'instrument SORBET sur Bepi-Colombo/MMO/PWI** permettra un accroissement des collaborations avec le Japon, tant pour l'aspect instrumental que pour le développement des simulations numériques et la modélisation. De plus, les relations avec la Chine seront amenées à s'intensifier dans le cadre de nouveaux projets.

Parallèlement, le pôle va **renforcer ses collaborations existantes** avec les autres laboratoires spatiaux et plasmas français, notamment **en Ile de France**. Dans ce contexte, nous avons participé au printemps 2008 au PPF « les plasmas : du laboratoire à l'univers » proposé à l'Université Pierre et Marie Curie, fédérant les laboratoires « plasmas » d'Ile de France. Il s'agit de structurer des activités de recherche et d'enseignement (master Astronomie et Astrophysique, master science de la fusion) en profitant et en mutualisant les compétences existantes en astrophysique, physique des plasmas et physique atomique pour faire émerger un nouvel axe d'activité. Par ailleurs, le pôle plasma est fortement impliqué dans l'élaboration d'un partenariat entre le futur LPP (regroupant le CETP et le LPTP) et l'Observatoire de Paris, facilitant ainsi nos collaborations comme par exemple sur le projet Solar Orbiter. Ce partenariat serait un premier pas vers une structure de plus grande échelle rassemblant les forces des divers laboratoires de la discipline depuis les plasmas astrophysiques aux plasmas de laboratoire en passant par la théorie et la simulation numérique. Une telle « fédération » pourrait garantir un potentiel fort de propositions pour des futurs projets, grâce à

la complémentarité des spécialités de chacun tout en permettant une plus grande cohésion et visibilité de la communauté plasma.

Les défis scientifiques

Les prospectives de recherche du Pôle Plasmas pour 2009-2012 concernent les deux thèmes phares du pôle : le vent solaire, des grandes aux petites échelles, et les environnements plasmas planétaires. Les études menées dans ces domaines ont déjà permis d'apporter des réponses fondamentales et d'améliorer notre compréhension dans les sujets de pointes tels que le chauffage de la couronne et l'accélération du vent solaire, l'échange d'énergie entre les échelles micro et macroscopique dans les milieux non collisionnels ou encore l'accélération de particules et les mécanismes d'émission radio dans les environnements planétaires. L'exploitation des missions spatiales en opérations ou bien en cours de réalisation (**WIND, CASSINI, CLUSTER, STEREO, BEPICOLOMBO**) s'articulent autour de ces questions, en parallèle des missions en phase de gestation (voir ci-dessous §I & II). Mentionnons également les implications fortes du pôle sur des projets « sol » et les perspectives en simulation et théorie (§III).

I. Vent solaire et milieu interplanétaire

Il semble maintenant clair que la stratégie pour répondre aux questions fondamentales sur le chauffage de la couronne et l'origine du vent solaire passe par une mission pour explorer les régions de l'héliosphère interne, aussi près que possible de la photosphère du Soleil.

La première étape sera **Solar Orbiter**. Cette mission permettra pour la première fois d'étudier la dynamique de la couronne solaire et l'héliosphère interne à une distance radiale de ~ 50 rayons solaires (~ 0.25 UA). L'orbite de Solar Orbiter rendra possible des périodes d'observation en phase avec la rotation solaire. Ceci permettra, pour la première fois, d'associer directement des observations à haute résolution spatiale d'événements à la surface solaire et dans la couronne avec des mesures in situ dans le vent solaire. Dans le cadre d'un appel d'offre instrumental émis par l'ESA, le Pôle Plasmas a soumis en janvier 2007 une proposition de type « Principal Investigator » pour l'instrument RPW (Radio and Plasma Waves). Cet instrument permettra de mesurer les champs électriques et magnétiques dans le plasma à haute cadence temporelle afin de déterminer les caractéristiques des ondes électromagnétiques et électrostatiques dans le vent solaire depuis le continu jusqu'à 20 MHz. Nous poursuivrons les études de phase A de Solar Orbiter/RPW.

Les technologies permettent maintenant d'envisager une sonde solaire qui mesurera les caractéristiques du plasma coronal jusqu'à 4 rayons solaires. Le concept actuel (Solar Probe +) qui devrait aboutir à la publication par la NASA d'un appel d'offre instrumental début 2009 consiste en une sonde ayant une trajectoire elliptique permettant de s'approcher à 9 Rs plusieurs fois par an. Le Pôle Plasmas est sollicité pour participer à cet appel d'offre. Côté ESA, la proposition PHOIBOS a été soumise à la prospective Cosmic Vision. Cette proposition a pour but d'étudier un concept de sonde qui n'utilise ni de RTG pour la gestion de l'énergie à bord ni un passage par Jupiter qui permet, par assistance gravitationnelle, d'acquérir une orbite finale inclinée d'environ 90° par rapport à l'écliptique et un périhélie de 4 Rs (Maksimovic, Velli et al., 2008). La mission PHOIBOS n'a pas été présélectionnée par l'ESA, mais des études R&T se poursuivront sur ce concept et sera proposée à nouveau au deuxième tour de l'AO de Cosmic Vision (ESA).

Par ailleurs, la compréhension des mécanismes de transfert d'énergie multi-échelles dans les milieux non collisionnels, tel que le vent solaire, nécessite des mesures in situ des champs électriques et magnétiques ainsi que de fournir les caractéristiques des particules. Compte tenu des faibles taux de télémétrie, les missions actuelles ne fournissent que quelques secondes de données par jour. Il est donc nécessaire de repousser les limites des instruments actuels. Rappelons que des mesures radio (in situ ou à distance) dans le vent solaire seront rares après l'arrêt de WIND et de STEREO. Le pôle s'implique donc sur toute mission spécifiquement dédiée à des mesures in situ en fournissant des récepteurs radio optimisés pour l'étude des processus physiques de dissipation de

l'énergie et les interactions multi-échelles. Deux missions sont actuellement en cours de définition : SENTINELS (NASA) et KUAUFU (Chine). Près de la Terre, la mission CROSS-SCALE, pré-sélectionnée par l'ESA dans le contexte Cosmic Vision, propose une stratégie d'analyses multi-échelles simultanée de processus 'plasma' fondamentaux : chocs, reconnexion, turbulence. Elle constitue une évolution naturelle du concept de CLUSTER et permettra de réaliser l'analyse quantitative des processus tri-dimensionnels et multi-échelles. Le pôle plasmas participe actuellement aux discussions scientifiques de Cross-Scale et à l'instrumentation radio associée.

II. Environnements plasmas planétaires

Du point de vue des environnements planétaires, avec l'acquis des missions CASSINI et STEREO, et BEPICOLOMBO à venir, l'objectif est double : étudier les mécanismes d'émission et d'accélération des particules magnétosphériques, notamment la localisation des sources d'émission radio et la détermination des modes d'émission; étudier les interactions satellites-magnétosphères planétaires et en déduire une cartographie précise du plasma pour comprendre les phénomènes multi-échelles. Notons que l'apport de la simulation numérique dans l'exploitation de ces observations est fondamental. Deux missions sont actuellement privilégiées : LAPLACE/JMO et JUNO.

La mission LAPLACE, pré-sélectionnée par l'ESA, est en phase d'étude dans le contexte Cosmic Vision. Il s'agit d'une mission ambitieuse d'étude du Système Jovien (magnétosphère, atmosphères et satellites galiléens), intéressant a priori les 3 agences ESA, NASA et JAXA. La mission inclut aussi un orbiteur magnétosphérique (JMO), qui intéresse vivement le pôle plasma du LESIA à la fois pour ses objectifs scientifiques liés aux plasmas (étude du tore de plasma, notamment au voisinage d'Europe et de Ganymède, étude de l'interaction magnétosphère jovienne/vent solaire, émissions radio) et pour une participation à la charge utile. En effet, instrumentalement, l'implication du pôle plasma sur **LAPLACE/JMO** consisterait :

- à un spectromètre radio bruit thermique, monté a priori sur l'orbiteur magnétosphérique JMO (en collaboration éventuelle avec la JAXA, comparable à celle menée pour BepiColombo/MMO). Un tel spectromètre permettrait d'effectuer une cartographie précise des électrons thermiques et suprathermiques de la magnétosphère jovienne et plus particulièrement dans le tore de plasma d'Europe (étude des sources du plasma, du « sputtering », du recyclage du tore de plasma d'Io, des structures à grande échelle ...) ainsi que dans la magnétosphère de Ganymède.

- à un spectro-goniopolarimètre HF permettant de remonter à la polarisation complète et au vecteur d'onde \mathbf{k} incident pour étudier l'ensemble des émissions radio aurorales et dues aux interactions satellites-magnétosphère. Les mesures proposées visant à localiser les radiosources joviennes, déterminer les modes d'émission (via la mesure de la polarisation), et contraindre les mécanismes d'émission radio et d'accélération des particules magnétosphériques, seront d'autant plus efficaces que la latitude atteinte par l'orbiteur emportant l'expérience sera élevée.

Les observations seraient complémentaires de celles de **JUNO**, orbiteur polaire de Jupiter pour lequel le pôle a une participation de type « co-Investigateur ». JUNO permettra d'étudier en profondeur la magnétosphère polaire de Jupiter, les aurores, le champ magnétique (et le champ de gravité) en effectuant des mesures in-situ dans les radiosources (comparables à FAST dans les sources de l'AKR terrestre). Son expérience radio sera seulement sensible au flux total sans capacités de mesures goniopolarimétriques.

Coté « sol », le grand réseau BF Hollando-Européen LOFAR sera opérationnel à partir de 2009, et inclura une station (réseau élémentaire d'antennes) à Nançay. Un concept de "super station" a été soumis à l'ANR pour étendre la participation française au projet. LOFAR et le projet de super station ont - parmi des objectifs interdisciplinaires - plusieurs objectifs scientifiques planétaires, exoplanétaires, solaires et héliosphériques. Le pôle plasmas est fortement impliqué dans le Co-PI ship du consortium français "FLOW", le PI-Ship du working group « planètes-exoplanètes » mais

également représenté au CS de LOFAR. En complément à LOFAR, l'exploitation des spectromètres BF à très hautes résolutions temporelle et spectrale à Nançay (dans la gamme 10-100 MHz, avec une aire effective 20 fois inférieure à LOFAR) et à Kharkov (10-30 MHz, avec une aire effective comparable à LOFAR) se poursuit. Cela permet d'aborder - outre Jupiter et le Soleil - des études de plasmas astrophysiques (exoplanètes, pulsars, étoiles à éruptions).

Pour finir, la prospective spatiale à moyen/long terme pourrait inclure l'interférométrie radio BF spatiale (pour études astrophysiques à haute résolution angulaire pour la première fois aux BF), et les projets en cours d'étude d'implantation d'antennes radio BF sur la Lune (de préférence la face cachée). Ils offriraient la possibilité à terme d'un réseau de grande aire effective, pour l'étude des sources faibles (cosmologie, exoplanètes).

III. Théorie et Simulations

La théorie et simulation numérique sont des outils transverses aux différentes thématiques du pôle plasmas. Ces compétences, nécessaires à l'exploitation des observations in situ et à distance, permettent d'aborder les problèmes à résoudre sous des angles complémentaires.

La micro-physique des plasmas à laquelle nous avons un accès de premier plan par la mesure (type forme d'ondes) mais également par des aspects théoriques et de simulations est une thématique en plein essor au pôle plasmas. Les mécanismes responsables de la formation des structures cohérentes (observées dans le vent solaire, dans la magnétosphère de Jupiter...) sont encore largement incompris. Néanmoins, il paraît clair que la forme de la fonction de distribution en énergie des électrons (non-Maxwellienne) joue un rôle crucial. Le problème peut donc être traité par la théorie cinétique. L'universalité de ces structures présente des défis nouveaux à la communauté de simulation numérique des plasmas spatiaux et être adaptés à des problèmes originaux (certains réacteurs nucléaires).

Par ailleurs, l'étude du transport de l'énergie dans les plasmas non collisionnels, tel que le vent solaire, peut être traitée par des modèles cinétiques sans collision et les simulations associées, à généraliser à la structure spirale du champ magnétique (collaborations Belgique, Italie).

Les sondes explorant les magnétosphères planétaires permettent, principalement, l'acquisition d'informations sur l'état du plasma à l'endroit de la sonde. Cependant, une magnétosphère planétaire est un système très étendu avec une structure spatiale complexe et souvent très variable au cours du temps. Ainsi l'interprétation des observations en un point, dépendant souvent d'événements distants, n'est pas aisé sans l'apport de simulations numériques, permettant une vue globale du système magnétosphérique. Un code hybride (collaboration République Tchèque) permet de produire des cartes de la magnétosphère de Mercure, dont l'avantage est de simuler des détails de l'ordre du kilomètre mais en contrepartie s'avère lent et inadaptés pour du "temps réel". L'utilisation d'un code fluide basé sur les équations de la MHD permettra des simulations en "temps réel" en support aux données de Sorbet d'ici le lancement de BepiColombo.

En support à l'interprétation des observations radio planétaires, des outils performants seront développés et améliorés comme des simulations PIC, des calculs d'émission radio par processus maser-cyclotron, et des modélisations géométriques des systèmes globaux « topologie magnétique à la source/directivité des émissions radio/géométrie source-observateur ».

Notons que le pôle plasmas s'investit pour la communauté dans la mise à disposition et valorisation des données radio, en travaillant principalement dans le cadre du CDPP (Centre de Données de la Physique des Plasmas – Toulouse). De nouveaux projets d'archivage d'envergure concernant notamment les données forme d'ondes et leur valorisation sont en cours de discussion. Ces travaux, possibles par l'implication de personnel CNAP du pôle, contribueront, à terme, à la formation d'un observatoire virtuel en physique des plasmas.

