

RECOMMANDATION UIT-R SM.1134-1*, **

Calcul du brouillage par intermodulation dans le service mobile terrestre

(1995-2007)

Domaine d'application

La présente Recommandation sert de base pour le calcul du brouillage par intermodulation à la sortie d'un récepteur, généré par au plus trois signaux brouilleurs intenses à l'entrée du récepteur du fait de la non-linéarité de la réponse en amplitude du récepteur.

Mots clés

Brouillage par intermodulation, signaux brouilleurs, non-linéarité

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, dans la plupart des cas types, les facteurs principaux qui sont à l'origine des brouillages dans le service mobile terrestre, sont:
- les produits d'intermodulation dans la bande qui sont générés par des signaux brouilleurs de niveau élevé;
 - les rayonnements non désirés d'un émetteur dont les étages d'entrée radiofréquence sont excités par les signaux provenant d'un autre émetteur;
 - les niveaux des signaux utile et brouilleur sont des variables aléatoires;
- b) que les fréquences des signaux brouilleurs doivent être particulières pour que les produits d'intermodulation se trouvent dans la bande de fréquences utile d'un récepteur;
- c) que la probabilité d'apparition d'un brouillage par intermodulation dû à plus de deux signaux brouilleurs de niveau élevé est très faible;
- d) qu'une méthode de calcul du brouillage par intermodulation facilitera l'efficacité d'utilisation du spectre de fréquences dans le service mobile terrestre,

recommande

- 1** d'utiliser le modèle d'intermodulation dans le récepteur présenté en Annexe 1 pour le calcul du brouillage par intermodulation dans le service mobile terrestre;
- 2** de se conformer, pour le calcul du brouillage par intermodulation, à la procédure ci-après, dont le détail est présenté en Annexe 1;
- 2.1** détermination, à l'entrée du récepteur, de la valeur moyenne et de la dispersion de la puissance d'un signal aléatoire utile;
- 2.2** détermination, à l'entrée du récepteur, de la valeur moyenne et de la dispersion de la puissance d'un signal aléatoire brouilleur dû à l'intermodulation;

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention de la Commission d'études 5 des radiocommunications.

** La Commission d'études 1 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en 2018 et en 2019, conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

2.3 détermination de la probabilité pour que les produits d'intermodulation générés dans le récepteur lui-même et ceux générés par intermodulation dans l'émetteur soient présents pendant la réception;

3 de déterminer les zones affectées par le brouillage par intermodulation et l'espacement géographique nécessaire entre émetteurs et récepteurs brouilleurs sur la base d'une valeur donnée de la probabilité de brouillage, comme décrit en Annexe 1.

Annexe 1

Modèles d'intermodulation

La présente Annexe décrit deux modèles d'intermodulation; le modèle d'intermodulation dans le récepteur et le modèle d'intermodulation dans l'émetteur. Elle comporte cinq paragraphes.

Le § 1 expose la formule générale pour le calcul du brouillage par intermodulation dans le récepteur. Le § 2 décrit la procédure de mesure de l'intermodulation dans le récepteur. Le § 3 présente une procédure d'évaluation du brouillage par intermodulation en réception au moyen de la formule générale. Le § 4 donne la formule de calcul du brouillage par intermodulation dans l'émetteur. Le § 5 décrit le calcul des probabilités de brouillage par intermodulation dans le récepteur et dans l'émetteur.

1 Modèle d'analyse d'intermodulation dans le récepteur

La puissance de brouillage par intermodulation du troisième ordre entre deux signaux est donnée par la formule suivante (Rapport 522-2 de l'ex-CCIR, Düsseldorf, 1990):

$$P_{ino} = 2(P_1 - \beta_1) + (P_2 - \beta_2) - K_{2,1} \quad (1)$$

où:

P_1 et P_2 : puissances des signaux brouilleurs de fréquences f_1 et f_2 , respectivement

P_{ino} : puissance du produit d'intermodulation du troisième ordre de fréquence f_0 ($f_0 = 2f_1 - f_2$)

$K_{2,1}$: coefficient d'intermodulation du troisième ordre, il peut être calculé à partir des mesures de l'intermodulation du troisième ordre ou obtenu à partir des spécifications des équipements

β_1 et β_2 : paramètres de sélectivité en fréquence RF aux écarts de fréquences Δf_1 et Δf_2 , respectivement, par rapport à la fréquence de fonctionnement f_0 .

Les valeurs de β_1 et β_2 peuvent être obtenues, par exemple, à partir de l'équation de calcul de l'affaiblissement d'un signal légèrement décalé par rapport à la fréquence d'accord.

$$\beta(\Delta f) = 60 \log \left[1 + \left(\frac{2 \Delta f}{B_{RF}} \right)^2 \right] \quad (2)$$

où B_{RF} est la largeur de bande RF du récepteur.

Il est utile de noter que pour une série particulière de mesures d'intermodulation du troisième ordre dans le cas de récepteurs analogiques de radiocommunication mobiles terrestres fonctionnant dans les bandes des ondes métriques et décimétriques inférieures, l'équation (1) devient [McMahon, 1974]:

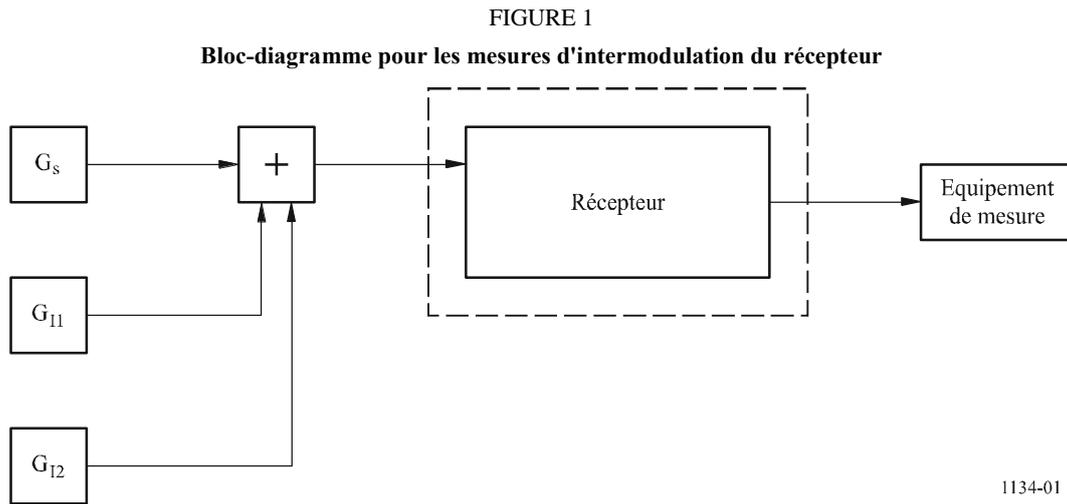
$$P_{ino} = 2P_1 + P_2 + 10 - 60 \log(\alpha f) \quad (3)$$

où αf est l'écart moyen en fréquence (MHz) et est égal à:

$$\frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2}$$

2 Caractéristiques du brouillage par intermodulation dans le récepteur

Sur la Fig. 1, G_s est le générateur du signal utile. G_{I1} et G_{I2} sont les générateurs des signaux brouilleurs qui sont à l'origine du produit d'intermodulation dans le récepteur. Ces signaux sont appliqués à l'entrée du récepteur.



Lors de la mesure de la caractéristique de l'intermodulation dans le récepteur, deux signaux brouilleurs de niveau égal produits par les générateurs G_{I1} et G_{I2} et un signal utile de niveau P_{sr} , produit par le générateur G_s sont appliqués à l'entrée du récepteur. Le désaccord de fréquence du premier signal brouilleur est choisi égal à Δf_0 , et celui du deuxième signal brouilleur à $2\Delta f_0$ environ. Le niveau des deux signaux brouilleurs à l'entrée du récepteur est augmenté jusqu'à ce que la qualité de la réception du signal utile ne passe pas en dessous d'une valeur spécifiée. On obtient alors la valeur de la sensibilité $P_I(IM)$ du récepteur à l'intermodulation. La qualité de la réception dépend indubitablement du rapport de protection dans le même canal A.

Noter que:

P_{sr} : sensibilité du récepteur radioélectrique (dBW)

$P_I(IM)$: sensibilité à l'intermodulation, mesurée pour le récepteur (dBW).

D'où, selon l'équation (1):

$$P_{ino} = 3P_I(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - K_{2,1} \quad (4)$$

Cette valeur est reliée à P_{sr} comme suit:

$$P_{sr} - A = P_{ino} \quad (5)$$

$K_{2,1}$ est donc:

$$K_{2,1} = 3P_I(IM) - 2\beta(\Delta f_0) - \beta(2\Delta f_0) - P_{sr} + A \quad (6)$$

3 Méthode d'analyse de l'intermodulation dans le récepteur

3.1 Modèle général

Des brouillages causés par les produits d'intermodulation (IMP, *intermodulation products*) dans le récepteur apparaissent lorsque les deux conditions suivantes sont satisfaites:

$$F_R - 0,5 \cdot B_{IF} \leq f_{IMP} \leq F_R + 0,5 \cdot B_{IF} \quad (7)$$

et

$$P_s - P_{ino} < A \quad (8)$$

où:

f_{IMP} : fréquence des IMP considérés

F_R : fréquence d'accord du récepteur

B_{IF} : bande passante de l'étage FI ou largeur de bande du filtre en bande de base s'il n'y a pas d'étage FI

P_s : puissance d'un signal utile (dBm)

P_{ino} : puissance équivalente du brouillage causé par les IMP, recalculée à l'entrée du récepteur (dBm)

A : rapport de protection dans le même canal.

P_{ino} est donnée par l'équation (1). Compte tenu de l'équation (1), la condition (8) peut être formulée comme suit:

$$2 P_1 + P_2 - P_s > R_0 \quad (9)$$

où:

$$R_0 = -A + 2\beta_1 + \beta_2 + K_{2,1} \quad (10)$$

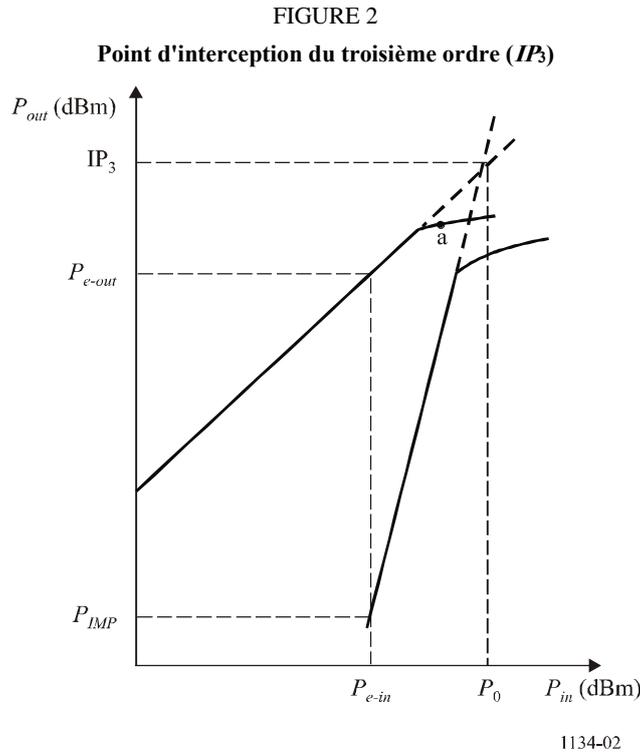
3.2 Méthode de calcul des produits d'intermodulation fondée sur des points d'interception

3.2.1 Lorsqu'il est impossible de mesurer le facteur $K_{2,1}$ du récepteur pour déterminer le brouillage causé par les IMP, il est recommandé de tirer parti de paramètres tels que les points d'interception du i ème ordre (IP_i), où $i = 2, 3$ et 5 , et les facteurs IM_i des mêmes ordres pour les microcircuits qui sont utilisés dans les étages d'entrée (présélecteurs et mélangeurs) des récepteurs modernes. Les paramètres IP_i et IM_i sont donnés dans les spécifications applicables.

Le paramètre le plus connu est le paramètre IP_3 ou «point d'interception du troisième ordre» (Manuel de l'UIT sur le contrôle du spectre radioélectrique, 2002, § 6.5); il s'agit d'un niveau théorique, auquel le niveau des IMP du troisième ordre est égal aux différents niveaux des signaux entrants (deux signaux égaux générant des IMP aux fréquences $2f_1 - f_2$ et $2f_2 - f_1$), recalculé à la sortie d'un élément non linéaire (voir la Fig. 2).

Les paramètres IP_i caractérisent le degré de linéarité des étages d'entrée du récepteur au sens de leur capacité à générer des IMP des ordres correspondants. Plus les niveaux des paramètres IP_i sont élevés, meilleure est la linéarité du récepteur et plus sa plage dynamique est large et, par conséquent, plus les niveaux des signaux entrants pour lesquels des IMP sont générés, sont élevés, meilleure est la protection du récepteur contre les brouillages causés par les IMP.

Les facteurs IM_i caractérisent la susceptibilité du récepteur aux IMP des ordres correspondants. Ils représentent la relation entre le niveau des IMP à la sortie du récepteur et le niveau des signaux entrants à son entrée (deux signaux égaux générant des IMP à la sortie).



Le Tableau 1 présente les valeurs moyennes et les limites de variation des paramètres des microcircuits utilisés dans les étages d'entrée des récepteurs (présélecteurs et mélangeurs), fournies par les fabricants les plus connus. Les valeurs individuelles de ces paramètres peuvent être obtenues dans les spécifications techniques des équipements appropriés. Le paramètre G dans le Tableau 1 représente le facteur d'amplification du présélecteur, et l'unité dBc désigne les décibels par rapport à la puissance de la porteuse non modulée de l'émission.

TABLEAU 1

Paramètres des microcircuits utilisés dans les étages d'entrée des récepteurs

G (dB)	IP_3 (dBm)	IM_2 (dBc)	IM_3 (dBc)	IM_5 (dBc)
12 ± 5	28 ± 5	-24 ± 5	-30 ± 5	-35 ± 5

Les formules permettant de calculer les composantes des IMP qui peuvent être situées dans la bande passante FI du récepteur sont données dans le Tableau 2, qui présente:

- f_{IMP} : fréquences des IMP des 2^{ème}, 3^{ème} et 5^{ème} ordres générés par deux ou trois signaux entrants
- P_{e-in} : puissance du signal entrant équivalent à l'entrée du récepteur – deux ou trois signaux entrants à l'entrée du récepteur avec des niveaux égaux P_{e-in} génèrent les mêmes IMP que les signaux entrants avec des niveaux différents P_1, P_2, P_3
- P_{IMP} : les niveaux des IMP des 2^{ème}, 3^{ème} et 5^{ème} ordres résultant de deux ou trois signaux entrants à l'entrée du récepteur, où P_1, P_2, P_3 désignent les puissances des signaux entrants aux fréquences f_1, f_2, f_3 correspondantes. Les valeurs de P_{IMP} sont exprimées en fonction de IP_i et IM_i .

TABLEAU 2

**Brouillages causés par les IMP des 2^{ème}, 3^{ème} et 5^{ème} ordres
pour 2 ou 3 signaux brouilleurs entrants**

Fréquence, f_{IMP}	$f_g \pm f_h$ ($f_g > f_h$)	$2f_g - f_h$	$f_k + f_l - f_m$	$3f_g - 2f_h$	$2f_k - 2f_l + f_m$
Ordre et type de produits	2 (1; 1)	3 (2; 1)	3 (1; 1; 1)	5 (3; 2)	5 (2; 2; 1)
P_{e-in} (dBm)	$(P_g + P_h)/2$	$(2P_g + P_h)/3$	$(P_k + P_l + P_m)/3$	$(3P_g + 2P_h)/5$	$(2P_k + 2P_l + P_m)/5$
P_{IMP} (dBm)	$2(P_{e-in} + G) - IP_2$	$3(P_{e-in} + G) - 2 \cdot IP_3$	$3(P_{e-in} + G) - 2 \cdot IP_3 + 6$	$5(P_{e-in} + G) - 4 \cdot IP_5$	$5(P_{e-in} + G) - 4 \cdot IP_5 + 9,5$
	$IM_2 + P_{e-in}$	$IM_3 + P_{e-in}$	$IM_3 + P_{e-in} + 6$	$IM_5 + P_{e-in}$	$IM_5 + P_{e-in} + 9,5$

Dans le Tableau 2, pour les fréquences f_{IMP} et pour les niveaux P_{e-in} des IMP, les divers indices sont déterminés comme suit.

Pour deux signaux entrants: chacun des indices g et h accepte l'une des deux valeurs 1 et 2, la condition suivante devant être remplie:

$$g + h = 3$$

Pour trois signaux entrants: chacun des indices k , l et m accepte l'une des trois valeurs 1, 2 et 3, la condition suivante devant être remplie:

$$k + l + m = 6$$

Les niveaux P_{e-in} des diverses composantes des IMP devraient être calculés pour les mêmes distributions d'indices que celles utilisées pour les fréquences f_{IMP} de ces composantes.

Le Tableau 2 indique également le nombre de fréquences f_{IMP} des composantes et le nombre possible de niveaux P_{e-in} différents des IMP des divers ordres pour différents niveaux de signaux entrants. Il ressort des formules de P_{e-in} que pour différents niveaux de signaux entrants, différentes composantes des IMP à la sortie pour le même ordre ont également divers niveaux qui se prêtent au calcul par cette méthode.

En remplaçant les valeurs de P_{IMP} par leurs expressions données dans le Tableau 2, on obtient les relations suivantes entre les niveaux IP_i et IM_i :

$$IP_2 = P_{e-in} + 2G - IM_2$$

$$IP_3 = P_{e-in} + 0,5(3G - IM_3)$$

$$IP_5 = P_{e-in} + 0,25(5G - IM_5)$$

Le niveau équivalent des IMP recalculé à l'entrée du récepteur P_{ino} vaut:

$$P_{ino} = P_{IMP} - G$$

Pour atténuer les signaux brouilleurs entrants, des filtres diplexeur ou passe-bande sont généralement installés à l'entrée des récepteurs avant les présélecteurs. Les paramètres des filtres (caractéristiques de forme trapézoïdale) sont les suivants: la bande passante B_{RF1} , la frontière de la bande d'affaiblissement B_{RF2} et l'affaiblissement des signaux entrants $\beta(\Delta f)$ en dehors de la bande passante (pour $\Delta f > 0,5 \cdot B_{RF2}$, l'affaiblissement est considéré comme constant et égal à L_F dB).

Dans ce cas, les affaiblissements d'insertion du filtre (dB) sont les suivants:

$$\beta(\Delta f) = \begin{cases} 0 & \text{pour } |\Delta f| \leq 0,5 \cdot B_{RF1} \\ a \cdot |\Delta f| + c & \text{pour } 0,5 \cdot B_{RF1} \leq |\Delta f| \leq 0,5 \cdot B_{RF2} \\ L_F & \text{pour } 0,5 \cdot B_{RF2} \leq |\Delta f| \end{cases}$$

où: $|\Delta f|$ – décalage de fréquence du signal entrant à l'entrée du récepteur

$$a = L_F / 0,5 (B_{RF2} - B_{RF1})$$

$$c = -0,5 \cdot a \cdot B_{RF1}$$

La puissance du signal à l'entrée du présélecteur P_j à la fréquence f_j ($j = 1; 2; 3$) vaut:

$$P_j = P_{j-in} - \beta(\Delta f)$$

où P_{j-in} : puissance du signal entrant à l'entrée du récepteur.

3.2.2 Etapes de la procédure de calcul du brouillage causé par les IMP

- Etape 1:* Détermination de l'affaiblissement des signaux entrants à l'entrée du récepteur résultant des filtres d'entrée $\beta(\Delta f_j)$, $j = 1; 2; 3$.
- Etape 2:* Calcul des niveaux des signaux entrants à l'entrée du présélecteur P_j .
- Etape 3:* Détermination des niveaux des IMP à la sortie du mélangeur P_{IMP} .
- Etape 4:* Estimation du niveau équivalent des IMP recalculé à l'entrée du récepteur P_{ino} .
- Etape 5:* Calcul du rapport signal/brouillage à l'entrée du récepteur R .
- Etape 6:* Comparaison du rapport signal/brouillage R avec le rapport de protection A pour déterminer les conditions de compatibilité du récepteur avec d'autres systèmes radio-électroniques dans l'environnement électromagnétique considéré.

3.2.3 Exemple de calculs

Supposons qu'on veuille calculer le brouillage causé par les IMP à la fréquence $f_1 + f_2 - f_3$ dans un récepteur et estimer son effet préjudiciable.

Données d'entrée: $IP_3 = 24$ dBm; $G = 15$ dB; $P_{1-in} = -50$ dBm; $P_{2-in} = -10$ dBm; $P_{3-in} = -15$ dBm; $P_s = -114$ dBm; $A = 9$ dB; $L_F = 30$ dB.

Considérons que les décalages de fréquence des signaux entrants à l'entrée du récepteur $|\Delta f_j| = |F_R - f_j|$ sont:

$$|\Delta f_1| \leq 0,5 \cdot B_{RF1}; |\Delta f_2| > 0,5 \cdot B_{RF2} \text{ et } |\Delta f_3| > 0,5 \cdot B_{RF2},$$

autrement dit un signal entrant est situé dans la bande passante du filtre d'entrée du récepteur et les deux autres signaux entrants sont situés en dehors de la bande passante.

Dans ce cas:

$$\beta(\Delta f_1) = 0; \beta(\Delta f_2) = \beta(\Delta f_3) = 30 \text{ dB}$$

$$P_j = P_{j-in} - \beta(\Delta f_j); P_1 = -50 \text{ dBm}; P_2 = -40 \text{ dBm}; P_3 = -45 \text{ dBm}$$

Calculons P_{e-in} et P_{IMP} à l'aide des équations du Tableau 2:

$$\begin{aligned} P_{e-in} &= (-50 - 40 - 45)/3 = -45 \text{ dBm} \\ P_{IMP} &= 3(-45 + 15) - 2 \cdot 24 + 6 = -132 \text{ dBm} \\ P_{ino} &= P_{IMP} - G = -132 - 15 = -147 \text{ dBm} \\ R &= P_s - P_{ino} = -114 - (-147) = 33 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$R > A$ et, par conséquent, d'après l'équation (8), la compatibilité est assurée.

4 Puissance des produits d'intermodulation dans l'émetteur

La puissance P_i des produits d'intermodulation apparaissant dans l'émetteur et présents ensuite à l'entrée du récepteur peut s'écrire comme suit:

$$P_i = P'_2 - \beta_{12} - \beta_{10} - K_{(2),1} - L_{10} \quad (11)$$

où:

- P'_2 : puissance de l'émetteur brouilleur (à la fréquence f_2) au niveau des bornes de sortie de l'émetteur brouillé (à la fréquence f_1), dans lequel les produits d'intermodulation apparaissent (dBW)
- β_{12}, β_{10} : affaiblissement apporté par les circuits de sortie et d'antenne de l'émetteur brouillé fonctionnant à la fréquence f_1 , au signal émis par l'émetteur brouilleur fonctionnant à la fréquence f_2 , et au produit d'intermodulation à la fréquence f_0 , respectivement (dB)
- $K_{(2),1}$: affaiblissement de conversion d'intermodulation dans l'émetteur (dB) qui est différent de l'affaiblissement $K_{2,1}$ dans l'équation (1)
- L_{10} : affaiblissement du produit d'intermodulation sur le trajet entre l'émetteur de fréquence f_1 et le récepteur (dB).

Un brouillage causé par l'intermodulation dans l'émetteur apparaît lorsque:

$$P_s - P_i < A \quad (12)$$

où A est le rapport de protection dans le même canal.

5 Probabilité de brouillage

5.1 Probabilité de brouillage par intermodulation dans le récepteur

Les Recommandations UIT-R P.370, UIT-R P.1057 et UIT-R P.1146 mettent l'accent sur le fait que, en raison des évanouissements, les niveaux des signaux utile et brouilleur sont des variables aléatoires suivant une distribution log-normale. Ainsi, le terme de gauche de la condition (9), exprimé en dBW, représente la somme de variables normales aléatoires indépendantes et constitue une variable normale aléatoire. La moyenne \bar{R} et la dispersion σ_R^2 de la variable aléatoire $R = 2P_1 + P_2 - P_s$ sont égales, respectivement, à:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= 2P_{1m} + P_{2m} - P_{sm} \\ \sigma_R^2 &= 4\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_s^2 \end{aligned}$$

où:

P_{1m}, P_{2m}, P_{sm} sont les moyennes et $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_s^2$ sont les dispersions des niveaux de puissance des signaux utile et brouilleur à l'entrée du récepteur (déterminées sur la base des données des Recommandations UIT-R P.370, UIT-R P.1057 et UIT-R P.1146).

5.2 Probabilité de brouillage par intermodulation dans l'émetteur

En tenant compte de l'équation (11), la condition (12) devient:

$$P'_2 - P_s - L_{10} > T_0 \quad (13)$$

où:

$$T_0 = \beta_{12} + \beta_{10} + K_{(2),1} - A$$

La moyenne \bar{T} et la dispersion σ_T^2 de la variable aléatoire:

$$T = P'_2 - P_s - L_{10}$$

sont égales, respectivement à:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= P'_{2m} - P_{sm} - L_{10m} \\ \sigma_T^2 &= \sigma_2^2 + \sigma_s^2 + \sigma_1^2 \end{aligned}$$

où:

P'_{2m}, P_{sm}, L_{10m} : moyennes

$\sigma_2^2, \sigma_s^2, \sigma_1^2$: dispersions des variables aléatoires P'_2, P_s, L_{10} .

5.3 Probabilité des produits d'intermodulation

La probabilité α que les produits d'intermodulation générés dans le récepteur lui-même et par intermodulation dans l'émetteur (conditions (9) et (13) respectivement) apparaissent durant la réception est égale à:

$$\alpha = \int_x^\infty e^{-t^2/2} \frac{dt}{\sqrt{2\pi}} \quad (14)$$

$x = (R_0 - \bar{R}) / \sigma_R$: caractérisant la probabilité d'apparition de produits d'intermodulation dans les récepteurs (condition (9))

$x = (T_0 - \bar{T}) / \sigma_T$: caractérisant la probabilité de brouillage dû aux produits d'intermodulation apparaissant dans les émetteurs (condition (13)).

Pour déterminer les zones touchées par les brouillages par intermodulation sur la base d'une valeur donnée α de la probabilité de brouillage, on détermine d'abord la valeur de x à partir de l'équation (14). Puis, pour une valeur connue de P_{sm} on peut déterminer les valeurs admises de P_{1m} et P_{2m} (ou P'_{2m} et L_{10m}) et les espacements géographiques nécessaires correspondants des émetteurs brouilleurs et des récepteurs, dont dépendra la zone touchée par les brouillages.