

**UIT-R**

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R F.1097-1**  
(05/2000)

**Possibilités d'atténuation des brouillages  
pour améliorer la compatibilité entre les  
systèmes radar et les faisceaux hertziens  
numériques**

**Série F**  
**Service fixe**



## Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

### Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	<b>Service fixe</b>
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	Propagation des ondes radioélectriques
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	Vocabulaire et sujets associés

*Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.*

Publication électronique  
Genève, 2010

© UIT 2010

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

## RECOMMANDATION UIT-R F.1097-1\*

**POSSIBILITÉS D'ATTÉNUATION DES BROUILLAGES POUR AMÉLIORER  
LA COMPATIBILITÉ ENTRE LES SYSTÈMES RADAR  
ET LES FAISCEAUX HERTZIENS NUMÉRIQUES**

(1994-2000)

**Champ d'application**

La présente Recommandation indique les possibilités d'atténuation des brouillages qui devraient être prises en considération pour améliorer la compatibilité entre les systèmes de faisceaux hertziens numériques et les systèmes radar. L'annexe précise les détails techniques concernant ces possibilités d'atténuation des brouillages et décrit l'expérience acquise au cours de l'exploitation, en ce qui concerne les brouillages causés par les radars aux systèmes hertziens fixes dans les bandes comprise entre 4 et 6 GHz.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que les systèmes radar peuvent occasionner des brouillages aux faisceaux hertziens numériques (DRRS, *digital radio-relay system*) dans certaines situations;
- b) qu'il existe deux phénomènes de couplage dans les faisceaux hertziens, de l'énergie rayonnée par les stations radar, à savoir:
  - rayonnements non essentiels du radar dans les bandes du faisceau hertzien,
  - surcharge des étages d'entrée du faisceau hertzien (désensibilisation du récepteur) provoquée par la fréquence fondamentale du radar;
- c) que la méthode la plus souhaitable pour atténuer les brouillages peut consister à réduire à un niveau suffisamment bas les rayonnements non essentiels du radar;
- d) qu'un certain nombre des techniques utilisées par les concepteurs de faisceaux hertziens pour améliorer la qualité de fonctionnement permettront vraisemblablement de diminuer la vulnérabilité des faisceaux hertziens aux brouillages occasionnés par les radars,

*recommande*

- 1** de prendre en considération les possibilités ci-après d'atténuation des brouillages pour la configuration des systèmes radar, afin d'améliorer leur compatibilité avec les DRRS:
  - mesures opérationnelles, conformément à l'accord passé avec l'organisme responsable du système radar;
  - choix ou ajustement de la fréquence d'émission;
  - remplacement de l'émetteur;
  - installation d'un filtre RF dans l'émetteur radar;
- 2** de prendre en considération les possibilités ci-après d'atténuation des brouillages pour la conception et la mise en œuvre des DRRS, afin d'améliorer leur compatibilité avec les systèmes radar:
  - filtres hyperfréquences en amont des étages d'entrée du récepteur;
  - choix de l'antenne (caractéristiques des lobes secondaires);
  - diversité d'antenne (espace ou angle);
  - codage avec correction d'erreur directe (CED);
  - technique additionnelle d'entrelacement de bits;
  - utilisation de canaux de remplacement dans la même bande;
  - utilisation de bandes de remplacement;

---

\* La Commission d'études 5 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en décembre 2009, conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

- choix d'un autre trajet;
  - toute autre technique possible;
- 3 de se référer à l'Annexe 1 à la présente Recommandation pour obtenir des directives supplémentaires.

## ANNEXE 1

### **Possibilités d'atténuation des brouillages pour améliorer la compatibilité entre les systèmes radar et les DRRS**

#### **1 Options relatives aux systèmes radar**

Les options indiquées ci-après sont toutes assujetties à la condition qu'une installation radar donnée a été clairement identifiée comme étant la source des brouillages.

A ce jour, les opérateurs DRRS ont observé que des brouillages étaient occasionnés par les radars de surveillance aérienne stationnaires fonctionnant à des fréquences de 1,3 GHz et de 3 GHz et par les radars météorologiques fonctionnant au voisinage de 5,6 GHz.

Par ailleurs, dans les zones côtières, les opérateurs de systèmes DRRS ont observé des brouillages provenant des radars de navigation (mobiles) de la marine marchande fonctionnant au voisinage de 3 GHz.

##### **1.1 Mesures opérationnelles: suppression des signaux dans le secteur**

Lorsque l'installation radar et l'organisme responsable de son fonctionnement sont connus, un accord peut être conclu avec cet organisme pour que le radar soit momentanément désactivé quand son faisceau principal pointe dans la direction du système DRRS. Il s'agit de la suppression des signaux dans le secteur.

Si ce mécanisme est accepté par l'organisme responsable du radar, il est simple à mettre en œuvre, soit en modifiant l'équipement sur les anciens radars, soit en recourant à des commandes logicielles sur les systèmes modernes.

En outre, les dépenses sont minimales ou nulles.

Ce système d'atténuation des brouillages a déjà été appliqué dans certains pays et a permis une coexistence satisfaisante entre les installations du service de radiopérage et celles du service fixe (voir aussi l'Appendice 1).

##### **1.2 Mesures opérationnelles: choix ou ajustement de la fréquence d'émission**

Pour certains systèmes fixes, on peut éventuellement choisir ou ajuster la fréquence fondamentale de l'émetteur radar dans la gamme de fréquences autorisée pour ce radar afin que les rayonnements harmoniques non essentiels de deuxième ou troisième ordre ne brouillent pas le système DRRS. Il serait possible en particulier de placer l'harmonique du radar dans la bande de garde, entre les demi-bandes supérieure et inférieure attribuées aux faisceaux hertziens dans le plan de fréquences ou complètement à l'extérieur de cette bande.

Si ce nouvel accord est accepté par l'organisme exploitant le radar, les dépenses encourues à cet effet sont également minimales ou nulles.

Cette technique a déjà été utilisée dans certains pays et a donné lieu à une coexistence satisfaisante entre les installations du service de radiopérage et celles du service fixe.

##### **1.3 Remplacement de l'émetteur**

On a observé des variations du niveau des rayonnements non essentiels pour les systèmes au sol qui utilisent des magnétrons classiques et coaxiaux. Ces variations peuvent être imputées à un phénomène de vieillissement qui entraîne:

- des modifications affectant les réseaux de mise en forme des impulsions du modulateur;
- des modifications affectant le courant et la tension de plaque du tube de puissance; ou
- un amorçage d'arcs dans le tube.

Les utilisateurs d'un radar au sol devront peut-être vérifier périodiquement l'émetteur radar pour déterminer si, à cause de son vieillissement, des composantes non essentielles qui étaient de faible niveau ou absentes lorsque le dispositif était neuf ne sont pas apparues.

Dans certains cas, les problèmes de brouillage ont été résolus par le remplacement du dispositif de sortie de l'émetteur radar.

#### **1.4 Installation d'un filtre RF dans l'émetteur radar**

Dans plusieurs cas, des filtres RF à guide d'ondes sont utilisés en vue de ramener à un niveau bas et acceptable les brouillages subis par les faisceaux hertziens.

Ainsi, des filtres RF passe-bas atténuateurs ont été employés dans les radars au sol fixes exploités à 1,3 GHz afin d'atténuer les brouillages occasionnés par le rayonnement harmonique de troisième ordre dans la bande des 4 GHz attribuée au service fixe.

De même, les radars au sol exploités à 5 GHz étaient équipés de filtres passe-bande/passe-bas destinés à supprimer les rayonnements non essentiels brouillant la partie inférieure et la partie supérieure de la bande des 6 GHz exploitée par le service fixe (voir la Fig. 1).

Ces filtres sont connus dans l'industrie du radar depuis plus de 30 ans. Ils suppriment les rayonnements non essentiels d'environ 40 à 50 dB, avec un affaiblissement d'insertion de quelques dixièmes de dB à la fréquence de fonctionnement fondamentale du radar. Ils ne réduisent que de peu les performances du radar (portée).

Lorsque le brouillage des DRRS est causé par des rayonnements non essentiels, l'installation d'un filtre RF dans l'émetteur radar est réputée être la solution à adopter de préférence, à condition que cela soit techniquement possible.

Le coût de l'installation de filtres dans les émetteurs radar devrait être lié à celui de l'ensemble du radar.

En principe, les mesures décrites aux § 1.3 et 1.4 s'appliquent aussi aux radars mobiles maritimes.

## **2 Options relatives aux faisceaux hertziens**

Lorsqu'un système radar occasionne des brouillages à un faisceau hertzien, la première tentative visant à réduire ces brouillages consiste à déterminer si le phénomène de couplage est:

- une surcharge des étages d'entrée du récepteur du faisceau hertzien provoquée par la fréquence fondamentale du radar; ou
- un rayonnement non essentiel du radar se produisant à la fréquence du canal récepteur.

Lorsqu'il s'agit de grands radars de surveillance aérienne stationnaires dotés d'une puissance de sortie maximale en MW à la fréquence nominale fondamentale, le niveau des rayonnements non essentiels émis involontairement et par inadvertance susceptibles d'être interceptés par le récepteur d'un faisceau hertzien est souvent plus élevé que le niveau du signal utile.

Dans le cas des radars de navigation mobiles de la marine marchande, les paramètres de l'émetteur diffèrent considérablement de ceux des émetteurs de surveillance aérienne. Les niveaux de sortie à la fréquence fondamentale et, par voie de conséquence, les niveaux des rayonnements non essentiels sont plus bas et la durée des impulsions est beaucoup plus courte.

Ce n'est que lorsqu'il devient difficile ou impossible de supprimer à la source (c'est-à-dire au niveau du radar) les rayonnements non essentiels se produisant à la fréquence du canal récepteur que des mesures devraient être tentées du côté du récepteur brouillé.

### **2.1 Filtres hyperfréquences**

S'il s'agit, sous l'effet du signal radar, d'une surcharge des étages d'entrée affectant un préamplificateur à faible bruit (qui est commun à tous les canaux de faisceaux hertziens), on peut utiliser un filtre passe-bande RF en amont du préamplificateur pour le protéger contre des brouillages radar.

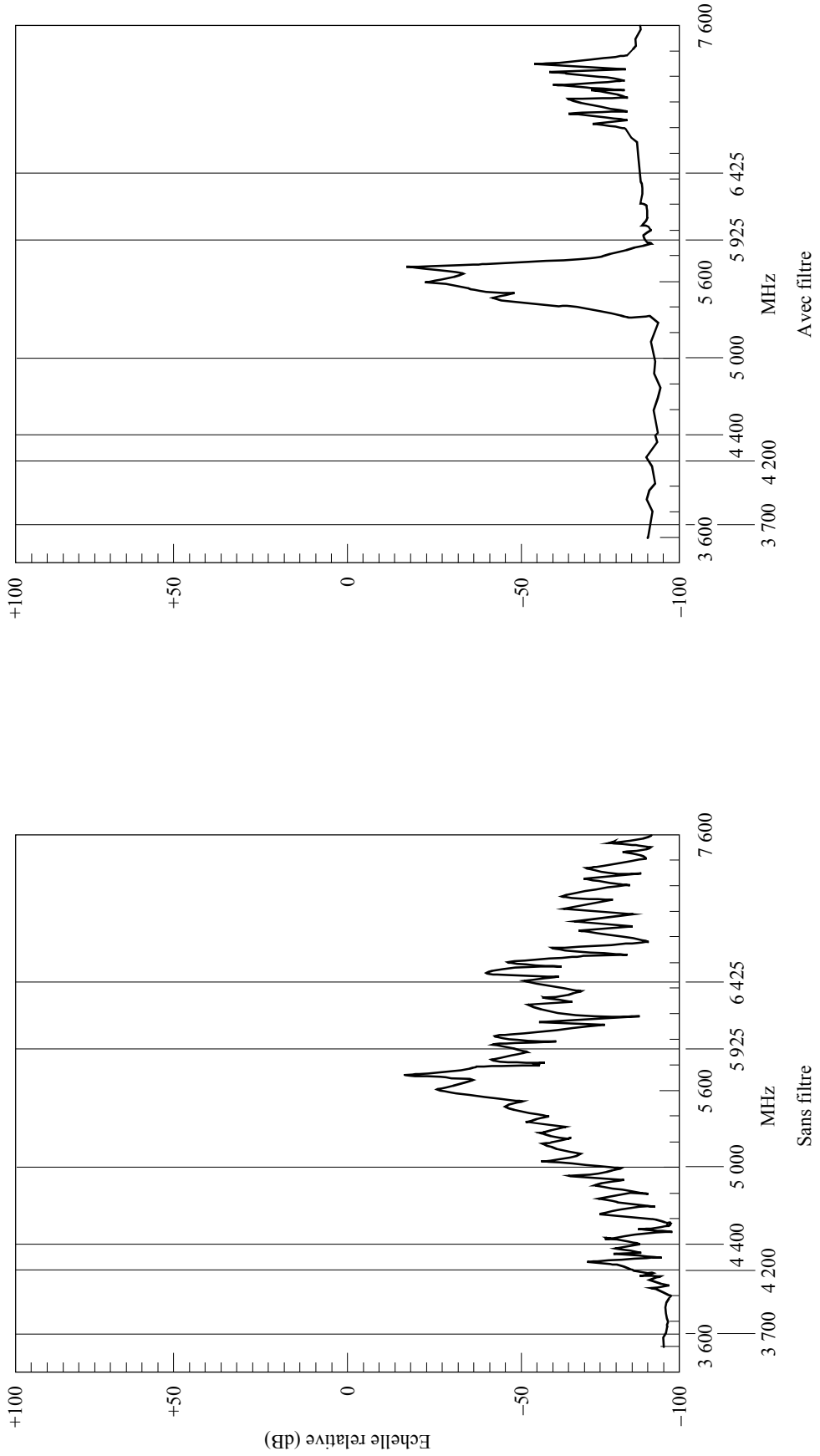
La surcharge en question, occasionnée par des radars au sol fonctionnant à 5 GHz, a été observée par certains opérateurs de systèmes DRRS exploités dans la partie inférieure ou supérieure de la bande des 6 GHz. L'installation d'un filtre passe-bande a résolu le problème.

Les filtres RF des récepteurs n'offrent pas une protection efficace contre les brouillages se produisant directement ou au voisinage des fréquences des canaux de réception des faisceaux hertziens.

## 2.2 Choix de l'antenne

Après étude du site d'un faisceau hertzien donné avec collecte des données électroniques appropriées, on pourra connaître l'emplacement approximatif d'un radar et les niveaux de rayonnements non essentiels susceptibles de causer des brouillages. Ainsi, il sera possible d'établir la géométrie du trajet allant du récepteur du faisceau hertzien vers l'émetteur du faisceau hertzien voulu et vers le radar.

FIGURE 1  
Mesure du spectre des rayonnements d'un radar fonctionnant à 5 GHz avec et sans filtre RF



S'il apparaît que le faisceau principal du radar interceptera l'antenne du récepteur du faisceau hertzien par le biais de ses lobes latéraux, le choix d'un type d'antenne de faisceau hertzien dont le niveau des lobes latéraux est assez bas pourrait contribuer à protéger le récepteur contre les brouillages causés par des rayonnements non essentiels.

Le niveau des brouillages causés par le biais des lobes latéraux ne peut dépasser le bruit thermique de fond que d'une petite quantité au maximum pour ne pas nuire à la qualité d'émission des DRRS.

Bien conçues, des antennes paraboliques blindées constituent un bon choix. Si le brouillage se produit selon un angle compris entre environ 20° et 60° par rapport au faisceau principal, dans le champ de vision vers l'avant de l'antenne, une antenne équipée d'un système d'alimentation décalé peut produire une meilleure suppression qu'une antenne parabolique blindée, mais elle est considérablement plus coûteuse.

### 2.3 Diversité d'antenne des DRRS

Les systèmes DRRS susceptibles d'être brouillés par des radars sont des systèmes à large bande et de grande capacité destinés à la transmission interurbaine. Ils exploitent généralement des canaux dans les bandes des 4 GHz, des 5 GHz ou de la partie inférieure ou supérieure des 6 GHz attribuées au service fixe. Ces bandes permettent de combler les grands intervalles ou les grands bonds.

En raison du phénomène de propagation observé dans ces bandes, on a recours sur la plupart des bonds à la diversité d'antenne de réception (diversité d'espace ou, parfois, diversité angulaire). La probabilité d'un niveau marginal des signaux reçus est donc réduite au minimum. Ce n'est que de cette façon que les prescriptions draconiennes en matière de qualité de transmission des signaux (voir la Recommandation UIT-R F.1189 et la Recommandation UIT-T G.826) peuvent être respectées en mode de fonctionnement normal.

Ainsi, la diversité assurera également une protection contre les rayonnements non essentiels émis par des radars, à condition que l'incidence sur le récepteur du faisceau hertzien soit modérée. Dans ces cas, les niveaux des rayonnements non essentiels peuvent être sensiblement supérieurs au bruit de fond du récepteur. Toutefois, le rapport  $S/N$  total est encore suffisant pour assurer une bonne détection/démodulation du signal utile.

### 2.4 Protection de l'antenne

Cette option a été proposée pour atténuer les brouillages. Elle est parfois utilisée pour les antennes de stations terrestres de satellites situées au niveau du sol. Le recours à des barrières ou à des murets s'est révélé utile.

Toutefois, compte tenu de l'emplacement normal des antennes de faisceaux hertziens (c'est-à-dire sur des tours ou des pylônes à 50 ou 100 m au-dessus du sol), la solution consistant à protéger les lobes latéraux des antennes par des dispositifs ou moyens de proximité n'est pas réaliste.

### 2.5 Correction d'erreur directe (CED)

On utilise le codage CED dans la plupart des faisceaux hertziens numériques pour réduire le TEB. Cette technique de codage permet de corriger un nombre limité d'erreurs aléatoires au niveau du récepteur grâce à un logiciel spécial de codage aux deux extrémités du bond.

Des mesures ont montré que, dans le cas d'un code avec correction d'erreur double, le seuil d'apparition de brouillages et d'erreurs dans le signal utile était amélioré d'environ 10 dB pour une impulsion brouilleuse équivalant à un intervalle correspondant à un baud (c'est-à-dire lorsque le brouillage provoque une réponse en impulsion du récepteur). Les DRRS de transmission interurbaine fonctionnent à des débits de 30 Mbd environ correspondant à des intervalles de l'ordre de  $\cong 30$  ns.

Toutefois, les impulsions parasites produites par les radars de surveillance aérienne (principalement pendant les temps de montée et de descente du signal radar volontairement émis) sont considérablement plus longues, de l'ordre de 100 ns, et le mécanisme CED classique ne pourra rien contre ces brouillages.

### 2.6 Entrelacement additionnel des bits

La situation est différente lorsque le brouillage est causé par un radar de navigation, la durée du signal volontaire étant bien plus courte ( $\leq 100$  ns) que pour les radars de surveillance aérienne. Les impulsions parasites produites pendant le temps de montée et le temps de descente sont excessivement courtes ( $\sim 15$  ns), mais peuvent encore être captées par les récepteurs de faisceaux hertziens à large bande.

On a trouvé une méthode d'atténuation utile pour remédier à cette situation, l'entrelacement additionnel des bits. A la réception d'un signal altéré par de courts paquets d'erreurs causés par le brouillage, les erreurs sont étalées dans le temps en raison du désentrelacement. Les erreurs sur les bits peuvent être ultérieurement corrigées par le processus CED.



La technique d'entrelacement des bits présente un inconvénient, à savoir qu'il impose un temps de traitement supplémentaire au niveau du récepteur. Cette technique devrait donc être offerte comme option additionnelle pour les récepteurs normaux, à n'utiliser que sur les bonds de faisceaux hertziens où des brouillages causés par des radars de navigation sont observés.

La technique d'entrelacement des bits comme méthode d'atténuation est appliquée avec succès au Japon depuis plusieurs années (voir aussi l'Appendice 1).

### **2.7 Accroissement de la puissance des émetteurs des faisceaux hertziens**

Cette méthode d'atténuation a été proposée mais elle n'améliorera probablement pas la situation pour les raisons suivantes:

- il est probable qu'une puissance supplémentaire de quelques dB des émetteurs des faisceaux hertziens n'améliorera pas sensiblement le rapport  $S/N$  total, de sorte que la qualité de la transmission restera altérée;
- un émetteur de faisceau hertzien considérablement plus puissant ne serait absolument pas rentable;
- une plus grande puissance accroît la probabilité de brouillage avec d'autres DRRS distants qui réutilisent le canal concerné.

### **2.8 Choix d'un canal RF de remplacement pour les faisceaux hertziens**

Cette méthode d'atténuation ne pourra être appliquée que dans certaines situations car elle n'est absolument pas considérée comme assurant une utilisation efficace du spectre. Elle est appliquée dans les conditions suivantes:

- le brouillage est causé par une harmonique assez bien définie du radar, de sorte que seul un canal particulier des faisceaux hertziens est affecté;
- pour une raison quelconque, il n'est pas possible de procéder à un nouvel accord du radar, comme indiqué ci-dessus au § 1.2;
- un canal RF non perturbé peut être mis à disposition par l'administration sur le bond en question.

### **2.9 Emploi d'une bande de remplacement**

Cette méthode d'atténuation pourrait être envisagée lors de la planification d'un nouveau DRRS et lorsqu'une étude de site a indiqué la probabilité de brouillages dans les bandes attribuées au service fixe, qui en temps normal devraient être choisies en premier lieu.

En outre, le recours à cette méthode dépend de la disponibilité des canaux dans une bande de remplacement adéquate.

Ce n'est cependant pas une option rentable pour une opération établie du service fixe.

En règle générale, il sera coûteux de rééquiper le ou les bonds affectés avec de nouveaux émetteurs-récepteurs.

### **2.10 Choix d'un trajet de remplacement**

Cette méthode n'est possible que lors de la planification d'un nouveau DRRS. Elle consiste à contourner le problème de base et, dans la plupart des cas, ce n'est pas une option réaliste pour des raisons économiques.

## **3 Rôle préventif des administrations**

Les administrations peuvent stipuler, par le biais de règlements nationaux concernant les émetteurs radioélectriques, des conditions et prescriptions particulières pour l'exploitation des installations de radiopérage (radars), qu'elles soient fixes ou mobiles, afin d'assurer la compatibilité avec les systèmes du service fixe fonctionnant dans les bandes adjacentes.

Dans le cadre de ces prescriptions, il devrait être spécifié que les opérateurs de radars sont tenus d'éviter l'émission de rayonnements non essentiels susceptibles de causer des brouillages nuisibles à d'autres services de radiocommunication.

## APPENDICE 1

## À L'ANNEXE 1

**Expérience opérationnelle****1 Introduction**

On trouvera dans le présent Appendice un résumé de l'expérience opérationnelle décrite par un certain nombre d'opérateurs DRRS dans des contributions présentées à l'ex-CCIR de l'UIT et, ultérieurement, à la Commission d'études 9 de radiocommunications.

Les renseignements en question ont été précédemment récapitulés dans un certain nombre de pièces jointes aux rapports concernant les réunions du Groupe de travail 9A des radiocommunications. Par ailleurs, des informations additionnelles ont été récemment communiquées au GT 9A.

En outre, il sera fait brièvement mention des informations générales pertinentes provenant d'autres sources.

L'objet du présent Appendice est de donner aux opérateurs de systèmes DRRS des directives supplémentaires concernant ce qui pourrait se produire dans la pratique et la manière de traiter les problèmes de brouillage radar lorsqu'ils surviennent.

**2 Informations reçues du Japon**

On trouvera ci-après un résumé de l'expérience du Japon entre 1985 à 1998 (Doc. 9A/64 – Operational experience of radar interference to digital radio-relay systems, 5 octobre 1998).

Les principaux paramètres des systèmes types sont indiqués dans le Tableau 1.

TABLEAU 1

**Principaux paramètres des systèmes DRRS longue distance utilisés au Japon**

Bande de fréquences	4 GHz: 3 600-4 200 MHz 5 GHz: 4 400-5 000 MHz 6 GHz: 5 925-6 425 MHz
Type de modulation	MAQ-16 (3 porteuses)
Capacité de transmission	3 × STM-0 (52 Mbit/s par porteuse)
Largeur de bande du récepteur	20 MHz par porteuse

Il a été signalé pour plus de 30 sections de commutation radioélectrique que les caractéristiques d'erreur des systèmes DRRS étaient gravement dégradées de sorte qu'elles produisaient des erreurs sur les bits même pendant les périodes sans évanouissement. Environ 20 sections comportent un bond au-dessus de la mer et un autre groupe de dix sections comprennent des stations situées à proximité de stations radar terrestres.

**2.1 Mesure de protection contre les brouillages causés par des radars fixes terrestres**

Les sources de brouillage sont au nombre de deux, à savoir les radars météorologiques et les radars réservés à un usage gouvernemental. Il a été facile de déterminer l'emplacement et les caractéristiques de ces types de radar. En conséquence, un filtre passe-bande a été installé dans l'émetteur radar après négociation avec les opérateurs de radars.

Ces cas illustrent la méthode d'atténuation indiquée à l'Annexe 1 (§ 1.4).

Le Tableau 2 donne des exemples d'installation de filtres passe-bande dans des émetteurs radar fixes terrestres.

Les caractéristiques de ces filtres sont indiquées dans le Tableau 3.

TABLEAU 2

## Exemples d'installation d'un filtre passe-bande dans un radar fixe terrestre

Trajet du système DRRS	Radar brouilleur	Système brouillé	Date
Fukuoka-Ohita	Radar météorologique	MAQ-16, 3 porteuses (5 GHz)	09-1985
Nagasaki-Sasebo	Radar à usage gouvernemental	MAQ-16, 3 porteuses (5/6 GHz)	10-1989
Sendai-Aomori	Radar à usage gouvernemental	MAQ-16, 3 porteuses (4 GHz)	03-1991
Tokyo-Sendai	Radar à usage gouvernemental	MAQ-16, 3 porteuses (4 GHz)	03-1991
Tokyo-Nagoya	Radar à usage gouvernemental	MAQ-16, 3 porteuses (4 GHz)	11-1991

TABLEAU 3

## Caractéristiques des filtres passe-bande destinés aux radars fixes terrestres

	Radar météorologique
Fréquence centrale, $f_c$ (largeur de bande)	5 320 MHz ( $f_c \pm 4$ MHz)
Affaiblissement d'insertion	Moins de 2 dB à la fréquence $f_c$
Caractéristiques de l'atténuation	3 600-4 200 MHz: plus de 70 dB 4 400-5 000 MHz: plus de 70 dB 5 925-6 425 MHz: plus de 70 dB
Puissance de crête admissible	Crête: 250 kW

## 2.2 Mesure de protection appliquée au niveau du récepteur

Sur un trajet créé en 1990 et traversant la baie de Tokyo, on a parfois observé des brouillages causés par les systèmes radar des navires à un niveau même supérieur à celui du signal de réception utile.

Un préamplificateur RF a alors été installé à l'entrée du réseau de branchement du récepteur. Ce dispositif était saturé par le signal émis à la fréquence fondamentale du radar.

Un filtre passe-bande a été placé en face du préamplificateur pour supprimer les brouillages radar, d'où un nombre considérablement inférieur d'erreurs sur les bits.

Le cas ci-dessus est un exemple de la méthode d'atténuation mentionnée à l'Annexe 1 (§ 2.1).

## 2.3 Mesure de protection contre les brouillages causés par les radars mobiles maritimes

S'agissant des brouillages causés par les radars de navigation maritimes sur des bords au-dessus de la mer, il est généralement très difficile d'en identifier la source. Il est donc nécessaire d'appliquer une méthode d'atténuation au niveau du récepteur du DRRS.

Depuis 1993, la CED, associée à la technique d'entrelacement des bits, a été appliquée à de nombreux bords subissant des brouillages.

Les résultats ont été assez probants. Cela étant, en raison du temps de traitement considérable requis par l'entrelacement des bits, il n'est possible d'appliquer cette technique qu'à un seul bord dans une section de commutation.

Quelques exemples d'application réussie de la technique d'entrelacement des bits ont été récapitulés ci-après (Doc. 9A/45 – Performance Improvement by Bit Interleave Technique (BIT), 23 septembre 1998. Contient d'autres précisions concernant cette importante méthode d'atténuation).

Le Tableau 4 indiquant les résultats obtenus est reproduit ci-après et contient des exemples de la méthode d'atténuation décrite à l'Annexe 1 (§ 2.6).

TABLEAU 4

**Différence entre les caractéristiques d'erreur des systèmes avec et sans entrelacement des bits**

N°	Date	Temps	Durée	Nombre de secondes avec erreurs (ES) sans entrelacement des bits	Avec entrelacement des bits
1	02.07.92	6:55 ~ 7:00	5 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 75 ES	Sans erreur
2	02.07.92	13:15 ~ 13:19	4 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 65 ES	Sans erreur
3	02.07.92	16:03 ~ 16:06	3 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 52 ES	Sans erreur
4	04.07.92	7:55 ~ 7:58	3 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 44 ES	Sans erreur
5	04.07.92	22:03 ~ 22:06	3 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 33 ES	Sans erreur
6	08.07.92	16:38 ~ 16:43	5 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 44 ES	Sans erreur
7	11.07.92	5:57 ~ 6:00	3 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 33 ES	Sans erreur
8	11.07.92	15:10 ~ 19:23	4 h 13 min	A un TEB de $10^{-6}$ : nombreuses erreurs	Sans erreur
9	12.07.92	8:42 ~ 9:22	40 min	A un TEB de $10^{-6}$ : nombreuses erreurs	Sans erreur
10	12.07.92	10:06 ~ 10:14	8 min	A un TEB de $10^{-6}$ : 30 ES	Sans erreur

Les exemples N° 1 à 7 sont représentatifs de la situation dans laquelle un navire passe en visibilité directe d'un DRRS chevauchant une voie maritime. Le passage du navire dure en tout quelques minutes, pendant lesquelles il se produit un nombre considérable de secondes avec erreurs (ES, *errored seconds*).

A partir de quelques aspects théoriques de la conception de l'entrelaceur de bits, on a pu établir les relations entre les paramètres suivants: longueur du bloc CED, capacité de correction CED (erreurs par bloc), fréquence de l'horloge d'émission du système DRRS (par exemple  $140 \times 10^6$  Hz), largeur de l'impulsion brouilleuse ( $\mu$ s), profondeur d'entrelacement et longueur de trame de l'entrelaceur.

Le temps de traitement admissible maximal du système DRRS donne une largeur maximale de l'impulsion brouilleuse qui peut être traitée au moyen de l'entrelacement des bits (voir, pour de brefs détails, l'Annexe 1, § 2.6).

On trouvera d'autres précisions concernant la technique d'entrelacement des bits à l'Appendice 2 à l'Annexe 1.

Dans un cas, un navire qui passait périodiquement juste en dessous du trajet radioélectrique a été identifié comme étant la source des brouillages.

Il a été possible d'appliquer ici la même procédure d'installation d'un filtre passe-bande dans l'émetteur comme dans le cas du radar fixe terrestre, c'est-à-dire la méthode d'atténuation décrite à l'Annexe 1 (§ 1.4).

Les caractéristiques du filtre passe-bande destiné aux radars de navigation sont indiquées dans le Tableau 5.

TABLEAU 5

## Caractéristiques des filtres passe-bande destinés aux radars mobiles maritimes

	Type 1	Type 2
Fréquence centrale, $f_c$ (largeur de bande)	$f_c = 3\ 050$ MHz ( $f_c \pm 10$ MHz)	$f_c = 3\ 050$ MHz ( $f_c \pm 25$ MHz)
Affaiblissement d'insertion	Moins de 0,5 dB à la fréquence $f_c$	
Caractéristiques de l'atténuation	3 600-4 200 MHz: plus de 60 dB 4 400-5 000 MHz: plus de 60 dB 5 925-6 425 MHz: plus de 60 dB	
Puissance de crête admissible	30 kW	90 kW

Il convient de faire attention au faible affaiblissement d'insertion des filtres à bande étroite destinés aux radars de navigation.

Autrement dit, les performances du radar (portée) ne sont que légèrement atténuées (voir l'Appendice 2, § 1.8).

### 3 Informations reçues du Danemark

#### 3.1 Identification des sources de brouillage

Il semble très difficile de déterminer une méthode qui permette d'identifier avec une certitude absolue les navires de la marine marchande à l'origine des brouillages. Toutefois, des circonstances fortuites ont permis d'obtenir une aide du service de contrôle du trafic maritime, dont les opérateurs surveillent 24 h sur 24 le passage des navires (Doc. 9A/15 – Radar interference from moving platforms; identification of individual ships causing error bursts in 4 GHz digital radio links crossing shipping lanes, 23 février 1998). Lorsqu'une liaison radio enregistre régulièrement des paquets d'erreurs, une alerte est automatiquement activée et transmise à l'opérateur du service de contrôle du trafic maritime, qui peut noter le nom du navire à l'origine de l'alerte.

Ces enregistrements ont été reportés dans des tableaux mensuels qui indiquent tous les renseignements pertinents concernant les navires en question: heure de passage, nom et indicatif d'appel international des navires, type et taille des navires et, ce qui est particulièrement intéressant, propriétaire et port d'origine.

Des renseignements remontant à plus de quatre ans sont actuellement consignés.

#### 3.2 Exemples d'atténuation des brouillages causés par de grands radars fixes

Des renseignements ont été collectés concernant les brouillages causés par un radar ayant un mode opératoire et une configuration de balayage antenne particuliers (Doc. 9A/5 – Interference from air surveillance height finder radar into 140 Mbit/s digital radio receiver, 23 janvier 1996).

Ce radar, conçu aux Etats-Unis d'Amérique, est utilisé dans de nombreux pays depuis bon nombre d'années pour la surveillance aérienne (modèle AN/FPS-90, précédemment /FPS-6).

Le radar AN/FPS-90 utilise un magnétron coaxial très puissant qui fournit en sortie une puissance de crête de ~ 3 MW à la fréquence fondamentale nominale. Sa conception est telle que le magnétron, après des milliers d'heures de fonctionnement, peut avoir tendance à produire un rayonnement non essentiel assez fort.

Le radar de surveillance aérienne normal est équipé en plus d'un altimètre qui ne fonctionne qu'occasionnellement. De nombreuses semaines peuvent donc s'écouler sans que les systèmes DRRS ne soient brouillés.

Des brouillages se produiront uniquement lorsque l'antenne de l'altimètre est pointée en direction de la station DRRS. Dans ce cas, l'antenne produirait un balayage en élévation sur un intervalle de  $-5^\circ$  à  $+30^\circ$ , produisant ainsi des groupes régulièrement espacés de paquets d'erreurs.

Cette régularité explique l'origine de la médiocre efficacité du DRRS.

Lorsque l'emplacement de l'altimètre et l'organisme responsable de son utilisation ont été connus, un accord a été conclu en vue de la suppression des signaux dans le secteur. Cela a permis de résoudre les problèmes de brouillage pendant une période provisoire. L'organisme susmentionné a accepté d'installer un filtre approprié dans l'émetteur radar.

Il s'agit donc là d'un exemple de la méthode d'atténuation décrite à l'Annexe 1 (§ 1.1).

Des informations ont été obtenues concernant les brouillages occasionnés à des systèmes DRRS fonctionnant à 4 GHz par la troisième harmonique d'un radar de surveillance de la défense aérienne (Doc. 9A/66, qui décrit «Experience with an L-band defense air surveillance radar», 29 octobre 1992). Ce dispositif fait partie d'une batterie de missiles IHAWK, connu sous le nom de radar de localisation périphérique. L'étage de sortie de puissance comprend un tube d'amplificateur à champs croisés à cavité externe de haute qualité. Ce modèle d'oscillateur est appelé stabilotron. C'est donc un générateur intrinsèquement stable fournissant environ 1/2 MW à la fréquence fondamentale proche de 1,3 GHz. En raison d'une légère non-linéarité résiduelle, ce tube hyperfréquence de forte puissance peut produire, à un niveau peu élevé, une troisième harmonique dans la bande des 4 GHz destinée au service fixe.

Lorsqu'il a été déterminé que le dispositif susmentionné était à l'origine des brouillages, un accord a été conclu avec l'organisme responsable de l'exploitation du radar en vue de faire en sorte que le radar fonctionne à une fréquence telle que la troisième harmonique engendrée se produise dans la bande de garde du plan de fréquences des 4 GHz.

Vu que, comme indiqué, le tube de puissance fonctionne de manière stable, la troisième harmonique est également assez bien définie. Ainsi, lorsqu'il a été accordé dans la région de la bande de garde, le système DRRS a cessé d'être soumis à des brouillages.

Il s'agit donc là d'un exemple de la méthode d'atténuation décrite à l'Annexe 1, § 1.2.

On a également étudié les brouillages causés à des systèmes DRRS fonctionnant à 4 GHz par la troisième harmonique d'un radar de surveillance aérienne de haute puissance situé dans un aéroport civil (Doc. 9A/67, qui décrit «Experience with an L-band civilian air surveillance radar (ASR)», 29 octobre 1992). Ce radar fonctionne aussi à des fréquences proches de 1,3 GHz. Il utilise un oscillateur pilote à semi-conducteurs et un amplificateur de puissance (klystron) de grande puissance à l'étage final (système MOPA). Le klystron fournit une puissance de sortie de l'ordre de 1,3 MW. Ce tube a également une légère non-linéarité résiduelle et peut donc produire une troisième harmonique.

Dans ce cas, l'organisme exploitant le radar avait obtenu une attribution de fréquences fixe des autorités compétentes, de sorte qu'il était impossible de procéder à un nouvel accord du dispositif.

En outre, la licence d'exploitation prévoyait que l'opérateur serait pleinement responsable en cas de plainte légitime concernant des brouillages. L'opérateur a donc été contraint d'installer, à ses propres frais, un filtre passe-bas dans le radar.

Cette solution a réglé les problèmes de brouillages et illustre la méthode d'atténuation décrite au § 1.4 de l'Annexe 1 ainsi que les informations figurant au § 3 de l'Annexe 1.

## 4 Informations reçues de l'Allemagne

Les informations reçues de l'Allemagne sont récapitulées ci-après (Doc. 9A/90 – An example of suppression of spurious emissions of radar systems by means of filters, 29 mars 1999).

### 4.1 Introduction

Les limites des rayonnements non essentiels émis par les systèmes de radiolocalisation et de radionavigation sont définies dans le projet de Recommandation 74-01 de la CEPT-ERC, Annexe 5, concernant les rayonnements non essentiels comme suit:

«-30 dBm (p.i.r.e.) ou -100 dBc, la valeur la moins stricte étant retenue ... pour les stations fixes uniquement».

Cette définition est fondée sur la limite de la catégorie B correspondante énoncée dans la Recommandation UIT-R SM.329 et a été introduite pour protéger les services de radiocommunication exploitant des bandes de fréquences adjacentes, notamment pour les liaisons par faisceaux hertziens numériques.

### 4.2 Rayonnements non essentiels émis par des magnétrons

Les émetteurs utilisant des magnétrons, par exemple dans les radars de forte puissance, produisent d'importants rayonnements non essentiels. On trouvera à la Fig. 2 un exemple de mesure de spectre pour un radar non équipé d'un filtre.

Les données techniques du radar météorologique correspondant sont les suivantes:

Gamme de fréquences:	5,6-5,65 GHz
Gain d'antenne:	40 dBi

Puissance (de crête):	360 kW (= 126 dBm p.i.r.e.)
Durée d'impulsion:	0,8-2 $\mu$ s
Fréquence de répétition des impulsions:	250-1 200 Hz

A la Fig. 2, on observe à 6,477 GHz, une pointe perturbatrice de  $-24,17$  dBm ou de 49 dBc.

### 4.3 Suppression des rayonnements non essentiels au moyen d'un filtre

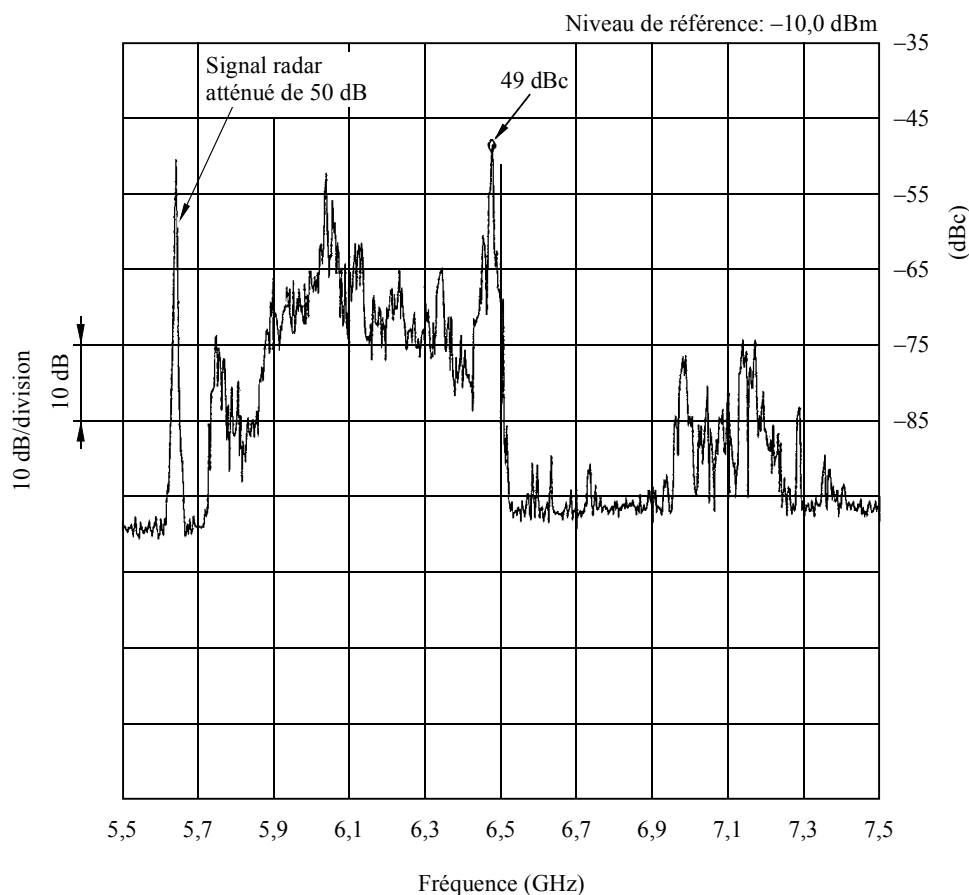
Un filtre à guide d'ondes comprenant un filtre coupe-bande connecté en série avec un filtre passe-bas a été installé. Le filtre n'était rempli que d'air comprimé (pour prendre en charge la puissance admissible).

L'affaiblissement mesuré par rapport à la fréquence est représenté à la Fig. 3. Sauf pour une petite gamme de fréquences, l'affaiblissement voulu est supérieur à 115 dB dans la gamme supérieure à 5,9 GHz présentant un intérêt.

L'affaiblissement d'insertion du filtre associé au filtre passe-bande est de 0,7 dB environ.

FIGURE 2

Spectre de fréquences d'un radar à magnétron non équipé d'un filtre,  
longueur mesurée du trajet radioélectrique: 600 m



Largeur de bande du filtre:	2,0 MHz
Largeur de bande de la vidéo:	3,0 MHz
Temps de balayage:	50 ms
Compte à 6,03470 GHz:	$-24,17$ dBm
Marque à 6,477 GHz:	$-24,17$ dBm
Affaiblissement:	0 dB

Si l'affaiblissement de bande dû aux deux filtres se chevauchant est optimisé, la pointe à 6,477 GHz observée à la Fig. 2 peut être réduite de 115 dB, d'où des valeurs de 164 dBc ou de -38 dBm en échelle absolue par rapport à la p.i.r.e.

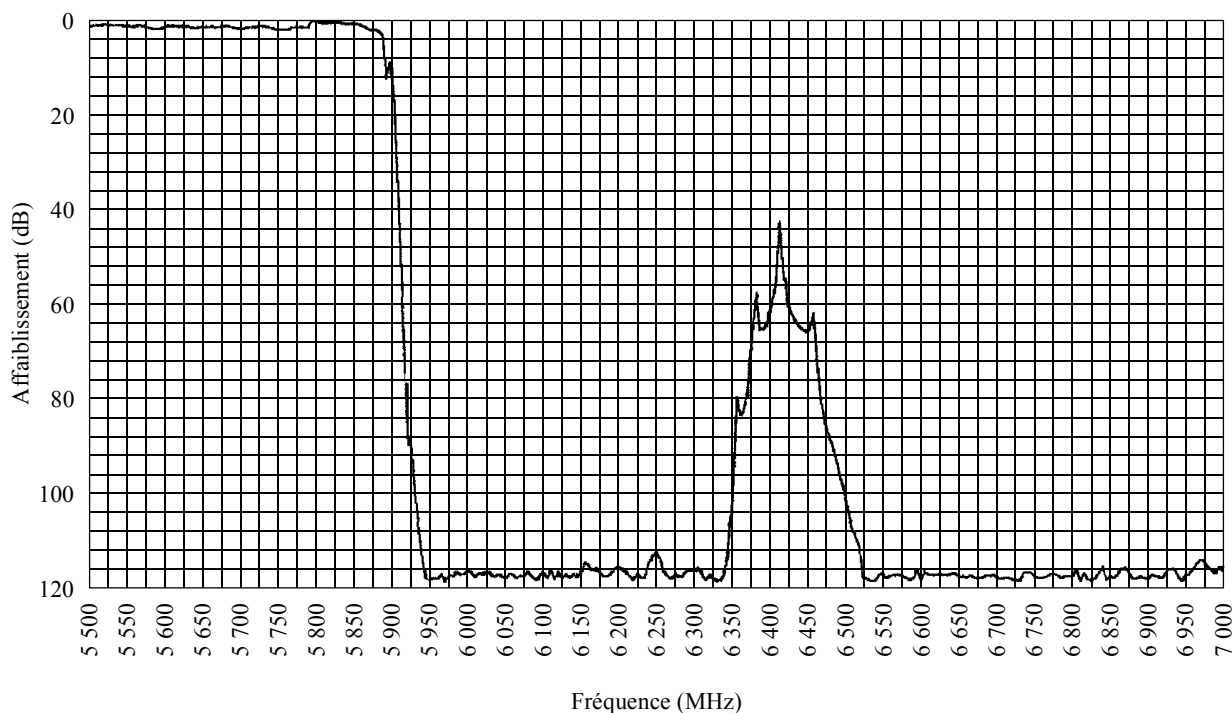
La Fig. 4 représente le spectre correspondant du radar équipé d'un filtre.

#### 4.4 Conclusion

Il a été démontré qu'il était techniquement possible d'atteindre les limites de -30 dBm (p.i.r.e.) ou -100 dBc pour les stations radar de forte puissance à l'aide d'un filtre à guide d'ondes relativement simple.

Par ailleurs, le coût est abordable (par exemple 8 000 dollars EU pour la production d'une pièce par un fabricant).

FIGURE 3  
Fonction de transfert du filtre à guide d'ondes



1097-03

## 5 Informations reçues de la Suède

A la fin des années 80, de nouveaux canaux hertziens dans la partie supérieure de la bande des 6 GHz ont été mis en service sur une liaison hertzienne traversant l'aéroport d'Arlanda près de Stockholm (Doc. 9A/107 – Interference into a radio-relay link from radar spurious emissions, 12 avril 1999).

Un radar météorologique situé à l'aéroport fonctionnait à 5,6 GHz. Sur le bond concerné, les rayonnements non essentiels produits par ce radar réduisaient la marge effective de protection contre les évanouissements à 5 dB environ, niveau auquel des erreurs sur les bits ont commencé à se produire.

Pour résoudre ce problème, on a installé un filtre passe-bas à guide d'ondes dans l'émetteur radar, ce qui a supprimé les brouillages.

### 5.1 Données concernant le faisceau hertzien et son trajet

On trouvera ci-après quelques données techniques concernant le faisceau hertzien:

Largeur de bande du récepteur:	40 MHz
Débit binaire:	140 Mbit/s
Modulation:	MAQ-16



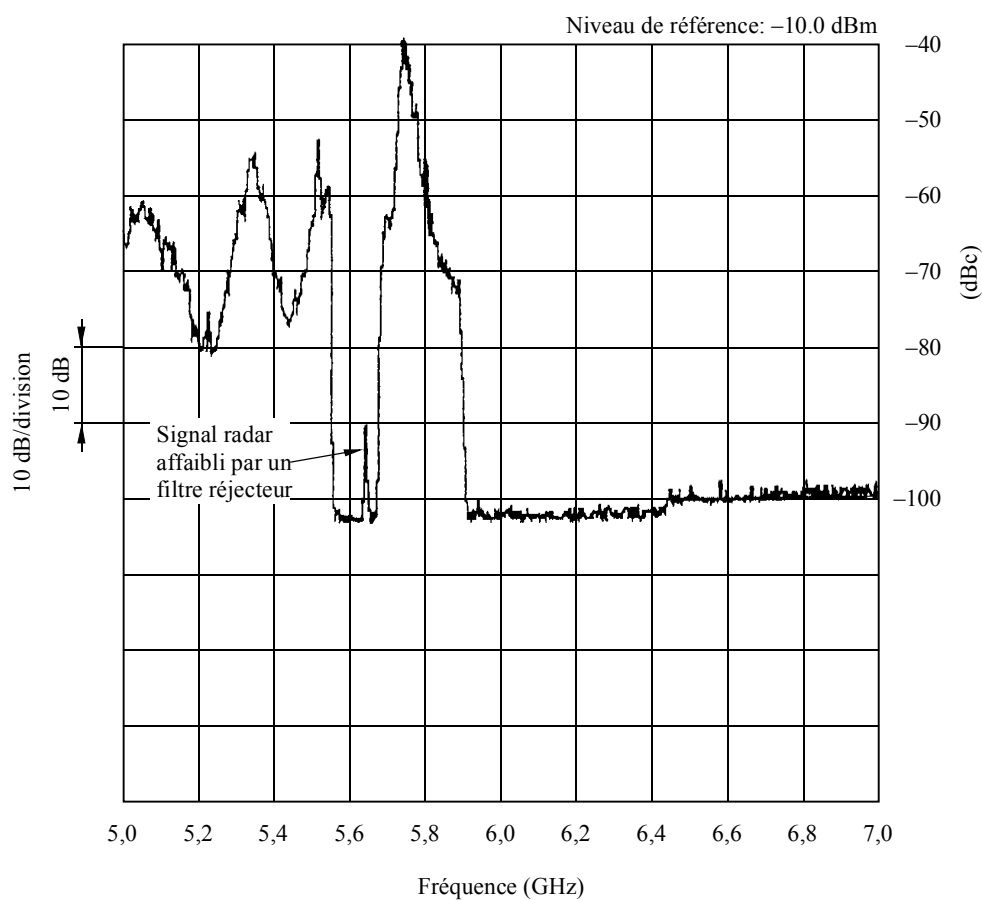
Antennes: 3 m, double polarisation  
 Longueur de bond: 32 km  
 Niveau nominal reçu: -35 dBm

Le radar est situé au milieu du bond, à 900 m de décalage de la ligne joignant les deux stations.

On a donc un angle de discrimination de  $3,2^\circ$  par rapport à l'axe de visée, ce qui devrait produire, pour les rayonnements non essentiels du radar et avec une antenne de 3 m, une discrimination de quelque 20 dB au niveau du diagramme de rayonnement de l'antenne.

FIGURE 4

Spectre de fréquences d'un radar à magnétron équipé d'un filtre,  
 longueur du trajet radioélectrique mesurée: 838 m (champ lointain)



Largueur de bande du filtre:	2,0 MHz
Largueur de bande de la vidéo:	3,0 MHz
Temps de balayage:	60 s
Compte à 5,86477 GHz:	-57,50 dBm
Marque à 6,477 GHz:	-24,17 dBm
Affaiblissement:	0 dB

1097-04

## 5.2 Données concernant les systèmes radar météorologiques

On trouvera ci-après les données techniques du radar météorologique correspondant:

Fréquence:	5,605 GHz
Puissance de crête de l'émetteur:	270 kW ( $\Rightarrow$ p.i.r.e. de 129 dBm)

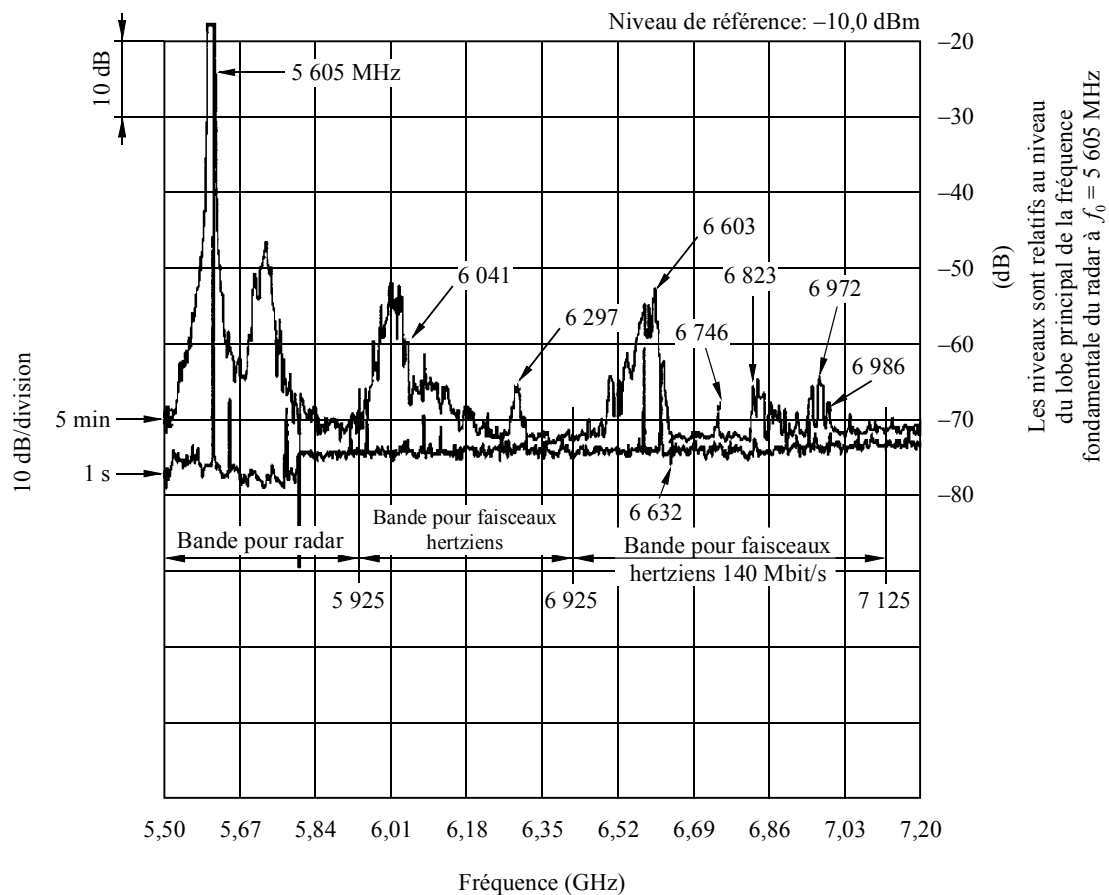
Gain d'antenne:	44,8 dBi (faisceau ponctuel)
Polarisation:	horizontale
Durée d'impulsion:	0,5 ou 2 $\mu$ s
Fréquence de répétition des impulsions:	250, 900 ou 1 200 Hz
Vitesse de rotation de l'antenne:	2 ou 6 tours par min
Angle d'élévation:	0-20°

### 5.3 Rayonnements non essentiels émis par les radars

Les émetteurs équipés de magnétrons tels que ceux des radars de forte puissance produisent généralement d'importants rayonnements non essentiels. On trouvera à la Fig. 5 un exemple de spectre de radar non équipé de filtre, mesuré sur le radar d'Arlanda. La figure montre qu'il existe des rayonnements non essentiels à la fois dans la partie inférieure et dans la partie supérieure de la bande des 6 GHz, à environ 50 dB au-dessous de la puissance de crête du radar.

FIGURE 5

Spectre de fréquences d'un radar météorologique non équipé d'un filtre

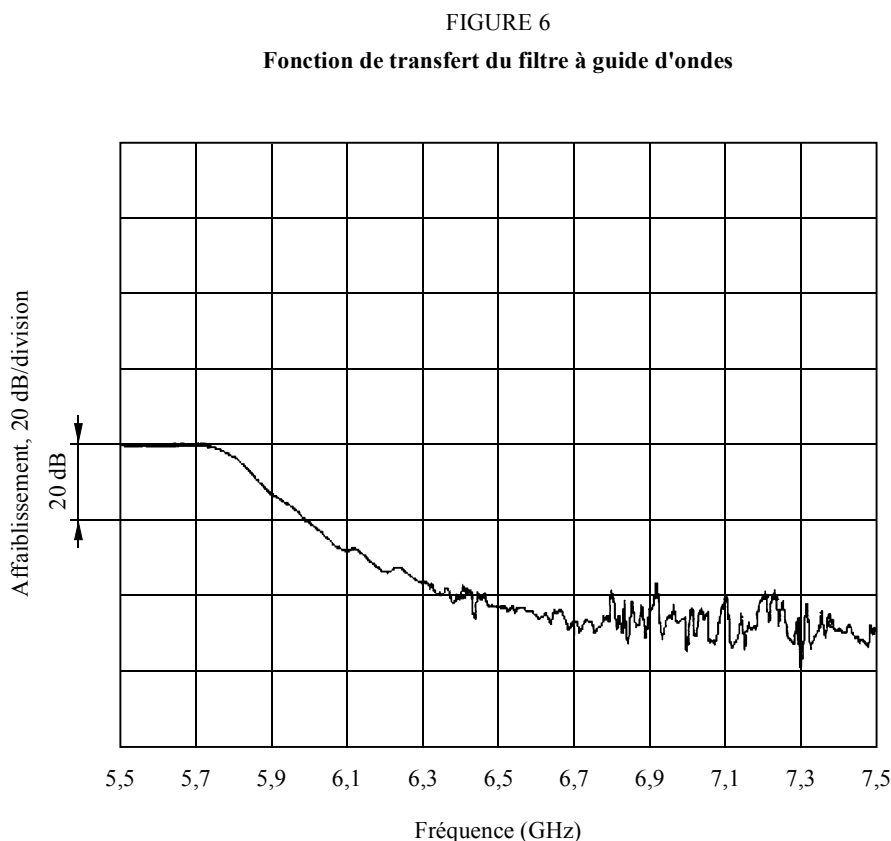


Largueur de bande du filtre:	3,0 MHz
Longueur de bande de la vidéo:	3,0 MHz
Temps de balayage:	42,5 ms
Affaiblissement:	0 dB
Affaiblisseur d'entrée:	0 dB
Affaiblisseur externe:	6 dB
Amplificateur à faible bruit à l'entrée:	gain de 20 dB

#### 5.4 Suppression des rayonnements non essentiels au moyen d'un filtre

Pour supprimer les rayonnements non essentiels dans la partie supérieure de la bande des 6 GHz, un filtre à guide d'ondes comprenant un filtre passe-bas a été installé. L'affaiblissement produit par le filtre au-dessus de 6,4 GHz est de  $\geq 40$  dB.

L'affaiblissement mesuré par rapport à la fréquence est représenté à la Fig. 6.



1097-06

#### 5.5 Résultats des mesures

De nombreuses mesures ont été réalisées pour étudier l'incidence des rayonnements non essentiels sur la qualité de transmission des DRRS. Ces mesures ont porté sur les niveaux des signaux, le spectre et les erreurs sur les bits dans différentes configurations. Certaines des mesures effectuées avant l'installation d'un filtre dans le radar sont indiquées ci-après.

#### 5.6 TEB par rapport au niveau du signal reçu

La Fig. 7 représente deux courbes du TEB en fonction du niveau du signal reçu. La courbe en pointillé caractérise le récepteur dans des conditions normales de fonctionnement sans brouillage. La ligne pleine est mesurée sur le bond par réduction progressive de la puissance d'émission. La grande différence entre les deux courbes tient aux rayonnements non essentiels émis par le radar météorologique. La marge uniforme de protection contre les évanouissements lorsque le  $TEB = 10^{-10}$  (niveau auquel des erreurs sur les bits commencent à se produire) est réduite de 28 à 5 dB.

Lorsque le radar fonctionnait à un angle d'élévation nul et que le signal utile était inférieur de 5 dB ou plus à la valeur nominale de  $-35$  dBm, une ou deux ES se produisaient par tour. Il n'y a pas eu de ES lorsque le radar pointait à plus de  $\pm 1,5^\circ$  par rapport à la station hertzienne ou lorsque l'angle d'élévation dépassait  $1,5^\circ$ .

Après installation d'un filtre passe-bas, on a observé une différence insignifiante entre les courbes.

#### 5.7 Conclusion

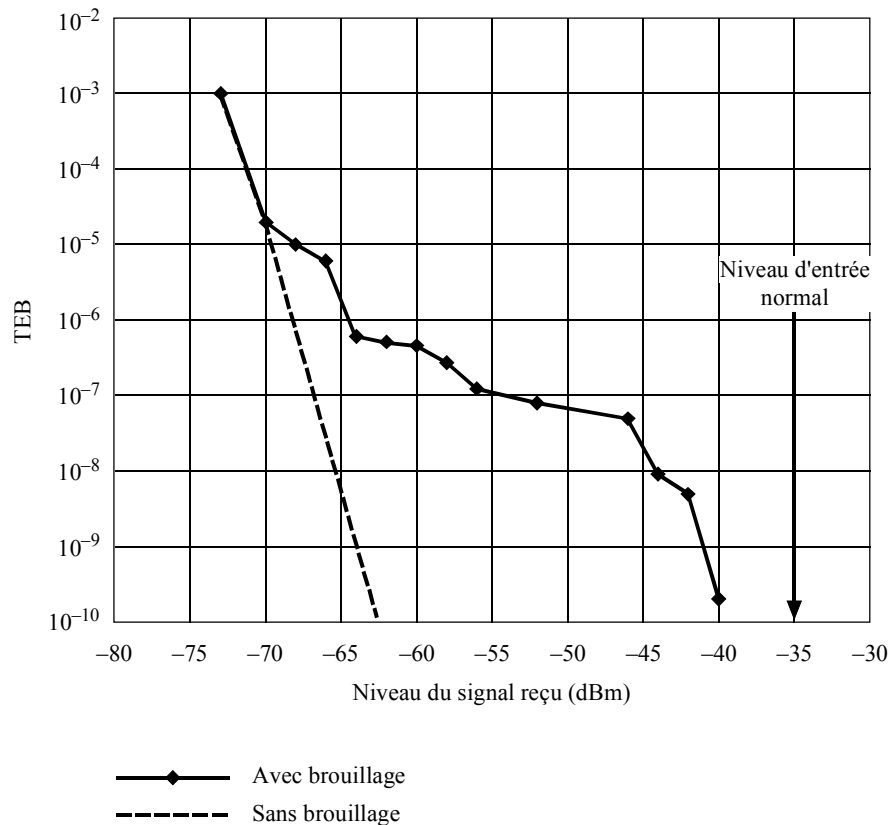
Il a été démontré que les rayonnements non essentiels provenant des systèmes radar peuvent aisément causer des brouillages nuisibles aux DRRS.

Il est possible de réduire les brouillages causés aux récepteurs des faisceaux hertziens à des valeurs négligeables en recourant à des techniques de protection relativement simples, par exemple des filtres passe-bas à guide d'ondes à installer dans les radars.

Ce cas illustre aussi la méthode décrite à l'Annexe 1 (§ 1.4).

FIGURE 7

TEB mesuré par rapport au niveau du signal reçu



1097-07

## 6 Informations provenant d'autres documents publiés

Les brouillages radar causés aux récepteurs des faisceaux hertziens ne sont pas récents. Il semblerait que ce soit R.D. Campbell, de la société AT&T, qui, le premier, a publié en 1958 un compte rendu de l'expérience acquise sur le terrain à cet égard. Quelques années plus tard, D.E. Cridlan, de l'Administration des postes du Royaume-Uni, a rapporté une expérience similaire.

A cette époque, l'incidence sur les transmissions analogiques MRF n'était pas aussi importante que l'effet observé, au cours des années ultérieures, sur les transmissions numériques. Le premier compte rendu connu est une note interne de Bell Telephone Laboratories (BTL) (Etats-Unis d'Amérique) datant de 1980, qui fait état de brouillages causés par un radar météorologique des Etats-Unis d'Amérique à des liaisons radioélectriques MAQ-64 acheminant des signaux à hiérarchie numérique plésiochrone à 135 Mbit/s. Ces incidents ont été mentionnés ultérieurement dans un rapport assez détaillé de la National Telecommunications and Information Agency (NTIA) (Etats-Unis d'Amérique).

Peu avant la publication de ce rapport, des preuves de brouillages causés par des radars en Europe ont été présentées à la Deuxième conférence européenne sur les faisceaux hertziens (ECRR) en 1989.

En conséquence, la Commission d'études 9 de radiocommunications a décidé en 1991 de s'attaquer à une nouvelle tâche, énoncée dans la Question UIT-R 159/9.

Depuis lors, des preuves opérationnelles ont été présentées au Groupe de travail 9A des radiocommunications, ainsi qu'à la Quatrième conférence ECRR.

Des informations sur l'émission de rayonnements non essentiels par les dispositifs de sortie radar de forte puissance, en particulier les magnétrons, ont été publiées périodiquement dans des revues et ouvrages techniques depuis 1945, époque à laquelle remontent les premiers phénomènes de brouillage observés.

Des informations concernant la conception et l'efficacité des filtres à installer dans les émetteurs radar de forte puissance ont été publiées dans des revues professionnelles au moins depuis 1965.

## APPENDICE 2

## À L'ANNEXE 1

**Calculs d'équations et exemples numériques**

Le présent Appendice rassemble les informations contenues dans les diverses contributions reçues depuis 1991 et des exemples numériques y sont donnés pour illustrer de manière plus détaillée les instructions générales données à l'Annexe 1.

**1.1 Réjection en fonction de la fréquence**

La réjection en fonction de la fréquence (FDR, *frequency-dependent rejection*) est la réjection assurée par un récepteur relativement à un signal d'entrée en raison de la largeur de bande du récepteur et de l'espacement des fréquences entre le récepteur et l'émetteur. La réjection FDR des faisceaux hertziens peut être obtenue à partir des niveaux de rayonnements non essentiels mesurés à la source (radar) avec une largeur de bande de résolution de 1 MHz plus un facteur de correction de largeur de bande.

Les faisceaux hertziens fonctionnant dans les bandes des 4 et 6 GHz ont une largeur de bande FI de réception d'environ 40 et 30 MHz respectivement. Les mesures étant souvent effectuées avec une largeur de bande d'analyseur de spectre de 1 MHz (largeur de bande de résolution type d'un analyseur de spectre), une correction doit être appliquée aux niveaux de rayonnements non essentiels mesurés pour rendre compte de la puissance de crête reçue avec un système de 40 ou 30 MHz.

Ce facteur de correction de la largeur de bande est de  $20 \log$  (largeur de bande FI du récepteur en MHz/1 MHz) pour les largeurs de bande FI du récepteur inférieures à la réciproque des temps de montée et de descente des signaux radar.

Les niveaux nominaux de rayonnements non essentiels indiqués dans la Recommandation UIT-R M.1314, Annexe 1, Tableau 2, peuvent servir à déterminer la réjection en fonction de la fréquence des faisceaux hertziens en rapport avec les rayonnements non essentiels des radars.

Par exemple, pour le couplage à partir d'un radar équipé d'un magnétron coaxial (rayonnements non essentiels:  $-60$  à  $-75$  dBc, selon la Recommandation UIT-R M.1314), la réjection FDR d'un faisceau hertzien dans la partie inférieure de la bande des 6 GHz (largeur de bande FI = 30 MHz) serait comme suit:

$$\begin{aligned} \text{FDR} &= 20 \log (30) - (60 \text{ à } 75) && \text{dBc} \\ &= +15 - (60 \text{ à } 75) && \text{dBc} \\ &= -45 \text{ à } -60 && \text{dBc} \end{aligned} \quad (1)$$

Ainsi pour un radar qui génère en sortie une puissance fondamentale maximale de 250 kW (+84 dBm), la puissance équivalente produite dans la bande ( $= P_T - \text{FDR}$ ) serait de  $+24$  à  $+39$  dBm.

Cette amplitude est égale ou même supérieure à celle de la puissance produite par les étages de sortie de l'émetteur du faisceau hertzien fonctionnant à 6 GHz.

**1.2 Réponse temporelle**

Pour déterminer l'effet des rayonnements non essentiels produits par de nombreuses stations radar sur la qualité de fonctionnement d'un DRRS, il est nécessaire de caractériser la réponse temporelle dans la bande passante FI du récepteur. Les mesures des signaux dans le temps indiquent que les réponses des récepteurs de faisceaux hertziens aux rayonnements non essentiels dans les bandes attribuées aux faisceaux hertziens peuvent comprendre deux éléments:

- réponses produites par les fronts avant et arrière de la modulation des impulsions radar;
- réponses produites par le bruit intrinsèque du tube à la sortie du radar pendant l'intervalle des impulsions.

Les rayonnements non essentiels se produisant pendant les fronts avant et arrière des impulsions sont à large bande par nature et génèrent donc une réponse en impulsion à la sortie FI du récepteur du faisceau hertzien.

La largeur de ces réponses en impulsion est égale à la réciproque de la largeur de bande FI du récepteur. Autrement dit, les réponses en impulsion aux fronts avant et arrière sont approximativement de 25 ns et de 33 ns pour un récepteur fonctionnant dans la bande des 4 GHz et dans la partie inférieure de la bande des 6 GHz respectivement.

En conséquence, les réponses en impulsion aux fronts avant et arrière apparaissent comme de courtes impulsions de sortie FI. Elles équivalent approximativement à un intervalle correspondant à un baud d'un DRRS.

Il convient de noter que les réponses en impulsion aux fronts avant et arrière ou les réponses en fréquence au front arrière ne sont pas nécessairement égales; elles augmentent à  $20 \log$  (largeur de bande FI du récepteur) pour les largeurs de bande FI du récepteur inférieures à la réciproque des temps de montée/descente des signaux radar.

Les rayonnements non essentiels se produisant pendant l'intervalle entier des impulsions sont de type bruit et sont générés par le tube à la sortie du radar.

Les réponses en amplitude du récepteur à ces rayonnements de type bruit sont également fonction de la fréquence accordée du récepteur et prédominent davantage lorsque le tube de sortie émet des rayonnements non essentiels.

L'amplitude du bruit non cohérent pendant l'intervalle des impulsions augmente à  $10 \log$  de la largeur de bande FI du récepteur.

En bref, les rayonnements non essentiels produisent deux types de réponses temporelles à la sortie FI d'un récepteur de faisceaux hertziens:

- réponses en impulsion dues aux fronts avant et/ou arrière de la modulation des impulsions radar;
- bruit non cohérent pendant l'intervalle des impulsions.

Les cas observés ont montré que les brouillages causés par des radars à des récepteurs de faisceaux hertziens sont surtout dus au faisceau principal de l'antenne du radar.

L'antenne d'un radar de recherche effectuant un balayage continu sur  $360^\circ$  illuminera brièvement un site de faisceau hertzien pendant chaque intervalle de balayage. L'antenne du faisceau hertzien interceptera donc un certain nombre d'impulsions radar durant chaque intervalle de balayage, par le biais de ses lobes latéraux ou, dans le cas le plus défavorable, par le biais de son faisceau principal.

On peut estimer le nombre total d'impulsions radar interceptées par passage à partir de l'équation suivante:

$$N = \frac{1}{RPM} \cdot 60 \cdot \frac{BW}{360} \cdot PRF \quad (2)$$

où:

- N*: nombre d'impulsions provenant du faisceau principal du radar interceptées par passage
- RPM*: vitesse de rotation de l'antenne (tours par min)
- BW*: ouverture du faisceau principal du radar (degrés)
- PRF*: fréquence de répétition des impulsions (impulsions/s).

La durée totale du train d'impulsions intercepté en provenance du faisceau principal du radar pendant un passage est donnée par l'équation suivante:

$$PTD = N \cdot PRI \quad (3)$$

où:

- N*: variable définie ci-dessus
- PRI*: intervalle de répétition des impulsions (s) =  $1/PRF$ .

Selon les caractéristiques types des radars au sol, le nombre d'impulsions *N* interceptées par balayage à l'azimut (passage) des antennes radar varie de 10 à 70 impulsions.

La durée du train d'impulsions (durée de l'exposition) varie approximativement entre 0,01 et 0,12 s par passage.

Les effets des impulsions radar sur les DRRS peuvent généralement être classés en quatre catégories de dégradation de la qualité:

- augmentation des taux d'erreurs résiduelles dépendant du temps,
- TEB momentanément supérieurs au seuil du taux de secondes avec erreurs (ESR, *errored second ratio*): établissement de rapports de défaillances dues à des rayonnements non essentiels et commutation du canal de protection ou activation d'alarmes en rapport avec la défaillance du service sur de multiples canaux,
- occurrences de secondes à fort taux d'erreur (SES, *severely errored second*) sur un ou plusieurs canaux,
- occurrences de pertes de verrouillage de trame (signal d'indication d'alarme, AIS) et perte de service.

Chacune de ces quatre catégories est examinée ci-après. Les trois premières catégories sont imputables à des mécanismes de couplage de réponses à des rayonnements non essentiels, la quatrième catégorie étant due à une surcharge aux étages d'entrée et à des rayonnements non essentiels.

### 1.3 Taux d'erreurs résiduelles

Les rayonnements non essentiels qui apparaissent comme des réponses en impulsion ou des impulsions de durée totale et de faible niveau dans le système de réception des faisceaux hertziens peuvent causer des taux d'erreurs résiduelles. Les réponses en impulsion du récepteur peuvent être produites par les fronts avant et arrière des impulsions radar.

La largeur des réponses en impulsion est égale à la réciproque de la largeur de bande FI du récepteur. Ainsi, pour les bandes des 4 GHz et des 6 GHz exploitées par les entreprises de télécommunication, les valeurs types de la réponse en impulsion sont de 25 ns et de 33 ns respectivement. Elles sont à peu près égales à un intervalle correspondant à un baud du DRRS.

En l'occurrence, on peut évaluer à partir de l'équation ci-après l'effet des réponses en impulsion aux fronts avant et arrière sur les performances du système pour un train d'impulsions provenant du faisceau principal du radar:

$$TEB = \frac{0,5 p N m}{R t} \quad (4)$$

où:

- TEB*: taux d'erreur sur les bits  
*p*: nombre d'impulsions de fronts avant/arrière par impulsion radar (nombre d'intervalles correspondant à un baud affectés par impulsion) (0, 1 ou 2)  
*N*: nombre d'impulsions provenant du faisceau principal du radar interceptées par passage  
*m*: nombre de bits/Bd (6 pour le mode MAQ-64)  
*R*: débit des signaux en bande de base (140 Mbit/s)  
*t*: période de temps pendant lequel les erreurs sont calculées (0,1 s pour 140 Mbit/s).

Exemple de calcul:

$$TEB \text{ résultant d'un radar type} = \frac{0,5 \times 2 \times 15 \times 6}{140 \times 10^6 \times 0,1} \cong 6,4 \times 10^{-6}$$

Ainsi, selon l'amplitude et le nombre de réponses en impulsion pendant le passage du faisceau principal du radar, le TEB peut dépasser  $1 \times 10^{-6}$ , ce qui déclenche une alarme.

Par ailleurs, pour ce cas de brouillage se traduisant par une réponse en impulsion, le système CED du DRRS pourrait corriger les erreurs se produisant dans un seul intervalle correspondant à un baud.

### 1.4 Taux d'erreur momentanément supérieurs au seuil

Des taux d'erreur momentanément supérieurs au seuil ( $TEB > 10^{-6}$ ) peuvent apparaître lorsque les rayonnements non essentiels produisent une impulsion parasite de durée totale, au-dessus du seuil de protection *C/I* du récepteur de faisceau hertzien. Dans ce cas, la durée des impulsions du radar de surveillance est généralement de l'ordre de 1 à 4  $\mu$ s.

Lorsque le brouillage pendant la durée totale de l'impulsion dépasse le seuil de protection *C/I* requis pour le récepteur du faisceau hertzien, il neutralisera la fonction de correction des erreurs et des blocs d'erreurs apparaîtront pour chaque impulsion entrante.

Dans ce cas, un bloc d'erreurs sera généralement compris entre 100 et 5 000 bits, selon la durée de l'impulsion.

L'équation ci-après permet d'estimer le TEB découlant de la réception d'un train d'impulsions de durée totale:

$$TEB = \frac{0,5 N(PW/BI)m}{R t} \quad (5)$$

où:

- TEB*: taux d'erreur sur les bits  
*N*: nombre d'impulsions par passage du faisceau principal du radar  
*PW*: largeur d'impulsion du radar (1  $\mu$ s, 3  $\mu$ s ou 4  $\mu$ s)  
*BI*: intervalle correspondant à un baud (pour 140 Mbit/s  $\cong$  43 ns)  
*m*: nombre de bits par Bd (6 pour le mode MAQ-64)  
*R*: taux de signaux en bande de base (140 Mbit/s)  
*t*: période de temps pendant lequel les erreurs sont calculées (0,1 s pour 140 Mbit/s).



Exemple de calcul:

$$TEB \text{ pour un radar type: } \frac{0,5 \times 18 \times (4 \times 10^{-6}/43 \times 10^{-9}) \times 6}{140 \times 10^6 \times 0,1} \cong 3,5 \times 10^{-4}$$

### 1.5 Occurrences de secondes à fort taux d'erreur (SES)

Les SES apparaissant dans un récepteur de DRRS peuvent être dues à des niveaux élevés de rayonnements non essentiels provenant du radar ou à une surcharge aux étages d'entrée.

Pour le couplage des rayonnements non essentiels, les SES peuvent aussi être imputées aux multiples réflexions par diffusion d'une impulsion radar. Ces phénomènes sont souvent dus à des réflexions causées par le terrain (collines et montagnes) ou par des bâtiments. La diffusion multiple a pour principal effet de provoquer un étirement de la largeur de l'impulsion reçue, ainsi que des impulsions additionnelles reçues, lorsque la différence de distance entre le trajet direct et le trajet réfléchi dépasse la distance que le signal du faisceau hertzien peut parcourir pendant une largeur d'impulsion.

Cette propagation par diffusion multiple peut aggraver les brouillages causés par les radars pulsés. En cas de diffusion par trajets multiples (étirement des impulsions), le TEB peut dépasser  $10^{-3}$ .

### 1.6 Perte de verrouillage de trame et perte de service

Si la réponse à une impulsion radar à la sortie FI d'un récepteur dépasse cinq impulsions de tramage consécutives (environ 10  $\mu$ s pour 140 Mbit/s), il se produira une perte de verrouillage de trame, de sorte que le système de réception entraînera aussi un reformatage de tous les systèmes en aval.

L'intervalle de reformatage durera des dizaines de millisecondes et sera inévitablement à l'origine de SES pour toutes les charges utiles transportées par le canal radioélectrique. En outre, le système de correction d'erreur n'est pas efficace en cas de perte de verrouillage de trame.

La perte de verrouillage de trame peut se produire à cause des mécanismes de couplage de réponses à des rayonnements non essentiels ou de surcharge aux étages d'entrée (récepteurs partageant le même préamplificateur). Lorsque la saturation aux étages d'entrée entraîne une perte de verrouillage de trame, le niveau du signal radar à l'entrée du récepteur sera généralement supérieur à 2,5 dBm à la fréquence fondamentale du radar et la durée des impulsions supérieure à 4  $\mu$ s. A cause du temps de récupération du préamplificateur à faible bruit partagé, une impulsion radar interceptée de 4  $\mu$ s est étirée à une valeur supérieure à 10  $\mu$ s.

On a observé une surcharge aux étages d'entrée des faisceaux hertziens fonctionnant à 6 GHz à cause de radars fonctionnant à 5 GHz.

Si la perte de service se produit dans le récepteur hyperfréquence, le temps d'interruption total de la transmission dans les installations situées en aval varie de 2,5 à 10 s.

Cette perte de service se produit lorsque le préamplificateur hyperfréquence de faible bruit devient surchargé à cause de l'énergie produite à la fréquence fondamentale du radar ou lorsque le faisceau principal de l'antenne du radar pointe en permanence, pour une raison quelconque, sur la station du faisceau hertzien.

Des niveaux de signaux radar supérieurs à -2 dBm à l'entrée du préamplificateur de faible bruit causeront une surcharge aux étages d'entrée. Dans ce cas, l'amplificateur peut être bloqué pendant un laps de temps bien supérieur à la durée de l'impulsion et des SES apparaissent généralement.

On n'a observé que très rarement des événements prolongés entraînant une perte de service totale.

Cet effet peut être corrigé avec l'installation d'un filtre dans le guide d'ondes du récepteur en amont de l'amplificateur de faible bruit. Il est également possible d'utiliser des amplificateurs de faible bruit individuels après les filtres de canaux du réseau de branchement.

### 1.7 Bandes latérales distantes du signal radar fondamental

Les bandes latérales distantes du signal radar fondamental qui est modulé par des impulsions ont un contenu substantiel.

La détermination des éléments spectraux découlant de la modulation par impulsion d'un dispositif de puissance de récepteur RF idéal est résumée ci-après.

La forme de l'impulsion modulée est censée être trapézoïdale, d'une durée totale,  $D$ , et d'un temps de montée et de descente  $\Delta$ . Les impulsions se produisent périodiquement à un intervalle  $T_r$ .

Les étapes détaillées de la détermination ne sont pas décrites ici. Les formules obtenues sont les suivantes:

a) L'amplitude totale du spectre est donnée par:

$$S(t) = K \cdot \cos(\omega t) \cdot f(t) \quad (6)$$

$$S(t) = \frac{K D}{T_r} \left[ \cos \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n D}{T_r}}{\frac{\pi n D}{T_r}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi n \Delta}{T_r}}{\frac{\pi n \Delta}{T_r}} \cdot \sin (\omega_0 + n \omega_r) t - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n D}{T_r}}{\frac{\pi n D}{T_r}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi n \Delta}{T_r}}{\frac{\pi n \Delta}{T_r}} \cdot \sin (\omega_0 - n \omega_r) t \right] \quad (7)$$

où:

$\omega_0 = 2 \pi f_0$ , fréquence fondamentale du radar

$$\omega_r = \frac{2\pi}{T_r} = 2 \pi f_r, PRF$$

$K$ : amplitude à mi-crête de chaque impulsion trapézoïdale.

b) La partie qui apparaît dans la largeur de bande  $B$  d'un récepteur (par exemple d'un faisceau hertzien) et qui est accordée en fonction de la fréquence centrale,  $f_m$ , d'un canal se caractérisera par une puissance spectrale donnée par:

$$I = \frac{K^2 B f_r}{\left[ \pi^2 \Delta (f_m - f_0)^2 \right]^2} \quad (8)$$

Il s'agit de la puissance hors bande de l'émetteur causant des brouillages au récepteur du faisceau hertzien.

La puissance de brouillage peut être exprimée en termes familiers (dBm):

$$I_{\text{dBm}} = K_{\text{dBm}}^2 - 20 \log [\pi^2 \Delta (f_m - f_0)^2] + 10 \log (B f_r) \quad (9)$$

*Exemple numérique:*

Considérons un radar de surveillance aérienne de bande L (1,32 GHz) ayant une sortie pulsée de 3,5 MW.

Ce radar peut causer des brouillages à un récepteur du service fixe fonctionnant à proximité de 1,47 GHz et transportant un signal MDP-4 de 8 Mbit/s concordant avec le plan des canaux décrit dans la Recommandation UIT-R F.1242, avec un espacement des canaux de 7 MHz.

Supposons que les paramètres détaillés du radar soient les suivants:

$$K^2 = 3,5 \text{ MW (crête)} \Rightarrow +95,4 \text{ dBm}$$

$$\Delta = 0,1 \mu\text{s (temps de montée)}$$

$$f_m - f_0: 150 \text{ MHz (séparation entre le canal du faisceau hertzien et la fréquence fondamentale du radar)}$$

$$B: \text{ largeur de bande du canal du faisceau hertzien } (\cong 7 \text{ MHz})$$

$$f_r: \text{ fréquence de répétition des impulsions (770 impulsions/s).}$$

A partir de ces paramètres, on calcule la partie de la puissance de sortie qui sera produite à proximité de 1,47 GHz dans une largeur de bande de 7 MHz et on obtient  $-13,4$  dBm environ.

Supposons ensuite que:

$$G = 34,5 \text{ dB, gain du faisceau principal du radar}$$

La p.i.r.e. sera donc  $\cong +21$  dBm.

Cela donne une indication du niveau de rayonnement non désiré qui peut être observé.

Notons que nous partons de l'hypothèse d'un émetteur idéal de 3,5 MW (sans rayonnement involontaire).

### 1.8 Examen de l'étendue de la réduction de la portée du radar causée par l'installation de filtres supprimant les rayonnements non essentiels

Lors de discussions précédentes, il a été affirmé que toute modification de conception d'un radar existant, c'est-à-dire l'installation de filtres de suppression dans la voie de transmission entre le tube de puissance de sortie et l'antenne, altérerait les performances du radar. En particulier, les représentants des entités exploitant des radars de la marine marchande ont affirmé que cette mesure aurait une incidence défavorable sur les opérations de sauvetage en mer.

On trouvera ci-après une brève analyse de l'étendue de la réduction des performances du radar.

Le point de départ est l'équation concernant la portée du radar généralement présentée dans les manuels [Barton, 1979]:

$$R^4 = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot k T_0 \cdot B \cdot NF_0 \cdot L_{tot}} \quad (10)$$

où:

- $R$ : portée maximale pour une taille de cible donnée du radar et pour une probabilité de détection donnée
- $P_t$ : puissance de crête de l'émetteur radar
- $G$ : gain de l'antenne radar
- $\lambda$ : longueur d'onde de fonctionnement du radar
- $\sigma$ : surface équivalente de la cible
- $k T_0$ : constante de Boltzmann et température de référence
- $B$ : largeur de bande de bruit équivalente du récepteur
- $NF_0$ : facteur de bruit du récepteur
- $L_{tot}$ : facteur de perte du système.

Considérons une installation radar non encore équipée d'un filtre supprimant les rayonnements non essentiels.

Avec un facteur de perte du système donné,  $L_{tot}$ , le radar a une portée nominale  $R_0$ .

Supposons que l'on installe un filtre ayant un affaiblissement d'insertion unidirectionnel mesuré  $L_f$ .

Le filtre contribuera deux fois au facteur de perte du système car il affaiblit la puissance émise et affaiblit encore une fois le signal d'écho reçu avant que celui-ci entre dans le récepteur.

Le facteur de perte du système augmente,  $L'_{tot}$ , la puissance reçue est maintenant plus faible et il en résulte une certaine réduction de la portée du radar,  $R'$ .

A supposer que tous les autres paramètres soient constants, prenons le taux de chaque côté:

$$\left( \frac{R_0}{R'} \right)^4 = \frac{L'_{tot}}{L_{tot}}$$

$$\left( \frac{R_0}{R'} \right) = \sqrt[4]{\frac{L'_{tot}}{L_{tot}}}$$

Appliquons maintenant la forme logarithmique:  $R_0$  (dB) -  $R'_0$  (dB) = 1/4 [ $L'_{tot}$  (dB) -  $L_{tot}$  (dB)]

$L'_{tot}$  (dB) -  $L_{tot}$  (dB) étant équivalent à seulement  $2 L_f$  (dB),  $R_0$  (dB) -  $R'_0$  (dB) = 1/4 [ $2 L_f$  (dB)]

La réduction de la portée  $\Delta R$  sous forme logarithmique correspond seulement à la moitié de l'affaiblissement d'insertion  $L_f$  (dB) du filtre.

Il est donc aisé de donner quelques exemples numériques sous forme de tableau en supposant qu'il existe une plage de valeurs probables de  $L_f$ . En outre, la réduction de la portée est exprimée en pourcentage de la valeur nominale  $R_0$  et peut enfin être convertie en termes absolus à l'aide d'un exemple type de portée de radar.

$L_f$ (dB)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
$\Delta R$ (dB)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,35
$\Delta R$ %	2,33	3,5	4,7	5,9	8,4

A titre d'exemple, supposons qu'il existe un radar de navigation de la marine marchande d'une portée nominale de  $R_0 = 10$  milles nautiques ( $\cong 18$  km), destiné à la détection d'un petit objet (balise de voie maritime, bouée).

Selon ce qui précède, la réduction absolue à partir de  $R_0 \cong 18$  km sera comme suit:

$L_f$ (dB)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
$\Delta R$ (m)	$\cong 419$	$\cong 630$	$\cong 846$	$\cong 1\ 062$	$\cong 1\ 512$

Considérer ou non que ces réductions de la portée sont préoccupantes en ce qui concerne la détection d'une petite cible située à une distance de 18 km environ est une question d'appréciation.

Toutefois, ce qui précède souligne également qu'il importe, d'une manière générale, de maintenir l'affaiblissement d'insertion des filtres de suppression des rayonnements non essentiels aussi bas que possible.

Les informations de base mentionnées à l'Appendice 1 (§ 6) montrent qu'il existe un consensus général concernant le fait que les filtres de suppression de forte puissance pourraient être conçus de manière à présenter un affaiblissement d'insertion de 0,15-0,5 dB à la fréquence de fonctionnement fondamentale du radar.

En outre, ces valeurs d'affaiblissement d'insertion ont été indiquées dans les contributions du Japon citées à l'Appendice 1.

## 1.9 Technique d'entrelacement des bits

La Fig. 8 illustre le principe et la configuration de la technique d'entrelacement des bits. Un circuit CED faisant appel à cette technique disperse des paquets d'erreurs sur les bits en modifiant l'ordre du signal en bande de base. Dans l'entrelaceur situé du côté du modulateur, la mémoire vive (RAM, *random access memory*) enregistre les données dans une trame d'entrelacement qui contient  $F_1$  éléments binaires obtenus comme suit:

$$F_1 = n d \quad (11)$$

où:

$n$ : longueur du bloc CED

$d$ : profondeur d'entrelacement des bits.

Lorsque la RAM produit des données en sortie, l'ordre du signal est modifié de sorte que  $(n-1)$  bits peuvent être insérés entre des bits adjacents. Dans le dispositif de désentrelacement situé du côté du démodulateur, l'ordre peut être réarrangé selon la procédure inverse. Ainsi, les erreurs en paquets causées par les brouillages émanant du radar sont transformées en erreurs aléatoires qui peuvent être ultérieurement corrigées par le mécanisme CED.

Si ce mécanisme peut corriger  $t$  erreurs sur les bits dans un bloc de  $n$  bits, les erreurs en paquets de  $dt$  bits contigus seront corrigées.

La profondeur d'entrelacement des bits,  $d$ , doit satisfaire à la relation suivante:

$$d = \frac{\tau f_c}{t} \quad (12)$$

où:

$d$ : profondeur d'entrelacement des bits

$\tau$ : longueur des erreurs en paquets (largeur de l'impulsion radar) (s)

$f_c$ : fréquence d'horloge des systèmes DRRS (Hz)

$t$ : capacité CED (bits)

[\*]: entier le plus proche arrondi à partir de \*.

Pour l'entrelacement des bits, la synchronisation de la porteuse doit être maintenue pendant la durée des erreurs en paquets. La constante de temps de la boucle de synchronisation de la porteuse devrait être de valeur plus élevée que la longueur des erreurs en paquets  $\tau$ . Il convient de noter que l'entrelacement des bits affecte le retard de traitement du système DRRS.

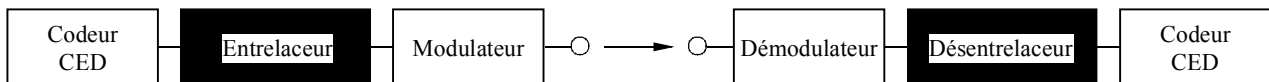
Le retard de traitement,  $D$  (s) exprimé par l'équation suivante devrait être défini de manière à être plus court que le temps de propagation admissible.

$$D = 2F_I/f_c = 2n d/f_c \tag{13}$$

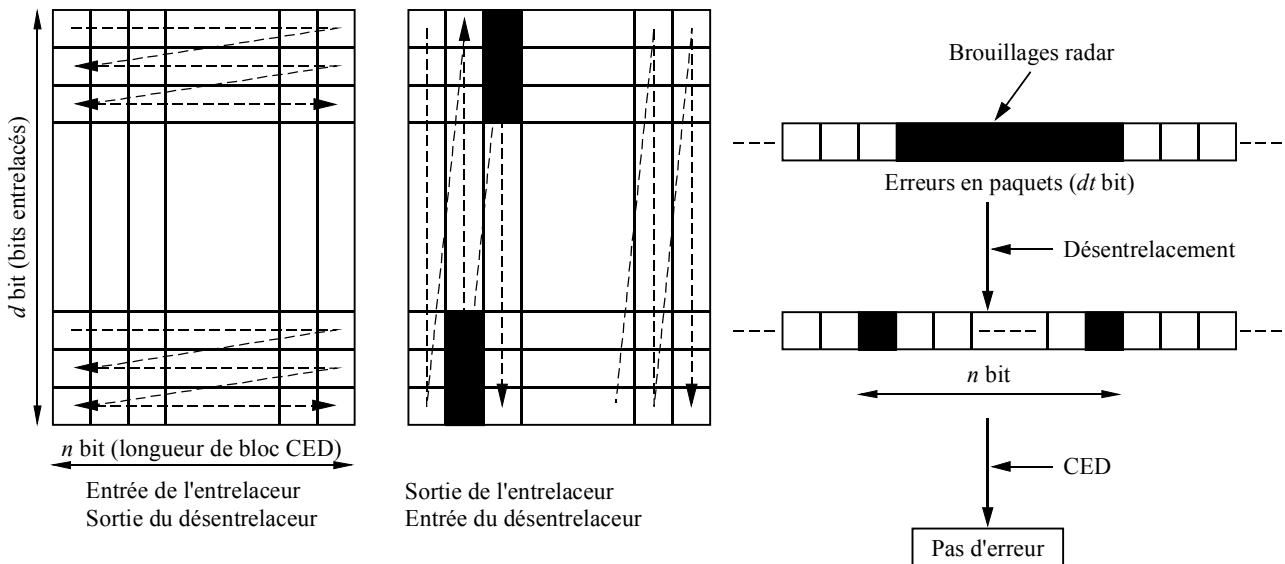
FIGURE 8

Principe et configuration de la technique d'entrelacement des bits

a) Configuration de l'entrelacement des bits



b) Format et principe de la trame



1097-08

Si le DRRS peut accepter le temps de propagation,  $D$ , indiqué dans la formule (13), l'entrelacement des bits permettra théoriquement d'éviter des erreurs. Cependant, dans le cas d'un signal de brouillage extrêmement important, les rayonnements non désirés répartis sur la largeur d'impulsion radar spécifiée occasionneront des brouillages additionnels. Cet effet doit faire l'objet d'un complément d'études.

La technique d'entrelacement des bits est facile à mettre en œuvre, moyennant l'adjonction de circuits en bande de base au modem. Toutefois, compte tenu de l'effet susmentionné concernant le temps de propagation, il peut être opportun de n'utiliser l'entrelacement des bits que sur les bonds exposés à des brouillages radar permanents.

### 1.10 Conséquences des brouillages

Les objectifs en matière de caractéristiques d'erreur relatives aux DRRS fonctionnant conformément à la Recommandation UIT-T G.826 sont énoncés dans les Recommandations UIT-R F.1092 et UIT-R F.1189.

Les objectifs de qualité pour un système à bonds multiples de 2 500 km fonctionnant à 155 Mbit/s sont indiqués ci-après (pour allocation de blocs  $B_L = 0$ ):

$$\begin{aligned} \text{ESR} &= 0,16 \times 0,05 = 8 \times 10^{-3} \text{ ou } 20 \text{ 736/mois} \\ \text{SESR} &= 2 \times 10^{-3} \times 0,05 = 1 \times 10^{-4} \text{ ou } 259/\text{mois} \\ \text{BBER} &= 2 \times 10^{-4} \times 0,05 = 1 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

ESR: taux de secondes avec erreurs

SESR: taux de secondes à fort taux d'erreur

BBER: taux de blocs erronés résiduels.

Avec, supposons, 50 bonds et un réseau hertzien de 2 500 km, le nombre mensuel admissible de SES par bond est de 5,2.

### 1.11 Brouillages causés par des radars fixes

Il est prévu que les brouillages causés par des radars fixes seront persistants (fonctionnement 24 h sur 24) mais assez rares. On supposera donc qu'ils affecteront un seul bond dans un réseau hertzien. Cette supposition semble raisonnable vu qu'un seul signal radar brouilleur serait soumis à un affaiblissement additionnel sur le trajet pouvant aller jusqu'à 34 dB (avec une longueur de bond supposée de 50 km) au-delà du premier bond exposé avant de rencontrer un autre site du système.

Il en résulte finalement qu'un bond du réseau hertzien fonctionnera avec une marge de protection contre les évanouissements réduite à cause des brouillages radar. La qualité de fonctionnement sur ce bond (définie en fonction de la propagation) serait affectée.

La question qui se pose maintenant est de savoir quel degré de dégradation des performances peut être toléré sur ce bond unique lorsque la dégradation est répartie sur la totalité du réseau à bonds multiples.

La détermination, au § 1.2 ci-dessus, de la durée d'un train d'impulsions intercepté laisse entendre que les brouillages causés par le faisceau principal à une station du service fixe pourraient se produire pour des pourcentages de temps proches de 1% ou cumulés – environ 14 min/jour (24 h). Il ne sera donc pas approprié d'adopter une prescription concernant la protection du service fixe selon des objectifs à court terme (c'est-à-dire < 0,005%) car dans ce cas une partie substantielle de la marge de protection contre les évanouissements sur le bond du service fixe serait perdue pendant de très courts laps de temps.

Par ailleurs, d'autres services primaires partageant la bande avec le service fixe ne devraient pas causer une dégradation des performances du service fixe de plus de 10%, comme l'exige la Recommandation UIT-R F.1094.

Les brouillages admissibles équivalent à un critère  $I/N$  minimum à l'entrée du récepteur du système du service fixe de -13 dB pour les systèmes du service fixe faisant appel à la diversité. Cependant, dans le cas des rayonnements non désirés émanant de services fonctionnant dans d'autres bandes, il est souhaitable que cette valeur  $I/N$  soit très inférieure à -13 dB pour ne pas affecter notablement la planification des bandes de fréquences attribuées au service fixe.

Vu qu'il n'est peut-être pas toujours facile de mettre en œuvre de manière économique un système très puissant de suppression des rayonnements hors bande provenant des radars fixes pour obtenir le niveau  $I/N$  susmentionné, il serait raisonnable d'accepter, même si c'est un inconvénient, un niveau intermédiaire équivalent à une dégradation de 3 dB maximum de la marge de protection contre les évanouissements sur le bond du service fixe.

En matière de protection, une valeur  $I/N$  minimale de 0 dB est obligatoire pour que l'objectif ESR des DRRS ne soit pas gravement compromis. Pour les systèmes du service fixe faisant appel à la diversité, le rapport  $I/N$  ne devrait pas dépasser -4 dB environ. Cela étant, pour tenir compte des divers systèmes radar et vu que le nombre de systèmes devrait être peu élevé (les brouillages qu'ils occasionnent aux réseaux du service fixe pouvant donc être raisonnablement gérés), un rapport  $I/N$  maximum de 0 dB peut être acceptable (voir aussi la Recommandation UIT-R F.1190). Un rapport  $I/N$  de 0 dB entraînera un accroissement d'un facteur de 4 environ de la qualité en termes de SES ( $\text{TEB} > 10^{-5}$ ). Sur un réseau hertzien de 50 bonds, cela se traduira par une augmentation de 6% de la qualité en termes de SES.

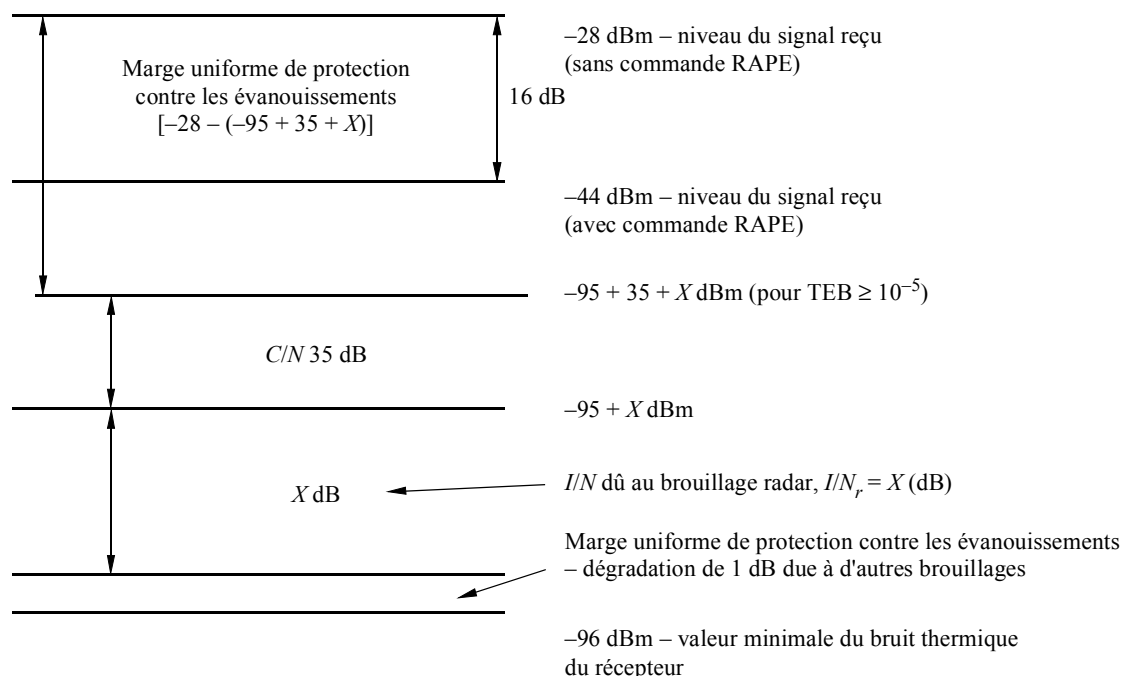
### 1.12 Brouillages causés par des radars mobiles

Comme exemples de sources de brouillage de ce type, citons les systèmes mobiles maritimes et les systèmes terrestres transportables (ne fonctionnant pas pendant le déplacement). Comme ci-dessus, il est supposé qu'un seul bond sera affecté dans un faisceau hertzien de 2 500 km. Ces sources de brouillage sont difficiles à contrôler et peuvent donc avoir une grave incidence sur le système radioélectrique numérique brouillé (généralement provoquant l'apparition de SES).

Par exemple, l'incidence du rapport  $I/N$  sur un faisceau hertzien à modulation MAQ-512 fonctionnant à 4 GHz est examinée ci-après:

Modulation:	MAQ-512
Fréquence:	4 GHz
Largeur de bande FI, $B$ :	40 MHz
Réduction de puissance (régulation automatique de la puissance émise (RAPE)) :	16 dB
Puissance d'émission:	37 dBm
Longueur de bond, $D$ :	46 km
Affaiblissement net sur le trajet:	65 dB
Niveau nominal du signal reçu:	-28 dBm
Facteur de bruit, $F$ :	2 dB
Bruit aux étages d'entrée du récepteur:	-96 dBm (-114 + 10 log $B$ (MHz) + $F$ )
Affaiblissement de transmission:	92,4 + 20 log (fréquence (GHz) + 20 log $D$ (km))

FIGURE 9  
Diagramme du niveau du signal reçu



Le rapport  $I/N_r$  ( $X$  dB) indiqué doit être inférieur à 16 dB (voir ci-après) pour que les brouillages radar n'entraînent pas l'apparition de SES ( $TEB > 10^{-5}$ ), d'où un non-respect des spécifications en matière de qualité énoncées dans la Recommandation UIT-T G.826.

$$-95 + 35 + X < -44$$

$$X < 95 - 35 - 44$$

$$X < 16$$

Un niveau de brouillage légèrement inférieur au seuil du récepteur n'aura pas d'incidence directe sur la qualité en termes de SES; toutefois, les objectifs de qualité en termes de taux de ESR et de taux BBER seront affectés.

Des études ont démontré que, pour les objectifs de qualité ESR, la prescription relative au taux d'erreurs résiduelles sur les bits (RBER) des DRRS est plus stricte que celle qui est fondée sur le taux BBER.

A titre d'exemple, le taux RBER correspondant aux objectifs ESR est de l'ordre de  $1 \times 10^{-13}$  par bond pour un système fonctionnant à 155,52 Mbit/s. Autrement dit, la Recommandation UIT-T G.826 impose un taux RBER inférieur (de un à deux ordres de grandeur) à ce qu'exige la Recommandation UIT-T G.821.

Pour mettre en place ces conditions de fonctionnement, il est recommandé d'appliquer une marge minimale de 6 dB qui donne un rapport  $I/N$  maximal de 10 dB dans le cas des radars mobiles (voir aussi la Recommandation UIT-R F.1190).

## 2 Résumé

En résumé, les caractéristiques des systèmes radar, les caractéristiques des faisceaux hertziens et les facteurs environnementaux influent sur les effets que produisent les rayonnements des radars pulsés sur les récepteurs des DRRS.

Ces effets sont très difficiles à analyser.

En raison de cette complexité, aucun effort ne devrait être ménagé pour assurer la compatibilité en maintenant un seuil de protection suffisant (rapport  $C/I$ ) des récepteurs des faisceaux hertziens.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARTON, D. K. [1979] Radar systems analysis. *Artech House Inc.*

---