

## RECOMMANDATION UIT-R P.532-1\*

**EFFETS IONOSPHERIQUES ET PROBLÈMES D'EXPLOITATION LIÉS À LA MODIFICATION ARTIFICIELLE DE L'IONOSPHERE ET DU CANAL RADIOÉLECTRIQUE**

(1978-1992)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) qu'une modification artificielle de l'ionosphère et du canal radioélectrique peut être provoquée par des puissances radioélectriques provenant d'émetteurs terrestres (ou spatiaux);
- b) qu'il peut se produire une modification de l'ionosphère, notamment dans la région F, du fait de l'existence d'une puissance surfacique élevée dans la gamme de fréquences de 2 à 12 MHz environ, surtout aux grands angles de rayonnement et aux fréquences juste inférieures aux MUF de référence de la couche au voisinage de l'incidence verticale, et que de telles modifications peuvent permettre la propagation à des fréquences allant jusqu'à 400 MHz environ et sur des distances allant jusqu'à 4 000 km;
- c) qu'on sait depuis longtemps qu'il peut se produire un phénomène de transmodulation en ondes kilométriques et hectométriques lorsque des émissions de puissance surfacique élevée traversent l'ionosphère;
- d) que, si les administrations ne mettent pas un frein à la croissance des puissances d'émission, l'ionosphère pourra se trouver défavorablement affectée, avec ce résultat que tant les services faisant appel à l'ionosphère comme milieu de propagation que les services en ondes métriques par onde de sol risquent de subir une dégradation à la réception;
- e) qu'il est possible de modifier l'ionosphère par l'injection de réactifs chimiques, de constituants photo-ionisables, de particules énergétiques et autres éléments, lesquels affecteront la distribution naturelle des composants du milieu et ses caractéristiques;
- f) que des modifications involontaires ou fortuites peuvent être provoquées par des processus réactifs liés à des lancements de fusées;
- g) qu'une modification artificielle du milieu peut induire de nouveaux modes transitoires de propagation entraînant une augmentation (ou une diminution) éventuelle de la zone de service par rapport à celle évaluée au moyen des méthodes classiques de prévision de la propagation des ondes radioélectriques,

*recommande*

que l'on tienne compte des points suivants pour la planification et l'exploitation de systèmes de radiocommunication utilisant l'ionosphère:

1. les renseignements contenus dans l'Annexe 1 devraient être utilisés pour déterminer les modifications de l'ionosphère provoquées par des émissions d'ondes radioélectriques de grande puissance propagées par l'ionosphère;
2. les formules données à l'Annexe 2 devraient être utilisées pour déterminer les effets de la modification de l'ionosphère sur les transmissions d'ondes radioélectriques (transmodulation);
3. les renseignements contenus dans l'Annexe 3 devraient être utilisés pour déterminer les modifications de l'ionosphère provoquées par des émissions transionosphériques d'ondes radioélectriques;
4. les renseignements contenus dans l'Annexe 4 devraient être utilisés pour déterminer les modifications de l'ionosphère résultant de l'injection de réactifs chimiques,

*recommande en outre*

5. que l'on veuille à réduire les puissances surfaciques excessives créées, aux altitudes de l'ionosphère, à des fréquences allant jusqu'à 12 MHz environ, et que l'on prenne des mesures à cet effet;
6. que, pour les systèmes d'exploitation de radiocommunication, toute modification intentionnelle de l'ionosphère qui aurait des effets nuisibles sur les services d'autres usagers soit découragée.

---

\* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2000 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

## Modifications de l'ionosphère provoquées par des émissions radioélectriques de grande puissance, à partir du sol

### 1. Introduction

La modification du plasma ionosphérique par des émissions radioélectriques de grande puissance se décompose en un échauffement ionosphérique ohmique, qui est un processus non linéaire mais classique, et en la génération d'instabilités paramétriques par des processus non linéaires d'interaction d'ondes.

La plupart des expériences de modification de l'ionosphère ont été faites en ondes décamétriques, et elles concernent le plus souvent la production de changements dans l'ionosphère supérieure (150-400 km) au moyen d'émetteurs construits à cet effet, fonctionnant à des fréquences proches des fréquences critiques de la région F. Si la fréquence modificatrice est inférieure à la fréquence critique, la modification est dite «sur-dense»; en revanche, si elle est supérieure à la fréquence critique, la modification est dite «sous-dense». L'ionosphère peut être sensiblement modifiée par une émission radioélectrique oblique de grande puissance à des fréquences considérablement supérieures à la fréquence critique de la région F de l'ionosphère.

Des émetteurs fonctionnant à des fréquences des bandes s'étendant des ondes myriamétriques aux ondes décimétriques provoquent des modifications dans toutes les régions de l'ionosphère. La région ainsi modifiée peut avoir un effet important sur les signaux de radiocommunication qui la traversent.

### 2. Théorie de l'échauffement ohmique

Des travaux théoriques ont suggéré que l'échauffement du plasma par dissipation ohmique devrait produire des changements à grande échelle de la température électronique et par suite de la densité électronique et d'autres paramètres. Beaucoup de phénomènes non linéaires tiennent au fait que la fréquence de collision dépend de la température électronique.

La théorie simplifiée montre comment l'échauffement ohmique peut se produire. Une onde de champ électrique  $E$  et de fréquence angulaire  $\omega$  est considérée comme traversant une couche de plasma ionosphérique avec une fréquence de collision effective  $\nu$  entre électrons et ions ou neutres. Ce champ agit sur les électrons, de masse  $m$  et de charge  $e$ , et les accélère. Mais les collisions les retardent et de l'énergie est extraite de l'onde, ce qui a pour résultat une augmentation de la température électronique. Bien que les électrons deviennent plus chauds, ils ne transfèrent qu'une petite partie de leur énergie excédentaire aux ions ou aux neutres durant les collisions, car la masse de ces électrons est beaucoup plus faible que celle des ions ou des neutres. Dans la région F, la fréquence de collision électron-ion est  $\leq 10^3/s$ , la fraction de la perte d'énergie par collision est  $\leq 10^{-4}$  et la constante de temps pour la perte d'énergie est donc environ de 10 s. Ce faible taux de perte rend possible un échauffement appréciable des électrons. L'échauffement de la région E est moins facile. Ici, la fréquence de collision électron-neutre est environ  $2 \times 10^5/s$ , la perte d'énergie fractionnelle par collision est  $5 \times 10^{-3}$  et par conséquent, la constante de temps pour la perte d'énergie est seulement environ 1 ms. Une forte absorption de l'onde radioélectrique incidente se produit dans la région où la fréquence du plasma électronique est proche de la fréquence radioélectrique. Ceci est dû au fait que l'onde est ralentie près de cette résonance naturelle, et que les électrons ont davantage de chances de heurter les particules lourdes.

Le champ électrique nécessaire pour produire une forte perturbation thermique de la température du plasma ionosphérique et, pour  $\omega \gg \nu$ , varie d'environ  $3 \times 10^{-4} f$  (mV/m) dans les régions D et E jusqu'à environ  $10^{-4} f$  (mV/m) dans la région F;  $f$  est la fréquence de l'onde perturbatrice (Hz). Ces champs impliquent des puissances isotropes rayonnées équivalentes d'environ 100 MW.

### 3. Théorie de l'instabilité paramétrique

L'instabilité paramétrique onde-plasma implique généralement une interaction à trois ondes. Dans le contexte d'une modification de l'ionosphère, une onde électromagnétique décamétrique de grande puissance fournit le champ moteur initial dont l'énergie cascade en une onde de plasma électronique électrostatique de fréquence inférieure et en une onde acoustique ionique de fréquence inférieure.

Le mécanisme non linéaire responsable de la plupart des instabilités paramétriques dans l'ionosphère est la force de pression thermique. Les perturbations de la température des électrons dues à l'échauffement par l'onde introduisent une force de pression thermique supplémentaire dans l'équation du mouvement des électrons, et donnent naissance à des irrégularités ionosphériques alignées sur les lignes de force du champ.

#### 4. Effets de modification

Certains effets importants de modification causés par des ondes radioélectriques décimétriques (et d'autres fréquences) chauffantes sont décrits ci-après.

Aux altitudes inférieures à 200 km, les électrons heurtent surtout des neutres, la fréquence de collision augmente avec la température et les ondes radioélectriques fortes sont absorbées plus que les faibles. Au-dessus de 200 km, là où les électrons heurtent surtout des ions, la fréquence de collision diminue avec la température et les ondes radioélectriques fortes sont absorbées moins que les faibles.

Des perturbations de la densité électronique se produisent si l'échauffement est maintenu pendant un temps suffisamment long. Une augmentation de la densité électronique se produit à des altitudes inférieures à environ 200 km. Aux altitudes supérieures, dans la région F, les températures électroniques élevées correspondent à une augmentation de pression qui provoque un écoulement du plasma hors de la région chauffée le long des lignes de force du champ géomagnétique. L'énergie électromagnétique est alors concentrée dans la région de densité électronique réduite, ce qui conduit à un nouvel échauffement et à une nouvelle expansion. Il en résulte des irrégularités à grande échelle de la densité électronique dans la région F, alignées le long des lignes de force du champ géomagnétique et avec des dimensions transverses d'environ 1 km. Un autre résultat de ce processus d'autoconcentration thermique est la production d'un F-diffus artificiel.

L'un des effets inattendus des premières expériences de modification de l'ionosphère par des ondes décimétriques a été la production d'irrégularités de petite échelle (environ 1 m) alignées sur les lignes de force du champ, qui rétrodiffusent les ondes métriques et décimétriques. Ces irrégularités sont probablement générées environ 200 m en dessous de la hauteur de réflexion de l'onde décimétrique chauffante, là où son effet d'échauffement est le plus grand.

Pour des puissances supérieures à un certain seuil, on a observé que le signal reçu diminue lorsque la puissance apparente rayonnée (p.a.r.) augmente. On a constaté aussi que dans le champ d'une onde de grande puissance à incidence oblique, de fréquence voisine de la MUF de la couche F2, une modification se produisait dans l'ionosphère normale, modification qui peut avoir un effet considérable sur les caractéristiques des signaux radioélectriques qui traversent cette perturbation.

Non seulement les ondes décimétriques de grande puissance peuvent provoquer des modifications de la haute ionosphère, mais encore ces mêmes ondes, émises sous forme d'impulsions, peuvent engendrer des ondes myriamétriques et plus longues encore du fait de modifications produites dans la basse ionosphère.

Le fait que des ondes myriamétriques et plus longues avaient été apparemment engendrées par des émissions de radiodiffusion à ondes hectométriques et kilométriques a été mis en évidence aux latitudes élevées. Ces signaux peuvent échauffer la région aurorale D ou E, en modulant l'électrojet auroral qui émet à son tour des signaux de longueur d'onde myriamétrique ou supérieure. Une injection commandée de signaux en ondes myriamétriques par des émetteurs au sol provoque une précipitation d'électrons depuis les ceintures de rayonnement, qui augmente l'ionisation aux altitudes de l'ionosphère. Les précipitations d'électrons qui se produisent naturellement ont une intensité qui varie dans une gamme beaucoup plus grande que celle des précipitations provoquées artificiellement que l'on a observées.

#### 5. Diffusion de signaux radioélectriques par des irrégularités induites artificiellement

Avec une p.i.r.e. de 0,5 MW ou plus, des irrégularités à grande échelle et à petite échelle de la densité électronique, alignées le long des lignes de force du champ magnétique terrestre se produisent quelques secondes après la mise en fonctionnement de l'émetteur, à la suite de l'échauffement ohmique et de l'apparition de certaines instabilités paramétriques et des ondes de plasma. Pour les signaux radioélectriques traversant la région perturbée, la conséquence est que, sur les trajets dont les deux terminaux sont au sol ainsi que sur les trajets Terre-espace, la profondeur et le taux des évanouissements augmentent. De plus, en raison des irrégularités alignées le long des lignes de force du champ magnétique, il se produit aux altitudes comprises entre 250 et 300 km dans l'ionosphère, un effet réflecteur comparable à celui d'un radar de grande section transversale ( $\approx 10^5$  à  $10^9$  m<sup>2</sup>). Ces effets se manifestent lorsque la fréquence de l'émetteur qui produit la chaleur est inférieure à la fréquence critique de la région F ( $\leq 12$  MHz), mais coïncide avec la fréquence de plasma à une certaine altitude dans l'ionosphère.

Les propriétés de diffusion des irrégularités alignées le long des lignes de force du champ magnétique ont été utilisées pour assurer diverses transmissions – téléphoniques, télex, fac-similé, impulsions – entre des terminaux au sol séparés par des milliers de kilomètres sur des fréquences allant des ondes décamétriques aux ondes décimétriques qui, sans cela, n'auraient pu être employées sur ces trajets. Dans la région F, la diffusion est assez nettement sensible à la directivité. Aussi les points où les signaux sont reçus sur la Terre grâce à ce mécanisme de diffusion dépendent-ils en partie de la position géomagnétique et de la hauteur de la région de l'ionosphère qui a été modifiée. En général, les signaux peuvent être reçus dans une zone située du côté équatorial de la région modifiée, zone très étendue dans la direction est-ouest et pouvant atteindre environ 4 000 km, alors qu'elle n'est que de 200 à 500 km dans la direction nord-sud.

On peut également créer une région à forte diffusion à une altitude voisine de 110 km dans la région E lorsque l'émetteur produisant l'échauffement fonctionne à des fréquences inférieures à la fréquence critique de la région E. Les observations concernant la diffusion dans la région E pendant le phénomène de modification sont plus rares, mais néanmoins elles tendent à montrer que la diffusion est moins sensible à la directivité que dans la région F et qu'ainsi les zones de réception des signaux au sol sont plus étendues dans la direction nord-sud que dans le cas de la diffusion dans la région F.

D'après les résultats des études mentionnées ci-dessus, il semble qu'il y ait un risque d'augmentation des brouillages due aux signaux diffusés par des régions modifiées intentionnellement ou non, dans une gamme allant des ondes décamétriques aux ondes décimétriques. On peut aussi prévoir que dans certaines conditions, des brouillages pourront se produire entre stations terriennes et satellites; car, la diffusion intervient dans toutes les directions définies par le cône de diffusion et ainsi, l'énergie d'un émetteur installé au sol pourra être diffusée dans l'espace et vice versa, par les irrégularités de la région modifiée.

## ANNEXE 2

### Transmodulation ionosphérique

#### 1. Introduction

La propagation d'ondes modulées de grande puissance dans un plasma provoque dans celui-ci des perturbations qui font varier la température des électrons, et ces variations, à leur tour, affectent la fréquence de collision, les caractères chimiques des ions et la densité électronique et, par conséquent, la conductivité et la permittivité du milieu. Ces modifications produites dans le milieu par une seule onde radioélectrique intense modulée ont pour résultat la superposition de la modulation de cette onde sur la porteuse d'une autre onde se propageant dans la même région. Vu le grand nombre d'émissions en ondes décamétriques, hectométriques et kilométriques pour lesquelles la propagation s'effectue à travers les régions D et E, cette interaction entre les ondes, ou transmodulation ionosphérique, est difficile à distinguer du brouillage dans le même canal, et encore plus difficile à mesurer.

Des mesures effectuées dans les bandes des ondes hectométriques et kilométriques à des latitudes moyennes font apparaître des taux de transmodulation inférieurs à 7%. Les mesures font l'objet de la Recommandation UIT-R BS.498.

#### 2. La théorie simple de la transmodulation ionosphérique

À l'attention des ingénieurs des télécommunications qui s'intéressent à l'évaluation du brouillage produit par la transmodulation, les caractéristiques principales du phénomène sont présentées ci-dessous.

##### 2.1 Le processus de collision des électrons

Les électrons libres, qui sont essentiellement à l'origine de la réaction de l'ionosphère sur les ondes radioélectriques, sont situés dans la région D et la basse région E de l'ionosphère et peuvent être considérés comme un constituant gazeux, statistiquement en équilibre thermique avec les autres molécules beaucoup plus nombreuses de l'atmosphère. On peut considérer que chaque électron a une énergie thermique  $Q_0$  et une vitesse  $V_0$  qui sont reliées à la température  $\theta_0$  de l'atmosphère par l'équation des gaz:

$$Q_0 = \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{3}{2} k \theta_0 \quad (1)$$

dans laquelle  $m$  est la masse de l'électron ( $9,1 \times 10^{-31}$  kg),  $k$  la constante de Boltzmann ( $1,37 \times 10^{-23}$  joules par Kelvin),  $\theta_0$  étant exprimé en Kelvins,  $Q_0$  et  $V_0$  en unités du système MKS.

Si, au point considéré, l'équilibre est perturbé par une augmentation de la vitesse des électrons, qui devient  $V$ , les grandeurs  $Q_0$  et  $\theta_0$  deviennent respectivement  $Q$  et  $\theta$  conformément à l'équation (1), la température de l'atmosphère ambiante restant inchangée. Il n'existe pas de preuve formelle permettant d'affirmer que la fréquence de collision des électrons dépend de  $V$  dans la basse région de l'ionosphère, mais l'on supposera ici que le libre parcours moyen des électrons est indépendant de leur vitesse, de telle sorte que la fréquence de collision  $\nu$  augmente à partir de sa valeur à l'état d'équilibre  $\nu_0$  proportionnellement à  $V$ . On obtient donc:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\nu^2}{\nu_0^2} = \frac{\theta}{\theta_0} \quad (2)$$

A chaque collision, une certaine quantité d'énergie est transférée dans l'atmosphère ambiante, cette quantité étant proportionnelle à l'excédent d'énergie et égale à  $G(Q - Q_0)$ ,  $G$  étant une constante dont, d'après des expériences faites en laboratoire sur l'azote, on a pu fixer la valeur à environ  $10^{-3}$ . L'équilibre est perturbé par le passage d'une onde radioélectrique et, si l'on désigne par  $Q_e$  l'énergie extraite de l'onde par un électron lors d'une collision à l'instant  $t$ , l'équation représentant l'énergie de l'électron est la suivante:

$$\frac{dQ}{dt} = \nu Q_e - \nu G(Q - Q_0)$$

ce qui, d'après l'équation (2), peut s'exprimer comme suit:

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{Q_e \nu_0^2}{2Q_0} - \frac{G}{2}(\nu^2 - \nu_0^2) \quad (3)$$

Si  $Q_e$  avait une valeur constante,  $\nu$  prendrait finalement une valeur  $\bar{\nu}$ , donnée par l'expression suivante:

$$\bar{\nu} = \nu_0 \left( 1 + \frac{Q_e}{GQ_0} \right)^{1/2} \quad (4)$$

sauf peut-être lorsque le champ est très élevé,  $Q_e \ll GQ_0$  et, donc  $\nu - \nu_0 \ll \nu_0$ .

Par conséquent, lorsque l'énergie  $Q_e$  est extraite,  $\nu - \nu_0$  décroît exponentiellement jusqu'à zéro avec une constante de temps  $1/G\nu_0$ . Dans la région de l'ionosphère considérée,  $\nu_0$  est de l'ordre de  $10^6$  collisions par seconde, de telle sorte que cette constante de temps est d'environ  $10^{-3}$  secondes, ce qui correspond à une fréquence de 1 000 Hz. Il s'ensuit que la fréquence de collision ne peut pas suivre les variations qui se produisent dans l'onde aux fréquences radioélectriques.

Etant donné toutefois que  $Q_e$  est proportionnel à la densité de puissance de l'onde et, par conséquent, au carré du champ électrique  $E$ , la fréquence de collision peut suivre la valeur efficace du champ. Si cette valeur efficace est modulée en amplitude par une fréquence acoustique, la fréquence de collision pourra dans une certaine mesure suivre la modulation pour des fréquences ne dépassant guère 500 Hz.

## 2.2 Le processus de modulation

En général, la modulation appliquée à l'onde radioélectrique contient de nombreuses fréquences acoustiques mais, pour évaluer le taux de transmodulation, il suffit de prendre une seule fréquence  $\omega/2\pi$  et d'étudier seulement la composante de cette fréquence dans le carré du champ. La valeur efficace du champ radioélectrique s'exprime donc comme suit:

$$E = E_0 (1 + M \cos \omega t) \quad (5)$$

on prendra, pour le carré de cette valeur:

$$E^2 = E_0^2 \left( 1 + \frac{M^2}{2} \right) + E_0^2 2M \cos \omega t \quad (6)$$

où  $M = 1$  pour un taux de modulation de 100%.

La valeur moyenne de  $E^2$  est donc nettement supérieure à  $E_0^2$ , et c'est cette valeur accrue qui détermine la moyenne de  $v$  dans l'équation (4), cependant que  $v$  est de la forme:

$$v = \bar{v} (1 + M_v) \quad (7)$$

où  $M_v$  est la modulation déterminée d'après le terme de modulation de l'équation (6).

Si l'on exprime  $Q_e$  sous la forme:

$$Q_e = C E^2 \quad (8)$$

on obtiendra la constante de proportionnalité  $C$  en tenant compte de l'affaiblissement de l'onde radioélectrique dû aux collisions électroniques lors de sa traversée de l'ionosphère et en prenant  $v_0 M_v$  comme composante de la modulation de  $v$  dans l'équation (7); l'équation de modulation déduite des expressions (3), (6) et (8) est alors la suivante:

$$v_0 \frac{dM_v}{dt} = \frac{v_0^2 C E_0^2 2M \cos \omega t}{2 Q_0} - \frac{G}{2} 2v_0 (v_0 M_v)$$

ou

$$\frac{dM_v}{dt} + G v_0 M_v = \frac{v_0 C E_0^2 M \cos \omega t}{Q_0}$$

par conséquent:

$$|M_v| = \frac{C E_0^2 M}{Q_0 G \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{G v_0} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (9)$$

Le dénominateur montre comment la réponse diminue aux fréquences acoustiques élevées.

### 2.3 Le processus d'absorption

Lorsque l'onde radioélectrique traverse l'ionosphère, la perte correspondant à l'énergie extraite par les électrons au cours des collisions lui fait subir un affaiblissement exponentiel correspondant à un facteur de réduction de l'amplitude,  $\exp(-\int \alpha ds)$ , l'intégrale étant calculée sur le trajet de transmission et  $\alpha$  étant un coefficient d'absorption. Si l'on considère l'absorption de l'onde qui traverse une couche mince ayant une section transversale d'aire unité, on démontre que l'énergie  $Q_e$  extraite par chaque électron lors d'une collision a pour expression:

$$Q_e = \frac{2\alpha\mu E^2}{Nv Z_0} \quad (10)$$

$\mu$  étant la partie réelle de l'indice de réfraction de l'ionosphère selon l'équation d'Appleton-Hartree,  $N$  la densité électronique (nombre d'électrons par  $m^3$ ) et  $Z_0$  l'impédance de l'espace libre, le champ  $E$  étant exprimé en V/m.

Etant donné que la fréquence radioélectrique peut être voisine de la fréquence gyromagnétique  $f_H$ , il est important d'inclure l'effet du champ magnétique terrestre en considérant le cas où cet effet est le plus important, c'est-à-dire lorsque la propagation se fait dans la direction du champ. On sait alors que l'expression de  $\alpha$  est:

$$\alpha = \frac{Ne^2 Z_0 v}{2\mu m [4\pi^2 (f \pm f_H)^2 + v^2]} \quad (11)$$

$e$  étant la charge de l'électron ( $1,60 \times 10^{-19}$  coulomb),  $f$  la fréquence radioélectrique en Hz, les signes + et - correspondant respectivement à l'onde ordinaire et à l'onde extraordinaire.

Compte tenu des expressions (8), (10) et (11), on a:

$$C = \frac{e^2}{m [4\pi^2 (f \pm f_H)^2 + v^2]} \quad (12)$$

Pour cette évaluation de la transmodulation, on peut négliger le terme  $v^2$  du dénominateur si, par exemple,  $4\pi^2 (f \pm f_H)^2 > 10v^2$ , ou  $(f \pm f_H) > v/2$ . Aux fréquences des ondes décamétriques et hectométriques, ce critère s'applique assez bien, sauf pour l'onde extraordinaire lorsque la fréquence est proche de la gyrofréquence, qui est de l'ordre de 1 MHz, où il se produit une résonance qui augmente la valeur de  $C$ . Dans ces conditions de résonance, notamment pour les émissions de grande puissance, la valeur de  $v - v_0$  est comparable à celle de  $v_0$ , et l'équation (4) – compte tenu des équations (8) et (12) – doit être considérée comme une équation quadratique en  $(\bar{v})^2$ . Aux fréquences plus basses, où  $f$  est du même ordre de grandeur que  $v$  ou inférieur à  $v$ , il faut traiter l'ensemble du problème d'une façon beaucoup plus élaborée en considérant une onde complète.

En portant dans (9) l'expression de  $C$  donnée par (12), on trouve:

$$|M_v| = \frac{2e^2 E_0^2 M}{3 m k \theta_0 \left[ 4\pi^2 (f \pm f_H)^2 + v_0^2 \right] G \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{Gv_0} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (13)$$

où  $Q_0$  est donné par (1), et en considérant en première approximation que  $v^2$  au dénominateur est égal à  $v_0^2$ , conformément à l'hypothèse faite pour établir l'équation (9), à savoir que  $C$  est une constante, pour une fréquence porteuse donnée.

## 2.4 Démodulation et transmodulation

Comme l'affaiblissement de l'onde a la forme d'un facteur de réduction de l'amplitude, le fait que  $\alpha$  dans l'équation (11), dépend directement de  $v$  implique que la modulation transférée de l'onde à la fréquence de collision réagit sur l'amplitude de l'onde. Il en résulte en fait une certaine démodulation de l'onde et ce phénomène présente énormément d'intérêt lorsqu'on procède à des expériences de modulation pour étudier la structure physique des régions inférieures de l'ionosphère. Dans ce cas, il est absolument nécessaire de faire une analyse statistique du mouvement électronique beaucoup plus détaillée que celle qui a été adoptée ici, ainsi qu'une étude approfondie de la résonance gyromagnétique.

Encore plus important toutefois est le fait que la modulation imposée à  $\alpha$  peut également être transférée au facteur de réduction d'amplitude d'une autre onde ayant une fréquence différente et passant dans la zone de modulation produisant ainsi une transmodulation. En dehors de son importance physique, ce phénomène est à l'origine d'un brouillage qui va maintenant être évalué. En principe, l'effet est mutuel, chaque onde étant dans une certaine mesure démodulée et modulant l'autre, mais il est maintenant souhaitable de faire une distinction entre les fréquences et de considérer une des émissions comme étant une émission utile, avec sa propre modulation subissant une modulation supplémentaire produite par une émission non désirée ou perturbatrice. Si l'on désigne les fréquences par  $f_W$  et  $f_D$  respectivement, la fréquence  $f$  de l'équation (13) devient maintenant  $f_D$ .

Soit  $\rho$  le facteur de réduction de l'amplitude de l'onde utile; son expression, d'après les équations (7) et (11), est la suivante:

$$\rho = \exp \left( - \int \frac{Ne^2 Z_0 \bar{v} (1 + M_v) ds}{2\mu m [4\pi^2 (f_W \pm f_H)^2 + v^2]} \right) \quad (14)$$

L'intégration s'étend sur la zone de transmodulation, qui est de dimensions limitées en raison de l'affaiblissement subi par l'onde perturbatrice pendant sa traversée de l'ionosphère; de ce fait, la modulation indiquée par (13), qui est subie par la fréquence de collision, diminue en même temps que  $E_0$ . Cette zone peut toutefois être suffisamment étendue pour que l'augmentation de  $N$  et la diminution de  $v$  avec la hauteur dans l'ionosphère aient de l'importance pour l'évaluation de  $\rho$  dans l'équation (14). En définitive, le produit  $Nv$  diminue mais, initialement, il peut augmenter avec la hauteur.

Le front d'une onde met si peu de temps à traverser la zone considérée que l'on peut envisager l'équation (14) comme une intégration sur toute cette zone pour une durée infiniment petite de l'échelle des temps des fréquences acoustiques.  $M_v$  demeure donc constant dans le temps pendant l'intégration et l'étude de la variation temporelle de  $M_v$  aux fréquences acoustiques montre que  $\rho$  est modulé et peut être exprimé comme suit en fonction d'une valeur moyenne et d'une modulation  $M_\rho$ :

$$\rho = \bar{\rho} (1 + M_\rho) \quad (15)$$

par conséquent:

$$\log_e \rho = \log_e \bar{\rho} + \log_e (1 + M_\rho)$$

ou encore, puisqu'on peut admettre que  $M_\rho \ll 1$

$$\log_e \rho = \log_e \bar{\rho} + M_\rho \quad (16)$$

Etant donné que  $M_\rho = 0$  lorsque  $M = 0$ , il s'ensuit que, d'après les équations (14) et (16):

$$\log_e \bar{\rho} = - \int \frac{Ne^2 Z_0 \bar{v} ds}{2\mu m [4\pi^2 (f_W \pm f_H)^2 + \bar{v}^2]} \quad (17)$$

$$M_\rho = - \int \frac{Ne^2 Z_0 \bar{v} ds}{2\mu m [4\pi^2 (f_W \pm f_H)^2 + \bar{v}^2]} \quad (18)$$

dans les dénominateurs de ces expressions, on a négligé la modulation sur  $v^2$  en utilisant la valeur moyenne.

On peut maintenant calculer l'intégrale de  $M_\rho$  dans (18), en isolant  $M_v$  (valeur moyenne) et en conservant formellement dans l'intégrale  $N$  et  $v$ , qui dépendent de l'emplacement; on déduit ainsi de l'équation (17), en termes d'amplitudes:

$$|M_\rho| = - |M_v| \log_e \bar{\rho} \quad (19)$$

d'où, d'après l'équation (13):

$$|M_\rho| = - \frac{2e^2 E_0^2 M \log_e \bar{\rho}}{3 m k \theta_0 [4\pi^2 (f_D \pm f_H)^2 + v_0^2] G \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{Gv_0} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (20)$$

avec une valeur moyenne estimée de  $E_0^2$  dans la zone de modulation.

La détermination de  $\log_e \bar{\rho}$  d'après l'équation (17) implique que l'on connaisse la distribution de  $N$  et de  $v$  dans la zone de modulation pour un modèle donné d'ionosphère. Le facteur de réduction  $\bar{\rho}$  peut être déterminé d'après des mesures du coefficient de réflexion de l'ionosphère pour la fréquence de l'onde utile, en supposant qu'il n'y a pas d'absorption avec déviation au voisinage du point de réflexion dans l'ionosphère, toute l'absorption se produisant au niveau de la zone de transmodulation, et en se souvenant que la modulation ne se produit pas toujours sur les deux trajets, montant et descendant. Si  $\bar{\rho}$  est exprimé par un affaiblissement positif  $D$  en décibels, on a:

$$D = - 20 \log_{10} \bar{\rho} = - 8,7 \log_e \bar{\rho} \quad (21)$$



Si, par ailleurs, la zone de transmodulation se trouve à une distance  $d$  km de l'émetteur brouilleur rayonnant une p.i.r.e. de  $P$  kW dans la direction de cette zone, on a :

$$E_0 = \frac{0,1732}{d} \sqrt{P} \quad \text{V/m} \quad (22)$$

On peut alors constater, d'après les équations (20), (21) et (22), qu'avec les valeurs numériques de  $e$ , de  $m$  et de  $k$  déjà données, avec la valeur  $G = 1,3 \times 10^{-3}$  et avec la valeur  $\theta_0 = 300$  K de l'atmosphère au niveau de la zone de modulation, on a :

$$|M_p| = \frac{0,31 P D M}{d^2 \left[ (f_D \pm f_H)^2 + 0,025 v_0^2 \right] \left[ 1 + \frac{2,34 \times 10^{-5}}{v_0^2} f_M^2 \right]^{1/2}} \quad (23)$$

où  $f_D, f_H$ , et  $v_0$  sont exprimés en MHz et la fréquence de modulation  $f_M = \omega/2\pi$  en Hz.

### 3. Théorie améliorée

Tout en constituant un guide utile, la théorie simple exposée ci-dessus ne convient peut-être pas toujours pour évaluer les niveaux probables de transmodulation. En classant une situation donnée dans l'une des cinq catégories de base, le Tableau 1 montre dans quelles conditions on peut prévoir que la théorie simple risque d'être insuffisante et comment on peut facilement la modifier de manière à obtenir des prévisions plus fiables. Par exemple, les calculs effectués d'après les résultats expérimentaux montrent que le transfert de modulation est plus élevé que prévu lorsque le niveau de réflexion de l'onde utile est situé dans la région perturbée. Toutefois, si la région perturbée se trouve à une très faible altitude dans l'ionosphère, une augmentation de la puissance moyenne de l'onde perturbatrice n'entraîne pas nécessairement une augmentation de la modulation transférée à l'onde utile. Il s'agit respectivement d'exemples des cas III et I du Tableau 1.

### 4. Discussion

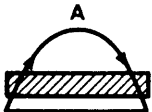
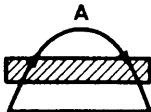
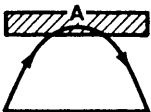
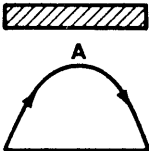
Une méthode simple pour établir l'équation approximative de la transmodulation est donnée sous forme symbolique (20) et sous forme numérique (23). La méthode est fondée sur la notion de changement d'absorption causé par le changement de la fréquence de collision, qui est le lien entre la modulation de l'onde perturbatrice et la modulation transférée sur l'onde utile. Le § 3 de la Recommandation UIT-R BS.498 indique certains des facteurs dont dépend le taux de transmodulation.

Comme on pouvait le prévoir, la transmodulation est directement proportionnelle au taux de modulation de l'onde perturbatrice et à la puissance rayonnée par l'émetteur brouilleur dans la direction de la zone de modulation dans l'ionosphère. La dépendance de la transmodulation à l'égard de l'affaiblissement subi par l'onde utile dans la zone de modulation souligne le fait que l'onde doit non seulement traverser cette zone pour arriver au point de réception situé à la surface de la Terre mais qu'elle doit aussi subir une absorption au cours du processus. Par conséquent, bien que la transmodulation ne dépende pas intrinsèquement de la puissance de l'émission utile, cette puissance doit être suffisante pour que le signal reçu survive à l'affaiblissement dû à l'absorption dans la zone en question. Une valeur typique de  $D$  serait 10 dB si l'affaiblissement n'est pas excessif, mais il est évident que le phénomène ne se produira pas à des fréquences suffisamment élevées pour que l'absorption soit très faible, en raison de la valeur élevée de  $f_W$  dans l'équation (14).

L'effet direct du champ magnétique terrestre sur l'onde utile est implicite pour déterminer la valeur de  $D$  tirée de celle de  $\bar{p}$ . C'est sur l'onde extraordinaire que cet effet est maximal et, dans certaines conditions, l'absorption peut être effectivement totale et ne laisser que la transmodulation sur l'onde ordinaire. La réception de signaux transmodulés dépend par conséquent des caractéristiques de polarisation des antennes d'émission et de réception et de l'heure du jour.

TABLEAU 1

**Catégories relatives à l'estimation de la transmodulation**  
Le trajet de l'onde utile est représenté en relation avec la région perturbée

Cas	I	II	III	IV	V
Configuration					
Emplacement de la région perturbée	nettement au-dessous de A	au-dessous de A	proche de A ou en A	au-dessus de A	en un point quelconque
$M_p$ (relative)	petite	moyenne	grande	petite	grande (si la géométrie convient)
Théorie simple	insuffisante	suffisante	insuffisante	insuffisante	insuffisante
Exemples	$f_W \approx 10f_D$ ou $f_W > 10f_D$	$C_D f_D < C_W f_W$	$f_W > f_D$  ( $C_D f_D \approx C_W f_W$ )	$10f_W < f_D$ ou $f_D \approx f_W$ ( $C_D f_D > C_W f_W$ )	émetteur perturbateur proche de la trajectoire de l'onde utile

où  $C_D$ ,  $C_W$  sont les cosinus des angles d'incidence, dans l'ionosphère, respectivement des ondes perturbatrice et utile.

D01-sc

Le rôle joué par le champ magnétique terrestre est plus évident pour l'onde brouilleuse, comme on peut le voir dans l'équation (23). L'émission peut être destinée à être reçue par l'onde de sol (bandes hectométriques ou kilométriques), la propagation se faisant avec une forte absorption de l'onde abordant l'ionosphère. Il est évident que l'onde extraordinaire est particulièrement efficace pour moduler la fréquence de collision lorsque la fréquence perturbatrice est voisine de la gyrofréquence. Par ailleurs, l'absorption de l'onde limite le volume de la zone de transmodulation et, par conséquent, l'affaiblissement de l'onde utile traversant cette zone. Dans une étude plus rigoureuse de l'énergie de l'onde perturbatrice absorbée par le milieu, on doit utiliser l'effet combiné de l'onde ordinaire et de l'onde extraordinaire.

La relation entre  $M_\rho$  et  $M_\nu$  dans l'équation (19) est fondée sur une valeur moyenne de  $M_\nu$ , ce qui implique une valeur moyenne de  $\nu_0$  dans l'équation (23) et une puissance  $P$  légèrement inférieure à la p.i.r.e. effective de l'émetteur brouilleur. La fréquence de collision a une influence prédominante sur la résonance gyromagnétique de l'onde extraordinaire mais, par ailleurs, la diminution rapide de  $\nu_0$  lorsque l'altitude augmente restreint surtout la gamme des fréquences acoustiques dans laquelle la transmodulation se produit. Les valeurs de  $\nu_0$  diminuent de manière exponentielle avec l'altitude et la nuit généralement on compte  $10^6$  collisions par seconde à 81 km et  $10^5$  collisions par seconde à 94 km.

Lorsque la fréquence de l'onde brouilleuse augmente et dépasse la gyrofréquence, la transmodulation finit par varier comme  $f_D^{-2}$ .

On peut mettre ensuite l'équation (23) sous une forme simple approchée:

$$P = \frac{3,2 |M_\rho| d^2 f_D^2}{MD} \quad \text{kW} \quad (24)$$

Pour évaluer la gêne que le brouillage risque de causer à l'onde utile, on admet que  $|M_\rho| = 0,03$ , que l'onde perturbatrice est modulée à 40% (c'est-à-dire que  $M = 0,4$ ), enfin que  $D = 10$  dB. Dans ces conditions, à la fréquence 1,6 MHz, pour la distance  $d = 150$  km correspondant à une onde incidente sur l'ionosphère sous un angle de  $45^\circ$  environ, il faut que la puissance de l'onde perturbatrice ne dépasse pas 1,4 MW pour que la transmodulation soit acceptable. Avec les p.i.r.e. que l'on peut actuellement obtenir en ondes hectométriques, il semble vraisemblable que les brouillages dus à la transmodulation risquent de se produire, d'autant plus que la formule simplifiée (24) exclut les effets possibles de résonance gyromagnétique. En revanche, une étude faite dans les mêmes conditions pour les fréquences supérieures à 5 MHz montre que même les p.i.r.e. très élevées couramment employées en radiodiffusion à ondes décimétriques ne sont probablement pas de nature à engendrer une modulation suffisante pour être gênante.

5. Des mesures expérimentales de transmodulation subie par des signaux de fréquence aussi basse que 20 kHz ont été effectuées, en utilisant comme signal utile les émissions de WWVL (Fort Collins, Colorado, Etats-Unis d'Amérique) et comme signal perturbateur celles de Platteville, Colorado (Etats-Unis d'Amérique). L'émetteur de Platteville fonctionnait sur 7,4 MHz et avait une p.i.r.e. de 50 MW. L'émission de WWVB (Fort Collins) sur 60 kHz, reçue à Bennett (Colorado) était le signal utile. Les deux polarisations, ordinaire et extraordinaire, du signal de Platteville ont été utilisées. Comme on pouvait s'y attendre, les effets de transmodulation ont été beaucoup plus intenses pour la polarisation extraordinaire que pour la polarisation ordinaire.

6. L'interprétation des effets de transmodulation a été en grande partie limitée aux variations de conductivité (transfert de modulation résultant des variations de l'affaiblissement du signal utile), sans tenir compte des variations de la permittivité. Ces dernières variations, qui peuvent résulter de la présence de signaux provenant d'émetteurs de grande puissance, donnent à penser que les signaux utiles faisant appel à une modulation autre que la modulation d'amplitude peuvent également être affectés par un phénomène de transmodulation.

## ANNEXE 3

**Les satellites collecteurs d'énergie solaire et l'ionosphère**

A la fin des années 70 et au début des années 80, on pensait que les satellites collecteurs d'énergie solaire (SPS = solar power satellites) pourraient contribuer puissamment à satisfaire les besoins futurs de la Terre en énergie. Le principe même de ces systèmes consistait à recueillir l'énergie solaire par de grands panneaux de cellules solaires évoluant sur orbite géostationnaire, puis à la convertir en puissance radioélectrique hyperfréquence, puissance qui était enfin rayonnée vers la Terre pour y être convertie en courant continu. Du fait que les niveaux de puissance qui entrent en jeu dans ces systèmes SPS sont très supérieurs à ceux que l'on rencontre habituellement dans les radiocommunications, il est possible que l'interaction du faisceau hyperfréquence avec l'ionosphère et la troposphère crée de sérieuses perturbations pour les services de radiocommunication existants.

Les effets des satellites collecteurs d'énergie solaire sur l'ionosphère peuvent être classés en deux catégories: celle dans laquelle le plasma ionosphérique influence la propagation du faisceau hyperfréquence et celle dans laquelle le plasma ionosphérique est lui-même modifié. Dans le premier cas, des gradients de densité électronique et des irrégularités peuvent influencer sur la propagation du faisceau. Les effets de la réfraction peuvent entraîner une modification de la position apparente du faisceau. Les irrégularités ionosphériques peuvent provoquer une scintillation et une diffusion du faisceau susceptibles de provoquer des brouillages dans le même canal pour d'autres systèmes radioélectriques.

La modification du plasma ionosphérique provoquée par le passage d'un faisceau hyperfréquence à haute puissance est due à l'échauffement ohmique des électrons par le faisceau. Cet échauffement ohmique peut provoquer une absorption accrue des ondes radioélectriques traversant la même région que le faisceau hyperfréquence. Par ailleurs, l'échauffement ohmique peut produire une autofocalisation d'origine thermique, ce qui peut aboutir à la formation d'irrégularités de densité électronique qui peuvent provoquer la diffusion d'ondes radioélectriques à des fréquences bien inférieures si celles-ci traversaient le volume de diffusion. Heureusement, la région de l'ionosphère dans laquelle ces effets se produisent en général se limite le plus souvent au voisinage de l'endroit auquel le faisceau traverse l'ionosphère.

## ANNEXE 4

**Modification artificielle de l'ionosphère par injection de produits chimiques**

Les produits d'échappement typiques des fusées, tels que  $H_2$ ,  $H_2O$  et  $CO_2$  peuvent entraîner des diminutions à grande échelle de la densité électronique de la région F de l'ionosphère. Cela résulte du fait que ces produits transforment le plasma d'ions atomiques de la région F en un plasma d'ions moléculaires. Une fois que les ions moléculaires associés à ces produits sont formés, ils se recombinent de manière dissociative avec la densité électronique ambiante à une vitesse qui est de 100 à 1 000 fois plus grande que la recombinaison des électrons avec les molécules naturelles d'azote ( $N_2$ ) et d'oxygène ( $O_2$ ). Il en résulte la formation d'un «trou ionosphérique» dans la région F. L'absence d'effets à grande échelle dus à l'injection de produits chimiques dans la basse ionosphère est due aux densités neutres élevées et à la chimie des ions moléculaires qui domine aux altitudes des régions D et E.

L'appauvrissement de l'ionosphère résultant de l'injection de produits chimiques a été observé grâce à des mesures du contenu électronique total et des signaux radioélectriques en ondes décimétriques. La théorie qui explique le mécanisme physique entrant en jeu dans la création d'appauvrissement de l'ionosphère par injection de produits chimiques est bien élaborée.

---