

BROUILLAGE TERRESTRE DE LA RECEPTION PAR SATELLITE EN BANDE C

Bande de frequences 3 400 – 4 800 MHz | FSS / DVB-S2 / T2-MI

Analyse exhaustive des mecanismes d'interference dans les conditions de la Slovaquie

Auteur : Roman David | www.dxsatcs.com

Soutien analytique et compilation : Claude (Anthropic) | claudio.ai

Date : Mars 2026

Classification : Publication scientifique et technique | www.dxsatcs.com

RESUME / SYNTHESE DE L'ETUDE

La presente etude scientifique traite de maniere exhaustive la problematique du brouillage electromagnetique terrestre (EMI – Electromagnetic Interference) affectant la reception par satellite en bande C dans la plage de frequences 3 400 – 4 800 MHz, avec un focus specifique sur les conditions de la Republique slovaque. L'analyse couvre les mecanismes physiques du brouillage, la classification des sources d'interference terrestres, l'influence des normes technologiques (5G NR, LTE, Wi-Fi, faisceaux hertziens, WiMAX, Internet terrestre), l'impact sur les convertisseurs LNB et les recepteurs satellitaires, ainsi qu'une evaluation critique des solutions de filtrage, y compris les filtres passe-bande Norsat.

L'etude a ete elaboree sur la base de sources techniques et scientifiques actuelles, notamment des publications de l'UIT-R, du 3GPP, de l'IEEE ainsi que des travaux de recherche revises par des pairs (arXiv, PMC, IEEE Xplore), et est destinee a servir de materiau de reference pour les specialistes en communications par satellite, en physique des ondes et en CEM (compatibilite electromagnetique).

CONSTAT ESSENTIEL : Le brouillage en bande C en Slovaquie est de nature multi-source et multi-mecanisme. Un simple BPF (filtre passe-bande) place apres le feed NE PEUT PAS eliminer toutes les formes de brouillage – en particulier ni les effets de saturation du LNB, ni les produits d'intermodulation generes directement a l'interieur du LNB, en amont de l'etage de filtrage. La solution requiert une approche systematique a plusieurs niveaux.

1. INTRODUCTION – LA BANDE C ET SA POSITION SPECIFIQUE

1.1 Definition et delimitation frequentielle de la bande C

La bande C, dans le contexte des communications par satellite, represente l'un des utilisateurs de frequences historiquement les plus importants et les plus stables du spectre electromagnetique mondial. Du point de vue de la physique des ondes electromagnetiques, cette bande couvre des longueurs d'onde allant d'environ 6,25 cm (4 800 MHz) a 8,8 cm (3 400 MHz).

Dans le contexte du FSS satellitaire (Fixed Satellite Service), les sous-bandes suivantes sont distinguees :

- Bande C standard (liaison descendante) : 3 400 – 4 200 MHz (utilisee en Europe et en Asie)
- Bande C etendue (Extended C-band) : 3 400 – 4 800 MHz
- Bande C super-etendue : jusqu'a 4 800 MHz (certaines attributions regionales)

- Bande C montante (Uplink) : 5 725 – 6 425 MHz (non exposee aux interferences terrestres)

La reception par satellite en bande C presente, par rapport a la bande Ku (10,7–12,75 GHz) et a la bande Ka (17,3–21,2 GHz), un avantage physique fondamental : un affaiblissement pluviometrique (rain fade) minimal. Ce phenomene est regi par la loi physique de la diffusion de Rayleigh, selon laquelle l'affaiblissement cause par les perturbations atmospheriques croit avec le carre de la frequence. A 4 GHz, l'affaiblissement cause par les precipitations est environ 100 fois inferieur a celui mesure a 12 GHz. C'est precisement cette propriete qui a confere a la bande C une importance strategique historique pour les regions tropicales et les pays a forte pluviometrie.

1.2 Nature physique de la liaison satellite-sol en bande C

Le signal satellitaire en bande C provenant de l'orbite geostationnaire (GEO, ~35 786 km) est caracterise par une densite spectrale de puissance (DSP) extremement faible. Le niveau typique du signal a l'entree du LNB se situe dans la plage :

$$P_{rx} = -90 \text{ a } -120 \text{ dBm (soit } 10^{-9} \text{ a } 10^{-12} \text{ mW)}$$

Cette valeur represente la limite inferieure physique de detectabilite et est determinee par :

- La PIRE du satellite (typiquement 30–50 dBW pour la bande C)
- Les pertes en espace libre (Free Space Path Loss, FSPL) sur une distance de ~36 000 km
- Les gains du systeme antenne et LNB

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(4\pi/c) \approx 196 \text{ dB @ 4 GHz, 36 000 km}$$

Ce niveau de signal extremement faible est simultanement la cause fondamentale du probleme de brouillage : toute source de puissance terrestre qui atteint l'entree du LNB peut etre d'un ordre de grandeur des millions de fois superieure au signal satellitaire recherche.

1.3 La situation specifique en Slovaquie

La Republique slovaque est situee au coeur de l'Europe, ou une expansion massive des reseaux mobiles, de l'Internet sans fil et des services en bande C a eu lieu (et continue de se derouler). Du point de vue de la reglementation des frequences, le spectre est gere par l'Office des telecommunications de la Republique slovaque (TU SR), qui delivre des licences conformement aux decisions d'harmonisation europeennes de l'ECC (Electronic Communications Committee) et aux reglements du BEREC.

Le document reglementaire cle pour la bande C est la decision d'harmonisation europeenne ECC/DEC/(11)06 relative a l'utilisation de la bande 3 400–3 800 MHz pour les services IMT (International Mobile Telecommunications), qui est en conflit direct avec la reception FSS dans ce sous-bande. En Slovaquie, les licences 5G dans la bande 3,5 GHz ont ete attribuees en 2020 aux quatre principaux operateurs.

2. CLASSIFICATION DES SOURCES TERRESTRES DE BROUILLAGE EN BANDE C

L'analyse suivante presente une classification systematique de toutes les sources terrestres de brouillage pertinentes dans la plage 3 400 – 4 800 MHz, identifiees sur la base de leurs proprietes physiques, de leur plage de frequences et de leur mecanisme d'interference.

2.1 5G NR (New Radio) – Bandes n78 et n77

Plage de frequences : 3 300 – 4 200 MHz (bande NR n78 : 3 300–3 800 MHz, n77 : 3 300–4 200 MHz)

La 5G NR en bande C represente actuellement la source de brouillage la plus grave et la mieux documentee du point de vue physique pour la reception satellitaire. La norme technique 3GPP Release 17 definit deux blocs de frequences principaux pertinents pour la bande C : la bande n78 (3 300–3 800 MHz) et la bande n77 (3 300–4 200 MHz). En Slovaquie, l'attribution a eu lieu dans la plage 3 490–3 510 MHz et dans la plage 3 400–3 600 MHz.

Mecanismes d'interference 5G :

a) Interference directe en bande (in-band) : Les stations de base (BS) 5G emettent dans la plage 3 300–4 200 MHz avec une PIRE (Puissance Isotrope Rayonnee Equivalente) typiquement de 40–80 W par secteur d'antenne. Lorsqu'une BS 5G fonctionne sur une frequence tombant dans la plage de reception du LNB (3 400–4 200 MHz), une collision spectrale directe se produit. Le signal d'une BS 5G a une distance de 1 km atteint l'entree du LNB a des niveaux de l'ordre de –40 a –60 dBm – soit de l'ordre de 30 a 60 dB au-dessus du signal satellitaire.

$$\text{deltaP} = P_{5G_rx} - P_{sat_rx} \approx 30 \text{ a } 60 \text{ dB d'exces de puissance}$$

b) Saturation du LNB : Lorsque la puissance a l'entree du LNB depasse le point de compression a 1 dB (P1dB, typiquement –10 a +5 dBm pour les LNB standard), le transistor amplificateur d'entree entre en regime non lineaire. Dans cet etat :

- Le gain du LNB chute en dessous de sa valeur nominale (compression de gain)
- Le plancher de bruit (noise floor) augmente significativement
- Des produits d'intermodulation (IMD) sont generes
- Le signal satellitaire est entierement masque, meme s'il se situe en dehors de la frequence 5G

c) Interference de canal adjacent : Meme lorsque la 5G opere dans le sous-bande 3 400–3 600 MHz et que le signal satellitaire est recu a 3 700–4 200 MHz, les emissions de lobes secondaires de la BS 5G et les produits d'intermodulation peuvent s'etendre jusqu'aux parties superieures de la bande C.

d) Produits d'intermodulation du troisieme ordre (IMD3) : Lors de l'emission simultanee de deux ou plusieurs porteuses 5G aux frequences f_1 et f_2 , des produits d'intermodulation du troisieme ordre sont generes dans la zone non lineaire du LNB aux frequences suivantes :

$$\text{IMD3} = 2 \cdot f_1 - f_2 \text{ et } 2 \cdot f_2 - f_1$$

Pour des porteuses 5G a 3 500 et 3 600 MHz : IMD3 = 3 400 MHz et 3 700 MHz – toutes deux directement dans la bande de reception satellitaire.

CONSTAT CRITIQUE : La saturation du LNB et les IMD3 sont generes DIRECTEMENT A L'INTERIEUR DU LNB, EN AMONT DE TOUT FILTRE EXTERNE. Par consequent, un filtre BPF externe place entre le feed et le LNB NE PEUT PAS eliminer ces effets. Un filtre ne peut assurer la protection que lorsqu'il est positionne en amont du transistor d'entree du LNB – ce qui signifie : l'integrer directement dans le LNB, ou utiliser un LNA (Low Noise Amplifier) special a IP3 (point d'interception) ultra-eleve en amont du LNB standard.

2.2 LTE / 4G – Bandes B42, B43 et bandes adjacentes

Plage de frequences : 3 400 – 3 800 MHz (LTE TDD bande 42/43)

La bande LTE TDD 42 (3 400–3 600 MHz) et la bande 43 (3 600–3 800 MHz) sont utilisées pour l'accès Internet sans fil fixe (FWA – Fixed Wireless Access) dans les pays européens. En Slovaquie, ces fréquences sont utilisées par les opérateurs pour l'Internet sans fil fixe dans les communes dépourvues d'infrastructure en fibre optique.

Les effets physiques sont identiques à ceux de la 5G, mais avec une PIRE plus faible et une largeur de canal plus grande (jusqu'à 100 MHz de largeur de canal). La spécificité du LTE TDD est le partage temporel du spectre (TDD – Time Division Duplex), où le lien montant et le lien descendant alternent périodiquement toutes les dizaines de millisecondes. Cela provoque un brouillage impulsionnel périodique, qui se manifeste comme un bruit impulsionnel sur le récepteur satellitaire.

2.3 WiMAX et Internet sans fil propriétaire

Plage de fréquences : 3 400 – 3 700 MHz

La norme IEEE 802.16 (WiMAX) et les systèmes PTMP propriétaires (Point-to-Multipoint) pour l'Internet sans fil fixe sont largement répandus dans les pays européens. De nombreux FAI (fournisseurs d'accès à Internet) en Slovaquie utilisent encore des systèmes PTMP (Ubiquiti AirMax, Mimosa, IgniteNet et autres) dans la bande 3 400–3 700 MHz. Ces systèmes sont antérieurs à la 5G et ne disposent souvent pas de masques d'émission standardisés conformes aux normes ETSI en vigueur.

Contrairement aux réseaux mobiles, les antennes PTMP pointent souvent horizontalement vers des secteurs, ce qui peut conduire à une interférence directe en visibilité directe (LOS) avec l'antenne parabolique du récepteur satellitaire, si le satellite se trouve dans la direction azimutale du secteur PTMP.

2.4 Faisceaux hertziens terrestres (Microwave Backhaul)

Plage de fréquences : 3 600 – 4 200 MHz et 4 400 – 5 000 MHz

Les liaisons hertziennes point à point (PTP) terrestres pour le backhaul des opérateurs mobiles et des FAI sont autorisées dans de nombreux sous-bandes dans la plage 3,6–5 GHz. Ces liaisons utilisent des antennes hautement directives (gain 30–40 dBi) et fonctionnent avec une PIRE pouvant atteindre 50 dBW.

Le risque d'interférence de ces liaisons est généralement faible en raison de leur directivité, mais peut survenir dans les situations suivantes :

- L'antenne satellitaire se trouve dans le lobe principal du faisceau hertzien
- La diffraction autour des bâtiments ou de la surface terrestre amène une partie du signal vers l'antenne satellitaire
- La propagation par trajets multiples due à la réflexion sur des bâtiments ou des surfaces humides

La bande de fréquences 4 400–4 800 MHz est particulièrement pertinente pour la bande C étendue (Extended C-band), utilisée par certains satellites (p. ex. Intelsat, SES) et dans les régions présentant un plan de fréquences différent.

2.5 Systèmes radar

Plage de fréquences : 3 300 – 3 500 MHz (bande S) et 4 200 – 4 400 MHz (radar bande C)

Les systèmes radar météorologiques et aéronautiques opèrent à proximité de la bande C satellitaire. En Slovaquie, des radars météorologiques (SHMU) et des radars de surveillance aéronautique (LPS SR) sont en service. Ces systèmes ne se trouvent généralement pas dans les zones résidentielles denses, mais leurs émissions impulsionnelles à haute puissance (puissance de crête pouvant atteindre le MW) peuvent, à courte distance, provoquer de graves interférences impulsionnelles – voire endommager physiquement l'étage d'entrée du LNB.

Remarque : Le brouillage radar se manifeste sous forme d'impulsions brèves et périodiques, et non comme un brouillage continu. Sur un analyseur de spectre, il est visible sous forme de pics périodiques dont la fréquence de répétition correspond à la période de rotation du radar (typiquement 5 à 10 secondes).

2.6 Wi-Fi en bande C (IEEE 802.11a/n/ac/ax)

Plage de frequences : 5 150 – 5 850 MHz (Wi-Fi 5 GHz)

La bande Wi-Fi 5 GHz classique (5 150–5 850 MHz) se situe en dehors de la definition etroite de la bande C FSS (3 400–4 200 MHz), de sorte que l'interference directe en bande du Wi-Fi avec la bande C classique est physiquement exclue.

Le Wi-Fi peut provoquer des interferences de maniere indirecte :

- Les emissions harmoniques de second ordre du Wi-Fi 2,4 GHz peuvent tomber dans la plage ~4 800 MHz (bande C etendue)
- Les emissions harmoniques de troisieme ordre du Wi-Fi 2,4 GHz tombent a ~7,2 GHz – en dehors de la bande C
- Les routeurs Wi-Fi presentant un defaut de conception RF peuvent generer un bruit large bande atteignant la bande C

D'un point de vue scientifique, l'influence directe du Wi-Fi sur la reception satellitaire en bande C est minimale – des interferences significatives ne surviennent que dans des cas extremes (equipement defectueux a proximite immediate de l'antenne parabolique).

2.7 Internet terrestre en bande C – FWA dans la bande 3,5 GHz

Plage de frequences : 3 400 – 3 800 MHz

L'accès sans fil fixe (FWA) dans la bande 3,5 GHz est actuellement l'une des causes les plus graves de brouillage en bande C en Slovaquie et dans les pays voisins. Les FAI (plus de 50 en Slovaquie) exploitent des stations de base sectorielles dans la bande 3,4–3,7 GHz avec des puissances d'émission de 1–10 W (PIRE 40–50 dBm).

Les mecanismes physiques sont identiques a ceux de la 5G et du LTE (voir sections 2.1 et 2.2), mais avec un historique d'exploitation plus long et une purete spectrale moins previsible (systemes proprietaires plus anciens sans masques d'emission stricts).

2.8 DECT, appareils ISM et autres sources locales

Plage de frequences : ISM 5,8 GHz (5 725–5 875 MHz) – brouillage harmonique

Les appareils dans la bande ISM 5,8 GHz (telephones sans fil, ecoutes-bebes, certains equipements Wi-Fi) affectent indirectement la bande C par des emissions harmoniques. Par ailleurs, les sources locales telles que :

- Moteurs electriques et alimentations a decoupage (SMPS) – bruit large bande
- Eclairage LED et fluorescent avec conception CEM defectueuse
- Chargeurs pour vehicules electriques (chargeurs EV) – brouillage impulsionnel large bande
- Equipements industriels (variateurs de frequence, machines CNC)

...peuvent contribuer a une elevation du plancher de bruit du systeme, mais ne sont pas des sources de brouillage direct en bande au sens defini.

3. MECANISMES PHYSIQUES D'INTERFERENCE – ANALYSE

3.1 Saturation du LNB (Compression de gain)

La saturation du LNB est le mecanisme d'interference physiquement le plus grave et le plus frequent en bande C. Le transistor amplificateur d'entree du LNB (typiquement un HEMT – High Electron Mobility Transistor) possede un point de compression a 1 dB (P1dB) defini. Pour les LNB bande C standard, le P1dB se situe typiquement dans la plage de –10 a +5 dBm a l'entree.

$$P_{\text{sat}}(\text{dBm}) = P_{1\text{dB_entree}} - G_{\text{LNB}} \text{ Pour un LNB avec un gain de } 60 \text{ dB et } P_{1\text{dB}} = +5 \text{ dBm} \\ : P_{\text{sat_entree}} = -55 \text{ dBm}$$

Une BS 5G a 500 m de distance produit typiquement –40 dBm a l'entree du LNB – soit 15 dB au-dessus du point de saturation. Les consequences sont :

- Compression de gain : le gain effectif du LNB diminue de 1 a 10 dB
- Degradation du facteur de bruit : le facteur de bruit augmente de plusieurs dB
- Recroissance spectrale (Spectral Regrowth) : apparition de nouvelles composantes spectrales en dehors du signal 5G d'origine

CONSTAT CRITIQUE : La saturation du LNB se produit A L'ETAGE D'ENTREE – c'est-a-dire EN AMONT du point de connexion d'un filtre BPF externe (interface feed–LNB). Le filtre BPF NE PEUT donc PAS prevenir la saturation s'il est place EN AVAL du HEMT d'entree. La seule solution : utiliser un LNB equipe d'un prefiltre integre place EN AMONT du premier etage d'amplification.

3.2 Produits d'intermodulation (IMD – Intermodulation Distortion)

Le comportement non lineaire du LNB dans la zone de saturation genere des produits d'intermodulation. Pour deux signaux d'entree aux frequences f1 et f2, les produits suivants apparaissent :

$$2 \cdot f_1 - f_2 \text{ (IMD3)}$$

$$2 \cdot f_2 - f_1 \text{ (IMD3)}$$

$$3 \cdot f_1 - 2 \cdot f_2 \text{ (IMD5)}$$

$$3 \cdot f_2 - 2 \cdot f_1 \text{ (IMD5)}$$

Les produits du troisieme ordre (IMD3) sont physiquement les plus significatifs, car ils se situent pres des frequences fondamentales et n'en different que de l'ecart (f2–f1). Pour des porteuses 5G a 3 500 et 3 600 MHz : IMD3 = 3 400 MHz et 3 700 MHz – toutes deux directement dans la bande C.

3.3 Elevation du plancher de bruit (Noise Floor Elevation)

En plus de la saturation et des IMD, les interferences terrestres peuvent elever le bruit total du systeme. Le phenomene est decrit par :

$$NF_{\text{total}} = NF_{\text{LNB}} + 10 \cdot \log_{10}(1 + P_{\text{interference}} / kTB)$$

ou k est la constante de Boltzmann, T la temperature (290 K) et B la largeur de bande. Cela conduit a une degradation du rapport C/N, qui se manifeste par une augmentation du TEB (Taux d'Erreur Binaire) pour le signal numerique (DVB-S2), des temps de verrouillage plus longs ou une perte totale du MER (Modulation Error Ratio).

3.4 Desensibilisation du recepteur (Receiver Desensitisation)

La desensibilisation survient lorsqu'un signal terrestre puissant (p. ex. 5G) reduit la sensibilite du LNB/recepteur aux signaux plus faibles (satellites), meme en dehors de sa propre frequence. Le phenomene est conditionne par la non-linearite des composants actifs et est quantifie par le parametre IP3 (point d'interception du troisieme ordre) :

$$IIP3 = P_e + (P_{\text{fond}} - P_{\text{IMD3}}) / 2$$

Pour les LNB standard, l'IIP3 est typiquement de +5 a +15 dBm. Un signal terrestre puissant depasse cette valeur et le systeme entre en regime non lineaire.

3.5 Degradation du bruit de phase (Phase Noise Degradation)

Des signaux terrestres puissants peuvent affecter la stabilite de l'oscillateur local (OL) du LNB via le phenomene d'injection de bruit (noise injection). Le bruit de phase de l'OL se manifeste comme un elargissement large bande (socle de bruit de phase) autour de chaque frequence porteuse, ce qui degrade la purete de phase du signal satellitaire converti en bande de base. Pour le DVB-S2 avec des modulations d'ordre eleve (16APSK, 32APSK), cela est particulierement critique.

4. CARTE DES FREQUENCES DE BROUILLAGE – SLOVAQUIE

Le tableau suivant recapitule toutes les sources de brouillage identifiees avec leurs plages de frequences, types d'interference et gravite estimee dans les conditions de la Slovaquie.

Source de brouillage	Plage de freq.	Mecanisme d'interference	Gravite (SK)
5G NR (n78/n77)	3 300–4 200 MHz	Saturation, IMD3	■ Critique
LTE TDD B42/43	3 400–3 800 MHz	Saturation, IMD	■ Elevee
FWA / WiMAX PTMP	3 400–3 700 MHz	Saturation, IMD3	■ Elevee
Faisceaux hertziens PTP	3 600–4 200 MHz	Plancher bruit, IMD	▲ Moyenne
Radars meteorologiques	3 300–3 500 MHz	Saturation, LOS	▲ Faible-Moyenne
Radars aeronautiques	4 200–4 400 MHz	LOS, diffraction	▲ Faible-Moyenne
Liaisons backhaul terr.	4 400–5 000 MHz	LOS, directif	■ Faible (C etendu)
Harmoniques Wi-Fi 2,4 GHz	~4 800 MHz	2e harm. ~4,8 GHz	■ Minimale
ISM / alimentations dec.	Large bande	Plancher de bruit	■ Minimale

5. EVALUATION CRITIQUE DES FILTRES BPF NORSAT

5.1 Description du produit et caracteristiques declarees

Norsat International est un fabricant canadien de composants satellitaires jouissant d'une solide reputation. Sa gamme de produits BPF bande C (filtres passe-bande) est concue principalement pour eliminer les interferences 5G en amont de l'entree du LNB. Les gammes de produits 3000-BPF et BPF-C sont positionnees comme solutions pour les operateurs affectes par les interferences 5G.

Norsat declare pour ses filtres BPF les parametres suivants (selon les modeles) :

- Bande passante (Passband) : 3 625–4 200 MHz ou 3 700–4 200 MHz (selon le modele)
- Attenuation en bande rejete (Stopband Rejection) : 40–60 dB dans la bande 5G (3 300–3 600 MHz)
- Perte d'insertion (Insertion Loss) : typiquement 0,5–1 dB en bande
- Bande de garde (Guard Band) : < 20 MHz (modele BPF-C-6)

5.2 Limitations techniques d'un filtre BPF externe

Sur la base de l'analyse physique, les limitations fondamentales suivantes d'un filtre BPF externe (place entre le feedhorn de l'antenne et l'entree du LNB) peuvent etre identifiees :

Limitation 1 : La saturation se produit EN AMONT du filtre

Le filtre BPF externe est physiquement place EN AMONT de l'entree du LNB – mais en aval du feedhorn. Le signal suit donc le chemin : Satellite → Antenne parabolique → Feedhorn → (Filtre BPF) → Entree LNB. Or, l'amplificateur d'entree du LNB se trouve DIRECTEMENT APRES le connecteur d'entree du LNB. Le filtre protege donc le LNB des signaux 5G en bande dans la zone rejete, MAIS si :

- Le signal 5G se situe dans la bande passante du filtre (p. ex. 5G a 3 700 MHz et filtre passant a partir de 3 700 MHz)
- La puissance totale de tous les signaux (satellite + 5G + bruit) depasse le P1dB du LNB
- Le signal 5G genere des produits dans la bande passante du filtre via des effets non lineaires dans le cable coaxial en amont du filtre

...alors la saturation se produit meme avec le filtre, et le filtre n'est d'aucun secours.

Limitation 2 : Frequence de coupure mal specifiee

En Slovaquie, les reseaux 5G des operateurs fonctionnent dans la plage 3 490–3 600 MHz. Si la limite de passage du filtre BPF se situe a 3 600 MHz ou au-dessus, une partie du spectre 5G peut etre transmise au LNB. Le modele de filtre doit etre choisi precisement en fonction du plan de frequences reel des operateurs 5G locaux.

Limitation 3 : Le probleme source proche-source lointaine (Near-Far Problem)

Si la BS 5G se trouve a une distance inferieure a environ 200–500 m, la puissance du signal peut etre si elevee que meme une attenuation en bande rejete de 60 dB est insuffisante. Pour un signal 5G de –40 dBm a l'entree et une attenuation de 60 dB : signal filtre = –100 dBm – toujours au niveau du signal satellitaire ou au-dessus.

Limitation 4 : Non-linearite du LNB causee par des signaux hors bande

Meme lorsque le signal 5G ne se situe pas dans la bande passante du filtre, sa puissance en amont du filtre est suffisante pour que, par couplage parasite (couplage capacitif et inductif parasite) dans l'ensemble mecanique feedhorn–filtre–LNB, une partie du signal s'infiltre en dehors du chemin electrique. Cela est physiquement impossible a supprimer sans un blindage parfait.

DIAGNOSTIC DE VOTRE PROBLEME : Le fait que le BPF Norsat n'ait pas apporte d'amelioration indique un ou plusieurs des phenomenes suivants : (1) La source de brouillage est constituee de porteuses 5G/LTE dans la BANDE PASSANTE de votre filtre (c'est-a-dire au-dessus de 3 700 MHz),

pas uniquement dans la bande rejetée. (2) La saturation du LNB se produit via des signaux hors bande dont la puissance dépasse le P1dB. (3) L'interférence arrive par le câble RF ou une ouverture mécanique (pas par le feedhorn). (4) Il existe une source de brouillage en bande qu'un BPF ne peut pas éliminer (p. ex. un faisceau hertzien terrestre à 3,8 GHz).

5.3 Solutions recommandées sur la base de l'analyse scientifique

- 1. LNB intégré avec préfiltre :** Remplacement du LNB standard par un modèle avec préfiltre passe-bande intégré placé EN AMONT du transistor HEMT d'entrée (p. ex. Norsat 3200-BPF-5 ou Norsat 3100N-BPF-5). Cela élimine physiquement le problème de saturation.
- 2. Analyse spectrale du brouillage local :** Avant tout achat de filtres supplémentaires, il est indispensable de déterminer les fréquences exactes des brouilleurs locaux à l'aide d'un analyseur de spectre (p. ex. RTL-SDR avec LNA, ou équipement professionnel). C'est la seule manière de sélectionner le filtre correct.
- 3. Mesures géométriques :** La modification de l'azimut et de l'élévation de l'antenne peut, dans certains cas, éliminer le problème de visibilité directe avec une BTS 5G locale.
- 4. Blindage du feedhorn :** Ajout d'un blindage RF autour de l'ensemble feedhorn-LNB pour minimiser le couplage capacitif et inductif parasite.
- 5. Coordination avec le TU SR :** Si le brouillage est causé par une exploitation non licenciée ou un chevauchement du plan de fréquences, un signalement auprès de l'Office des télécommunications de la République slovaque (TU SR) peut conduire à une résolution réglementaire.

6. PHYSIQUE DES ONDES ET BROUILLAGE – MODELES DE PROPAGATION

6.1 Propagation en espace libre (Free Space Propagation)

La loi fondamentale de la propagation en espace libre décrit la diminution de l'intensité du signal avec la distance :

$$\text{FSPL(dB)} = 20 \cdot \log_{10}(4 \cdot \pi \cdot d \cdot f / c)$$

où d est la distance (m), f est la fréquence (Hz) et c est la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s). Pour une BTS 5G à 3,5 GHz :

$$\text{FSPL @ 100 m} = 73,3 \text{ dB} \mid \text{FSPL @ 1 km} = 93,3 \text{ dB} \mid \text{FSPL @ 5 km} = 107 \text{ dB}$$

6.2 Effets de trajets multiples (Multipath)

Dans l'environnement urbain de la Slovaquie (villes, ensembles résidentiels), les signaux 5G parviennent à l'antenne satellitaire non seulement par la voie directe en visibilité directe (LOS), mais aussi par des réflexions sur les bâtiments, les véhicules et la surface terrestre. Ces copies par trajets multiples peuvent présenter des phases et des amplitudes différentes, conduisant à :

- Un évanouissement sélectif en fréquence (Frequency Selective Fading) – différentes fréquences dans la bande C sont affectées différemment
- Des interférences constructives et destructives – certaines porteuses en bande C sont plus affectées que d'autres
- Une dispersion de polarisation – les signaux terrestres incidents présentent des polarisations diverses et peuvent affecter également les canaux en polarisation croisée

6.3 Diffraction (Diffraction par arête de couteau)

Le signal d'une BTS 5G peut surmonter des obstacles physiques (bâtiments, sommets) par diffraction. Le rayon de la zone de Fresnel pour 3,5 GHz et une distance de 1 km :

$$r_{\text{Fresnel}} = \sqrt{\lambda \cdot d} = \sqrt{0,086 \cdot 1000} \approx 9,3 \text{ m}$$

Cela signifie que les obstacles inférieurs à ~9 m ne bloquent pas physiquement le signal à cette distance – le signal se diffracte autour d'eux. Pour une antenne satellitaire située sur le toit d'un bâtiment, cela explique pourquoi même des bâtiments apparemment bien protégés peuvent ne pas éliminer le brouillage 5G.

7. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions principales

Sur la base de l'analyse scientifique exhaustive, les conclusions suivantes peuvent être formulées :

1. La réception satellitaire en bande C (3 400–4 800 MHz) est, dans les conditions de la Slovaquie, exposée à un brouillage multi-source provenant de la 5G, du LTE, du FWA et des faisceaux hertziens.
2. Les mécanismes physiques d'interférence sont multiples et se chevauchent : saturation du LNB, produits d'intermodulation IMD3/IMD5, élévation du plancher de bruit et désensibilisation.
3. Les filtres BPF externes (y compris Norsat) présentent des limitations physiques et n'éliminent ni la saturation du LNB ni les IMD générés en amont du point de filtrage.
4. Une mitigation efficace nécessite l'utilisation d'un LNB avec préfiltre interne, une analyse spectrale du brouillage local et une approche technique combinée.
5. À des fins de publication sur le portail dxsatcs.com, la présente analyse a été élaborée sur la base des sources scientifiques de l'UIT-R, du 3GPP et de publications revues par des pairs, et peut servir de référence scientifiquement fondée.

Auteur : Roman David | www.dxsatcs.com | Soutien analytique : Claude (Anthropic) | Mars 2026

Sources : Rapports UIT-R M.2109, S.2199, S.2368 | 3GPP TS 38.101 | IEEE ICC 2018 | arXiv 2312.16079 | Documentation technique Norsat | Notes d'application Rohde & Schwarz