

SURSAUTS RADIO SOLAIRES

C. Caroubalos

► To cite this version:

C. Caroubalos. SURSAUTS RADIO SOLAIRES. Journal de Physique Colloques, 1973, 34 (C2), pp.C2-63-C2-68. 10.1051/jphyscol:1973213 . jpa-00215260

HAL Id: jpa-00215260

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00215260>

Submitted on 1 Jan 1973

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.

SURSAUTS RADIO SOLAIRES

C. CAROUBALOS

Observatoire de Meudon, France

Résumé. — On étudie les émissions radio transitoires du soleil provenant de l'interaction entre le plasma coronal avec des particules suprathermiques accélérées au cours de certaines éruptions chromosphériques.

Après avoir donné la classification spectrale des sursauts radiosolaires, on présente de nouveaux résultats d'observation (dus surtout aux radiospectrographes et aux radiohéliographes). Ceci permet de mieux comprendre le processus physique donnant naissance à l'émission. On examine en particulier les types III et II ainsi que certaines composantes des sursauts de type IV.

Enfin, on expose en bref les applications que l'étude des sursauts radio solaires trouve en dehors de la physique solaire : dans l'astrophysique, dans les relations soleil-terre ainsi que dans plusieurs domaines de la physique des plasmas.

Abstract. — We study the transient radio emissions of the sun arising from the interaction between the coronal plasma and suprathermal particles accelerated during certain chromospheric flares.

The spectral classification of the solar radio bursts is given and new results, mainly due to radio-spectrographic and radioheliographic observations are presented. This permits a better understanding of the physical process giving rise to the emission. In particular we examine the type III and type II bursts as well as some components of type IV.

Finally we summarise some applications of the study of the solar radio bursts outside of the field of solar physics, in astrophysics, in solar terrestrial relations as well as in numerous other domains of plasma physics.

1. Introduction. — 1.1. LE SOLEIL NON PERTURBÉ. —

Le soleil, même dans son état « non perturbé » émet un rayonnement radioélectrique dans une large gamme (du mm au km).

Ce rayonnement, d'origine thermique, provient du mouvement désordonné des électrons de la *couronne calme* (Fig. 1) ainsi que de régions localisées, *condensations*, qui contiennent du plasma plus dense et plus chaud, piégé dans des arches magnétiques émergeant de certaines configurations des taches solaires (Fig. 2).

La couronne est un magnétoplasma hautement ionisé. Sa densité électronique N_e diminue presque exponentiellement avec la distance à la surface optique

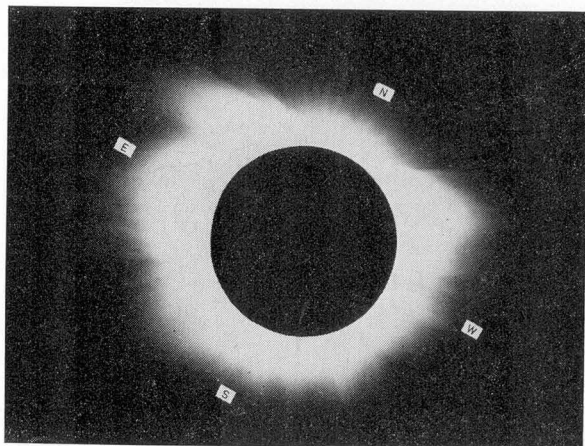


FIG. 1. — La couronne solaire pendant une éclipse (photo de l'équipe de Meudon).

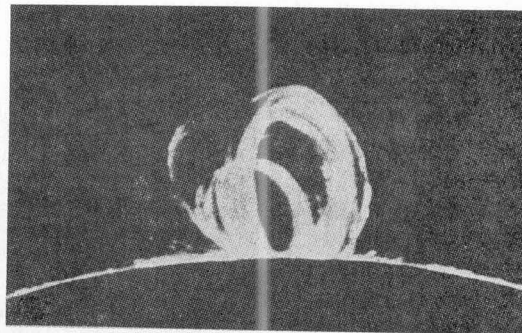


FIG. 2. — Une structure fermée de champs magnétiques coronaux visualisés en $H\alpha$ par une protubérance en arche (photo de l'Observatoire de Sacramento Peak).

du soleil ⁽¹⁾. Sa température T_e est de $1 \text{ à } 2 \times 10^6 \text{ K}$.

Pour des raisons de propagation des ondes électromagnétiques ⁽²⁾ on ne peut recevoir, de chaque niveau de la couronne, que des fréquences supérieures à la fréquence de plasma local

$$f_p = \left(\frac{e^2 N_e}{m_e} \right)^{1/2} = 9 \sqrt{N_e} \text{ (MKSA)}.$$

Ainsi la couronne agit comme filtre passe-haut ; quand on observe sur des longueurs d'ondes de plus en plus grandes, on reçoit le rayonnement des couches de plus en plus extérieures, sans être gêné par les

(1) Plus précisément d'après par ex. le modèle de Newkirk on a $N_e(\rho) = 4,3 \times 10^{14+4,32/\rho} \text{ e/cm}^{-3}$ (avec $\rho = R/R_\odot$).

(2) Voir par ex. approximation des hautes fréquences [1]

couches inférieures (différence avec l'optique). Il s'ensuit que le diamètre radio du soleil tend à augmenter avec la longueur d'onde d'observation.

1.2 LES SURSAUTS. — Mais ce qui rend la couronne particulièrement intéressante pour la radioastronomie et pour la physique des plasmas est le fait que certaines fréquences caractéristiques du magnétoplasma coronal (coupures et résonances, c'est-à-dire pôles et racines de l'indice de réfraction) se trouvent dans le domaine radio. Ceci conduit à une grande variété de conditions de propagation et d'instabilité, ainsi que de couplage entre divers modes ; l'interaction entre le plasma coronal et les particules suprathermiques (par ex. d'électrons éjectés au cours des éruptions chromosphériques) aboutit à une grande variété de mécanismes d'émission radio non thermique.

Ainsi la couronne devient souvent le siège d'émissions transitoires, quelquefois très intenses (par ex. 10^3 à 10^4 fois celle du soleil calme) d'origine non thermique.

Ce sont les **sursauts radiosolaires**.

Leur étude nous permet à la fois de mieux connaître l'activité solaire, de mesurer les paramètres physiques de la couronne et enfin, de tester certaines hypothèses théoriques relatives aux instabilités de magnétoplasma et aux mécanismes d'émission et de propagation des ondes.

2. Les observations. — L'observation la plus complète des sursauts solaires consisterait à observer :

(α) l'intensité I ,

et (β) la polarisation $\{P\}$ (paramètres de Stoke), en fonction de : la fréquence f , le temps t , la position sur le soleil r et la direction d'observation θ , c'est-à-dire :

$$I = I(f, t, r, \theta)$$

$$\{P\} = \{P(f, t, r, \theta)\}.$$

Jusqu'ici on a obtenu beaucoup d'informations surtout par l'observation de :

— L'intensité des sursauts et ses variations avec le temps et la fréquence, c'est-à-dire le « spectre dynamique » $I = I(t, f)$ (fournie par les radiospectrographes).

— La position et la forme en fonction du temps, c'est-à-dire l'évolution de la « radio-image » de la source (fournie par les interféromètres et les radio-héliographes).

En particulier, le spectre dynamique a permis dès le début une première classification des sursauts radio en 5 types distincts (dont on voit des exemples sur la Fig. 3), et a donné les premiers arguments sur leur nature. Aujourd'hui ce nombre est bien plus élevé. On ne peut que se limiter ici à la discussion de quelques types seulement.

Sur la figure 3, on voit également une représentation schématique de la séquence des sursauts qui peuvent apparaître en liaison avec une éruption chromosphérique ; le plus souvent cette séquence apparaît incomplète ou même les sursauts apparaissent séparément.

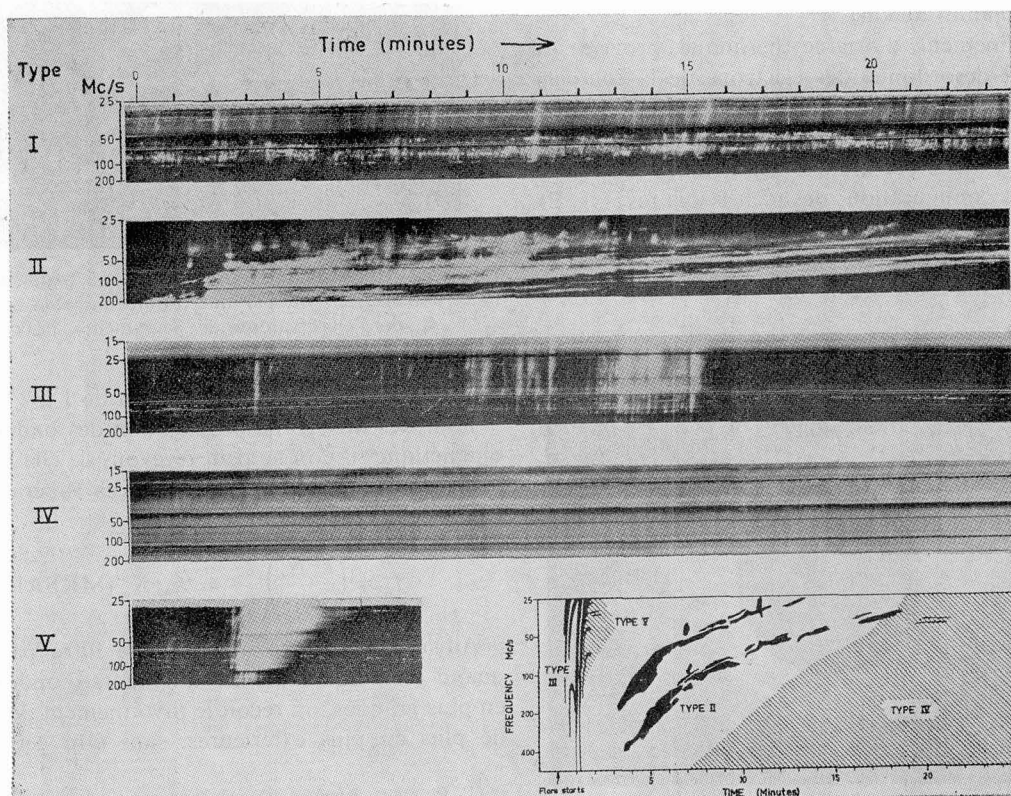


FIG. 3. — Exemples de spectres dynamiques illustrant les cinq principaux types de sursauts. Le diagramme schématise la séquence complète de sursauts liés à une éruption (d'après Wild).

2.1 TYPES III ET II. — Les types III et II, de spectre assez étroit, se caractérisent par un glissement de la fréquence du maximum du rayonnement vers les grandes longueurs d'ondes, ce qui est interprété comme l'indication que la source qui donne naissance à leur émission se déplace vers les couches extérieures de la couronne.

Cette hypothèse a été par la suite confirmée directement par l'observation de la position de la source sur différentes fréquences [2].

« L'hypothèse plasma » était lancée selon laquelle un agent exciteur se propage dans la couronne et excite à chaque altitude des ondes de plasma (ondes longitudinales) de fréquence $\sim f_p$ qui sont converties, par diffusion, en ondes électromagnétiques (ondes transversales) aux fréquences f_p et $2 f_p$ [3]. Cette hypothèse était appuyée par :

- la présence occasionnelle du second harmonique,
- le fait qu'elle était capable d'interpréter la décroissance exponentielle, en fonction du temps, de l'intensité des types III observés sur une fréquence fixe : cette décroissance reflète l'amortissement de l'onde de plasma par les collisions des électrons en mouvement de l'onde avec les ions du plasma ambiant. La constante d'amortissement τ donnée par

$$\tau^{-1} = \nu_{ei} \simeq 4,2 \times 10^{-5} N_e T^{-3/2}$$

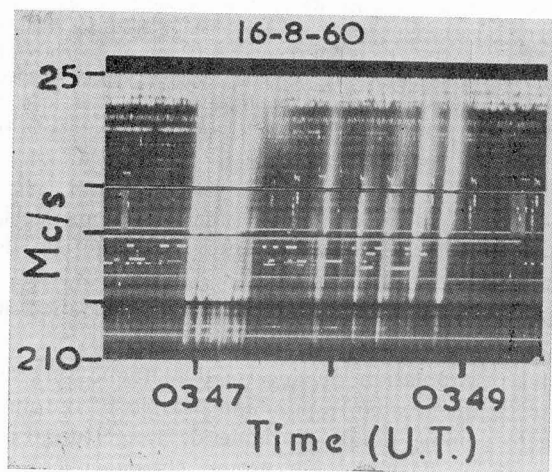


FIG. 4. — Les types III apparaissent le plus souvent en groupes (d'après Wild).

pouvait ainsi être mesurée, offrant un moyen inespéré pour apprécier la température de la couronne ⁽³⁾.

Mais quelle est la nature de l'excitateur des deux types de sursauts ?

La vitesse de dérive en fréquence du type III correspond à des vitesses d'ascension de l'excitateur

⁽³⁾ Cette technique est récemment contestée pour les basses fréquences où l'amortissement Landau joue éventuellement un rôle important dans la détermination du profil en temps des types III [4].

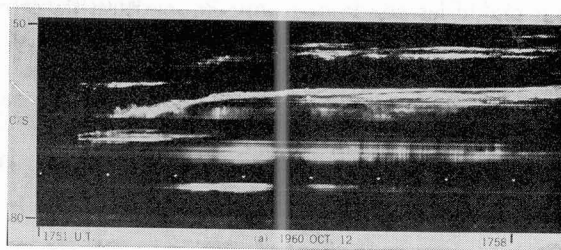


FIG. 5. — Dans 50 % des cas, on observe l'harmonique des types II, souvent dédoublés de la même façon que l'émission fondamentale [10].

très élevées : Une valeur typique est $v = c/3$ ⁽⁴⁾, ce qui laisse penser à une émission Cerenkov, tandis que celle des types II est $\sim 1\,000$ km/s, c'est-à-dire proche de la vitesse des ondes de choc rapides.

C'est ainsi qu'on est arrivé à la conclusion suivante :

- Les types III sont excités par des faisceaux rapides de particules chargées (électrons d'énergie ~ 40 keV). Ces particules guidées par des structures magnétiques ouvertes peuvent s'échapper très loin dans le milieu interplanétaire et ainsi expliquer le fait que parfois un type III peut franchir une énorme gamme de fréquences.

Il paraît aujourd'hui assez bien établi que le faisceau est globalement relaxé et que seule sa partie frontale maintient l'instabilité donnant naissance aux ondes de plasma (quasi-relaxation [5], [6]). On peut ainsi comprendre la persistance de l'émission pendant parfois 100 ou 200 R_\odot [7], [8] en dépit des effets quasi linéaires tendant à former très rapidement un « plateau » sur la fonction de distribution, c'est-à-dire à supprimer l'inversion de population correspondant au faisceau.

- L'excitateur du type II est d'une nature tout à fait différente. Il s'agit très probablement d'une onde de choc déclenchée par une perturbation produite lors de certaines éruptions chromosphériques violentes [9], [10]. Plus précisément l'onde de choc se forme aux endroits où la vitesse V de cette perturbation dépasse une vitesse critique du milieu (par ex., pour l'onde de choc « rapide » magnétosonore, la vitesse d'Alfven locale : $V_A = 2 \times 10^4 H/f_p$ km/s avec H en gauss).

⁽⁴⁾ En effet en première approximation (trajectoire de l'excitateur radiale, pas d'effet de propagation de l'onde EM), si

$$f_{III} = f_p = 9 \sqrt{N_e} \text{ et } N_e = N_0 e^{-b/\rho} \text{ et } \rho = R/R_\odot$$

on a

$$v_{dérive} = \frac{df}{dt} = 4,5 \frac{dN/dR}{\sqrt{N}} v_{ascension} = -4,5 \frac{b}{\rho^2 R_\odot} f v_{ascension}.$$

En appliquant $f = 200$ MHz $df/dt \simeq -100$ MHz/s $p = 1,2 R_\odot \sim 7 \times 10^{10}$ cm, on trouve $v_{ascension} \simeq \frac{c}{3}$.

En réalité les conditions pour l'apparition de cette onde de choc sont assez difficiles à atteindre, ce qui explique le nombre limité de types II observés, comparé à celui des types III (~ 1 type II/50 h, ~ 3 types III/1 h au maximum du cycle).

Plusieurs autres résultats d'observation viennent en appui de ces interprétations.

Pour les types III, on peut citer :

a) Certains sursauts, variantes des types III, ont la forme d'un U inversé (Fig. 6). C'est-à-dire au début

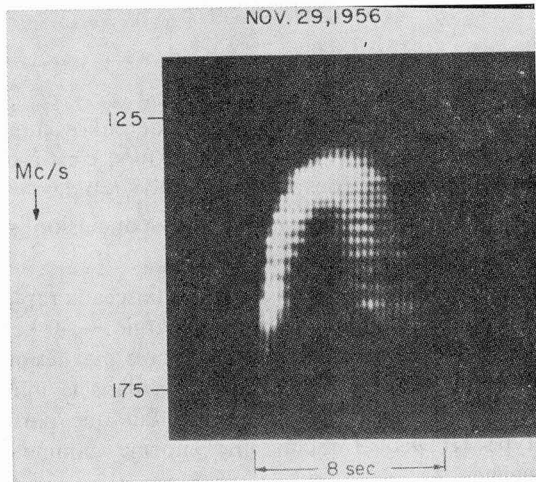


FIG. 6. — Spectre dynamique d'un sursaut de type U [11].

ils correspondent à un mouvement ascendant de vitesse $\sim c/3$ mais progressivement la dérive s'inverse et elle finit par suggérer un mouvement de descente rapide vers les couches denses de la couronne (hautes fréquences). Ces sursauts de type U apparaissent assez fréquemment et en corrélation avec les types III. Ils sont interprétés par le guidage du faisceau d'électrons par des structures magnétiques fermées, ce qui explique bien pourquoi les positions de leurs parties

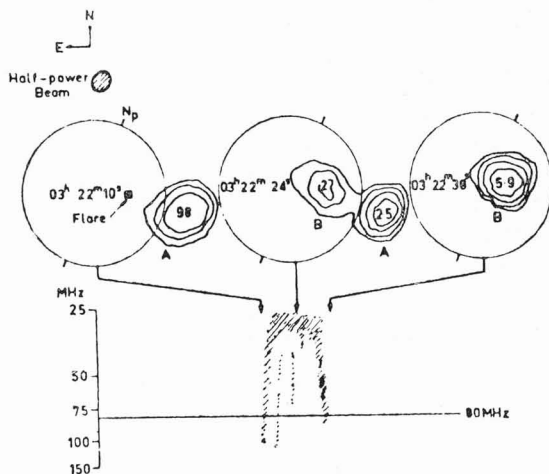


FIG. 7. — La structure double d'un sursaut de type U vue par le radiohéliographe de Culgoora. La partie montante du spectre correspond à la source A et la partie descendante à la source B [12].

montantes et descendantes sont tellement différentes [12], [13] voir par exemple la figure 7.

b) Des études statistiques menées depuis 1968 montrent une corrélation des types III avec la détection à bord des sondes spatiales d'électrons d'énergie $E > 40$ keV.

Tout récemment (1971) l'apparition d'un faisceau d'électrons rapides a été observé simultanément avec un type III en hectométriques à bord de la même sonde spatiale (IMP-6) à 1 UA.

La figure 8 [14] montre l'évolution du spectre d'énergie des électrons du faisceau au cours de son passage par le détecteur de la sonde (seuil 18 keV). On voit clairement l'existence d'une « inversion » qui se limite à la partie du faisceau qui arrive en tête.

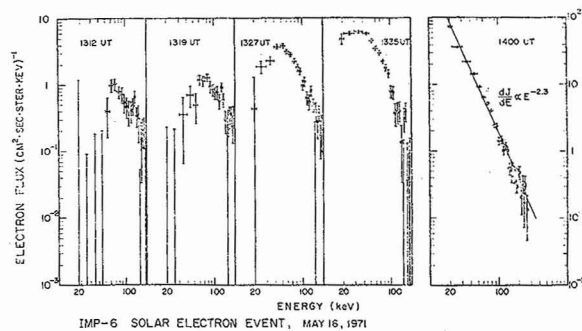


FIG. 8. — Une séquence de spectres d'énergie obtenue au cours de la partie croissante d'un événement à électrons solaires observé par IMP-6. Le début d'un type III sur 55 kHz à 13 h 07 min TU coïncide avec le début de l'arrivée des particules. Le rayonnement du type III continue à augmenter jusqu'à la disparition du maximum sur le spectre d'énergies [14].

On a pu également observer une anisotropie de la distribution de vitesses de cette partie initiale du faisceau [15].

En ce qui concerne l'excitateur des sursauts du type II, on peut citer :

a) L'extrapolation du spectre dynamique vers les hautes fréquences correspondant à la basse couronne suggère comme temps d'origine de la perturbation la phase de flash d'une éruption chromosphérique.

b) Le radiohéliographe de Culgoora montre que les dimensions d'un type II sont grandes ($\sim \frac{1}{2} R_{\odot}$ pour 80 MHz) et que souvent sa structure est multiple avec des fragments disposés sur une arche très large dont le centre est l'éruption chromosphérique (Fig. 9 et 11).

2.2 TYPE IV. — Il s'agit d'une émission très complexe de large bande qui accompagne les plus importantes éruptions. Interprété par l'émission synchrotron d'électrons d'énergie 100 keV à quelques MeV a au moins deux composantes.

2.2.1 La partie mobile (observée pour la première fois par Boischoit il y a 15 ans à Nançay) constitue la manifestation la plus spectaculaire de la radio-astronomie solaire et la plus intéressante pour la

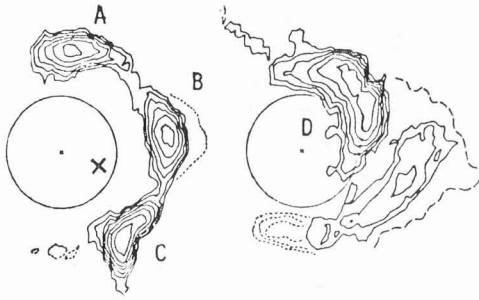


FIG. 9. — Un type II important dont l'éruption responsable se trouve au-delà du limbe à la position X. Les radiohéliogrammes 80 MHz correspondent à 02 h 50 s et 03 h 03 min 6 min TU. Le type III apparaît aux sources A, C et D. La source B est un type IV stationnaire [16].

géophysique (à cause d'une large gamme de phénomènes géophysiques qui l'accompagne : X, CRE, PCA, SSC, Forbush decrease ⁽⁵⁾).

Ce type IV mobile est, comme le type II, lié à une onde de choc (d'où la forte corrélation entre les deux types de sursauts).

Il peut correspondre soit à la partie frontale d'un nuage d'électron de haute énergie piégé dans une arche magnétique en expansion, soit au front d'une onde MHD ou même d'une « source isolée » se déplaçant le long de lignes de forces ouvertes [17], [18], [19] (Fig. 10 et 11). Les observations de polarisation circulaire de ces sources jouent un rôle important dans leur interprétation.

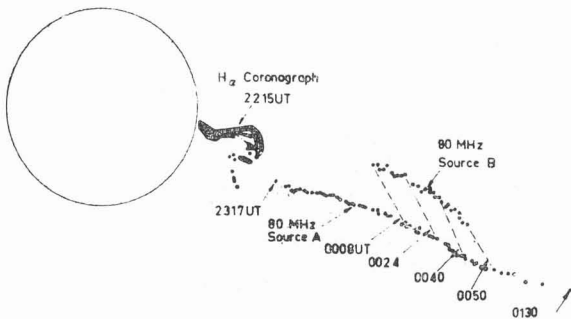


FIG. 10. — Un type IV mobile constitué de deux sources (A et B) qui se déplacent jusqu'à $5,3 R_{\odot}$ du centre du soleil. Cet événement a suivi une importante éjection observée en $H\alpha$ [20].

2.2.2 La partie « stationnaire » des types IV bien visible en métrique est à première vue moins spectaculaire. Cependant, avec l'amélioration des instruments en sensibilité, et en résolution (temporelle,

(5) CRE : cosmic ray enhancement → arrivée de protons de haute énergie. PCA : polar cap absorption → interruption des télécommunications polaires. SSC : storm sudden commencement → perturbation géomagnétique. FD : diminution du niveau des rayons cosmiques galactiques.

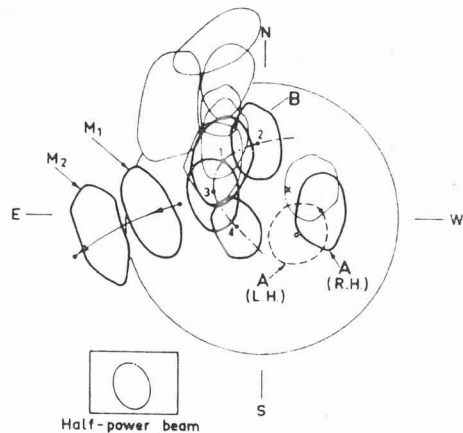


FIG. 11. — Un événement radiosolaire complexe déclenché par une éruption (X) qui a apparemment produit une onde de choc. A : type IV stationnaire ; B₁ à B₄ : composantes de type II (disposées en arche) ; M₁, M₂ : positions successives d'un type IV mobile ; les contours fins correspondent à des types III liés à la phase de flash [21].

angulaire et en fréquence) on y découvre une infrastructure de grand intérêt théorique : Par exemple :

a) La configuration « Zèbre » (Fig. 12) (franges parallèles d'émission et d'absorption, peu inclinées ou pas du tout par rapport à l'axe du temps) semble avoir trouvé une interprétation satisfaisante à l'aide de modes de Bernstein [23] : ces modes cyclotron (électrostatiques longitudinaux) après couplage non linéaire avec le mode hybride haut peuvent conduire à un mode EM ordinaire observé aux fréquences

$$f = f_{\text{hybride super}} + n f_{\text{gyro}}.$$

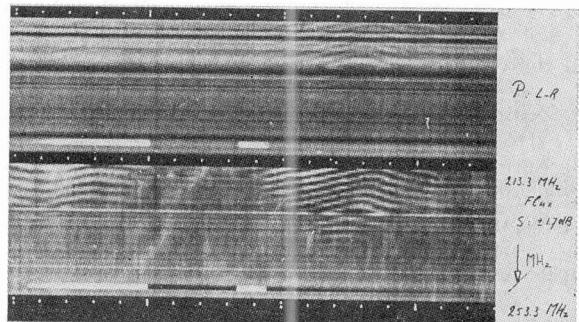


FIG. 12. — Structure zébrée dans un type IV stationnaire [22].

b) « Structures pulsantes ». Ces fluctuations périodiques à large bande de la brillance du continuum ont une période typique 0,1 à 1 s.

Elles sont aujourd'hui attribuées à une modulation de l'émission synchrotron par les variations périodiques de l'intensité du champ magnétique, dues par exemple à une onde hydromagnétique stationnaire formée dans un tube de lignes de forces [24].

En faveur de cette interprétation est la constatation que les dimensions spatiales de la source fluctuante sont très inférieures à celles du continuum [25]. Mais

ceci exige une variation d'amplitude inadmissible pour un champ magnétique local. Pour faire face à cette difficulté, on doit faire appel à une «cohérence» à l'émission [26] (due par ex. à une mise en phase partielle des électrons rapides par le H).

2.3 TYPE I. — Nous avons volontairement laissé en dernier les sursauts de type I, bien que les orages de types I constituent l'activité la plus courante du soleil radio. Ces émissions, très localisées en temps, en dimensions angulaires et en fréquence, [27], [28], n'ont pas encore reçu d'interprétation théorique satisfaisante bien qu'un certain nombre d'explications aient été proposées [29], [30].

3. Conclusion. — L'étude des sursauts radiosolaires en dehors de son intérêt pour la physique du soleil, l'astrophysique et les relations soleil-terre offrent au physicien du plasma un moyen unique pour tester certaines hypothèses théoriques et stimulent le lance-

ment de nouvelles hypothèses dans de nombreux domaines différents :

— Conditions d'instabilité MHD du plasma. Importance de certaines configurations magnétiques.

— Développement de modes d'ondes instables, leur amplification, propagation et conversion en onde EM.

— Conditions de couplage, linéaire ou non linéaire, des divers modes conduisant aux ondes radio.

— Mécanismes d'accélération de particules chargées et conditions de piégeage ou de fuites de ces particules dans l'espace interplanétaire.

— Etudes des processus d'émission Cerenkov, gyromagnétique, synchrotron (et sa coupure BF par effet Razin) et d'émissions cohérentes, etc...

Grâce à la couronne solaire, on dispose donc d'une espèce d'énorme laboratoire de magnétoplasma sans parois et permanent, où règnent des conditions inaccessibles aux laboratoires terrestres.

Bibliographie

On s'est limité au minimum de références nécessaires au texte.

Pour une étude et une bibliographie plus complètes, voir :

WILD, J. P., SMERD, S. F. and WEISS, A. A., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **1** (1963) 291.

et

WILD, J. P. and SMERD, S. F., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **10** (1972) 159.

- [1] QUEMADA, D., « *Les ondes dans les plasmas* » (§ 3.8), (Hermann, Paris) 1968.
- [2] WILD, J. P., SHERIDAN, K. V. and NEYLAN, A. A., *Australian J. Phys.* **12** (1959) 369.
- [3] GINZBURG, V. L. and ZHELEZNIakov, V. V., *Soviet Astr. A. J.* **2** (1958) 653.
- [4] HARVEY, C. C. and AUBIER, M. G., *Astron. Astrophys.* **22** (1973) 1.
- [5] ZAITSEV, V. V., MITYAKOV, N. A. and RAPOPORT, V. O., *Solar Phys.* **24** (1972) 444.
- [6] SMITH, D. F. and FUNG, P. C. W., *J. Plasma Phys.* **5** (1971) 1.
- [7] SLYSH, V. I., *Cosmic Res.* **5** (1967) 759.
- [8] ALEXANDER, J. K., MALITSON, H. H. and STONE, R. G., *Solar Phys.* **8** (1969) 388.
- [9] PILKENER, S. B. and GINTSBURG, M. A., *Sov. Astr. A. J.* **7** (1964) 639.
- [10] MAXWELL, A. and THOMPSON, A. R., *Astrophys. J.* **135** (1962) 138.
- [11] MAXWELL, A. and SWARUP, G., *Nature* **181** (1958) 36.
- [12] LABRUM, N. R. and STEWART, R. T., *Proc. ASA* **1** (1970) 316.

- [13] CAROUBALOS, C., COUTURIER, P. and PROKAKIS, T., *Astron. Astrophys.* **23** (1973) 131.
- [14] LIN, R. P., « *Symposium on High Energy Phenomena on the Sun* » (Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland) 1973.
- [15] FRANK, L. A. and GURNETT, D. A., *Solar Phys.* **27** (1972) 446.
- [16] SMERD, S. F., *Proc. ASA* **1** (1970) 305.
- [17] SMERD, S. F. and DULK, G. A., dans « *Solar Magnetic fields* », IAU Sympos. N° 49 (R. Howard ed.) 616, 1971.
- [18] SCHMAHL, E. J., *Proc. ASA* **2** (1972) 95.
- [19] LACOMBE, C., MANGENEY, A., *Astron. Astrophys.* **1** (1969) 325.
- [20] RIDDLE, A. C., *Solar Phys.* **13** (1970) 448.
- [21] KAI, K., *Solar Phys.* **10** (1969) 460.
- [22] SLOTTJE, C., Proc. of the 2nd meeting of the CESRA, Trieste, 88, 1972.
- [23] CHIUDERI, C. dans « *Plasma Physics and Solar Radioastronomy* », 288, ed. A. Mangeney (Proc. de l'école d'été de CESRA à l'île de Ré), 1973.
- [24] ROSENBERG, H., *Astron. Astrophys.* **9** (1970) 159.
- [25] CAROUBALOS, C., PICK, M., ROSENBERG, H. and SLOTTJE, C., *Solar Phys.* (1973) sous presse.
- [26] MANGENEY, A., dans « *Cosmic Plasma Physics* » (Schindlen ed. Plenum Press, New York) 185, 1972.
- [27] ELGARoy, O., *Astrophysica Norvegica* **7** (1961) 123.
- [28] BOUGERET, J. L., *Astron. Astrophys.* **24** (1973) 53.
- [29] TAKAKURA, T., *Publ. Astr. Soc. Japan* **16** (1964) 135.
- [30] FUNG, P. G. W. and YIP, W. K., *Aust. J. Phys.* **19** (1966) 759.