

## RECOMMANDATION UIT-R SM.1271-0\*

## UTILISATION EFFICACE DU SPECTRE ET MÉTHODES PROBABILISTES

(1997)

**Domaine d'application**

La présente Recommandation sert de base concernant les critères de qualité de fonctionnement élaborés à partir de méthodes probabilistes afin de parvenir à une plus grande efficacité d'utilisation du spectre.

**Mots clés**

Probabilité de brouillage, utilisation du spectre, modèle de brouillage, sur la même fréquence, critères de brouillage

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que la technologie des télécommunications a progressé rapidement au cours de la dernière décennie et que les administrations ont utilisé de plus en plus les services de radiocommunication, ce qui a créé de nouveaux besoins de fréquences radioélectriques;
- b) que le partage des fréquences est un des éléments importants qui interviennent dans l'efficacité d'utilisation du spectre;
- c) que de nombreux principes directeurs et critères de partage sont fondés sur les hypothèses les plus défavorables concernant les brouillages;
- d) qu'une plus grande efficacité d'utilisation du spectre peut dépendre de l'adoption de critères de qualité de fonctionnement élaborés à partir de méthodes probabilistes;
- e) qu'il serait nécessaire d'avoir les caractéristiques statistiques des signaux utiles et brouilleurs pour étudier les différents cas de partage des fréquences et évaluer l'utilisation du spectre par rapport à des normes de qualité de fonctionnement,

*recommande*

**1** aux administrations d'envisager d'adopter une méthode probabiliste dans l'étude des brouillages et de leur incidence sur la qualité de fonctionnement des systèmes pour parvenir à une meilleure efficacité dans l'utilisation du spectre;

**2** d'adopter une méthode probabiliste dans l'étude des brouillages imputables à plusieurs sources et d'utiliser des techniques comme celles décrites à l'Annexe 1 pour évaluer tous les risques de brouillage liés à l'exploitation d'un nouveau système et pour calculer la probabilité de brouillage station de base-station mobile et station mobile-station de base dans un système duplex mobile terrestre, la méthode qui figure dans l'Annexe 2 doit être utilisée.

NOTE 1 – D'autres exemples seront présentés pour expliquer comment utiliser les méthodes probabilistes pour évaluer les caractéristiques des signaux utiles et brouilleurs, l'objectif étant d'améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre.

---

\* 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.

## ANNEXE 1

(Exemple 1)

## Calcul de la tension reçue due aux rayonnements provenant de plusieurs systèmes fonctionnant sur la même fréquence

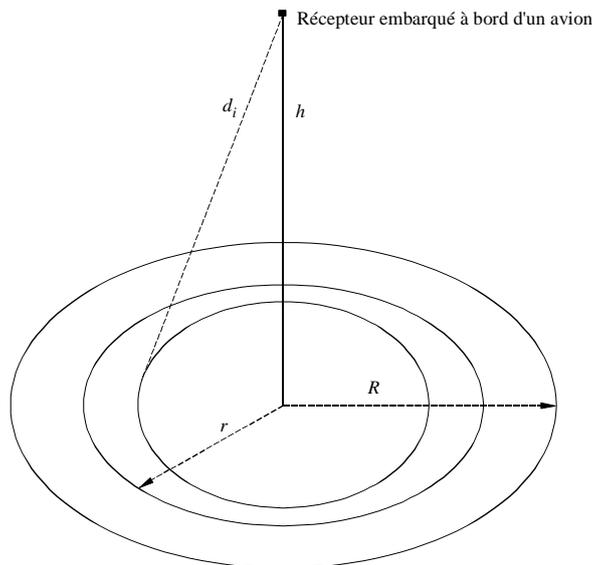
### 1 Introduction

Dans de nombreux scénarios de partage des fréquences on peut observer un brouillage. Dans certains cas, le nombre et l'emplacement des sources brouilleuses possibles ne sont pas connus (lorsque le brouillage est causé par des émetteurs du service mobile terrestre); il est alors possible d'évaluer les brouillages en utilisant des méthodes probabilistes.

Dans l'exemple qui nous intéresse, la méthode décrite permet de montrer clairement comment calculer le niveau des brouillages imputables à plusieurs sources en utilisant des méthodes probabilistes. Dans un souci de simplicité, prenons le cas d'un récepteur embarqué à bord d'un avion survolant une zone urbaine. Dans ce cas particulier, on peut négliger les effets de la courbure de la Terre. On supposera que l'antenne du récepteur est une antenne doublet demi-onde présentant un diagramme de rayonnement en cosinus. On suppose que les  $N$  sources brouilleuses sont uniformément réparties dans la zone supposée circulaire de rayon  $R$  (voir la Fig. 1).

FIGURE 1

Récepteur embarqué à bord d'un avion survolant une zone urbaine;  
sources de brouillage uniformément réparties



1271-01

L'objectif sera d'obtenir une expression simple de la fonction de densité de probabilité de la tension efficace reçue aux bornes de l'antenne de réception. Cet exemple repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices:

- le nombre d'émetteurs brouilleurs  $N$  est important;
- les émetteurs brouilleurs sont répartis uniformément, (d'un point de vue géographique) dans une zone circulaire de rayon  $R$ ;
- tous les émetteurs brouilleurs ont la même puissance rayonnée;
- le récepteur, qui est brouillé par tous les mobiles, est embarqué à bord d'un avion à une altitude  $h$ , directement au-dessus du centre de la zone circulaire qui contient toutes les sources de brouillage;
- on adopte en première approximation la loi de propagation en espace libre pour représenter la loi de propagation depuis un système brouilleur jusqu'au récepteur aéroporté.

## 2 Méthode

Si l'on considère que le récepteur aéroporté survole la zone urbaine, la tension aux bornes de l'antenne de réception s'écrit comme suit:

$$V = \sum_{i=1}^N C_A A(d_i) K_i e^{j\varphi_i} \quad (1)$$

$C_A$  est la relation entre l'intensité du champ au niveau d'une antenne et la tension entre bornes lorsqu'on l'adapte à une impédance de charge résistive de  $50 \Omega$ :

$$C_A = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{50}{73}} \quad (2)$$

$A(d_i)$  est le facteur d'antenne complexe qui est lié à la distance  $d_i$  séparant le système brouilleur et l'antenne par la relation suivante:

$$A(d_i) = a(d_i) e^{j\alpha(d_i)} \quad (3)$$

$K_i$  et  $\varphi_i$  sont respectivement l'amplitude et la phase du champ au niveau de l'antenne de réception dues au brouilleur  $i$ ; ils sont définis comme suit:

$$K_i = E_L \left( \frac{d_L}{d_i} \right) K_s \quad (4)$$

où  $E_L$  est la limite de l'intensité du champ spécifiée (mV/m) à une distance  $d_L$  (m) par rapport à une source de brouillage unique.  $K_s$  est le facteur du diagramme de rayonnement du système brouilleur qui tient compte de la réduction du niveau moyen par rapport au niveau maximal.  $d_i$  est la distance (m) qui sépare le système brouilleur de l'antenne.

$$\varphi_i = \varphi(0) + \frac{2\pi d_i}{\lambda} \quad (5)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\varphi(0)$  la phase initiale du signal lorsqu'il quitte la source  $i$ .

L'équation (1) peut être réécrite comme suit:

$$V = \sum_{i=1}^N v_i e^{j\psi_i} \quad (6)$$

où:

$$v_i = C_A E_L K_s d_L \frac{a(d_i)}{d_i} \quad (7)$$

$$\psi_i = \varphi(0) + \frac{2\pi d_i}{\lambda} + \alpha(d_i) \quad (8)$$

où  $\psi_i$  est uniformément réparti entre 0 et  $2\pi$ .

On peut facilement montrer que  $|v|$  suit une distribution de Rayleigh telle que:

$$p(|v|) = \frac{|v|}{\xi^2} \exp\left[-\frac{|v|^2}{2\xi^2}\right] \quad (9)$$

où  $\xi^2 = (N/2) \cdot E(v_i^2)$  est la valeur d'espérance de  $v_i^2$ . La tension efficace est  $v_{eff} = \sqrt{2}\xi$ .

A partir des variables déjà indiquées, il est possible de calculer la tension efficace comme suit:

$$v_{eff} = \sqrt{N} C_A E_L K_S d_L \sqrt{E \left[ \left( \frac{a(d_i)}{d_i} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

Il est possible de calculer le facteur antenne/distance:

$$\sqrt{E \left[ \left( \frac{a(d_i)}{d_i} \right)^2 \right]}$$

dû à l'effet combiné du diagramme de rayonnement de l'antenne de réception et de la distribution des sources de brouillage dans une zone donnée, en tenant compte de la densité de probabilité des sources brouilleuses. Si, dans un souci de simplicité, on suppose une distribution uniforme (voir la Fig. 1) la fonction de densité de probabilité de localisation  $r$  des sources brouilleuses est donnée par:

$$p(r) = \frac{(2\pi r)}{(\pi R^2)} = 2 \frac{r}{R^2} \quad (11)$$

Etant donné que la courbure de la Terre est négligeable, la distance qui sépare le système brouilleur de l'antenne de réception est donnée par:

$$d_i = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (12)$$

Etant donné également que nous avons pris pour hypothèse une loi en cosinus pour l'antenne,

$$a(d_i) = h/d_i \quad (13)$$

le facteur d'antenne est donné par:

$$a(d_i) / d_i = h / d_i^2 = h / (r^2 + h^2) \quad (14)$$

dont la valeur attendue est:

$$E \left[ \left( \frac{a(d_i)}{d_i} \right)^2 \right] = \int_0^R \left( \frac{h}{r^2 + h^2} \right)^2 \frac{2r}{R^2} dr = \frac{1}{R^2 + h^2} \quad (15)$$

L'expression ci-dessus permet de calculer le rayonnement conjugué de plusieurs sources sur une zone relativement petite, par exemple de petites villes où la courbure de la Terre peut être négligée. Pour de grandes villes, lorsque la courbure de la Terre ne peut pas être négligée, la formule est relativement plus complexe.

### 3 Conclusion

L'exemple considéré nous permet de constater que pour évaluer l'effet de plusieurs sources de brouillage dont on ne connaît pas l'emplacement, il faut utiliser des méthodes probabilistes et adopter les hypothèses présentées dans l'introduction. Les deux variables aléatoires, à savoir la tension reçue et le facteur d'antenne, doivent être prises en compte sous leur forme d'espérance. Les équations (10) et (15) sont des exemples de formules permettant de calculer la tension de brouillage à partir de l'intégration d'un nombre relativement grand de sources brouilleuses.

## ANNEXE 2

(Exemple 2)

## Méthode de calcul de la probabilité de brouillage station de base-station mobile et station mobile-station de base dans un système duplex mobile terrestre

### 1 Introduction

Dans les systèmes mobiles terrestres, la distance de réutilisation des fréquences entre stations de base exploitées dans le même canal est traditionnellement déterminée à partir du niveau acceptable de brouillage pour la station mobile brouillée. Il s'agit d'une méthode «déterministe» dans laquelle la probabilité de brouillage n'est pas prise en considération. Le calcul de la distance de réutilisation des fréquences est donc basé sur des scénarios correspondant au cas le plus défavorable. A l'évidence, ces systèmes ne fonctionnent pas souvent dans de tels scénarios, d'où une inefficacité d'utilisation du spectre.

La méthode présentée ici est une méthode «probabiliste». Elle définit une probabilité de brouillage qui dépend de la distance séparant deux stations de base exploitées dans le même canal. La distance de réutilisation des fréquences peut donc être déterminée à partir d'un niveau acceptable de probabilité de brouillage, fonction des paramètres propres aux systèmes et également du facteur de réjection hors canal (OCR) qui mesure la capacité d'un récepteur de supprimer les brouillages. Ce paramètre a été défini dans la Recommandation UIT-R SM.337.

La probabilité de brouillage est définie comme étant le rapport de la partie de la zone de couverture qui subirait des brouillages à la zone de couverture totale. Dans l'exemple qui nous intéresse, on suppose que la distribution des stations mobiles dans la zone de couverture brouillée et dans la zone de couverture brouilleuse est uniforme. On pourrait penser que cette probabilité décroît au fur et à mesure que la distance séparant les stations de base augmente. L'analyse montre que ce n'est pas toujours le cas. Pour certaines valeurs du paramètre OCR, la probabilité de brouillage va en fait augmenter puis décroître au fur et à mesure que la distance augmente. Si l'on utilise les courbes de probabilité, il est possible de choisir une plus petite distance de séparation pour une probabilité acceptable de brouillage, ce qui permet d'accroître l'efficacité d'utilisation du spectre. Cette méthode de calcul de la probabilité de brouillage ne dépend pas de la technique de modulation utilisée. Elle peut s'appliquer à des systèmes de radiocommunication analogiques ou numériques ayant des largeurs de canaux différentes.

### 2 Calcul des critères de brouillage

Dans l'exemple considéré, on donne une méthode permettant de calculer la probabilité de brouillage causé à un système duplex mobile terrestre. Le brouillage station de base-station mobile et le brouillage station mobile-station de base sont traités séparément. Tout d'abord il faut définir un critère permettant de déterminer s'il y a ou non brouillage préjudiciable.

Dans le critère de brouillage, on suppose qu'il y a brouillage si la différence entre le niveau de la puissance brouilleuse  $P_i$  et le niveau de la puissance utile  $P_r$  est supérieure à un certain rapport de protection,  $\varepsilon$  (dB) (c'est-à-dire si  $P_i - P_r > \varepsilon$ ). Si l'on utilise la 4<sup>e</sup> loi de puissance, il est possible d'exprimer les niveaux de puissance sous forme de distances de sorte que le critère de brouillage devient  $d_2 < k d_1$  où les paramètres sont définis comme suit:

$d_1$ : distance (km) entre l'émetteur utile et le récepteur utile

$d_2$ : distance (km) entre l'émetteur brouilleur et le récepteur utile

$k$ : facteur de critère de brouillage donné par l'expression:

$$k = 10^{\frac{\varepsilon - 20 \log \left( \frac{h_{DTx}}{h_{ITx}} \right) - 10 \log \left( \frac{G_{DTx}}{G_{ITx}} \right) - P_{iDTx} + P_{iITx} - OCR}{40}}$$

où:

$h$ : hauteur de l'antenne (m)

$G$ : gain d'antenne isotrope (dB)

$P_i$ : puissance émise (dBW)

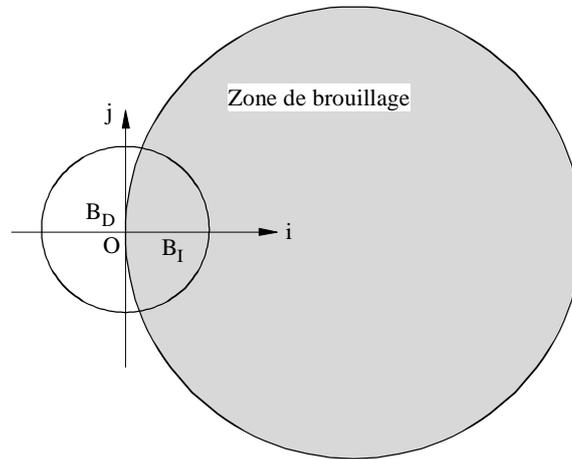
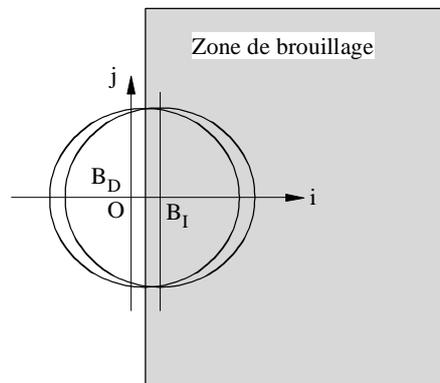
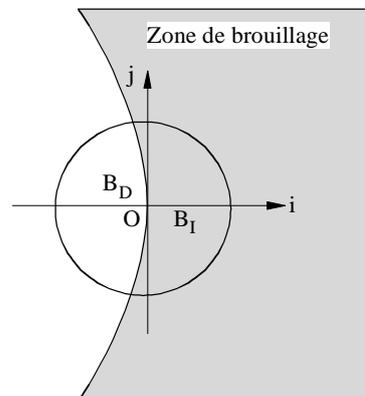
$OCR$ : facteur de réjection hors canal (dB)

$DTx$ : émetteur utile

$ITx$ : émetteur brouilleur.

Selon les valeurs de ces paramètres,  $k$  peut prendre l'une des trois valeurs suivantes:  $0 < k < 1$ ,  $k = 1$  ou  $k > 1$ . Les zones de brouillage pour les trois valeurs de  $k$  sont représentées aux Fig. 2a), 2b) et 2c). On notera que la zone ombrée correspond à la zone où on observe des brouillages et  $OCR = 1$  correspond à une valeur du paramètre OCR de 18 dB. Les résultats de l'analyse (§ 6) montrent que les faibles valeurs OCR correspondent à une forte probabilité de brouillage et que les valeurs OCR élevées correspondent à une faible probabilité de brouillage pour une même distance de séparation.

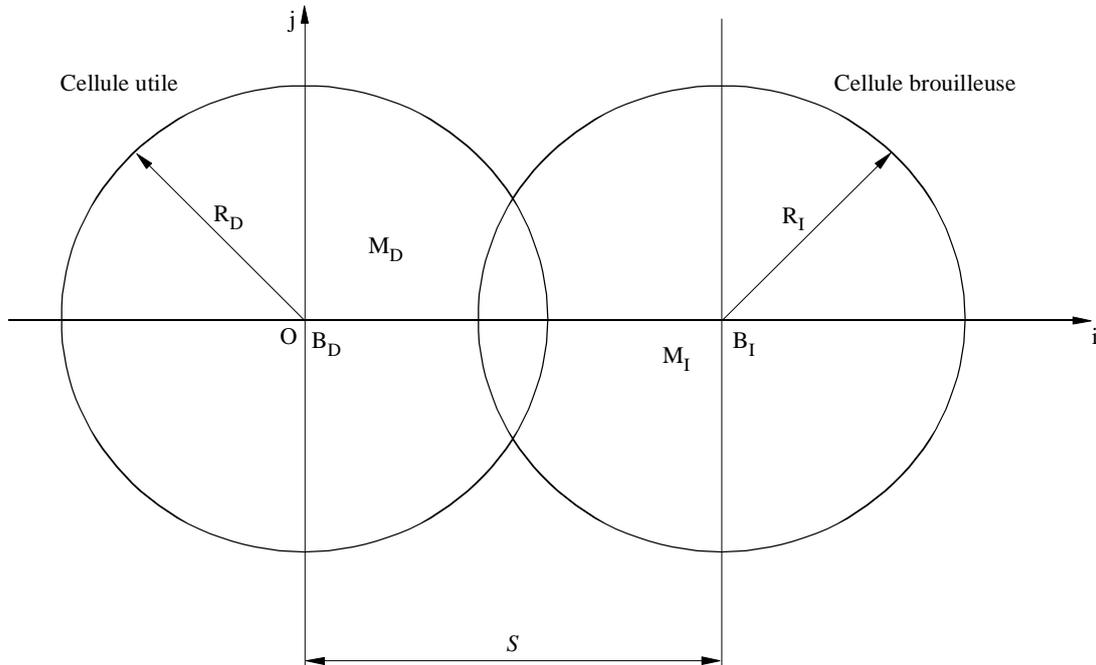
FIGURE 2

Zones de brouillage pour les trois valeurs de  $k$ a)  $k < 1$ b)  $k = 1$ c)  $k > 1$

### 3 Modèle probabiliste

La Fig. 3 montre les zones de couverture – ou cellules – de deux stations de base distantes l'une de l'autre de  $S$  km.

FIGURE 3  
Stations de base utile et brouilleuse



1271-03

Il y a des stations mobiles dans les cellules utile et brouilleuse. Dans l'exemple considéré, la station de base utile est  $B_D$ , la station de base brouilleuse  $B_I$  et de la même façon la station mobile utile  $M_D$  et la station mobile brouilleuse  $M_I$ . La constante  $R$  correspond au rayon des zones de couverture. La station de base  $B_D$  est située à l'origine et la station de base  $B_I$  est située à  $S$  km le long de l'axe  $i$ . Dans les deux modèles,  $d_1$  est défini comme étant la distance entre le récepteur utile et l'émetteur utile. De même,  $d_2$  est défini comme étant la distance entre le récepteur utile et l'émetteur brouilleur. Tous les paramètres de distance sont exprimés en kilomètres.

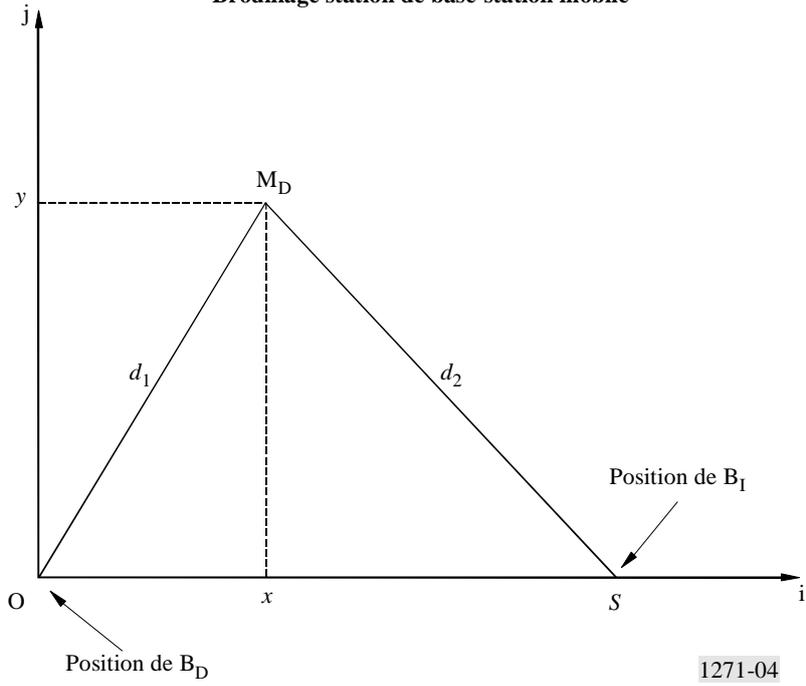
### 4 Brouillage station de base-station mobile

On observe ce type de brouillage lorsqu'une station mobile utile  $M_D$  est brouillée par une station de base brouilleuse  $B_I$ .

Pour trouver la probabilité de brouillage, il faut déterminer la zone de recoupement entre la zone de couverture et la zone brouilleuse. Cette zone brouilleuse est délimitée par la limite de la zone de couverture d'un côté et la courbe définie par  $d_2 = k d_1$  de l'autre. Selon la valeur de  $k$ , cette courbe peut être un cercle englobant la région de brouillage ( $k < 1$ ), une ligne droite ( $k = 1$ ) ou un cercle englobant la région exempte de brouillage ( $k > 1$ ). Le centre et le rayon des cercles de brouillage, qui sont différents des zones de couverture, varient en fonction de  $k$  et de  $S$ . Une fois que ces zones sont déterminées, on peut obtenir la probabilité de brouillage en divisant la zone de brouillage par la zone de couverture.

FIGURE 4

**Brouillage station de base-station mobile**

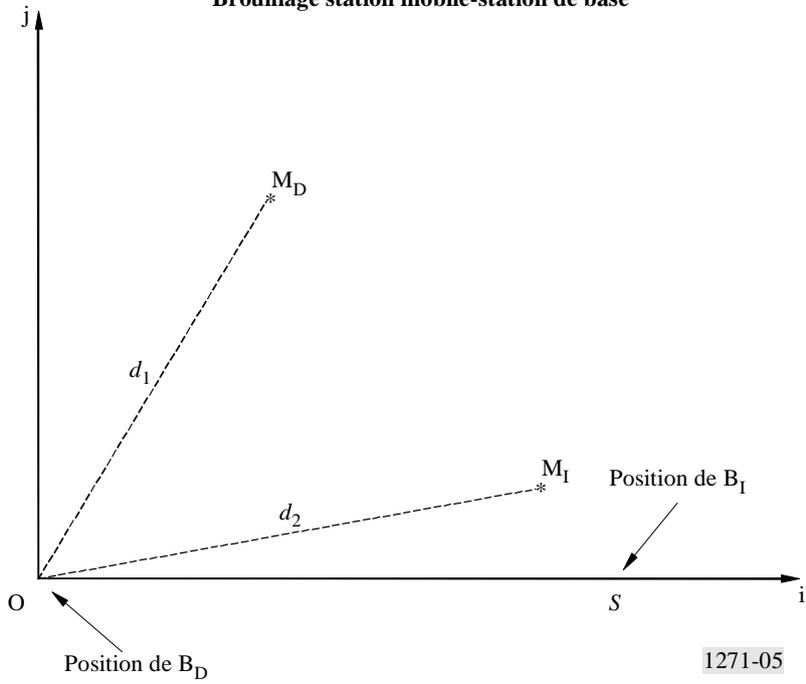


**5 Brouillage station mobile-station de base**

On observe ce type de brouillage lorsqu'une station de base utile  $B_D$  est brouillée par une station mobile brouilleuse  $M_I$ .

FIGURE 5

**Brouillage station mobile-station de base**



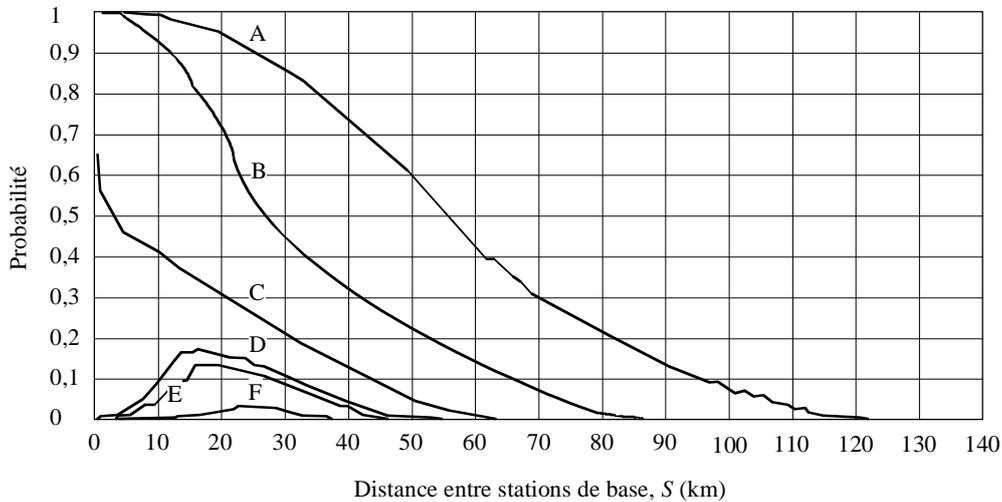
Pour qu'il y ait brouillage entre une station mobile et une station de base, il faut que la station mobile utile soit située à  $r$  km de la station de base utile  $B_D$  et que la station mobile brouilleuse soit située à moins de  $k r$  km de la station de base utile  $B_D$ . La probabilité de brouillage au niveau du récepteur de la station de base est le produit des probabilités de ces deux événements.

## 6 Résultats

A l'aide de cette méthode, on calcule le brouillage station de base-station mobile et station mobile-station de base pour diverses valeurs OCR et de  $S$ . Les différentes valeurs OCR tiennent compte du fait que différents systèmes mobiles terrestres (analogiques et numériques, avec différentes largeurs de canal) peuvent se brouiller les uns les autres.

Les courbes de probabilité pour un brouillage station de base-station mobile et un brouillage station mobile-station de base sont tracées aux Fig. 6 et 7. Dans l'exemple, on a pris pour hypothèse les valeurs suivantes:  $R_D = R_I = 32$  km,  $\varepsilon = 18$  dB. La valeur du paramètre OCR est décrite dans le Tableau 1.

FIGURE 6  
Probabilité de brouillage station de base-station mobile

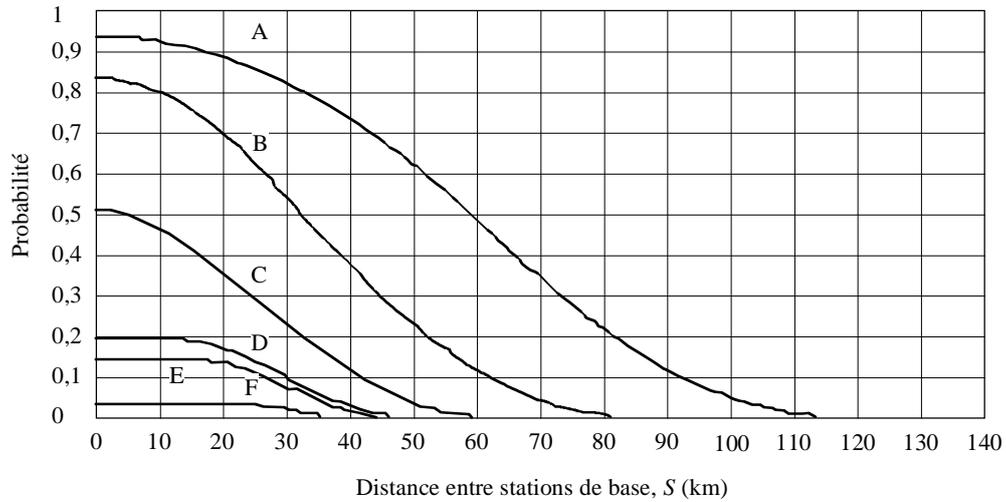


Courbes	OCR (dB)
A	0,0
B	8,5
C	17,8
D	26,4
E	29,0
F	42,9

1271-06

A l'aide de ces courbes, il est possible de déterminer la distance de séparation entre deux systèmes duplex mobiles terrestres lorsque l'on connaît le paramètre OCR et une probabilité acceptable de brouillage. Par exemple, pour une valeur OCR de 8,5 dB et une probabilité acceptable de brouillage de 0,05, les courbes donnent une distance entre émetteurs de 73 km dans le cas d'un brouillage station de base-station mobile et de 68 km dans le cas d'un brouillage station mobile-station de base. Il faudrait donc choisir 73 km car cette distance satisfera aux exigences minimum pour les deux types de brouillage.

FIGURE 7  
 Probabilité de brouillage station mobile-station de base



Courbes	OCR (dB)
A	0,0
B	8,5
C	17,8
D	26,4
E	29,0
F	42,9

1271-07

TABLEAU 1

Courbe	OCR (dB)	$\Delta f$ (kHz)	Valeur
A	0,0	0,00	Un type de système brouillant un système similaire
B	8,5	6,25	Deux systèmes à 12,5 kHz se brouillant l'un l'autre
C	17,8	12,50	Deux systèmes à 25 kHz se brouillant l'un l'autre
D	26,4	12,50	Un système à 25 kHz brouillant un système à 12,5 kHz
E	29,0	12,50	Un système à 12,5 kHz brouillant un système à 25 kHz
F	42,9	12,50	Deux systèmes à 12,5 kHz se brouillant l'un l'autre

## 7 Conclusion

Dans cet exemple, on a présenté une méthode permettant de calculer la probabilité de brouillage pour des systèmes duplex mobiles terrestres. Si l'on choisit un niveau acceptable de probabilité de brouillage, on peut calculer la distance de séparation entre deux systèmes. On peut ainsi déterminer la distance de séparation minimale requise et donc améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre.