

Quelques manifestations de l'éruption solaire du 7 mai 1978

C. et R. GONZE, J.C. JODOGNE et A. KOECKELENBERGH

L'observation de l'étoile la plus voisine de notre planète est effectuée par tous les moyens possibles. Si la voie optique est celle qui a la plus longue tradition, tous les autres domaines du spectre des ondes électromagnétiques sont actuellement utilisés sauf le rayonnement gamma. En ce qui concerne les émissions corpusculaires, la surveillance continue du vent solaire est assurée depuis la mise sur orbite de satellites adéquats. Mais l'arrivée de particules solaires douées d'une énergie suffisante était déjà détectée au sol avant 1940. De nos jours, de nombreuses observations géophysiques sont effectuées car leur relation avec les phénomènes solaires existe indubitablement.

Cependant, le déploiement de toutes ces techniques d'observation ne doit pas faire perdre de vue la limitation spatiale de nos observations. Si les émissions électromagnétiques d'origine thermique ont lieu dans toutes les directions, le caractère très directionnel des émissions dues à l'effet synchrotron ne peut être négligé. Remarquons également que les propriétés magnétiques de l'espace interplanétaire distordent systématiquement les trajectoires des particules chargées et que le plasma solaire éjecté continûment n'est pas sans effet sur le champ magnétique interplanétaire.

Le phénomène transitoire du 7 mai 1978 est examiné successivement du point de vue radioélectrique (C. et R. Gonze), optique (A. Koeckelenbergh) et géophysique (J.C. Jodogne). Le temps est toujours exprimé en temps universel (U.T.). Pour faciliter la lecture, la chronologie des principaux événements est donnée ci-après :

| | |
|-----------------------------------|---|
| 3 ^h 18 ^m | accroissement brusque du flux radio, |
| 3 ^h 21 ^m | accroissement brusque du flux de rayons X, |
| 3 ^h 23 ^m | perturbation ionosphérique à début brusque, |
| 3 ^h 25-27 ^m | début optique de l'éruption, |
| 3 ^h 31 ^m | maximum du flux de rayons X, |
| 3 ^h 36 ^m | maximum optique, |
| 3 ^h 35-40 ^m | début de l'enregistrement au sol des protons solaires, |
| 3 ^h 40 ^m | début de l'enregistrement à bord de satellites des protons lents, |

| | |
|--------------------------------|---|
| 3 ^h 44 ^m | fin du sursaut de rayons X, |
| 4 ^h 22 ^m | maximum des perturbations ionosphériques à début brusque, |
| 5 ^h 15 ^m | début de l'absorption polaire, |
| 6 ^h 19 ^m | absorption polaire maximale, |
| 6 ^h 25 ^m | fin des perturbations ionosphériques à début brusque, |
| 8 ^h 30 ^m | fin de l'absorption polaire. |

1. Manifestations radioélectriques

La région active au sein de laquelle une éruption s'est produite le 7 mai 1978 vers 03^h27^m apparaît au bord Est du limbe solaire le 24 avril 1978. A ce moment, cette région a déjà une existence assez longue puisqu'elle est née, en partie tout au moins, depuis 3 rotations solaires. Dès le 24 avril, des mesures radiointérométriques effectuées à Algonquin (Canada) sur 10,7 cm de longueur d'onde mettent en évidence l'apparition sur le bord Est du Soleil d'une source localisée. Cette même source devient également visible à partir du 25 avril sur 3 cm (Toyoskawa, Japon) et à partir du 27 avril sur 21 cm (Fleurs, Australie). Elle devient détectable à partir du 26 avril sur 43 cm (Fleurs, Australie). A la station radioastronomique de Humain (Belgique), les observations effectuées sur 75 cm de longueur d'onde indiquent l'apparition de la source sur le bord Est du Soleil dès le 27 avril. Le 28 avril, la source est nettement visible (Fig. 1).

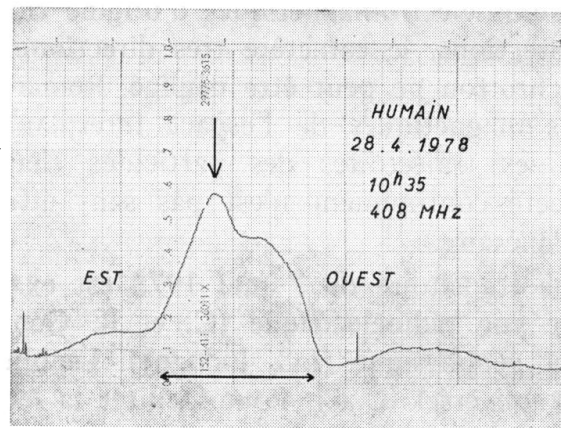


Fig. 1. — Observation en dérive du Soleil sur 408 MHz au moyen de la base Est-Ouest de l'interféromètre de Humain donnant la distribution de brillance intégrée. La flèche verticale indique la source radio située sur le bord Est du Soleil. La flèche horizontale donne la dimension approximative du disque solaire sur 408 MHz.

D'autre part, des observations effectuées au moyen du satellite OSO 8 équipé d'un spectromètre à rayons X (gamme 1 à 8 Å) indiquent la présence d'une source X visible depuis le 19 avril. L'intensité de cette source croît régulièrement au cours du temps pour passer par un maxi-

mum ($550 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) le 23 avril, date à laquelle la source peut être associée sans aucun doute à la source radio apparue au bord Est du Soleil. La source radio et la source de rayons X seront présentes pendant toute la durée de leur transit sur le disque solaire jusqu'à leur disparition au bord Ouest le 12 mai pour la première et le 15 mai pour la deuxième. Depuis l'apparition de la source radio le 24 avril jusqu'au 7 mai, date de l'événement remarquable étudié, l'activité radioélectrique solaire s'est principalement manifestée le 28 avril vers $16^{\text{h}}10^{\text{m}}$, suite à une forte éruption chromosphérique (importance 3B) qui s'est produite au sein de cette région et le 1^{er} mai vers $19^{\text{h}}16^{\text{m}}$ suite à une éruption d'importance 2B survenue dans cette même région.

En raison de l'heure à laquelle l'événement remarquable du 7 mai débute, celui-ci n'a pu être observé que par des stations radioastronomiques situées en URSS (Gorky), au Japon (Hiraiso), en Australie (Culgoora) et à Manille (Manilla). A Humain, seules les toutes dernières manifestations du phénomène ont pu être observées sur 50 cm de longueur d'onde au moment du lever du Soleil. L'ensemble des observations montre que le sursaut radioélectrique associé à l'éruption à protons du 7 mai débute tout d'abord sur environ 10 cm de longueur d'onde : à $3^{\text{h}}28,2^{\text{m}}$, le flux solaire commence à croître sur 11,1 cm (Gorky). Cette montée de flux est ensuite observée successivement d'une part sur des longueurs d'onde de plus en plus courtes et d'autre part sur des longueurs d'onde de plus en plus grandes. En moins de 9 minutes, le phénomène se manifeste dans l'entière du spectre radioélectrique, des ondes millimétriques aux ondes décamétriques. Les sursauts observés sont importants sans toutefois être d'une intensité et d'une durée exceptionnelles. Le flux radioélectrique solaire reprend sa valeur normale aux environs de $4^{\text{h}}10^{\text{m}}$.

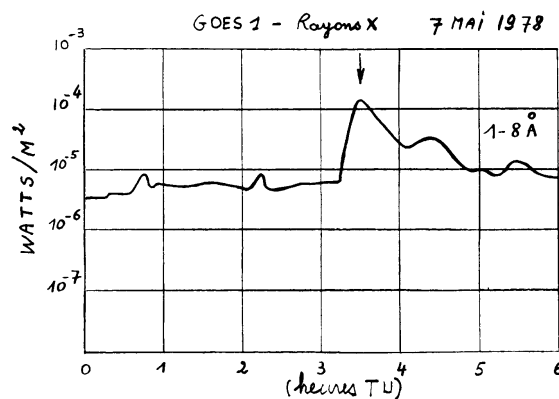


Fig. 2. — Rayonnement X solaire dans la bande 1-8 Å enregistré à bord du satellite GOES-1. A $3^{\text{h}}21^{\text{m}}$ a lieu une brusque et forte augmentation du rayonnement qui atteint son maximum à $3^{\text{h}}31^{\text{m}}$.

Parallèlement au sursaut radioélectrique, un sursaut *de rayons X* est également observé à partir de 3^h21^m grâce au satellite GOES-1. Le maximum de ce sursaut a lieu à 3^h31^m, heure à laquelle l'intensité du rayonnement X est multiplié par un facteur proche de 100 par rapport à la valeur de cette intensité avant le sursaut (voir Fig. 2). Ce sursaut se termine vers 3^h44^m. La région où s'est produite l'éruption à protons restera active au cours de la journée du 7 mai, produisant notamment quelques sursauts radioélectriques de moyenne importance ainsi que 5 perturbations ionosphériques à début brusque (SID). Ces perturbations ionosphériques ont été enregistrées à Uccle et à Humain au moyen d'observations de parasites atmosphériques lointains sur 27 KHz dont le niveau dépend de l'état d'ionisation de la région D de l'ionosphère.

2. Observations optiques

Les éruptions solaires sont rarement visibles en lumière blanche. Cependant, les filtres monochromateurs (filtres de Lyot, par exemple) qui sélectionnent le rayonnement particulier de l'atome d'hydrogène neutre, permettent de photographier et de filmer les éruptions solaires. L'heure d'apparition, extrêmement matinale, de l'éruption n'a pas favorisé son observation dans nos régions tant dans le domaine optique que dans le domaine radioélectrique. De plus, les conditions météorologiques n'étaient guère favorables sur l'Est de l'Europe et en Asie où le Soleil était haut sur l'horizon. Seules les stations d'observation de Tashkent (URSS) et de Manille (Philippines) ont, et dans de mauvaises conditions, vu l'éruption solaire. Vers 3^h27^m, les observateurs de Tashkent, signalent une éruption assez modeste de classe 1, et de brillance normale. L'instant du début optique ne paraît pas déterminé avec une grande précision, il se situe certainement entre 3^h25^m et 3^h27^m, la surveillance solaire ayant, semble-t-il, commencé vers 3^h25^m. Les observateurs philippins commencent leurs observations vers 3^h36^m, c'est-à-dire au moment où l'amplitude du phénomène est vraisemblablement maximale et ils classent l'éruption du « type 2 normal », ce qui permet d'estimer qu'elle a recouvert 5 à 7 degrés carrés à la surface du Soleil, soit deux cents millionnièmes de la surface observable. L'éruption était constituée de plusieurs centre éruptifs brillants, accompagnée d'activation des filaments sombres dans le voisinage (indice d'une perturbation du champ magnétique à grande distance) et a recouvert le noyau d'une tache solaire, cachant celui-ci aux yeux des observateurs. Ce dernier détail est une caractéristique des éruptions accompagnées d'éjections de protons de grande énergie.

Il n'a pas été facile de localiser les noyaux éruptifs par rapport aux taches solaires en raison de l'effet déformant de la perspective, toute la région intéressée étant voisin du bord solaire Ouest et, entraînée par la

rotation de l'astre, a disparu le lendemain. Une estimation approchée permet cependant d'évaluer la distance entre le centre éruptif et la tache recouverte, soit environ 80.000 km. L'expansion du nuage éruptif (riche en atomes d'hydrogène ionisés, donc en protons) s'est déroulée en une dizaine de minutes et à la vitesse minimum de 150 kilomètres par seconde. Mis en mouvement vers 3^h25^m, elle atteint les régions centrales de la tache, à fort champ magnétique, peu avant 3^h35^m.

Les clichés (Fig. 3) représentent la situation du limbe solaire Ouest, la veille de l'éruption, 6 mai 1978. A gauche, un héliogramme réalisé avec l'héliographe Zeiss de l'Observatoire Royal de Belgique à 8^h25^m. On y voit les principales taches du groupe entourées des plages faculaires bien contrastées. Au centre, à la même échelle (diamètre solaire de 250 mm) un filtrogramme H α (dans le rouge) réalisé à 8^h38^m le même jour, au moyen du filtre monochromateur de Lyot de l'Observatoire Royal de Belgique. On y constate la coïncidence des régions faculaires, la présence de plusieurs filaments et on distingue les principales taches solaires. Au moment de la prise de vue, de petites surrections brillantes se manifestaient au voisinage du limbe. A droite, un cliché moins contrasté fait le 6 mai également, une demi-heure plus tard, montre que

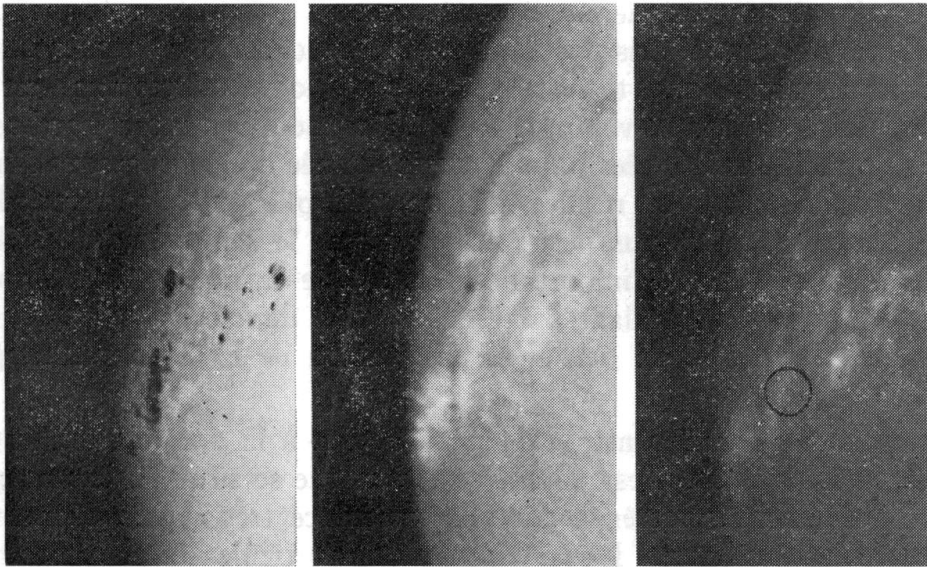


Fig. 3. — *Gauche* : Photosphère solaire en lumière jaune-vert obtenue le 6 mai 1978 à 8^h25^m. Les principales taches du groupe sont entourées de plages faculaires. — *Centre* : Chromosphère solaire sur la raie H α obtenue le même jour à 8^h38^m. On y retrouve les plages faculaires ainsi que les principales taches et plusieurs filaments. — *Droite* : Chromosphère solaire sur la raie H α le même jour prise environ une demi-heure plus tard que le cliché précédent. L'activité au limbe a diminué tandis qu'une sous-éruption est apparue dans le groupe de taches voisin de celui au sein duquel aura lieu le lendemain l'éruption étudiée.

cette activité au limbe s'est apaisée, mais une sous-éruption est bien visible dans le groupe voisin de celui qui intéresse cette note. L'éruption du 7 mai s'est développée dans la région marquée d'un cercle et a recouvert la tache voisine.

3. Manifestations géophysiques

Examinons maintenant la partie corpusculaire des émissions et l'impact des rayonnements électromagnétiques sur la Terre.

Événement au niveau du sol concernant les rayons cosmiques solaires (Ground Level Event).

Le 30 avril 78 débuta une diminution sensible du nombre de particules cosmiques incidentes sur la Terre (par unité d'aire et de temps). Cette diminution appelée *décroissance Forbush*, est mise en évidence par des enregistrements au sol de la composante neutronique du rayonnement cosmique (secondaire). Elle a été provoquée par une perturbation du champ magnétique interplanétaire consécutive à une éruption solaire antérieure. Sur la Figure 4, les valeurs horaires du nombre de particules sont portées en graphique. Les valeurs extrêmes à gauche donnent la situation normale. La décroissance Forbush atteint plus de 10 % ce qui est pour la station de Dourbes, assez appréciable. En effet, la latitude géomagnétique du lieu détermine le seuil énergétique pour lequel les protons ne passent pas la barrière constituée par le champ d'induction magnétique terrestre. Ce seuil (pour les protons) est de 3,26 milliards d'électron-volt (*) (Gev) à Dourbes. Comme le nombre de particules incidentes douées d'une énergie donnée diminue lorsque l'énergie envisagée croît, il en résulte qu'à un seuil plus élevé, correspond un nombre de particules plus petit. A l'équateur, le seuil est de 14 Gev ; aux pôles, il est nul. L'importance relative de la décroissance dépend donc du seuil correspondant à la station. Elle dépend aussi de l'orientation de la verticale du lieu et de la position de la Terre par rapport au Soleil.

Après une décroissance Forbush, le retour à la normale est lent, il prend plusieurs jours. C'est durant ce retour que se situe l'événement du 7 mai, événement caractérisé par une croissance très rapide du nombre de particules incidentes due à l'apport des particules d'origine solaire. Sur la Figure 4, l'échelle des temps a été dilatée pour la période de 3^h à 5^h. Le trait continu représente les valeurs horaires. Le trait pointillé,

(*) L'électron-volt est l'unité d'énergie employée en physique des particules. Elle représente $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Rappelons que la vitesse d'un proton de 3 Gev est égale à 95 % de celle de la lumière. Ainsi, la distance Soleil---Terre est parcourue par ce proton en un temps très voisin (8,8 min.) de celui nécessaire à la lumière (8,3 min.).

les valeurs obtenues toutes les 15 minutes, l'échelle des ordonnées étant alors divisée par quatre (à droite). On voit que le nombre de particules par quart d'heure a atteint une augmentation de 30 %.

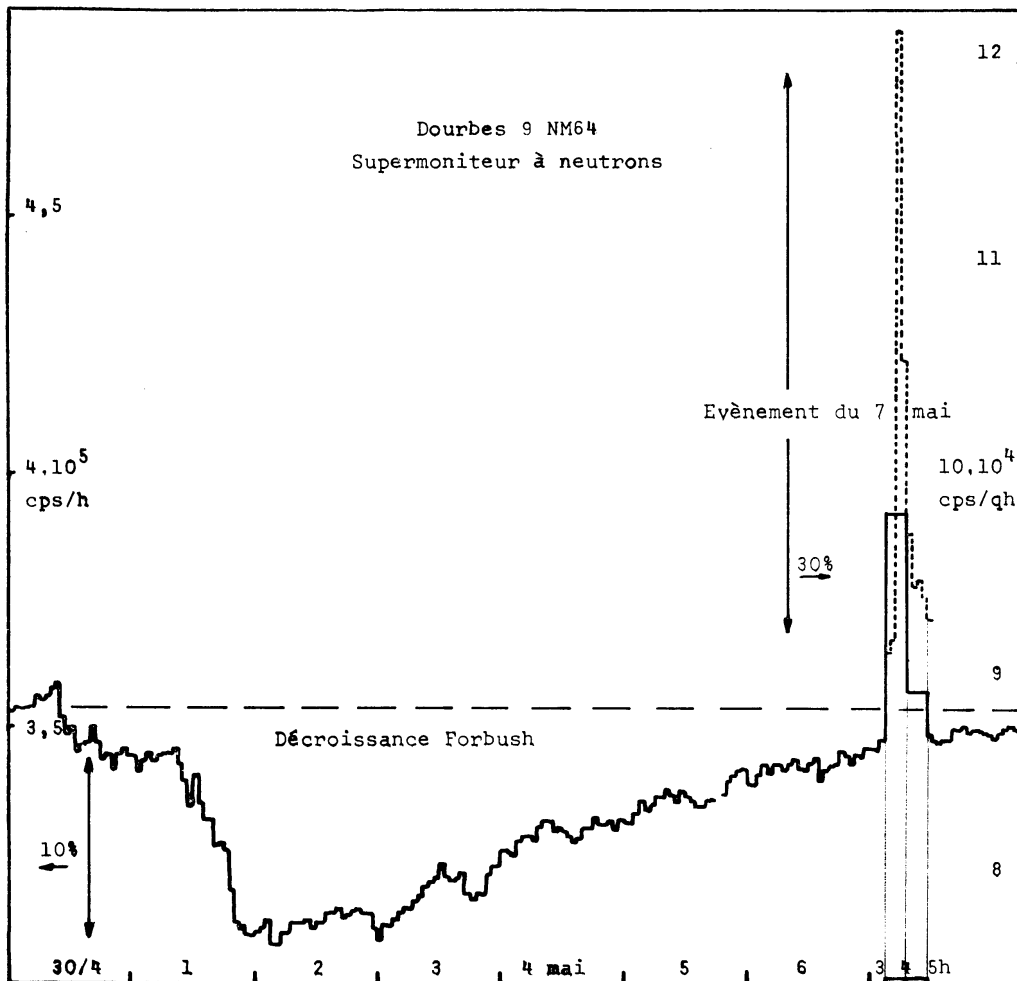


Fig. 4. — Décroissance de Forbush suivie de sa phase de normalisation au cours de laquelle survient vers 3^h35^m une brusque augmentation du rayonnement cosmique solaire observé au niveau du sol.

Certaines stations situées à des latitudes comparables et qui enregistrent le nombre de particules arrivées pendant cinq minutes, constatèrent le début de la croissance entre 3^h35^m et 3^h40^m. En supposant qu'il en a été de même à Dourbes, l'accroissement y atteint alors *plus de 50 %* ce qui n'avait jamais encore été mesuré à Dourbes. Des estimations par calcul de l'amplitude à Dourbes concordent avec ce pourcentage. La station d'Apatity (URRS, latitude 68°N) a enregistré une augmentation de plus de 125 % !

Que peut-on tirer des observations ? L'éruption dans la gamme des rayons X débute à 3^h21^m avec un maximum à 3^h31^m. Le commencement des émissions radio a eu lieu à 3^h18^m. Les premières particules arrivent au plus tôt à 3^h35^m. La durée du parcours Soleil-Terre est, pour ces particules, de 18 à 22 min. suivant que le début des émissions radio ou X est pris comme instant de départ (il faut tenir compte des 8 min. de délai entre l'émission et la réception des ondes électromagnétiques).

L'absence de contribution pour la station de Rome (seuil à 6,2 Gev) indique que les particules n'ont pas eu d'énergie supérieure à 6,2 Gev. Comme des particules ont atteint les stations de Leeds, Kiel, Utrecht et Dourbes (seuils de 2,15 à 3,26 Gev) cinq minutes avant celles de la station de Bologne (seuil à 5,22 Gev), il est probable que ce délai représente le temps nécessaire pour l'accélération supplémentaire requise pour augmenter l'énergie de quelques Gev. Or, deux régions de polarités magnétiques différentes ont été « touchées » par l'éruption. On peut dès lors imaginer que l'accélération a eu lieu pendant le va et vient des particules entre les deux régions (au sein d'un genre de bouteille magnétique dont les goulots étaient en mouvements relatifs).

Les événements des 19 novembre 1949, 23 février 1956 et 4 mai 1960 ont en commun avec celui du 7 mai 1978 les caractéristiques suivantes :

- événements au cours de la phase de normalisation d'une décroissance Forbush,
- durée brève et délai parmi les plus courts entre le début de l'éruption associée et l'arrivée des particules,
- position de l'éruption au bord ouest du Soleil.

Cette dernière caractéristique et la répartition des directions d'arrivée au-delà de la magnétosphère permettent de relier directement le volume de l'éruption à la Terre par un « tube » magnétique. Ce tube formé par les lignes en spirale du champ magnétique interplanétaire était stable à ce moment. Enfin, la composante horizontale de l'induction magnétique terrestre à Dourbes ne présentait au moment de l'événement aucune augmentation sensible. Ceci exclut toute variation du nombre de particules incidentes par modification locale du seuil.

Événement à protons (Proton Event)

Les détecteurs de particules placés à bord de satellites artificiels peuvent détecter des protons d'énergie beaucoup plus faible que dans les stations au sol. Le nombre de protons enregistrés, d'énergie comprise entre 16 et 500 millions d'électron-volt (vitesse comprise entre 1,7 et 70% de la vitesse, c , de la lumière) augmente rapidement peu après

l'éruption. Ces premières particules ont été accélérées au tout début de l'éruption car leur vitesse est inférieure à la moitié de c , ce qui implique un temps de parcours Soleil-Terre nettement plus long que 16 minutes (trajet en spirale et non en ligne droite). Notons que des particules alpha (noyaux d'hélium) ont été détectées un peu plus tard (quelques minutes) par d'autres détecteurs à bord du même satellite.

Absorption sur la calotte polaire (Polar Cap Absorption)

Les régions polaires sont les seules régions où les particules de faible énergie (donc les plus lentes) peuvent atteindre la stratosphère. L'arrivée en masse de telles particules perturbent l'ionosphère et il en résulte une absorption du bruit radio cosmique (mesuré pour $\lambda = 10$ m). Le 7 mai à 5^h15^m, une absorption a débuté pour atteindre une amplitude de 2,2 dB à 6^h49^m et se terminer à 8^h30^m. Aux latitudes inférieures à 65°, le champ magnétique terrestre empêche d'observer de tels phénomènes.

Perturbations ionosphériques à début brusque (Sudden Ionospheric Disturbances)

Dans la stratosphère éclairée, la photoionisation supplémentaire due aux rayons X et UV de l'éruption provoque une augmentation rapide de la densité d'ions. Une importante perturbation de l'ionosphère débuta à 3^h23^m avec un maximum à 4^h22^m pour se terminer à 6^h25^m. Elle fut associée à l'activité de la région solaire où eut lieu l'éruption et donna lieu à des évanouissements brusques des transmissions en ondes courtes (SWF), des anomalies de phase dans la gamme des kHz (SPA, $\lambda = 10$ km), des renforcements de la grandeur du signal (SES) pour des transmissions généralement extrêmement stables.

Effet d'éruption solaire (Solar Flare Effect)

Les enregistrements magnétiques de certaines stations ont révélé des perturbations le 7 mai de 3^h24^m à 5^h05^m.

En conclusion, voilà donc un événement qui n'apparaît pas comme exceptionnel pour ses aspects optique ou radioélectrique mais dont les conséquences géophysiques ne furent pas négligeables.