

RECOMMANDATION UIT-R BS.498-2*

**Transmodulation ionosphérique en radiodiffusion
en ondes kilométriques (B.km) et hectométriques (B.hm)**

(1974-1978-1990)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

qu'un rayonnement trop important vers l'ionosphère peut entraîner une transmodulation ionosphérique et, par conséquent, des brouillages préjudiciables,

recommande

que le rayonnement maximal admissible sous n'importe quel angle de site soit tel que la gêne due à la transmodulation ionosphérique ne dépasse pas celle qui est admise pour le brouillage dans le même canal (voir la Recommandation UIT-R BS.560).

ANNEXE 1**

Les effets de la transmodulation ionosphérique dans les bandes kilométriques et hectométriques peuvent devenir de plus en plus graves à cause de l'augmentation continue des puissances d'émission.

1 Des expériences détaillées ont été effectuées à ce sujet dans le cadre de l'UER dans plusieurs pays, notamment au Royaume-Uni et en République fédérale d'Allemagne et en République populaire de Chine. De ces expériences, qui ont été faites avec des émissions classiques en modulation d'amplitude à double bande latérale, on peut déduire les résultats suivants:

1.1 Le taux de transmodulation augmente d'une façon sensiblement linéaire avec la puissance de l'émetteur brouilleur, ainsi qu'avec son taux de modulation.

NOTE – Le taux de transmodulation est le taux avec lequel la porteuse de l'émetteur utile est modulée par les signaux de l'émetteur brouilleur.

* La Commission d'études 6 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2002 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 44.

** Cette Annexe est donnée pour information.

1.2 Cette transmodulation dépend surtout de la puissance rayonnée par le brouilleur dans la direction du point de réflexion de l'onde utile sur l'ionosphère.

Les taux de transmodulation inférieurs à 10% sont directement proportionnels à la puissance. Ainsi, une augmentation de 3 dB de la puissance de l'émetteur brouilleur entraîne une élévation de 6 dB du taux de transmodulation. D'autre part, le taux de transmodulation est directement proportionnel au taux de modulation de l'émetteur brouilleur.

1.3 Le taux de transmodulation est d'autant plus petit que la fréquence de modulation de l'émetteur brouilleur est plus élevée. Des expériences de laboratoire ont montré qu'il est possible d'établir une relation entre l'effet subjectif de la transmodulation et le brouillage dans un même canal. Pour provoquer un niveau donné de dégradation subjective, le brouillage résultant de la transmodulation ionosphérique exige que le rapport signal/brouillage soit inférieur de 6 dB à la valeur correspondant au brouillage dans un même canal, à condition que la transmodulation soit rapportée à une fréquence de modulation de 300 Hz.

1.4 A noter que les études de la transmodulation ionosphérique sont résumées dans la Recommandation UIT-R P.532.

2 La Fig. 1 donne les taux de transmodulation mesurés dans un grand nombre d'expériences. Chaque résultat de mesure a été normalisé par rapport à la valeur que l'on aurait observée si l'émission brouilleuse avait été rayonnée par une antenne verticale courte, la puissance porteuse étant de 100 kW modulée à 300 Hz au taux de 80%.

Sur la Fig. 1, une courbe semi-empirique donne la valeur du taux de transmodulation maximal susceptible d'être observé (moyenne sur un court intervalle de temps); cela se produit si le signal utile traverse la région de l'ionosphère qui est «éclairée» avec la plus grande intensité par le rayonnement brouilleur. La Fig. 1 montre que la transmodulation croît jusqu'à un deuxième maximum lorsque la fréquence brouilleuse est voisine de la fréquence gyromagnétique. La Fig. 5 est une carte indiquant les valeurs de la fréquence gyromagnétique dans les diverses parties du monde.

3 Cet effet de transmodulation est à considérer non seulement pour la réception par onde ionosphérique, mais aussi pour la réception par onde de sol, à la limite de la zone desservie, lorsque de nuit l'onde ionosphérique n'est plus complètement négligeable. L'effet de transmodulation est toutefois réduit, approximativement dans le rapport des amplitudes des ondes utiles, de sol ou ionosphérique, au point de réception.

4 Les taux de transmodulation ionosphérique ont été calculés en B.km et en B.hm. L'influence de la puissance des émetteurs utile et brouilleur a été évaluée. Les résultats théoriques et pratiques ont été comparés.

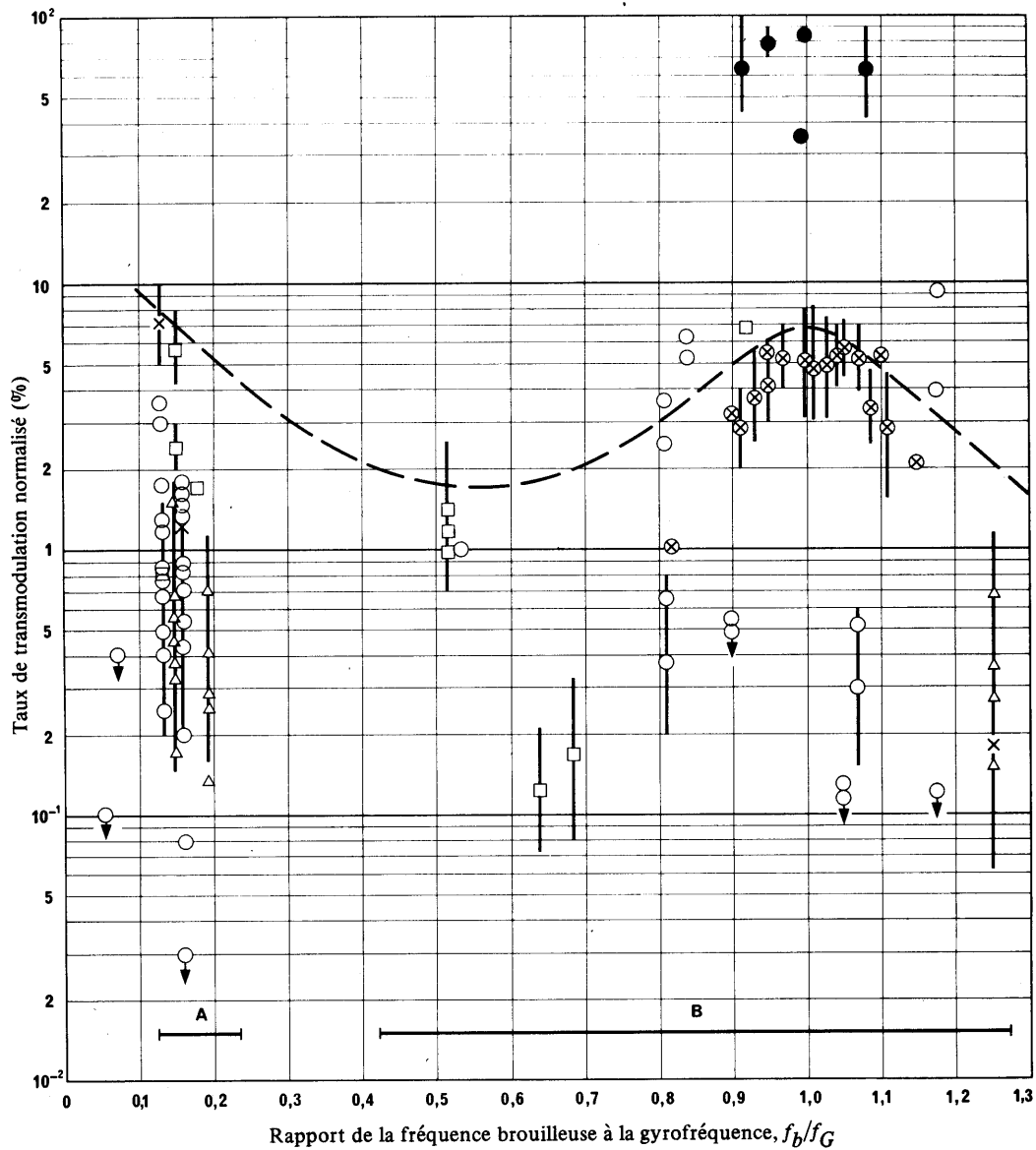


FIGURE 1 – Mesure de la transmodulation ionosphérique à des latitudes moyennes

□ : Mesures faites avant 1945

○ : Mesures faites à Cambridge et Birmingham

● : Mesures faites en Italie

⊗ : Mesures faites en Australie

△ : Mesures faites après 1945 en Europe occidentale

× : Autres mesures

— — — : Limite supérieure semi-empirique

A : bande 5 (ondes kilométriques)

B : bande 6 (ondes hectométriques)

Note. – Les lignes verticales représentent la gamme des valeurs médianes mesurées pendant une nuit, ou au cours de plusieurs nuits. Les flèches pointées vers le bas indiquent qu'il existe des mesures qui sont inférieures à la valeur indiquée.

5 Conclusions préliminaires

On peut donner des exemples de la puissance surfacique, ou de la puissance d'émission en fonction de l'angle de site, susceptible de causer des perturbations aux émissions utiles.

Pour cela, on a d'abord fixé une valeur acceptable du taux de transmodulation. D'après la Recommandation 560 et la Recommandation UIT-R P.1147, un rapport de protection en radiofréquence d'environ 30 dB est acceptable pour 10% du temps dans le cas d'un signal brouilleur fluctuant. Compte non tenu de l'effet indiqué au § 1.3, on aurait le même effet perturbateur avec un taux de transmodulation de 3% pendant 10% du temps. Il a été démontré que ce taux de transmodulation est dû, dans la partie supérieure de la bande hectométrique de radiodiffusion, à une puissance surfacique maximale dans la région E d'environ $2 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ($-57 \text{ dB (W/m}^2\text{)}$), soit un champ maximal de 27 mV/m ($89 \text{ dB (}\mu\text{V/m)}$).

En supposant une hauteur de 100 km pour la couche E, on peut calculer le rayonnement de divers types d'antenne produisant une telle puissance surfacique dans la région E. Les antennes d'émission verticales couramment utilisées ont un diagramme de rayonnement vertical qui est une fonction bien définie de leur hauteur (exprimée en longueur d'onde λ). En particulier, pour de telles antennes, le rayonnement est nul pour un angle de site de 90° . Le Tableau 1, indique, pour diverses hauteurs d'antennes verticales, les puissances d'alimentation correspondant aux conditions précédentes.

TABLEAU 1

Hauteur de l'antenne verticale	$< 0,25 \lambda$	$0,25 \lambda$	$0,5 \lambda$	$0,55 \lambda$	$0,64 \lambda$	$0,64 \lambda^{(1)}$
Puissance porteuse de l'émetteur (kW)	320	340	560	670	370	840

⁽¹⁾ Avec compensation du premier lobe latéral.

On peut également calculer la relation entre la puissance rayonnée et l'angle de site depuis 0° (rayonnement horizontal) jusqu'à 90° (rayonnement vertical) nécessaire pour produire la même puissance surfacique. Les résultats sont indiqués dans le Tableau 2.

Les tableaux 1 et 2 ne donnent que des valeurs approximatives, car la théorie montre que la transmodulation ionosphérique peut être influencée par plusieurs facteurs tels que les fréquences utiles et brouilleuses (en particulier leur position par rapport à la gyrofréquence) et la polarisation des ondes.

Les puissances indiquées dans les Tableaux 1 et 2, à titre d'exemples, sont déduites d'un petit nombre de mesures faites sur une fréquence voisine de la limite supérieure de la bande hectométrique. Ces mesures ne tiennent pas compte de la variation de la transmodulation en fonction de la fréquence porteuse perturbatrice ni de la diminution de la transmodulation pour les audiofréquences élevées, diminution qui permet d'augmenter de 3 dB les puissances brouilleuses.

TABLEAU 2

Angle de site	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	90°
p.a.r.v. (dB (1 kW)) ou f.c.m. (dB (300 V)) ⁽¹⁾	39,5	32	27,5	24,3	22,5	22	21,5	20,2	19,3	18,7	18,5
p.a.r.v. (kW)	9000	1600	570	230	190	160	140	105	85	75	70

(1) p.a.r.v.: Puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte; } Voir aussi la Recommandation UIT - R BS.561
f.c.m.: force cymomotrice.

A noter que des services autres que la radiodiffusion ont été perturbés par la transmodulation ionosphérique.

On a comparé les résultats de nombreuses mesures de la transmodulation ionosphérique; la Fig. 1 montre qu'une puissance de 100 kW sur antenne verticale courte, dans la partie inférieure de la bande hectométrique de radiodiffusion, produit une transmodulation qui peut dépasser 2% pendant 50% du temps. On peut démontrer que cela correspond à une transmodulation de 3% dépassée pendant 10% du temps. On peut donc comparer directement la puissance de 100 kW avec celle de 320 kW du Tableau 1. La présence d'une puissance plus grande dans ce tableau s'explique par le fait que la méthode de mesure dont elle est le résultat semble donner une transmodulation inférieure aux valeurs estimées pour le cas le plus défavorable (voir la courbe de la Fig. 1).

La Fig. 1 montre également que la transmodulation due à des brouilleurs en ondes kilométriques ou sur des fréquences voisines de la fréquence gyromagnétique peut être supérieure de 10 dB aux valeurs qui correspondent à des fréquences de la partie inférieure de la bande hectométrique. Une diminution de 5 dB de la puissance brouilleuse réduit de 10 dB la transmodulation. Compte tenu de l'effet de la fréquence de modulation, on peut conclure que, suivant la valeur de la fréquence brouilleuse en ondes kilométriques ou hectométriques, les puissances comprises entre les valeurs des Tableaux 1 et 2 et des valeurs inférieures de 7 dB peuvent, dans le pire des cas, brouiller un service par onde ionosphérique dans des conditions comparables au brouillage dans un même canal, avec un rapport de protection de 30 dB.

On peut utiliser des puissances brouilleuses un peu plus élevées s'il s'agit de protéger de la transmodulation ionosphérique non plus la réception par onde ionosphérique, mais la réception par onde de sol; en effet, le brouilleur n'exerce une action que sur la composante ionosphérique du signal reçu. Si la limite de la zone de service par onde de sol est définie par la ligne où le champ de l'onde de sol dépasse de 10 dB le champ médian de l'onde ionosphérique, la valeur médiane de la transmodulation du signal résultant sera inférieure de 14 dB à la valeur médiane de la transmodulation de l'onde ionosphérique. Les puissances brouilleuses peuvent donc être supérieures aux puissances correspondantes, lorsqu'il s'agit de protéger l'onde ionosphérique.

6 Utilisation pratique des conclusions

L'UER a étudié les conséquences, pour la planification dans les bandes 5 (ondes kilométriques) et 6 (ondes hectométriques) des conclusions préliminaires résumées dans le § 5 de la présente Annexe. Le problème le plus important est d'établir des limites pour le rayonnement maximal en fonction de l'angle de site et du type d'antenne pour que le brouillage par la transmodulation ionosphérique reste inférieur à une certaine valeur. Les conclusions à tirer de ces études sont énumérées ci-après.

La gêne causée par la transmodulation ne devrait pas dépasser celle due au brouillage dans le même canal, avec un rapport de protection de 30 dB. Cependant, la transmodulation, contrairement au brouillage dans le même canal, décroît lorsque la fréquence de modulation augmente. Des essais subjectifs, indispensables pour relier ces deux effets, ont montré que le taux maximal de transmodulation pouvait être de 6,3%, quand l'émetteur brouilleur est modulé à 80% par un signal à 300 Hz. On recommande de considérer cette valeur comme la limite maximale acceptable pour la transmodulation.

Les résultats de l'évaluation subjective du degré de gêne causée par la transmodulation effectuée en Chine dans des conditions normales de transmission de programmes de radiodiffusion sonore et avec un rapport de protection cocanal de 27 dB pour le service par onde ionosphérique montrent que l'on obtient une note de qualité de 4, le brouillage devenant perceptible mais non gênant pour un taux de transmodulation de 8,9%.

La Fig. 2 (courbe A), qui tient compte du fait que la transmodulation dépend de la fréquence porteuse brouilleuse et de l'altitude de la couche réfléchissante, indique soit la puissance apparente rayonnée sur antenne verticale courte (dB (1 kW)), soit la force cymomotrice (dB (300 V)), dans la direction verticale, qui produirait pendant 50% du temps la transmodulation spécifiée plus haut. Les abscisses sont le rapport de la fréquence brouilleuse, f_b , à la gyrofréquence, f_G (environ 1,25 MHz en Europe). Cette courbe est déduite d'un grand nombre de mesures faites en Europe et en Australie (voir § 5 et Fig. 1), en prenant les valeurs observées de transmodulation comme les plus mauvaises qui puissent se produire sur le trajet géographique le plus défavorable.

En pratique, on doit tenir compte du diagramme vertical de l'antenne ainsi que de l'augmentation de la distance entre l'antenne et le point de réflexion dans des directions différentes de la verticale. La Fig. 3 indique l'augmentation du rayonnement admissible dans des directions autres que la verticale, due uniquement à l'augmentation de la distance. Une augmentation ou une diminution de ce rayonnement pourra résulter du diagramme vertical de l'antenne. Pour l'application pratique, l'influence de la distance au point de la réflexion, et du diagramme vertical, ont été combinées en un seul facteur de correction ΔP qu'il faut ajouter aux valeurs tirées de la Fig. 2. Ce facteur de correction a été calculé pour des antennes verticales de différentes longueurs électriques $\chi \approx l/\lambda$ et pour des doublets demi-onde horizontaux à différentes hauteurs $\chi \approx h/\lambda$ au-dessus du sol en supposant que la couche ionosphérique où se produit la transmodulation est de 85 km d'altitude. Le résultat de ce calcul est donné à la Fig. 4.

Dans le cas où un service nocturne par onde de sol est à protéger de la transmodulation, on peut supposer que le champ ionosphérique de l'émetteur utile est inférieur de 10 dB au champ direct à la limite de la zone de service. Comme seule la composante ionosphérique est sujette à la transmodulation, on peut admettre une augmentation de 5 dB du rayonnement, si l'on ne considère que le service par onde de sol; d'où la courbe B de la Fig. 2.

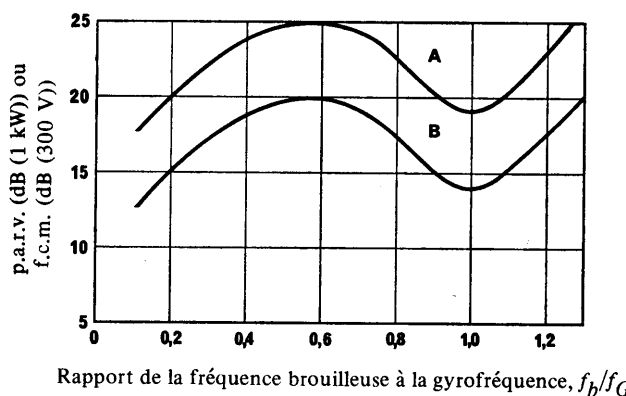


FIGURE 2 – Rayonnement à incidence verticale donnant une transmodulation quasi maximale de 6,3% à 300 Hz

Courbe A: pour la protection du service par onde de sol
 Courbe B: pour la protection du service par onde ionosphérique

0498-02

A titre d'exemple, considérons une antenne verticale courte, en ondes kilométriques ($f_b/f_G = 0,2$). La Fig. 2 montre que pour protéger un service par onde de sol, la p.a.r.v. maximale dans la direction verticale doit être de 20 dB par rapport à 1 kW, soit 100 kW. Cependant, cette antenne courte produit un champ maximal dans l'ionosphère sous un angle de site de 45° ; la Fig. 3 montre qu'on peut admettre une augmentation de 3 dB pour cet angle, d'où une p.a.r.v. de 200 kW. Il est toutefois plus commode de spécifier la p.a.r.v. dans la direction horizontale. Pour une antenne courte, elle est de 3 dB plus élevée qu'à 45° , soit 400 kW.

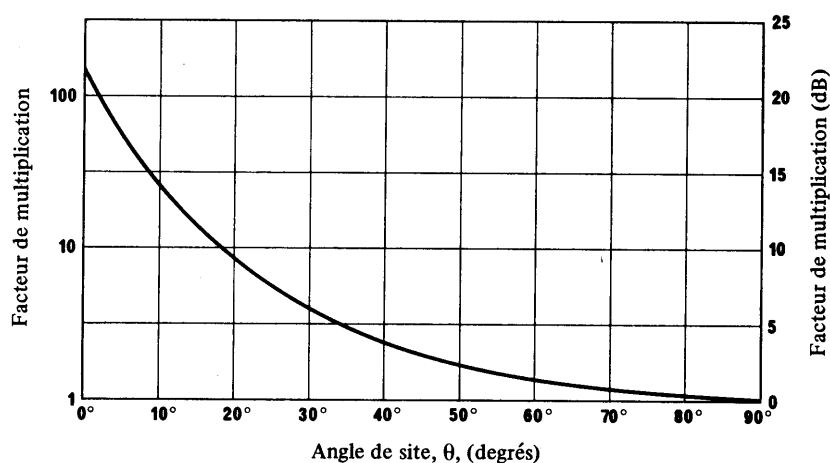


FIGURE 3 – Variation du rayonnement admissible en fonction de l'angle de site

(en tenant compte de la courbure de la Terre et en admettant que la transmodulation se produit à une altitude de 85 km)

0498-03

On trouve dans ce cas, à l'aide de la courbe A de la Fig. 4, la valeur $\Delta P = +6$ dB pour une antenne verticale courte ($l/\lambda \ll 0,1$), d'où une puissance totale fournie à l'antenne de $P = +26$ dB (1 kW), soit ≈ 400 kW.

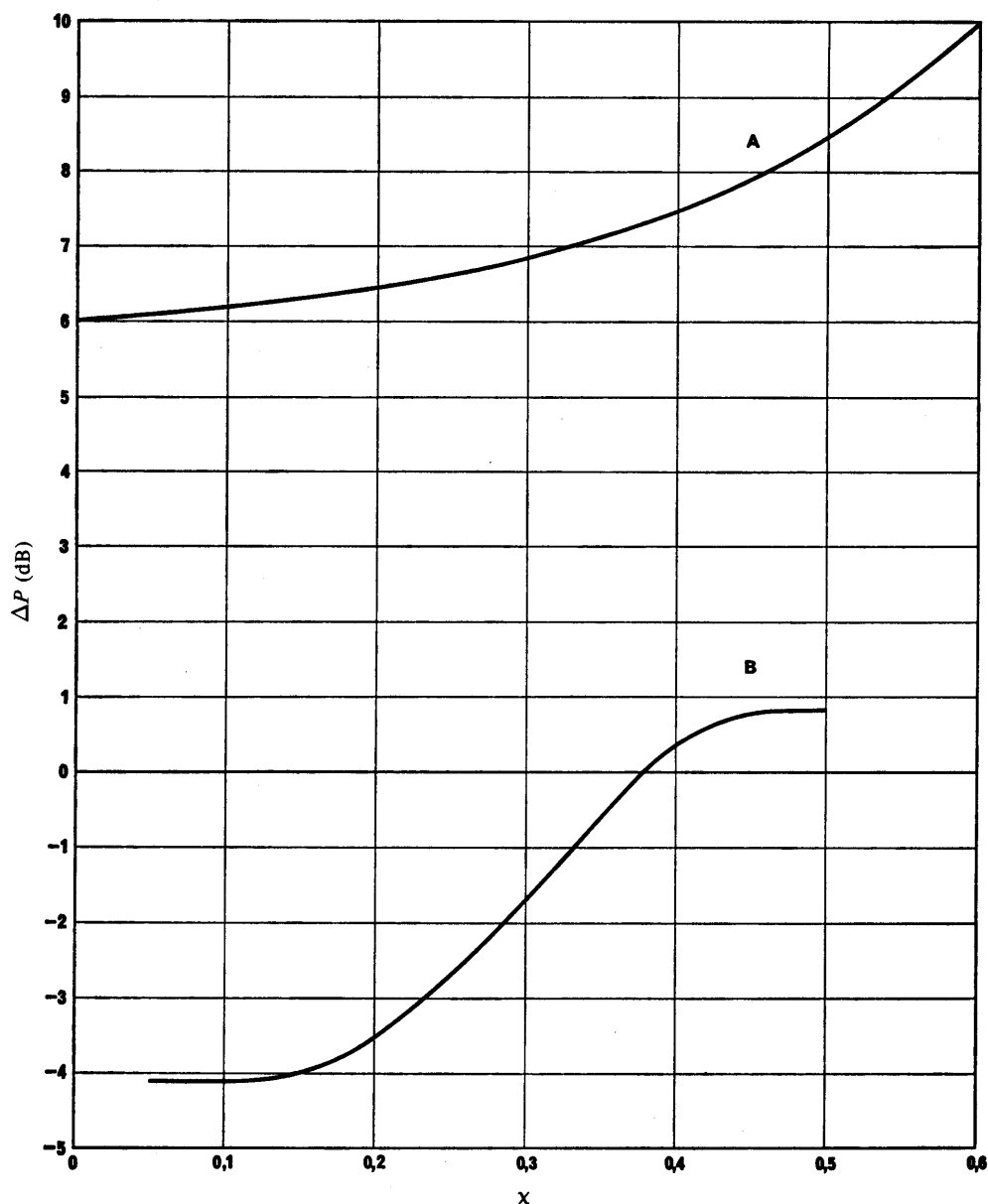


FIGURE 4 – Facteur de correction, ΔP , pour divers types d'antenne

Courbe A: Antenne verticale
 x : hauteur relative de l'antenne, l/λ

Courbe B: Doublet horizontal ($l = 0,5\lambda$)
 x : hauteur relative au-dessus du sol, h/λ

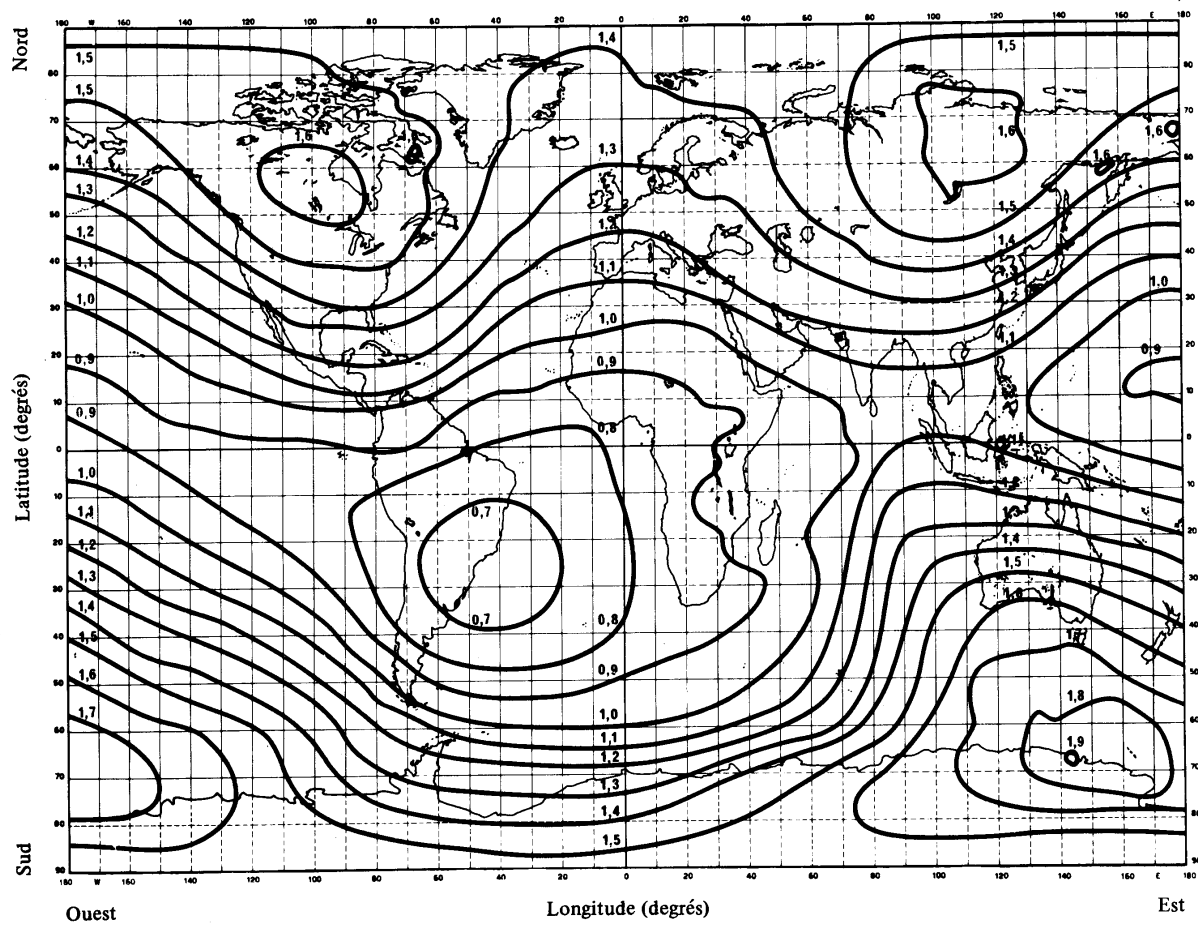


FIGURE 5 – Répartition mondiale de la gyrofréquence (MHz)

D04-sc

Les courbes qui montrent la relation entre le taux de transmodulation au point de réception et le champ au point de réflexion dans l'ionosphère telles que celles de la Fig. 6 ont été établies à la suite de recherches effectuées en Chine. Ces courbes peuvent servir à évaluer le taux de transmodulation en un point de réception donné pour différentes valeurs du champ brouilleur au point de réflexion dans l'ionosphère et à calculer approximativement la zone d'influence de transmodulation.

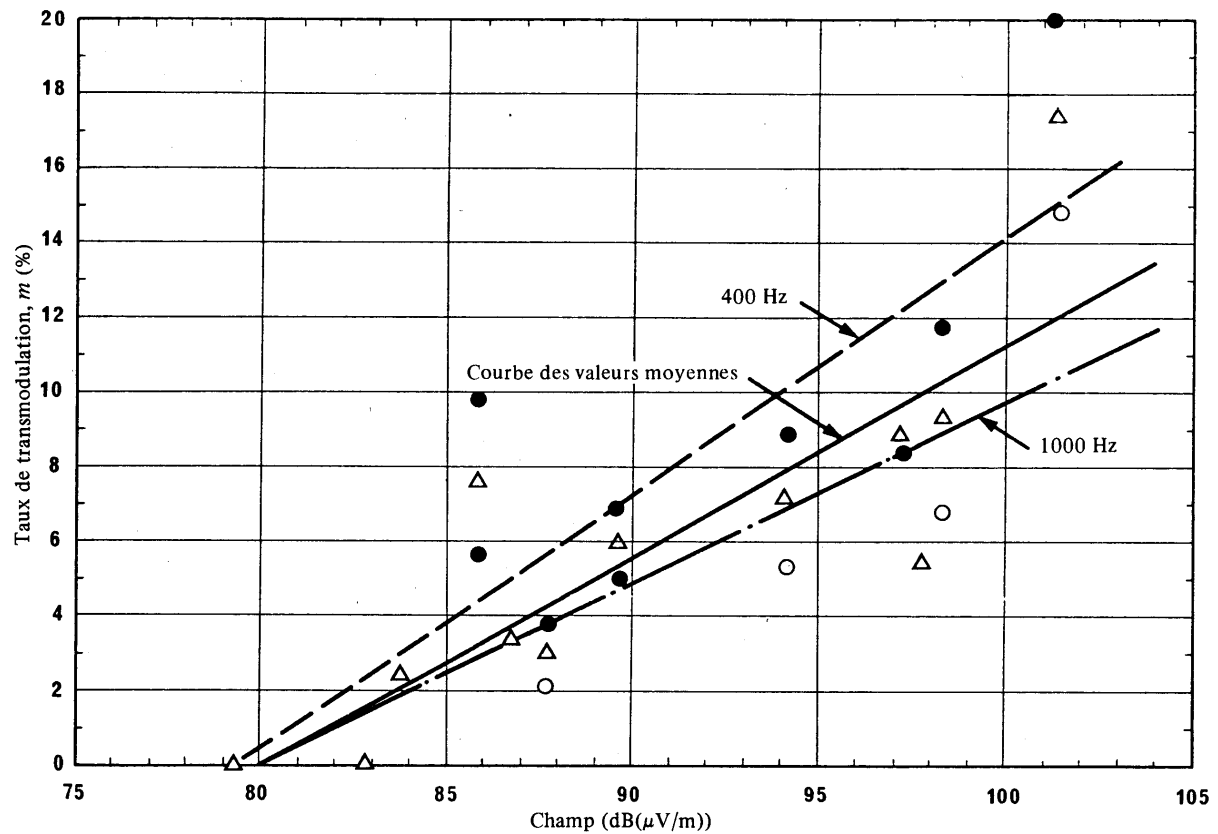


FIGURE 6 – Relation entre le taux de transmodulation et le champ au point de réflexion dans l'ionosphère

(Coefficient de corrélation $r = 0,84$ pour ces courbes)

- 400 Hz valeur mesurée
- 1000 Hz valeur mesurée
- △ moyenne des valeurs mesurées