
Bulletin de l'Union des Physiciens

Association des professeurs de Physique et de Chimie

Couche ionosphérique D et émergence du cycle solaire 23

par J.-J. DELCOURT

Institut Supérieur Industriel - Province de Hainaut
Rue Paul Pastur - 7500 Tournai - Belgique

*«Afin de nous assurer que rien n'intervienne
dans la couche D à notre insu».*

L'enveloppe gazeuse qui entoure la Terre est globalement en équilibre. Alors que la composition chimique de notre atmosphère est le résultat de processus évolutifs d'émissions de nature biogénique, radiogénique ou volcanique, sa structure stratigraphique est sous la dépendance directe de la gravitation terrestre et du rayonnement électromagnétique émis par le Soleil.

Si, par opportunité, on s'intéresse à une atmosphère stationnaire (non dépendante du paramètre temps : $\delta/\delta t = 0$) et stratifiée en fonction de la hauteur ($\delta/\delta x = 0$; $\delta/\delta y = 0$; $\delta/\delta z$ non nulle), l'équilibre hydrostatique de l'atmosphère traduit simplement le fait qu'à chaque altitude le poids des couches supérieures se trouve équilibré par le gradient de pression des couches sous-jacentes. Cet état d'équilibre est

exprimé par la *relation barométrique* $p_{(h)} = p_0 \cdot e^{-h/H}$ avec p_0 la pression à l'altitude 0 et H une grandeur assimilable à une longueur dépendant entre autres de la température et de la masse molaire du gaz. On appelle H *hauteur spécifique* ; elle représente la «hauteur d'atmosphère homogène», c'est-à-dire l'altitude à laquelle s'étendrait le gaz si la pression était constante et égale à la pression de référence. Ainsi, dans une atmosphère tranquille, sans agitation tendant à homogénéiser un mélange constitué de plusieurs gaz de poids moléculaires différents, les différents constituants se verraient attacher une hauteur spécifique différente et les gaz légers deviendraient prépondérants par rapport aux gaz lourds aux hautes altitudes. On dit se trouver en *équilibre de diffusion*.

On constate expérimentalement que les composants majeurs de l'atmosphère sont brassés jusqu'à une hauteur approximative de 80 km. Jusqu'à cette altitude, la masse moléculaire moyenne de l'air est constante et la région sous-jacente est appelée homosphère par opposition à la région sus-jacente appelée hétérosphère qui est en équilibre de diffusion.

1. LE PHÉNOMÈNE D'IONISATION

Dès la liaison radiotélégraphique transatlantique de Marconi en 1901, Heaveside et Kennely avaient suggéré l'existence à haute altitude d'une couche réfléchissante pour les ondes radio-électriques. Une série brillante de manipulations réalisée par les équipes de Appleton - Barnett, Tuve et Breit faisait apparaître que la couche conductrice n'était pas unique, mais surmontée d'une autre couche réfléchissante susceptible de se dédoubler.

La couche découverte par Heaveside à une altitude de 120 km fut nommée E, et celle découverte par Appleton et *alii* à une altitude de 250 km fut nommée F. La couche d'interfaçage entre l'atmosphère neutre et l'atmosphère *conductrice* à une altitude de l'ordre de 60 km fut appelée couche D. Watson Watt créa en 1929 le terme générique d'*ionosphère*.

L'absorption d'une énergie incidente par une tranche d'atmosphère peut conduire à un phénomène de dissociation moléculaire, d'excitation ou de photoionisation de ses constituants.

Dans l'ordre d'importance décroissante, l'énergie incidente peut être véhiculée par des photons solaires, des particules chargées de provenance solaire, magnétosphérique ou cosmique, ou des matériaux d'origine météoritique.

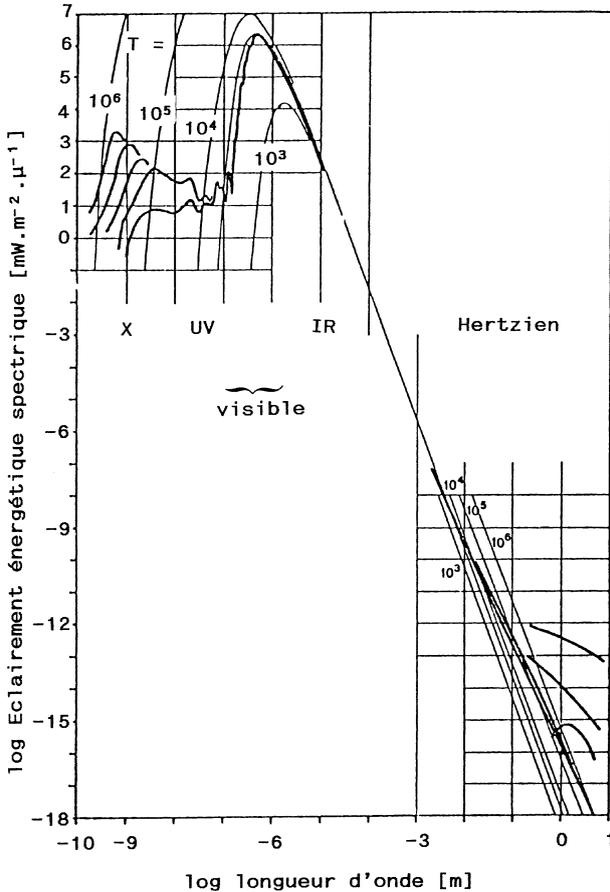


Figure 1 : Distribution de l'énergie émise par le Soleil en fonction de la longueur d'onde, du domaine métrique radio aux X. Le maximum se produit dans le spectre visible. Les différentes courbes en traits gras correspondent aux éruptions. Elles sont comparées aux différentes distributions du corps noir à mille, six mille, dix mille, cent mille et un million de K.

Pour l'essentiel, le spectre électromagnétique du Soleil qui correspond en première approximation à celui d'un corps noir à 6 000 K

s'étend du domaine hertzien (longueur d'onde kilométrique) au domaine *gamma* (longueur d'onde en fraction de nanomètre) en passant par le domaine des infrarouges, du visible, des UV et des X (figure 1).

Le flux énergétique moyen par unité de longueur d'onde reçu dans le domaine des X est un million de fois plus faible qu'il ne l'est dans le visible, et dans le domaine hertzien métrique, le coefficient de proportionnalité est de l'ordre de 10^{-25} .

Ainsi, du point de vue de l'énergie totale émise, la partie rayonnée dans le visible est très largement prépondérante, et on peut mesurer au sommet de l'atmosphère, afin de s'abstraire des phénomènes d'absorption, un éclaircissement énergétique de l'ordre de $1\,367\text{ W/m}^2$.

Bien que des radiomètres absolus embarqués aient permis de détecter une variation de l'ordre de 0,1 %, cette densité de flux d'énergie est suffisamment constante pour qu'on lui garde son appellation générique de *constante solaire*.

C'est ce flux incident qui fixe la balance des réactions photochimiques de la haute atmosphère (aéronomie) et qui est responsable, avec une périodicité diurne, de la création dans la haute atmosphère d'électrons libres qui, en se déplaçant, donnent naissance à une partie de la composante externe du champ d'induction terrestre (modification de l'ordre de 10 nT pour une valeur globale de 40 000 nT représentant la composante interne de B_T).

Dans la mesure où il n'est pas réfléchi par l'albédo terrestre, ce flux est également la source énergétique qui entretient la machine thermique océan - atmosphère - continent (climatologie).

Le phénomène atmosphérique d'absorption est caractérisé par une *profondeur de pénétration* qui est l'épaisseur de la tranche d'atmosphère qui autorise une transmission du rayonnement incident dans le rapport $1/e = 0,368$. Les différents constituants atmosphériques jouent ainsi le rôle de filtres sélectifs et chaque longueur d'onde est donc caractérisée par une profondeur de pénétration différente. On trouvera figure 2 un graphique altitude de pénétration - longueur d'onde, ainsi que les principaux constituants absorbants et leur répartition en altitude. En utilisant un modèle d'atmosphère simple à constituant unique, à température constante, en équilibre de diffusion, absorbant un rayonnement monochromatique, Chapman expliqua dès 1931 qu'il devait se

produire un pic d'ionisation à une altitude préférentielle puisque le nombre d'atomes ou de molécules ionisables décroît de manière exponentielle avec l'altitude tandis que l'intensité du rayonnement ionisant décroît de manière exponentielle avec la profondeur de pénétration. Il y a donc un manque de matériau ionisable aux altitudes élevées et un manque de radiations ionisantes aux altitudes faibles.

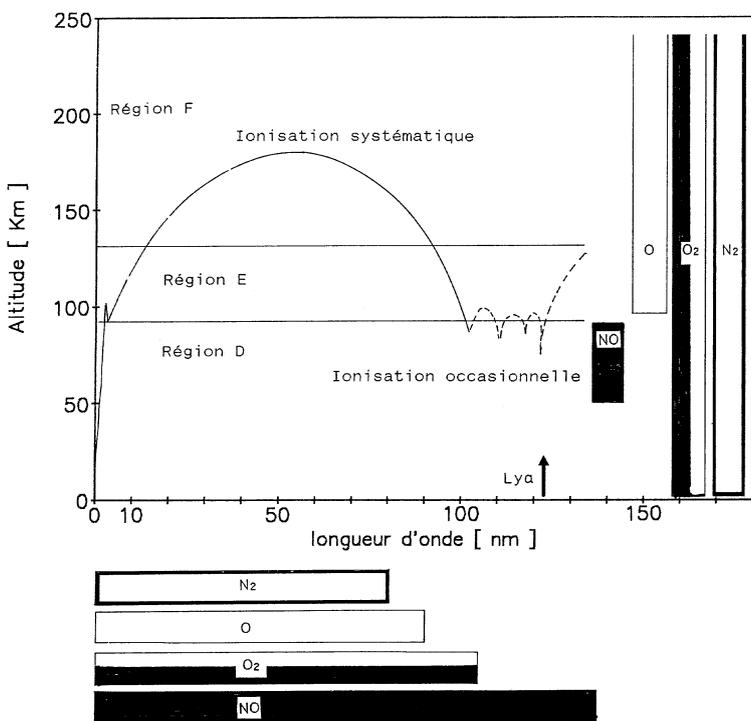


Figure 2 : Altitude de pénétration des diverses radiations ionisantes. On constate par exemple que NO présent entre 50 et 90 km d'altitude est théoriquement ionisable par toutes les radiations de longueur d'onde inférieure à 140 nm pour autant qu'elles ne soient pas trop atténuées, ce qui est systématiquement le cas des X et éventuellement des UV lointains entre 100 et 140 nm.

En outre, Chapman soulignait le fait que si la hauteur du pic d'ionisation ne dépendait pas de l'intensité de la radiation incidente, par contre le taux de production des électrons, donc le profil du pic d'ionisation était lui, fonction de cette intensité, et donc de l'incidence du rayonnement ionisant, soit encore de la distance zénithale du Soleil qui est fonction de la saison et de l'heure locale.

Si on se limite au seul phénomène d'ionisation, il apparaît que la totalité du gaz disponible à la hauteur du pic de Chapman finirait par être ionisé. Or, il n'en est rien, ce qui implique l'existence de processus électrochimiques de recombinaison qui facilitent la disparition d'électrons locaux à un rythme d'autant plus grand que la concentration électronique est importante. C'est finalement plus la nature chimique des composants atmosphériques et les taux de recombinaison associés que l'intensité de la radiation ionisante qui fixe la densité électronique moyenne à une altitude donnée (figure 3).

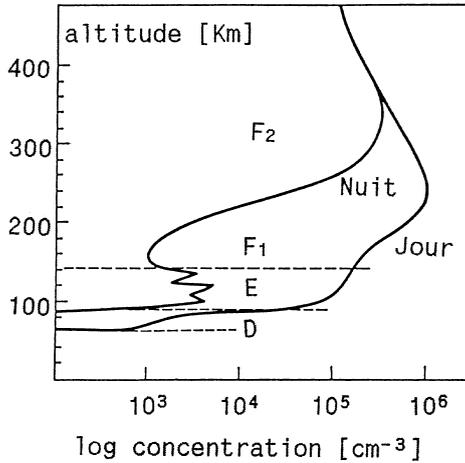


Figure 3 : Concentration en électrons en fonction de l'altitude. On constate que la couche D est inexistante la nuit.

Si on exclut quelques points de détail, les équations photochimiques qui décrivent le cycle de création - recombinaison des électrons et des ions dans l'ionosphère sont bien connues et offrent un modèle fiable.

Les travaux de Chapman marquaient le début d'une série d'expériences qui allaient d'abord faire appel au sondage ionosphérique par le biais d'ondes radioélectriques de fréquence variable pour aboutir à l'heure actuelle à des expériences faites à partir de satellites artificiels ou de laboratoires embarqués à bord d'une navette spatiale. Les sondages faits par *le haut* sont devenus de routine.

2. LA COUCHE D

D'une manière assez paradoxale, la couche D qui s'étend de 50 km à 90 km d'altitude a résisté à toutes les expériences *in situ* puisque les ballons sondes les plus performants plafonnent à une quarantaine de kilomètres d'altitude tandis que les engins spatiaux orbitent à des altitudes largement supérieures à 300 km. Quant aux fusées sondes, leur passage au travers de la couche D n'est que transitoire, ce qui explique que les études de routine par des moyens indirects et non invasifs ont gardé tout leur intérêt.

Inexistante la nuit (figure 3), la création de la couche D au lever du jour est due à une cascade de réactions qui font intervenir le photodétachement d'un électron excédentaire attaché à un ion moléculaire négatif d'oxygène et à des phénomènes de photoionisation qui agissent sur les molécules de O₂ et de NO qui se forme à l'aube quand de l'azote atomique produit dans la couche E diffuse vers le bas et entre en réaction avec l'oxygène local.

La figure 2 indique que les X de longueur d'onde inférieure à 10 nm en provenance de la couronne solaire peuvent ioniser tous les composants de l'atmosphère en dessous de 100 km d'altitude, tandis que les UV lointains ne provoquent qu'une ionisation occasionnelle à l'exclusion de la raie Lyman α de provenance chromosphérique qui est absorbée sélectivement par le NO de la région D. Pour fixer un ordre de grandeur, l'éclairement énergétique dans la bande X s'étendant de 0,1 à 1 nm est de l'ordre du $\mu\text{W}/\text{m}^2$ au niveau de l'orbite géosynchrone.

Si on reprend la figure 1, dans le domaine des UV et des X, les courbes en traits gras représentent le flux solaire durant les éruptions. On constate un accroissement des X durs qui peut atteindre trois ordres de grandeur tandis que Lyman α à 121,6 nm ne voit pas son intensité croître de manière significative. L'évolution du flux des X durant le cycle solaire est ainsi susceptible de modifier profondément le profil de la région D qui se révèle être un indicateur excessivement précis dans l'étude des relations Soleil - Terre.

3. LE CYCLE SOLAIRE

L'activité solaire est cyclique et multiforme. L'apparition de taches (dépressions de gaz «froid» dans la photosphère) évoluant en nombre et en position sur le disque solaire en est la manifestation la plus

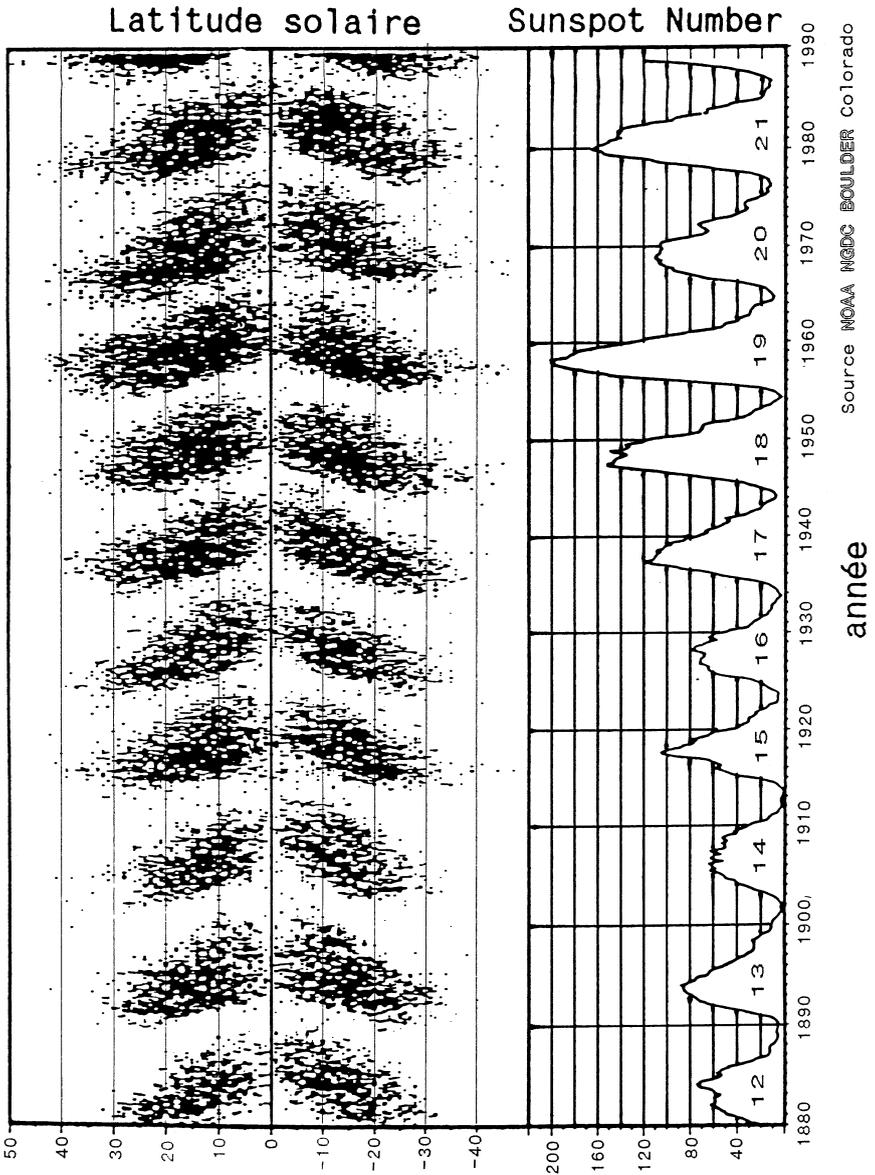


Figure 4 : Diagramme en ailes de papillon de Maunder et évolution du Sunspot Number en fonction du cycle solaire.

accessible. La région où se forment les taches voit se développer un champ d'induction important, de l'ordre de celui développé par un aimant permanent. Sur le plan visuel, la répartition en latitude des taches (loi de Spörer et diagramme en ailes de papillon de Maunder) obéit à une périodicité de l'ordre de onze ans (figure 4) et le *nombre relatif de taches* qui décrit la répartition des taches en nombre et en groupes sur le disque, bien qu'il ne soit pas, à court terme, corrélé avec le nombre ou la qualité des éruptions chromosphériques, est un bon indice statistique de l'évolution au niveau de l'année de l'activité solaire. Il est d'ailleurs le seul à jouir de la pérennité en décrivant une quinzaine de cycles avec des données homogènes, et plus d'une vingtaine si on prend en compte les données antérieures à 1848.

Purement statistiques, et sans liaison causale indiscutée avec la réalité physique de la machine interne solaire, ces observations visuelles ne permettent pas d'extrapolations fiables quant aux cycles futurs. *C'est une longue bataille perdue d'avance que de vouloir rendre le Soleil parfait, ou s'il n'est pas parfait, stable, ou s'il n'est pas tout à fait stable, prévisible...*

Le cycle de Spörer - Maunder, qui n'est pas nécessairement symétrique dans les deux hémisphères, et qui, en fin de cycle contient des taches de latitudes très différentes appartenant à deux cycles consécutifs, est d'ailleurs déphasé par rapport à des cycles plus fondamentaux dont les manifestations sont plus *subtiles*. Une série d'observations au sol, confirmées par des dizaines de missions post Skylab ont mis en évidence l'existence d'un champ magnétique solaire grossièrement dipolaire, évoluant de part et d'autre d'une lame neutre équatoriale *plissée*, et s'inversant tous les onze ans (cycle de vingt-deux ans). La connexion des lignes de force de ce champ interplanétaire avec les lignes de force du champ d'induction terrestre, pour autant que les polarités respectives l'autorisent, permet une injection facilitée de particules de vent solaire dans la magnétosphère terrestre provoquant ainsi les sous orages magnétiques dont l'intensité est représentative d'inhomogénéités présentes dans le vent solaire. Les mesures faites par *Hélios* dans le plan de l'écliptique et par *Ulysse* dans un plan presque polaire ont bien confirmé que le vent solaire rapide provient de trous coronaux (zones à faible température et à faible champ d'induction) qui ont tendance à se développer dans les régions polaires lors du minimum du cycle. Il semblerait donc bien que la composante magnétosphérique du géomagnétisme terrestre externe soit corrélée à un cycle de base

dépendant plus du cycle du vent solaire, donc de la position des trous coronaux que du cycle de Spörer - Maunder.

4. L'ÉVÉNEMENT TYPE (flare)

La description faite *supra* concerne un état de régime qui décrit le Soleil dans une espèce de *globalité*. Ainsi, l'évolution du champ poloïdal contrôle la distribution des vitesses du vent solaire dont une des manifestations au niveau terrestre est l'évolution de la composante externe de B_T et du nombre d'aurores polaires. Le côté statistique de cette évolution permet entre autres aux ionosphéristes de faire des projections des conditions de propagation radio à moyen et long terme, et en général aux scientifiques de planifier certains programmes d'envergure.

Par opposition à ces phénomènes généraux et cycliques, on voit se développer des phénomènes paroxystiques et chaotiques qui sont attachés à des zones qui contiennent la plupart du temps des taches ou des groupes de taches où la complexité du champ magnétique est l'élément déterminant. Ces centres actifs, caractérisés par un réarrangement des lignes de force du champ d'induction, sont la source d'émissions de forte intensité qui couvrent l'entièreté du spectre électromagnétique, du domaine radio aux UV et aux X durs.

Chaque type d'émission, parfaitement stéréotypé, correspond à un réaménagement local des caractéristiques physiques de l'atmosphère solaire. A la suite d'une dizaine de prédécesseurs équipés de capteurs X, le satellite Yohkho qui profite d'un nouveau système d'imagerie en X mous et durs a permis de confirmer *de visu* le déroulement d'un flare : restructuration de deux boucles de champ magnétique qui se pénètrent provoquant l'échauffement du plasma interne jusqu'à des températures de l'ordre de quarante millions de degrés, libération d'électrons se déplaçant à des vitesses d'au moins 50 000 km/s, extension dans la couronne de la protubérance avec émission de X mous au sommet de l'arche et de X durs aux points d'ancrage, propagation d'une onde acoustique dans l'atmosphère voisine avec ébranlement et mise en oscillation de la chromosphère et de la couronne et éventuellement injection dans l'espace interplanétaire de particules chargées et de lambeaux de couronne. L'énergie moyenne dissipée lors d'un *flare* est de l'ordre de 10^{24} à 10^{25} J dont au moins la moitié est convertie en

énergie cinétique attachée aux particules et matériau quittant l'environnement solaire.

Une étude spécifique des émissions détectables dans l'environnement terrestre permet donc d'évaluer le phénomène transitoire qui affecte une tranche de l'atmosphère solaire.

5. QUELQUES MANIFESTATIONS IONOSPHERIQUES DES FLARES

La transmission terrestre d'un signal radioélectrique peut s'effectuer par le biais d'une onde de sol qui n'est effective que pour des fréquences inférieures à 10 MHz ou par une onde de ciel susceptible de se réfléchir dans l'ionosphère pour autant que sa fréquence soit inférieure à une trentaine de MHz. Les deux ondes peuvent interférer (figure 5).

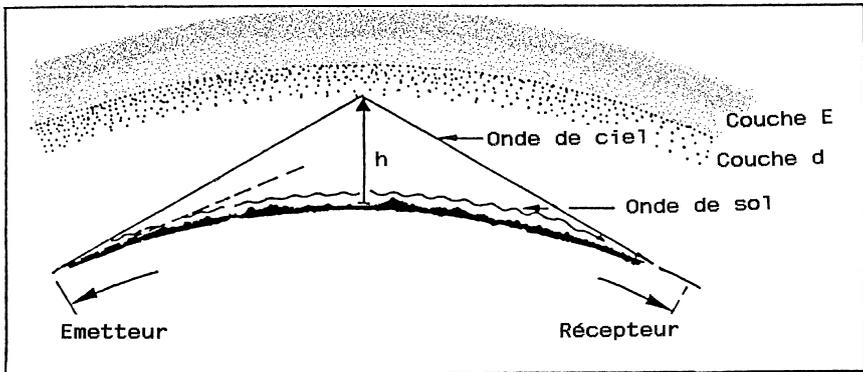


Figure 5 : La transmission d'un signal radioélectrique se fait par le biais d'une onde de sol et d'une onde de ciel qui interfèrent à la réception.

Le phénomène de réflexion se produit à une altitude où la concentration électronique est suffisante et telle que la fréquence de plasma du milieu soit égale à la fréquence du rayonnement incident. Dans ces conditions, l'indice de réfraction du milieu devient nul.

Si N est le nombre d'électrons par mètre cube, l'altitude de réflexion est celle pour laquelle $N = [f/9]^{2*}$.

Si on se réfère à la figure 3, on constate que les ondes VLF (*Very Low Frequency* : $3 \text{ KHz} < f < 30 \text{ KHz}$) et LF ($30 \text{ KHz} < f < 200 \text{ KHz}$) ont une hauteur de réflexion située dans la couche D. Les signaux de fréquence plus élevée se réfléchissent soit dans la couche E ou la couche F, en subissant une double atténuation, voire une absorption totale, en mettant en oscillation les électrons sous-jacents lors du trajet incident et du trajet réfléchi. Le phénomène est bien connu des ionosphéristes qui définissent des *heures d'ouverture pour les différents circuits*. Pour les ondes basses et très basses fréquences, la Terre et l'ionosphère constituent un guide d'onde qui autorise des propagations par rebonds successifs à très grandes distances. Ce sont des fréquences qui sont utilisées par les systèmes de navigation interférentielle LORAN C (100 KHz) ou Oméga (entre 12 et 15 KHz). A ces fréquences, pour des distances inférieures à 2 000 ou 3 000 km, il y a coexistence d'une onde de sol et d'une onde de ciel d'amplitudes différentes qui interfèrent. Si l'altitude de réflexion se modifie par surionisation de la couche D, la phase du signal réfléchi évolue, et en conséquence l'amplitude du signal reçu varie. Il s'agit, dans le fond, d'un mirage électromagnétique puisque le signal que l'on reçoit de l'émetteur est la somme d'un signal direct et d'un signal réfracté.

L'amplitude et la phase des signaux LF et VLF sont ainsi représentatives de la hauteur de la couche D et donc du flux énergétique ionisant.

Signalons au passage qu'une surionisation de la couche D améliore la propagation à longue distance de la composante VLF générée par les éclairs des orages tropicaux, particulièrement aux environs des 28 KHz (SEA : *Sudden Enhancement of Atmospherics*).

* L'oscillation de plasma et sa fréquence associée se développent dans un plasma globalement neutre présentant localement des modifications de densité électronique. Le phénomène correspond à l'exercice d'une force de rappel. Le carré de la pulsation de plasma est proportionnel au carré de la charge de l'électron, à la densité électronique et inversement proportionnel à la masse de l'électron et à la permittivité du vide. Exprimé en MKS, on obtient $f_p = 9 [N]^{1/2}$. Une démonstration formelle se trouve dans tous les ouvrages traitant d'électromagnétisme. On reliera avec intérêt le cours de Berkeley : Ondes - volume 3.

Bien entendu, ces mesures ne peuvent être interprétées qu'au niveau global du flux solaire, et sans autre moyen d'investigation, il n'est pas possible d'associer le *burst* énergétique à un centre actif spécifique.

La figure 6 montre clairement la périodicité diurne du phénomène d'ionisation pour un jour calme ; les enregistrements représentent l'évolution du niveau de réception de MSF 60 (*cfr. infra*) pour le trente-sixième et le cent vingt-deuxième jour de l'année 1983 (milieu de la phase décroissante du cycle 21).

Bien que la partie pratique de l'expérience ne soit pas décrite dans l'article, on doit pouvoir mesurer l'évolution de la phase du signal reçu. Ceci implique que les récepteurs soient très différents des récepteurs de radio classique. Il s'agit de récepteurs à amplification directe qui de fait ne sont que des amplificateurs très sélectifs des signaux à recevoir. Si on désire recevoir trois signaux, il faudra donc trois récepteurs qui sont *accordés* chacun sur un signal à mesurer. La technique de l'amplification directe est assez particulière et demande certaines précautions. Pour donner un aperçu, l'amplitude du signal à l'entrée du récepteur est de l'ordre de 100 μV , et il est amplifié jusqu'à des niveaux de l'ordre de quelques volts. Il faut donc éviter à tout prix une réinjection vers l'antenne du signal amplifié provoquant une mise en oscillation du système.

On obtiendra le schéma auprès du laboratoire de l'ISIPH et dans des limites raisonnables, la réalisation pour copie d'un prototype de référence serait envisageable. La mise au point optimale du récepteur implique les compétences de laboratoire adéquates, surtout pour l'alignement des deux circuits accordés.

Le montage, hors antenne, occupe un circuit imprimé de format européen 16 \times 10 cm. L'expérience ne présente d'utilité que si le niveau de réception du signal est enregistré vingt-quatre heures sur vingt-quatre, trois cent soixante-cinq jours par an, les événements ayant une tendance certaine à se manifester quand l'enregistreur est en panne ou utilisé à d'autres fins... La règle majeure de l'enregistrement géophysique est la continuité.

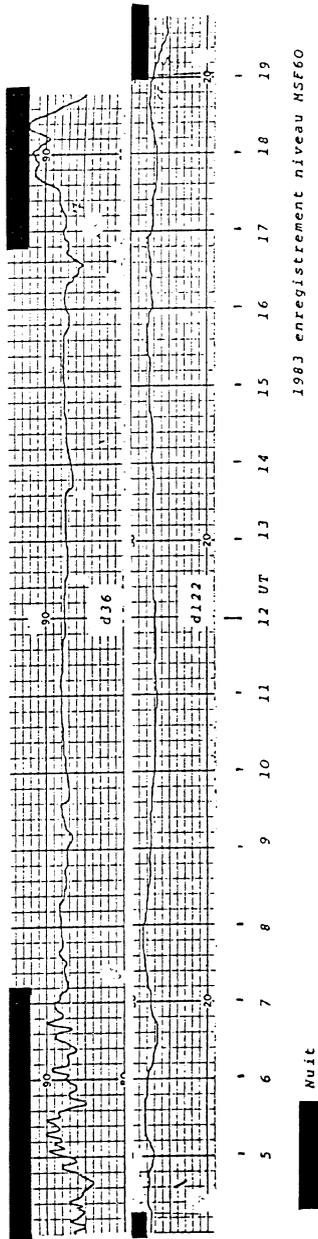


Figure 6 : Établissement de la couche D au lever du Soleil. L'existence de la couche D autorise des liaisons VLF exemptes de fluctuations.

6. LES RÉSULTATS

Ils dépendent largement de la position géographique du récepteur et donc des amplitudes relatives de l'onde de sol et de l'onde de ciel. Quand la distance augmente, l'amplitude de l'onde de sol diminue tandis que l'amplitude de l'onde de ciel augmente, et pour une distance de l'émetteur de l'ordre de 1 000 km, elles sont égales.

C'est donc à cette distance que le phénomène interférentiel est le plus marqué. La figure 7 donne l'amplitude relative des deux composantes. Ainsi, si l'amplitude de l'onde de ciel vaut 10 % de celle de l'onde de sol, lors d'une modification de la hauteur de la couche D par surionisation, on peut suspecter que l'évolution de l'amplitude maximale de la frange d'interférence ne représentera que 20 % de la valeur moyenne du niveau de réception du signal. Bien entendu, pour les grandes distances, quand l'onde de sol a disparu, c'est l'amplitude de la seule onde de ciel que l'on mesure. Parmi les très nombreux enregistrements, on trouvera figure 8 le relevé d'un jour perturbé où les effets des *flares* solaires affectent les trois *circuits* de réception MSF, HBG et DCF dans la région Lilloise (cfr. *infra*).

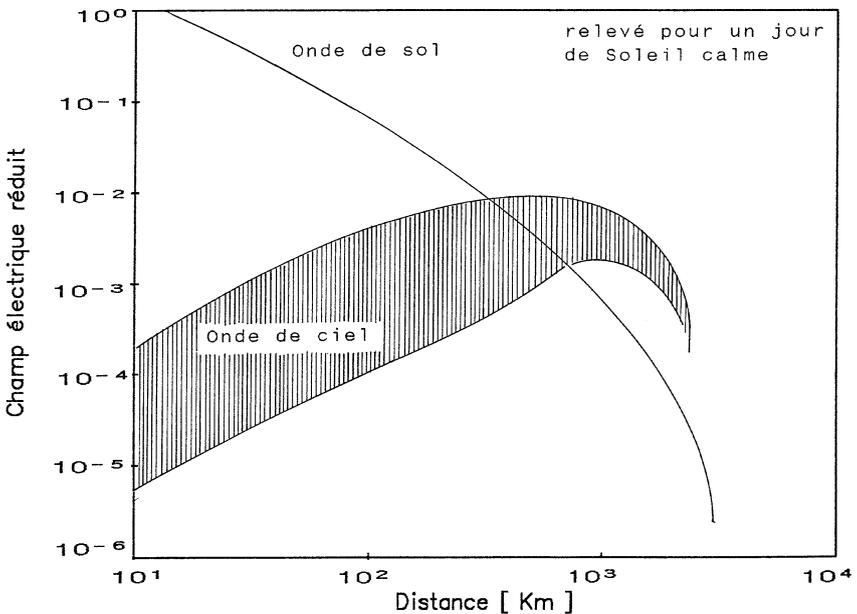


Figure 7

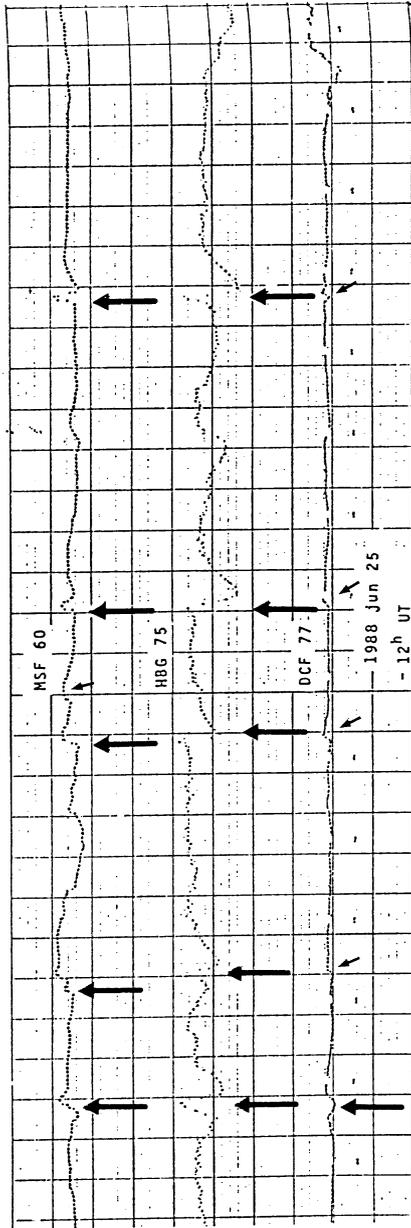


Figure 8 : Modifications induites par une succession de flares solaires des niveaux de réception des signaux en provenance de MSF, DCF et HBG dans le nord de la France.

La morphologie même du signal correspond à des bouffées de X qui surionisent la couche D. La montée du signal est rapide (un pointé toutes les deux minutes), et la phase de récupération est lente (fraction d'heure).

On insistera sur le fait que l'amplitude du phénomène transitoire n'est pas directement liée à la modification du flux des X incidents. Par contre, le temps de récupération de l'ionosphère qui dépend de la quantité de molécules ou d'atomes qui ont été ionisés l'est. L'interprétation de l'errement de la plume sur l'enregistrement donne naissance à un indice de crédibilité qui doit être confirmé par corrélation avec d'autres enregistrements de provenances diverses. L'importance des flares est donc référencée à la durée et à l'*appréciation* de la perturbation ionosphérique induite selon les tableaux suivants :

Durée en minutes	Indice associé
18 ou moins	1 -
de 19 à 25	1
de 26 à 32	1 +
de 33 à 45	2
de 46 à 85	2 +
de 86 à 125	3
de 126 à plus	3 +

Tableau 1

Indice de confiance lors de l'interprétation	
Contestable	0
Possible	1
Probable	2
Raisonnable	3
Net	4
Certain	5

Tableau 2

A titre d'exemple, la figure 9 (enregistrement) correspond au niveau de MSF 60 reçu le 4 mai 1989 en Suède par la station de G. FLODQVIST. La grande distance séparant l'émetteur du récepteur donne naissance à un effet marqué sur l'onde de ciel.

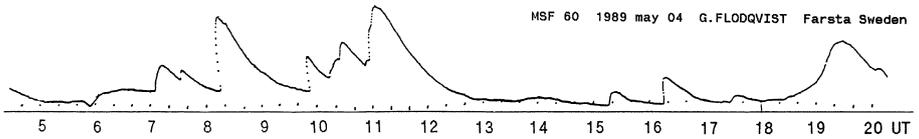


Figure 9 : Les amplitudes respectives de l'onde sol et de l'onde de ciel étant quasi égales, l'amplitude de la figure d'interférence est particulièrement marquée dans cet enregistrement de MSF effectué en Suède.

La figure 10 montre une partie d'enregistrement décrivant un accroissement des atmosphériques le 24 juin 1993 à 14 h 40 et 17 h 30 UT (Cugnon et Koeckelenbergh : SIDC Sunspot Bulletin, juin 1993).

Des conditions idéales d'étude en Europe de l'Ouest, notamment en France ?

On peut suspecter qu'une scrupuleuse étude de routine au sol puisse rendre des services comparables et complémentaires à ceux offerts par des satellites spécialisés dans la mesure du flux global en X tels que GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) dont les données sont disponibles dans les *Solar-Geophysical Data* auprès du NOAA à Boulder USA. Certains auteurs supposent même que le taux de production nocturne en électrons de ce qui reste de la région D pourrait être sous la dépendance du passage au méridien de sources X.

Une triple opportunité s'offre

Nous sommes à la fin du cycle 22. Le cycle solaire 23 devrait émerger mi 1996, début 1997. En moyenne, la «montée» d'un cycle se fait en deux ans et demi ou trois ans.

On peut recevoir de manière confortable dans toute l'Europe au moins trois émetteurs LF de signaux horaires permettant une étude continue de l'évolution de la couche D (figure 11).

Ces émetteurs fonctionnent sur les fréquences de 60 KHz (MSF - Rugby - Grande-Bretagne), 75 KHz (HBG - Prangins - Suisse), 77,5 KHz (DCF - Mainflingen - Allemagne), auxquels on peut joindre RBU ($f = 66 \frac{2}{3}$ KHz Moscou). Ils sont tous caractérisés par une amplitude de porteuse constante interrompue en début de seconde durant 100 ou 200 ms autorisant une mesure du niveau de réception particulièrement simple et fiable. A l'exclusion de RBU, les *circuits* en

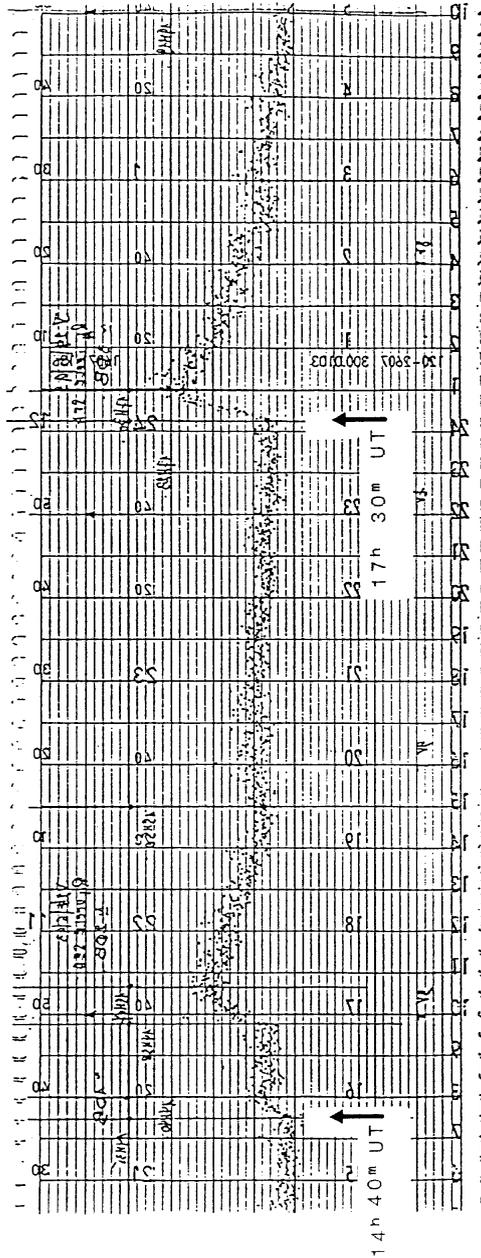


Figure 10 : SEA bien marqué dû à la surionisation du bas de la couche D. Le bruit de fond dont le niveau fluctue à sa source dans les orages tropicaux.

Europe de l'Ouest sont des circuits «simple réflexion» qui autorisent un positionnement géographique exact des zones de rebond sur la couche D.

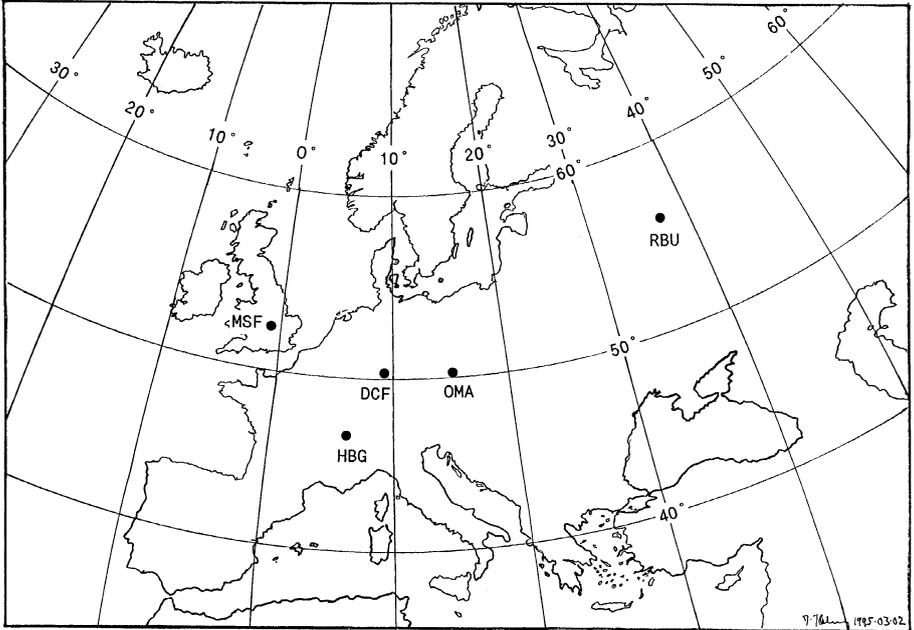


Figure 11

En août 1999, fait exceptionnel, il y aura une éclipse totale de Soleil visible en Europe dont la zone de totalité couvrira approximativement, en ce qui concerne la France, une bande Le Havre - Reims - Strasbourg. On ne peut que très rarement profiter dans un tel contexte d'une telle modification transitoire des conditions d'ionisation.

Une large campagne de mesures indirectes concernant la couche D durant l'émergence du cycle solaire 23 présenterait un intérêt certain. Elle permettrait entre autre de mettre en place une infrastructure légère autorisant des mesures en continu du taux d'ionisation de la basse ionosphère, et pour peu que les sites des stations soient bien choisis, de procéder le 11 août 1999 à des mesures de vitesse d'ionisation de la couche D le long de la zone de totalité de l'éclipse de Soleil où le flux solaire sera interrompu au maximum durant 2 m 20 s. Pour cette partie

d'expérience, idéalement, la zone de totalité devrait être équidistante des émetteurs et des stations de réception (il y a là un beau problème de système de projection...).

Le laboratoire de l'ISIPH (Belgique) est à la recherche de partenaires désireux de participer à une campagne de mesures européenne concernant la couche D durant l'émergence du cycle solaire 23. Tout renseignement technique ainsi qu'une description complète de la campagne peut être obtenu auprès de l'auteur. Si le nombre de stations associées au projet est suffisant, un E mail sera mis sur pied.

Pour tout renseignement :

J.-J. DELCOURT - Laboratoire d'Électronique - Institut Supérieur Industriel de la Province de Hainaut - 2, rue Paul Pastur - B 7500 TOURNAI - BELGIQUE - Fax : (19) 32 69 842979 - Tél. et Fax privé : (19) 32 69 227745

BIBLIOGRAPHIE

- MM. COLLINS, PETERSEN et alii : «*Yohkko and the Mysterious Solar Flare : Sky and Telescope*», septembre 1993.
- M. CUGNON et alii : Sunspot Bulletin, Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles.
- M. DELCOURT : «*Magnétisme terrestre*», Masson éditeur, 1990.
- M. FOUKAL : «*Le Soleil, une étoile variable : Pour la Science*», avril 1990
- MM. NESME et E. RIBES : «*Commentaire à Foukal*», op. cit.
- M. PHILLIPS : «*Guide to the Sun*», Cambridge University Press, 1992.