

CALCUL DE LA VARIATION DE DENSITÉ ÉLECTRONIQUE DANS LA BASSE IONOSPHERE AU COURS D'UNE ÉRUPTION SOLAIRE

PAR

Jean-Marc de COMARMOND

(Laboratoire de Physique — Observatoire de Tananarive)

RÉSUMÉ

Une méthode de calcul de la variation de densité électronique dans la basse ionosphère (entre 60 et 80 kilomètres d'altitude) à partir des relations régissant la création de paires d'ions, la formation d'ions négatifs par attachement d'électrons sur des molécules neutres et de libération d'électrons par détachement sur ions négatifs, est exposée ici. Les résultats de ce calcul, effectué sur ordinateur, et correspondant à une éruption solaire d'intensité forte dont la variation dans le temps est fixée, sont donnés pour différentes altitudes de la basse ionosphère.

ABSTRACT

A method of calculation of variation of electron density in lower ionosphere (in the 60 to 80 kilometers height range) by integration of ionospheric balance equations is presented. Results, obtained by computer, corresponding to a strong solar flare with a definite time variation are given for different heights of ionosphere.

INTRODUCTION

L'étude des effets des éruptions solaires sur la propagation d'ondes radioélectriques myriamétriques (ondes TBF) nous a amené à chercher à calculer la variation de densité électronique dans la basse ionosphère (altitude 60 à 80 kilomètres) au cours d'une éruption solaire. Pour cela nous avons repris le calcul effectué par PIERCE et ARNOLD (1963) mais nous avons dû changer certains des paramètres ionosphériques utilisés par ces auteurs et modifier la méthode de calcul.

I. RELATIONS D'ÉQUILIBRE

Les processus de création de paires d'ions (électron ion positif), formation d'ions négatifs par attachement sur molécules neutres et détachement d'électrons sur ions négatifs sont régis par les relations suivantes :

$$\frac{dN_e}{dt} = Q - aN_e - \alpha_e N_e N^+ + (d + f) N^- \quad (1)$$

$$\frac{dN^-}{dt} = aN_e - (d + f) N^- - \alpha_i N^- N^+ \quad (2)$$

$$\frac{dN^+}{dt} = Q - \alpha_e N_e N^+ - \alpha_i N^- N^+ \quad (3)$$

$$N = N_e + N^- \quad (4)$$

ou :

— N_e , N^+ et N^- sont les densités d'électrons d'ions positifs et d'ions négatifs (cm^{-3}) ;

— a est le coefficient d'attachement électron sur molécule neutre (s^{-1}) ;

— α_e est le coefficient de recombinaison électron-ion positif (cm^3/s) ;

— α_i est le coefficient de recombinaison ion négatif-ion positif (cm^3/s) ;

— d est le coefficient de photo détachement ($A^- + h\nu \rightarrow A + e$), (s^{-1}) ;

— f est le coefficient de détachement par collision et association (s^{-1}) ;

— Q taux de production de paires d'ions ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$).

L'équilibre sera obtenu pour $\frac{dN_e}{dt} = \frac{dN^-}{dt} = \frac{dN^+}{dt} = 0$, et la résolution de ce système d'équation nous donnera les valeurs de N_e , N^- et N^+ si nous connaissons le taux de production de paires d'ions et les coefficients ionosphériques régissant création et disparition d'électrons libres par détachement recombinaison et attachement.

II. COEFFICIENTS DE RECOMBINAISON, D'ATTACHEMENT ET DE DÉTACHEMENT.

Les valeurs de ces coefficients révisées récemment par MITRA (1968) sont différentes de celles utilisées par PIERCE et ARNOLD en 1963, en particulier celles concernant les processus de recombinaison.

1. Coefficient de recombinaison électron-ion

MITRA (1968) recommande une valeur comprise entre 1 et $4 \times 10^{-7} \times \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.2}$ ce qui donne les valeurs calculées à différentes altitudes du *tableau I* et qui sont supérieures à celles utilisées par PIERCE et ARNOLD d'au moins un ordre de grandeur.

TABLEAU I

Valeurs du coefficient α_e de recombinaison électron-ion dans la région D de l'ionosphère d'après PIERCE et ARNOLD (1963) et MITRA (1968).

Hauteur (km)	MITRA (1968), valeurs recommandées $1 \text{ à } 4 \times 10^{-7} \times \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.2}$ ($\text{cm}^3 \times \text{s}^{-1}$)		PIERCE et ARNOLD (1963) ($\text{cm}^3 \times \text{s}^{-1}$)
	$2.5 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.2}$	$4 \times 10^{-7} \left(\frac{T}{300}\right)^{-1.2}$	
60	$3,0 \times 10^{-7}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-8}$
65	$3,4 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-7}$	$3,9 \times 10^{-8}$
70	$3,8 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-8}$
75	$4,4 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$4,4 \times 10^{-8}$
80	$5,1 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-8}$
85	$5,1 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-8}$
90	$5,1 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-8}$

2. Coefficient de recombinaison ion négatif-ion positif

A toutes altitudes dans la basse ionosphère MITRA (1968) donne $\alpha_i = 1 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ ce qui est 3 fois supérieur à la valeur de PIERCE et ARNOLD ; α_i est alors au plus égal au tiers de α_e alors que PIERCE et ARNOLD utilisaient dans leur méthode de calcul $\alpha_i = \alpha_e$.

3. Coefficient d'attachement a

Pour l'attachement sur la molécule neutre O_2 qui est largement prépondérant dans la basse ionosphère, MITRA donne $a = 2 \times 10^{-30} [\text{O}_2]^2$ où $[\text{O}_2]$ est le nombre de molécules d'oxygènes par cm^3 .

Les valeurs calculées à différentes altitudes et données dans le *tableau II* ne sont pas très différentes de celles de 1963.

TABLEAU II

Valeurs du coefficient d'attachement des électrons dans la région D de l'ionosphère d'après PIERCE et ARNOLD (1963) et MITRA (1968).

Hauteur (km)	MITRA (1968) (s^{-1})	PIERCE et ARNOLD (1963) (s^{-1})
60	4,71	7,1
65	1,41	1,9
70	$3,8 \times 10^{-1}$	$5,1 \times 10^{-1}$
75	$8,8 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$
80	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$
85	$2,3 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-3}$
90	$2,6 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$

4. Coefficient de photo détachement d

Les valeurs du coefficient de photo détachement trouvées en laboratoire sont pour O_2^- , $d = 0,44 \text{ s}^{-1}$, et pour O^- , $d = 1,4 \text{ s}^{-1}$, nous utiliserons donc :

$$d = \left(\frac{0,44 [\text{O}_2^-] + 1,4 [\text{O}^-]}{[\text{O}_2^-] + [\text{O}^-]} \right) \cos \chi \text{ en } \text{s}^{-1}$$

où $[\text{O}_2^-]$ et $[\text{O}^-]$ sont les densités d'ions O_2^- et O^- , et χ la hauteur zénithale du soleil.

5. Coefficient de détachement par collision et détachement associatif

Pour le coefficient f sont utilisées seulement les valeurs de PIERCE et ARNOLD données dans le *tableau III*.

TABLEAU III

Valeurs du coefficient de détachement par collision et association d'après PIERCE et ARNOLD (1963).

Hauteur (km)	f (s^{-1})
60	$2,9 \cdot 10^{-1}$
65	$2,2 \cdot 10^{-2}$
70	$3,2 \cdot 10^{-3}$
75	$2,6 \cdot 10^{-3}$
80	$3,5 \cdot 10^{-3}$
85	$8,1 \cdot 10^{-3}$
90	$1,0 \cdot 10^{-2}$

III. DENSITÉ ÉLECTRONIQUE DE LA BASSE IONOSPHERE EN PÉRIODE DE SOLEIL CALME

1. Taux de production de paires d'ions en période calme

Les principaux agents ionisants de la basse ionosphère sont la raie Lyman α et le rayonnement X

solaires, et le rayonnement cosmique. L'ionisation par rayonnement solaire est fonction de la hauteur zénithale du soleil χ et l'ionisation par rayonnement cosmique est fonction de la latitude du lieu. Dans le *tableau IV* sont données les valeurs de Q calculées par PIERCE et ARNOLD à différentes altitudes pour une hauteur zénithale du soleil $\chi = 20^\circ$ et à une latitude de 40° . Pour chaque altitude la valeur du taux de production de paires d'ions correspondant à l'agent d'ionisant prépondérant dans le total Q est encadrée.

TABLEAU IV

Taux de production de paires d'ions par différents agents ionisants (d'après PIERCE et ARNOLD) pour $\chi = 20^\circ$ et $\lambda = 40^\circ$.

Hauteur (km)	Rayons X $\text{cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$	Lyman $\text{cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$	Rayons cosmiques $\text{cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$	Q (total) $\text{cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$
60	$6,3 \times 10^{-4}$		$3,2 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-2}$
65	$7,2 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$
70	$2,0 \times 10^{-2}$	$9,4 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-1}$
75	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$4,0 \times 10^{-1}$
80	$8,7 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^{-3}$	1,1
85	3,5	$9,9 \times 10^{-2}$	7×10^{-4}	3,6
90	$2,1 \times 10$	$4,5 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10$

2. Calcul de densité électronique

En période calme, le taux de production de paires d'ions Q varie lentement dans le temps et nous pouvons considérer qu'il y a à chaque instant équilibre et résoudre le système d'équation (1) (2)

(3) (4) en faisant $\frac{dN_e}{dt} = \frac{dN^-}{dt} = \frac{dN^+}{dt} = 0$

Dans les équations (1) et (2) pour la basse ionosphère, il faut remarquer que les termes concernant les processus d'attachement et de détachement sont très supérieurs au terme concernant la création ou la recombinaison ; négligeant ces derniers termes les équations (1) ou (2) donnent $\frac{N^-}{N_e} = \frac{a}{d+f} = \lambda$ (5).

L'équation (3) régit alors les processus de création et de neutralisation d'ions positifs qui avec $\frac{dN^+}{dt} = 0$ et les équations (4) et (5) donnent :

$$N^+ = \frac{Q(a+d+f)}{\alpha_e(d+f) + \alpha_i a}$$

et $N_e = \frac{d+f}{a+d+f} N^+ = \frac{N^+}{1+\lambda}$

donc

$$N_e = \sqrt{\frac{Q}{(\alpha_e + \lambda\alpha_i)(1+\lambda)}}$$

soit avec pour coefficient effectif de recombinaison $\alpha_{eff} = \alpha_e + \lambda\alpha_i$ et coefficient de disparition d'électrons $\psi = (1+\lambda)\alpha_{eff}$.

$$N_e = \sqrt{\frac{Q}{(1+\lambda)\alpha_{eff}}} = \sqrt{\frac{Q}{\psi}}$$

IV. ÉRUPTION SOLAIRE

Au cours de l'éruption seule l'augmentation du rayonnement X solaire est importante pour la

modification de la densité électronique de la basse ionosphère.

1. Flux du rayonnement X solaire dans différentes bandes spectrales et taux de production de paires d'ions

PIERCE et ARNOLD ont calculé le taux de production d'ions pour différentes longueurs d'ondes X : 1 Å, 2 Å, 4 Å, 6 Å la répartition spectrale étant celle donnée par WHITEN et POPOFF mais l'intensité de chaque raie étant augmentée de façon à obtenir

un flux correspondant au maximum d'une éruption solaire moyenne (26×10^{-5} ergs $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) dans la bande 0,5 à 3 Å et 86×10^{-4} ergs $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ dans la bande 1 à 8 Å). A partir du taux de production pour chacune de ces raies nous avons calculé pour différentes altitudes le taux de production pour différentes bandes spectrales et le total Q'_m pour le rayonnement X de longueur d'onde comprise entre 0,5 et 8 Å. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau V, celles de la bande spectrale prépondérante dans le taux de production du rayonnement X total pour chaque altitude étant encadrées dans le *tableau*.

TABLEAU V

Taux de production de paires d'ions par les rayons X (0.5 — 8 Å) au cours d'une éruption solaire d'intensité moyenne d'après PIERCE et ARNOLD.

($\chi = 20^\circ$)

Hauteur (km)	0.5 — 1.5 Å $\text{cm}^{-3} \times \text{sec}^{-1}$	1 — 3 Å $\text{cm}^{-3} \times \text{sec}^{-1}$	3 — 5 Å $\text{cm}^{-3} \times \text{sec}^{-1}$	5 — 8 Å $\text{cm}^{-3} \times \text{sec}^{-1}$	Q' (total) $\text{cm}^{-3} \times \text{sec}^{-1}$
60	45×10^{-3}	$10,4 \times 10^{-2}$			15×10^{-2}
65	35×10^{-3}	$7,8 \times 10^{-1}$			$7,9 \times 10^{-1}$
70	$22,5 \times 10^{-3}$	2,3	$3,8 \times 10^{-2}$		2,4
75	$12,5 \times 10^{-3}$	2,6	4,3	36×10^{-4}	7
80	$5,5 \times 10^{-3}$	1,3	24	5,1	30
85	$2,5 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-1}$	25	54	80
90	1×10^{-3}	$2,9 \times 10^{-1}$	22	56	78

2. Variation dans le temps du taux de production de paires d'ions au cours de l'éruption

Les valeurs du taux de production Q'_m données sur le *tableau V* sont les valeurs correspondant au maximum d'une éruption solaire moyenne. La variation dans le temps du taux de production utilisée dans le calcul de la densité électronique sera donnée par :

$Q'(t) = Q'_m \times e^{-t/\theta} \times t^2 / (4 \times e^{-2} \times \theta^2)$ le maximum de l'éruption solaire correspondant à $t = 2\theta$.

V. CALCUL DE LA DENSITÉ ÉLECTRONIQUE PENDANT L'ÉRUPTION SOLAIRE

L'éruption débute à $t = 0$.

1. Période calme avant l'éruption

Q est donné pour chaque altitude dans le *tableau IV* et avec les valeurs de α_e , α_i , a , d et f données plus haut nous avons :

$$(N^+)_0 = \sqrt{\frac{Q(a+d+f)}{\alpha_e(d+f) + \alpha_i a}}$$

$$(N^-)_0 = \frac{a}{a+d+f} (N^+)_0$$

$$(N_e)_0 = \frac{d+f}{a+d+f} (N^+)_0$$

2. Pendant l'éruption

La relation (3) nous donne :

$$\left(\frac{dN^+}{dt}\right)_{t=0} = Q + Q'(0) - \alpha_e \cdot (N_e)_0 \cdot (N^+)_0 - \alpha_i \cdot (N^-)_0 \cdot (N^+)_0$$

$$\text{à } t = \tau ; (N^+) = (N^+)_{\circ} + \tau \times \left(\frac{dN^+}{dt}\right)_{t=0}$$

si τ n'est pas trop petit c'est-à-dire si le temps nécessaire à l'équilibre entre ions négatifs et électrons est inférieur à τ nous pouvons écrire :

$$(N^-)_{\tau} = \frac{a}{a+d+f} (N^+)_{\tau}$$

$$\text{et } (N_e)_{\tau} = \frac{d+f}{a+d+f} (N^+)_{\tau}$$

On calculera alors $\left(\frac{dN^+}{dt}\right)$ et on en déduira de $(N^+)_{2\tau}$, $(N^-)_{2\tau}$, $(N_e)_{2\tau}$; à $t = k\tau$ nous aurons :

$$\left(\frac{dN^+}{dt}\right)_{k\tau} = Q + Q'(k\tau) - \alpha_e \cdot (N_e)_{k\tau} \cdot (N^+)_{k\tau} - \alpha_i \cdot (N^-)_{k\tau} \cdot (N^+)_{k\tau}$$

$$(N^+)_{(k+1)\tau} = (N^+)_{k\tau} + \tau \cdot \left(\frac{dN^+}{dt}\right)_{k\tau}$$

$$(N^-)_{(k+1)\tau} = (N^+)_{(k+1)\tau} \cdot \left(\frac{a}{a+d+f}\right)$$

$$(N_e)_{(k+1)\tau} = (N^+)_{(k+1)\tau} \cdot \left(\frac{d+f}{a+d+f}\right)$$

VI. RÉSULTATS OBTENUS PAR ORDINATEUR

Le taux de production de paires d'ions dû à l'éruption solaire est donné par :

$$Q'(t) = Q'_m \times e^{-t/\theta} \times t^2 / (4 \times e^{-2} \times \theta^2)$$

avec $\theta = 180s.$, c'est-à-dire maximum de l'intensité du rayonnement X six minutes après le début de l'éruption. Les valeurs prises pour Q'_m , étant 4 fois celles données dans le *tableau V*, correspondent à une forte éruption solaire. Les courbes de la *figure 1* représentent la variation dans le temps de Q' aux différentes altitudes.

Le calcul a été effectué avec $\tau = 5 s.$, ce qui permet de considérer à chaque pas l'équilibre entre électrons et ions négatifs établi.

Sur la *figure 2* est représentée pour chaque altitude la variation de la densité électronique au cours de l'éruption. Sur chaque courbe est repéré le point où la densité électronique est maximum. Il faut noter que le retard entre le maximum de la densité électronique et le maximum de l'éruption solaire est de 2 minutes à 80 kilomètres, 7 minutes à 70 kilomètres et 15 minutes à 60 kilomètres. Ces retards sont nettement inférieurs à ceux trouvés par PIERCE et ARNOLD et ils correspondent mieux au retard entre maximum du rayonnement X solaire observé par satellite et maximum de l'effet de

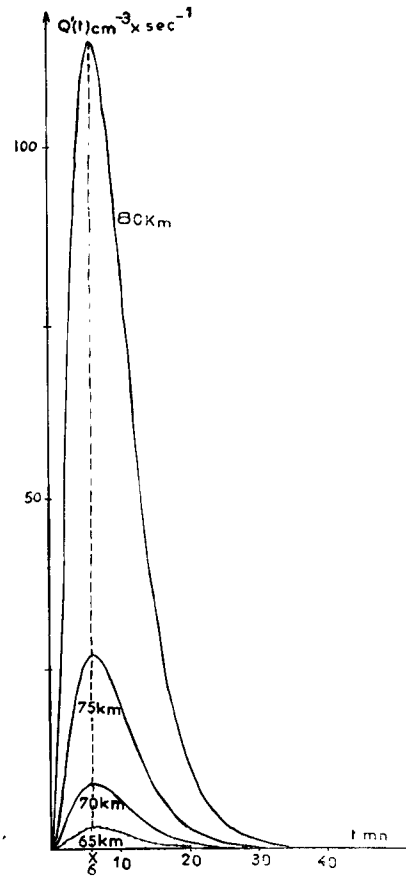


FIGURE 1
Taux de production d'électrons supplémentaires dans la région D au cours d'une éruption solaire

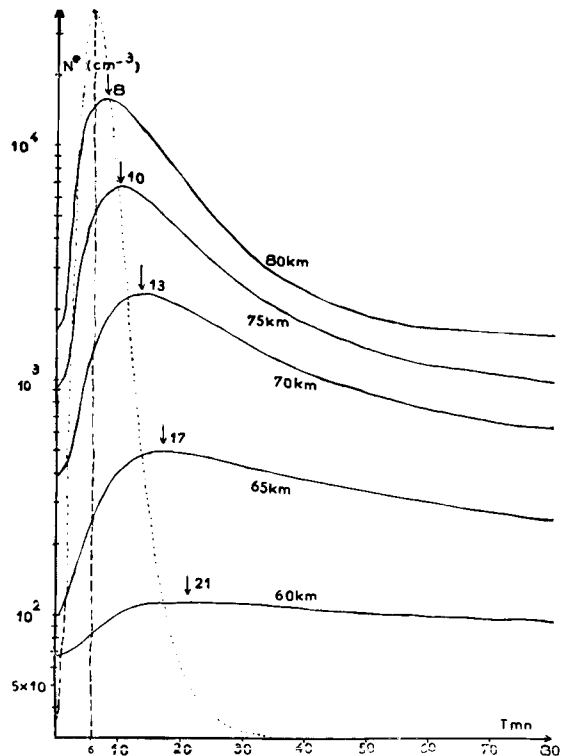


FIGURE 2
Variation de la densité électronique dans la région D de l'ionosphère au cours d'une éruption solaire ; en pointillé : $Q'(t)$ à 80 kilomètres

l'éruption solaire sur la propagation d'ondes radio-électriques myriamétriques.

CONCLUSION

Ce calcul de variation de densité électronique au cours d'une éruption solaire a permis de mettre au point la méthode de calcul. Nous disposons d'un programme Fortran pour effectuer ce calcul. Pour analyser les effets des éruptions solaires sur la propagation d'ondes TBF. Il sera utile d'effectuer

ce calcul pour d'autres variations dans le temps et différentes intensités du rayonnement X d'éruptions solaires.

BIBLIOGRAPHIE

- MITRA (A.-P.). — *A review of D region processes in non-polar latitudes.* « Jour. of Atm. and Terr. Phys. » (1968). Vol. 30, n° 6, pp. 1065-1114.
- PIERCE (E.-T.) and ARNOLD (H.-R.). — *Sudden ionospheric disturbances and the propagation of very low frequency radio waves.* Part. I. « Stanford Research Institute Report », July 1963.