

L'ionosphère

F5FOD/v02 16 mars 2025

Quelle est-elle, où est-elle ?

Quels sont ses impacts sur les télécommunications ?

Comment peut-on mesurer ses caractéristiques ?

Ce n'est qu'un survol...

Je me suis parfois inspiré des deux conférences sur l'ionosphère
données en 2008 par F5NB, Robert Berranger, au Radio-Club
F6KRK...

mais aussi et surtout du cours « Propagation terrestre, ionosphérique et
spatiale des ondes électromagnétiques » de Georges Boudouris, cours
que j'ai suivi... en 1970/1971 !

$$(28) \quad ||\sigma|| = \frac{-j\omega\epsilon_0 X}{U(U^2-Y^2)} \begin{pmatrix} U^2 & -jUY_L & jUY_T \\ jUY_L & U^2-Y_T^2 & -Y_L Y_T \\ -jUY_T & -Y_L Y_T & U^2-Y_L^2 \end{pmatrix}$$

Reprenons maintenant les équations (17)-(19), en utilisant cette expression du tenseur de conductibilité ; puisque chaque composante : $\eta_{ij} = f_{i0} \cdot e^{-jkz}$ peut être remplacée par son amplitude f_{i0} et $k^2 = k_0^2 n^2$ ($n = n' - jn''$: indice de réfraction), on obtient :

$$(29) \quad \begin{aligned} \left(n^2 - 1 + \frac{XU}{U^2 - Y^2} \right) \mathcal{E}_{x_0} - j \frac{XY_L}{U^2 - Y^2} \mathcal{E}_{y_0} + j \frac{XY_T}{U^2 - Y^2} \mathcal{E}_{z_0} &= 0 \\ j \frac{XY_L}{U^2 - Y^2} \mathcal{E}_{x_0} + \left(n^2 - 1 + \frac{X(U^2 - Y_T^2)}{U(U^2 - Y^2)} \right) \mathcal{E}_{y_0} - \frac{XY_L Y_T}{U(U^2 - Y^2)} \mathcal{E}_{z_0} &= 0 \\ - j \frac{XY_T}{U^2 - Y^2} \mathcal{E}_{x_0} - \frac{XY_L Y_T}{U(U^2 - Y^2)} \mathcal{E}_{y_0} + \left(\frac{X(U^2 - Y_L^2)}{U(U^2 - Y^2)} - 1 \right) \mathcal{E}_{z_0} &= 0 \end{aligned}$$

Ce système en $\mathcal{E}_{x_0}, \mathcal{E}_{y_0}, \mathcal{E}_{z_0}$, revêt une importance évidente puisqu'il détermine la constitution des ondes caractéristiques. En tant que système homogène, il n'admet une solution non nulle que si son déterminant s'annule :

$$(30) \quad \begin{vmatrix} U^2 + (n^2 - 1) \frac{U(U^2 - Y^2)}{X} & -jUY_L & jUY_T \\ jUY_L & U^2 - Y_T^2 + (n^2 - 1) \frac{U(U^2 - Y^2)}{X} & -Y_L Y_T \\ -jUY_T & -Y_L Y_T & U^2 - Y_L^2 - \frac{U(U^2 - Y^2)}{X} \end{vmatrix} = 0.$$

Cette équation donne l'équation du second degré :

$$(31) \quad \left(1 + \frac{X}{(n^2 - 1)U} \right)^2 - \frac{Y_T^2}{U(U-X)} \left(1 + \frac{X}{(n^2 - 1)U} \right) - \frac{Y_L^2}{U^2} = 0,$$

d'où l'indice de réfraction :

$$(32) \quad n^2 = (n' - jn'')^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ \frac{Y_T^2}{2(1-X-jZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{4(1-X-jZ)^2} + Y_L^2}} \quad (*)$$

(*) Si l'on tenait compte du "terme de LORENTZ" (voir note à la suite de l'équation 23), on trouverait, au lieu de l'équation (32) :

$$(32.a) \quad n^2 = 1 - X \left/ \left(\left(1 + \frac{1}{3}X - jZ \right) + \frac{1}{2} \frac{Y_T^2}{U} \right) / \left(1 + \frac{2}{3}X - jZ \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \frac{Y_T^4}{U^2} / \left(1 + \frac{2}{3}X - jZ \right)^2 + Y_L^2} \right.$$

Rappelons, par ailleurs, que tout ce qui est dit dans ce chapitre suppose que les porteurs actifs sont les électrons, ce qui correspond presque toujours à la réalité dans l'ionosphère terrestre. Si l'on devait considérer à la fois des densités électroniques N_e et ionique N_i , on aurait à apporter à l'équation (32) les modifications suivantes (GOUBAU, 1935) :

(voir suite de cette note au bas de la page 170)

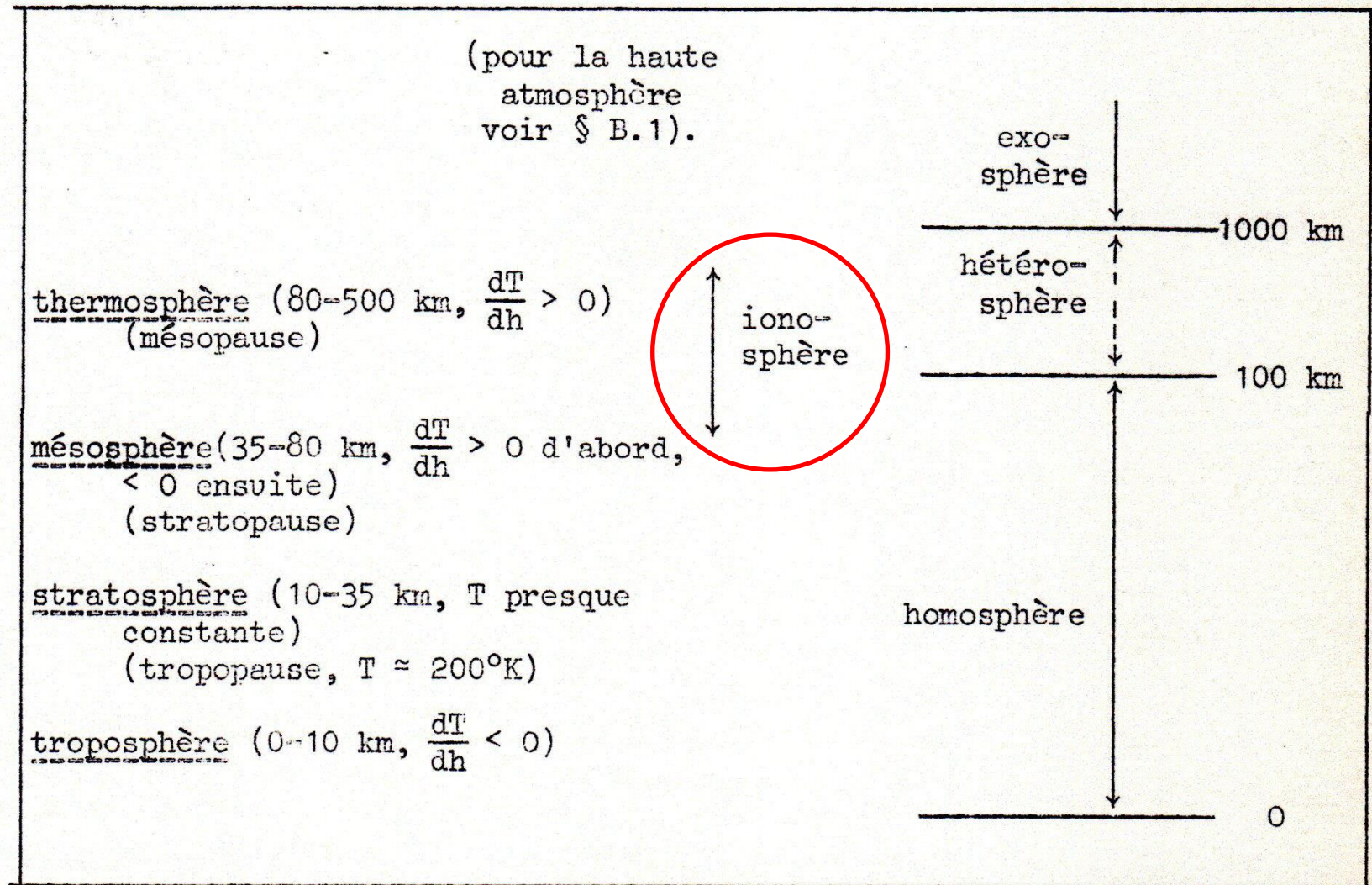
.../...

.169.

page 169 de 305

Euh... les phénomènes et les calculs sont souvent complexes. Je vais essayer de présenter les choses de manière un peu plus... « sympathique » !

Un peu de vocabulaire sur lessphères



L'ionosphère, c'est quoi ?

C'est la région la plus élevée de l'atmosphère terrestre,
entre 80 et 1000 km d'altitude.

Ions

Atomes ou groupements d'atomes ayant gagné ou perdu un ou plusieurs électrons.

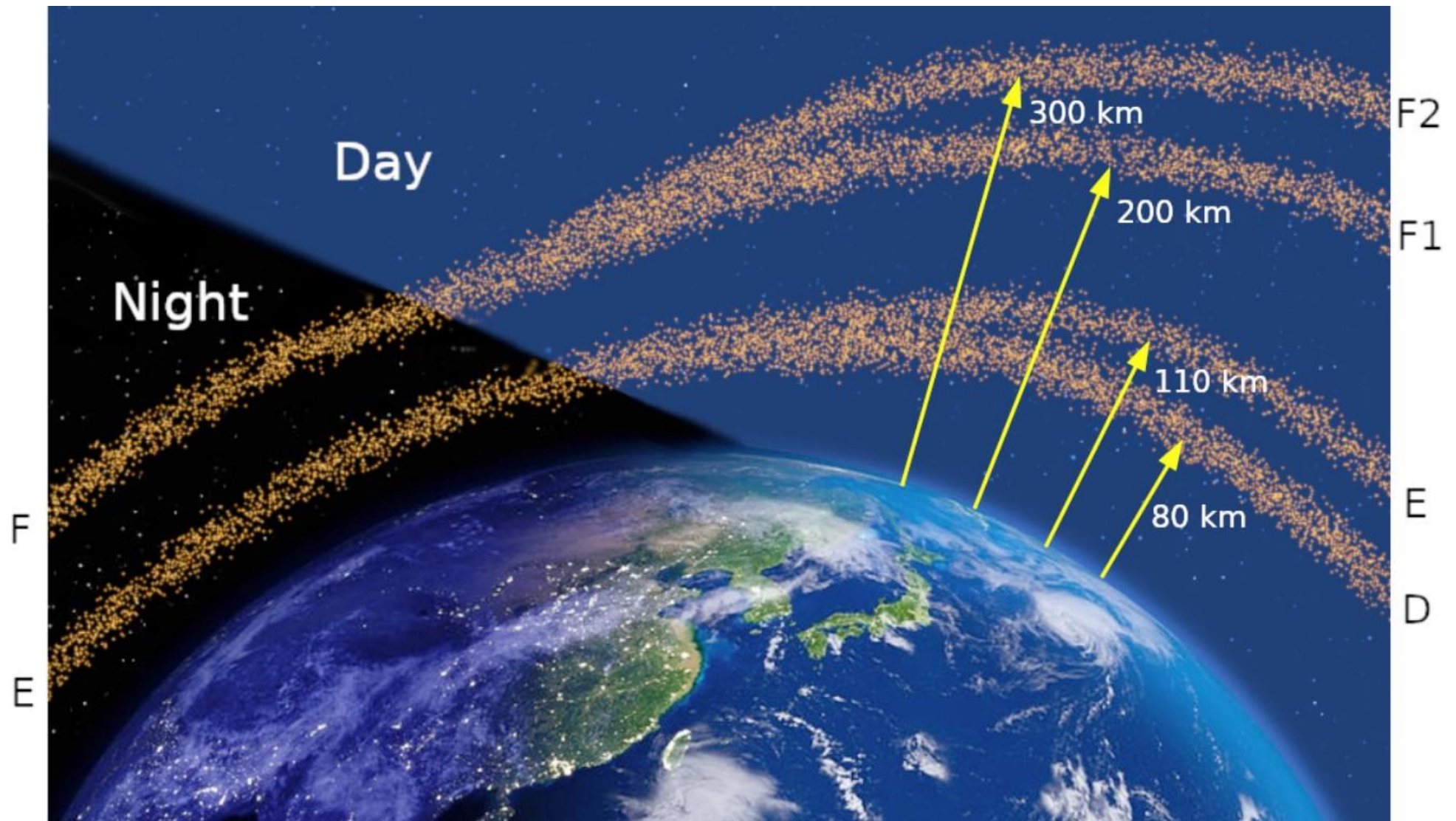
Ici, c'est la version « perdu » !

On a donc des ions positifs et des électrons (négatifs) libres en balade.

Sphère

La Terre !

En balade mais regroupés sur plusieurs couches : D, E, F1, F2, F.



Quels atomes ou groupements d'atomes ?

Principalement ceux « de l'air » de l'atmosphère.

Exemples



Qui les sépare ?

C'est le Soleil, à 150 000 000 km environ de la Terre (à 1 UA).

Plus précisément, c'est l'énergie des rayons UV envoyés par le Soleil (et parfois également les rayons X).

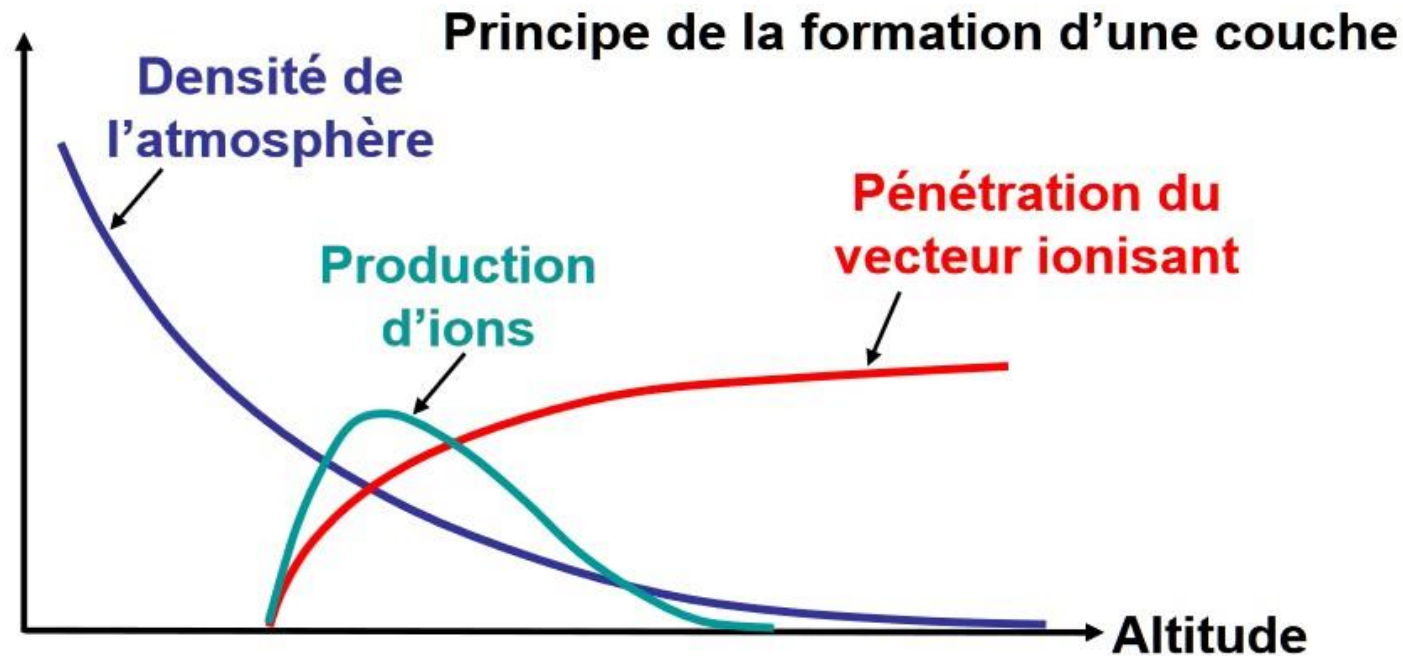
Et localement, les chutes de météores.

On a donc un mélange d'ions positifs, d'électrons (négatifs) libres, d'atomes neutres et de molécules neutres (ceux et celles qui ne se sont pas laissé faire par le Soleil !).

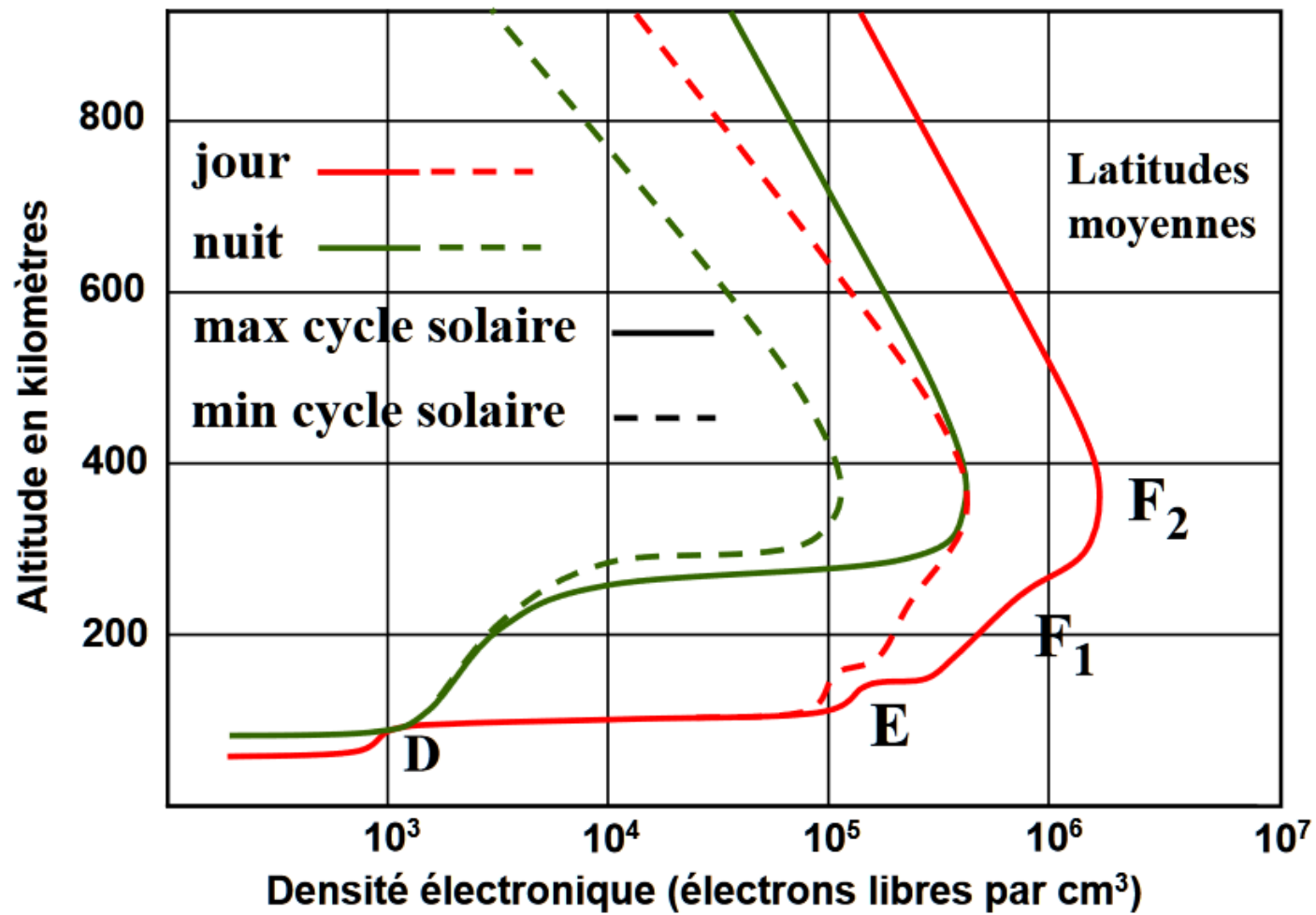
Mais au total, *l'ensemble reste statistiquement électriquement **neutre***.

Ce n'est ni un liquide, ni un solide, ni tout à fait un gaz : c'est un « **plasma** », un autre état de la matière.

Plasma organisé en couches (ou régions)



La densité de l'atmosphère diminue quand l'altitude augmente.
La pénétration du rayonnement (UV, X) augmente quand la densité de l'atmosphère diminue.
Par conséquent, il y aura une région où l'effet ionisant sera maximal.



Couche D

Altitude : 60 à 90 km.

Densité électronique : 10^3 cm^{-3} .

Apparaît avec le lever du Soleil et disparaît immédiatement après le coucher, par recombinaisons entre ions et électrons libres.

Couche E

Altitude : 90 à 120 km.

Densité électronique : 10^5 cm^{-3} .

Au cours de l'été, en moyennes latitudes, apparaissent parfois pendant quelques dizaines de minutes voire quelques heures des « nuages » plus fortement ionisés : on parle de *sporadique E* ou *Es*.

Couche F

Altitude : 120 à 800 km.

Densité électronique : 10^6 cm^{-3} , donc la plus ionisée.

La couche F se décompose pendant la journée en deux sous-couches F1 et F2. Ces deux sous-couches se recombinent en général la nuit plusieurs heures après le coucher du Soleil.

Variations de l'ionisation

L'ionisation des couches ionosphériques est fortement corrélée au flux solaire reçu par la Terre.

Variations journalières

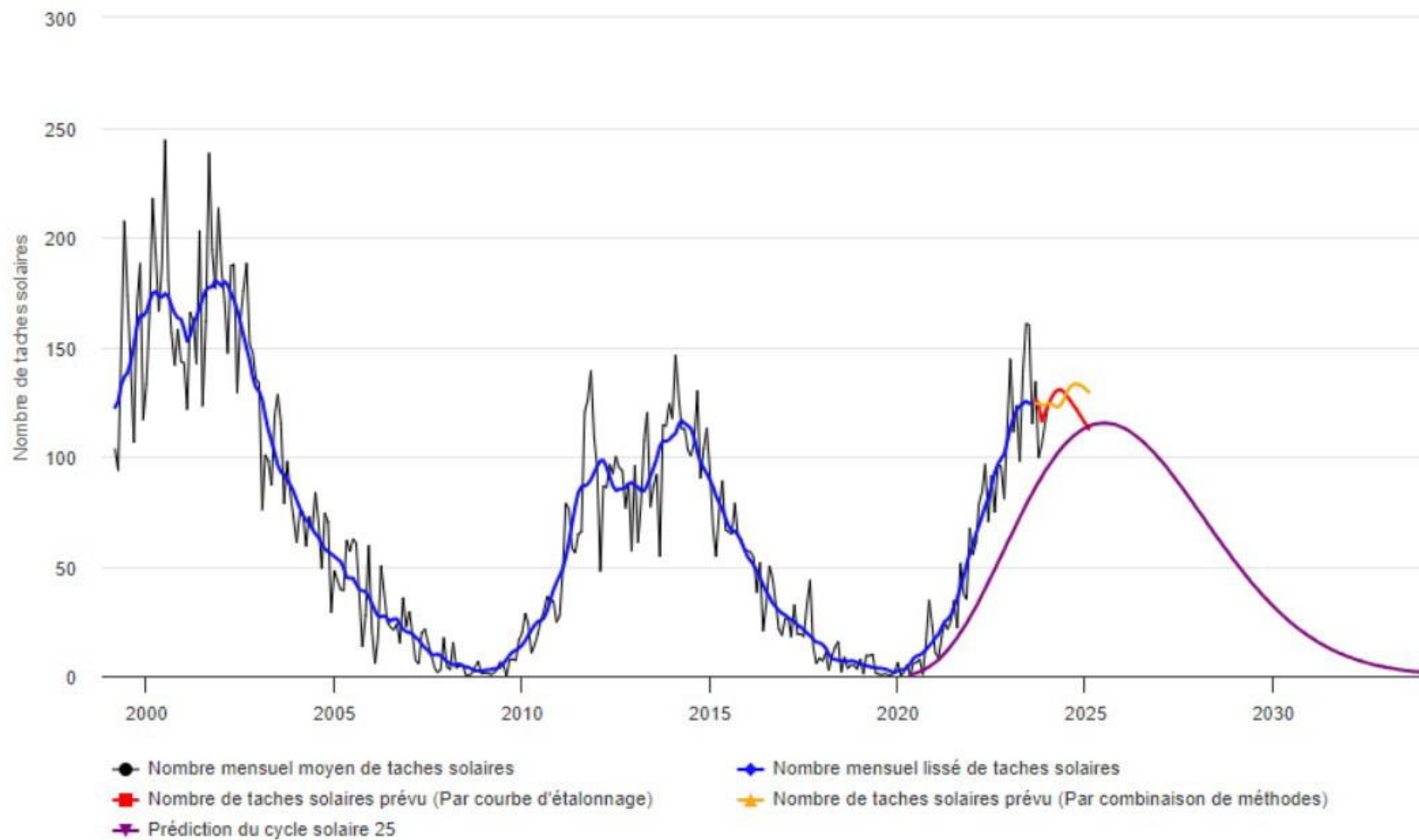
- Dues à l'angle zénithal du Soleil, l'angle entre une ligne normale à une surface horizontale sur la Terre et une ligne tracée directement vers le Soleil à partir de cette surface horizontale. En un lieu, l'ionisation est maximale au midi solaire du lieu.
- Après la disparition du Soleil (nuit), l'ionisation cesse et les recombinaisons provoquent une diminution de la densité ionique ; ces recombinaisons étant importantes pour la couche D, celle-ci disparaît rapidement pendant la nuit ;

la densité de la couche E baisse fortement, sans disparaître ;
la couche F1 n'existe plus ;
la couche F2 ne subit qu'une baisse modérée de son ionisation grâce à un échange d'ions avec la réserve que constitue la magnétosphère.
- L'aube et le crépuscule sont des instants particuliers, car les effets du Soleil se font sentir progressivement selon l'altitude.

Variations saisonnières

- Cycle de 27,3 jours (rotation du soleil sur lui-même).
- Cycle annuel.
- Cycle undécennal (tous les onze ans) des taches et trous polaires : nombre de Wolf.
- Cycle séculaire ?
- Inclinaison des axes.

Progression du cycle solaire - Nombre de taches solaires



WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels

Grosses perturbations

- PIDB (Perturbation Ionosphérique à Début Brusque).

Elle est provoquée par une éruption chromosphérique.

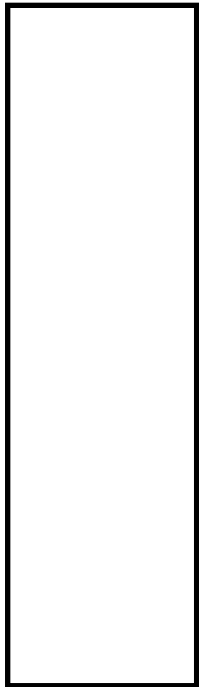
- PCA (Polar Cap Absorption), dans la calotte polaire.

Elle est le résultat de l'arrivée de protons solaires qui sont précipités dans les hautes latitudes, là où se referment les lignes de force du champ magnétique terrestre.

La fréquence plasma électronique f_{pe}

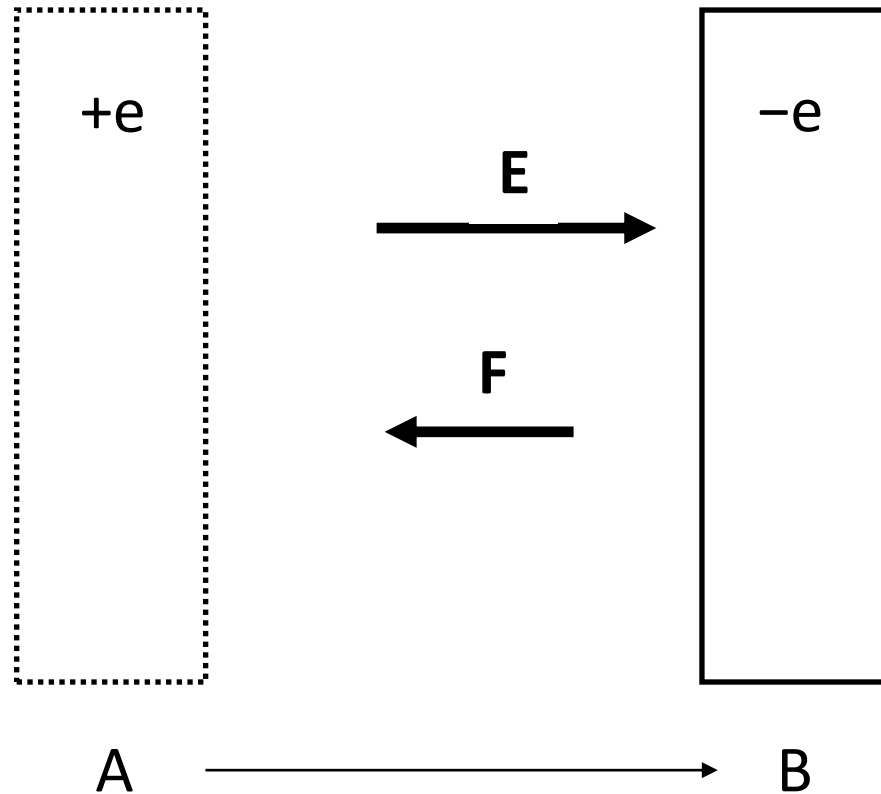
Prenons un plasma homogène composé d'ions et d'électrons libres tous immobiles et de même densité numérique. En l'absence de perturbation extérieure, la densité de charge est nulle.

Découpons une « lame » dans ce plasma :



Il y a autant d'ions que d'électrons libres.
Personne ne bouge !
L'ensemble est électriquement neutre.

Apportons une perturbation : la lame passe de la position A à la position B :



(dessin non à l'échelle !)

Les électrons libres vont se déplacer de A en B.

Le déplacement des ions est négligeable, la masse d'un proton étant pratiquement 2000 fois plus élevée que celle d'un électron.

L'absence d'un électron libre en A va y créer un « trou » positif : $+e$. La présence d'un électron supplémentaire en B va y créer une charge négative $-e$ (e = charge de l'électron).

Ce déplacement d'électrons crée un champ électrique $\mathbf{E}$ orienté de A vers B.

La loi de Maxwell-Gauss ou le théorème de Gauss nous indique que le module de ce champ est proportionnel au déplacement (pour simplifier, on néglige les collisions et les effets magnétiques...).

Le champ électrique $\mathbf{E}$ impose à nos électrons une force $\mathbf{F}$ égale à $-e\mathbf{E}$, orientée donc de B vers A. Par conséquent c'est une force de rappel vers A. Elle est également proportionnelle au déplacement puisque que $\mathbf{E}$ l'est.

Néanmoins, suite à la perturbation subie, nos électrons continuent leurs déplacements « vers la droite ».

Soumis à cette double contrainte (attirés « à gauche » et poussés « à droite »), ils vont se mettre à osciller.

La mise en équation de leur mouvement donne un résultat identique à celle d'une masse suspendue à un ressort, soumise à l'attraction terrestre et à la force de rappel dudit ressort.

Nous sommes en présence d'un *oscillateur harmonique*.

La fréquence de l'oscillation est appelée :

« fréquence plasma électronique f_{pe} »

« électronique » car on néglige ici tout effet d'origine magnétique.

$$f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m}}$$

f_{pe} = fréquence plasma électronique, en Hz

N = densité d'électrons, en m^{-3}

e = charge de l'électron = $1,6 \times 10^{-19}$ C

ε_0 = permittivité du vide, en Fm^{-1}

m = masse de l'électron = $9,1 \times 10^{-31}$ kg

$1/\varepsilon_0 = \mu_0 \times c^2 = 4\pi \times 10^{-7} \times (3 \times 10^8)^2$, en F^{-1}m

μ_0 étant la perméabilité du vide et c la vitesse de la lumière.

Finalement, on obtient la relation très simple suivante :

$$f_{pe} = 9\sqrt{N} \quad (\text{avec } f_{pe} \text{ en Hz et } N \text{ en } \text{m}^{-3})$$

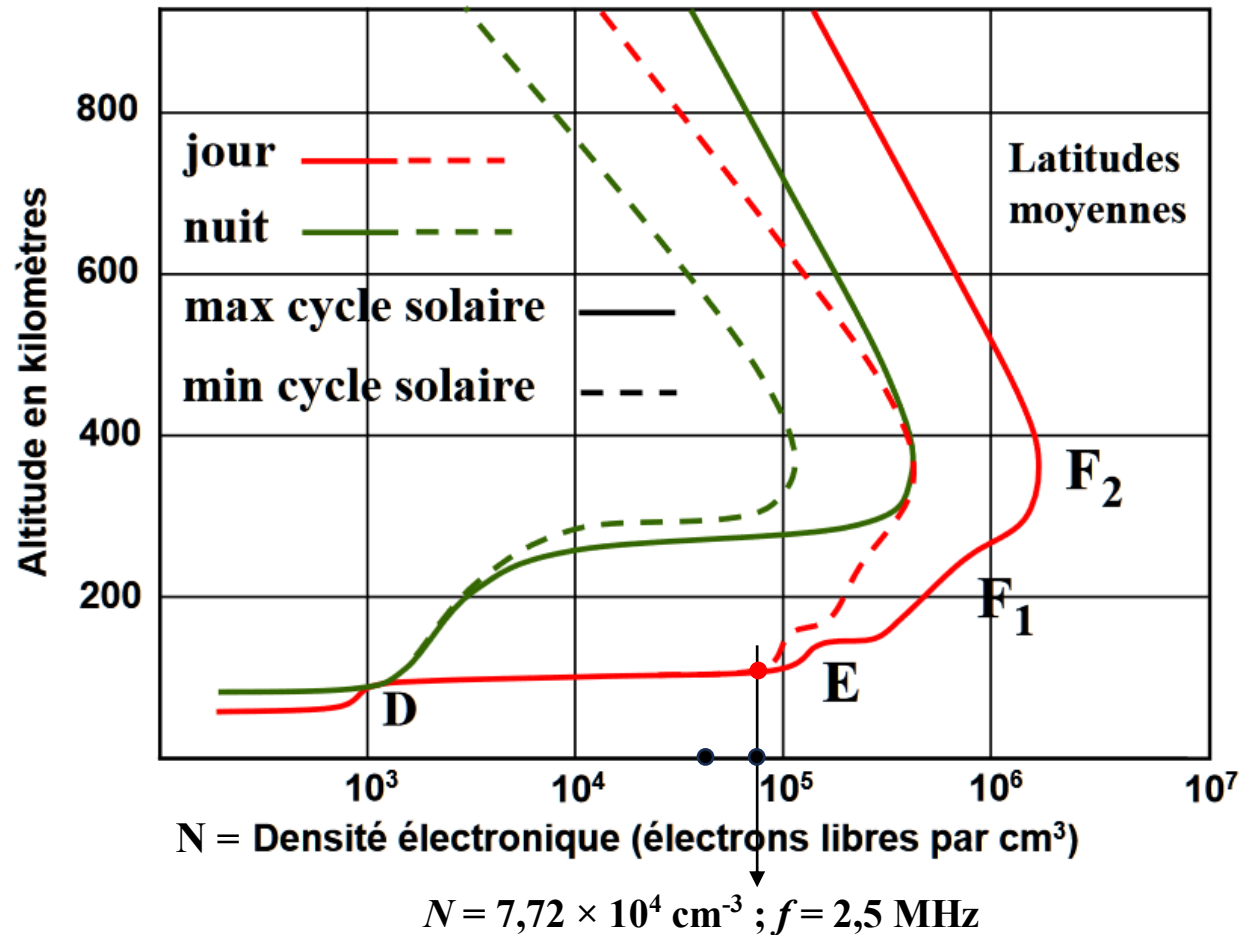
Soit :

0,28 MHz pour une densité d'électrons libres égale à **10^3** par **cm^3**
0,90 MHz pour une densité d'électrons libres égale à **10^4** par **cm^3**
2,85 MHz pour une densité d'électrons libres égale à **10^5** par **cm^3**
9,00 MHz pour une densité d'électrons libres égale à **10^6** par **cm^3**
28,46 MHz pour une densité d'électrons libres égale à **10^7** par **cm^3**

Tiens, tiens !

Émission « à la verticale »

Envoyons *à la verticale* depuis le sol terrestre vers l'espace une onde électromagnétique de fréquence f égale à 2,5 MHz.



Supposons qu'existe alors au-dessus de nous une zone ionisée de densité $7,72 \times 10^4$ électrons libres par cm^3 et que nous soyons de jour, par exemple la couche E : sa f_{pe} sera égale à 2,5 MHz.

Donc $f = f_{pe}$!

Notre onde va perturber la zone ionisée qui oscillera à sa fréquence plasma électronique propre égale à 2,5 MHz et il y aura « résonance » avec notre onde qui, elle aussi, oscille à cette même fréquence.

Les électrons libres du plasma, tel un miroir, renverront l'onde vers la Terre.

Supposons qu'existe aussi au-dessus de nous mais un peu plus bas une zone ionisée de densité 5×10^4 électrons libres par cm^3 et que nous soyons toujours de jour. Sa f_{pe} sera égale à 2 MHz. Une onde émise depuis le sol à cette fréquence sera renvoyée vers la Terre.

À la zone où la densité d'électrons libres est à son maximum (N_{max}) pour une couche donnée, par exemple la couche E, correspond la fréquence plasma :

$$f_{pe_{max}} = 9\sqrt{N_{max}} = fo_E$$

Une onde verticale de fréquence supérieure ne sera plus renvoyée vers la Terre : il n'y aura plus de réception d'écho, du moins en provenance de cette couche.

La connaissance de cette fréquence fo_E nous permet d'ailleurs de calculer cette densité maximale N_{max} .

Nous pouvons également calculer les altitudes de ces zones.

Notons $2t$ le temps en seconde entre l'émission et la réception de l'écho sur Terre.

La hauteur *virtuelle* h_v à laquelle s'est produite la réflexion vaut donc, en kilomètres :

$$h_v = c \times t = 300000 \times t.$$

En fait, $c = 299\,792\,458$ m/s...

Hauteur *virtuelle* car le calcul précédent considère que les ondes ont voyagé à la vitesse de la lumière... dans le vide, ce qui n'est pas tout à fait le cas !

En effet, dans les zones ionisées, la vitesse de l'onde dépend de N , la densité d'électrons libres...

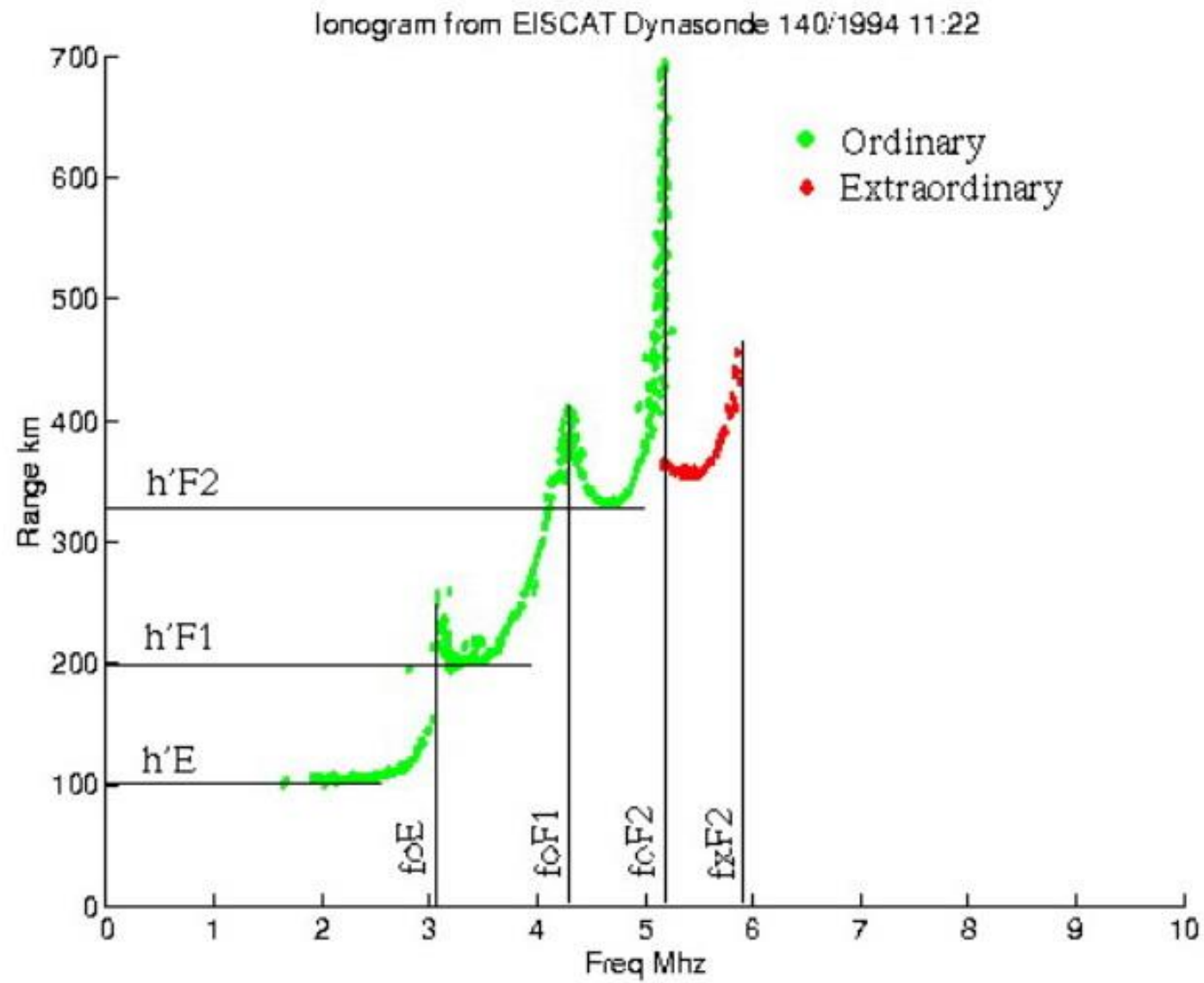
La difficulté, c'est qu'il faut calculer l'intégrale d'une fonction assez compliquée entre deux bornes dont l'une est... la hauteur *réelle* pour obtenir la hauteur *virtuelle* !

On ne dispose pas d'une « formule » donnant la hauteur réelle en fonction de la hauteur virtuelle. Il faut donc calculer la valeur de cette intégrale par valeurs successives supposées de la hauteur réelle.

Autrefois, les calculs se faisaient graphiquement. Aujourd'hui, c'est bien entendu par calcul numérique (ex. : l'outil POLAN, POLynomial ANalysis). Dans les deux cas, il s'agit d'un calcul de surfaces...

Les ionosondes

Ces équipements effectuent des émissions « à la verticale » et mesurent les temps d'écho selon les fréquences d'émission. Ce qui donne les hauteurs virtuelles puis les hauteurs réelles (par calcul) en fonction des fréquences. On réalise alors un « ionogramme ».



Dans l'exemple qui précède, nous trouvons les fréquences f_{O_E} , $f_{O_{F1}}$ et $f_{O_{F2}}$ des couches E, F1 et F2.

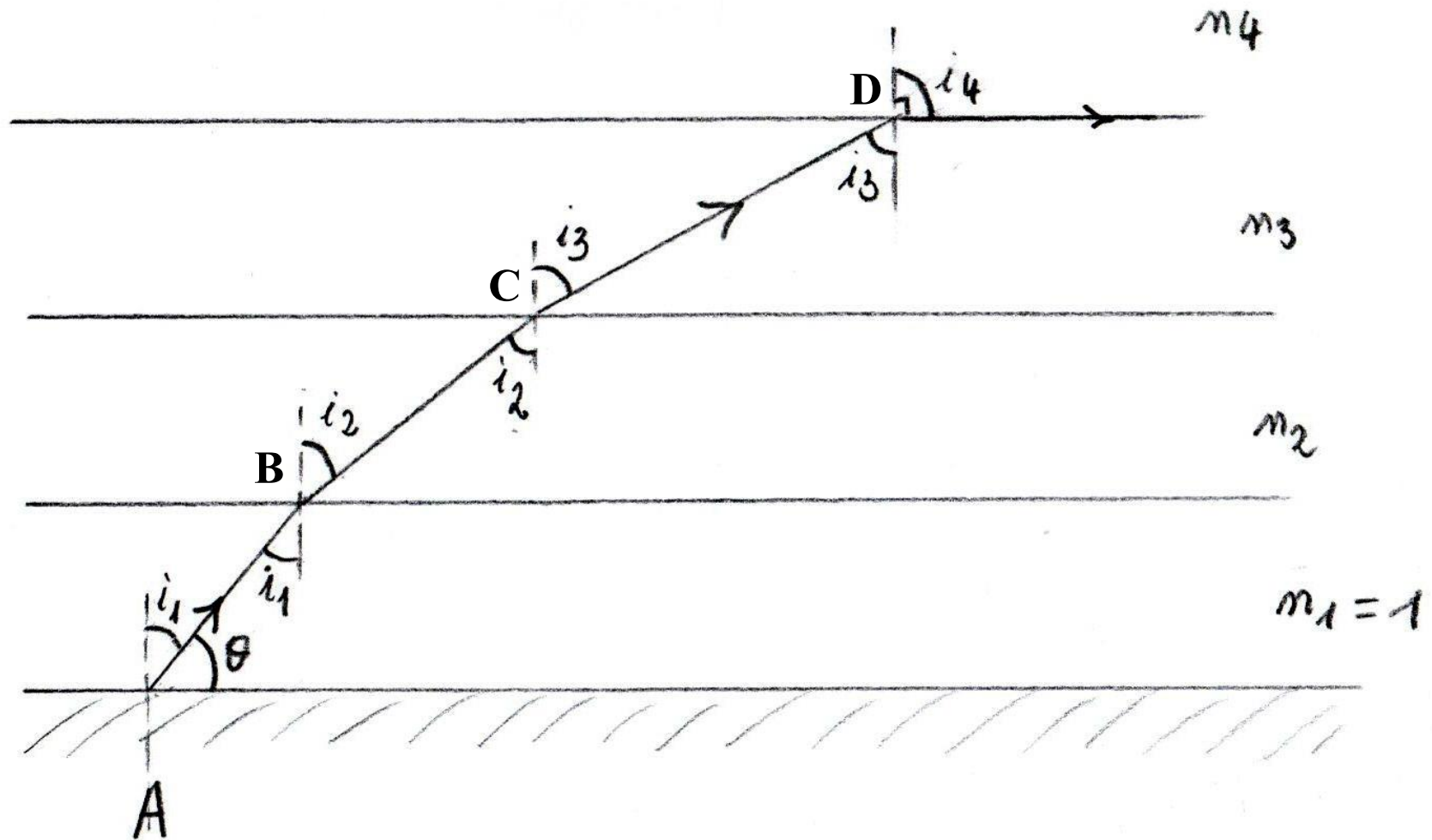
L'indice « o » indique qu'il s'agit d'une fréquence « ordinaire ».

L'indice « x » indique qu'il s'agit d'une fréquence « extraordinaire », lorsque le champ magnétique terrestre intervient.

Ionogrammes en temps réel (!) depuis Dombes (Belgique) :

<https://digisonde.oma.be/ionogif/latest.html>

Émission non à la verticale



Notre onde part de A avec une élévation égale à θ qui est donc l'angle d'élévation par rapport à l'horizontale du lieu.

Elle parcourt d'abord une zone où l'indice de réfraction vaut n_1 qui est pratiquement égal à 1.

En B, elle rencontre une zone où l'indice de réfraction vaut n_2 , avec un angle d'incidence égal à i_1 (angle par rapport à la verticale du lieu).

L'indice de réfraction n_2 n'étant pas égal à n_1 , il y a réfraction de l'onde : elle traverse la nouvelle zone sous un angle i_2 . Cette réfraction suit la loi de Descartes-Snell (comme toute réfraction) :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2)$$

Nous verrons que $n_2 < n_1$. Par conséquent $i_2 > i_1$: **l'onde « se courbe » vers la Terre !**

Idem en C :

$$n_2 \sin(i_2) = n_3 \sin(i_3)$$

Idem en D, mais là n_4 et la fréquence f de l'onde sont tels que i_4 vaut 90° . C'est le cas limite et l'onde va faire un chemin « symétrique » et revenir sur Terre !

Reprenons les trois réfractions :

$$n_1 \sin(i_1) = n_2 \sin(i_2) = n_3 \sin(i_3) = n_4 \sin(i_4)$$

Donc :

$$n_1 \sin(i_1) = n_4 \sin(i_4)$$

et

$$\sin(i_1) = n_4 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = n_4$$

Finalement, on obtient :

$$\sin(i_1) = n_4 = \cos(\theta)$$

Oui, mais comment calculer un indice de réfraction dans le plasma ionosphérique ?

Cet indice nous est fourni par l'équation d'Appleton-Hartree :

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{\frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta}{1 - X - iZ} \pm \frac{1}{1 - X - iZ} \left(\frac{1}{4}Y^4 \sin^4 \theta + Y^2 \cos^2 \theta (1 - X - iZ)^2 \right)^{1/2}}$$

Houlà !

Dans cette jolie formule, θ est un autre angle : c'est l'angle entre la direction de la propagation de l'onde et le champ magnétique terrestre.

Si on néglige les collisions : $Z = 0$.

Si on néglige le champ magnétique : $Y = 0$.

On obtient alors cette formule toute simple :

$$n^2 = 1 - X$$

Comme $X = f_{pe}^2 / f^2$, l'indice de réfraction vaut :

$$n^2 = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2}$$

Cet indice de réfraction varie donc avec la densité d'électrons libres N et la fréquence de travail f .

Reprenons notre cas limite et appelons f_c la fréquence correspondante :

$$\sin(i_1) = n_4 = \sqrt{1 - \frac{f_{pe}^2}{f_c^2}} = \sqrt{1 - \frac{81N_4}{f_c^2}} = \cos(\theta)$$

Conclusion

θ , l'angle d'élévation de l'onde au-dessus du sol, et f_c , la fréquence critique, sont liés.

Exemple

$N = 10^6$ électrons libres par cm^3 donne une f_{pe} égale à 9 MHz.

Avec une élévation de 30° soit une incidence de 60° , la fréquence critique f_c est égale à 18 MHz.

=> Au-dessus de 18 MHz, l'onde sera réfractée vers l'espace.

Si l'on voulait qu'une onde de 20 MHz soit renvoyée vers la Terre, il faudrait une incidence de 63° soit une élévation de 27° .

Enfin, on démontre très facilement la relation suivante :

$$f_c = \frac{f_{pe}}{\cos(i)} = \frac{f_{pe}}{\sin(\theta)}$$

Cette fréquence f_c est donc plus élevée que f_{pe} .

Et si $i = 0^\circ$ ($\theta = 90^\circ$) : $f_c = f_{pe}$.

Normal : on est alors à la verticale !

On voit maintenant l'importance de bien connaître les caractéristiques des couches ionisées de l'ionosphère – fréquences f_{pe} et hauteurs – pour pouvoir établir une liaison radio entre deux points sur Terre par voie ionosphérique.

Pour arriver à cette connaissance, il y a les « ionosondes » vues précédemment et les satellites dont les satellites GNSS.

En effet, la seconde génération de satellites GNSS étant "bi-bandes", c'est-à-dire émettant simultanément sur deux fréquences distinctes, et se trouvant au-dessus de l'ionosphère, nous pouvons mesurer la phase relative entre les deux signaux arrivant sur Terre et remonter à l'état de l'ionosphère, celui-ci impactant la vitesse de propagation des signaux en fonction de leur fréquence.

Un simple smartphone avec GNSS bi-fréquences et quelques logiciels adéquats permettent de calculer le TEC (Total Electron Content) et d'en déduire une description des couches de l'ionosphère.

Pour cela, il faut d'abord pouvoir accéder aux données brutes reçues.

C'est maintenant faisable avec les smartphones Android bi-fréquences et en installant l'appli *GnssLogger*. Puis on transfère les fichiers au format RINEX vers un PC.

Page suivante : exemple de fichier RINEX fourni par un smartphone Android (ici mono-fréquence !).

C : BeiDou (BDS) E : Galileo G : GPS
I : NavIC (ex-IRNSS) J : QZSS R : GLONASS

```

4.01 OBSERVATION DATA M RINEX VERSION / TYPE
GnssLogger samsung 14 20241120 145512 UTC PGM / RUN BY / DATE
Google GnssLogger MARKER NAME
Unknown MARKER NUMBER
Unknown Unknown OBSERVER / AGENCY
Unknown GnssLogger v3.1.0.3 REC # / TYPE / VERS
Unknown Unknown ANT # / TYPE
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 4 C1C L1C D1C S1C SYS / # / OBS TYPES
R 4 C1C L1C D1C S1C SYS / # / OBS TYPES
C 4 C2C L2C D2C S2C SYS / # / OBS TYPES
E 4 C1C L1C D1C S1C SYS / # / OBS TYPES
2024 11 20 14 55 12.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
8 R01 1 R03 5 R08 6 R10 -7 R11 0 R12 -1 R20 2 R21 4 GLONASS SLOT / FRQ #
samsung SM-A536B (Android 14) HW Year: 2021 HW Model: COMMENT
S.LSI,K050 COMMENT
END OF HEADER

> 2024 11 20 14 55 12.0000000 0 27
G19 22024387.53406 -6674.40606 -1134.92206 37.80006
G12 20300321.58006 68034.64906 718.06306 36.30006
G24 20376588.48105 -25858.74505 -1604.86105 34.50005
G22 25556956.28724 -5011.56924 -3555.39224 25.00024
G25 22247908.59324 362141.32124 2904.33524 24.80024
G15 24017421.88523 1154162.50923 -4240.47523 23.30023
G10 23926929.53123 1974529.36123 -1910.89923 22.20023
G23 24735155.90823 2681983.67223 -3409.19723 21.30023
G32 23501448.18623 218158.92823 2607.38023 20.10023

```

Mais revenons à notre propagation ionosphérique.

La question qui se pose est la suivante :

« Je suis à tel endroit sur la Terre et je veux joindre cet autre point, toujours sur la Terre, sans utiliser de satellites. Aujourd'hui, quelles fréquences puis-je utiliser pour maximiser mes chances de réussite et à quelles heures? ».

La réalité est bien entendu beaucoup plus complexe que le peu que j'ai exposé. Il faut tenir compte des collisions, du champ magnétique terrestre, des trajets multiples avec rebond sur la Terre, de la nature du sol (ou de la mer !), de la puissance d'émission, des qualités du récepteur, du type de modulation, etc.

C'est un peu comme la météo : ce n'est pas encore une science exacte...

Des organismes internationaux publient les données ionosphériques. D'autres les exploitent pour calculer et établir des prévisions.

PREVISIONS de la propagation ionosphérique

S. Canivenc
F 8 S H

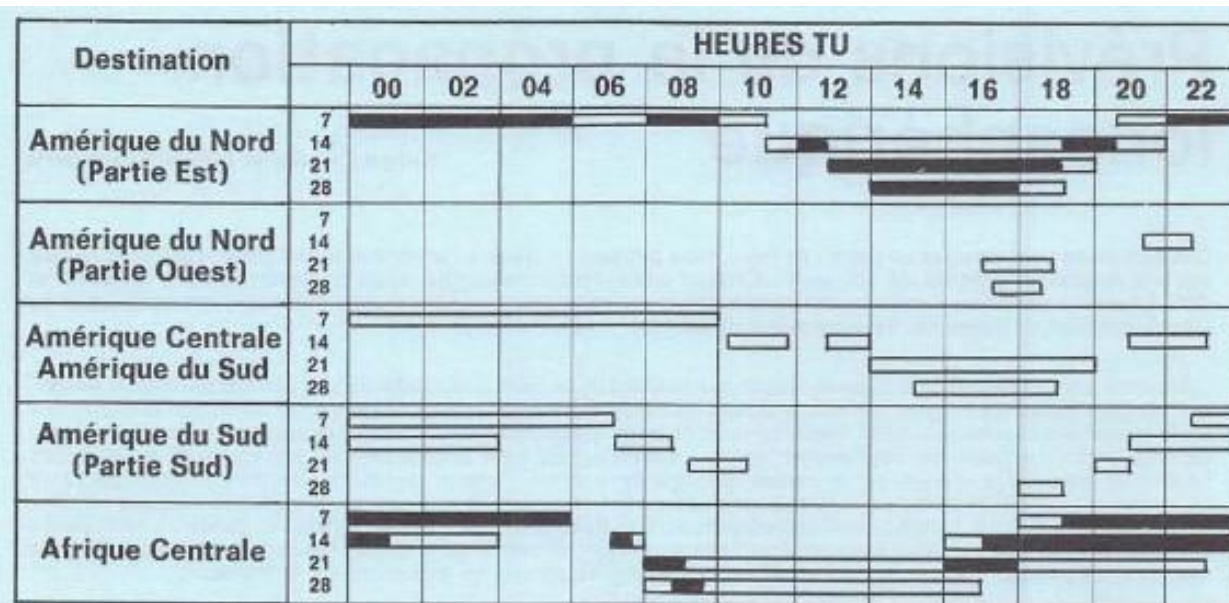
valables pour le mois DE MAI 1964

Ces prévisions sont valables au départ de Paris, mais peuvent convenir, en général, à l'ensemble de la France métropolitaine ; elles sont basées sur une puissance rayonnée de 100 watts (CW) par un aérien demi-onde (angle de départ compris entre 0° et 40°). Elles sont effectuées d'après les cartes publiées mensuellement par le Central Radio Propagation Laboratory du National Bureau of Standards (U.S.A.). Moyenne glissante 17 centrée sur mai 1964.

Les heures indiquées sont des heures TU.

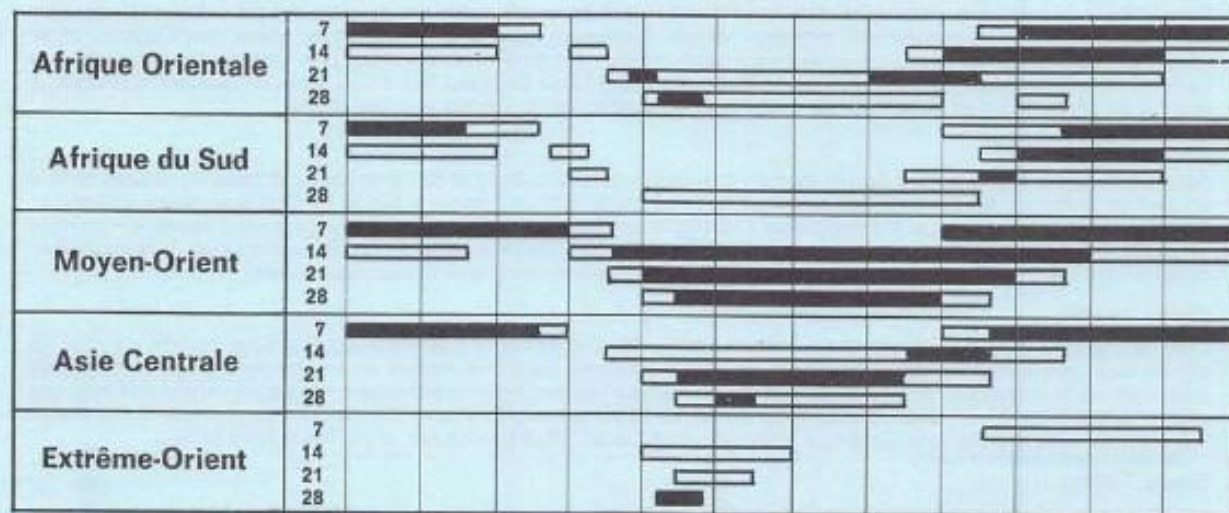
Les chiffres entre parenthèses indiquent le pourcentage de jours du mois où la propagation est escomptée. La correspondance est la suivante : 1 = 10 % ; 2 = 25 % ; 3 = 50 % ; 4 = 75 % ; 5 = 90 %.

DESTINATION	7 MHz	14 MHz	21 MHz	28 MHz
AFRIQUE				
Ouest Africain, Nigeria, Togo, Cameroun, Ghana, Sierra Leone, Guinées Espagnole et Portugaise.	0000-0300 (5) 2300-2400 (5)	0000-0100 (1-2) 0330-0400 (1-2) 0400-0430 (3) 0430-0530 (4) 0530-2100 (5) 2100-2300 (4) 2300-2400 (3)	0900-1400 (1-2) 1400-1500 (3) 1500-1930 (4) 1930-2000 (3) 2000-2030 (1-2)	
Afrique Centrale et Orientale, République du Congo,	0000-0400 (5) 2200-2400 (5)	0000-0030 (3) 0030-0100 (1-2) 0200-0300 (1-2)	0500-0700 (1-2) 0700-0900 (3) 0900-1700 (4)	1300-1400 (1-2) 1400-1500 (3) 1530-1700 (1-2)



Toujours Serge
Canivenc, F8SH

Radio-REF
janvier 1980



□ 30 % ■ 90 % ● Arc Majeur

De nos jours, il y a de nombreux sites modernes fournissant d'abondantes informations.

Par exemple :

<https://dx.qsl.net/>

<https://prop.kc2g.com/>

<https://www.dxzone.com/cgi-bin/dir/jump.cgi?ID=19368>

<https://www.voacap.com/hf/>

<https://www.f5jni.com/propagation.html>

<https://hfpropagation.com/>

<https://www.arrl.org/news/the-k7ra-solar-update-750>

Je vous remercie de votre attention !