

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R SM.1446
(04/2000)

**Définition et mesure des produits
d'intermodulation dans un émetteur
utilisant des techniques de modulation de
fréquence, de phase ou d'autres techniques
de modulation complexes**

Série SM
Gestion du spectre



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 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
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	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, 2011

© UIT 2011

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 SM.1446*

**DÉFINITION ET MESURE DES PRODUITS D'INTERMODULATION DANS UN ÉMETTEUR
UTILISANT DES TECHNIQUES DE MODULATION DE FRÉQUENCE, DE PHASE
OU D'AUTRES TECHNIQUES DE MODULATION COMPLEXES**

(2000)

Domaine d'application

La présente Recommandation sert de base concernant les définitions des différents types d'intermodulation dans l'émetteur et de divers types de techniques de mesure.

Mots clés

Produits d'intermodulation, techniques de mesure, rayonnements non désirés

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les produits d'intermodulation (IM) font partie des rayonnements non désirés (numéro 1.146 du RR);
- b) que les produits d'IM sont générés dans le système de transmission radioélectrique lui-même et/ou par interaction entre différents éléments rayonnants situés sur le même site radioélectrique;
- c) que les limites des rayonnements non désirés dans le domaine des rayonnements non essentiels fixées dans l'Appendice 3 du RR et la Recommandation UIT-R SM.329 ne concernent que les produits d'IM par un seul ou plusieurs canaux;
- d) que les limites des émissions hors bande ne concernent que les produits d'IM par un seul ou plusieurs canaux et qu'elles sont actuellement à l'étude;
- e) qu'aucune limite n'est définie pour l'IM entre émetteurs de différents systèmes;
- f) que le nombre de sites radioélectriques partagés est en augmentation rapide et que chaque site peut rayonner de façon anormale et incontrôlée des produits d'IM passifs et actifs qui viendront s'ajouter au niveau des récepteurs;
- g) que les produits d'IM imputables à un émetteur radioélectrique en modulation d'amplitude sont examinés dans la Recommandation UIT-R SM.326;
- h) qu'il est nécessaire de définir des méthodes de mesure des produits d'IM, en particulier pour des techniques de modulation numériques,

notant

- a) que le Rapport UIT-R SM.2021 expose des principes généraux sur la génération de produits d'IM et sur les techniques de réduction des brouillages permettant de minimiser les produits d'IM,

recommande

1 de se fonder, pour l'examen des types de mécanismes qui génèrent des produits d'IM dans le système de transmission, sur les définitions et les techniques de mesure données dans l'Annexe 1 pour chaque type d'IM.

* La Commission d'études 1 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en 2016 et en 2019, conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

ANNEXE 1

Produits d'IM dans l'émetteur

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Définition des différents types d'IM dans l'émetteur	2
1.1 Type 1 – IM par un seul canal	3
1.2 Type 2 – IM par plusieurs canaux	4
1.3 Type 3 – IM entre émetteurs.....	5
1.4 Type 4 – IM due à des antennes actives	6
1.5 Type 5 – IM due à des circuits passifs.....	6
1.6 Affaiblissement de l'IM de l'émetteur.....	7
2 Considérations touchant aux services de radiocommunication.....	8
3 Techniques de mesure	8
3.1 Méthodes génériques de mesure des produits d'IM par un seul canal (Type 1).	8
3.1.1 Modulation analogique.....	8
3.1.2 Modulations numériques.....	9
3.2 Méthodes génériques pour mesurer les produits d'IM par porteuses multiples (Type 2)	9
3.2.1 Description des méthodes de mesure	10
3.2.2 Comparaison des méthodes.....	11
3.3 Méthodes génériques pour mesurer l'IM entre émetteurs (Type 3).....	12
3.3.1 Principe	12
3.3.2 Dispositif de mesure.....	12
Appendice 1 à l'Annexe 1 – Exemples de caractéristiques d'IM	14

1 Définition des différents types d'IM dans l'émetteur

Les produits d'IM sont dus à des points de non-linéarité dans l'amplificateur de sortie de l'émetteur, (par exemple au niveau des semi-conducteurs, des klystrons, etc. et dans des dispositifs passifs (par exemple au niveau des combineurs, des circulateurs, des connecteurs, etc.)).

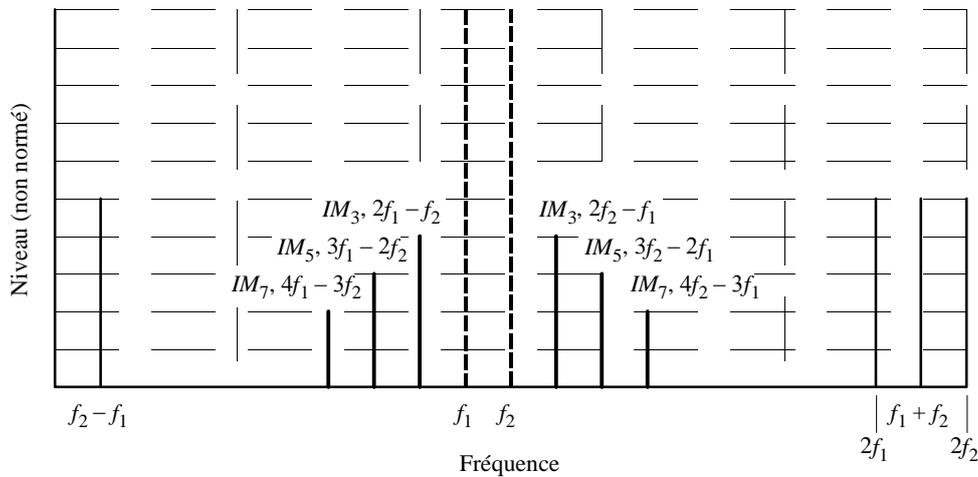
Les produits d'IM à la fréquence f_{IM} sont causés par deux ou plus de deux signaux brouilleurs aux fréquences f_1, f_2, \dots correspondant aux points de non-linéarité, au niveau de la sortie d'un émetteur. La relation entre f_{IM} et f_1, f_2, \dots s'exprime de façon très générale:

$$f_{IM} = |m_1 f_1 + m_2 f_2 + \dots| \quad \text{avec} \quad m_0 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

L'ordre du produit d'IM est donné par $n = m_1 + m_2 + \dots$. Cela signifie que la fréquence pour des produits d'IM de 2ème ordre, IM_2 avec $n = 2, m_1 = m_2 = 1$ se traduit par $f_{IM} = |f_1 \pm f_2|$ et pour des produits d'IM de 3ème ordre IM_3 ($n = 3, m_1 = 2, m_2 = 1$) par $f_{IM} = |2f_1 \pm f_2|$ ou par $f_{IM} = |2f_2 \pm f_1|$ avec $m_1 = 1, m_2 = 2$. Les produits $2f_1 - f_2$ et $2f_2 - f_1$ sont ceux qui intéressent le plus les concepteurs car ils sont souvent spécifiés dans des normes même si les produits $f_1 + f_2 - f_3$ sont de plus grande ampleur et plus nombreux s'il y a plus de deux signaux brouilleurs. Pour certaines applications, les produits d'IM de cinquième ordre, IM_5 , se produisant respectivement à $3f_1 - 2f_2$ ou $3f_2 - 2f_1$, doivent eux aussi être pris en considération. La relation entre les différents produits d'IM est illustrée à la Fig. 1.

FIGURE 1

Produits d'IM (traits gras) non normés par rapport aux fréquences fondamentales (tirets gras)



1446-01

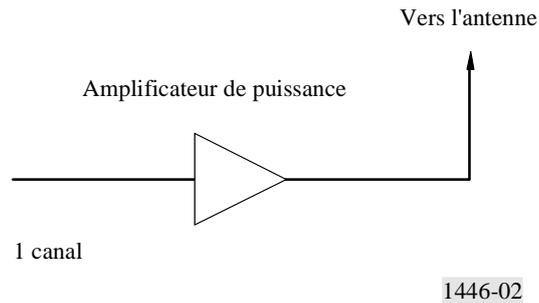
On définit cinq différents types d'IM.

1.1 Type 1 – IM par un seul canal

Par IM par un seul canal, on entend la distorsion du signal utile due à la non-linéarité au niveau des circuits de l'émetteur, y compris tous les dispositifs passifs, par exemple les combineurs, etc.

La Fig. 2 illustre ce type d'IM.

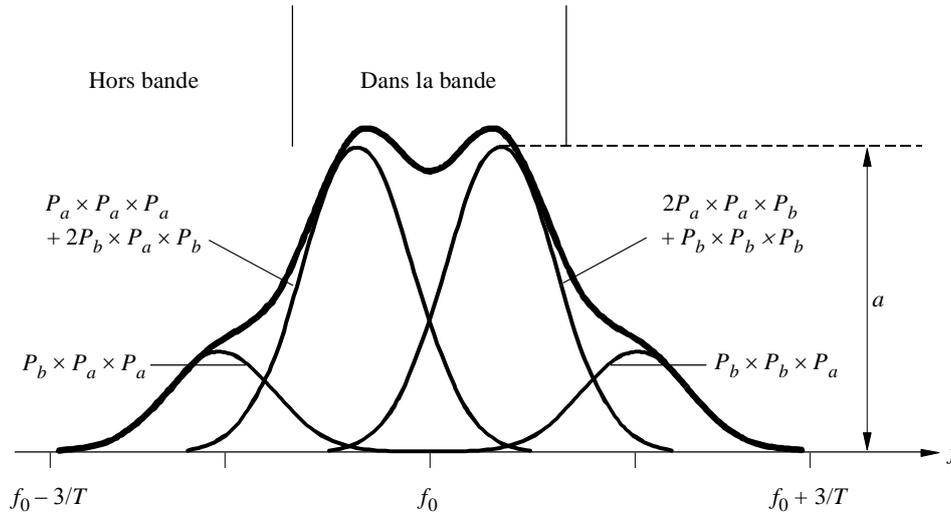
FIGURE 2
Type 1 – IM par un seul canal



Outre les phénomènes de distorsion d'IM dus au mélange de deux signaux ou plus de transmission RF, on peut observer des émissions dans la bande et des émissions hors bande à partir d'un seul signal de modulation en bande de base dû au mélange de composantes de fréquences discrètes d'un signal d'entrée complexe de l'émetteur. Cela peut se produire avec un signal analogique, par exemple un signal vocal qui se compose généralement de plusieurs composantes de fréquences variant dans le temps. Cela peut aussi se produire avec des signaux numériques en raison du mélange de fréquences de série de Fourier pour produire de nouvelles composantes de fréquences. Il en résulte une distorsion du signal numérique qui est émis et une augmentation de l'amplitude dans une portion du spectre du signal d'origine. Un signal numérique véritablement aléatoire contiendra un nombre infini de ces composantes spectrales se traduisant par un spectre continu assimilable à du bruit modelé par le filtre passe-bande. La distorsion d'IM a pour effet d'accroître l'énergie dans des sous-bandes du spectre assimilable à du bruit, en particulier, celle associée aux produits d'IM de 3ème ordre. Cette augmentation d'énergie dans le spectre assimilable à du bruit appelée à la fois bruit d'IM ou croissance spectrale apparaît souvent dans les courbes spectrales de modulation numérique sous forme de bosses ou d'épaulements à proximité des bords du filtre passe-bande qui entraînent un excès de la puissance de bruit dans la bande adjacente et des risques de brouillage (voir la Fig. 3 ci-après).

FIGURE 3

Exemple de bruit d'IM de 3ème ordre dans les bandes de fréquences utilisées $BO = 0,82$ ($BI = 4,5$) et $f_0 < f < f_0 + 1/T$ où T est la longueur de symbole, f_0 est la fréquence porteuse et P sont les puissances du signal, non normées



BO: Recul à la sortie
 BI: Recul à l'entrée

1446-03

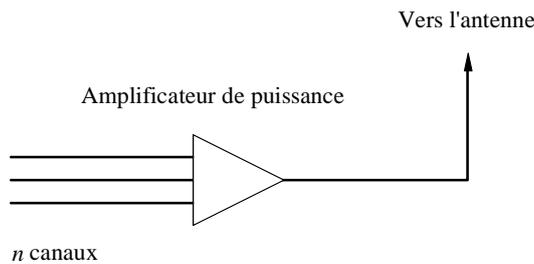
1.2 Type 2 – IM par plusieurs canaux

Il y a IM par plusieurs canaux lorsque la distorsion des signaux utiles de plusieurs canaux est causée par la non-linéarité dans des circuits d'émetteur identiques.

Les signaux dans les différents canaux peuvent avoir des modulations différentes, des largeurs de bande différentes ou des espacements différents dans toute la bande.

FIGURE 4

Type 2 – IM par plusieurs canaux



1446-04

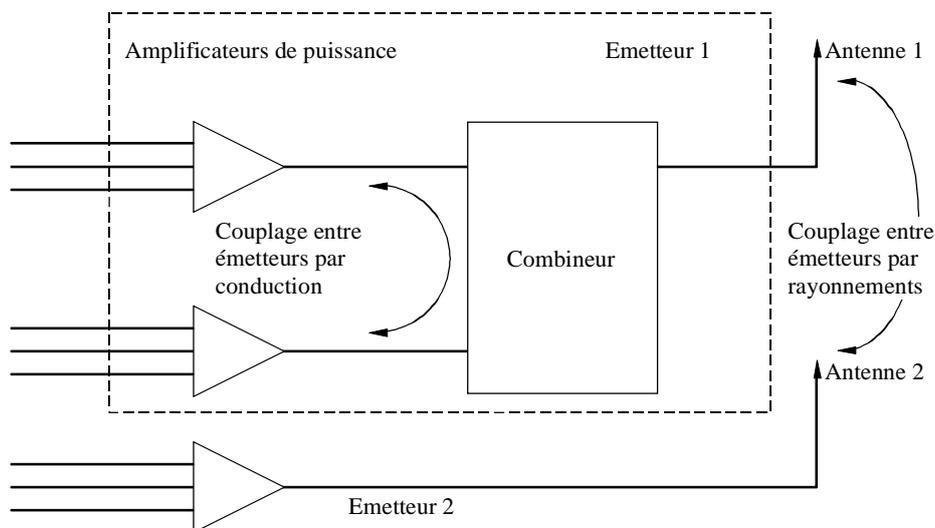
1.3 Type 3 – IM entre émetteurs

Il y a IM entre émetteurs situés sur un même site soit dans les émetteurs eux-mêmes soit dans une composante non linéaire sur le site pour produire des produits d'IM à des fréquences qui peuvent être très éloignées des fréquences d'émission effectives. Ce phénomène, effet du boulon rouillé souvent appelé en anglais *rusty bolt effect*, est fonction des divers problèmes que pose essentiellement l'exploitation de divers équipements sur un même site, même si on peut soumettre les émetteurs eux-mêmes à certains essais.

Les produits d'IM entre émetteurs (Type 3) sont induits par des signaux brouilleurs qui pénètrent dans l'émetteur via l'antenne. Si la fréquence de ces signaux est proche de la fréquence nominale de l'émetteur, ils peuvent être à l'origine de très importants produits d'IM au niveau de la sortie de l'émetteur. Si leur fréquence est éloignée de la fréquence nominale, c'est-à-dire si elle se situe en dehors de la largeur de bande de fonctionnement utile, il faut prendre en ligne de compte la sélectivité de fréquence du système.

La Fig. 5 illustre ce type d'IM.

FIGURE 5
Type 3 – IM entre émetteurs



1446-05

1.4 Type 4 – IM due à des antennes actives

La Fig. 6 illustre un type de structure d'antenne active utilisée avec un satellite.

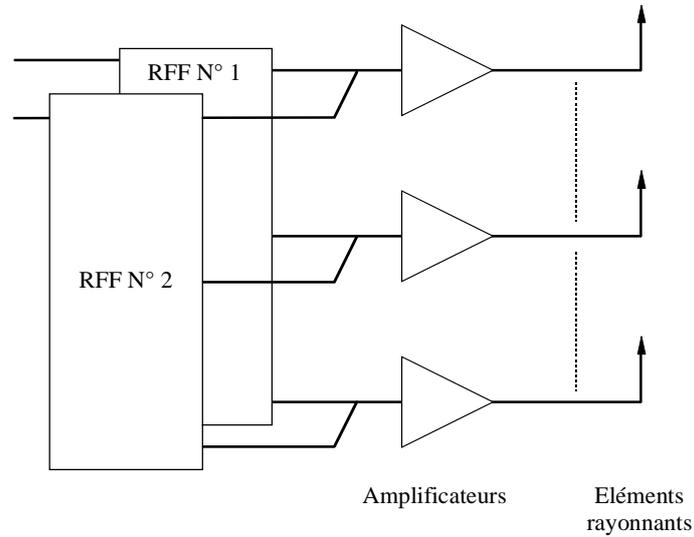
La formation de faisceaux en amont des amplificateurs de puissance permet de limiter les pertes de puissance RF mais impose aux amplificateurs de fonctionner en mode multiporteuses: chaque amplificateur reçoit tous les signaux à transmettre et fonctionne donc sur toute la largeur de bande du système. Cette distribution de la puissance du signal sur les différents trajets d'antenne permet des échanges de puissance entre les faisceaux et une reconfiguration de ces faisceaux par simple transmission d'un signal de télécommande.

Le mode de fonctionnement multiporteuses d'une antenne active et la non-linéarité des amplificateurs induisent des rayonnements non essentiels sous forme de signaux d'IM. L'analyse de ces signaux est rendue très complexe par l'architecture active de l'antenne.

NOTE 1 – Des antennes actives sont actuellement mises au point, et le système se diversifie de plus en plus dans la technologie et les applications des services de communication. On envisage d'utiliser ces systèmes largement dans de nombreux domaines dans l'avenir, par exemple pour les communications très grande vitesse à un débit de plus de 1 Gbit/s pour l'imagerie, radar, etc. Par conséquent, les produits d'IM causés par des antennes actives et la méthode de mesure de ces produits devraient être examinés plus avant.

FIGURE 6

Type 4 – Architecture d'une antenne active, amplificateurs compris



RFF: réseau de formation de faisceaux

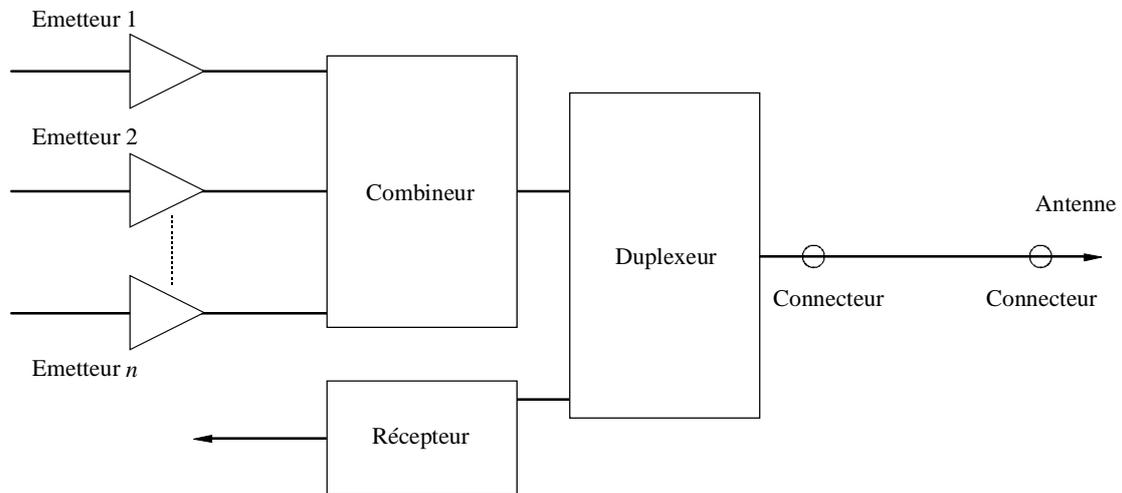
1446-06

1.5 Type 5 – IM due à des circuits passifs

La Fig. 7 illustre une station radioélectrique dans laquelle plusieurs émetteurs et récepteurs partagent une même antenne. Habituellement, on peut considérer que les circuits passifs – guides d'ondes, câbles et connecteurs – ne produisent pas de produits d'IM car on les assimile à des circuits linéaires. Toutefois, lorsque leur qualité de fonctionnement se dégrade en raison du vieillissement ou d'un mauvais contact, certains points de non-linéarité peuvent apparaître. Si plusieurs émetteurs fonctionnent simultanément, la combinaison des fréquences d'émission peut être à l'origine de produits d'IM. On a constaté dans le passé que, dans un cas extrême, des produits d'IM du neuvième ordre nuisent gravement à la qualité de fonctionnement du récepteur.

FIGURE 7

Type 5 – IM due aux circuits passifs



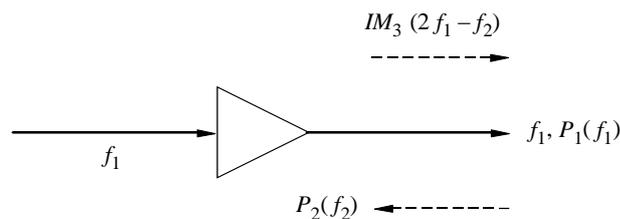
1446-07

Il est donc important de maintenir la linéarité des circuits passifs, comme les guides d'ondes, les câbles et les connecteurs.

1.6 Affaiblissement de l'IM de l'émetteur

L'affaiblissement de l'IM de l'émetteur mesure la capacité d'un émetteur à neutraliser la formation de signaux dans ces éléments non-linéaires en raison de la présence de la porteuse. Cette définition est illustrée à la Fig. 8, f_1 étant la fréquence porteuse, $P_1(f_1)$ la puissance de sortie et f_2 le signal brouilleur ayant la puissance P_2 .

FIGURE 8
Définitions de l'affaiblissement de l'IM de l'émetteur
et du facteur d'IM inverse



1446-08

L'affaiblissement de l'IM de l'émetteur A_{IM} est alors défini par:

$$IM_3 < P_1 - A_{IM} \quad \text{dB}$$

Un autre concept qui s'applique particulièrement au Type 3, et appelé facteur d'IM inverse, A_{RIM} , définit la suppression d'IM provenant de sources extérieures de signaux:

$$IM_3 < P_2 - A_{RIM} \quad \text{dB}$$

Ces définitions utilisées pour des émetteurs ne doivent pas être confondues avec le rejet d'IM du récepteur qui mesure la capacité d'un récepteur à recevoir un signal modulé utile sans dépasser une dégradation donnée en raison de la présence de produits d'IM.

2 Considérations touchant aux services de radiocommunication

Quelques exemples de produits et de caractéristiques d'IM pour le SFS, le SMS et le service de radiodiffusion sont donnés dans l'Appendice 1 à l'Annexe 1. En règle générale, les caractéristiques d'IM dépendent de facteurs très divers, par exemple les techniques de modulation et d'accès, les composants matériel, le coût de l'équipement, etc ... Les exemples choisis ont pour seul but d'illustrer les plages de suppression de produits d'IM réalisables dans des systèmes réels. Ils ne sont pas censés définir des limites pour les produits d'IM.

3 Techniques de mesure

Pour mesurer les produits d'IM ou le bruit, on utilise en général les mêmes techniques que pour mesurer les émissions hors bande ou les rayonnements non essentiels. Il y a quelques règles à suivre: les niveaux d'IM ne doivent pas être affectés par la présence du signal de sortie de l'émetteur et il faut prévoir pour l'équipement de mesure une dynamique suffisante pour qu'il puisse détecter des signaux d'IM de faible niveau en présence de signaux utiles.

Quelques méthodes particulières de mesure des produits d'IM sont décrites ci-après.

3.1 Méthodes génériques de mesure des produits d'IM par un seul canal (Type 1)

En général, les méthodes sont subdivisées entre méthodes s'appliquant aux émetteurs classiques analogiques et méthodes s'appliquant aux émetteurs numériques.

3.1.1 Modulation analogique

Dans toutes les méthodes, il importe de faire en sorte qu'il n'y ait pas IM entre les signaux d'entrée de l'émetteur soumis à l'essai et que ces signaux ne soient pas affectés par la sortie RF de l'émetteur. Il existe diverses méthodes de combinaison des signaux.

3.1.1.1 Test à deux tonalités

Il s'agit ici du cas classique d'un émetteur à bande latérale unique ou d'un émetteur à bande latérale indépendante (BLI). L'application à l'entrée de deux tonalités sinusoïdales, d'amplitude égale et dont les fréquences ne sont pas liées harmoniquement est bien connue; en général on mesure les produits d'IM de troisième et de cinquième ordre à l'aide d'un analyseur de spectre bien qu'il existe d'autres méthodes. Il y a quelques différences dans les spécifications: l'affaiblissement des produits d'IM peut être spécifié par rapport à l'une des deux tonalités ou à la puissance en crête du signal; il y a une différence de 6 dB entre ces deux niveaux. Un signal de 24 dB inférieur au niveau de l'une des deux tonalités est donc de 30 dB inférieur à la puissance en crête.

Bien qu'utilisée depuis de nombreuses années et bien qu'elle ait l'avantage d'être simple, cette méthode présente des lacunes pour des modulations comme les signaux vocaux. Dans le cas de signaux vocaux, même si la largeur de bande peut être limitée de 300 à 2 400 Hz, il y a encore une variation du débit syllabique qui tombe à 10 ou 15 Hz. Par conséquent, un émetteur qui donne de bons résultats sur un test à deux tonalités, avec un espacement entre tonalités de 700 Hz peut donner des résultats médiocres pour ce qui est des produits d'IM et donc pour les émissions hors bande sur des signaux vocaux, en particulier lorsqu'il y a traitement poussé des signaux vocaux pour réduire le rapport crête/moyenne. On a essayé de trouver une solution à ce problème dans certaines spécifications des émetteurs en exigeant des tests avec des espacements entre tonalités aussi faibles que 30 Hz mais il peut alors être difficile d'effectuer des mesures.

3.1.1.2 Test à trois tonalités

Autre formule utilisée comme dans la télévision par câble, un test à trois tonalités (mais les modalités du test sont différentes de celles utilisées dans la télévision par câble). On utilise dans ce cas 3 tonalités sinusoïdales, d'amplitude égale, dont les fréquences ne sont pas liées harmoniquement, avec un espacement entre deux d'entre elles d'environ 30 Hz. L'interprétation des résultats affichés par l'analyseur de spectre devient plus complexe en ce sens qu'il y a maintenant six produits d'IM de troisième ordre alors qu'il n'y en avait que deux dans un test à deux tonalités. De même il y aura 6 produits d'IM de cinquième ordre, etc. Toutefois, ces tests permettent de bien montrer les carences de la régulation dynamique de l'alimentation de l'amplificateur final.

3.1.1.3 Test de bruit

3.1.1.3.1 Bruit non continu dans le domaine fréquence

Une autre méthode utilisée consiste à appliquer du bruit à l'entrée de l'émetteur. Cette technique est utilisée depuis de nombreuses années avec les systèmes analogiques de multiplexage par répartition en fréquence: on applique à l'équipement un bruit dont le spectre présente une discontinuité dans le domaine fréquence d'entrée. Les effets de la distorsion d'IM peuvent alors être mesurés par le niveau du signal qui apparaît dans la discontinuité équivalente à la sortie. Toutefois, à moins que le bruit d'entrée ne soit modulé au débit syllabique, cette méthode offre peu d'avantages réels dans le cas d'un équipement monocanal. Dans le cas d'un équipement multicanal, par exemple un émetteur à BLI acheminant 2 canaux vocaux et 12 signaux télégraphiques à fréquence vocale, cette méthode donne une meilleure approximation qu'avec un test à deux tonalités. Le plus gros avantage de cette méthode c'est qu'elle permet d'obtenir un rapport crête/moyenne plus réaliste que la méthode à tonalité continue.

3.1.1.3.2 Bruit continu dans le domaine fréquence

Au lieu de prévoir une discontinuité dans le domaine fréquence du signal entrée, on peut, autre solution, examiner l'amplification spectrale du signal modulé par du bruit par rapport au spectre produit par l'émetteur sans produits d'IM. Les résultats sont plus difficiles à interpréter mais leur applicabilité dépend de l'application. Dans les applications où les produits d'IM dans le canal sont importants pour le fonctionnement du système, cette méthode n'a aucune application. Lorsque les produits d'IM sont importants en raison de leurs conséquences sur les émissions hors bande, cette méthode donne une idée réaliste des performances de l'émetteur.

3.1.2 Modulations numériques

Les produits d'IM dans ces émetteurs sont en général mesurés en termes de rapport de protection dans le canal adjacent. On utilise un train de bits pseudo-aléatoire approprié pour moduler l'émetteur et la puissance dans le canal adjacent ou alterné (adjacent + un) est mesurée à l'aide d'un analyseur de spectre ou d'un récepteur de mesure appropriés. Pour le reste cette technique est analogue à celle décrite pour un canal unique (§ 3.1.1.3.2). Cela vaut pour un certain nombre de méthodes de modulation numérique, notamment le multiplexage par répartition de fréquences orthogonales.

3.2 Méthodes génériques pour mesurer les produits d'IM par porteuses multiples (Type 2)

Les amplificateurs haute puissance, c'est-à-dire ceux utilisés dans des systèmes à satellites, sont exploités à une puissance aussi proche que possible de leur puissance de sortie maximale (de saturation), ce qui cause des produits d'IM qui dégradent le rapport signal/bruit lorsque le même amplificateur est utilisé pour transmettre plus d'une porteuse. Dans les systèmes numériques, le TEB est déterminé par le rapport énergie par bit/densité spectrale de bruit, E_b/N_0 où E_b est la puissance de la porteuse divisée par le débit binaire et N_0 est la puissance de bruit sur une seule bande latérale par Hz de largeur de bande. Les contributions de bruit et de brouillage de la liaison montante et de la liaison descendante doivent être combinées au bruit d'IM de façon à ce que toutes les contributions soient rapportées à la puissance de la porteuse. La température de bruit équivalente, T_{im} , caractérise bien le bruit d'IM. En règle générale la valeur escomptée de C/T_{im} est:

$$C/T_{im} = -150 - 10 \log(N) + 2BO \quad \text{dB}$$

où N est le nombre de porteuses et BO est le recul à la sortie, donné en fonction du recul à l'entrée BI par:

$$BO = 0,82(BI - 4,5) \quad \text{dB}$$

En supposant que toutes les porteuses ont la même puissance:

$$C = P_s - 10 \log(N) - BO \quad \text{dBW}$$

où P_s est la puissance de sortie de saturation. Ainsi:

$$T_{im} = P_s + 150 - 3BO \quad \text{dB(K)}$$

et

$$N_0 = P_s - 78,6 - 3BO \quad \text{dB(W/Hz)}$$

Ainsi, lorsque la puissance d'entrée est augmentée de 1 dB, la puissance de sortie est augmentée de 0,82 dB. Par ailleurs, le bruit d'IM augmente de 2,46 dB et le rapport C/T est réduit de 1,64 dB. Cette approximation est valable sur une plage étroite proche de 4,5 dB jusqu'à la saturation pour tous les amplificateurs avec tube à ondes progressives sans linéarisation. Cette méthode est parfois appelée méthode d'essai «sans porteuse».

3.2.1 Description des méthodes de mesure

Les principes et les méthodes d'essai applicables à cette procédure de mesure différente sont énumérés brièvement ci-après:

– *Test à une seule porteuse*

Le signal multiporteuse et les produits d'IM du deuxième et du troisième ordre sont modélisés par une fonction de Bessel qui dépend de la puissance de sortie et du déphasage de l'amplificateur. Une porteuse unique (à ondes entretenues) est appliquée à l'amplificateur. On fait varier l'amplitude du signal d'essai de zéro jusqu'à saturation de l'amplificateur. La puissance de sortie et le déphasage sont mesurés en fonction de la puissance d'entrée.

– *Test à deux porteuses avec analyse d'interception*

La caractéristique de transfert non linéaire est représentée par une expansion de la série de Taylor. Les performances en mode d'exploitation multiporteuse peuvent être déduites des séries de Taylor. Les signaux de sortie des deux générateurs de signaux fonctionnant sur f_1 et f_2 sont combinés et appliqués à l'entrée de l'amplificateur. Les puissances de sortie à ces fréquences fondamentales et les puissances des produits d'IM de troisième ordre à $2f_1 - f_2$ et $f_2 - f_1$ etc. sont consignées et utilisées pour déterminer les points d'interception, lesquels servent à déterminer les coefficients des séries de Taylor.

– *Test à plusieurs porteuses*

On part de l'hypothèse que la somme de densité de puissance de bruit d'IM devient asymptotique vers la même valeur fixe au fur et à mesure que le nombre de porteuses augmente. On a montré que la somme des

produits IM jusqu'au septième ordre représente environ 82,2% de la puissance d'IM, c'est-à-dire que si l'on peut négliger les produits d'IM d'ordre élevé, un minimum de sept à quinze porteuses suffit. Un certain nombre de porteuses indépendantes (à ondes entretenues) plus ou moins également espacées avec un «trou» à proximité des produits d'IM escomptés et individuellement modulées par des signaux MF et MA sont combinées à l'entrée de l'amplificateur. A la sortie, dans le trou, les produits d'IM sont mesurés directement par un analyseur de spectre.

– *Test à 2/3/4 porteuses avec approximation*

Si l'on ne dispose pas d'un nombre suffisant de sources pour le test multiporteuse, on peut alors faire le test avec un nombre plus petit de porteuses et les caractéristiques multiporteuse peuvent être déduites par approximation. Le résultat asymptotique pour un grand nombre de porteuses est le suivant:

$$\left(\frac{C}{IM}\right)_{\infty} = \frac{1}{6} \left[\sqrt{\left(\frac{C}{IM}\right)_2} + 1 \right]^2$$

où $(C/IM)_2$ est le résultat mesuré avec deux porteuses.

Il s'agit dans ce test de mesurer directement les produits d'IM causés par 2, 3 ou 4 porteuses indépendantes de la même façon que décrit précédemment.

On utilise pour les mesures un générateur de bruit et un filtre ayant une largeur de bande de coupure différente. Ce filtre réjecteur supprime le bruit d'un seul canal appelé canal silencieux. A la sortie, un analyseur de spectre mesure les produits d'IM dans ce canal. On notera que le rapport bruit/puissance (NPR, *noise power ratio*) du filtre analogique réducteur de bruit doit être de 20 dB inférieur au niveau de NPR à mesurer et avoir une largeur de bande d'environ 10% de la largeur de bande de l'amplificateur.

– *Test avec simulateur de signaux agile en fréquence (FASS, frequency agile signal simulator)*

Le FASS est capable de synthétiser n'importe quels signaux arbitraires, y compris plusieurs porteuses modulées à des débits de données divers utilisant différents formats de modulation. Ce signal d'excitation est beaucoup plus proche du signal effectif que le bruit blanc gaussien mais en raison de la mémoire finie il doit être répété à certaines fréquences. Le bruit d'IM peut être mesuré directement pour différentes combinaisons de porteuses, de formats de modulation et de largeurs de bande.

On utilise une technique de synthèse numérique dans cette méthode pour générer un signal à l'aide d'un logiciel informatique. Ce signal se compose de données numériques téléchargées à un synthétiseur qui génère alors un signal via un convertisseur numérique/analogique. De tels FASS disponibles sur le marché peuvent synthétiser des signaux directement sur de très courtes fréquences en mode numérique.

– *Test avec TEB*

Le TEB est la mesure ultime de l'acceptabilité pour des systèmes de transmission numériques. Une mesure directe du TEB conviendrait mieux qu'un test pendant lequel on essaie d'isoler la contribution du bruit d'IM dans la puissance totale.

On utilise couramment des tests avec TEB pour mesurer les performances de systèmes numériques en présence de brouillage dans le même canal et dans le canal adjacent mais ces tests sont rarement utilisés pour mesurer les conséquences des points de non-linéarité de l'amplificateur. Ces tests sont coûteux et prennent beaucoup de temps en raison des équipements et du temps de mesure supplémentaires nécessaire pour des TEB très faibles, par exemple de l'ordre de 1×10^{-10} . Toutefois, c'est exactement la plage dans laquelle le bruit d'IM devrait se produire et dégrader la qualité de fonctionnement du système.

3.2.2 Comparaison des méthodes

Toutes les méthodes conviennent pour mesurer les produits d'IM ou le bruit. Les principales caractéristiques de ces méthodes sont résumées dans les paragraphes suivants et le Tableau 1 avec les mérites de chacune d'elles. Le test avec le TEB n'est pratiquement pas utilisé pour mesurer les produits d'IM car il est très coûteux en équipement et en temps.

- La méthode à porteuse unique et la méthode à 2 porteuses avec analyse d'interception sont simples, rapides et très répandues mais limitées car le comportement de l'équipement en présence de plusieurs porteuses est prévu de façon indirecte, à l'aide d'un modèle mathématique qui suppose que l'amplificateur n'a pas de mémoire.
- Les méthodes multiporteuses NPR et FASS peuvent donner des résultats précis car il y a mesure directe du comportement de l'équipement dans des conditions de charge réalistes.
- La méthode à 2/3/4 porteuses par approximation est rapide et simple mais pêche par le fait que l'approximation n'est valable que dans la région où les produits d'IM de troisième ordre dominant.

- La méthode FASS est très souple et peut donner des résultats précis mais sa largeur de bande d'essai est limitée par la rapidité du convertisseur numérique/analogique et sa résolution de fréquence par la capacité de mémoire même si sa fréquence d'essai peut varier dans des proportions importantes.

TABLEAU 1
Notation des méthodes

Critères	Une seule porteuse	Plusieurs porteuses	2/3 porteuses	Analogique NPR	FASS
Porteuse:					
Grand nombre	2	2	1	3	3
Niveau mixte	2	3	1	1	3
Non uniforme	2	3	1	1	3
Précision	2	3	1	3	3
Reproductibilité	3	3	1	2	3
Coût	3	2	3	2	1
Simplicité	3	1	3	3	3
Temps	2 ≈ 0,5 h	1 ≈ 1,5 h	3 ≈ 5 min	3 ≈ 5 min	3 < 5 min
Fréquence	3	3	3	2	3
Largeur de bande	1	3	3	2	2

Légende: 1: médiocre, 2: acceptable, 3: bon.

NOTE 1 – Le test à porteuse unique suppose que l'amplificateur n'a pas de mémoire.

L'importance relative des critères donnés dans le Tableau 1 dépend bien sûr de l'application. Par exemple, dans une application SMS SCPC il est important de pouvoir prévoir le comportement de l'équipement en présence d'un grand nombre de porteuses mais il est moins important de pouvoir utiliser des porteuses avec des niveaux différents et des espacements non uniformes. Par ailleurs, la fréquence et la largeur de bande sont moins importantes tant que l'on se trouve dans la bande SMS, ce qui donne à penser que la méthode analogique NPR peut s'avérer être un bon choix pour cette application.

Par contre pour une application SFS/AMRF, il est plus important de pouvoir utiliser des porteuses avec des niveaux différents et un espacement non uniforme et la disponibilité de l'équipement couvrant les bandes SFS supérieures peut être un problème. Dans ce cas, la préférence est donnée au test multiporteuse.

Dans un cas comme dans l'autre, si le coût, la simplicité et le temps sont plus importants que la précision absolue et la reproductibilité, le test à porteuse unique reste un concurrent sérieux.

3.3 Méthodes génériques pour mesurer l'IM entre émetteurs (Type 3)

Ces méthodes classiques et génériques sont utilisées pour mesurer les produits d'IM de troisième ordre dont on considère qu'ils sont les plus importants.

3.3.1 Principe

Les produits d'IM dans l'émetteur sont à l'origine d'émissions brouilleuses, lesquelles sont induites par un signal brouilleur à proximité de la fréquence nominale de l'émetteur. On suppose un émetteur pour lequel la puissance du signal utile émis est L_w à la fréquence $f_0 = f_1$ et la puissance du signal entrant est L_1 à la fréquence $f_2 = f_0 \pm \Delta f$. On obtient ainsi un produit d'IM de troisième ordre $IM_3 = L_{IM}$ à la fréquence f_{IM} :

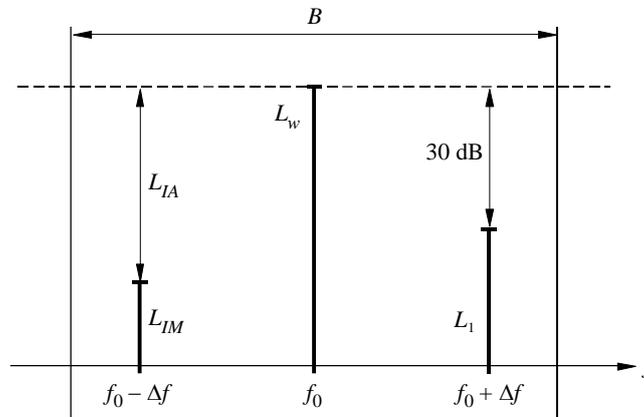
$$f_{IM} = 2f_0 - (f_0 \pm \Delta f) = f_0 \pm \Delta f$$

Pour ne tenir compte que des principaux mécanismes, tout en négligeant les effets d'ordre supérieur, il faut choisir un espacement de fréquence de Δf à l'intérieur de la largeur de bande B du système afin que la composante d'IM L_{IM} ne subisse d'affaiblissement important supplémentaire dans le récepteur brouillé. Le niveau du signal de la composante d'IM est défini comme suit:

$$L_{IM} = 2L_w + L_1 + 20 \log k$$

où k est une constante arbitraire introduite uniquement pour calculer le produit d'IM à partir des mesures. Dans la Fig. 9, l'affaiblissement d'IM L_{IA} est défini comme étant l'affaiblissement du produit d'IM L_{IM} rapporté au niveau signal utile L_w pour le signal brouilleur de 30 dB inférieur à L_w .

FIGURE 9
Détermination des produits d'IM à l'aide
d'une méthode à deux tonalités



1446-09

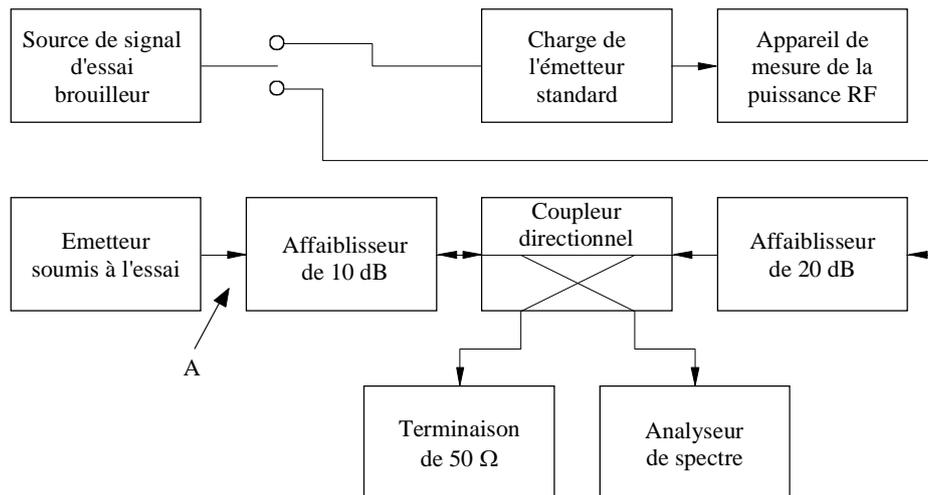
Si l'on applique les relations de la Fig. 9 dans l'équation (10), on peut déterminer $20 \log k$ par $20 \log k = 30 - 2L_w - L_{IA}$ et le produit d'IM L_{IM} devient alors:

$$IM_3 = L_{IM} = L_1 - L_{IA} + 30 \quad \text{dB}$$

3.3.2 Dispositif de mesure

Etape 1: Connecter l'équipement comme indiqué à la Fig. 10. Pour réduire l'influence des erreurs de désadaptation, il est important que l'affaiblisseur de puissance de 10 dB soit couplé à l'émetteur soumis à l'essai avec la plus petite connexion possible. La source du signal d'essai brouilleur est une porteuse RF non modulée offrant la même puissance en sortie que l'émetteur soumis à l'essai. Cet émetteur et la source du signal d'essai brouilleur doivent être physiquement séparés de sorte que la mesure ne soit pas influencée par les rayonnements directs.

FIGURE 10
Dispositif de mesure



1446-10

Etape 2: Adapter l'analyseur de spectre pour donner une indication maximale avec un balayage en fréquence sur 500 kHz.

Etape 3: Choisir la fréquence de la source du signal d'essai brouilleur entre 50 kHz et 100 kHz au-dessus de celle de l'émetteur soumis à l'essai, de façon à ce que les composantes d'IM à mesurer ne coïncident pas avec d'autres composantes non essentielles.

Etape 4: Inscire (dBm) la composante d'IM de troisième ordre la plus importante à partir de l'analyseur de spectre comme IM_3 .

Etape 5: Inscire (dBm) le niveau de puissance de sortie RF de l'émetteur soumis à l'essai, mesuré à partir de l'analyseur de spectre comme P_1 .

Etape 6: Calculer le rapport d'IM comme étant:

Affaiblissement d'IM (rapporté au point A)

$$A_{IM} = P_1 - IM_3$$

Etape 7: Choisir la fréquence de la source du signal d'essai brouilleur entre 50 kHz et 100 kHz au-dessus de la fréquence de l'émetteur soumis à l'essai, de façon à ce que les composantes d'IM à mesurer ne coïncident pas avec d'autres composantes non essentielles.

Etape 8: Répéter les Etapes 4 à 6.

Etape 9: Le chiffre le plus bas obtenu aux Etapes 6 et 8 est l'affaiblissement d'IM.

NOTE 1 – Il faudra peut-être faire varier les caractéristiques de l'affaiblisseur pour des niveaux de puissance d'émission supérieurs à 25 W.

APPENDICE 1

À L'ANNEXE 1

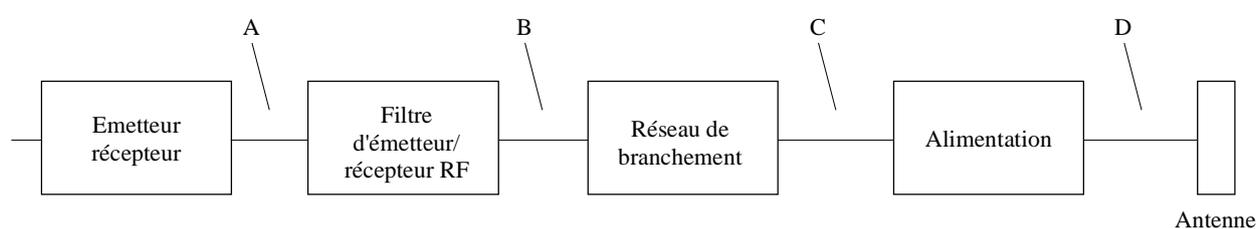
Exemples de caractéristiques d'IM

En règle générale, les caractéristiques d'IM dépendent de facteurs différents très divers, par exemple, les techniques de modulation et d'accès, les composantes matériel et le coût de l'équipement. Les exemples suivants ont pour seul but d'illustrer les plages de suppression des produits d'IM réalisables dans des systèmes réels. Ils ne sont pas censés définir des limites pour les produits d'IM.

1 Service fixe

Les limites d'IM fixées dans les normes européennes actuelles pour les faisceaux hertziens ne sont données ici que pour information (voir la Fig. 11). Elles ne concernent que les produits d'IM entre émetteurs (Type 3) c'est-à-dire qu'il n'existe pas de valeurs précises disponibles de l'affaiblissement d'IM dans les normes européennes.

FIGURE 11

Diagramme de blocs type pour le service fixe

1446-11

Le fabricant de l'équipement déclare pendant l'installation la conformité de l'équipement aux limites d'IM pour les liaisons fixes. Le niveau d'IM maximum autorisé est donné par rapport au point B dans la chaîne de réception. Toutes les installations fixes doivent respecter les critères donnés lorsque le niveau de puissance utile au point C est égal à 28 dBm.

2 Service mobile

De nombreuses normes applicables au service mobile ne contiennent pas de valeurs précises de l'affaiblissement d'IM. Ces valeurs sont comprises dans les limites des rayonnements non essentiels. Des exemples d'affaiblissement d'IM disponibles sont donnés dans le Tableau 2. Les valeurs requises sont comprises entre 40 et 70 dB. On suppose en général que le signal brouilleur est un signal à ondes entretenues dont la puissance est de 30 à 50 dB inférieure à celle du signal utile.

TABLEAU 4

Exemples d'affaiblissement d'IM de stations terriennes et de stations spatiales Inmarsat

Composante de système	Affaiblissement d'IM
Station terrienne terrestre/station terrienne côtière Inmarsat	Produits d'IM de troisième ordre: > 30 dB au-dessous de la p.i.r.e. d'une des deux porteuses d'essai, chacune ayant une amplitude de $p.i.r.e._{max}$ de -3 dB, où $p.i.r.e._{max}$ maximum est la p.i.r.e. maximale
Station spatiale Inmarsat-2 Répéteur, direction aller Répéteur, direction retour	Dû à plusieurs porteuses: > 13,5 dB > 22,0 dB
Station spatiale Inmarsat-3 Répéteur, direction aller Répéteur, direction retour	Dû à plusieurs porteuses: > 14,0 dB > 21,5 dB

4 Services de radiodiffusion

Pour des émetteurs de radiodiffusion situés sur le même site, le facteur d'IM inverse est souvent utilisé pour caractériser l'IM entre émetteurs, A_{RIM} , (Type 3).

A titre d'illustration on donne l'exemple suivant: l'émetteur de radiodiffusion sonore MF utile fonctionne à $f_1 = 98$ MHz, 300 W de puissance, et il est brouillé par un signal de 300 mW provenant d'un deuxième émetteur. On fait varier la fréquence f_2 entre 87,5 MHz et 108 MHz (Bande II) avec un espacement de fréquence de $|f_1 - f_2| > 300$ kHz. Les résultats sont données dans le Tableau 5.

TABLEAU 5

Exemples de facteurs d'IM inverse sur des sites d'émetteurs MF

Fréquence	f_1	f_2	$2f_1 - f_2$	$2f_2 - f_1$	$3f_1 - f_2$
Puissance absolue (dBm)	55	25	15	-5	-20
A_{RIM} (dB)	-	-	10	30	45

Les valeurs types du facteur d'IM inverse pour des émetteurs MF sont d'au moins 10 dB. L'utilisation d'isolateurs peut accroître la protection.