

RECOMMANDATION UIT-R SM.337-4

SÉPARATIONS EN FRÉQUENCE ET EN DISTANCE

(Question UIT-R 72/1)

(1948-1951-1953-1963-1970-1974-1990-1992-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les facteurs primordiaux qui déterminent les critères appropriés de séparation en fréquence ou en distance sont, dans les cas les plus courants:
- la puissance et la distribution spectrale du signal requises par le récepteur,
 - la puissance et la distribution spectrale des signaux brouilleurs et du bruit captés par le récepteur,
 - l'affaiblissement de transmission entre équipements radioélectriques dépendant de la distance;
- b) que le rayonnement d'un émetteur s'étend généralement hors de la bande de fréquences nécessairement occupée par l'émission;
- c) qu'un grand nombre d'autres facteurs interviennent également, tels que les propriétés du milieu transmissif, qui sont de caractère variable et difficiles à déterminer, ainsi que les caractéristiques du récepteur et, dans le cas de la réception auditive, les propriétés de discrimination de l'oreille humaine;
- d) que des compromis entre la séparation en fréquence et la séparation en distance des équipements radio-électriques sont possibles,

recommande

- 1** que les séparations en fréquence ou en distance des équipements radioélectriques soient calculées par la méthode suivante:
- 1.1** déterminer la puissance et la distribution spectrale du signal capté par le récepteur;
- 1.2** déterminer la puissance et la distribution spectrale des signaux brouilleurs et du bruit capté par le récepteur;
- 1.3** déterminer les interactions entre signaux, brouillages et caractéristiques du récepteur pour plusieurs séparations en fréquence ou en distance en utilisant les équations fondamentales de l'Annexe 1 ou, si nécessaire, des approximations simples des équations intégrales et la notion décrite dans l'Annexe 2;
- 1.4** déterminer, à l'aide de ces éléments, le degré de séparation en fréquence ou en distance qui donne la qualité et la probabilité de service requises, compte tenu du caractère fluctuant du signal et du brouillage et, s'il y a lieu, des propriétés de discrimination de l'auditeur ou du spectateur;
- 1.5** déterminer le modèle de propagation de l'UIT-R approprié à utiliser;
- 2** qu'à chacune des étapes de ce calcul il soit, autant que possible, procédé à une comparaison avec les données obtenues dans des conditions contrôlées et représentatives des conditions d'exploitation, particulièrement en ce qui concerne la valeur finalement obtenue pour la séparation en fréquence ou en distance des équipements radioélectriques.

ANNEXE 1

Equations de base

La présente Annexe décrit des mesures permettant de quantifier les effets réciproques des signaux désirés, du brouillage et des caractéristiques du récepteur, pour diverses séparations en fréquence et en distance. Ces mesures portent sur les caractéristiques suivantes:

- le rejet dépendant de la fréquence (FDR – frequency dependent rejection) qui est la mesure du rejet du spectre de l'émission de l'émetteur brouilleur résultant de la courbe de sélectivité du récepteur;

- la caractéristique distance/fréquence (FD – frequency distance) qui est la mesure de la distance minimale de séparation requise entre un récepteur et une source de brouillage, en fonction de la différence entre leurs fréquences d'accord;
- le rapport de protection relatif en radiofréquence, A (voir la Recommandation UIT-R BS.560), qui est la différence (dB) entre le rapport de protection lorsque les porteuses de l'émetteur utile et de l'émetteur brouilleur sont décalées de Δf et le rapport de protection lorsque les deux porteuses ont la même fréquence.

La caractéristique distance/fréquence et le rejet dépendant de la fréquence permettent de mesurer le couplage du brouillage entre la source brouilleuse et le récepteur et elles fournissent les solutions fondamentales nécessaires pour l'évaluation du brouillage dans bon nombre de cas. Le recours à ces caractéristiques facilite la solution des problèmes liés au partage des fréquences dans le même canal et aux brouillages par la bande ou le canal adjacents. En effet, ces caractéristiques permettent d'établir des critères pour la séparation minimale en fréquence et en distance entre la source de brouillage et le récepteur, ce qui assure à ce dernier une qualité de fonctionnement acceptable.

Le niveau de brouillage dans le récepteur dépend des gains et des affaiblissements qui se produiront dans le signal brouilleur, entre la source et le récepteur. Ce niveau est exprimé par la formule suivante:

$$I = P_t + G_t + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f) \quad \text{dBW} \quad (1)$$

où:

P_t : puissance de l'émetteur brouilleur (dBW)

G_t : gain de l'antenne de l'émetteur brouilleur en direction du récepteur (dBi)

G_r : gain de l'antenne du récepteur en direction de l'émetteur brouilleur (dBi)

$L_b(d)$: affaiblissement de transmission de référence pour une distance de séparation d entre la source de brouillage et le récepteur (dB) (voir la Recommandation UIT-R P.341)

et

$$FDR(\Delta f) = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (2)$$

où:

$P(f)$: densité spectrale de puissance du signal brouilleur à la fréquence intermédiaire équivalente

$H(f)$: sélectivité du récepteur

$$\Delta f = f_t - f_r$$

où:

f_t : fréquence d'accord de la source de brouillage

f_r : fréquence d'accord du récepteur.

La caractéristique FDR peut être divisée en deux termes, le rejet à la fréquence d'accord (OTR – on-tune rejection) et le rejet hors fréquence (OFR – off-frequency rejection), qui est le rejet supplémentaire résultant du désaccord entre la source de brouillage et le récepteur.

$$FDR(\Delta f) = OTR + OFR(\Delta f) \quad \text{dB} \quad (3)$$

où:

$$OTR = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (4)$$

$$OFR(\Delta f) = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (5)$$

Le rejet à la fréquence d'accord, également appelé facteur de correction, peut faire l'objet de l'approximation suivante:

$$OTR \approx K \log \left(\frac{B_T}{B_R} \right) \quad B_R \leq B_T \quad (6)$$

où:

B_R : largeur de bande du récepteur brouillé à 3 dB (Hz)

B_T : largeur de bande de l'émetteur brouilleur à 3 dB (Hz)

$K = 20$ pour les signaux non cohérents

= 20 pour les impulsions.

ANNEXE 2

Méthode permettant de déterminer la séparation en fréquence et en distance entre les systèmes de radiocommunication

1 Introduction

Nul n'ignore que le principe de la séparation en fréquence et en distance qui s'applique aux systèmes de radiocommunication est un élément important du processus de gestion des fréquences pour la plupart des services de radiocommunication. Pour les services régis par des plans de disposition des canaux, ce principe s'énonce comme suit: des émetteurs fonctionnant dans le même canal doivent être distants d'au moins d_0 km; des émetteurs fonctionnant dans des canaux adjacents doivent être distants d'au moins d_1 km; pour des émetteurs séparés par deux canaux la distance doit être d'au moins d_2 km, etc. Les règles relatives à la séparation en fréquence et en distance s'appliquant aux technologies moins récentes sont aujourd'hui bien connues mais l'arrivée des technologies nouvelles soulève le problème suivant: quelle règle fréquence/distance le responsable de la gestion du spectre devrait-il appliquer lorsque des systèmes nouveaux et anciens occupent la même bande de fréquences? La méthode permettant de déterminer les règles de séparation en fréquence et en distance à appliquer entre systèmes analogues et systèmes dissemblables est présentée ci-après.

2 Méthode

Pour élaborer une nouvelle règle de séparation en fréquence et en distance, il faut calculer le niveau de brouillage à l'entrée du récepteur brouillé et définir un critère de brouillage acceptable.

2.1 Calcul des brouillages

Ce calcul fait intervenir deux facteurs essentiels: un facteur spectral et un facteur spatial.

Le *facteur spectral* dépend des caractéristiques spectrales de l'émetteur brouilleur et de la courbe de fréquence du récepteur brouillé. Pour les besoins des calculs, il faut avoir une idée précise de la densité spectrale de puissance du signal brouilleur qui dépend de différents paramètres tels que la technique de modulation et la largeur de bande du signal d'information dans le cas de systèmes analogiques ou bien encore, le débit des données transmises dans le cas de systèmes numériques.

Pour ce qui est du récepteur brouillé, il faut connaître les caractéristiques de la courbe de fréquence intermédiaire (FI) équivalente du récepteur. On peut utiliser les spécifications du fabricant (largeur de bande de 6 dB et de 40 dB au niveau de la partie FI) comme base pour la modélisation de la courbe de fréquence FI du récepteur.

Le facteur spectral est représenté par le facteur de rejet hors canal (OCR – off-channel-rejection), $OCR(\Delta f)$, qui est défini par la relation suivante:

$$OCR(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df} \quad \text{dB} \quad (7)$$

où:

$P(f)$: densité spectrale de puissance du signal brouilleur (W/Hz)

$H(f)$: courbe de fréquence FI équivalente du récepteur brouillé

Δf : séparation en fréquence entre le récepteur brouillé et l'émetteur brouilleur.

On notera que l'équation (7) ne diffère pas de l'équation (2) même si les limites inférieures d'intégration sont différentes.

Il ressort à l'évidence de l'équation (7) que le facteur $OCR(\Delta f)$ dépend dans une large mesure de l'importance du chevauchement entre la bande passante du récepteur et le spectre de puissance du signal brouilleur: en effet, plus Δf augmente, plus le chevauchement diminue, ce qui se traduit par une puissance brouilleuse plus faible ou, ce qui est équivalent, par des valeurs plus élevées pour $OCR(\Delta f)$.

Le *facteur spatial* concerne le calcul de la distance rapporté à l'affaiblissement du signal; il est étroitement lié au modèle de propagation qui sera utilisé et à la distribution statistique du signal brouilleur sur la partie avant du récepteur brouillé. Il convient d'utiliser un modèle de propagation approprié recommandé par l'UIT-R.

Le modèle de propagation qui sera utilisé dans ce cas dépend bien sûr de la configuration du système ainsi que de la bande de fréquences d'exploitation, de l'environnement géographique autour de la zone de service et de la largeur de bande du système.

2.2 Critère de brouillage

Il s'agit généralement d'une relation simple basée sur ce que l'on entend par brouillage préjudiciable ou brouillage tolérable. Ce critère devrait, en principe, être lié au niveau de dégradation de qualité que le récepteur brouillé peut tolérer mais ce n'est pas réalisable ne serait-ce que parce qu'il existe de nombreux types de systèmes et de techniques différents qui ne sont peut-être pas capables de traiter les brouillages de la même façon. On adopte donc un critère plus générique basé sur un rapport de protection α (dB). On considérera que le brouillage est tolérable si l'inégalité suivante est satisfaite:

$$P_d - P_i \geq \alpha \quad (8)$$

où:

P_d : niveau du signal utile (dBW)

P_i : niveau du signal brouilleur (dBW)

α : rapport de protection (dB).

2.3 Procédure

On peut résumer comme suit la procédure d'élaboration d'une règle de séparation en fréquence et en distance:

Etape 1: Détermination du niveau du signal utile P_d (dBW) sur la partie avant du récepteur brouillé.

Etape 2: Calcul du niveau résultant de brouillage sur la partie avant du récepteur brouillé à l'aide de la formule:

$$P_i = P_t + G_r - L_p - OCR(\Delta f) \quad (9)$$

où:

P_t : puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) de l'émetteur brouilleur (dBW)

G_r : gain de l'antenne de réception par rapport à une antenne isotrope (dBi)

L_p : affaiblissement sur le trajet de propagation

$OCR(\Delta f)$: facteur de rejet hors canal pour un espacement des fréquences Δf exprimé par l'équation (7).

On se place dans l'hypothèse des valeurs OCR utilisées dans la présente Recommandation, qui a plus pour but de présenter la méthodologie des valeurs OCR que leur mise au point.

Etape 3: Utilisation de P_d et P_i des étapes 1 et 2 dans l'équation (8) pour obtenir ou calculer numériquement une relation entre la séparation en fréquence Δf et la séparation en distance d de façon à ce que le brouillage soit considéré comme tolérable.

3 Application à des systèmes de radiocommunication mobiles terrestres

Un exemple faisant intervenir deux systèmes de radiocommunication mobiles terrestres différents est donné dans le présent paragraphe pour expliquer la méthode décrite ci-dessus. Les deux systèmes considérés pourraient être numériques ou analogiques avec accès multiple par répartition dans le temps (AMRT) ou fréquence (AMRF). Nos calculs se fondent sur des gabarits d'émissions spectrales et sur des critères de sélectivité pour le récepteur; les résultats sont donc indépendants des techniques de modulation qui pourraient être utilisées par l'un ou l'autre système. Dans cet exemple, on est parti du principe que les caractéristiques de sélectivité du récepteur étaient analogues aux caractéristiques des gabarits des émissions spectrales, ce qui est censé être le cas pour des systèmes numériques.

Les hypothèses prises pour les deux systèmes sont résumées dans les Tableaux 1 et 2.

TABLEAU 1

Paramètres pris pour hypothèse dans l'exemple considéré

Niveau minimal du signal utile, P_{min}	-145 dBW
Rapport de protection requis, α	18 dB
Hauteur de l'antenne de la station de base, h_b	75 m
Fréquence d'exploitation, f	450 MHz
p.i.r.e. de la station de base	20 dBW
Gain de l'antenne de réception de la station de base	0 dBi
Permittivité relative équivalente, ϵ	30
Conductivité équivalente, σ	10^{-2} S/m

Il y a quatre scénarios de brouillage dans le cas de systèmes de radiocommunication mobiles terrestres: station de base-station de base, station de base-station mobile, station mobile-station de base et station mobile-station mobile. Pour les systèmes simplex, où la station de base et les stations mobiles émettent sur la même fréquence, les quatre scénarios de brouillage sont présents. Pour les systèmes duplex par contre où les stations mobiles et la station de base émettent sur des fréquences différentes, seuls les scénarios de brouillage station de base-station mobile et station mobile-station de base doivent être pris en considération. Aux fins de l'analyse de la distance de séparation toutefois, seul le cas le plus défavorable doit être examiné; c'est-à-dire le cas de brouillage qui exige la distance de séparation la plus grande entre les systèmes. Dans la plupart des situations, on peut partir du principe que les stations de base fonctionnent pendant près de 100% du temps et que le mode de brouillage entre stations de base est le mode dominant qui exige la distance de séparation la plus grande. C'est la raison pour laquelle d'autres modes ne sont pas pris en considération ici.

Nous allons maintenant présenter les modèles de propagation pour les systèmes de radiocommunication mobiles terrestres puis les résultats numériques pour chacun des deux combinaisons de systèmes étudiées.

3.1 Brouillage entre stations de base

Le modèle de propagation choisi pour le mode entre stations de base est le modèle de propagation par diffraction (voir la Recommandation UIT-R P.526). D'après ce modèle, l'affaiblissement sur le trajet est exprimé par la formule suivante:

$$L_{P_{bb}} = L_{FS} - L_{DIF/FS} \quad (10)$$

où:

L_{FS} : affaiblissement sur le trajet (dB) dû à l'espace libre (FS – free space)

$L_{DIF/FS}$: rapport de l'affaiblissement par diffraction sur l'affaiblissement en espace libre (dB) et défini comme suit:

$$L_{DIF/FS} = 20 \log \left(\frac{E_{DIF}}{E_{FS}} \right) = F(X) + G(Y1) + G(Y2) \quad (11)$$

où:

$F(X)$: une valeur de gain qui dépend de la distance normalisée entre les stations de base

$G(Y1), G(Y2)$: valeurs de gain qui dépendent des hauteurs d'antenne normalisées des stations de base

X : distance normalisée entre les antennes des stations de base

$Y1, Y2$: hauteurs d'antenne normalisées, définies comme suit:

$$X = 2,2 \beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (12)$$

$$Y = 9,6 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h_{1,2} \quad (13)$$

où:

$$\beta = \frac{1 + 1,6 K^2 + 0,75 K^4}{1 + 4,5 K^2 + 1,35 K^4} \quad (14)$$

K : admittance à la surface de la Terre pour la polarisation verticale:

$$K = 0,36(a_e f)^{-1/3} \left[(\epsilon = 1)^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \left[\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

où:

ϵ : permittivité relative équivalente de la Terre

σ : conductivité équivalente de la Terre (S/m)

a_e : rayon terrestre équivalent égal à 4/3 de 6 371 km

d : distance entre l'émetteur et le récepteur (km)

f : fréquence d'émission

h_1, h_2 : hauteurs respectives de l'antenne de l'émetteur et de l'antenne du récepteur (m).

$$F(X) = 11 + 10 \log(X) - 17,6 X \quad (16)$$

$$G(Y) \cong 17,6 (Y - 1,1)^{1/2} - 5 \log(Y - 1,1) - 8 \quad \text{pour } Y > 2 \quad (17)$$

$$G(Y) \cong 20 \log(Y + 0,1 Y^3) \quad \text{pour } 10 K < Y < 2 \quad (18)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K + 9 \log(Y/K) [\log(Y/K) + 1] \quad \text{pour } K/10 < Y < 10 K \quad (19)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K \quad \text{pour } Y < K/10 \quad (20)$$

où K est l'admittance normalisée à la surface de la Terre.

3.2 Résultats numériques

3.2.1 Aspects liés au spectre

On a utilisé l'équation (7) pour calculer le facteur $OCR(\Delta f)$, en fonction de Δf . Dans notre exemple, nous examinons les deux cas d'étude suivants:

Cas 1: système à 25 kHz brouillant un système à 12,5 kHz;

Cas 2: système à 12,5 kHz brouillant un système à 25 kHz.

Les hypothèses numériques pour les deux cas sont indiquées dans le Tableau 2 dans lequel le facteur $OCR(\Delta f)$ est exprimé en fonction de la séparation en fréquence Δf (kHz).

TABLEAU 2

Résultats concernant l'OCR (dB) dans le cas d'un brouillage entre deux systèmes différents

Δf (kHz)	Cas 1: $OCR(\Delta f)$ (dB)	Cas 2: $OCR(\Delta f)$ (dB)
0	$\cong 0$	$\cong 0$
12,5	26,4	29
25	57,7	58,8
37,5	57,7	59

3.2.2 Aspects liés à l'espace

A partir des paramètres indiqués dans les Tableaux 1 et 2 et en prenant pour hypothèse une distribution log normale de la puissance du signal reçu utile, un facteur de variabilité de l'emplacement de 17 dB, la couverture à 90% du système mobile terrestre est de 32 km. Le niveau correspondant de puissance du récepteur utile est:

$$P_d = P_{min} + L_{VF} = -128 \text{ dBW}$$

Par conséquent, le niveau de brouillage acceptable est: $P_d - \alpha = -146 \text{ dBW}$.

Les séparations en distance requises, D , entre stations de base pour les deux cas étudiés ont été calculées à l'aide de la méthode présentée dans la présente Recommandation. Le Tableau 3 récapitule les résultats.

TABLEAU 3

Séparation en distance requise, D (km)
et séparation en fréquence, Δf (kHz)

Δf (kHz)	Cas 1 et Cas 2: D (km)
0	107,5
12,5	72,5
25	33
37,5	33

4 Caractéristique fréquence/distance applicable à l'intermodulation

Les systèmes mobiles terrestres sont affectés non seulement par les brouillages dans le même canal ou les brouillages dans le canal adjacent mais aussi par les brouillages imputables aux produits d'intermodulation. Dans le cas d'une intermodulation du troisième ordre entre deux signaux dans le récepteur, puisque deux émetteurs de station de base interviennent dans la formation d'un produit d'intermodulation, il existe un lien entre les distances minimales acceptables qui les séparent du récepteur brouillé.

En partant de l'hypothèse que le gain d'antenne du récepteur est égal à l'affaiblissement total du récepteur, que la valeur moyenne du niveau minimal du signal utile pour obtenir une valeur de 12 dB pour le rapport SINAD en présence de bruit est de -145 dBW, qu'on utilise un affaiblissement sur le trajet en espace libre et que tous les émetteurs ont une même p.i.r.e. égale à 20 dBW on peut se servir de la caractéristique fréquence/distance applicable à la bande 410-470 MHz pour prévoir les niveaux de puissance brouilleuse, au niveau du récepteur brouillé. Dans ce modèle:

$$P = 2 P_N + P_F - 0,57 - 60 \log (\delta f) \quad (21)$$

où:

P : niveau de puissance brouilleuse résultant (dBW) dans le récepteur brouillé

P_N : puissance reçue (dBW) de l'émetteur dont la fréquence est la plus proche de la fréquence du récepteur brouillé

P_F : puissance reçue (dBW) de l'émetteur dont la fréquence est la plus éloignée de la fréquence du récepteur brouillé

δf : séparation en fréquence entre la fréquence de l'émetteur proche et celle de l'émetteur distant (MHz).

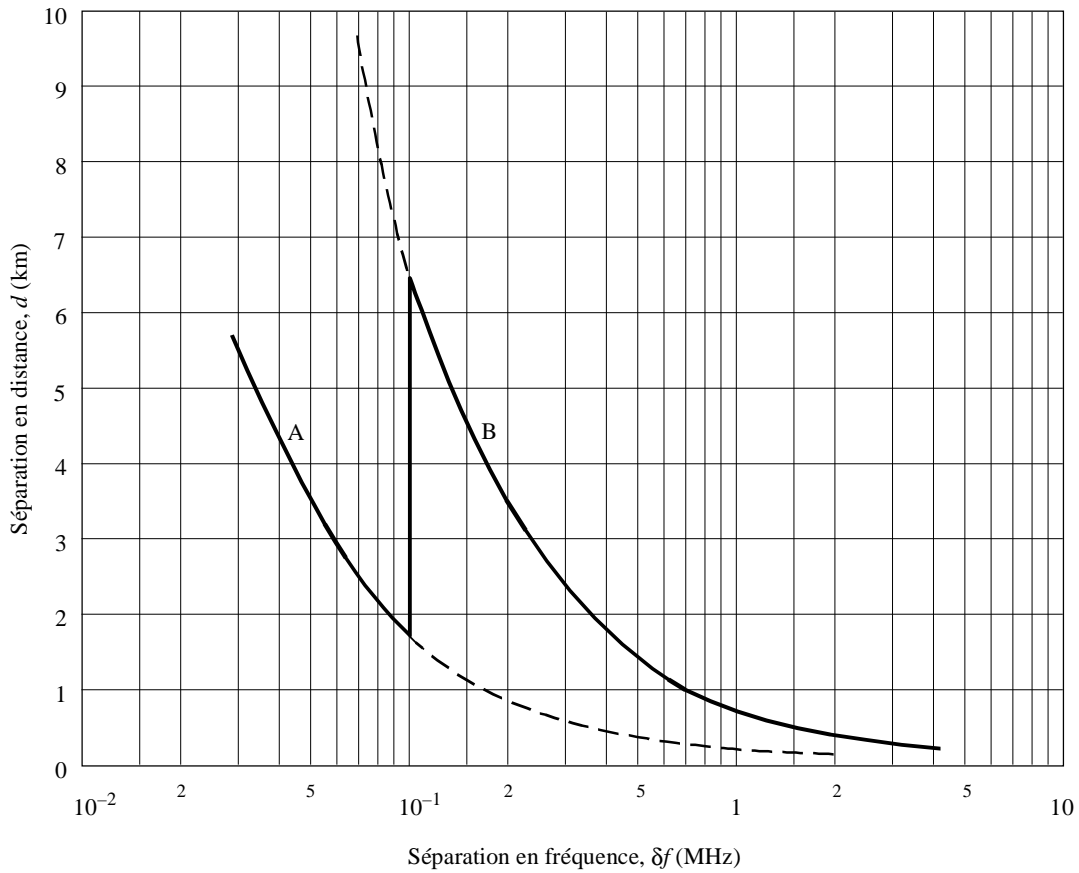
Avec une fréquence porteuse de 460 MHz, on observerait une intermodulation du troisième ordre entre deux signaux si:

$$d \cdot \delta f \leq 0,17 \quad (22)$$

où d est la distance séparant une station en service et une station que l'on se propose d'exploiter. On a supposé une marge de protection de 6 dB entre le niveau de puissance brouilleuse et le niveau minimal de puissance utile. On pourra trouver des informations utiles dans la Recommandation UIT-R SM.1134. Étant donné que la station que l'on se propose d'exploiter peut être concernée par l'apparition d'un produit d'intermodulation, soit comme récepteur brouillé soit comme émetteur distant ou comme émetteur proche, il faut, pour déterminer la caractéristique fréquence-distance décrite à la Fig. 1, utiliser la courbe B avec la courbe A. La zone au-dessus de la courbe correspond aux situations de brouillage admissibles; celle située en dessous de la courbe correspond à des situations de brouillage potentielles.

FIGURE 1

Caractéristique fréquence-distance dans le cas d'une analyse d'un brouillage d'intermodulation du troisième ordre par deux signaux au niveau du récepteur



— Courbe de sélection d'intermodulation
 Courbes A: d fonction de δf
 B: $2d$ fonction de $2\delta f$

0337-01

5 Conclusions

Pour attribuer une fréquence à une station nouvelle que l'on se propose d'exploiter, il faut tout d'abord évaluer les brouillages dans le même canal et les brouillages dans les canaux adjacents en utilisant les caractéristiques fréquence-distance appropriées. Une fois que ces caractéristiques sont respectées, les stations exploitées susceptibles d'être concernées par un brouillage d'intermodulation avec la station que l'on se propose d'exploiter sont alors examinées sur la base de la caractéristique fréquence-distance applicable à l'intermodulation. Une analyse détaillée est ensuite faite si ces caractéristiques ne sont pas respectées. Il convient de noter que les analyses figurant dans la présente Recommandation ne tiennent pas compte des obstacles artificiels ou naturels.