

# CALCUL DE LA VARIATION DE DENSITÉ ÉLECTRONIQUE DANS LA BASSE IONOSPHERE AU COURS DE DIFFÉRENTES ÉRUPTIONS SOLAIRES

PAR

Jean-Marc de COMARMOND

(Laboratoire de Physique — Observatoire de Tananarive)

## RÉSUMÉ

Nous présentons ici une méthode de calcul modifiée par rapport à celle que nous avons exposée précédemment pour le calcul de la variation de la densité électronique dans la basse ionosphère au cours d'une éruption solaire. Nous donnons aussi les résultats obtenus à différentes altitudes pour une éruption solaire modérée, et à 70 kilomètres pour différents types d'éruptions solaires. Ce calcul montre de plus que  $\lambda$ , rapport de densités d'ions négatifs et d'électrons, varie peu au cours d'une éruption solaire à toutes les altitudes considérées. Il serait intéressant de reprendre ces calculs avec des valeurs plus récentes des coefficients ionosphériques et des taux de production électronique.

## ABSTRACT

The method of calculation of electron density in low ionosphere during a solar flare given in a recent paper (COMARMOND 1971) has been modified. This new method is presented with the results obtained for the variation of electron density at different altitudes during a moderate solar flare and at 70 kilometre for different types of solar flares. This calculation show that  $\lambda$ , negative ion to electron density ratio, does not vary much during a solar flare. For the future, it should be interesting to use this method of calculation with more recent values of ionospheric coefficients and electron production rates.

## INTRODUCTION

Nous avons dans un article récent (COMARMOND 1971) présenté une méthode de calcul de la densité électronique de la basse ionosphère au cours d'une éruption solaire et les résultats obtenus entre

80 kilomètres et 60 kilomètres pour une forte éruption solaire. Nous avons voulu voir comment la basse ionosphère répondait à différents types d'éruptions solaires et nous avons modifié la méthode de calcul exposée précédemment.

## I. RAPPEL

La densité électronique dans la basse ionosphère s'obtient par la résolution du système d'équations différentielles regissant l'équilibre des densités d'électrons ( $N_e$ ), d'ions négatifs ( $N^-$ ) et d'ions positifs ( $N^+$ ) :

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

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

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

où —  $Q(t)$  est le taux de production de paires d'ions.

—  $\alpha_e$  le coefficient de recombinaison électron-ion positif.

—  $\alpha_i$  le coefficient de recombinaison ion négatif - ion positif.

—  $a$  le coefficient d'attachement d'électron sur molécule neutre.

—  $(f)$  le coefficient de détachement d'électron sur ion négatif par collision et association.

—  $(d)$  le coefficient de photodétachement.

A ces trois relations, il faut ajouter l'équation de neutralité électrique :

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

A l'équilibre  $Q(t)$  est constant et  $\frac{dN_e^-}{dt} = \frac{dN^+}{dt} = 0$ , et avec  $\frac{N^-}{N_e} = \lambda = \frac{a}{d+f}$  on trouve :

$$(N_e)_0 = \sqrt{\frac{Q}{(\alpha_e + \lambda \alpha_i)(1 + \lambda)}}$$

$$(N^-)_0 = \lambda (N_e)_0 \quad \text{et} \quad (N^+)_0 = (1 + \lambda) (N_e)_0$$

## II. CALCUL DE LA DENSITÉ ÉLECTRONIQUE AU COURS D'UNE ÉRUPTION SOLAIRE

### I. Méthode de calcul

Dans notre précédent article (COMARMOND 1971) notre calcul était basé sur l'hypothèse que  $\lambda$  restait constant au cours de l'éruption solaire. Il suffisait alors de calculer  $N^+$  par intégration de l'équation (3) et d'en déduire les valeurs de  $N^-$  et de  $N_e$ . Dans les calculs exposés ici nous n'avons pas conservé l'hypothèse  $\lambda$  constant et par intégration des relations (1), (2) et (3) nous avons calculé séparément  $N_e$ ,  $N^-$ , et  $N^+$  en partant de  $(N_e)_0$ ,  $(N^-)_0$  et  $(N^+)_0$  pour  $t = 0$ , et :

$$(N_e)_{(k+1)\tau} = (N_e)_{k\tau} + \tau \cdot \left(\frac{dN_e}{dt}\right)_{k\tau}$$

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

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

$\tau$  devant alors être suffisamment petit pour que les termes d'ordre supérieur à  $\tau \left(\frac{dN}{dt}\right)$  soient négligeables devant ce dernier dans le développement en série de Taylor de  $N(t)$ .

### 2. Taux de production électronique

#### a. Avant l'éruption

Le taux de production électronique avant l'éruption solaire est, pour chaque altitude, fonction de la distance zenithale solaire  $\chi$  et de la latitude du lieu  $\varphi$  (ionisation par rayonnement cosmique). Nous avons pris ici pour  $Q_0$ , avec  $\chi = 20^\circ$  et  $\varphi = 40^\circ$ , les mêmes valeurs que celles de notre calcul précédent obtenues d'après PIERCE et ARNOLD (1963) et données dans le tableau (I).

TABLEAU I

h (km)	60	65	70	75	80
$Q_0$ ( $\text{cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ ) $\chi = 20^\circ, \varphi = 40^\circ$	$3,3 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$4,0 \times 10^{-1}$	1,1

#### b. Au maximum de l'éruption

Au cours de l'éruption solaire l'ionisation supplémentaire est due à l'accroissement du flux de rayonnement X solaire. Pour un flux et une distribution spectrale connus du rayonnement X, le taux de production électronique peut être calculé à partir de la densité des constituants neutres, du pouvoir absorbant de ces constituants sur les

différentes raies du rayonnement X et du pouvoir ionisant des différentes bandes du rayonnement X. Au maximum de l'éruption le taux de production électronique est à chaque altitude  $Q'_0$ , fonction de  $\chi$ , et nous avons utilisé ici les valeurs obtenues à partir des calculs de PIERCE et ARNOLD ; pour  $\chi = 20^\circ$  et pour une éruption solaire de rayonnement X d'intensité modérée ; les valeurs de  $Q'_0$  sont données dans le tableau (II).

TABLEAU II

h (km)	60	65	70	75	80
$Q'_0$ ( $\text{cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ ) $\chi = 20^\circ$	$15 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^{-1}$	2,4	7	30

#### c. Variation dans le temps au cours de l'éruption solaire

L'éruption solaire débute à  $t = 0$ , le taux de production électronique est alors  $Q_0$ . Au cours de l'éruption le taux de production électronique est  $Q(t)$ .

$$Q(t) = Q_0 + Q'(t)$$

Pour  $0 \leq t \leq \theta_1$ , nous prenons

$$Q'(t) = Q'_0 \frac{1 - e^{-t/\theta_1}}{1 - e^{-1}}$$

donc  $Q'(t)$  est maximum et égal à  $Q'_0$  pour  $t = \theta_1$ .

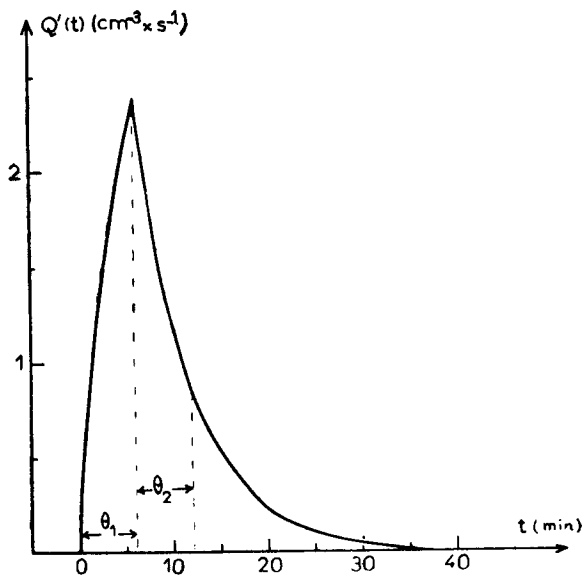


FIGURE 1

Taux de production électronique à 70 kilomètres  
dû aux rayonnements X d'une éruption solaire modérée  
 $Q' = 2,4 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = 6 \text{ minutes}$

$$\text{Pour } t \geq \theta_1, \quad Q'(t) = Q'_0 \times e^{-\frac{t-\theta_1}{\theta_2}}$$

$Q'(t)$  décroît exponentiellement avec la constante de temps  $\theta_2$  à partir du maximum  $Q'_0$  pour  $t = \theta_1$ .

En faisant varier  $\theta_1$  et  $\theta_2$  nous aurons différentes variations dans le temps de l'éruption solaire. La figure (1) donne  $Q'(t)$  pour  $\theta_1 = 6 \text{ minutes}$  et  $\theta_2 = 6 \text{ minutes}$  avec  $Q'_0 = 2,4 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ , valeur du taux de production électronique maximum pour une éruption solaire modérée à l'altitude de 70 kilomètres, et pour  $\chi = 20^\circ$ .

### 3. Coefficients ionosphériques

Comme dans le calcul précédent nous utiliserons les valeurs des coefficients de recombinaison, d'attachement et de détachement donnés par MITRA (1968) et qui sont rappelées dans le tableau suivant.

h (km)	60	65	70	75	80
$\alpha \text{ (cm}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$4,9 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$
$\alpha_1 \text{ (cm}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-7}$
a (s <sup>-1</sup> )	4,71	1,41	0,38	$8,8 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$
d (s <sup>-1</sup> )	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
f (s <sup>-1</sup> )	0,29	$2,2 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$

## III. RÉSULTATS

### I. Variation de la densité électronique à différentes altitudes

On trouvera sur la figure (2) les résultats obtenus pour  $N_e(t)$  à différentes altitudes. Ces courbes ont été obtenues pour une éruption solaire d'intensité modérée dont le taux de production électronique maximum aux différentes altitudes a été donné plus haut ; cette éruption correspondrait à un flux maximum de rayonnement X de  $26 \times 10^{-5} \text{ ergs} \times \text{cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$  dans la bande  $0,5 - 1 \text{ \AA}$  et  $87 \times 10^{-4} \text{ ergs} \times \text{cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$  dans la bande  $1 - 8 \text{ \AA}$  ce qui est bien, d'après les mesures de rayonnement X solaire de NRL (Explorer 37) publiées dans Solar Geophysical Datas, une éruption solaire modérée. Pour la variation dans le temps,  $Q'(t)$  correspond à  $\theta_1 = \theta_2 = 6 \text{ minutes}$ .

On notera tout d'abord que le retard entre le maximum d'intensité de l'éruption solaire et le maximum de densité électronique est décroissant avec l'altitude : 16' à 60 kilomètres, 8' à 70 kilomètres et inférieur à 2' à 80 kilomètres.

On remarquera par ailleurs que les résultats obtenus par cette méthode de calcul ne sont pas sensiblement différents de ceux du calcul précédent, et de plus le rapport  $\lambda$  varie ici très peu au cours de l'éruption solaire (0,2 % à 60 kilomètres et 1,2 % à 80 kilomètres), ceci justifiant à posteriori l'hypothèse que  $\lambda$  reste constant utilisée dans le calcul de 1970.

Nous avons utilisé ici un pas d'intégration  $\tau$  de 0,1 s à 60 kilomètres et de 0,25 s à toutes les autres altitudes.

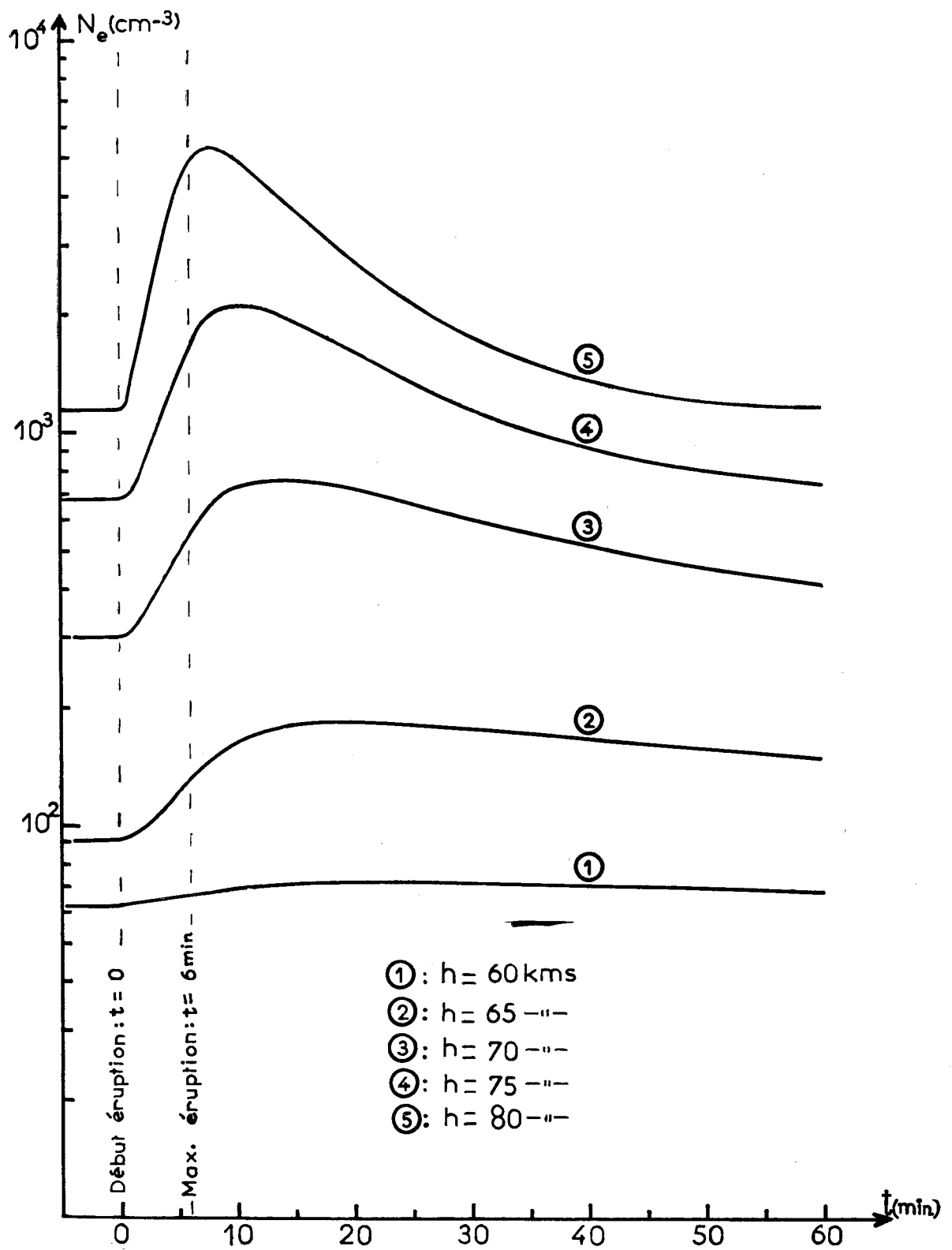


FIGURE 2

Densité électronique à différentes altitudes au cours d'une éruption solaire modérée

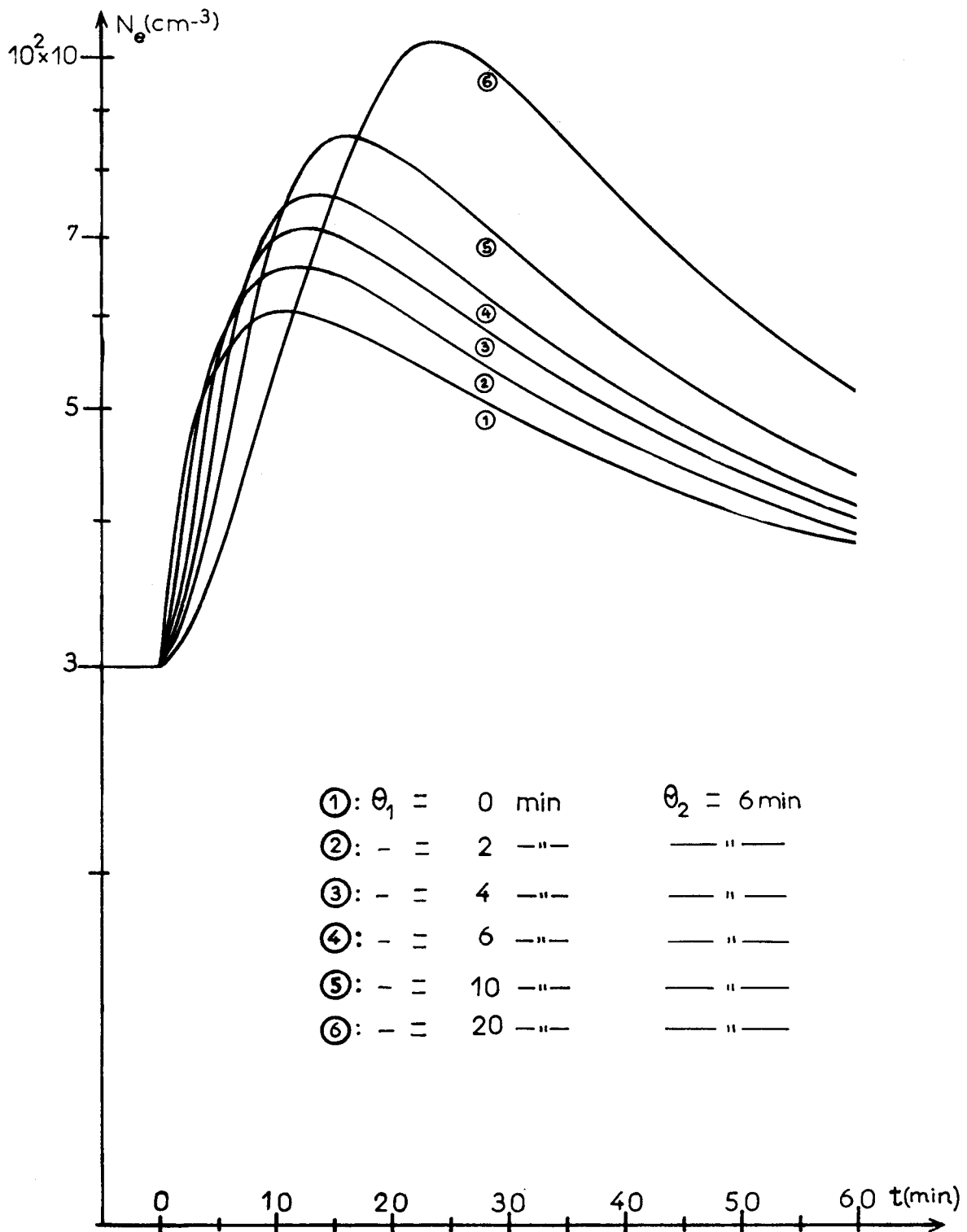


Figure 3

Densité électronique à 70 kilomètres pour éruption solaire modérée  
 ( $Q_0 = 2,4 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ ) et pour différents temps de montée  $\theta_i$ .

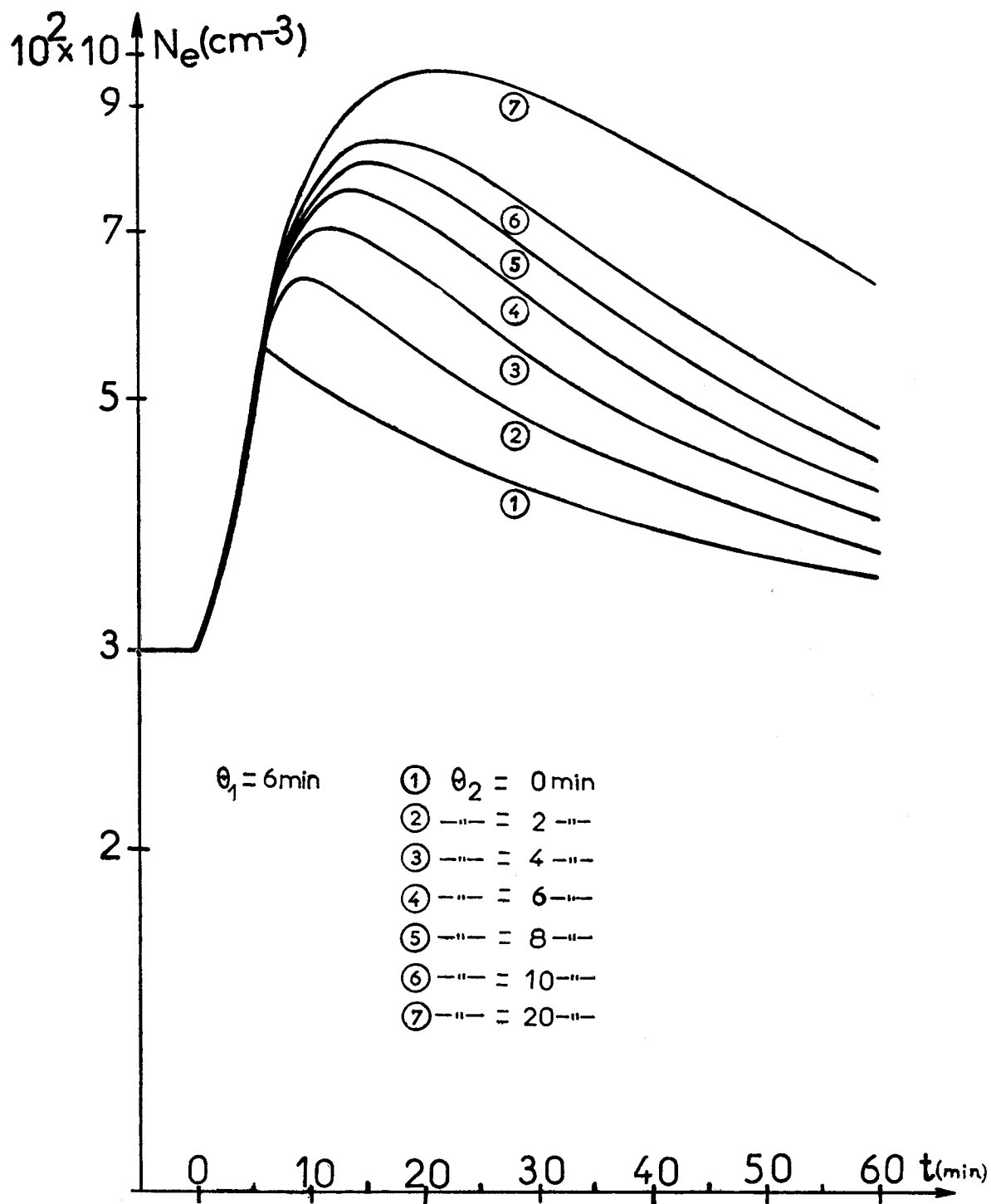


Figure 4

Densité électronique à 70 kilomètres pour éruption solaire modérée ( $Q_0 = 2,4 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ )  
 et différentes constantes de temps du retour au rayonnement solaire normal

## 2. Variation de la densité électronique à 70 kilomètres d'altitude pour différentes éruptions solaires

### a. Eruption solaire modérée, différentes variations dans le temps.

Les différentes courbes de la figure (3) correspondent à une éruption solaire modérée  $Q'_0 = 2,4 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$  et différentes valeurs de  $\theta_1$  comprises entre 0 et 20 minutes,  $\theta_2$  restant constant et égal à 6 minutes.

On remarquera que le retard entre maximum de l'éruption et maximum de densité électronique décroît lorsque  $\theta_1$  croît : 11,5 minutes pour  $\theta_1 = 0$  et 4' pour  $\theta_1 = 20$  minutes. De plus le maximum de densité électronique croît avec  $\theta_1$ , de  $605 \text{ cm}^{-3}$  pour  $\theta_1 = 0$  à  $1\ 030 \text{ cm}^{-3}$  pour  $\theta_1 = 20$  minutes.

Les courbes de la figure (4) correspondent toujours à une éruption solaire modérée, avec  $\theta_1 = 6$  minutes et différentes valeurs de  $\theta_2$ , constante de temps du retour à l'activité solaire normale,  $\theta_2$  variant entre 0 et 20 minutes. Le retard entre maximum de l'éruption solaire et maximum de densité électronique croît avec  $\theta_2$  beaucoup plus vite qu'il ne décroît avec  $\theta_1$  et il est inférieur à 1 minute lorsque  $\theta_2$  est nul.

Le maximum de densité électronique croît aussi avec  $\theta_2$ , il est de  $556 \text{ cm}^{-3}$  pour  $\theta_2 = 0$  et  $968 \text{ cm}^{-3}$  pour  $\theta_2 = 20$  minutes.

### b. Eruptions solaires de différentes intensités

Les courbes  $N_e(t)$  de la figure (5) ont été obtenues pour différentes valeurs du taux de production électronique maximum  $Q'_0$  et même allure de variation dans le temps,  $\theta_1 = \theta_2 = 6$  minutes.

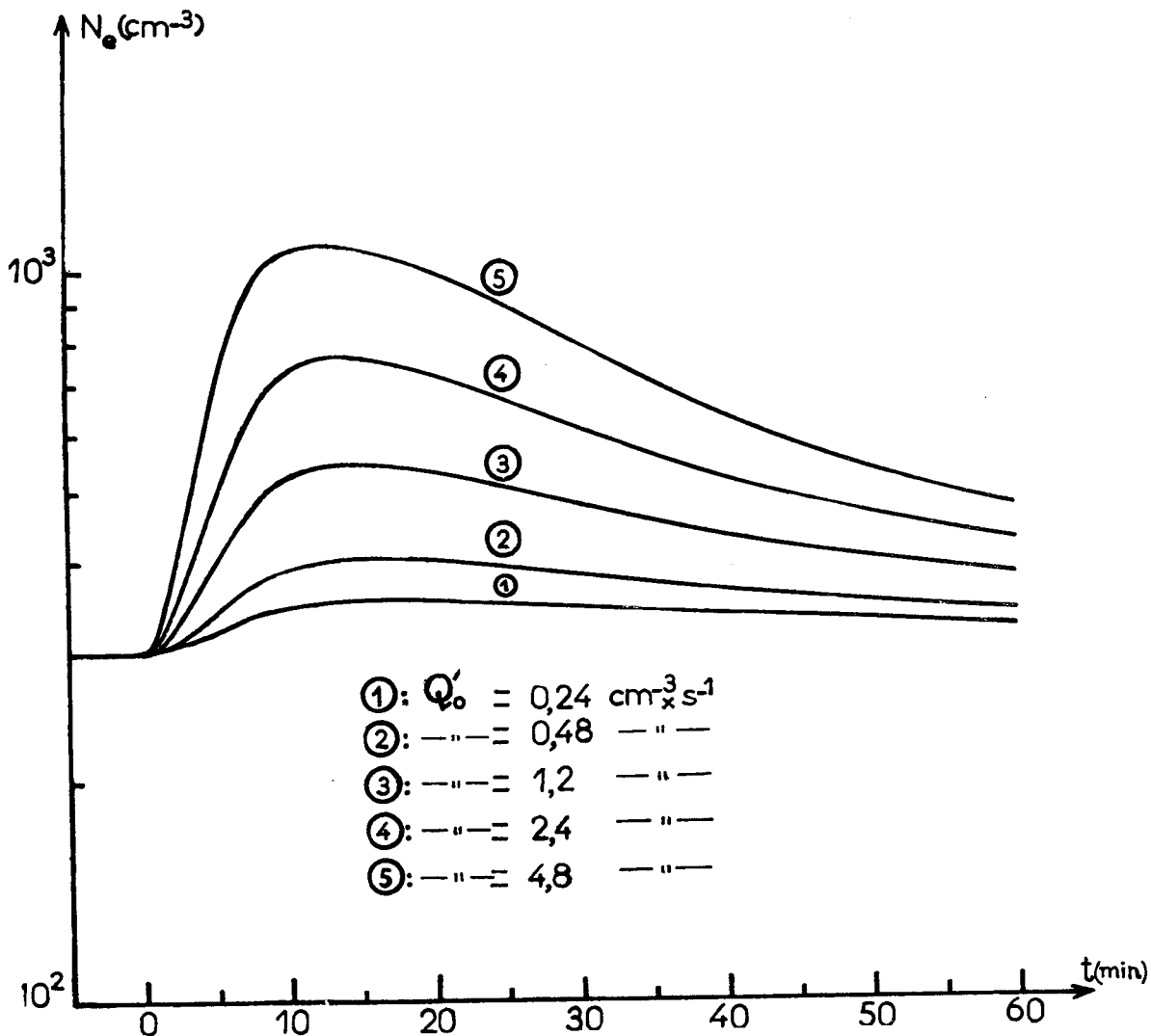


Figure 5

Densité électronique à 70 kilomètres pour éruptions solaires de différentes intensités

Les différentes courbes correspondent à des éruptions solaires d'intensité très faible pour 1 et 2, faible pour 3, modérée pour 4 et moyenne pour 5.

Le retard entre maximum de l'éruption solaire et maximum de densité électronique décroît lorsque  $Q'_0$  croît : il est de 10' pour  $Q'_0 = 0,48 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$  et de 7' pour  $Q'_0 = 4,8 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ .

#### IV. DISCUSSION

Nous reviendrons tout d'abord sur le rapport de densités d'ions négatifs et d'électrons dont nous avons déjà dit plus haut qu'il variait peu. En effet aux différentes altitudes  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  croît avec l'altitude mais reste toujours faible comme le montrent les valeurs données dans le tableau (IV) ces valeurs correspondant à une éruption solaire modérée avec  $\theta_1 = \theta_2 = 6'$ .

TABLEAU IV

h (km)	60	65	70	75	80
$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	0,2 %	0,3 %	0,5 %	1 %	1,2 %

A 70 kilomètres nous pouvons remarquer que  $\Delta\lambda/\lambda$  augmente lorsque le taux de production électronique croît plus rapidement ( $\Delta\lambda/\lambda = 0,8 \%$  pour  $\theta_1 = 0$ ) et lorsque le maximum du taux de production électronique augmente ( $\Delta\lambda/\lambda = 0,8 \%$  pour  $Q'_0 = 4,8 \text{ cm}^{-3} \times \text{s}^{-1}$ ). Mais la variation du rapport de densités d'ions négatifs et d'électrons reste faible ce qui justifie la méthode de calcul plus rapide exposée précédemment (COMARMOND, 1971).

Dans le calcul le pas d'itération  $\tau$  doit être suffisamment petit pour que le 3<sup>e</sup> terme du développement en série de Taylor de  $N_e$ ,  $N^+$  ou  $N^-$  soit négligeable devant le second terme. Nous avons considéré être un test de validité la constance des résultats lorsque  $\tau$  varie dans un certain domaine. Pour l'altitude de 60 kilomètres lorsque  $\tau$  varie de 0,05 s à 0,25 s les résultats obtenus ne varient pas sensiblement, pour  $\tau = 0,4$  s le processus d'intégration diverge. A l'altitude de 70 kilomètres les valeurs obtenues pour  $N_e$  ne varient pas lorsque  $\tau$  varie entre 0,05 s et 2 s et le processus d'intégration diverge pour  $\tau = 3$  s. Il en est de même à 80 kilomètres.

Il faut remarquer qu'au cours de ces calculs quelque soit l'altitude et quelque soient la variation dans le temps et l'intensité de l'éruption solaire, l'équation de neutralité électrique reste vérifiée, c'est à dire que la densité d'ions positifs est égale à la somme des densités d'ions négatifs et d'électrons.

Pour les coefficients ionosphériques, nous avons utilisé les valeurs conseillées par MITRA (1968) ; au cours des deux dernières années de nombreux travaux ont été publiés concernant ces coefficients qui devraient donc être reconsidérés à la lumière des résultats les plus récents. Il en est de même pour les taux de production électronique des différents agents ionisants du milieu pour lesquels nous sommes basés sur les valeurs données par PIERCE et ARNOLD en 1963, et il faudrait aussi considérer la modification de la distribution spectrale du rayonnement X au cours de l'éruption solaire (en général diminution de la dureté du rayonnement X au cours du temps) qui doit avoir une grande influence sur l'évolution du profil ionosphérique.

#### CONCLUSION

Nous avons modifié la méthode de calcul déjà utilisée et les résultats obtenus nous ont permis de justifier, a posteriori, une hypothèse de base du calcul de 1970. Nous avons donné les résultats obtenus à différentes altitudes pour une éruption solaire modérée et à 70 kilomètres pour différentes éruptions solaires. Il reste à améliorer les tests de validité mathématique de la méthode employée et à revoir à la lumière de publications plus récentes les coefficients ionosphériques et les taux de production électroniques des différents agents ionisants de la basse ionosphère.

Manuscrit reçu, le 10 juin 1971.

#### BIBLIOGRAPHIE

- COMARMOND (J.-M. de). — « Calcul de la variation de densité électronique dans la basse ionosphère au cours d'une éruption solaire ». Ann. de l'Université de Madagascar. Série Math. et Sc. de la Nature (1971) n° 8, pp. 41-46.
- 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. 1 065-1 114.
- PIERCE (E.-T.), ARNOLD (H.-R.). — « Sudden Ionospheric disturbances and the propagation of very low frequency radio waves » Part. 1. Stanford Research Institute Report. July 1963.