

RAPPORT DU COMITE DE COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE (CCE)

Ingénierie des sites radioélectriques

Date : 31/08/2026

Version : 2

Table des révisions

Version	Date	Auteur(s)	Nature des révisions
V1	26/09/2001	Direction de la planification du spectre et des affaires européennes	Adoption du document
V2	31/08/2026	Comité de contrôle du spectre et Direction de la planification du spectre et des affaires européennes	Adoption du document révisé

Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	6
1.1	AVERTISSEMENT.....	6
1.2	CREDITS	6
2.	LE SITE RADIOELECTRIQUE	7
2.1	DEFINITIONS	7
2.2	PRINCIPES GENERAUX D'INGENIERIE.....	8
3.	EXEMPLES DE SERVICES TYPIQUEMENT COLOCALISES	8
3.1	SERVICE DE RADIODIFFUSION.....	8
3.2	SERVICE MOBILE TERRESTRE	9
3.3	RESEAUX IOT ET SYSTEMES BASSE PUISSANCE.....	12
3.4	RESEAUX Wi Fi, SRD ET AUTRES SYSTEMES LOCAUX	13
3.5	RESEAUX AERONAUTIQUES	14
3.6	FAISCEAUX HERTZIENS	15
3.7	RESEAUX SATELLITES	16
4.	DEFINITIONS RELATIVES AUX CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS RADIOELECTRIQUES	17
4.1	CARACTERISTIQUES D'UN RECEPTEUR	17
4.2	CARACTERISTIQUES D'UN EMETTEUR.....	20
4.3	AUTRES CARACTERISTIQUES DES EQUIPEMENTS DES INSTALLATIONS RADIOELECTRIQUES	22
4.4	RESUME	22
5.	BROUILLAGES.....	23
5.1	DEFINITION	23
5.2	MECANISMES PRINCIPAUX	25
5.3	AUTRES MECANISMES ET NOTIONS DE COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE	27
5.4	DEMANDE D'INSTRUCTION DE BROUILLAGE	38
6.	AERIENS, FILTRES, COUPLAGES ENTRE AERIENS, INSTALLATIONS DES AERIENS.....	38
6.1	DEFINITION DES ELEMENTS DU « CIRCUIT D'ANTENNE »	39
6.2	PYLONES ET INSTALLATION DES AERIENS.....	42
7.	REGLES GENERALES DE PARTAGE DES SITES.....	54
7.1	COHABITATION DES INSTALLATIONS	54
7.2	REGLES DE COEXISTENCE ENTRE DIFFERENTS SYSTEMES.....	55
7.3	ETAT RADIOELECTRIQUE DES LIEUX	55
8.	COMPOSANTES DE L'ANFR PERTINENTES A L'INGENIERIE DES SITES.....	56
8.1	SITES RADIOELECTRIQUES ET SERVITUDES : L'ISITS.....	56
8.2	STATIONS RADIOELECTRIQUES : L'ICAF	56
8.3	BROUILLAGES : LE DOT	57
	ANNEXE 1 – REFERENCES.....	58
	ANNEXE 2 – CARACTERISTIQUES DE SYSTEMES RADIOELECTRIQUES	61
	A2.1 SEUILS DES RAYONNEMENTS NON ESSENTIELS (RNE) POUR LA RADIODIFFUSION	61
	A2.2 CARACTERISTIQUES DE QUELQUES SYSTEMES MOBILES.....	68
	ANNEXE 3 – EXEMPLE DE PV D'ESSAI DE COHABITATION RADIOELECTRIQUES.....	74

Table des abréviations

ADS-B	Automatic dependent surveillance-broadcast (Surveillance dépendante automatique en mode diffusion)
ANFR	Agence nationale des fréquences
Arcep	Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse
Arcom	Autorité de régulation de la communication audiovisuelle et numérique
ATC	Air Traffic Control (contrôle du trafic aérien)
BLE	Bluetooth Low Energy, Bluetooth à basse consommation
BLR	Boucle locale radio
C/I	Rapport signal à interférence
C/N	Rapport signal à bruit
C/(N+I)	Rapport du signal à la combinaison du bruit et de l'interférence
CBTC	Communication Based Train Control (contrôle de train basé sur les communications)
CEM	Compatibilité électromagnétique
CGF	Comité de gestion des fréquences
CPCE	Code des postes et des communications électroniques
CPL	Courants porteurs en ligne
DAB	Digital Audio Broadcasting
DAB+	Codage audio évolué du système de radiodiffusion sonore numérique DAB
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DME	Distance Measuring Equipment (dispositif de mesure de distance)
DOT	Département des opérations techniques (ANFR)
EHF	Extrêmement haute fréquence, Ondes millimétriques
EMI	Electromagnetic interference
FDD	Frequency Division Duplex (duplexage par répartition en fréquence)
FH	Faisceau hertzien
FI	Fréquence intermédiaire
FM	Frequency Modulation (modulation de fréquence)
FNF	Fichier national des fréquences (ANFR)
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System (radiocommunication ferroviaire du futur)
GP	Ground Plane (plan de masse) ou Glide Path (trajectoire de descente, voir ILS)
GNSS	Géolocalisation et navigation par un système de satellites
GSM-R	Global System for Mobile communications – Railway (système global pour communications mobiles – chemin de fer)
HF	Haute fréquence, ondes décamétriques
ICAF	Instance de coordination des assignations des fréquences (ANFR)
IDU	Indoor Unit (équipement d'intérieur, dans le cadre de faisceaux hertziens)
ILS	Instrument Landing System (système d'atterrissage aux instruments)
IM_n	Produits d'intermodulation à l'ordre n
INPT	Infrastructure nationale partageable des transmissions (typiquement PPDR bande étroite, Tétrapol 12.5 kHz)
IP_n	Point d'interception à l'ordre n
ISITS	Instance de sites et servitudes (ANFR)
ISM	Appareils industriels, scientifiques ou médicaux
LF	Low Frequency (basse fréquence, grandes ondes, ondes kilométriques)
LOC	Localizer (voir ILS)
MF	Moyenne fréquence, ondes hectométriques
NDB	Non Directional Beacon (balise non directionnelle)
ODU	Outdoor Unit (équipement extérieur d'un faisceau hertzien)
OIV	Opérateur d'importance vitale
OP1dB	Point de compression à 1 dB
PIM	Produit d'intermodulation
PMR	Réseau mobile professionnel
POCSAG	Post Office Code Standardisation Advisory Group, code de radiorecherche N° 1 [42]

PPDR	Public Protection and Disaster Relief (systèmes de radiocommunication destinés à la protection du public et aux secours en cas de catastrophe)
RED	Radio Equipment Directive (directive européenne relative aux équipements radioélectriques)
RF	Radiofréquence
RNE	Rayonnements non essentiels
RNT	Radio numérique terrestre
RR	Règlement des radiocommunications (UIT)
RRF	Réseau radio du futur
RRU	Remote Radio Unit (équipement radioélectrique déporté)
ROP	Réseaux ouverts au public
ROS	Rapport d'onde stationnaire
SATCOM	Communications par satellite
SDIS	Service départemental d'incendie et de secours
SHF	Super haute fréquence, ondes centimétriques
SSR	Secondary Surveillance Radar (radar secondaire)
TCAS	Traffic alert and Collision Avoidance System (système d'alerte de trafic et d'évitement de collision)
THD	Très haut débit
TDD	Time Division Duplex (duplexage par séparation temporelle)
TNRBF	Tableau national de répartition des bandes de fréquences (France)
TNT	Télévision numérique terrestre
TV	Télévision
UHF	Ultra haute fréquence, ondes décimétriques
UIT	Union internationale des télécommunications
UIT-R	Secteur des radiocommunications de l'UIT
VCO	Voltage Controlled Oscillator (oscillateur contrôlé en tension)
VCXO	Voltage Controlled Cristal Oscillator (oscillateurs à quartz contrôlé en tension)
VDL	VHF Data Link (liaison de données VHF)
VHF	Very High Frequency (très haute fréquence, ondes métriques)
VOR	VHF Omnidirectional Range (radiophare omnidirectionnel VHF)

1. Introduction

Ce document est un guide qui vise à sensibiliser les acteurs concernés par l'ingénierie des sites radioélectriques à la prévention des brouillages et des non conformités. Il présente des bonnes pratiques d'ingénierie et d'installation des équipements radioélectriques afin d'éviter ces brouillages et non-conformités. Ces bonnes pratiques s'appuient sur l'état de l'art à la date de révision du document et les expériences partagées par les parties prenantes lors de sa rédaction.

Est aussi abordé le rôle de l'Agence nationale des fréquences (ANFR) dans l'autorisation des stations avec les procédures de consultation associées, ainsi que le rôle de l'Agence dans la résolution des brouillages ou le contrôle de la conformité des équipements et de leur installation.

Ce document s'adresse principalement :

- aux affectataires de fréquences ;
- aux gestionnaires de sites, pour les guider dans l'accomplissement de leurs missions ;
- aux opérateurs, installateurs et utilisateurs, y compris les administrations, souhaitant utiliser un site en s'y intégrant harmonieusement ;
- à l'Instance de sites et servitudes (ISITS) de l'ANFR, dans le cadre de l'instruction des demandes d'implantation ou de modification de stations radioélectriques, notamment en cas de contentieux techniques ISITS (à cet effet il complète de façon technique le Document ANFR/DR-05 [9]) ;
- aux agents des services régionaux de l'ANFR dans leurs tâches de contrôle ;
- aux agents des Autorités de régulation de la communication audiovisuelle et numérique (Arcom) locales (attaché technique audiovisuel) dans le cadre du contrôle des sites de radiodiffusion.

1.1 Avertissement

Le suivi des conseils de ce document ne peut être considéré comme garant de la conformité du site radioélectrique concerné, d'une part car les conseils ne peuvent concerner toutes les situations et d'autre part car les technologies et le cadre réglementaire peuvent avoir évolué entre les dates de rédaction et d'utilisation de ce guide. En tout état de cause, l'installation doit respecter l'ensemble des lois et des règlements en vigueur ainsi que, le cas échéant, des obligations dans le cadre de contrats privés ou publics (licences d'utilisation de fréquences, baux, etc.).

1.2 Crédits

De nombreuses illustrations et photographies sont tirées du site <https://qrvradio.fr>, reproduites avec l'aimable autorisation de Christophe Bourrier (F4EZC).

2. Le site radioélectrique

2.1 Définitions

Le Document ANFR/DR-05 [9] définit un site radioélectrique comme suit.

« Un site est une parcelle cadastrale ou ensemble de parcelles cadastrales connexes, sur laquelle ou lesquelles se trouvent une ou plusieurs stations. Il correspond à la mise en exploitation pour plusieurs utilisateurs, sur une même emprise territoriale, d'une ou plusieurs infrastructures radioélectriques. »

L'utilisateur qui a construit ou qui entretient le bâtiment, ou celui qui a la charge administrative des parties communes est dénommé gestionnaire du site. Les autres utilisateurs sont appelés les cohabitants. »

Les infrastructures présentes sur le site peuvent être constituées à la fois d'émetteurs et de récepteurs, et peuvent utiliser des bandes de fréquences et des technologies radiofréquences bien distinctes. Ces installations radioélectriques peuvent appartenir à différents utilisateurs.

Le gestionnaire du site est de fait le coordonnateur du site. Ses responsabilités sont décrites dans le Document ANFR/DR-05 [9]. Il est l'entité responsable de l'exploitation des infrastructures communes (bâtiments, supports, alimentation, accès, etc.). Les autres utilisateurs sont appelés cohabitants.

Les responsabilités respectives entre gestionnaire, titulaires d'autorisations et, le cas échéant, propriétaires des équipements voire propriétaire de la (ou des) parcelle(s) cadastrales sont fixées par contrat entre les parties.

À noter que les cohabitants d'un site radioélectrique sont les personnes physiques ou morales titulaires d'une autorisation d'installation et d'exploitation de réseaux radioélectriques ou de stations d'émission de radiodiffusion donnée par un affectataire de bande de fréquences (administrations ou autorités indépendantes). Les personnes autorisées ne sont pas obligatoirement propriétaires des matériels.

D'autres définitions relatives aux sites radioélectriques incluent les notions

- (i) de réseaux, installation ou équipements radioélectriques ;
- (ii) de station radioélectrique et
- (iii) d'infrastructure d'accueil.

2.1.1 Réseau, installation ou équipements radioélectriques

L'article L. 32 du code des postes et des communications électroniques (CPCE) [3] donne les définitions suivantes.

« Un réseau, une installation ou un équipement sont qualifiés de radioélectriques lorsqu'ils utilisent intentionnellement des fréquences radioélectriques, en émission ou en réception, pour la propagation des ondes en espace libre, à des fins de radiocommunication ou de radiorepérage, y compris les équipements permettant de recevoir des services de radio ou de télévision. »

Sont également considérés comme des équipements radioélectriques ceux qui doivent être complétés d'un accessoire tel qu'une antenne, pour émettre ou recevoir intentionnellement des fréquences radioélectriques à des fins de radiocommunication ou de radiorepérage. »

2.1.2 Stations radioélectriques

L'Article 1.61 du Règlement des radiocommunications (RR) [4] de l'Union internationale des télécommunications (UIT) définit une station comme :

« Un ou plusieurs émetteurs ou récepteurs, ou un ensemble d'émetteurs et de récepteurs, y compris les appareils accessoires, nécessaires pour assurer un service de radiocommunication ou pour le service de radioastronomie, en un emplacement donné »

2.1.3 Infrastructure d'accueil

Le CPCE [3] définit une infrastructure d'accueil comme :

« tout élément d'un réseau destiné à accueillir des éléments d'un réseau sans devenir lui-même un élément actif du réseau, tels que les conduites, pylônes, gaines, chambres de tirage et regards, trous de visite, boîtiers, immeubles ou accès à des immeubles, installations liées aux antennes, tours et poteaux, châteaux d'eau. Les câbles, y compris la fibre noire, ainsi que les éléments de réseaux utilisés pour la fourniture des eaux destinées à la consommation humaine ne sont pas des infrastructures d'accueil au sens du présent article. »

2.2 Principes généraux d'ingénierie

Un site radioélectrique doit être conçu pour permettre l'accueil d'un nombre maximal d'installations radioélectriques tout en protégeant les utilisateurs présents. L'application des normes en vigueur et des règles de l'art vise à limiter les perturbations et à permettre un partage optimal.

Gestionnaire et cohabitants doivent examiner les caractéristiques des équipements installés ou demandant à s'installer sur le site, notamment :

- le respect des normes de sécurité électrique et de protection des installations radioélectriques ;
- les rayonnements hors bande (bruit large bande des émetteurs), par exemple avec le filtrage des équipements, notamment en radiodiffusion, afin d'éviter des émissions hors bande susceptibles de générer des brouillages ;
- les rayonnements non essentiels (RNE) ;
- le découplage entre les antennes présentes sur le site ;
- la protection contre les produits d'intermodulation (PIM) ;
- la protection contre la désensibilisation, le blocage ou la saturation ;
- la sélectivité du canal adjacent ;
- les réponses parasites.

3. Exemples de services typiquement colocalisés

On présente ici des systèmes de radiocommunication et de radiodiffusion que l'on peut trouver communément sur un même site radioélectrique. Cette section n'a pas vocation à être exhaustive, notamment s'agissant des bandes de fréquences.

Le tableau national de répartition des bandes de fréquences (TNRBF) [5], arrêté par le Premier ministre, est le texte réglementaire de référence qui précise les bandes de fréquences et services auxquels les administrations de l'État et autorités administratives indépendantes, les affectataires, ont accès en vue de l'accomplissement de leurs missions.

3.1 Service de radiodiffusion

Le service de radiodiffusion de terre dispose principalement d'attributions sur quatre bandes de fréquences :

- 47-68 MHz ou bande I (en partage avec le service mobile terrestre et le service d'amateur),
- 87,5-107,9 MHz ou bande II,
- 174-223 MHz ou bande III,
- 470-694 MHz encore appelée bande IV/V.

Les services de radiodiffusion qui utilisent effectivement ces bandes se répartissent entre :

- Radio analogique à modulation de fréquence (FM en bande II),
- Radio numérique terrestre (RNT au format DAB+ en bande III),
- Télévision numérique terrestre (TNT au format DVB-T ou DVB-T2 en bandes IV et V).



Figure 1 : exemples d'antennes pour la radiodiffusion FM

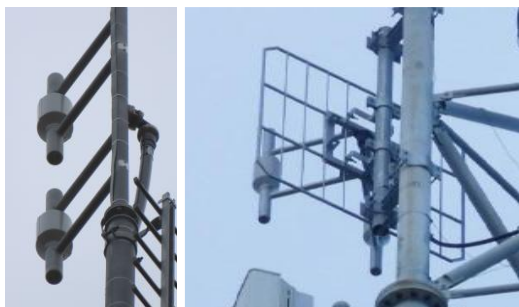


Figure 2 : antennes pour la radio numérique terrestre (DAB+)



Figure 3 : antenne de diffusion TNT d'un émetteur de faible puissance

3.2 Service mobile terrestre

3.2.1 Réseaux ouverts au public type 2/3/4/5G

A partir du 8 février 2025, les réseaux ouverts au public (ROP) peuvent exploiter les bandes :

- 703-733 MHz et 758-788 MHz en duplexage par répartition en fréquences (FDD, respectivement montant et descendant)
- 791-821 MHz et 832-862 MHz (FDD, respectivement descendant et montant)
- 880-915 MHz et 925-960 MHz (FDD, respectivement montant et descendant)
- 1710-1785 MHz et 1805-1880 MHz (FDD, respectivement montant et descendant)
- 1920-1980 MHz et 2110-2170 MHz (FDD, respectivement montant et descendant)
- 2500-2570 MHz et 2620-2690 MHz (FDD, respectivement montant et descendant)
- 3490-3800 MHz en duplexage par séparation temporelle (TDD)

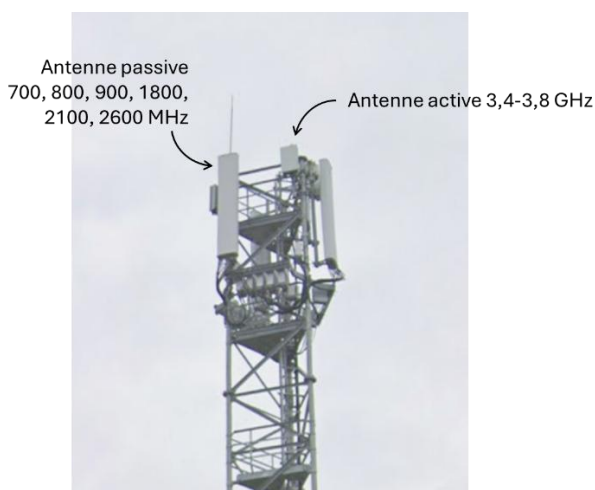


Figure 4 : antennes de réseaux ouverts aux publics (ROP)

3.2.2 Réseaux professionnels à usage partagé ou à usage privé

Les bandes suivantes pour les réseaux mobiles professionnels (PMR) sont gérées par l'ANFR sous convention avec l'Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep). Elles peuvent être utilisées avec des canalisations de 6.25, 12.5 ou 25 kHz :

- 29,7-54 MHz
- 54-68 MHz
- 68-87,5 MHz
- 146-174 MHz
- 406,1-430 MHz

- 440-470 MHz

Les bandes suivantes pour les réseaux PMR sont gérées directement par l'Arcep.

- 2 575-2 615 MHz TDD
- 3 410-3 490 MHz très haut débit (THD) radio (par exemple boucle locale radio – BLR)
- 3 800-4 200 MHz TDD



Figure 5 : exemple d'antenne à plan de masse (GP) vers 35/40 MHz



Figure 6 : exemples d'antennes GP vers 70/80 MHz



Figure 7 : exemples d'antennes Yagi vers 70/80 MHz

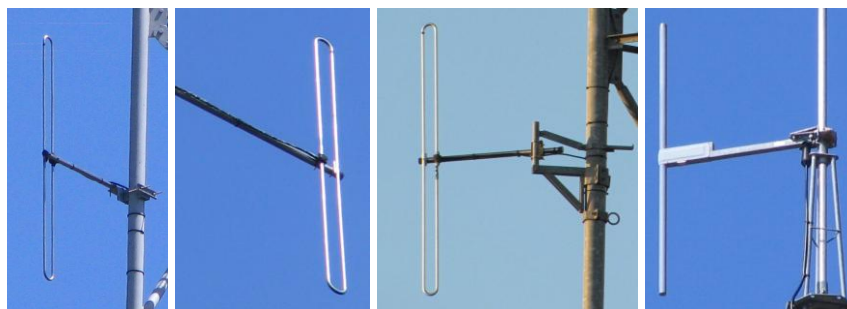


Figure 8 : exemples d'antennes dipôles utilisées en PMR vers 70/80 MHz



Figure 9 : exemples d'antennes GP en bande Ultra High Frequency (UHF)



Figure 10 : exemples d'antennes Yagi en bande UHF

3.2.3 Réseaux professionnels orienté ferroviaire

De manière non exhaustive, les bandes suivantes sont utilisées pour de la signalisation ferroviaire :

- CBTC (Communication Based Train Control) : 5 915-5 935 MHz ;
- GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway): 876-880 MHz et 921-925 MHz (FDD, respectivement descendant et montant) ;
- FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) :
 - 876-880 MHz et 921-925 MHz (FDD, respectivement descendant et montant) ;
 - 1900-1910 MHz (TDD).

3.2.4 Réseaux du ministère de l'intérieur (PPDR)

Les bandes de fréquences utilisées par les réseaux du ministère de l'intérieur se décomposent comme suit :

- bandes très hautes fréquences (VHF), vers 80 et 170 MHz, réseaux d'alerte des Services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) respectivement analogiques et numériques (POCSAG) ;
- bande VHF-R 118-136 MHz, réseaux de « com aéro safety » en dérogation auprès de l'aviation civile ;
- bande UHF 380-430 MHz pour les réseaux de l'Infrastructure nationale partageable des transmissions (INPT) ;
- bande 700 MHz PPDR, principalement utilisée par des « bulles tactiques » et l'infrastructure par des opérateurs de tunnels, établissements recevant du public (ERP), certains opérateurs d'importance vitale (OIV) en complément aux zones couvertes par les opérateurs mobiles ;
- ondes centimétriques (SHF), 6-8-13-22-38 GHz pour le service fixe.



Figure 11 : antenne pour les réseaux INPT

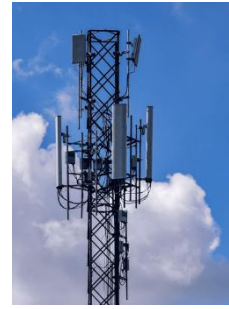


Figure 12 : antennes d'opérateur mobile utilisées par le réseau radio du futur (RRF)

3.3 Réseaux IoT et systèmes basse puissance

L'Annexe 7 du TNRBF [5] décrit les fréquences utilisables par certains matériels de faible puissance et de faible portée. Ces réseaux et systèmes représentent aujourd'hui une part significative des installations et doivent être considérés dans l'ingénierie des sites.

Low Power Wide Area Networks (LPWAN):

- LoRaWAN (863-870 MHz, 915 MHz selon zones)
- Sigfox (863-870 MHz)
- Autres technologies LPWAN (868-915 MHz)

Caractéristiques générales :

- Faible puissance (typiquement 10-25 mW)
- Bandes partagées pour les appareils industriels, scientifiques ou médicaux (ISM) → sensibilité au bruit ambiant et aux puissances élevées sur site
- Risque d'intermodulation passive lorsqu'ils cohabitent avec des systèmes à forte puissance

Importance pour la compatibilité de site :

- Forte sensibilité → besoin d'un environnement radiofréquence (RF) propre
- Trafic sporadique mais grande densité d'objets
- Risques d'écrasement dans les sites multi émetteurs



Figure 13 : exemple de base LoRa



Figure 14 : antenne Sigfox



Figure 15 : réseaux 868 MHz



Figure 16 : réseaux Wi-Fi WiMax 5 GHz

3.4 Réseaux Wi Fi, SRD et autres systèmes locaux

Les réseaux locaux et systèmes de courte portée sont désormais omniprésents sur les sites techniques.

Réseaux Wi Fi :

- 2,4 GHz (2400-2483,5 MHz)
- 5 GHz (5150-5850 MHz)
- 6 GHz (5925-7125 MHz) – Wi Fi 6E / 7

Systèmes SRD (Short Range Devices) :

- Bluetooth / Bluetooth Low Energy (BLE)
- Zigbee (2,4 GHz)
- Thread
- RFID UHF (860-960 MHz)

3.5 Réseaux aéronautiques

Les réseaux aéronautiques civils s'appuient sur un ensemble de bandes de fréquences couvrant un spectre très large, chaque sous-bande étant associée à un ou plusieurs systèmes spécifiques de communication, navigation ou surveillance. Ils reposent sur un maillage dense d'infrastructures au sol (stations radio, radiobalises, aides à la navigation, radars et centres de contrôle), complété par des systèmes satellitaires permettant d'assurer les communications air-sol, les échanges entre centres de contrôle ainsi que les services de navigation et de surveillance à l'échelle mondiale.

- Basses et moyennes fréquences (LF, MF) dans 130-535 kHz : utilisées pour les radiobalises NDB (Non Directional Beacon), permettant une navigation de base par radiogoniométrie
- Hautes fréquences (HF) vers 2,2-25,5 MHz : utilisées pour les communications air-sol longue distance (zones océaniques ou isolées), via des liaisons point-à-point en propagation ionosphérique
- VHF (74,8-75,2 MHz) : utilisée pour les radiobornes (marker ILS) associées aux procédures d'atterrissage
- VHF (108-117,975 MHz) : dédiée aux aides à la navigation, notamment VOR et le Localizer (LOC) de l'ILS (Instrument Landing System)
- VHF (118-137 MHz) : utilisée pour les communications voix air-sol (ATC), certaines liaisons de données (VDL). Ces communications peuvent se faire par réseau terrestre et/ou satellitaire
- UHF (328,6-335,4 MHz) : utilisée pour le Glide Path (GP) de l'ILS (Instrument Landing System)
- UHF (406,0-406,1 MHz) : utilisée pour les balises de détresse
- Bande L (960-1 164 MHz) : utilisée pour les systèmes de surveillance (SSR (Mode A/C/S), ADS-B et TCAS), et de communication air-sol (LDACS) ainsi que de navigation tels que DME
- Bande L (1 164-1 215 MHz) : utilisée pour les systèmes de navigation DME et pour des systèmes récepteurs GNSS embarqués
- Bande L (1 215-1 400 MHz) : utilisée par les radars primaires de surveillance et des systèmes complémentaires GNSS
- Bande L (1 525-1 660,5 MHz) : utilisée pour les systèmes GNSS (1 559-1 610 MHz) ainsi que les systèmes d'augmentation satellitaire régionale (SBAS) et les communications aéronautiques par satellite (SATCOM dans les bandes 1 525-1 559 MHz and 1 610-1 660,5 MHz)
- Bande S (2 700-3 100 MHz) : utilisée pour les radars de surveillance d'aéroport
- Bande C (4 200-4 400 MHz) : utilisée pour les communications embarquées sans fil intra-aéronef (WAIC) et principalement par les radioaltimètres de bord, actifs sur toute phase de vol
- Bande C (5 030-5 150 MHz) : utilisée pour les télémesures aéronautiques (5 091-5 150 MHz) et identifiée pour le contrôle et la commande d'aéronefs télépilotes (C2 Link), et potentiellement d'autres applications aéronautiques (e.g, SATCOM).
- Bande C (5 350-5 470 MHz) : utilisée pour les radars météorologiques embarqués
- Bande X (9 000-9 200 MHz) : utilisée pour les radars de surface aéroportuaires, permettant la surveillance des mouvements au sol
- Bande X (9 300-9 500 MHz) : utilisée pour les radars météorologiques embarqués
- Bande Ku (12,4-15,7 GHz) : identifiée pour les radars de détection et d'évitement (DAA – Detect And Avoid) de cible non-coopératives, principalement pour les besoins des aéronefs télépilotes.
- Bande Ka (31,8 GHz-33,4 GHz) : utilisée pour les radars EFVS embarqués (Système de vision en vol augmenté amélioré) pour les phases critiques de vol
- Bande W (95-100 GHz) : utilisée pour les systèmes de détection de débris d'objets étrangers (FOD – Foreign Object Debris) à la surface des pistes.

Cette liste n'est pas exhaustive mais illustre les principaux systèmes CNS (Communication, Navigation, Surveillance) de l'aviation civile. Au-delà de ces bandes spécifiquement attribuées au service aéronautique, l'affectataire Aviation civile s'appuie également sur des fréquences exploitées à titre dérogatoire pour certaines applications opérationnelles ainsi que sur des faisceaux hertziens utilisés pour l'interconnexion des infrastructures de navigation aérienne et des centres de contrôle. Ces réseaux peuvent mobiliser des fréquences réparties sur différentes portions du spectre radioélectrique en fonction des besoins de disponibilité, de résilience et de sécurité.

Certaines bandes utilisées par l'aviation civile sont par ailleurs souvent adjacentes à celles dédiées aux télécommunications et à la radiodiffusion. Cette proximité spectrale nécessite une attention particulière en matière de compatibilité électromagnétique, notamment sur les sites radioélectriques en cohabitation, afin de garantir la continuité et la sécurité des services aéronautiques.

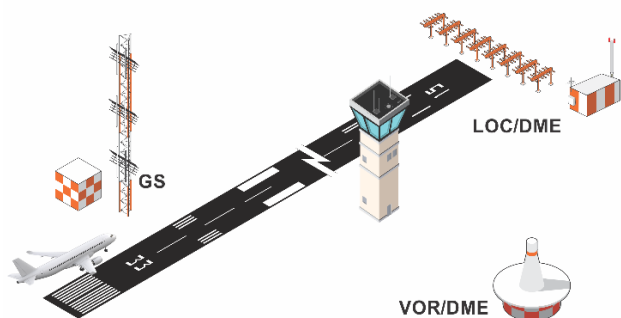


Figure 17 : installations aéroportuaires pour l'aide à la navigation

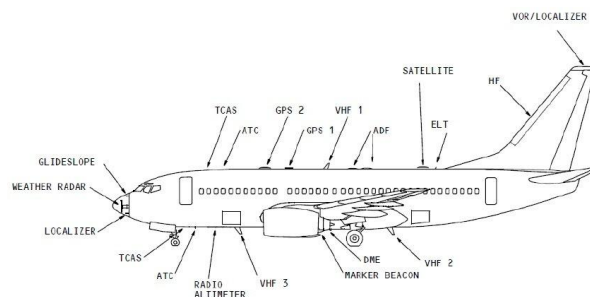


Figure 18 : antennes embarquées



Figure 19 : radar du Grand Ballon d'Alsace

3.6 Faisceaux hertziens

Les faisceaux hertziens (FH) sont des liaisons point à point utilisant des antennes paraboliques et opérant dans les bandes attribuées au service fixe. L'Annexe 5 du TNRBF [5] décrit la disposition des canaux des faisceaux hertziens dans les bandes les plus communes.

Si les faisceaux fonctionnent couramment en ondes centimétriques (SHF) et millimétriques (EHF), ils peuvent être alimentés par des câbles coaxiaux qui véhiculent un signal en fréquence intermédiaire (FI) en bande métrique. Ces câbles ou les bretelles doivent être réalisés avec soin pour éviter des perturbations éventuelles.

Plus rarement, les antennes sont alimentées depuis le sol par guide d'onde, afin de faciliter la maintenance des parties actives amplifiées.

Sur certains sites, des dispositifs passifs sont mis en place pour assurer l'acheminement des services concernés : de par leur aspect passif, ils ne génèrent a priori pas de perturbation mais la liaison peut être affectée par les conditions radioélectriques environnantes sur le site.



Figure 20 : outdoor unit (ODU) alimentée en FI par un câble coaxial et couplée directement à une antenne de 30 cm



Figure 21: antenne à deux entrées (une par polarisation), alimentée par des guides d'onde flexibles (parties actives, modulation et amplification, déportées)



Figure 22 : autres exemples d'antennes FH

3.7 Réseaux satellites

De par leur orientation, les antennes des réseaux satellites ne nécessitent pas forcément d'être placées sur un point haut dominant le terrain environnant.

On pourra cependant porter attention aux risques de brouillages qui peuvent découler du partage de certaines bandes de fréquences entre services de terre (par exemple service fixe, dont faisceaux hertziens) et services spatiaux (par exemple radiodiffusion par satellite ou service fixe par satellite).



Figure 23 : exemples d'antennes satellite



Figure 24 : exemple de cohabitation entre antennes satellites et antennes FH

4. Définitions relatives aux caractéristiques des équipements radioélectriques

Cette section présente les caractéristiques principales des équipements utilisés pour la conception des installations.

4.1 Caractéristiques d'un récepteur

Les propriétés essentielles d'un récepteur sont : la sensibilité, la sélectivité, la linéarité, la stabilité et la fiabilité. Les deux dernières n'entrent pas en compte dans la compatibilité électromagnétique.

4.1.1 Sensibilité

Aptitude à recevoir des signaux de faible amplitude RF pour un signal à bruit ou un taux d'erreur binaire donné. Plus la sensibilité est bonne, plus la sensibilité aux intermodulations en réception est élevée (IP_3 plus faible). Il convient de spécifier uniquement la sensibilité nécessaire dans les cahiers des charges, si elle n'est pas déjà précisée dans une norme en vigueur.

4.1.2 Rapport signal à bruit

Le rapport de protection est le rapport de la puissance du signal utile au bruit (C/N) qui permet d'assurer le bon fonctionnement du récepteur.

4.1.3 Rapport de protection

Le rapport de protection est le rapport de la puissance du signal utile au signal brouilleur (C/I), qui permet d'assurer le bon fonctionnement du récepteur.

4.1.4 Sélectivité

Capacité d'un récepteur à discriminer deux signaux proches en fréquences et à supporter des signaux sur les canaux adjacents. Elle dépend principalement :

- du filtrage de la fréquence intermédiaire,
- et de la qualité spectrale de l'oscillateur local.

4.1.5 Linéarité et produits d'intermodulation

La linéarité est la capacité du récepteur à éviter la création d'harmoniques et de produits d'intermodulation. Elle est caractérisée par les niveaux des points d'interception à l'ordre n , IP_n (IP_2 , IP_3 , IP_5 , etc.) et par le point de compression à 1 dB (OP1dB) qui sont exprimés en dBm.

Des IP_3 et IP_5 élevés améliorent la robustesse dans les environnements de champs forts.

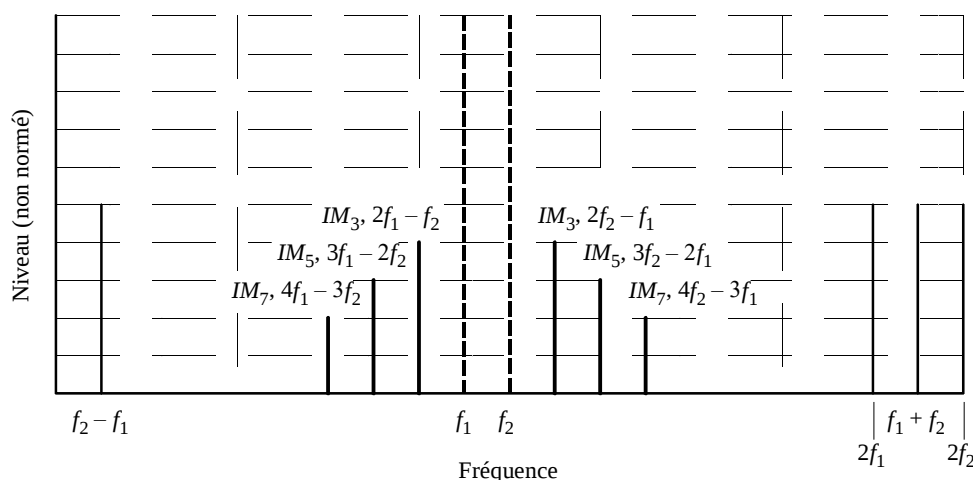


Figure 25 : produits d'intermodulation à l'ordre n
(IM_n traits gras) par rapport aux fréquences fondamentales¹

Cette section décrit les produits d'intermodulation entre deux fréquences distinctes, mais ils peuvent s'étendre à des sites utilisant un plus grand nombre de fréquences. Voir aussi la section 5.2.4.

4.1.5.1 Produit d'intermodulation de second ordre

Deux signaux test ayant la même puissance quadratique (P_{in}) aux fréquences f_1 et f_2 ($f_1 < f_2$) sont injectés à l'entrée de l'antenne du récepteur. En cas de non-linéarité, deux produits d'intermodulation aux fréquences f_3 et f_4 peuvent apparaître :

$$f_3 = f_2 - f_1 \quad (\text{MHz}) \quad (1)$$

$$f_4 = f_2 + f_1 \quad (\text{MHz}) \quad (2)$$

Ces fréquences peuvent également s'exprimer au moyen du paramètre Δf (différence de fréquences) :

$$\Delta f = 2 \times f_1 - f_2 \quad (\text{MHz}) \quad (3)$$

$$f_1 = f_3 + \Delta f \quad (\text{MHz}) \quad (4)$$

$$f_2 = 2 \times f_3 + \Delta f \quad (\text{MHz}) \quad (5)$$

Le produit d'intermodulation de second ordre en entrée est ensuite calculé :

$$IP_2 = P_{in} + a \quad (\text{dBm}) \quad (6)$$

où :

IP_2 : produit d'intermodulation de second ordre à l'entrée du récepteur testé

P_{in} : puissance quadratique (dBm) des deux signaux test injectés

a : différence (dB) entre le niveau des signaux test et celui du produit d'intermodulation le plus élevé à l'entrée.

4.1.5.2 Produit d'intermodulation de troisième ordre

Les intermodulations d'ordre 3 produisent des signaux aux fréquences $2 \times f_1 - f_2$ et $2 \times f_2 - f_1$. Elles peuvent être caractérisées par l' IP_3 ou l' IM_3 .

Le point d'interception d'ordre trois, IP_3 , est l'intersection des réponses idéales d'ordre 1 et 3. Il est caractérisé par la puissance d'entrée ou de sortie correspondante, respectivement IIP_3 ou OIP_3 , exprimées en dBm.

L' IM_3 correspond à la différence entre le produit d'intermodulation et les signaux d'entrée, pour des niveaux de référence donnés selon la norme applicable au récepteur. L' IM_3 est exprimé en dBc.

¹ Source : Recommandation UIT-R SM.1446 [41]

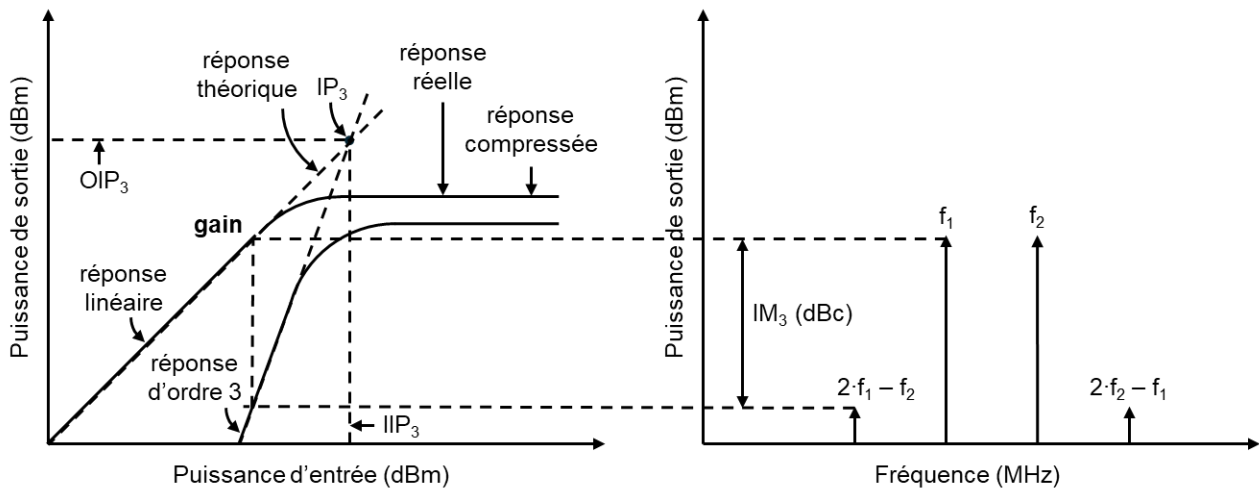


Figure 26 : point d'interception du troisième ordre (IP3)

4.1.5.3 Point de compression à 1 dB

Au point de compression à 1 dB, la puissance en dBm en sortie est 1 dB en dessous de la puissance théorique produite dans le prolongement de la plage de fonctionnement linéaire du récepteur.

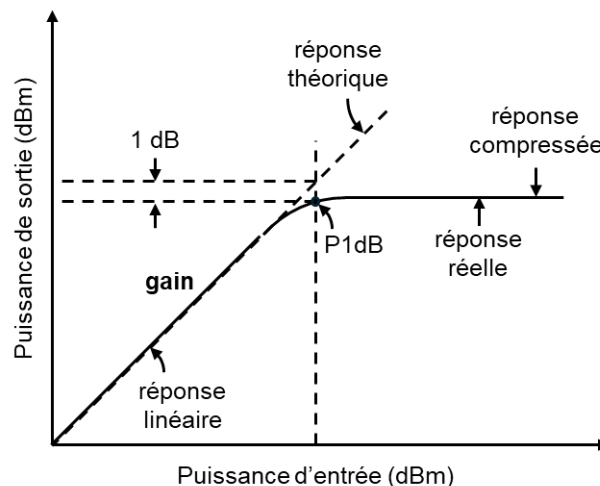


Figure 27 : point de compression à 1 dB (P1dB)

4.1.6 Seuil de saturation

Le seuil de saturation s'exprime en dBm et correspond à la puissance maximum admissible par le récepteur pour assurer son bon fonctionnement.

Le terme de blocking est parfois utilisé pour désigner ce seuil de saturation dans certaines spécifications produit. Mais il est à noter que dans d'autres contextes, ce terme fait référence à la perte de service liée à une désensibilisation trop forte créée par un signal en bande adjacente (voir section 5.2.2).

4.1.7 Stabilité

L'oscillateur local doit avoir une stabilité en fréquence en adéquation avec le besoin (exemple 1 ppm pour une fréquence de la Direction générale de l'Aviation civile – DGAC – en bande VHF) et un bruit d'oscillateur (bruit de phase) limité.

4.1.8 Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude à maintenir durablement les performances nominales dans les conditions d'exploitation (température, vieillissement, environnement électromagnétique).

4.1.9 Niveau de bruit radioélectrique ambiant

La mesure de bruit radioélectrique ambiant est seulement une indication approximative, puisqu'elle est strictement applicable à l'antenne utilisée et aux conditions de bruit propre à cette mesure.

Le niveau de bruit ambiant, suivant les emplacements et le choix des bandes de fréquences, a une influence importante sur la portée du système et de sa performance.

Le bruit radioélectrique ambiant comprend :

- le bruit atmosphérique ;
- le bruit cosmique ;
- le bruit d'origine humaine.

La Recommandation UIT-R P.372-17 [38] donne de plus amples informations sur le bruit radioélectrique.

4.2 Caractéristiques d'un émetteur

Les propriétés essentielles d'un émetteur sont sa puissance de sortie, sa fréquence, sa largeur de bande nécessaire, ses rayonnements non désirés, sa stabilité et sa fiabilité.

4.2.1 Puissance de sortie de l'émetteur

La puissance de sortie de l'émetteur est typiquement exprimée en dBm (dB relatif à 1 mW) ou en dBW (dB relatif à 1 W).

4.2.2 Fréquence assignée

La fréquence assignée est définie par l'Article **1.148** du RR [4] comme le « *centre de la bande de fréquences assignée à une station.* »

4.2.3 Largeur de bande nécessaire

La largeur de bande nécessaire est définie par l'Article **1.152** du RR [4] : « *Pour une classe d'émission donnée, largeur de la bande de fréquences juste suffisante pour assurer la transmission de l'information à la vitesse et avec la qualité requise dans des conditions données.* »

Dans le cas des émetteurs/répéteurs multivoies ou multi-porteuses, dans lesquels plusieurs porteuses peuvent être émises simultanément à partir d'un amplificateur de sortie ou d'une antenne active, la largeur de bande nécessaire est par hypothèse celle de l'émetteur ou du répéteur.

4.2.4 Rayonnements non désirés

Les rayonnements non désirés sont définis par l'Article **1.146** du RR [4] comme l'« *ensemble des rayonnements non essentiels et des rayonnements provenant des émissions hors bande.* »

Les définitions de rayonnements non essentiels et émissions hors bande sont à retrouver dans les deux sections ci-après. À noter que la limite entre les rayonnements non essentiels et les rayonnements provenant des émissions hors bande est précisée dans la Recommandation UIT-R SM.1539-2 [41], et est généralement située à 250% de la largeur de bande nécessaire.

4.2.5 Émission hors bande

L'Article **1.144** du RR [4] définit une émission hors bande comme une : « *Émission sur une ou des fréquences situées en dehors de la largeur de bande nécessaire mais en son voisinage immédiat, due au processus de la modulation, à l'exclusion des rayonnements non essentiels.* »

Pour les émetteurs/répéteurs multivoies ou multi porteuses, dans lesquels plusieurs porteuses peuvent être émises simultanément à partir d'un amplificateur de sortie ou d'une antenne active.

4.2.6 Rayonnement non essentiel

Les rayonnements non essentiel sont définis par l'Article **1.145** du RR [4] : « *Rayonnement sur une ou sur des fréquences situées en dehors de la largeur de bande nécessaire et dont le niveau peut être réduit sans affecter la transmission de l'information correspondante. Ces rayonnements comprennent les rayonnements harmoniques, les rayonnements parasites, les produits d'intermodulation et de conversion de fréquence, à l'exclusion des émissions hors bande.* »

Tous les rayonnements, y compris les produits d'intermodulation, les produits de conversion et les rayonnements parasites, qui sont émis à des fréquences séparées de la fréquence centrale de l'émission par au moins 250% de la largeur de bande nécessaire à cette émission sont de manière générale considérés comme étant des rayonnements non essentiels. Pour les émetteurs/répéteurs multivoies ou multi-porteuses, dans lesquels plusieurs porteuses peuvent être émises simultanément à partir d'un amplificateur de sortie ou d'une antenne active, la fréquence centrale de l'émission est, par hypothèse, le centre de la largeur de bande à -3 dB de l'émetteur ou du répéteur.

La Recommandation UIT-R SM.329-13 [39] donne plusieurs exemples de rayonnements non essentiels, dont certains sont mentionnés dans les sections suivantes.

4.2.6.1 Rayonnement harmonique

Le rayonnement harmonique est un rayonnement non essentiel sur des fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence centrale ($2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, etc.). Il résulte de la non-linéarité, notamment, des étages d'amplification et participe de fait à la création de raies d'intermodulation à l'émission.

4.2.6.2 Rayonnement parasite

Le rayonnement parasite est un rayonnement non essentiel sans relation directe avec la fréquence porteuse (défauts, instabilités, couplages indésirables).

4.2.6.3 Produits de conversion de fréquence

Les produits de conversion de fréquence sont des rayonnements non essentiels, ne comprenant pas les rayonnements harmoniques, sur les fréquences ou leurs multiples entiers des oscillations utilisées pour produire la fréquence porteuse ou la fréquence caractéristique d'une émission.

4.2.7 Stabilité

L'oscillateur local doit avoir une stabilité en fréquence en adéquation avec le besoin (exemple 1 ppm pour une fréquence DGAC en bande VHF) et un bruit d'oscillateur (bruit de phase) limité.

4.2.8 Bruit de phase

Le bruit de phase d'un oscillateur (VCO ou VCXO) est la fluctuation aléatoire de la phase, ou gigue, autour de la fréquence porteuse, exprimée en dBc/Hz à un certain décalage de la porteuse. Un bruit de phase trop important et mal filtré peut être à l'origine de rayonnement non essentiels.

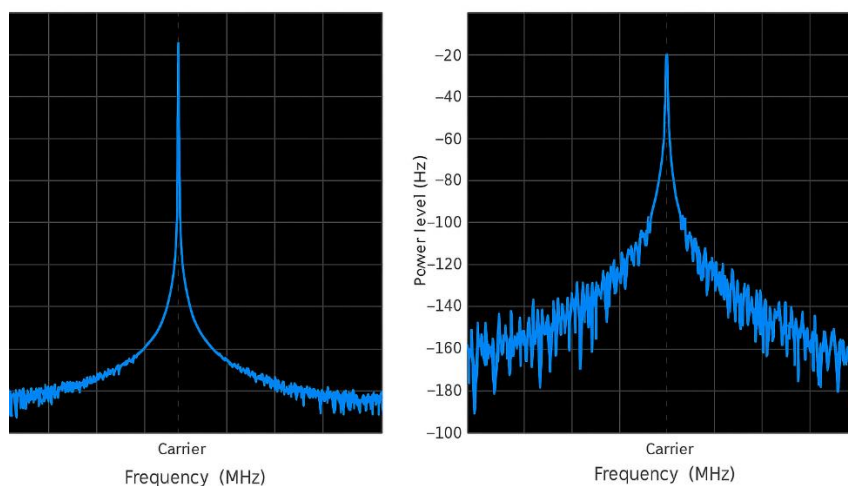


Figure 28 : oscillateurs à faible bruit de phase (à gauche) et à fort bruit de phase (à droite)

4.2.9 Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude à maintenir durablement les performances nominales d'un émetteur dans les conditions d'exploitation (température, vieillissement, environnement électromagnétique).

4.3 Autres caractéristiques des équipements des installations radioélectriques

4.3.1 Pertes câble

Le câble est caractérisé par ses pertes linéiques, typiquement exprimées en dB.m⁻¹.

L'affaiblissement du signal par les câbles est typiquement exprimé en dB.

4.3.2 Gain d'antenne

Le gain d'antenne est typiquement exprimé en dBi (par rapport à une antenne isotrope) ou en dBd (par rapport à un dipôle demi-onde).

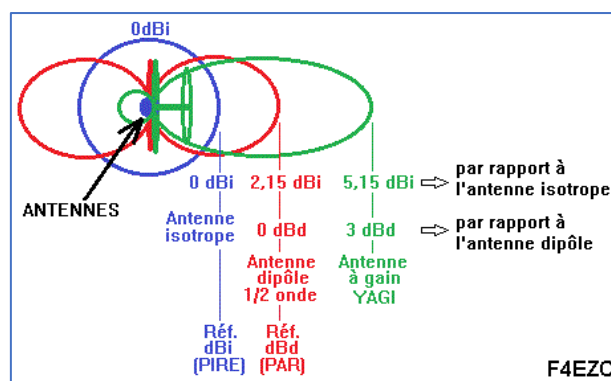


Figure 29 : comparaison entre antennes isotrope, dipôle et Yagi 2 éléments

Le gain d'antenne exprimé en dBi est le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne dans une direction donnée (typiquement, la direction de rayonnement maximal) par la même puissance délivrée à une antenne isotrope idéale.

Le gain d'antenne exprimé en dBd est le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne dans une direction donnée par la même puissance délivrée à un dipôle demi-onde idéal.

La relation entre le gain d'antenne en dBi et le gain d'antenne en dBd est donné par :

$$G_{dBi} = G_{dBd} + 2.15 \quad (\text{dBi}) \quad (7)$$

4.3.3 Puissance apparente rayonnée (p.a.r.)

Puissance rayonnée par un dipôle idéal produisant la même puissance que l'émetteur considéré. La p.a.r. est la somme de la puissance de sortie de l'émetteur, des pertes câble et du gain d'antenne exprimé en dBd. Elle varie donc en fonction de la direction du rayonnement considéré, comme le gain d'antenne.

4.3.4 Puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.)

Puissance rayonnée par une antenne isotrope idéale produisant la même puissance que l'émetteur considéré. La p.i.r.e. est la somme de la puissance de sortie de l'émetteur, des pertes câble et du gain d'antenne exprimé en dBi. Elle varie donc en fonction de la direction du rayonnement considéré, comme le gain d'antenne.

La relation entre la p.i.r.e et la p.a.r. est donnée par l'équation suivante.

$$p.i.r.e. = p.a.r. + 2.15 \quad (\text{dBW}) \quad (8)$$

4.4 Résumé

Les paramètres importants d'un équipement radio sont :

- Sensibilité
- Sélectivité
- Linéarité (IP_3/IP_5)
- Stabilité et bruit de phase de l'oscillateur local

Les paramètres à surveiller sont :

- Largeur de bande nécessaire

- Désensibilisation
- Réponses parasites
- Émissions hors bande
- Rayonnements non essentiels (harmoniques, parasites, *IM*)
- Bruit large bande
- Bruit ambiant radioélectrique

5. Brouillages

Les phénomènes de brouillage décrits dans la présente section doivent être appréhendés au regard des définitions issues du RR [4] (Articles **1.166** à **1.169** et **15**, notamment), reprises dans le Document ANFR/DR-13 [11] relatif à la procédure de recueil et d'instruction des cas de brouillage.

En particulier, il convient de distinguer les perturbations perceptibles sans impact significatif sur le fonctionnement du service, des situations de brouillage préjudiciable caractérisées par une dégradation sérieuse, répétée ou une interruption du service ou le brouillage de services de radionavigation ou de sécurité (voir Article **1.169** du RR [4]).

Les mécanismes techniques décrits ci-après (dégradation des couvertures, désensibilisation, etc.) peuvent, selon leur contexte d'exploitation, ne pas constituer un brouillage au sens réglementaire, ou relever d'un brouillage préjudiciable nécessitant une instruction conformément au Document ANFR/DR-13 [11], notamment lorsqu'une origine externe est suspectée.

La compréhension de ces phénomènes est donc essentielle pour qualifier correctement une situation de brouillage, orienter les actions correctives, et, le cas échéant, justifier une saisine de l'ANFR.

5.1 Définition

Le RR [4] définit un brouillage (Article **1.166**) comme l'« *effet, sur la réception dans un système de radiocommunication, d'une énergie non désirée due à une émission, à un rayonnement ou à une induction (ou à une combinaison de ces émissions, rayonnements ou inductions), se manifestant par une dégradation de la qualité de transmission, une déformation ou une perte de l'information que l'on aurait pu extraire en l'absence de cette énergie non désirée.* »

Le CPCE [3] définit un brouillage préjudiciable comme un « *brouillage qui compromet le fonctionnement d'un service de radionavigation ou d'autres services de sécurité ou qui, de toute autre manière, altère gravement, entrave ou interrompt de façon répétée le fonctionnement d'un service de radiocommunications opérant conformément à la réglementation internationale, de l'Union ou nationale applicable* ».

Les brouillages ont des causes très diverses, d'émissions radio par des sources radioélectriques non autorisées ou défectueuses, à des émissions involontaires de parasites électromagnétiques générées par des appareils électriques, électroniques ou radio, non-conformes, vétustes ou mal réglés.

Le brouillage d'une bande de fréquences entrave voire empêche toutes les utilisations de cette bande de fréquences dans un périmètre donné.

Un brouillage, offensif ou non, provoque des altérations, ou même des dénis de service. Les effets peuvent être importants sur le plan économique, environnemental, sociétal et/ou sécuritaire, jusqu'à la mise en danger d'autrui.

Tous les secteurs et domaines sont potentiellement concernés, y compris des domaines critiques ou de sécurité.

Sur les sites radioélectriques, le regroupement d'équipements radioélectriques (émetteurs et récepteurs fonctionnant dans des bandes variées, parfois voisines) crée des interactions qui sont autant de causes potentielles de dysfonctionnement. Cette concentration, combinée à la qualité parfois hétérogène des installations (antennes, câbles, émetteurs, récepteurs) et à l'environnement local (réflexions, couplages, oxydation), crée un risque de brouillages.

Les cohabitants doivent tenir compte de l'ensemble de ces paramètres pour disposer continuellement d'installations respectant les règles de l'art et permettre ainsi un fonctionnement normal.

Dans les zones de forte concentration, les seules exigences normatives des équipements individuels peuvent ne pas suffire. Un schéma d'analyse permet généralement d'identifier les risques de perturbations et les actions correctives possibles.

Le synoptique suivant situe plus précisément ces risques et indique les points pouvant faire l'objet d'une action pour éliminer les brouillages.

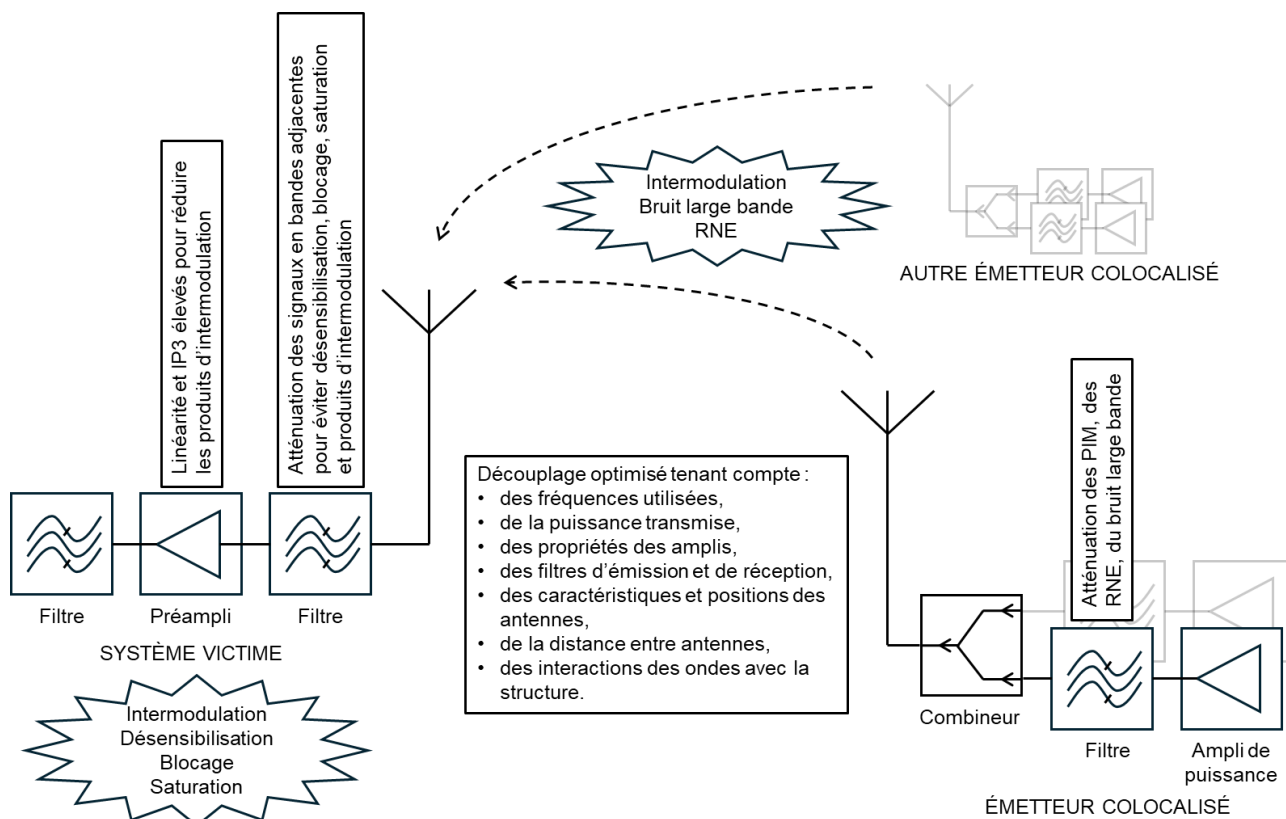


Figure 30 : interactions des systèmes radioélectriques

L'amélioration des conditions de compatibilité entre les différents éléments d'un site peut être obtenue en ajoutant des filtres supplémentaires ou en augmentant le découplage entre ces éléments.

L'addition d'un filtre à l'émission atténue :

- les rayonnements non essentiels et le niveau de bruit radioélectrique large bande de l'émetteur ou des émetteurs couplés sur la même antenne ;
- les éventuels produits d'intermodulation créés au niveau de l'émission.

Au niveau du récepteur, un filtre améliore les caractéristiques radioélectriques en apportant une protection supplémentaire contre :

- le brouillage en canal adjacent ;
- la désensibilisation ;
- l'intermodulation dans le récepteur ;
- les réponses parasites.

Le découplage supplémentaire entre antennes sera créé en plaçant les aériens dans un plan vertical ou en les éloignant en distance dans le plan horizontal. Le découplage entre émissions permettra de limiter les réémissions d'intermodulations à un niveau acceptable, selon la planification et la qualité des émetteurs, dont leurs points d'interception. Le découplage entre émission et réception permettra de limiter le niveau de signal en entrée d'une chaîne de réception (diminution d'un signal dans la même bande de fréquence ou d'une autre bande).

Enfin, dans les calculs de compatibilité sur le site, il y a lieu de prendre en compte tous les émetteurs présents (avec leur puissance, écart duplex, largeur du canal), y compris ceux des autres stations dont la réception est perturbée, ceux-ci pouvant eux-mêmes contribuer pour une partie non négligeable à la dégradation des conditions de réception.

5.2 Mécanismes principaux

5.2.1 Désensibilisation

La désensibilisation est la perte de sensibilité d'un récepteur due à un signal indésirable ou à l'environnement (parasites, bruit urbain, autres émetteurs radio...). La désensibilisation entraîne la dégradation de la capacité d'un récepteur à recevoir des signaux RF. Elle peut être générée par des signaux partageant la même bande, ou opérant en bande adjacente.

La désensibilisation se mesure par la dégradation du rapport signal à (bruit + interférence), $C/(N+I)$.

La conséquence d'une désensibilisation est une réduction de la portée des communications (réduction de couverture), voire la perte du signal utile ou une dégradation trop importante du signal démodulé utile.

Dans le cas d'un système où la réception et l'émission sont simultanées (typiquement le cas d'un relais), une auto-désensibilisation anormale peut être mesurée lorsque le passage en émission désensibilise sa propre réception.

5.2.2 Blocage

Il y a blocage lorsque le rapport $C/(N+I)$ n'est plus suffisant pour assurer une démodulation correcte du signal utile. Voir section 4.1.6.

Le blocage d'un récepteur empêche son fonctionnement et découle le plus souvent d'un signal adjacent trop intense et/ou pas assez filtré.

L'utilisation d'un filtre peut aider à résoudre le blocage par un signal en canal adjacent ou en bande adjacente.

À noter que le terme de blocking est parfois utilisé pour désigner le seuil de saturation dans certaines spécifications produit.

5.2.3 Saturation

Il y a saturation d'un récepteur lorsque la puissance du signal reçu dépasse son seuil de fonctionnement linéaire. Dans ce cas, les harmoniques produites par la saturation empêchent toute démodulation du signal.

L'utilisation d'un filtre peut aider à résoudre la saturation par un signal en canal adjacent ou en bande adjacente.

5.2.4 Produits d'intermodulation

Les produits d'intermodulation sont des signaux indésirables générés par combinaison lorsqu'au moins deux signaux RF distincts passent à travers un circuit non linéaire. Ces produits apparaissent à des fréquences qui sont des combinaisons linéaires entières des signaux originaux ($2f_1 - f_2$, $2f_1 + f_2$, etc.). Deux fréquences ou plus de deux fréquences utilisées sur un site radioélectrique peuvent participer à la production de produits d'intermodulation (voir la section 4.1.5).

5.2.4.1 Types d'intermodulations

On peut rencontrer plusieurs types d'intermodulation qui se manifestent de diverses manières dans les systèmes radioélectriques. On les définit par les quatre types suivants :

- 1) Intermodulation dans le canal d'émission : lorsque le signal désiré subit une distorsion due à des imperfections dans l'émetteur, et lorsque des produits d'intermodulation sont seulement fonction de l'émetteur lui-même.
- 2) Intermodulation entre plusieurs fréquences d'émission : lorsque les signaux désirés de plusieurs fréquences subissent une distorsion par des imperfections dans le même émetteur.
- 3) Intermodulation entre émetteurs (IM_3 , IM_5 , etc.) : lorsqu'un ou plusieurs émissions sur un même site se combinent pour produire des produits d'intermodulation, soit dans les émetteurs eux-mêmes soit dans un composant non-linéaire sur le site. Les fréquences produites sont potentiellement éloignées des émissions utiles (voir Figure 25).
- 4) Intermodulation dans les amplificateurs de la chaîne de réception : les produits d'intermodulation sont créés par la non-linéarité des amplificateurs, notamment dans un environnement de champs forts.

Les produits d'intermodulation d'ordre pair ne sont pas impossibles, mais plus rares en pratique.

Concernant les calculs des produits, il est important de préciser qu'ils doivent tenir compte :

- De la largeur de modulation de tous les émetteurs, les calculs sur porteuses pures non modulées étant incomplets et donc non réalistes.

- De la bande passante des récepteurs.

5.2.4.2 Ecart duplex

Lorsque la différence entre deux fréquences d'émission correspond à l'écart duplex d'un relais radio, un produit d'intermodulation peut correspondre à la fréquence de réception du relais.

Exemple :

- FM_1 : fréquence radiodiffusion 1
- $FM_2 = FM_1 - 4,05 \text{ MHz}$: fréquence radiodiffusion 2
- $F_{tx_radio_PMR}$: fréquence d'émission PMR
- $F_{rx_radio_PMR}$: $F_{rx_radio_PMR} = F_{tx_radio_PMR} - 4,05 \text{ MHz}$ (exemple d'écart duplex)
- $F_{tx_radio_PMR} - (FM_1 - FM_2) = F_{rx_radio_PMR}$

5.2.4.3 Facteurs aggravants

Des aériens et structures en mauvais état, particulièrement les oxydations et la rouille, peuvent aggraver les phénomènes d'intermodulation. Il en va de même des connectiques en mauvais état, mal serrées ou non adaptées aux puissances de la chaîne d'émission. Tout élément est susceptible de produire des raies d'intermodulation.

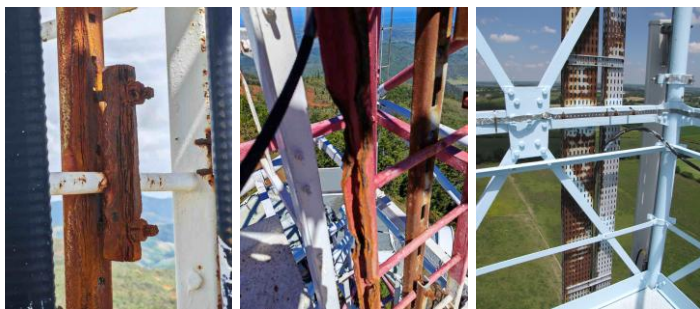


Figure 31 : exemple de structures rouillées contribuant aux produits d'intermodulation



Figure 32 : dans ce cas, l'ouverture de la trappe influait sur l'amplitude des produits d'intermodulation

Des défauts de maintenance, d'entretien ou d'utilisation d'infrastructures d'accueil ou d'installations radioélectriques (ex : corrosion, supports d'antenne non utilisés et non connectés mais maintenus en place) peuvent contribuer à produire des brouillages préjudiciables.

Ce phénomène est parfois nommé « effet du boulon rouillé » (voir Recommandation UIT-R SM.1446-0 [40]).

Exemples de défauts d'une structure d'accueil de station radioélectrique :

- Carbonisation ou oxydation de surfaces métalliques
- Corrosion de la structure d'accueil (pylône, pylônet)
- Corrosion d'antennes, corrosion de connectique
- Connexions desserrées ou souillées
- Couches d'oxyde superficielle
- Défauts métalliques dans les structures
- Présence inutile d'antennes, de câbles, de fils d'alimentation électrique
- Câbles coupés

Des défauts dans des dispositifs métalliques passifs peuvent générer des non-linéarités avec la création de micro-courants d'intensités variables. Ces non-linéarités peuvent contribuer à la réémission de fréquences transmises sur le site ou à l'émission de combinaisons de fréquences transmises sur le site par effet d'intermodulation, et générer un brouillage de services autorisés, installés à distance ou sur la structure d'accueil elle-même.

5.3 Autres mécanismes et notions de compatibilité électromagnétique

Cette section traite des aspects pratiques et techniques de la compatibilité électromagnétique (CEM).

Un équipement peut être perturbateur en conduit et/ou en rayonné. Il est nécessaire d'utiliser des équipements respectant les normes CEM, en coffrets métalliques, blindés et installés dans les règles de l'art. Dans certains cas, le vieillissement de composants ou une température trop élevée deviennent des facteurs d'aggravation des perturbations.

Les ferrites peuvent aider à réduire les pollutions électromagnétiques, mais l'identification du phénomène (conduit ou rayonné) est nécessaire à un traitement pertinent (ferrite, ou blindage en scotch cuivre, ou grillage).

Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de remplacer l'équipement en cause.

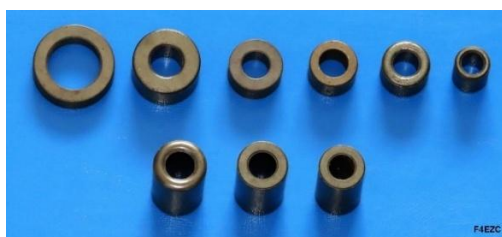


Figure 33 : exemples de ferrites



Figure 34 : ferrites à clipser



Figure 35 :
exemples de
réalisations

De manière générale, les recommandations suivantes s'appliquent :

- Les équipements susceptibles de provoquer des perturbations doivent être éloignés le plus possible des éléments sensibles (récepteurs). Exemple : chargeur dans le bas de la baie radio et partie réception dans le haut.
- Les câbles susceptibles de rayonner doivent être blindés et plaqués sur le châssis métallique de la baie. Ils seront aussi éloignés de ceux qui sont les plus sensibles.

5.3.1 Câbles des signaux en fréquences intermédiaires

Des systèmes radio, comme certains faisceaux hertziens, utilisent des câbles pour fournir à l'unité extérieure un signal en bande de base ou sur fréquence intermédiaire. Ce signal, différent du signal transmis par l'antenne, peut utiliser une fréquence proche de celle d'un système cohabitant. Il convient alors de porter une attention particulière aux câbles (sélection et installation) et à la réalisation des connecteurs afin d'éviter tout brouillage.

5.3.1.1 Exemple de cas recensés

Dans certains cas, les fréquences intermédiaires (FI), utilisées par des FH peuvent tomber sur la fréquence de réception d'un cohabitant. Il conviendra alors de porter une attention particulière à l'installation, et un soin particulier à sa réalisation (par exemple, au serrage des connecteurs ou aux choix du type de câble).

Pour exemple, Enedis a subi plusieurs cas de brouillage importants dus à des fréquences intermédiaires tombant au centre de sa bande de réception VHF à proximité d'une baie FH (exemple de mesure à +20 dBμV, voir Figure 36 ci-dessous). Des mesures de désensibilisation VHF de la réception Enedis ont parfois dépassé 40 dB.

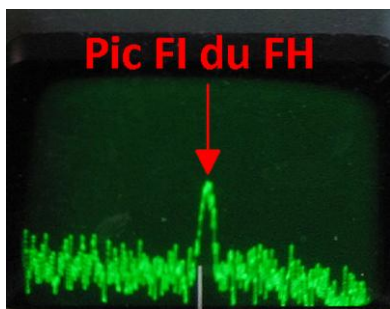


Figure 36 : exemple de mesure à +20 dBμV à proximité d'une baie FH

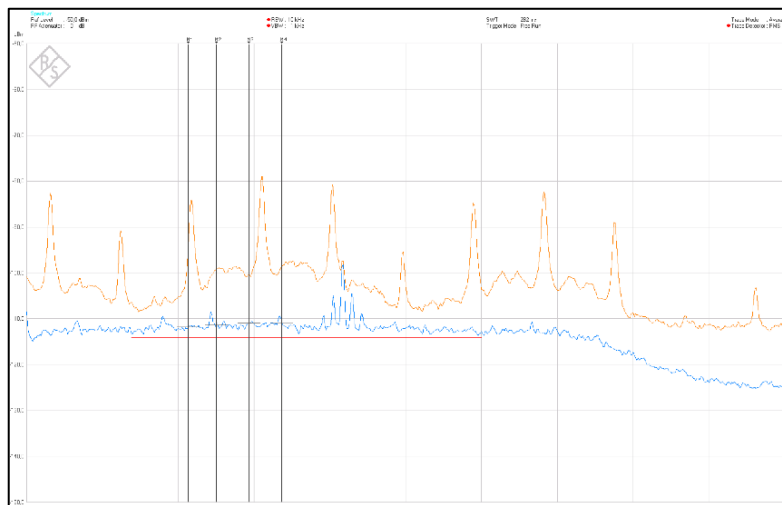


Figure 37 : exemple de brouillage par la fréquence intermédiaire d'une liaison FH (courbe orange : liaison FH en opération, courbe bleue : liaison FH éteinte)

5.3.1.2 Exemples de résolutions

Trois cas de résolutions ont été recensés par Enedis :

- reprise de connecteurs défectueux ;
- intervention sur la baie technique hébergeant l'IDU du FH :
 - remplacement de la porte avant vitrée par une porte métallique (cage de Faraday) ;
 - mise à la terre des portes de la baie et des matériels ;
- remplacement intégral du FH (IDU et ODU) par un autre modèle avec une FI différente.

5.3.2 Câbles sans terminaison

Un feeder ou un câble coaxial non utilisé doit être bouchonné à chaque extrémité par une charge adaptée à son impédance (généralement 50 Ohms, parfois 75 Ohms). Dans le cas contraire, le câble risque de se comporter comme une antenne. Comme une antenne, un feeder ou un câble qui n'est plus utilisable doit être déposé intégralement.

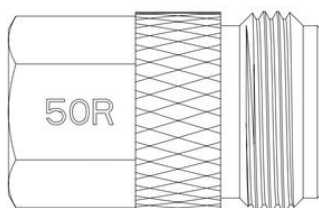
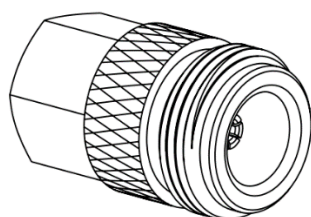


Figure 38 : exemple de bouchon N femelle 50 Ω terminaison N femelle

5.3.2.1 Exemple de situation à éviter

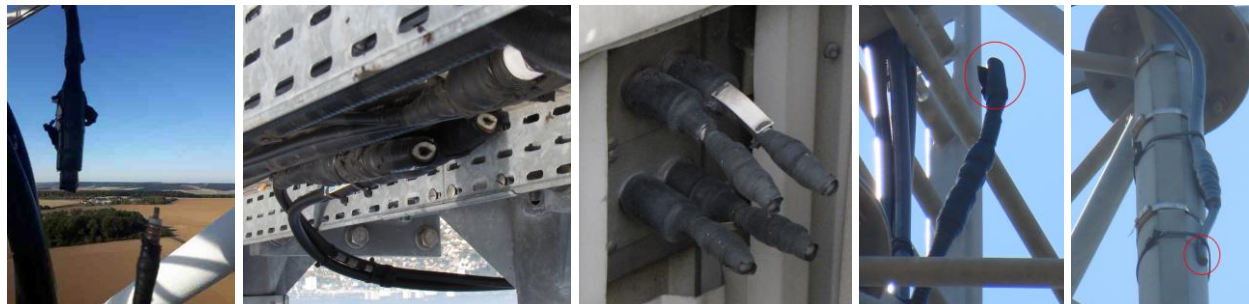


Figure 39 : exemples de câbles en extérieur, sans terminaison, pouvant générer des perturbations pour les équipements des cohabitants

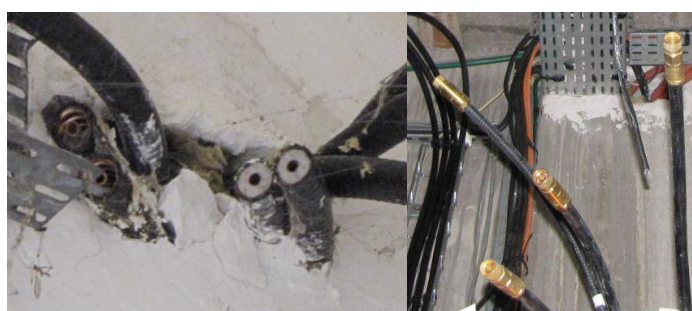


Figure 40 : exemples de câbles en intérieur, sans terminaison, pouvant générer des perturbations pour les équipements des cohabitants



Figure 41 : exemple de câble terminé par un circuit ouvert au lieu d'une charge adaptée

5.3.3 Sources d'alimentation

Des modules d'alimentation non linéaires, onduleurs, hacheurs peuvent générer des harmoniques radio. En modulation d'amplitude, ces perturbations se caractérisent par des crépitements ou des grésillements large bande, parfaitement audibles.

5.3.3.1 Exemples de cas recensés

Des cas de brouillages ont été constatés dus à des sources d'alimentations diverses :

- alimentations à découpages ;
- chargeurs ;
- élévateurs de tension DC-DC ;
- onduleurs 230V : les modèles « pur sinus » générant le moins d'harmoniques, alors que les « quasi-sinus », « pseudo-sinus » et autres sont typiquement générateurs d'harmoniques ;
- installations photovoltaïques.

Le cas des installations photovoltaïques (particulièrement les micro-onduleurs) installés sur des pylônes radio ou à proximité, représentent un problème grandissant qui nécessite des essais de compatibilité radioélectrique avant mise en service. En début de l'ensoleillement, des battements (« bruits d'hélicoptère ») peuvent se faire entendre, de plus en plus rapide, avec ensuite des crépitements/grésillements large bande, de type électrique, parfaitement audibles en modulation d'amplitude.

Si dans certains cas, la pose de filtres EMI (Electromagnetic interference) DC-DC peut s'avérer suffisante, dans d'autres cas, le remplacement du micro-onduleur peut s'avérer indispensable.



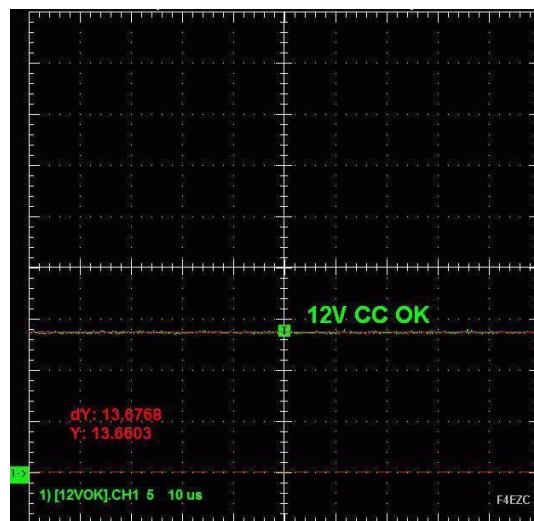
Figure 42 : filtre EMI

La Figure 43 ci-dessous montre un exemple d'onduleur 12/230V défectueux, nécessitant son remplacement. Il présente des parasites anormaux, principalement conduits, mais provoquant aussi des rayonnements harmoniques (brouillages radio).

Onduleur en défaut, pics parasites et destructeurs de +28V sur l'alimentation 12V (+ ondulations 20,3 mV AC).



Onduleur neuf OK, alimentation stable.



<https://qrvradio.fr/Brouillages.htm#Onduleur>

Figure 43 : exemple de variations de tension d'un onduleur défectueux

5.3.4 Matériels informatiques et câbles Ethernet

Le matériel informatique ou à base de processeurs (cadencé par une horloge) peut rayonner sur des fréquences élevées au moins jusqu'en UHF.

Il peut produire des porteuses pures ou des battements d'horloge harmoniques audibles sous forme de signaux bruités plus ou moins aigus.

L'utilisation de câbles blindés et équipés de ferrites permet de réduire ces perturbations. Ces câbles doivent être les plus courts possibles.

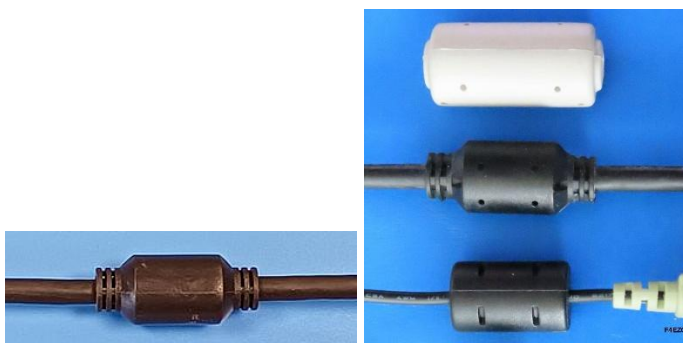


Figure 44 : exemples de ferrites



Figure 45 : exemple de câble transparent permettant de vérifier la présence de blindage

5.3.4.1 Exemples de cas recensés

- Câbles vidéo de qualité médiocre (VGA, HDMI...)
- Câbles informatiques (disques durs...) non blindés
- Rayonnement d'écrans d'ordinateurs
- Appareils utilisant des courants porteurs en ligne (CPL)
- Câbles Ethernet non blindés

Afin de limiter les rayonnements pouvant perturber les équipements radio, les câbles de liaisons Ethernet doivent être les plus courts possibles et blindés, ainsi que les prises RJ45 associées (voir Figure 46 ci-dessous).

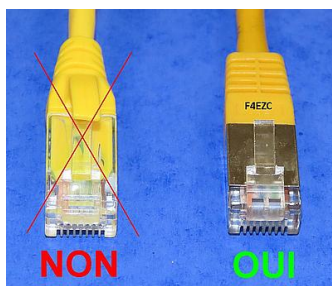


Figure 46 : terminaison de câble Ethernet non-blindé (à droite) et blindé (à gauche)

Exemples de blindages de câbles Ethernet :

- SSTP, S/FTP : câble blindé par tresse (S), paires blindées par feuillard (F).
- FFTP, F/FTP : câble blindé par feuillard (F), paires blindées par feuillard (F).

Une indication « U » signifie unshielded, soit non blindé (ex : UTP), donc à éviter. À noter également que la catégorie du câble doit aussi être adaptée au débit utile.



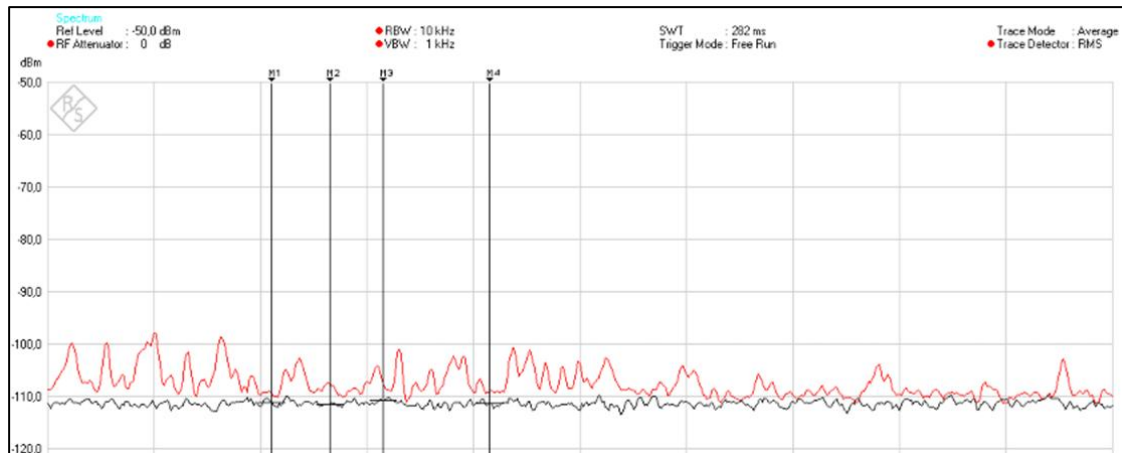


Figure 47 : exemple de brouillage par une station WiMax dont le câble Ethernet n'est pas blindé : courbes de mesures avant et après mise en conformité (respectivement rouge et noir)

Les prises CPL (Courant Porteur en Ligne), généralement grand public, utilisent des câbles électriques non blindés pour conduire le signal utile. Ces câbles rayonnent particulièrement en bande HF mais peuvent aussi provoquer des brouillages en bande VHF du fait de leur proximité (voir Figure 48 et 49 suivantes).

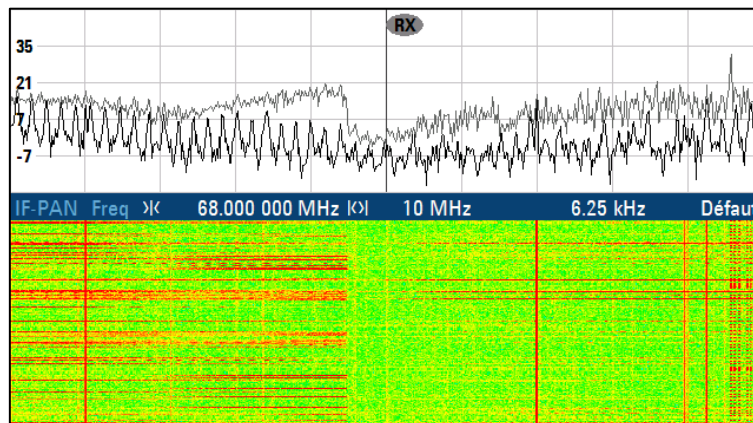


Figure 48 : exemple de brouillage par CPL



Figure 49 : brouillage UHF par une station d'accueil informatique avec câbles HDMI

5.3.5 Caméras de surveillances et détecteurs infrarouges

5.3.5.1 Exemples de cas recensés

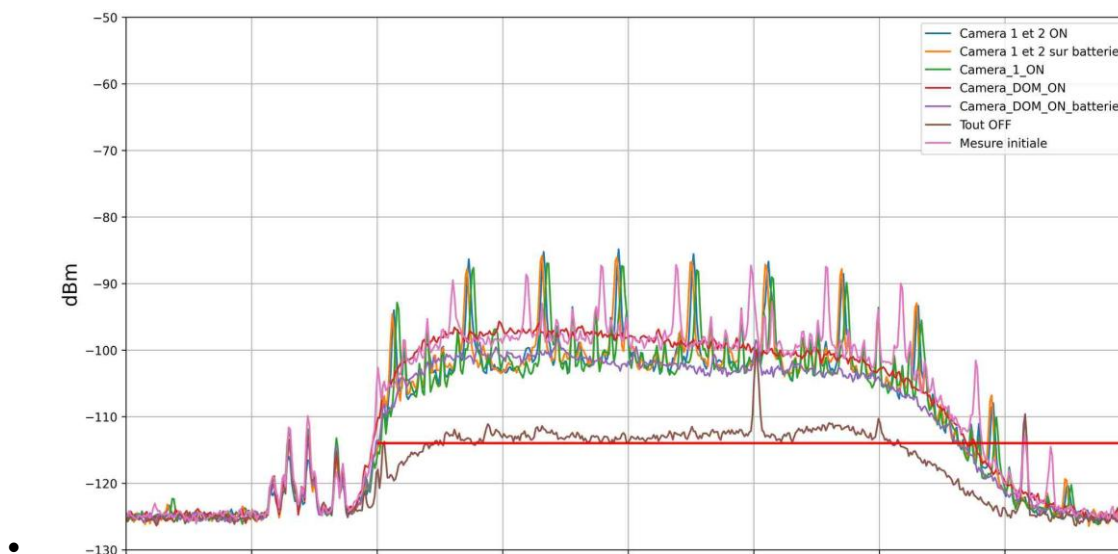


Figure 50 : brouillage radio en bande VHF par une caméra de surveillance « départ de feu » mise en place par le SDIS

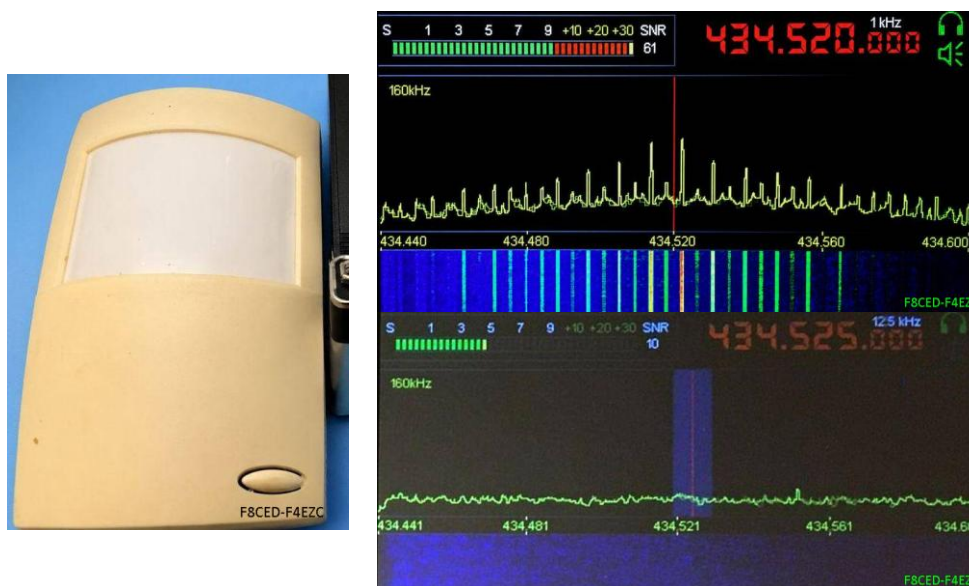


Figure 51 : spectres radio avant (en haut à droite) et après (en bas à droite) dépose d'un détecteur infrarouge

5.3.6 Éclairages

Des éclairages à économie d'énergie défectueux et les tubes fluorescents sont générateurs de parasites. Dans ce cas, seul le remplacement peut résoudre le problème. Les lampes LED peuvent aussi être une cause de brouillage.

5.3.6.1 Balisages pour l'aviation

Les lampes de balisages pour l'aviation, situées généralement en haut des supports, sont parfois source de parasites. La Figure 52 et la Figure 53 illustrent le cas de balises situées en haut du support, et provoquant des remontées spectrales.



Figure 52 : exemples de balisage aéronautique

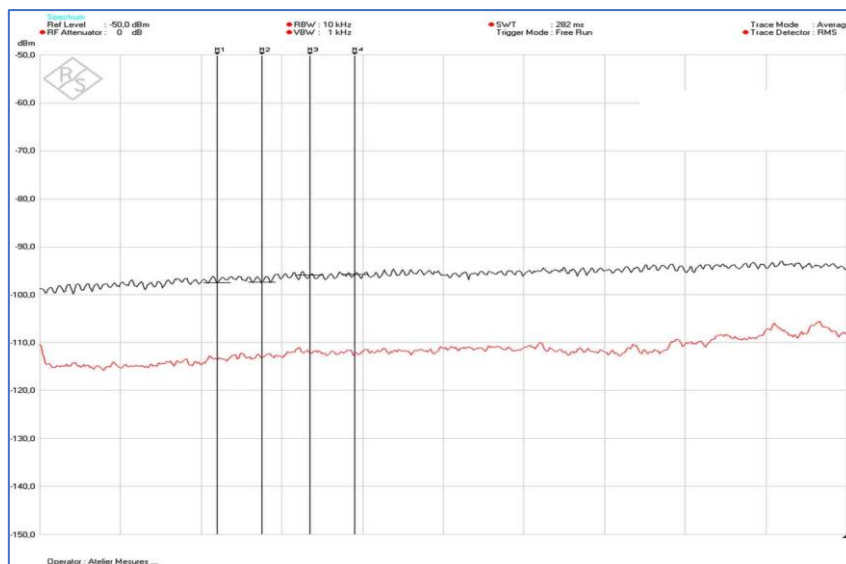


Figure 53 : niveau de bruit en bande VHF avec (courbe noire) et sans (courbe rouge) balisage

Ces lampes de balisages pour l'aviation, situées généralement en haut des supports, doivent être éloignées le plus possible des antennes.

Certains modèles rayonnent fortement et produisent une désensibilisation du récepteur pouvant dépasser les 30 dB.

Des actions possibles (voir Figure 54 ci-dessous) sont :

- Le blindage de la lampe (grillage).
- Si la lampe est située en tête de pylône, au-dessus des antennes : la pose d'une plaque de blindage.
- La pose de ferrites.
- L'utilisation de câbles blindés.

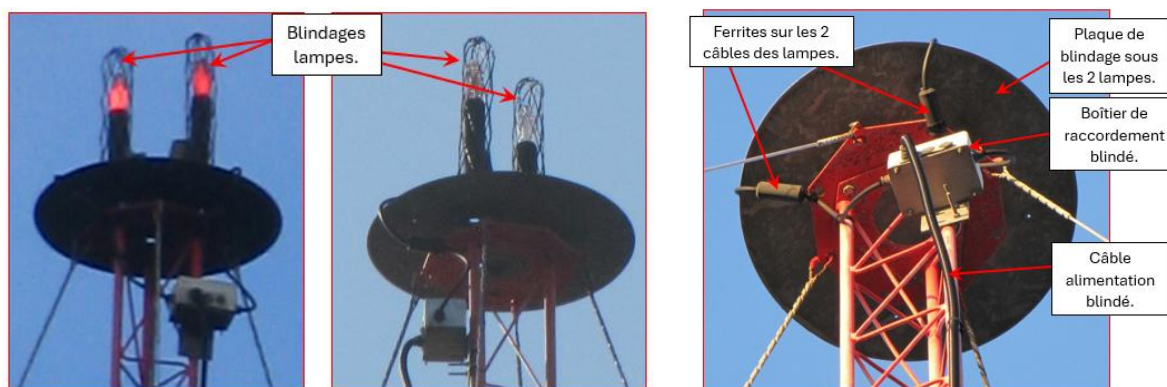


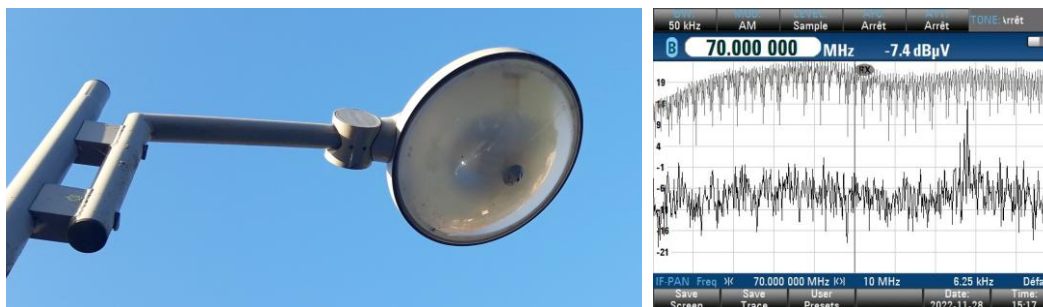
Figure 54 : exemple de réalisation Enedis permettant d'atténuer la désensibilisation du récepteur

Toutefois, la solution qui semble la plus adaptée et la plus simple à mettre en œuvre est le remplacement des lampes par un modèle basse tension (LED).



Figure 55 : lampe LED basse tension

5.3.6.2 Autres éclairages



Voir aussi <https://qrvradio.fr/Brouillages.htm#Lampadaire>

Figure 56 : brouillage VHF par un candélabre défectueux

5.3.7 Préamplificateurs de télévision

Des préamplificateurs de télévision (TV), notamment ceux en tête de mât exposés à l'ensoleillement et vieillissants, peuvent provoquer des brouillages UHF intermittents (voir Figure 57).

Les deux préconisations principales de remédiation sont :

- Le remplacement du préamplificateur ;
- la dépose intégrale si celui-ci n'est plus utile.

Cela peut en outre être l'occasion de remplacer le câble coaxial qui, dans certains cas, n'est plus étanche.

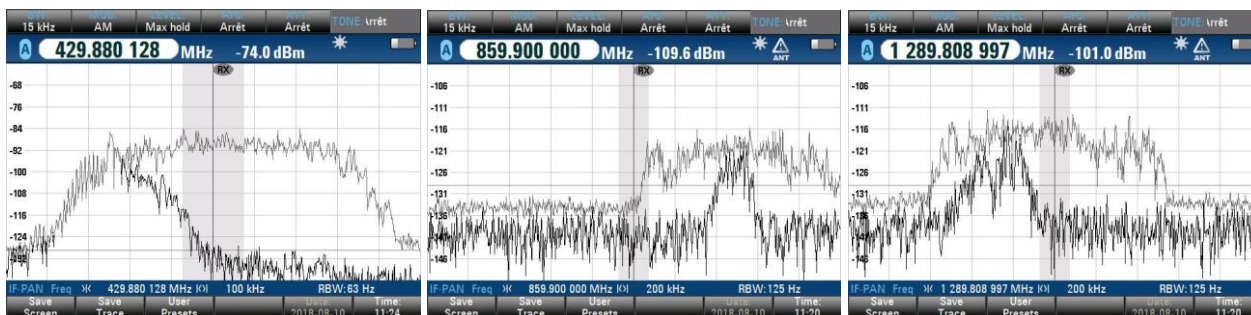


Figure 57 : exemple de dérive d'un unique amplificateur d'antenne TV défectueux avec harmoniques 2, 3...

5.3.8 Lignes électriques

Sur un site radio, la proximité de lignes électriques haute-tension en défaut peut aussi générer des parasites intenses en bandes HF et VHF, pouvant atteindre plus rarement l'UHF. Ces phénomènes apparaissent généralement par temps chaud, sec et ensoleillé.

Dans ce cas, il est nécessaire de contacter le gestionnaire de la ligne afin de planifier une réparation et éventuellement, selon la technologie, poser des antiparasites.

En complément, il est déconseillé d'installer des équipements radio sensibles (principalement en bandes HF et VHF) à proximité de postes électriques, de lignes électriques, ou de zones industrielles sources potentielles de perturbations problématiques.

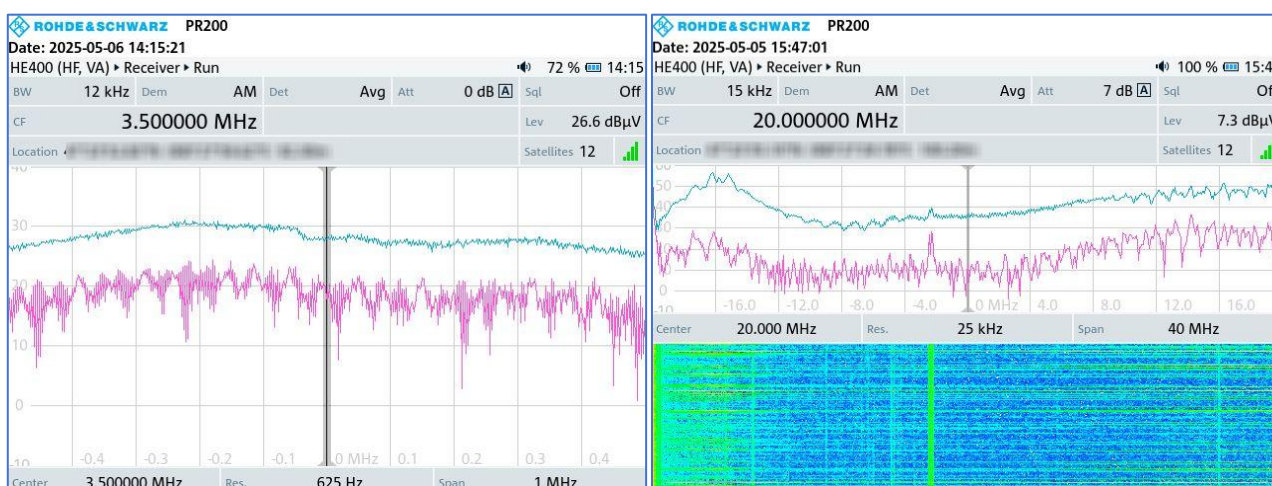


Figure 58 : mesures de pollutions en bande HF créées par des installations électriques

5.3.9 Exposition des équipements à des champs forts

Certains équipements électroniques installés sur un pylône (ex : modem, Remote Radio Unit – RRU) et placés dans un champ trop fort peuvent générer des émissions parasites.

Dans ce cas de figure, il convient d'étudier un déplacement des éléments ou un remplacement par un autre modèle plus robuste.

5.3.9.1 Exemple 1



Figure 59 : modem 868 MHz générant des brouillages radio VHF lorsque ce dernier est situé dans des champs trop forts

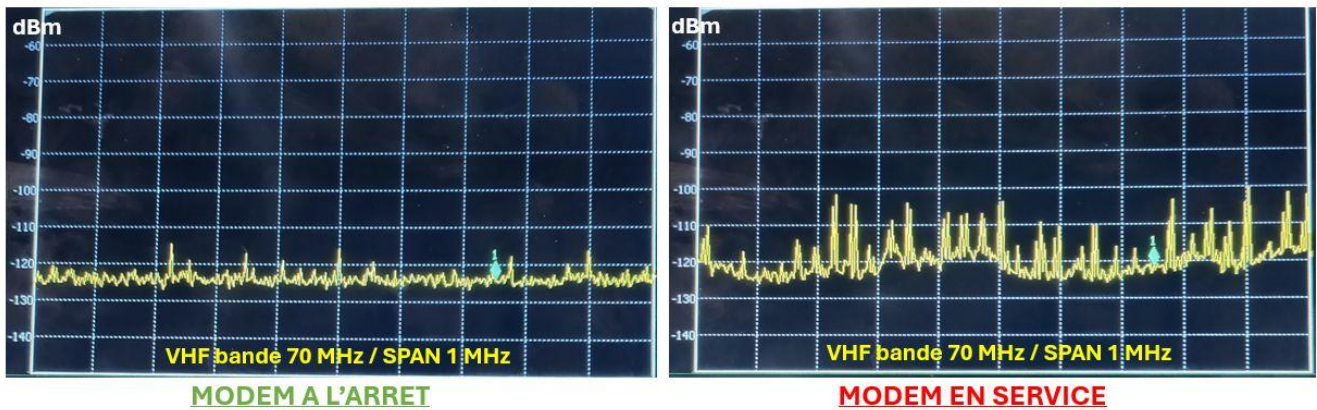


Figure 60 : illustration des remontées spectrales générées par un modem opérant à 868 MHz lorsque ce dernier est situé dans des champs trop forts

5.3.9.2 Exemple 2

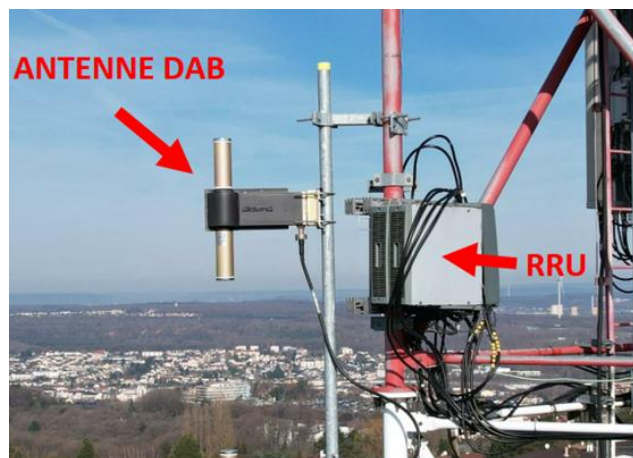


Figure 61 : RRU saturé par des émission DAB+

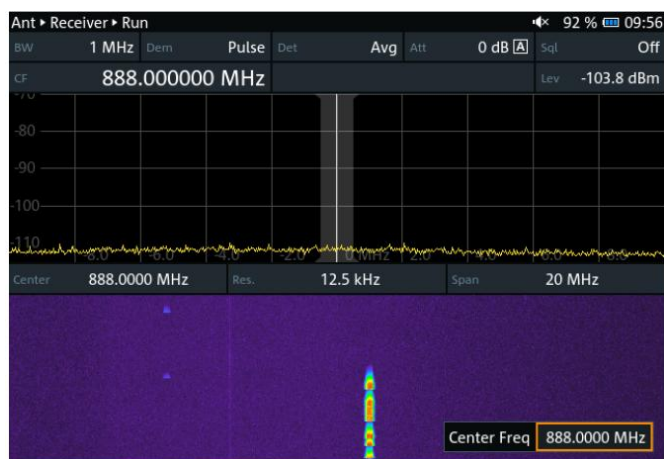


Figure 62 : DAB+ à l'arrêt

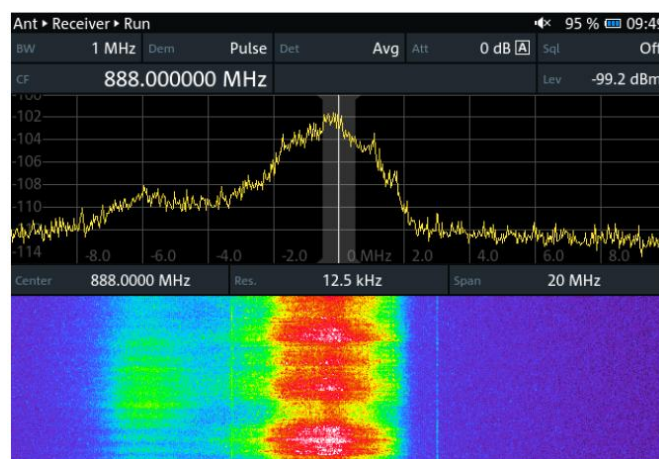


Figure 63 : DAB+ en service

5.4 Demande d'instruction de brouillage

Lorsqu'une perturbation est observée, l'exploitant doit, dans un premier temps, en analyser les causes potentielles au regard des phénomènes décrits dans la présente section. Cette analyse porte prioritairement sur les éléments relevant de son périmètre de responsabilité (le bon fonctionnement de ses équipements, la conformité de son installation, l'absence de défaut interne susceptible de générer la perturbation, tels que la désensibilisation, l'intermodulation, les défauts de câblage, etc.).

Ce n'est qu'après ces premières analyses qu'une demande d'instruction de brouillage peut être envisagée. Auquel cas, il convient de se référer au document de référence ANFR/DR-13 [11], qui définit les modalités détaillées de saisine et de traitement des brouillages.

Conformément à ce document, la saisine de l'ANFR est réservée aux situations de brouillage préjudiciable, et fondées sur l'hypothèse d'une origine externe à l'installation concernée. À ce titre, l'exploitant est invité à documenter les conditions d'apparition du brouillage (fréquence, temporalité, localisation), ses effets sur le service, les vérifications réalisées sur son installation, ainsi que toute information utile permettant d'orienter les investigations. Ces éléments contribuent à la recevabilité de la demande et à l'efficacité de son instruction.

Dans le cas particulier des sites mutualisés, certaines situations de brouillage peuvent présenter des difficultés d'identification précise de la source, notamment lorsque celle-ci résulte de phénomènes liés à l'environnement du site (structures métalliques, câblages, intermodulation passive, etc.). Dans ces configurations, et malgré les investigations menées, il peut ne pas être possible de rattacher le brouillage à un équipement ou à un utilisateur identifié. Conformément aux dispositions applicables, l'instruction peut alors être clôturée sans identification formelle de la source, notamment lorsque des facteurs liés à la structure du site (défaut d'entretien, mauvaise utilisation...) sont susceptibles d'être à l'origine de la perturbation.

Dans ce contexte, des actions correctives peuvent être engagées par les acteurs concernés, en particulier les gestionnaires d'infrastructures, afin de remédier aux dysfonctionnements constatés ou suspectés.

6. Aériens, filtres, couplages entre aériens, installations des aériens

Ce chapitre a pour objectif de rappeler de manière synthétique les principales technologies utilisées pour le couplage des aériens. Les cohabitants sont invités à se référer aux catalogues des fournisseurs afin d'étudier plus en détail les équipements adaptés à leurs propres installations. De manière générale, ils sont invités à privilégier l'utilisation de ces composants afin de protéger leurs infrastructures et d'optimiser la performance des systèmes d'aériens.

Le gestionnaire de site, soucieux d'assurer une optimisation globale, pourra demander aux cohabitants d'adopter les solutions techniques les plus pertinentes pour garantir la meilleure configuration possible.

6.1 Définition des éléments du « circuit d'antenne »

Ce chapitre présente les définitions essentielles des principaux éléments constituant le circuit d'antenne dans une installation radioélectrique. On distingue les installations de radiodiffusion de celles destinées au service mobile, car elles reposent sur des technologies différentes. Les systèmes de radiodiffusion se caractérisent notamment par leurs fortes puissances.

6.1.1 Service mobile

6.1.1.1 Antennes pour les stations fixes du service mobile

Les catalogues des constructeurs fournissent les descriptions détaillées de différents types d'antennes parmi lesquelles les installateurs peuvent choisir le modèle le plus approprié au site radioélectrique.

Les principaux facteurs caractérisant le rayonnement des aériens sont le gain théorique, les angles d'ouvertures théoriques horizontal et vertical, les angles d'azimut et de site, le tilt, le couplage avec les éléments métalliques environnants (autres antennes, supports, pylône). Ainsi, le rayonnement des antennes est influencé par leurs environnements.

6.1.1.2 Filtres combineurs à cavités, cavités résonnantes, isolateurs, circulateurs, filtres harmoniques

L'utilisation d'un filtre permet d'éviter certains types de brouillages.

6.1.1.2.1 Filtre combineur à cavité

Dans certaines installations d'émission, les fréquences très proches et la puissance d'émission élevée nécessitent une isolation importante pour éviter la création d'intermodulation dans les étages de puissance des émetteurs.

6.1.1.2.2 Cavités résonnantes

La cavité est un circuit résonnant permettant un grand nombre de modes de vibration au-dessus d'une fréquence minimale. Lorsque la fréquence ne correspond pas à la valeur de résonance, l'onde est absorbée. Pour les fréquences propres à la cavité, celle-ci accumule l'énergie. Une cavité permet des réjections de 80 à 100 dB en dehors de la bande de fréquence d'accord avec une perte d'insertion oscillant généralement entre 0,5 et 2 dB.

Les cavités peuvent être utilisées en émission et en réception. Une installation utilisant la même antenne en émission et en réception nécessite un filtre duplexeur (ou un relais RF) pour :

- du côté du récepteur, rejeter la fréquence d'émission ;
- du côté de l'émetteur, rejeter les fréquences de réception.

6.1.1.2.3 Isolateur, circulateur, filtre harmonique

Un hybride permet de combiner deux sources de signaux pour en sortir deux autres en évitant toute non-linéarité provoquant des produits d'intermodulation. L'isolateur et le circulateur sont des composants présentant une faible atténuation d'insertion dans un sens et une forte atténuation de réjection dans l'autre.

Il est ainsi possible de coupler des émetteurs sur une même antenne avec une perte d'émission de 3 dB (coupleur 3 dB).

Il est aussi possible d'augmenter le découplage entre antennes en montant plusieurs isolateurs en cascade, auquel cas il faut alors tenir compte des pertes supplémentaires.

Parfois, à la suite de non-linéarités dans le matériau ferrite, des harmoniques peuvent être créées ; il est alors nécessaire d'ajouter un filtre d'harmonique.

6.1.1.3 Techniques de couplage des émetteurs et des récepteurs

En utilisant les équipements cités et en les combinant, on obtient les éléments permettant un couplage des émetteurs et des récepteurs à une même antenne. Il s'agit des équipements obtenus par combinaison de :

- hybride – isolateur ;
- cavités – isolateurs ;
- cavités.

L'utilisation de l'une ou l'autre des techniques présente des avantages qui sont contrebalancés par un certain nombre d'inconvénients qui sont résumés dans le Tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : comparaison des différentes techniques de couplage des émetteurs et des récepteurs

Terme	Avantages	Inconvénients
Hybride – isolateur	- faible écart entre fréquences d'émission - bon isolement - extensible - faible encombrement	Pertes importantes
Cavités – isolateurs	- faible pertes pour des écarts moyens entre émetteurs - bon isolement - extensible	Ecart minimum entre fréquences d'émission
Cavités	- isolement bon - faibles pertes - extensible	Ecart minimum entre fréquences d'émission

En résumé, une installation avec des circulateurs hybrides permet de très petits écarts en fréquences entre les émetteurs, mais la plage entre l'écart minimal et maximal est limitée ; alors qu'une installation à l'aide de cavités exige une séparation en fréquence plus importante mais en contrepartie la plage d'écart n'est pas limitée pour des écarts importants.

Les notices des constructeurs fournissent les descriptions détaillées et les valeurs à utiliser.

6.1.1.4 Intérêt du couplage d'émetteurs

Le couplage d'émetteurs est particulièrement intéressant sur les sites concentrant des utilisateurs de même catégorie, notamment s'ils utilisent les mêmes gammes de fréquences, avec les avantages suivants :

- éviter un grand nombre d'antennes sur un site, améliorant ainsi le choix de son emplacement et son rayonnement global ;
- maîtriser les découplages entre émetteurs ;
- utiliser un seul câble coaxial, qui peut être à faibles pertes.

6.1.1.5 Couplage de récepteurs

On peut coupler les récepteurs dans un même site en utilisant un diviseur de puissance dont le nombre de sorties est égal au nombre de récepteurs. Il sera en général nécessaire d'utiliser un amplificateur. Ces amplificateurs sont large bande, et les signaux à amplifier devront être sélectionnés au préalable par un filtre présélecteur. Ces amplificateurs ont aussi leur limite de linéarité et sont susceptibles de créer de l'intermodulation.

6.1.1.6 Multi-coupleurs et aériens communs

L'installation d'antennes à bande passante suffisamment large, sur des sites partagés par de nombreux utilisateurs, engage la responsabilité des gestionnaires de ces sites, tenus d'accepter toutes sortes d'équipements respectant les normes en vigueur et d'en assurer la cohabitation.

Deux cas peuvent se présenter suivant la nature de l'équipement à installer ou les conventions établies :

- soit l'équipement, par exemples du type multicanaux, possède son propre système de couplage d'antenne ;
- soit l'équipement est à connecter à une prise aux caractéristiques connues et couplée localement à une antenne partagée avec d'autres utilisateurs.

6.1.1.6.1 Aérien commun sans multi-coupleur

Les équipements possédant leurs multi-coupleurs intégrés peuvent être connectés à une antenne commune sans dégradation des performances garanties par les constructeurs. Cependant, ces performances peuvent s'avérer insuffisantes pour assurer une bonne cohabitation des équipements.

6.1.1.7 Aérien commun avec multi-coupleur

L'exploitant du site offre dans ce cas un ou plusieurs accès à des utilisateurs variés. Les performances radioélectriques de ces accès sont à définir avec précision, pour maîtriser les paramètres d'émission et de réception. Elles concernent particulièrement :

- les bilans de transmission (gains des antennes, pertes des câbles de liaison, pertes des coupleurs d'émission, gain sur la voie de réception, facteur de bruit et performances d'intermodulation, etc.) ;
- l'impédance nominale de l'accès et la largeur de bande acceptable (rapport d'onde stationnaires – ROS – inférieur à 1,5 par exemple).

Certains réseaux peuvent nécessiter des soins particuliers sur certains paramètres comme par exemple la sensibilité de réception. Un compromis devra alors être défini pour tenir compte des limites réalistes particulières à un site.

6.1.2 Service de radiodiffusion

6.1.2.1 Principaux types de multiplexeurs utilisés en radiodiffusion

Destinés à coupler plusieurs émetteurs sur la même antenne, cette technique présente l'avantage de limiter le nombre d'aériens sur le même pylône, d'alléger les structures et surtout de maîtriser les découplages verticaux entre les antennes et de limiter ainsi les brouillages.

Les principaux types de multiplexeurs utilisés sont les suivants :

- Les multiplexeurs en pont mettant en œuvre des filtres à cavités : la cellule élémentaire, constituée de 2 coupleurs et de 2 cavités, permet de coupler 2 fréquences différentes avec des écarts de fréquence correspondant aux performances des filtres à cavités, typiquement 0,8 et 1,2 MHz en diffusion FM. Le nombre de fréquences couplées est limité par la puissance maximale admissible de la dernière cellule. Cette technique est largement utilisée pour les diffusions en modulation de fréquence de fortes puissances et en télévision, notamment pour assurer la diffusion des canaux TNT et RNT (DAB+).
- Les multiplexeurs à point commun ou en étoile : constitués de filtres à cavités, dont les sorties sont reliées à un point commun correspondant à la sortie vers l'antenne d'émission ; l'adaptation est réalisée par des lignes coaxiales de longueur $\lambda/4$. Cette technique permet de multiplexer au maximum 5 émetteurs de faibles puissances mais reste moins agile que celle du multiplexage en pont. L'association de multiplexeurs à point commun et en pont permet de lever cette limitation.

À noter que les multiplexeurs à lignes de déphasage sont également utilisés en TNT.

Comme pour le service mobile, il est possible en radiodiffusion de connecter un grand nombre d'émetteurs de diffusion sur une même antenne. Cette solution est à privilégier, car en minimisant le nombre d'antennes d'émission, elle permet de faciliter la mise en œuvre d'un découplage vertical avec les antennes des autres services de radiocommunications lorsque les bandes de fréquences sont adjacentes : par exemple entre des antennes de diffusion FM et du service mobile, ou des antennes de diffusion TNT et du service mobile.

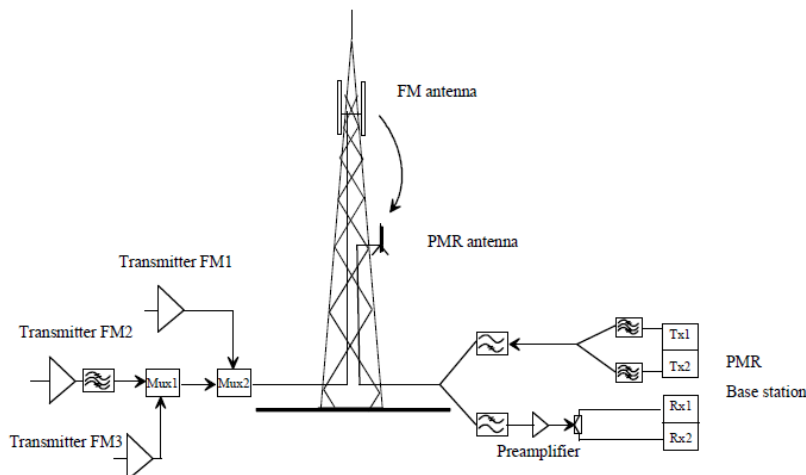


Figure 64 : exemple de schéma de découplage vertical des antennes entre celles d'une installation de radiodiffusion FM et une installation PMR

6.1.2.2 Précautions à mettre en œuvre pour un émetteur de radiodiffusion FM de secours « N+1 »

Les conclusions des enquêtes techniques associées à des demandes d'instruction de plaintes en brouillage de fréquences exploitées par la direction générale de l'Aviation civile (DGAC), montrent qu'une partie des cas identifiés sont imputables aux opérateurs radio FM quant aux technologies mises en œuvre pour le système d'émission de secours (aussi appelé N+1).

Afin d'assurer la continuité de service d'une diffusion radiophonique, un opérateur de radiodiffusion FM dispose de plusieurs solutions techniques, détaillées ci-après.

La première solution consiste à mettre en œuvre un système composé d'un relais coaxial permettant de secourir un émetteur et/ou une antenne en défaut par un émetteur et/ou une antenne de secours. A noter que le filtre à cavité est positionné après le relais coaxial. Cette solution présente l'avantage d'être efficace techniquement puisqu'elle permet de générer un spectre FM « propre » et non brouilleur.

La deuxième solution consiste à mettre en œuvre un système d'antennes d'émission de secours indépendant et isolé du système d'antennes principal, relié à un émetteur de secours non filtré. Ce type de montage est beaucoup moins onéreux que la première solution mais présente un risque de brouillage du fait de l'apparition d'éventuels phénomènes d'intermodulations provoqués par l'absence de filtrage sur l'émetteur de secours. En effet, l'isolation radioélectrique de l'antenne de secours vis-à-vis de l'autre système d'antenne doit être réalisée avec soin afin de limiter au maximum les risques de brouillages. Cette solution sans filtrage sur l'émetteur de secours n'est pas préconisée dans le cadre de l'ingénierie d'un site radioélectrique de qualité.

La troisième solution consiste à relier un émetteur de secours, non filtré, directement sur l'entrée large bande d'un multiplexeur radiofréquence en pont. Ce moyen de secours, plus économique, est déconseillé. Il présente en effet un fort risque de brouillage en raison de potentiels phénomènes d'intermodulations provoqués par le mélange de fréquences.

La première solution technique est celle qui doit être retenue préférentiellement par les opérateurs de radiodiffusion, car elle offre les meilleures garanties d'absence de brouillages par intermodulation.

6.1.2.3 Seuils des rayonnements non essentiels (RNE)

Les rayonnements non essentiels et les émissions non désirées des émetteurs, sont encadrés par les normes ETSI qui s'appliquent dans l'Union conformément aux dispositions de la directive sur les équipements radioélectriques (RED) [1].

La Commission a publié la référence à chaque norme donnant les caractéristiques des masques spectraux des émissions, par exemple, ETSI EN 302 018 pour la diffusion en FM.

Voir la section A2.1 en annexe pour une introduction aux textes applicables en radiodiffusion FM, DAB+ et TNT.

6.2 Pylônes et installation des aériens

6.2.1 Pylône

Entre toutes les pièces assemblées d'une structure, la continuité électrique doit être assurée sans risque de création de couplage galvanique pour les pièces peintes. Par exemple, des épargnes (zones sans peinture) doivent éviter les serrages sur des corps étrangers isolants. Un maximum d'éléments soudés est préférable, notamment en ce qui concerne les membrures verticales qui doivent être munies de brides soudées. Le contact entre ces dernières est amélioré par interposition de graisse de contact et pour les sites comportant un grand nombre de fréquences, il faut effectuer un shuntage de ces brides par des conducteurs réalisés dans des matériaux inoxydables, soudés sur celles-ci et vissés entre eux. Dans les cas de pylônes haubanés, il est préférable d'utiliser des haubans isolants (ex : fibre de verre, kevlar) en neutralisant les surfaces de frottement et en raccordant les chapes à la masse générale. L'armature en acier des massifs d'ancrage devra être assemblée par soudure et non par frettage et raccordée à la terre de la station par les conducteurs les plus courts.

6.2.2 Installation des aériens

6.2.2.1 Antennes

6.2.2.1.1 Position des antennes

La position de l'antenne sur l'infrastructure est importante pour atteindre la couverture radioélectrique souhaitée.

Lorsque les zones de couverture radioélectrique de plusieurs réseaux sont identiques, les cohabitants sont invités à rechercher systématiquement à partager l'aérien, en s'y connectant au moyen d'équipements de couplage. Une telle installation permet d'augmenter la place disponible pour des installations futures.

Les antennes actives, par exemple les antennes GNSS, sont des antennes électroniques amplifiées et peuvent être sensibles aux champs forts. Afin d'éviter d'éventuels phénomènes dégradant leur réception, il convient d'éviter de les placer dans des champs forts ou à proximité d'antennes d'émission, y compris les petites antennes des routeurs de téléphonie mobile (l'écartement minimum étant de 1 mètre). En outre, pour ces antennes actives utilisées pour de la réception satellite, elles seront de préférence positionnées en extérieur du bâtiment dans un environnement dégagé afin, par exemple, d'assurer la réception d'un maximum de satellites.

6.2.2.1.2 Couverture omnidirectionnelle

En sommet de pylône on obtient facilement une couverture omnidirectionnelle. On pourra y installer une antenne omnidirectionnelle, choisie en prenant en compte le gain dans le plan vertical.

Une couverture omnidirectionnelle peut également être obtenue par une combinaison d'antennes placées le long du fût du pylône ou sur les faces d'un bâtiment. Le diagramme total est obtenu en première approximation par la somme des diagrammes de chaque antenne. La puissance fournie par l'émetteur est divisée sur chaque antenne à l'aide d'un répartiteur de puissance, le gain des antennes compensant alors les pertes de puissance dues à la répartition sur les antennes.

6.2.2.1.3 Couverture sectorisée

L'utilisation d'antennes directives sur une face de bâtiment ou de pylône est à privilégier lorsque la zone à couvrir est limitée à un secteur géographique dans une direction donnée.

Lorsque les installations comprennent des antennes sectorisées et lorsque la planification du réseau le permet, il est conseillé aux exploitants de rechercher le partage des aériens.

Les utilisateurs d'un site radio sont incités à rechercher constamment l'optimisation du site en retenant les emplacements les plus adéquats sur le support commun, tandis que le gestionnaire est incité à veiller à optimiser les caractéristiques de son site en faisant l'offre la plus appropriée aux cohabitants.

6.2.2.1.4 Choix des antennes

Les antennes doivent présenter un découplage suffisant afin de limiter la réception de signaux indésirables susceptibles de générer des produits d'intermodulation dans les équipements raccordés. Leur construction doit utiliser des matériaux dont les traitements de surface permettent d'éviter les phénomènes de corrosion et les pertes de contact. Lorsque cela est possible, les antennes doivent être constituées d'éléments monoblocs. En effet, les assemblages par simple serrage exigent une parfaite compatibilité électrochimique et une excellente tenue dans le temps pour garantir la stabilité électrique.

À noter que les constructeurs fournissent les caractéristiques nécessaires au bon dimensionnement du support et à l'intégration de l'antenne, notamment :

- les dimensions physiques,
- le poids,
- la surface de prise au vent,
- la vitesse maximale du vent,
- le dépointage et torsion éventuels,
- la bande passante,
- le gain (attention à la distinction entre dBd et dBi),
- le diagramme de rayonnement,
- le type de connectique.

L'antenne doit être choisie pour obtenir le rayonnement adapté à la zone de service et minimiser la zone de brouillage.

6.2.2.1.5 Proximité de l'antenne à la structure support

Plus l'antenne est proche de la structure, plus elle induira du courant et de l'énergie dans celle-ci. La structure aura dans ce cas un rôle à jouer dans le rayonnement (réflecteur ou directeur suivant l'azimut).

Il y a lieu de procéder à une pré-étude d'influence dès qu'une antenne ayant peu de directivité est installée à proximité de la structure métallique qui la supporte.

Une pré-étude est alors généralement réalisée par le fournisseur de l'antenne à qui il suffit généralement de fournir les croquis détaillés de l'installation prévue. Lorsqu'il s'agit d'une antenne directive le rayonnement arrière est négligeable.

En règle générale, et lorsque plusieurs équipements radioélectriques sont connectés à une antenne commune, il ne faut jamais utiliser la structure dans le rayonnement de l'antenne, c'est à dire qu'il faut lui trouver un emplacement évitant cette interaction ou l'écarter suffisamment. Tout élément réflecteur ou directeur doit faire partie intégrante de l'antenne (soudure des éléments, pas de boulons ou autres éléments pouvant s'oxyder).

On doit prendre en considération les caractéristiques de rayonnement indiquées par le constructeur dès qu'un risque d'interaction se présente (exemple : distance antenne structure trop faible).

6.2.2.1.6 Cas particulier de l'antenne dipôle, dipôle trombone...

Bien que ce type d'antenne soit théoriquement omnidirectionnelle, en pratique, dans une majorité de cas, du fait de sa polarisation verticale et de son écartement par rapport à la structure portante, son rayonnement devient directif à +2 dBd, donc avec un azimut d'émission.

6.2.2.1.7 Découplage entre antennes

Le découplage entre deux antennes est le rapport entre la puissance fournie à l'entrée de la première antenne servant à l'émission et la puissance en sortie de l'autre antenne servant à la réception.

Un découplage émission/réception suffisant peut éviter la réception gênante du bruit de l'émetteur aux fréquences de réception, et de signaux trop puissants pour le récepteur qui peuvent générer de l'intermodulation à la réception.

En fonction de leurs caractéristiques, les antennes peuvent être découplées dans le plan vertical ou dans le plan horizontal ou décalées obliquement.



Figure 65 : exemples de découplages insuffisants entre réseaux PMR VHF et radiodiffusion FM

6.2.2.1.8 Distance entre antennes

Il est nécessaire de veiller au bon découplage entre les antennes de réseaux différents mais proche au niveau fréquence.

Le calcul du découplage est fonction de la fréquence et de la distance entre antennes.

Le découplage L peut être calculé via l'application directe de la formule de pertes en espace libre :

$$L = 20 \cdot \log_{10}(F) + 20 \cdot \log_{10}(d) - 27,5 - (G_1 - P_1) - (G_2 - P_2) \quad (\text{dB}) \quad (9)$$

En pratique, ce modèle peut s'avérer simpliste car il ne prend pas en compte certains effets importants, tel que l'influence de la structure du pylône sur le rayonnement des antennes.

Le tableau suivant décrit les différents termes de la formule (9) ci-dessus.

Tableau 2

Terme	Signification	Unité	Rôle dans le calcul
F	Fréquence	MHz	Plus la fréquence augmente, plus le couplage augmente (moins d'atténuation).
d	Distance entre les antennes	m	L'augmentation de la distance augmente l'atténuation (donc le découplage).
-27,5	Constante liée aux unités (MHz / m)	dB	Provient de la formule d'atténuation en espace libre normalisée.
G_1	Gain de la première antenne dans la direction de la seconde	dBi	Plus ce gain est élevé, plus le couplage augmente.
P_1	Pertes du câble d'alimentation de la première antenne	dB	Elles réduisent la puissance réellement rayonnée.
G_2	Gain de la seconde antenne dans la direction de la première	dBi	Plus ce gain est élevé, plus la puissance reçue est grande.
P_2	Pertes du câble d'alimentation de la seconde antenne	dB	Elles réduisent la puissance réellement reçue.
F	Fréquence	MHz	Plus la fréquence augmente, plus le couplage augmente (moins d'atténuation).

D'une manière générale :

- les pertes dans les câbles peuvent se situer entre 2 et 4 dB en fonction de la fréquence
- les gains d'antennes varient entre 3 et 10 dBi suivant les fréquences si les antennes se regardent et sont parallèles et entre -10 et -20 dBi si les antennes sont perpendiculaires.

Plus la fréquence est basse, plus la distance minimale à respecter est élevée. En conséquence, une attention particulièrement doit être apportée aux fréquences inférieures à 200 MHz.

Le graphe ci-après (Figure 66) donne un ordre de grandeur des distances de séparation verticale et horizontale.

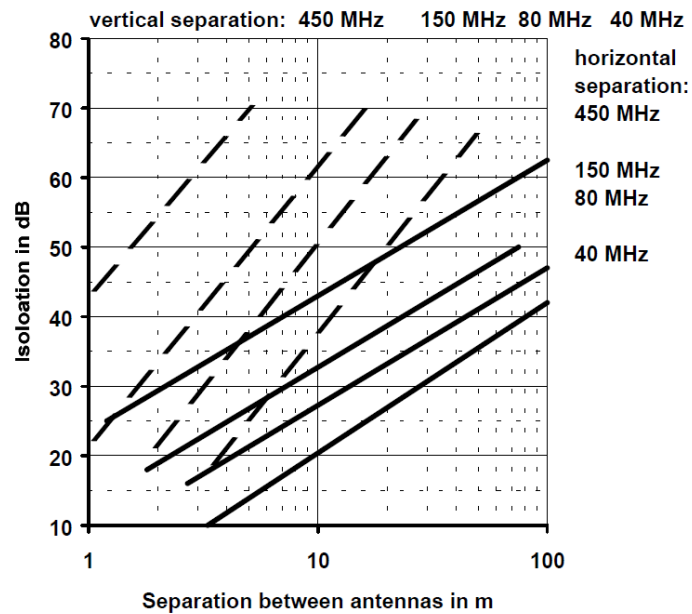


Figure 66 : ordre de grandeur de l'isolation entre antennes dans les plans vertical et horizontal en fonction de la distance de séparation

En pratique, en fonction des sources, les valeurs de découplage entre antennes varient de plusieurs dB. La Figure 67 ci-après donne des valeurs mesurées pour deux sources et en tenant compte du pylône.

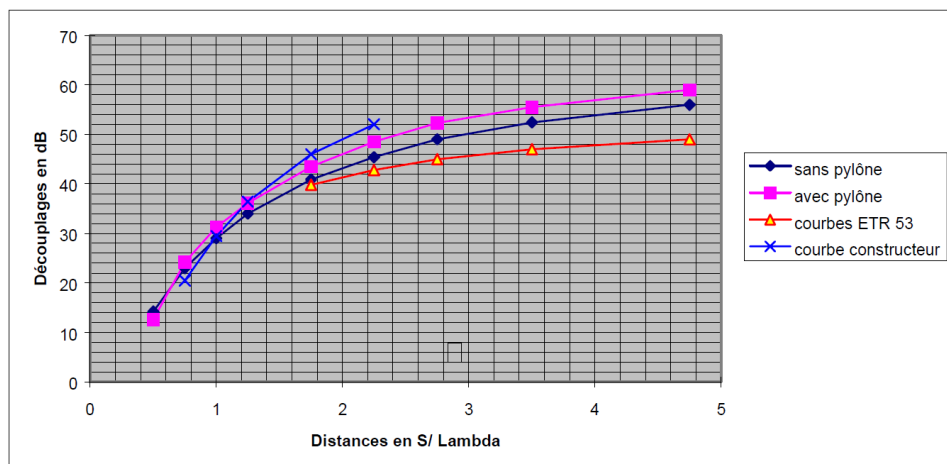


Figure 67 : comparaison des valeurs de découplage suivant différentes sources et avec ou sans prise en compte du pylône

Les diagrammes ci-après donnent des valeurs de découplage mesurées entre dipôles pour des valeurs de fréquences à 40, 80, 450, 900 et 1800 MHz.

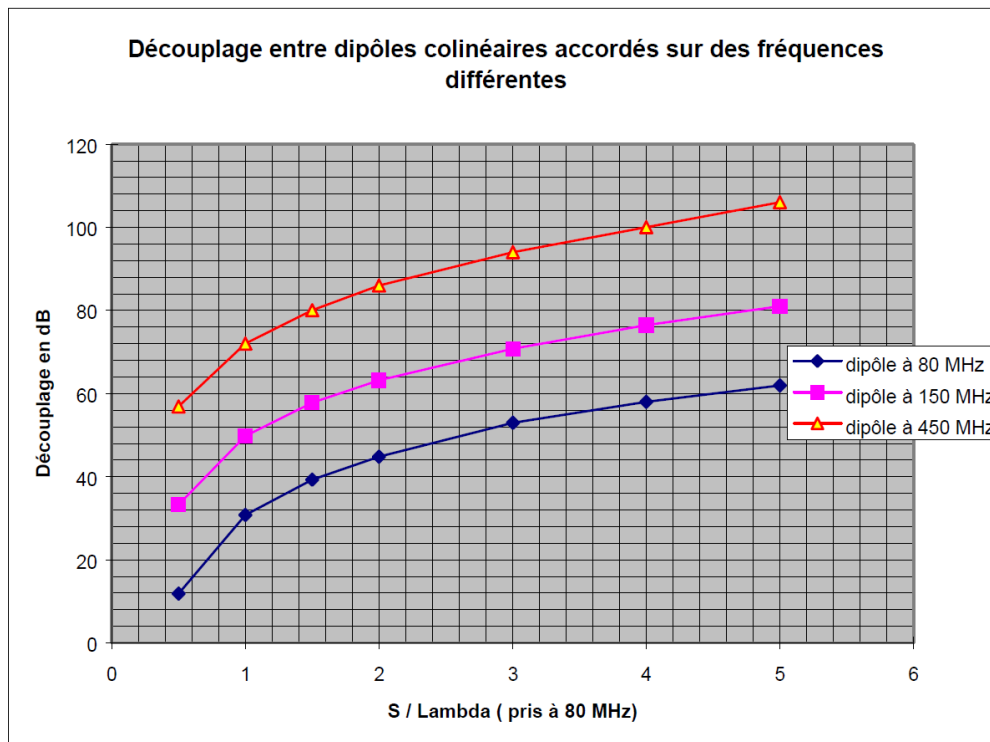


Figure 68 : comparaison des valeurs de découplage entre dipôles accordés sur des fréquences différentes

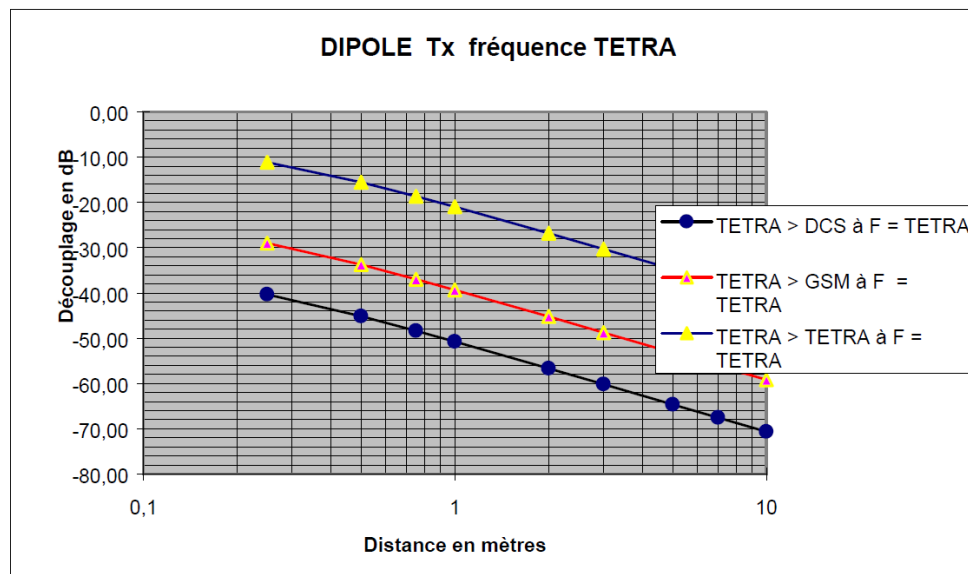


Figure 69 : comparaison des valeurs de découplage de dipôle TETRA (400MHz) vers des dipôles GSM (900 MHz) mesurées sur la fréquence du réseau TETRA

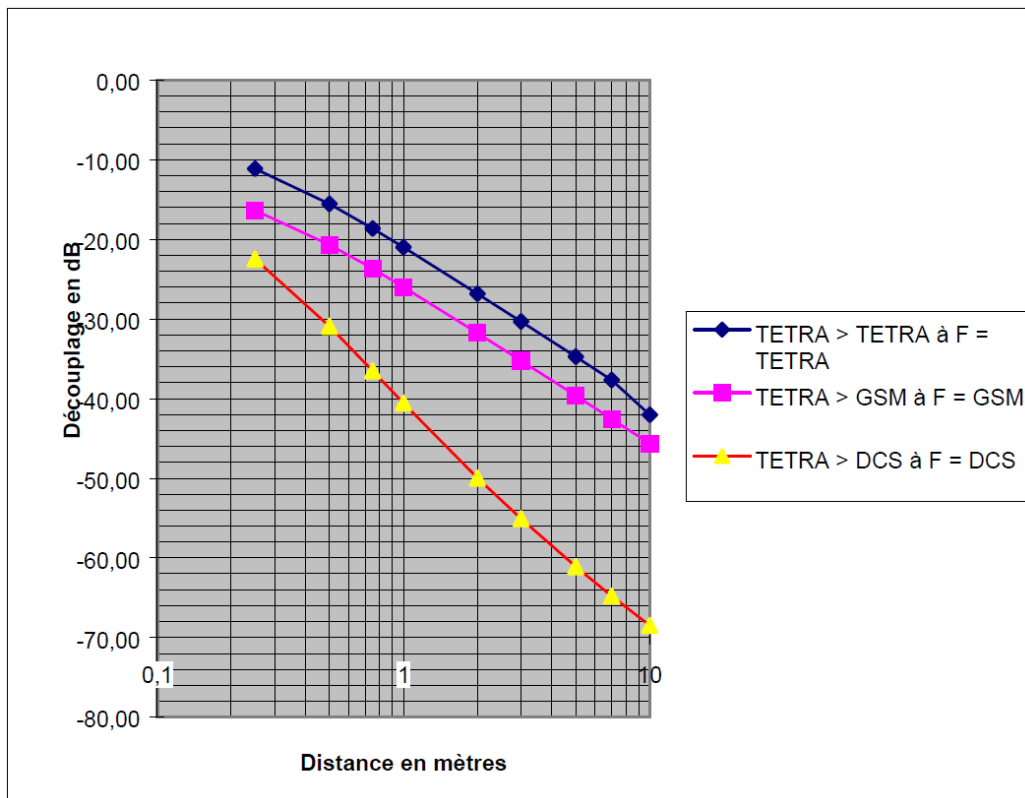


Figure 70 : comparaison des valeurs de découplage de dipôle TETRA (400 MHz) vers des dipôles GSM (900 MHz) mesurées sur différentes fréquences

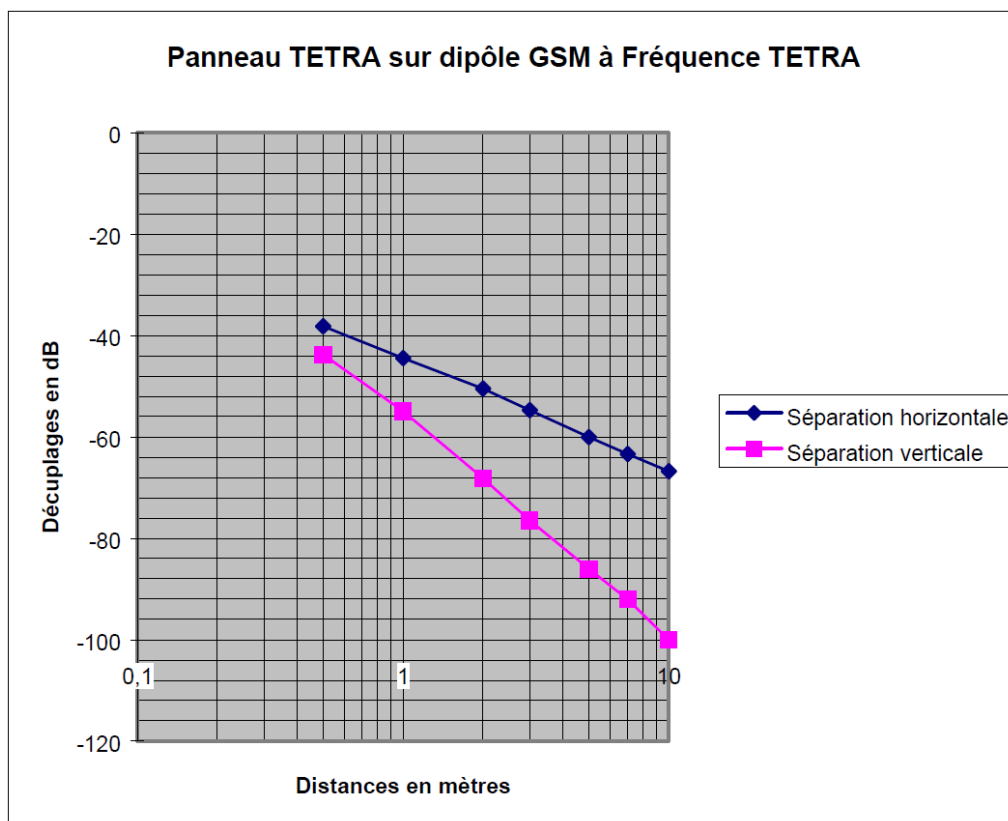


Figure 71 : comparaison des valeurs de découplage vertical et horizontal d'un panneau TETRA (400 MHz) vers des dipôles GSM (900 MHz) mesurées sur la fréquence du réseau TETRA

6.2.2.2 Unités radio à distance (RRU)

Il est conseillé de placer les RRU au plus près possible des antennes sans affecter leur rayonnement.

6.2.2.3 Câbles et connecteurs

Les câbles doivent être dimensionnés de façon appropriée en fonction des applications et puissances concernées.

Les câbles coaxiaux mal dimensionnés ou mal montés constituent une cause fréquente de produits d'intermodulation. Les connecteurs doivent être de qualité et présenter une marge suffisante en puissance afin d'éviter les échauffements, dilatations et pertes de contact. Le nombre de connecteurs successifs doit être limité au strict nécessaire pour réduire les points de faiblesse.

Les câbles doivent être correctement fixés, idéalement tous les mètres, pour éviter tout mouvement au vent.

6.2.2.3.1 Bretelles coaxiales entre équipements et feeders

Les liaisons entre le coffret radio et le feeder principal, appelées « bretelles » devront être réalisées en câble coaxial souple, robuste, de bonne qualité et d'une longueur suffisante pour sortir de la baie technique.

Les types de bretelles peuvent varier en fonction des applications et des donneurs d'ordre, entre câbles tressés ou semi-rigides.

Les liaisons doivent être équipées de connecteurs adaptés sans adaptateurs intermédiaires ni transitions inutiles.

Comme illustré par la Figure 74 ci-dessous, certains coudes coaxiaux à 90° de qualité médiocre ne garantissent pas la continuité interne du conducteur : la liaison peut être simplement assurée par un contact peu fiable (emboîtement, languette, ressort, etc.). Ces conceptions provoquent des effets capacitifs ou inductifs parasites, voire des mauvais contacts nuisibles au fonctionnement radio.

Les soudures doivent être réalisées avec minutie pour éviter tout problème de connexion.

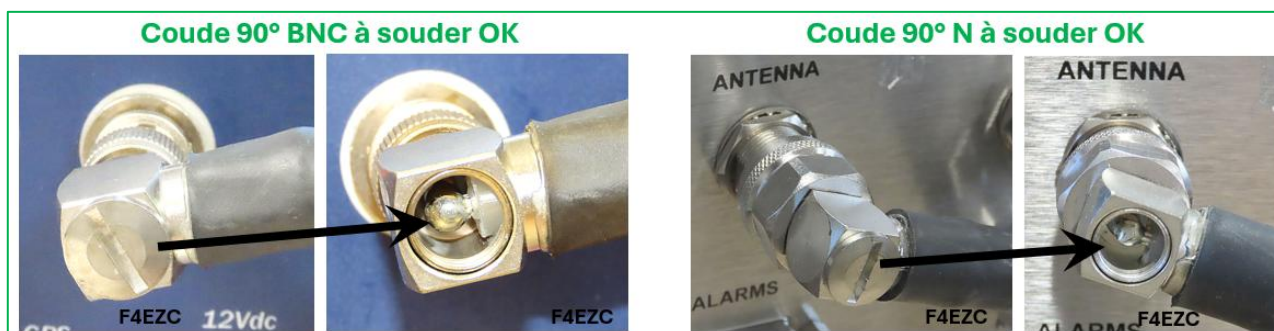


Figure 72 : exemples de coudes BNC et N à souder

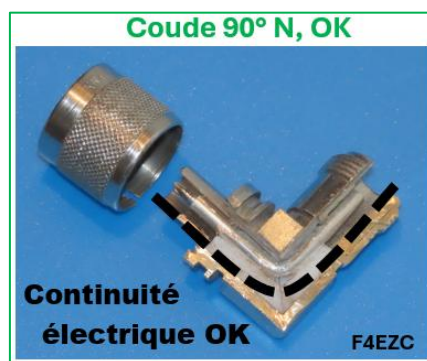


Figure 73 : exemple de coude N recommandé

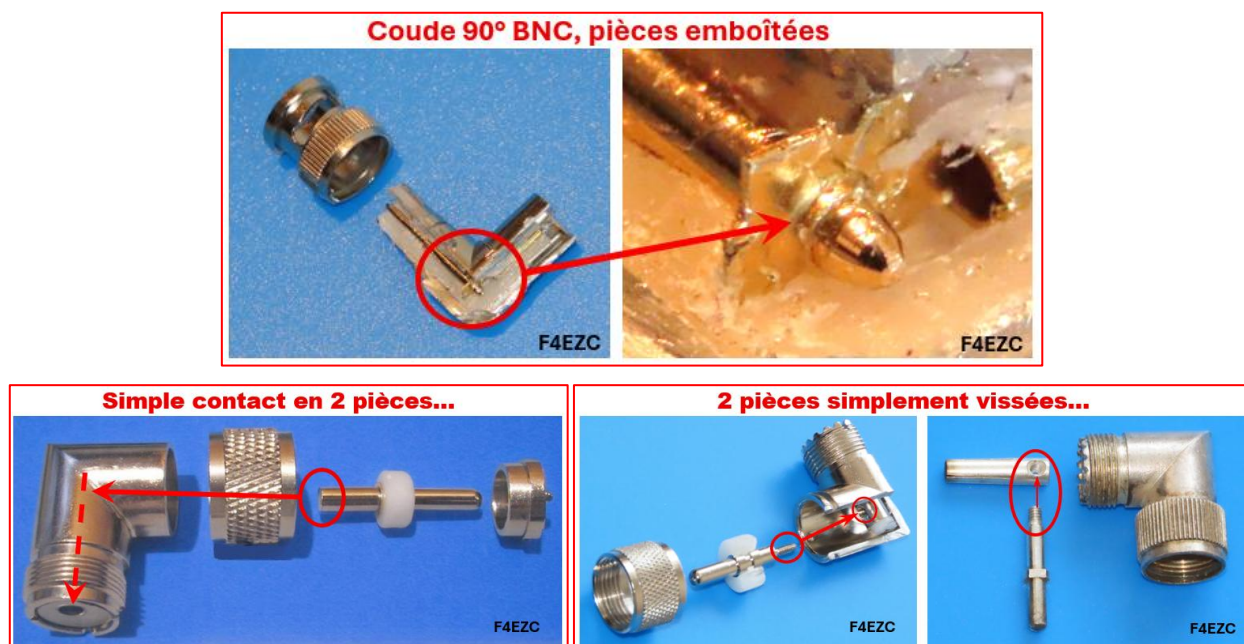


Figure 74: exemples de coudes sans contact franc à proscrire

6.2.2.3.2 Repérages, étiquetages

Tous les feeders/câbles coaxiaux doivent être correctement repérés en plusieurs endroits, au niveau des émetteurs, sortie de local, éléments intermédiaires selon possibilités et aux aériens (supports, antennes...). Le cahier des charges du donneur d'ordre doit décrire l'emplacement et le contenu des étiquettes.



Figure 75 : exemples d'étiquetages sérigraphiés

6.2.2.3.3 Mesures et vérifications des câbles coaxiaux

Les câbles coaxiaux doivent être vérifiés selon le cahier des charges du donneur d'ordre, qui peut comprendre une mesure de ROS avec un analyseur scalaire ou vectoriel, sur charge adaptée et sur connexion à l'antenne, afin de vérifier la qualité des connecteurs, et la bonne adaptation de la chaîne de transmission.

Ainsi, on pourra selon le cas procéder aux mesures suivantes :

- Mesures de puissance directe, réfléchie et ROS vues du sol (en sortie d'émetteur et au feeder principal).
- Mesures de puissance directe, réfléchie et ROS aux aériens (coupleur, antennes, éléments intermédiaires...).
- Mesure de défaut (Distance To Fault - DTF) sur le feeder principal avec l'antenne remplacée par une charge adaptée, généralement 50 Ohms, parfois 75 Ohms.
- Mesures d'affaiblissement des câbles.
- Mesures de découplage entre antennes.

Il conviendra de réaliser ces mesures avec discernement, certaines d'entre elles pouvant générer des interférences ou des interruptions de service. Les mesures doivent être réalisées sur de courtes durées dans les plages de fréquence de l'utilisateur pour éviter la production de brouillages momentanés dans les bandes adjacentes.

Les appareils de mesure doivent être adaptés à la puissance des signaux environnants : analyseur scalaire ou vectoriel dans les cas simples, mais wattmètre-réfectomètre en cas de présence d'émissions fortes pour éviter les risques d'erreur de mesure.

La nature des mesures attendues doit être précisée par le donneur d'ordre. Les résultats des mesures seront normalement consignés par le gestionnaire de l'installation dans un procès-verbal de recette.

6.2.2.3.4 Chemin de câble

Il est recommandé d'assurer la continuité électrique sur tout le parcours du chemin de câble par l'adjonction d'un câble de mise à la terre ($\geq 50\text{mm}^2$) raccordé à la terre de la station et maintenu régulièrement par des colliers inox au chemin de câbles.

Les chemins de câbles de type « dalle marine » capotée sont à privilégier.

6.2.2.3.5 Câbles Ethernet

Afin de limiter les rayonnements pouvant perturber les équipements radio, les câbles de liaisons Ethernet ainsi que les prises RJ45 associées doivent être les plus courts possibles et blindés.

Voir section 5.3.4.

6.2.2.3.6 Kits de mise à la terre

Concernant les kits de mise à la terre, les pratiques en vigueur peuvent varier entre utilisateurs. Il convient donc, en premier lieu, de respecter le cahier des charges du donneur d'ordre.

Les kits de terre peuvent être déconseillés par certains acteurs pour plusieurs raisons :

- Le câble coaxial est abimé (découpe de l'isolant) pouvant provoquer des fragilités et des problèmes d'étanchéité.
- Les mises à la terre de ces kits peuvent provoquer des problèmes d'oxydation (oxydoréduction) entre les différents matériaux (cuivre, acier galvanisé, acier inoxydable, aluminium...).
- De plus ces mises à la terre ne sont pas toujours réalisées correctement.

D'autres acteurs demandent systématiquement l'installation de kits de terre. Quand ils sont utilisés, les raccordements du blindage des coaxiaux à la masse doivent être réalisés avec un serrage fiable, des matériaux compatibles du point de vue électrochimique et une protection efficace contre les intempéries (par exemple avec du ruban auto-amalgamant « peau de chat » autour des connecteurs). La mise à la terre des coaxiaux peut se faire à l'aide de kits disposés au niveau des antennes, au bas du pylône et à l'entrée de la trémie. Ces kits sont ensuite raccordés à la terre du pylône.

6.2.2.4 Mise à la terre et protection contre la foudre

6.2.2.4.1 Réseau de terre

Une faible résistance de la prise de terre (10 ohms maximum) est fortement recommandée, ainsi que de s'assurer qu'elle soit non inductive. Les raccordements équipotentiels de tout le site (maillage des différentes terre et interconnexion des équipements dans les bâtiments) permettent de se prémunir contre diverses sources de perturbations.

Tous les éléments de terres devront être correctement repérés aux endroits accessibles.



Figure 76 : exemples d'étiquetages sérigraphiés de couleur verte pour les mises à la terre

6.2.2.4.2 Protection contre la foudre, paratonnerre

Une descente de terre en feuillard d'environ 30x2 mm est recommandée, relié au bâtiment et à une plaque de cuivre située sous les fondations ou le cas échéant à une patte d'oie. Selon le cas, plusieurs prises de terre de type A sont conseillées, complétées par un double ceinturage raccordé au réseau de terre de la station.

Dans certaines situations, par exemple si une antenne omnidirectionnelle est positionnée en tête de pylône, il n'est pas possible d'installer un paratonnerre. C'est alors l'antenne qui tient lieu de paratonnerre, et elle doit être raccordée à la terre en conséquence. Dans ces cas, les équipements radio peuvent être protégés par des stubs ou des parafoudres coaxiaux adaptés aux fréquences et puissances mises en œuvre, à condition de les monter dans les règles de l'art, selon les normes en vigueur, et de les contrôler régulièrement.

En bande étroite, les stubs de protection (court-circuit 1/4 d'onde) placés entre la bretelle du relais et le feeder principal peuvent avantageusement remplacer les parafoudres coaxiaux. Ils ont l'avantage de ne pas avoir de tension d'amorçage et de court-circuiter toutes les décharges électriques ou électrostatiques.

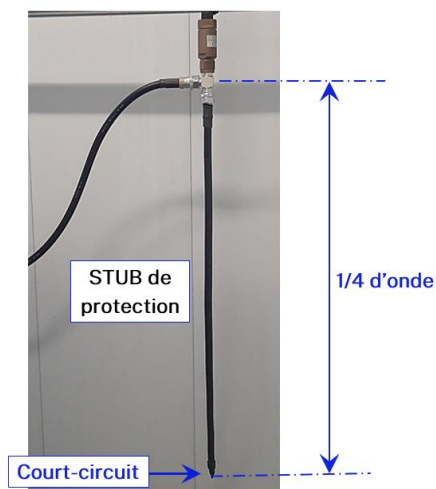


Figure 77 : stub de protection quart d'onde

En application des normes en vigueur, le tableau électrique du local radio devra typiquement être équipé de protections foudre (parafoudres secteur).

6.2.2.5 Contrôle des installations

Les installations d'antennes peuvent être contrôlées par l'ANFR, les affectataires de fréquences et les autorités indépendantes délivrant les autorisations comme l'Arcom. Voir le document de référence DR-07 Procédure de contrôle des stations et d'inspection des sites radioélectriques [10].

6.2.3 Maintenance

Afin de diminuer les risques de création d'éléments non-linéaires sources de produits d'intermodulation, il est indiqué d'apporter un soin particulier aux installations, y compris les installations métalliques avoisinantes, comme les clôtures et portes, lors de la maintenance régulière des sites. Les actions préventives consistent notamment :

- au changement des parties corrodées ;
- au resserrage de la boulonnerie ;
- à la vérification des chemins de câble ;
- à la vérification de la terre ;
- aux retouches de peinture ;
- au serrage des caillebotis ;
- aux Balisage lumineux ;
- à la dépollution des sites ;
- aux fixation des dalles marines ;
- aux retouches de galvanisation à froid ;
- à la vérification des fixations des antennes et des câbles ;
- à la suppression des câbles et des antennes non utilisés, ou à défaut à la fermeture de ces éléments par des charges adaptées (généralement 50 Ohms, parfois 75 Ohms) s'ils sont conservés en secours.

Il est conseillé de constater le bon état général des stations chaque fois que cela est possible, indépendamment des contrôles périodiques, par exemple, à la suite d'événements climatiques.

Une attention particulière concerne les balisages diurnes/nocturnes pour l'aviation, dont le fonctionnement des lampes est à contrôler régulièrement. À noter que ces balisages doivent être éloignés le plus possible des antennes. Il convient également de vérifier que la mise en service des lampes ne désensibilise pas le relais.



Figure 78 : exemple de site non dépollué

6.2.3.1 Vérification périodique des installations

La maintenance préventive, tant pour les émetteurs que pour les récepteurs, est cruciale pour pérenniser la qualité radioélectrique dans le temps et éviter les brouillages. Dans cet optique, il est indiqué de contrôler préventivement les installations de manière régulière, avec une périodicité adaptée aux systèmes déployés et aux usages.

Ces contrôles périodiques peuvent inclure :

- Sur une base régulière :
 - Contrôles basiques (état général, site, local, accès, électricité...) et petites réparations.
 - Contrôle visuel depuis le sol (jumelles) du pylône, des antennes et de leurs orientations.
 - Wattmètre radio si possible.
 - Recherche de points d'échauffements et de faux contact.
- Sur une base ponctuelle : contrôle approfondi.
 - Visites pour un contrôle visuel au plus près des aériens, dômes des châteaux d'eau, antennes accessibles, mesures des orientations précises (boussole/compas).
 - Nécessite des appareils adaptés aux installations
 - Mesures de terres
- Sur une base spécifique
 - Contrôles du pylône/sécurités/antennes/étanchéités connecteurs... en totalité.
 - Audit radio plus complet (nécessite des appareils adaptés aux installations).

6.2.3.2 Oxydation/rouille

Comme indiqué en section 5.2.4.3, des aériens et structures en mauvais état, particulièrement les oxydations et la rouille, peuvent aggraver considérablement les phénomènes d'intermodulations. Il en va de même de connectiques en mauvais état, mal serrées ou non adaptées aux puissances de la chaîne d'émission. Tout élément est susceptible de produire des raies d'intermodulation.

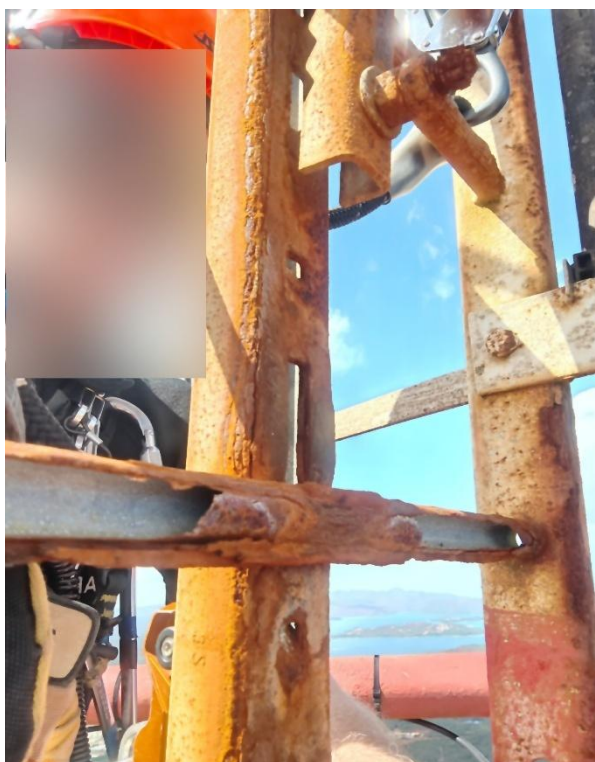


Figure 79 : exemple de structure corrodée pouvant contribuer à la production de produits d'intermodulation



Figure 80 : exemple d'antenne FM corrodée pouvant contribuer à la production de produits d'intermodulation

7. Règles générales de partage des sites

Les règles générales de partage des sites décrites dans cette section visent à éviter les brouillages décrits en section 5.

7.1 Cohabitation des installations

Les opérateurs de réseaux publics, les exploitants de réseaux radioélectriques indépendants et les administrations sont incités à rechercher le partage des sites et des supports afin d'en maximiser l'utilisation. Il leur appartient d'établir des règles communes pour la répartition des coûts.

Une bonne ingénierie facilite la bonne gestion des fréquences et permet de maîtriser la compatibilité électromagnétique entre systèmes cohabitants. Les utilisateurs doivent donc maîtriser les éléments de réalisation technique d'un site et mettre en œuvre les moyens adaptés. Par exemple, les utilisateurs doivent pouvoir partager les antennes installées sur un pylône lorsque c'est possible. De même, il est important de minimiser les couplages entre antennes et de favoriser l'installation de services voisins en fréquences.

Un point crucial est l'information des cohabitants, avant la mise en service d'une nouvelle installation ou la modification d'une installation (radio ou autres équipements électriques susceptibles de perturber : onduleurs, panneaux solaires...). Dans cet objectif, la procédure de l'Instance de sites et servitudes (ISITS) permet à travers la période de consultation de quatre semaines :

- d'informer les parties concernées de tous les projets d'implantation ou de modification technique ;
- de soumettre une réserve éventuelle.

Les réserves sont examinées par ISITS avant d'aboutir à un possible différé pouvant déboucher sur un essai de compatibilité.

Un essai de compatibilité peut permettre de statuer sur la levée du différé, par exemple, par la production d'un procès-verbal. Selon le cas et/ou le cahier des charges du donneur d'ordre, un procès-verbal d'essais de cohabitation radioélectriques avec ou sans réserve, peut être réalisé sur le site (exemple en Annexe 3).

Dans certains cas, la cohabitation peut être techniquement impossible et l'accueil du futur cohabitant refusé.

7.2 Règles de coexistence entre différents systèmes

Afin d'assurer une bonne coexistence entre différents systèmes sur un même site, il est nécessaire d'assurer un découplage suffisant entre les aériens des différents systèmes, y compris dans le domaine des émissions non désirées (généralement, pour ce dernier cas, via le respect des normes applicables).

Afin de limiter les problèmes de coexistence sur site aux situations les plus critiques (bandes immédiatement adjacentes, produits d'intermodulation), il est recommandé aux cohabitants de respecter la règle suivante.

Les découplages entre les émissions et les réceptions des différents systèmes sur un même site doivent être supérieurs à un minimum de 60 dB, et avoir pour objectif d'obtenir plus de 70 dB. Dans certaines configurations, il peut être nécessaire d'exiger 90 dB de découplage, par exemple afin que le niveau de champ fort sur des récepteurs tiers ne dépasse pas -20 dBm ou 10 V/m.

7.3 Etat radioélectrique des lieux

Pour les sites installés dans des zones de haute densité radioélectrique, chaque utilisateur doit pouvoir fournir un relevé sur toutes ses antennes des signaux reçus provenant d'émissions extérieures au site à des niveaux supérieurs à -30 dBm, avant filtrage ou couplage, de 30 MHz à 2,7 GHz. Ces signaux doivent être identifiés.

Les utilisateurs doivent connaître les isolements entre les différentes antennes installées.

Chaque installation est décrite par les puissances émises, les fréquences d'émission et de réception, la sensibilité et la listes des protections particulières.

Il est attendu du gestionnaire du site radioélectrique l'établissement d'un schéma détaillé des systèmes d'antennes et de couplage avec les indications des réglages et le relevé des paramètres importants (ROS, gabarits de filtrage, isolements, gains des amplificateurs communs, etc.).

7.3.1 Dossier des interventions sur les problèmes radioélectriques

Il est attendu du gestionnaire du site d'enregistrer et de connaître les interventions sur le site radioélectrique, ainsi que de fournir le récapitulatif de manière précise des problèmes rencontrés et des techniques adoptées pour y remédier.

Ce dossier a pour vocation d'aider à résoudre des difficultés qui peuvent survenir sur le site ou sur des sites voisins pour résoudre notamment les problèmes radioélectriques, telles que :

- intermodulation entre émetteurs ;
- brouillage en canal adjacent ;
- perturbations par des équipements électriques et électroniques (atelier d'énergie, alimentation à découpage, etc.).

Il est important que les dossiers contiennent les plans de limites de rayonnements radio et les zones à forts rayonnements nécessitant des procédures particulières qui seront transmises par le cohabitant concerné.

Lors d'interventions planifiées, le gestionnaire du site doit informer tous les cohabitants afin que ces derniers puissent prendre leurs dispositions selon leurs procédures internes.

7.3.2 Dossier des extensions et projets

Il est attendu du gestionnaire du site radioélectrique de veiller à ce que les extensions des installations ne se fassent pas de manière incontrôlée, en veillant à :

- l'optimisation de l'utilisation des antennes fournissant la même couverture radioélectrique dans la gamme de fonctionnement des réseaux concernés, en proposant si nécessaire une installation sur une antenne ou un groupement d'antennes commun ;
- la protection des installations d'émission et de réception en service. Si nécessaire, il pourra être demandé à l'utilisateur en place de renforcer ses protections pour observer une bonne compatibilité entre services.

À partir des éléments techniques définissant les conditions de protection de l'émission et de la réception fixées dans les relations contractuelles initiales liant le gestionnaire du site et l'utilisateur, le gestionnaire du site doit pouvoir établir des règles de partage raisonnable pour les équipements supplémentaires nécessaire à une poursuite de l'exploitation des installations en place avant toute mise en service d'une nouvelle installation.

Toute modification des conditions techniques initiales doit être résolue entre le gestionnaire du site et son client.

8. Composantes de l'ANFR pertinentes à l'ingénierie des sites

S'agissant de gestion des fréquences, et sous la supervision du comité de gestions des fréquences (CGF), l'Instance de sites et servitudes (ISITS) et l'instance de coordination des assignations des fréquences (ICAF) sont chargées, par délégation, du traitement opérationnel des demandes déposées dans le cadre des procédures conformément aux modalités opérationnelles consignées dans les documents de référence qui en décrivent le fonctionnement : ANFR/DR-05 [9] pour ISITS et ANFR/DR-04 [8] pour ICAF.

Les consultations de l'ISITS et l'ICAF sont programmées de manière périodique :

- une fois par semaine pour l'ISITS (à l'exception de la dernière semaine de l'année civile) ;
- une fois par mois pour l'ICAF (à l'exception du mois d'août).

L'ANFR tient à jour les listes des participants à l'ISITS et à l'ICAF. A cette fin chaque affectataire de fréquences indique à l'Agence les listes des personnes habilitées à le représenter à l'ISITS et à l'ICAF.

S'agissant des brouillages, au sein de la direction du contrôle du spectre (DCS) de l'ANFR, le département des opérations techniques (DOT) assure le pilotage national du processus de traitement des cas de brouillage et exerce un rôle de coordination avec les affectataires de fréquences concernés et les autres services compétents de l'Agence. Les modalités de signalement et d'instruction des cas de brouillage sont consignées dans les documents de référence (ANFR/DR-13 [11]).

8.1 Sites radioélectriques et servitudes : l'ISITS

L'Instance de sites et servitudes (ISITS) est responsable du traitement opérationnel des demandes de création, modification, suppression de stations radioélectriques et des demandes de diffusion de la documentation relative à l'établissement, la modification et l'abrogation des servitudes.

Ses tâches sont :

- de préparer les accords, avis et informations de l'Agence relatifs aux demandes d'implantations, de modifications, de suppressions de stations radioélectriques et de les enregistrer dans la base de données relative aux stations radioélectriques tenue à jour par l'Agence ;
- d'examiner les dossiers en litige et de définir les modalités pour les instruire (si ces modalités nécessitent des optimisations ou des modifications d'une ou plusieurs procédures de gestion des fréquences, elles sont remontées et instruites par le CGF) ;
- de donner un avis sur les cas de brouillages qui lui sont signalés et sur la conformité des stations radioélectriques contrôlées par rapport aux déclarations ;
- de donner un avis sur la création et la modification des zones de groupement enregistrées dans le répertoire des stations radioélectriques tenu à jour par l'ANFR ;
- d'instruire les dossiers en litige (si la résolution du litige nécessite des optimisations ou des modifications de procédure, les dossiers sont remontés et instruits lors de réunions du CGF).

8.2 Stations radioélectriques : l'ICAF

L'ICAF est responsable du traitement opérationnel des demandes d'enregistrement des assignations au fichier national des fréquences (FNF).

Ses tâches sont :

- de mettre en œuvre la coordination des assignations de fréquences dans les bandes en partage ;
- d'attribuer un statut national aux assignations de fréquences ;
- de veiller à l'enregistrement et la mise à jour des assignations de fréquences dans le Fichier National des Fréquences ainsi qu'au fichier de référence international des fréquences conformément aux dispositions du cadre législatif et réglementaire ;
- de donner un avis sur les cas de brouillage qui lui sont signalés et sur la conformité des émissions radioélectriques contrôlées par rapport aux déclarations ;
- d'instruire les dossiers en litige (si la résolution du litige nécessite des optimisations ou des modifications de procédure, les dossiers sont remontés et instruits par le CGF).

8.3 Brouillages : le DOT

Dans le cadre de sa mission de Contrôle du Spectre au titre de l'article L. 43 du CPCE, l'ANFR intervient en cas de brouillage signalé par une victime. Pour cela, un formulaire spécifique est à remplir selon la nature du plaignant (voir ANFR/DR-13 [11] et sur le [site web de l'Agence](#)).

Le traitement des brouillages est une investigation technique menée par des agents assermentés et habilités, équipés d'équipements d'analyse du spectre. Ces agents disposent de certains pouvoirs de police judiciaire et constatent les cas de violation de la législation en matière de radiocommunications, dans le cadre de l'article L. 40 du CPCE. Ils décident des suites à donner aux constatations effectuées, de manière proportionnée à la gravité des comportements illicites relevés. Le cas échéant, ils peuvent dresser un procès-verbal transmis au Procureur de la République pour poursuite pénale.

Annexe 1 – Références

Textes de référence

- [1] Directive RED : directive 2014/53/UE du Parlement européen et du Conseil du 16 avril 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE
 - et sa transposition en droit français :
 - décret n° 2017-599 du 21 avril 2017 relatif à la mise à disposition sur le marché des équipements radioélectriques
 - articles en R et L dans le CPCE, dont le L.34-9
- [2] Directive CEM : directive 2014/30/UE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la compatibilité électromagnétique
 - et sa transposition en droit français :
 - décret n° 2015-1084 du 27 août 2015 relatif à la compatibilité électromagnétique des équipements électriques et électroniques
- [3] Code des postes et des communications électroniques (CPCE)
- [4] Règlement des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications ([lien](#))
- [5] Tableau national de répartition des bandes de fréquences (annexe à l'arrêté du 18 avril 2025 du premier ministre - Document ANFR, [lien](#))
- [6] Arrêté du 17 décembre 2007 pris en application de l'article R. 20-44-11 du code des postes et des communications électroniques et relatif aux conditions d'implantation de certaines installations et stations radioélectriques
- [7] Décision du CSA n°87-23 du 6 mars 1987 parue au Journal Officiel le 28 mars 1987

Documents de l'Agence Nationale des Fréquences

Sauf exception, les documents de référence de l'ANFR ne sont pas partagés sur le site web de l'Agence, mais ils sont disponibles sur demande auprès de l'Agence.

- [8] Règles de procédure de la Commission d'attribution des fréquences ANFR/DR-04
- [9] Procédures d'utilisation optimale des sites radioélectriques (ISITS – Document ANFR/DR-05)
- [10] Procédure de contrôle des stations et d'inspection des sites radioélectriques ANFR/DR-07
- [11] Procédure de recueil et d'instruction des cas de brouillage ANFR/DR-13
- [12] Modélisation des sites radioélectriques et des périmètres de sécurité pour le public ANFR/DR 17-6

Rapports ANFR/CCE

- [13] Rapport de l'Agence nationale des fréquences à la ISITS sur la compatibilité entre les réseaux de radiocommunications du service mobile du ministère de l'intérieur (bande 83-87,3 MHz) et les stations d'émission de radiodiffusion FM (bande 87,5-108 MHz) autorisées par le Conseil supérieur de l'audiovisuel. (Rapport du groupe de travail CCE3)

Etudes de compatibilité ERC

- [14] Radiocommunications systems operating in adjacent bands – DECT/DCS 1800 Compatibility – ERC Report 31
- [15] Frequency sharing between UMTS and existing fixed services : ERC Report 64
- [16] Adjacent band compatibility between UMTS and other services in the 2 GHz band : ERC Report 65
- [17] Adjacent band compatibility of 400 MHz TETRA and analogue FM PMR : ERC Report 104
- [18] Adjacent Band Compatibility of TETRA and TETRAPOL in the 380-400 MHz frequency range - Analysis Completed using a Monte Carlo Based Simulation Tool ERC Report 103

Normes harmonisées publiées au Journal officiel de l'Union européenne

En date du 11/06/2026, les normes harmonisées publiées au journal officiel de l'UE sont énumérées dans la Décision d'exécution (UE) 2022/2191 de la Commission du 8 novembre 2022, telle qu'amendée ([lien](#)).

Parmi ces normes harmonisées publiées au journal officiel de l'UE, on peut noter les suivantes :

- [19] EN 302 018 V2.1.1 Équipements de transmission pour le service de diffusion radio en modulation de fréquence (FM) — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [20] EN 300 086 V2.1.2 Service mobile terrestre — Équipements hertziens munis d'un connecteur RF interne ou externe destinés principalement à la parole analogique — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [21] EN 300 113 V2.2.1 Service mobile terrestre — Équipements de radio destinés à la transmission de données (et/ou voix) utilisant une modulation à enveloppe constante ou non constante et ayant un connecteur d'antenne — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [22] EN 300 224 V2.1.1 Service mobile terrestre — Équipement radioélectrique destiné à être utilisé dans un service de radiomessagerie fonctionnant dans la plage de fréquences de 25 MHz à 470 MHz — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [23] EN 300 296 V2.1.1 Service mobile terrestre — Équipements radioélectriques à antenne intégrée destinés principalement à la parole analogique — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [24] EN 300 341 V2.1.1 Service mobile terrestre — Équipements radioélectriques à antenne intégrée, transmettant des signaux destinés à déclencher une réponse spécifique du récepteur — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [25] EN 300 390 V2.1.1 Service mobile terrestre — Équipements radioélectriques à antenne intégrée destinés à la transmission de données (et de la parole) — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [26] EN 301 502 V12.5.2 Système mondial de communications mobiles (GSM) — Équipements de station de base (BS) — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [27] EN 302 077 V2.3.1 Équipement de transmission pour le service de diffusion audionumérique (DAB) — Norme harmonisée pour l'accès au spectre radioélectrique (V2.1.0)
- [28] EN 302 217-2 V3.3.1 Systèmes radioélectriques fixes — Caractéristiques et exigences relatives aux équipements et antennes point à point — Partie 2 : Systèmes numériques fonctionnant dans la bande de fréquences de 1 GHz à 86 GHz — Norme harmonisée pour l'accès au spectre radioélectrique
- [29] EN 300 224 V2.1.1 Service mobile terrestre — Équipement radioélectrique destiné à être utilisé dans un service de radiomessagerie fonctionnant dans la plage de fréquences de 25 MHz à 470 MHz — Norme harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive 2014/53/UE
- [30] EN 302 296-2 V1.2.1 Compatibilité électromagnétique et spectre radioélectrique (ERM) — Équipements de transmission pour la diffusion du service de télévision numérique terrestre (DVB-T) — Partie 2: Norme européenne (EN) harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive R&TTE
- [31] EN 302 326-2 V1.2.2 Systèmes radioélectriques fixes — Équipements multipoint et antennes — Partie 2: Norme européenne (EN) harmonisée couvrant les exigences essentielles de l'article 3, paragraphe 2, de la directive R&TTE pour les équipements radioélectriques multipoint numériques

Guides et rapports techniques ETSI

- [32] ETR 132 Radio broadcasting systems; code of practice for site engineering VHF, frequency modulated sound broadcasting transmitters.
- [33] EG 200 053 V1.5.1 (2004-06) Radio site engineering for radio equipment and systems.

AFNOR/CEI

- [34] NF EN IEC 55015 Limites et méthodes de mesure des perturbations radioélectriques produites par les appareils électriques d'éclairage et les appareils analogues
- [35] NF EN IEC 61000-6-1 : normes génériques - Norme d'immunité pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère
- [36] NF EN IEC 61000-6-2 : normes génériques - Immunité pour les environnements industriels

Recommandations UIT-R

- [37] Recommandation UIT-R SM.1009-1 Compatibilité entre le service de radiodiffusion sonore dans la bande d'environ 87-108 MHz et les services aéronautiques dans la bande 108-137 MHz.
- [38] Recommandation UIT-R P.372-17 Bruit radioélectrique
- [39] Recommandation UIT-R R SM.329-13 Rayonnements non désirés dans le domaine des rayonnements non essentiels
- [40] 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
- [41] Recommandation UIT-R SM.1539-2 Variation de la frontière entre le domaine des émissions hors bande et le domaine des rayonnements non essentiels dont il faut tenir compte dans l'application des Recommandations UIT-R SM.1541 et UIT-R SM.329
- [42] Recommandation UIT-R M.584-2 Codes et formats pour systèmes de radiorecherche

Annexe 2 – Caractéristiques de systèmes radioélectriques

A2.1 Seuils des rayonnements non essentiels (RNE) pour la radiodiffusion

A2.1.1 Rayonnements non essentiels en radiodiffusion FM

La norme ETSI EN 302 018 [19] s'applique conformément à la directive RED.

En France, les niveaux maximums des rayonnements non essentiels sont définis au niveau national par la décision du CSA n°87-23 du 6 mars 1987 parue au Journal Officiel le 28 mars 1987 [7]. Cette décision précise que :

- pour les émetteurs d'une puissance nominale supérieure à 500 watts rms, un niveau de RNE de 90 dBc en-dessous de la porteuse est demandé ;
- pour les émetteurs d'une puissance nominale comprise entre 25 et 500 watts rms, un niveau de RNE de 60 dBc en-dessous de la porteuse, sans dépasser 1 milliwatt est demandé ;
- pour les émetteurs d'une puissance inférieure ou égale à 25 watts rms, un niveau de RNE de 40 dBc en-dessous de la puissance de la porteuse, sans dépasser 25 microwatts est demandé.

A2.1.2 Gabarits spectraux pour les émissions hors bande du système DAB+

En dehors du spectre de la modulation multi-porteuse (OFDM) d'une largeur de bande de 1,536 MHz, le signal contient des bandes latérales naturelles (« shoulders ») qui subissent un affaiblissement par rapport au signal utile, d'environ 40 à 50 dB. Bien qu'un niveau élevé de linéarité soit mis en œuvre, les amplificateurs de puissance généralement utilisés produisent naturellement des produits d'intermodulation (PIM) qui augmentent le niveau des bandes latérales, dans certains cas jusqu'à seulement 30 dB sous le signal utile. Ces bandes latérales indésirables sont considérées comme des signaux parasites et doivent, dans la mesure du possible, être supprimées pour permettre une utilisation optimale du spectre des fréquences, notamment des blocs de fréquences DAB+ adjacents (N-1 et N+1).

Selon la norme en vigueur EN 302 077 [27], le spectre du signal DAB+ est mesuré dans une largeur de bande de 4 kHz. À l'intérieur du bloc d'une largeur de 1,5 MHz, le niveau de puissance est donc réduit de $(10 \times \log_{10}(4 / 1536))$ dB = -26 dB par rapport à la puissance totale du signal. L'affaiblissement des bandes latérales (signaux hors bande) est exprimé en dB par rapport à cette valeur.

Le spectre du signal hors bande rayonné doit se situer dans les limites d'un des gabarits définis sur les figures ci-dessous et dans les tableaux associés. Le gabarit :

- en trait plein du cas 1 correspond aux émetteurs DAB+ nécessitant la mise en œuvre d'un filtre critique pour limiter les brouillages entre les canaux adjacents notamment pour des émetteurs DAB+ non co-localisés,
- en trait pointillé du cas 2 correspond aux émetteurs DAB+ nécessitant la mise en œuvre d'un filtre non critique pour des canaux dont les émetteurs sont colocalisés,
- en trait plein du cas 3 correspond aux émetteurs DAB+ nécessitant la mise en œuvre d'un filtre super-critique pour protéger les fréquences du Ministère de l'Intérieur.

En DAB+, les émissions hors bandes sont les émissions à des fréquences en dehors la bande passante nécessaire ($f_L - 3$ MHz à $f_L + 3$ MHz où f_L est la fréquence centrale du canal DAB+). Les émissions hors bandes sont données pour un niveau de puissance moyenne mesurée dans une largeur de bande de 4 kHz où 0 dB correspond à la puissance de sortie moyenne.

Tableau 3 : points d'inflexion des gabarits spectraux pour des émetteurs DAB+ de puissance moyenne

Fréquence par rapport à la fréquence centrale du bloc DAB+ (MHz)	Cas 1 (cas critique) niveau relatif en dBc	Cas 2 (cas non critique) niveau relatif en dBc	Cas 3 (cas super-critique) niveau relatif en dBc
$\pm 0,77$	- 26	- 26	- 26
$\pm 0,97$	- 71	- 56	- 71
$\pm 1,75$	- 106	NA	- 126
$\pm 3,00$	- 106	- 106	- 126

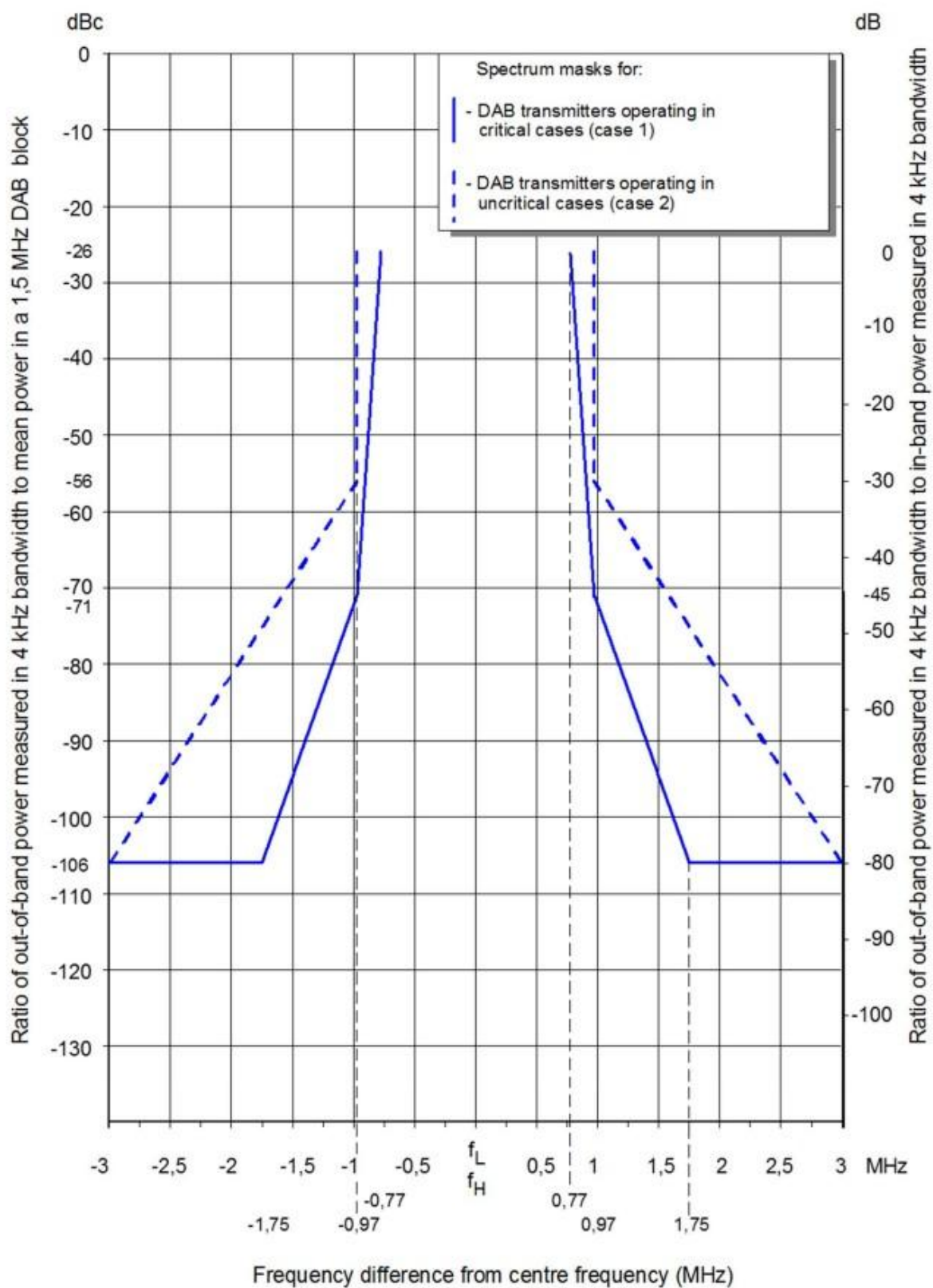


Figure 81 : gabarits spectraux pour les signaux hors bandes (cas 1 et cas 2)

Afin de protéger les services de sécurité et notamment les systèmes POCSAG² du Ministère de l'Intérieur, certains canaux DAB+ et en particulier le canal 5A nécessitent la mise en place de filtres supercritiques selon le gabarit défini dans la norme EN 302 077 v2.1.1 [27] tel que décrit au cas 3 de la figure ci-dessous.

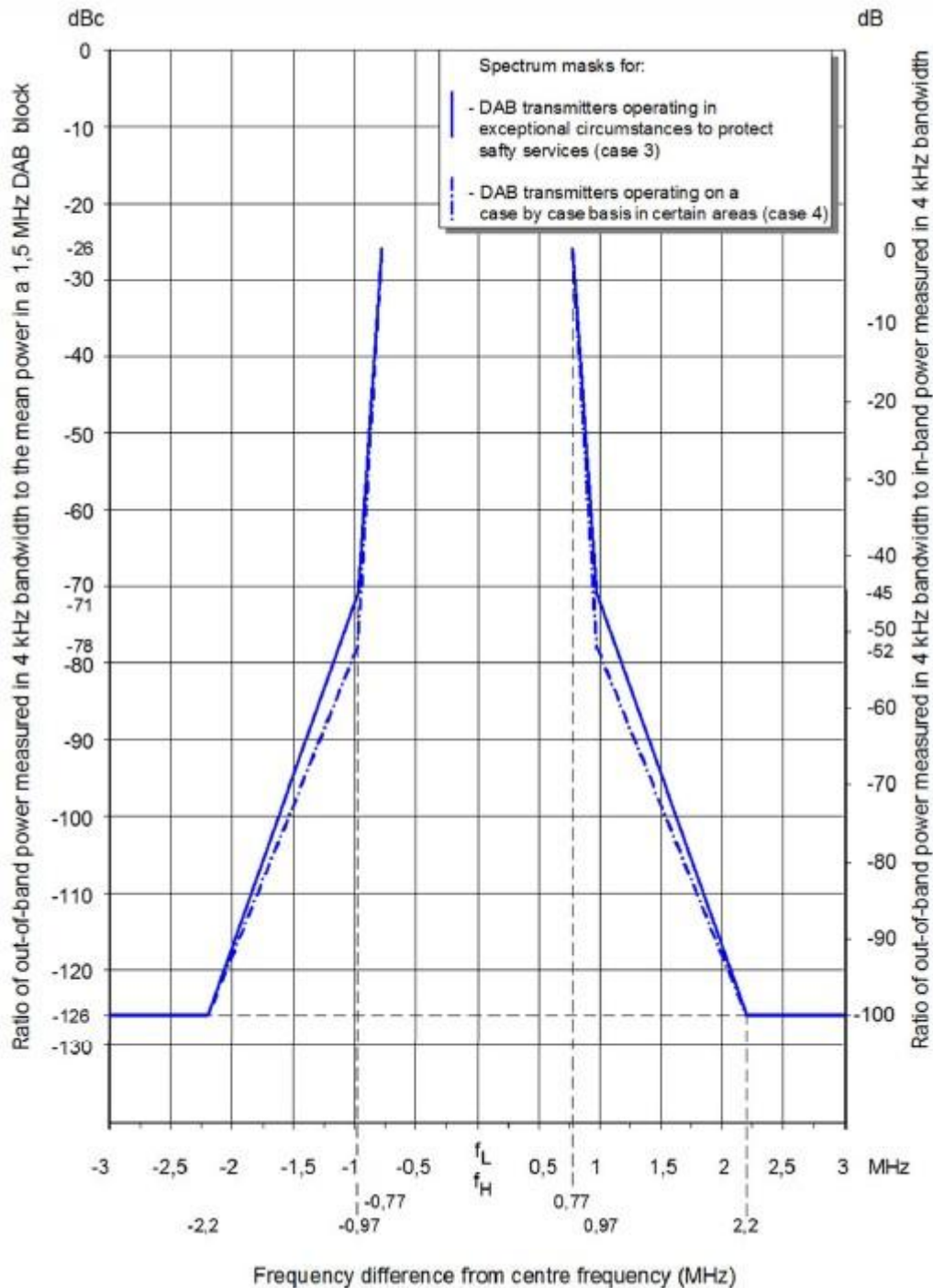


Figure 82 : gabarits spectraux pour les signaux hors bandes (cas 3 et cas 4)

² Post Office Code Standardisation Advisory Group.

A2.1.3 Gabarits spectraux pour les émissions hors bande du système DVB-T / DVB-T2

La norme EN 302 296 [23] définit les limites de puissance pour les émissions parasites et les émissions hors bandes des systèmes DVB-T/T2 :

- Avec l'utilisation d'une canalisation de 8 MHz en France, les émissions hors bandes sont les émissions à des fréquences en dehors la bande passante nécessaire ($f_0 - 20$ MHz à $f_0 + 20$ MHz où f_0 est la fréquence centrale du canal DVB-T/T2). Les émissions hors bandes sont données pour un niveau de puissance moyenne mesurée dans une largeur de bande de 3 kHz où 0 dB correspond à la puissance de sortie moyenne.
- Les émissions parasites sont les émissions à des fréquences en dehors de la bande passante nécessaire, entre 9 kHz et 3 GHz

Les limites de niveau d'émissions parasites sont données ci-dessous. Elles sont mesurées dans une bande de référence de 100 kHz, soit en valeur absolue, soit en valeur relative de la puissance d'émission de sortie moyenne des émetteurs.

Frequency range of the spurious emission	Limits of the spurious emission	Reference bandwidth
9 kHz to 470 MHz	≤ -36 dBm (250 nW) for $P \leq 69$ dBm ≥ 105 dBc for 69 dBm $< P$	100 kHz
> 470 MHz to 694 MHz	≤ -36 dBm for $P \leq 39$ dBm ≥ 75 dBc for 39 dBm $< P \leq 50$ dBm ≤ -25 dBm (3 μ W) for 50 dBm $< P$	100 kHz
> 694 MHz	≤ -36 dBm (250 nW) for $P \leq 69$ dBm ≥ 105 dBc for 69 dBm $< P$	100 kHz

NOTE: P = mean power of the transmitter measured at the antenna port.

Figure 83 : niveau d'émissions parasites en DVB-T/T2

Le spectre des émissions hors bande doit se situer dans les limites d'un des gabarits définis sur les figures ci-dessous et dans les tableaux associés.

Les limites et gabarits sont spécifiés en fonction de la classe de puissance d'émission :

- Emetteur faible puissance : émetteur de puissance < 25 W opérant dans la bande UHF (470-694 MHz). Les émissions hors bandes sont données en valeur absolue, dans une largeur de bande de 3 kHz.
- Emetteur forte puissance : émetteur de puissance ≥ 25 W opérant dans la bande UHF (470-694 MHz). Les émissions hors bandes sont données pour un niveau de puissance moyenne mesurée dans une largeur de bande de 3 kHz où 0 dB correspond à la puissance de sortie moyenne de l'émetteur.

Comme en DAB+, les limites et gabarits sont spécifiés également en fonction du besoin de protection des canaux adjacents :

- Cas critique : émetteurs DVB-T/T2 nécessitant la mise en œuvre d'un filtre spécifique pour limiter les brouillages entre canaux adjacents (émetteurs colocalisés ou non).
- Cas non critique : émetteurs DVB-T/T2 ne nécessitant pas une protection accrue des canaux adjacents sur la zone de diffusion.

Tableau 4 : points d'inflexion des gabarits spectraux pour des émetteurs DVB-T/T2

Fréquence par rapport à la fréquence centrale du canal DVB-T/T2 (MHz)	Faible puissance (cas critique) niveau absolu en dBm/3 kHz	Faible puissance (cas non critique) niveau absolu en dBm/3 kHz	Forte puissance (cas critique) niveau relatif en dBc/3 kHz	Forte puissance (cas non critique) niveau relatif en dBc/3 kHz
$\pm 3,9$	10	10	-34	-34
$\pm 4,2$	-40	-30	-84	-74

± 6	-52	-42	-96	-86
± 12	-77	-67	-121	-111
± 20	-77	-67	-121	-111

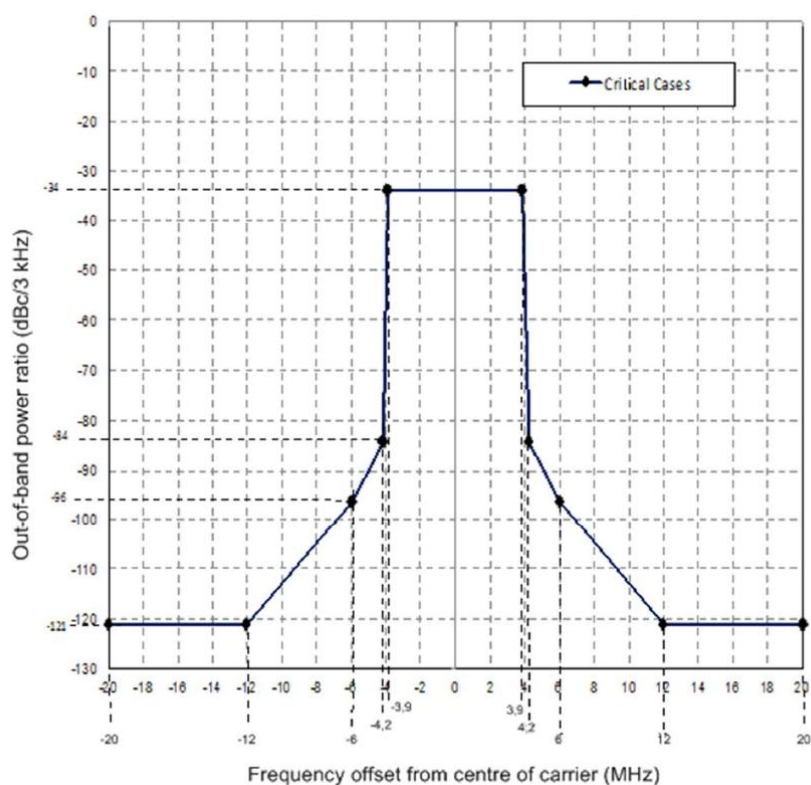


Figure 84 : masque d'émission critique en DVB-T/T2 – Emetteur forte puissance

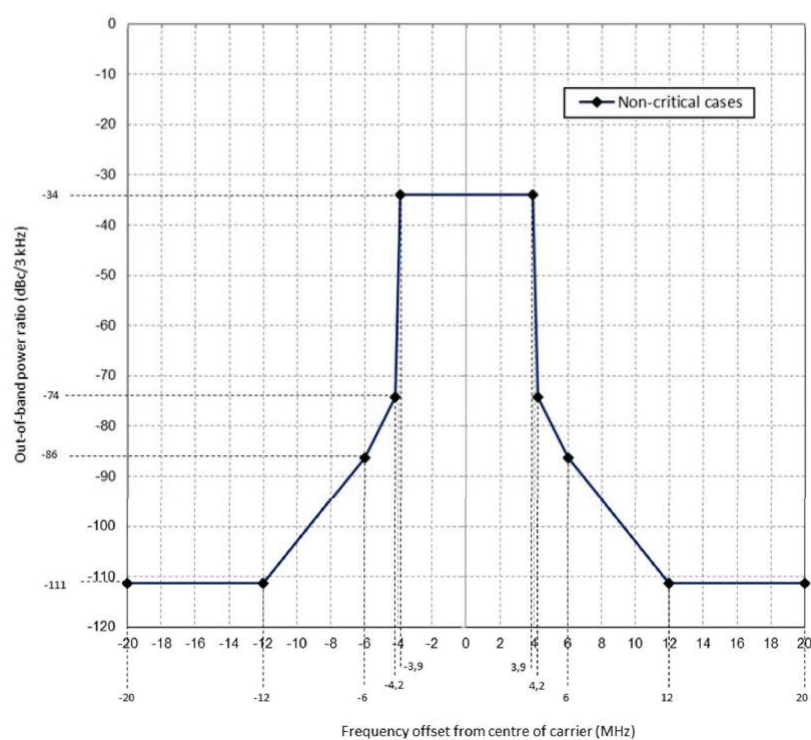


Figure 85 : masque d'émission non critique en DVB-T/T2 – Emetteur faible puissance

A2.2 Caractéristiques de quelques systèmes mobiles

Cette section présente les caractéristiques de certains systèmes anciens toujours utilisés en 2026. Pour le déploiement de nouveaux systèmes, se référer aux normes harmonisées en vigueur.

Les valeurs indiquées ci-après sont des valeurs typiques données à titre indicatif. Elles sont tirées des notices descriptives des équipements. Les valeurs de réglage sur sites sont adaptées aux déploiements des réseaux, toutefois, ces chiffres permettent d'évaluer au préalable le type d'ingénierie en fonction des réseaux rencontrés.

Tableau 5 : réseaux de type relais PMR à une ou deux fréquences en numérique

Caractéristiques		Emission fixe	Réception fixe	Emission mobile	Réception mobile
1 – type ou appellation du réseau					
2 - bande de fréquences de réglage des appareils	F max	68-83 MHz	68-83 MHz	68- 83 MHz	68-83 MHz
	F min				
3.1 Pas de canalisation		12,5 kHz	12,5 kHz	12,5 kHz	12,5 kHz
3.2 modulation	Analog./num. classe	Modulation indirecte ou directe		Modulation indirecte ou directe	
4. Mode d'accès					
5.Caractéristiques radioélectriques					
5.1 Norme de référence		ETS 300-113	ETS 300-113	ETS 300-113	ETS 300-113
5.2.1 Puissance nominale de sortie émetteur typique		1 à 20 W		1 à 15 W	
5.2.2 Puissance apparente rayonnée	PAR min	<1 W		1W	
	PAR max	35 W		15 W	
	Diagramme en site				
5.2.3 Puissance dans le canal adjacent		< 70 dB		-80	
5.3 Sensibilité			> 0,35 µV		> 0,35 µV
5.4.1 Protection co-canal			0 dB		0 dB
5.4.2 Protection canal adjacent			> 70 dB		> 70 dB
5.5.1 Rayonnements non essentiels		-57	-57	-57	-57
5.5.2 Rayonnements non essentiels en mode émission					
5.6 Blocage ou désensibilisation du récepteur			> 84 dB		> 84 dB
5.6.1 avec signal brouilleur sinusoïdal pur					
5.6.2 avec signal brouilleur modulé					
5.7 Intermodulation					
5.7.1 Atténuation d'intermodulation			> 75 dB		> 75 dB
5.7.2 Protection contre l'intermodulation des récepteurs			70 dB		> 70 dB
Immunité externe aux champs forts en dehors de la bande (canal) utile			ETS 300 -279		ETS 300 -279
Champ utile de fonctionnement à l'intérieur de la zone de service (50% temps 50% emplacements)					> 9 dB µV/m

Tableau 6 : réseaux de type TETRA dans la bande 410-430 MHz

Caractéristiques		Emission fixe	Réception fixe	Emission mobile	Réception mobile
1 – type ou appellation du réseau					
2 - bande de fréquences de réglage des appareils	F max	420-430 MHz	410-420 MHz	410-420 MHz	420-430 MHz
	F min				
3.1 Pas de canalisation		25 kHz	25 kHz	25 kHz	25 kHz
3.2 modulation	Analog./num. classe	numérique	numérique	numérique	numérique
4. Mode d'accès					
5. Caractéristiques radioélectriques					
5.1 Norme de référence		ETS 300-392 (TETRA)	ETS 300-392 (TETRA)	ETS 300-392 (TETRA)	ETS 300-392 (TETRA)
5.2.1 Puissance nominale de sortie émetteur typique		1 à 20 W		1 à 15 W	
5.2.2 Puissance apparente rayonnée	PAR min	<1 W		1W	
	PAR max	35 W		15 W	
Diagramme en site					
5.2.3 Puissance dans le canal adjacent					
5.3 Sensibilité					
5.4.1 Protection co-canal					
5.4.2 Protection canal adjacent					
5.5.1 Rayonnements non essentiels					
5.5.2 Rayonnements non essentiels en mode émission					
5.6 Blocage ou désensibilisation du récepteur					
5.6.1 avec signal brouilleur sinusoïdal pur					
5.6.2 avec signal brouilleur modulé					
5.7 Intermodulation					
5.7.1 Atténuation d'intermodulation					
5.7.2 Protection contre l'intermodulation des récepteurs					
Immunité externe aux champs forts en dehors de la bande (canal) utile			ETS 300 -827		ETS 300 -827
Champ utile de fonctionnement à l'intérieur de la zone de service (50% temps 50% emplacements)					

Tableau 7: réseaux de type TETRA 25 kHz dans la bande 450-470 MHz

Caractéristiques		Emission fixe	Réception fixe	Emission mobile	Réception mobile
1 – type ou appellation du réseau					
2 - bande de fréquences de réglage des appareils	F max	460-470 MHz	450-460 MHz	450-460 MHz	460-470 MHz
	F min				
3.1 Pas de canalisation		25 kHz	25 kHz	25 kHz	25 kHz
3.2 modulation	Analog./num.	numérique	numérique	numérique	numérique
	classe				
4. Mode d'accès					
5.Caractéristiques radioélectriques					
5.1 Norme de référence		ETS 300-392 (TETRA)	ETS 300-392 (TETRA)	ETS 300-392 (TETRA)	ETS 300-392 (TETRA)
5.2.1 Puissance nominale de sortie émetteur typique		1 à 20 W		1 à 15 W	
5.2.2 Puissance apparente rayonnée	PAR min	<1 W		1W	
	PAR max	35 W		15 W	
	Diagramme en site				
5.2.3 Puissance dans le canal adjacent					
5.3 Sensibilité					
5.4.1 Protection co-canal					
5.4.2 Protection canal adjacent					
5.5.1 Rayonnements non essentiels					
5.5.2 Rayonnements non essentiels en mode émission					
5.6 Blocage ou désensibilisation du récepteur					
5.6.1 avec signal brouilleur sinusoïdal pur					
5.6.2 avec signal brouilleur modulé					
5.7 Intermodulation					
5.7.1 Atténuation d'intermodulation					
5.7.2 Protection contre l'intermodulation des récepteurs					
Immunité externe aux champs forts en dehors de la bande (canal) utile			ETS 300 -827		ETS 300 -827
Champ utile de fonctionnement à l'intérieur de la zone de service (50% temps 50% emplacements)					

Tableau 8: réseaux de type TETRA 12.5 kHz dans la bande 450-470 MHz

Caractéristiques		Emission fixe	Réception fixe	Emission mobile	Réception mobile
1 – type ou appellation du réseau					
2 - bande de fréquences de réglage des appareils	F max	460-470 MHz	450-460 MHz	450-460 MHz	460-470 MHz
	F min				
3.1 Pas de canalisation		12,5 kHz	12,5 kHz	12,5 kHz	12,5 kHz
3.2 modulation	Analog./num. classe	numérique	numérique	numérique	numérique
4. Mode d'accès					
5.Caractéristiques radioélectriques					
5.1 Norme de référence		PAS TETRAPOL	PAS TETRAPOL	PAS TETRAPOL	PAS TETRAPOL
5.2.1 Puissance nominale de sortie émetteur typique		1 à 20 W		1 à 15 W	
5.2.2 Puissance apparente rayonnée	PAR min	<1 W		1W	
	PAR max	35 W		15 W	
	Diagramme en site				
5.2.3 Puissance dans le canal adjacent					
5.3 Sensibilité					
5.4.1 Protection co-canal					
5.4.2 Protection canal adjacent					
5.5.1 Rayonnements non essentiels					
5.5.2 Rayonnements non essentiels en mode émission					
5.6 Blocage ou désensibilisation du récepteur					
5.6.1 avec signal brouilleur sinusoïdal pur					
5.6.2 avec signal brouilleur modulé					
5.7 Intermodulation					
5.7.1 Atténuation d'intermodulation					
5.7.2 Protection contre l'intermodulation des récepteurs					
Immunité externe aux champs forts en dehors de la bande (canal) utile					
Champ utile de fonctionnement à l'intérieur de la zone de service (50% temps 50% emplacements)					

Tableau 9 : systèmes du ministère de l'Intérieur dans la bande 83-87,3 MHz

Caractéristiques		Emission fixe	Réception fixe	Emission mobile	Réception mobile
1 – type ou appellation du réseau		RU, GD, Tactique, ops, Cdt, FTA, SSU	RU, GD, Tactique, ops, Cdt, FTA, SSU	RU, GD, Tactique, ops, Cdt, FTA, SSU	RU, GD, Tactique, ops, Cdt, FTA, SSU
2 - bande de réglage des appareils	F max	83 MHz	83 MHz	83 MHz	83 MHz
	F min	87,3 MHz	87,3 MHz	87,3 MHz	87,3 MHz
3.1 Pas de canalisation		25 kHz ou 12,5 kHz	25 kHz ou 12,5 kHz	25 kHz ou 12,5 kHz	25 kHz ou 12,5 kHz
3.2 modulation	Analog./num.	Modulation de Phase	Modulation de Phase	Modulation de Phase	Modulation de Phase
4. Mode d'accès	classe	G3E	G3E	G3E	G3E
5.Caractéristiques radioélectriques					
5.1 Norme de référence		ETS 300-086	ETS 300-086	ETS 300-086	ETS 300-086
5.2.1 Puissance nominale de sortie émetteur typique		50 W pour la Police / 15 W pour les SDIS		20 W pour la Police / 10 W pour les SDIS	
5.2.2 Puissance apparente rayonnée	PAR min	35 W pour la police / 1 W pour les SDIS		5 W	
	PAR max	45 W pour la police / 15 W pour les SDIS		15 W	
Diagramme en site					
5.2.3 Puissance dans le canal adjacent		< 70 dB		-80	
5.3 Sensibilité			0,35 µV		0,35 µV
5.4.1 Protection co-canal			0 dB		0 dB
5.4.2 Protection canal adjacent			> 70 dB		> 70 dB
5.5.1 Rayonnements non essentiels		-57	-57	-57	-57
5.5.2 Rayonnements non essentiels en mode émission					
5.6 Blocage ou désensibilisation du récepteur			> 84 dB		> 84 dB
5.6.1 avec signal brouilleur sinusoïdal pur					
5.6.2 avec signal brouilleur modulé					
5.7 Intermodulation					
5.7.1 Atténuation d'intermodulation			> 75 dB		> 75 dB
5.7.2 Protection contre l'intermodulation des récepteurs			70 dB		> 70 dB
Immunité externe aux champs forts en dehors de la bande (canal) utile					
Champ utile de fonctionnement à l'intérieur de la zone de service (90% temps 90% emplacements)					9 dB µV/m

Annexe 3 – Exemple de PV d’essai de cohabitation radioélectriques



PV
Cohabitation.doc