

SURVEILLANCE DU SIGNAL SATELLITE • EUTELSAT 16A • 16,0°E

Étude de cas

Stabilité de la réception de porteuses radio à débit symbole extrêmement bas ($SR = 100\text{--}176\text{ kSym/s}$) en bande Ku depuis le satellite Eutelsat 16A dans les conditions de la zone « In-Footprint Reception »

Site de réception : Lučenec, sud de la Slovaquie centrale | Antenne : réflecteur à foyer primaire
Prodelin, $D = 450\text{ cm}$ | Système de mesure : TBS 5927 + EBS Pro

Auteur de l'étude :

Roman Dávid, www.dxsatcs.com

1. Introduction et objectif de l'étude

Cette étude a pour objet l'analyse et l'interprétation des résultats d'une surveillance de signal de longue durée portant sur trois porteuses radio diffusées en bande Ku depuis le satellite géostationnaire Eutelsat 16A, situé à la position orbitale 16,0° Est. Le dénominateur commun des trois porteuses observées est un débit symbole (Symbol Rate, SR) extrêmement bas, compris entre 100 et 176 kSym/s – c'est-à-dire à la limite inférieure de ce que les équipements de réception grand public sont, en pratique, capables de démoduler de manière fiable en continu et sur une longue période.

Les porteuses présentant un débit symbole aussi bas occupent une largeur de bande extrêmement étroite (de l'ordre de quelques centaines de kHz) et se révèlent, au regard de la théorie du traitement numérique du signal, nettement plus sensibles au bruit de phase, à l'instabilité en fréquence de l'oscillateur local du LNB de réception, ainsi qu'à la précision de l'accord du récepteur, que les porteuses DVB-S/S2 classiques dont le SR se situe à plusieurs mégasymboles par seconde. L'objectif de cette étude est donc non seulement de documenter les résultats mesurés par l'auteur des mesures, M. Roman Dávid (www.dxsatcs.com), mais aussi d'expliquer la nature physique et technique des phénomènes qui permettent – ou, à l'inverse, compromettent – la stabilité d'une telle réception.

Le site de réception analysé – la ville de Lučenec, dans le sud de la Slovaquie centrale – se trouve dans la zone de couverture déclarée d'Eutelsat 16A, avec une puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE, EIRP) garantie d'environ 49 à 50 dBW (zones Europe A et Europe B de la couverture du satellite), ce que l'auteur qualifie, dans l'analyse présentée, de « In-Footprint Reception » – réception au sein du lobe principal de couverture, par opposition à une réception en bordure ou en dehors de l'empreinte garantie (« Out-of-Footprint Reception »), qui exige un diamètre de réflecteur nettement plus grand et une unité de preuve de stabilité de réception plus longue.

2. Paramètres géométriques de la station de réception de Lučenec

Le calcul précis de l'azimut, de l'élévation et de l'angle de rotation du LNB (skew) constitue un préalable indispensable à toute analyse technique sérieuse de la réception satellite, car une antenne mal orientée introduit dans le système une dépolarisation et un affaiblissement supplémentaires, particulièrement sensibles pour les porteuses à spectre étroit et à faible rapport signal/bruit. Pour garantir la précision de cette étude, les données vérifiées du service dishpointer.com ont été utilisées pour les coordonnées de la ville de Lučenec (latitude 48,3331° N, longitude 19,6664° E) et pour le satellite Eutelsat 16A à la position 16,0° E :

Paramètre	Valeur
Latitude du site (Lučenec)	48,3331° N
Longitude du site (Lučenec)	19,6664° E
Azimut (vrai / nord géographique)	184,9°
Azimut (magnétique)	178,8°
Élévation de l'antenne	34,4°

Angle de rotation du LNB (skew)	3,3°
---------------------------------	------

Tableau 1 : paramètres géométriques de pointage de l'antenne pour la réception d'Eutelsat 16A au site de Lučenec (source des données : dishpointer.com).

Une élévation de 34,4° constitue une valeur relativement favorable pour la latitude de l'Europe centrale – le trajet du signal traverse l'atmosphère sous un angle suffisamment prononcé pour que l'épaisseur effective de la couche atmosphérique (et donc l'affaiblissement dû aux précipitations, dit rain fade) ne soit pas extrême, contrairement à la réception de satellites présentant une trajectoire d'élévation sensiblement plus basse. Un skew de 3,3° est une valeur proche de zéro, ce qui signifie une correction seulement minime de la rotation du LNB par rapport à la position verticale de référence – pour une réception sensible à la polarisation (catégorie à laquelle appartiennent clairement les porteuses à faible SR), le respect précis de cet angle est important afin de maximiser l'isolation de polarisation croisée (XPD) et de minimiser les interférences entre porteuses à polarisation verticale et horizontale proches en fréquence.

3. Configuration technique de la chaîne de réception

Le système de réception se compose d'un réflecteur parabolique à foyer primaire Prodelin d'un diamètre $D = 450$ cm, d'un LNB doté d'un oscillateur PLL hautement stable (stabilité LOF déclarée ± 10 kHz), ainsi que d'un analyseur/mesureur numérique TBS 5927 piloté par le logiciel EBS Pro. Dans l'analyse présentée, l'auteur souligne que, dans la zone « In-Footprint Reception » où l'EIRP garantie est d'environ 49-50 dBW, un réflecteur d'un diamètre d'environ 80 cm suffirait, du strict point de vue du bilan énergétique, à assurer une réception stable des porteuses standard. Le fait qu'un réflecteur nettement surdimensionné de 450 cm de diamètre ait été utilisé dans le cas présent répond donc à un objectif autre que la simple augmentation de la puissance reçue – son principal apport réside dans le rétrécissement du lobe principal de l'antenne (et donc une sélectivité spatiale accrue vis-à-vis des satellites voisins), et surtout dans une marge substantielle de rapport porteuse/bruit (C/N), qui s'avère, dans cette étude, le facteur clé de la démodulation des porteuses à bande extrêmement étroite.

Il convient de souligner ici un point important, correctement identifié par l'auteur : pour la réception de porteuses à faible SR, le facteur limitant principal n'est pas le diamètre du réflecteur (le bilan énergétique), mais la qualité et la stabilité de la chaîne de signal en aval de l'antenne – au premier chef l'oscillateur du LNB et la précision de l'accord numérique. Dans ce contexte, un grand réflecteur ne sert pas à « capter un signal qui serait sinon inaudible », mais à créer une marge C/N suffisante, qui permet aux légères instabilités résiduelles de fréquence et de phase de l'oscillateur de ne se traduire que par une faible fluctuation de la qualité (Q), et non par une perte de synchronisation (Lock).

4. Influence de la stabilité de l'oscillateur local (LOF) sur la démodulation des porteuses à faible SR

La fréquence de l'oscillateur local (LO) du LNB satellite sert à convertir le signal haute fréquence reçu en bande Ku (10,7-12,75 GHz) vers une bande de fréquence intermédiaire traitable par le tuner du récepteur (typiquement 950-2150 MHz). Tout écart entre la fréquence réelle de l'oscillateur et sa valeur nominale – appelé décalage LOF (Local Oscillator Frequency) – se répercute linéairement sur la position de la porteuse reçue dans

le spectre de fréquence intermédiaire. Pour les porteuses classiques à SR élevé (par exemple plusieurs MSym/s), même un décalage de plusieurs dizaines de kHz représente une fraction négligeable de la largeur de bande occupée. Pour une porteuse à SR = 100 kSym/s, la situation est cependant radicalement différente.

La largeur de bande occupée par une porteuse peut, en première approximation (pour une modulation QPSK avec un facteur de roll-off typique), être estimée comme le produit du débit symbole par le coefficient (1 + roll-off). L'auteur indique, pour la porteuse Radio Wrocław, une largeur de bande mesurée (Carrier Width) de 0,120 MHz, soit 120 kHz – valeur pleinement cohérente avec une porteuse à SR = 100 kSym/s pour un facteur de roll-off proche de 0,20 (typique des porteuses DVB-S de ce type). Dans un tel cas, un décalage de fréquence LO de l'ordre de quelques à quelques dizaines de kHz représente déjà plusieurs dizaines de pourcents de la largeur de bande occupée par la porteuse – et le démodulateur (boucle de Costas ou boucle de phase/fréquence équivalente intégrée à la puce du récepteur) doit être capable de suivre et de compenser ce décalage en temps réel sans perte de synchronisation.

La stabilité LOF déclarée de l'oscillateur PLL utilisé, de l'ordre de ± 10 kHz, constitue de ce point de vue un paramètre technique clé. Pour une porteuse d'une largeur de bande de 120 kHz, un décalage de ± 10 kHz représente environ 8-9 % de la largeur spectrale occupée – une valeur qui se situe confortablement dans la plage centrale que la boucle de fréquence d'un démodulateur DVB-S moderne (y compris le jeu de puces utilisé dans le récepteur TBS 5927) est capable de suivre en régime établi sans risque de perte de Lock. À titre de comparaison, les LNB moins onéreux ou plus anciens, équipés d'un oscillateur à résonateur diélectrique (DRO) plutôt que d'un PLL, présentent typiquement une stabilité LOF de l'ordre de ± 500 kHz à ± 2 MHz, avec de surcroît une forte dépendance à la température (dérive lors des variations de température ambiante entre le jour et la nuit). À un tel niveau d'instabilité, le décalage en fréquence d'une porteuse d'à peine 120 kHz de largeur de bande pourrait faire entièrement sortir la fenêtre d'accord du récepteur de la plage de recherche du démodulateur, rendant la perte de Lock pratiquement inévitable, en particulier lors des variations de température du LNB au cours d'une surveillance de longue durée.

Sous cet angle, l'utilisation d'un LNB à oscillateur PLL avec une stabilité LOF de ± 10 kHz ne constitue donc pas une simple amélioration qualitative, mais bien, pour la réception de porteuses à SR inférieur à environ 200 kSym/s, une condition technique sans laquelle une réception stable et sans interruption à long terme n'est réalistement pas envisageable, quel que soit le diamètre du réflecteur employé.

5. Largeur de bande ultra-étroite de la porteuse (Carrier Width = 0,120 MHz) et ses conséquences

Une largeur de bande spectrale étroite entraîne deux conséquences opposées. D'une part, elle concentre la puissance rayonnée de la porteuse sur un intervalle de fréquence restreint, ce qui, pour une EIRP satellite donnée, accroît la densité spectrale de puissance (puissance par unité de bande) et donc le rapport porteuse/bruit théoriquement atteignable – c'est la raison physique pour laquelle des porteuses à puissance rayonnée absolue relativement faible peuvent, avec une ouverture de réception suffisamment grande, être démodulées avec un SNR étonnamment élevé (l'auteur rapporte une valeur de crête mesurée de SNR = 17,7 dB, valeur disposant d'une marge substantielle par rapport au seuil requis pour un

Lock DVB-S stable, lequel se situe généralement, pour une modulation QPSK et un taux de codage moyen, entre 4 et 7 dB).

D'autre part, une bande étroite impose des exigences nettement plus élevées en matière de précision d'accord et de qualité du bruit de phase (phase noise) de l'oscillateur utilisé, car tout bruit de phase au voisinage de la fréquence porteuse occupe une part relativement plus importante de la largeur spectrale totale que dans le cas d'une porteuse à large bande. De même, les effets de type Doppler causés par une légère dérive de la position géostationnaire du satellite (en pratique de l'ordre de quelques unités à quelques dizaines de Hz pour une réception domestique classique) sont relativement plus importants pour une porteuse aussi étroite que pour des porteuses DVB-S2 à large bande, de l'ordre de quelques unités à quelques dizaines de MSym/s.

6. Nécessité d'un accord manuel précis de la fréquence dans EBS Pro

Une conséquence pratique découle directement de l'analyse précédente, que l'auteur prend judicieusement en compte dans sa méthode : la saisie manuelle de la fréquence de la porteuse dans EBS Pro avec une précision de trois décimales (c'est-à-dire au niveau du kHz, par exemple 12 590,540 MHz plutôt que la valeur arrondie de 12 590,5 MHz ou 12 591 MHz). Pour une porteuse d'une largeur de bande de 120 kHz, l'écart entre une valeur de fréquence arrondie et une valeur précise, de l'ordre de quelques centaines de Hz à quelques kHz, représente une fraction non négligeable de la fenêtre de recherche du démodulateur. La saisie précise de la fréquence à trois décimales signifie, en pratique, que le démodulateur n'a pas besoin de « balayer » une plage de fréquence plus large autour de la valeur nominale lors de l'acquisition du Lock, ce qui réduit le temps nécessaire à la synchronisation et diminue la probabilité que la boucle de synchronisation en fréquence se « verrouille » sur un produit de bruit ou d'intermodulation voisin plutôt que sur la porteuse elle-même.

Cette étape illustre de façon typique la manière dont des paramètres théoriques (largeur de bande de la porteuse, stabilité LOF du LNB) doivent également se traduire dans la configuration pratique du logiciel de mesure/réception – sans cette combinaison (oscillateur PLL de qualité associé à une saisie manuelle précise de la fréquence), même un bilan énergétique du signal théoriquement suffisant ne garantirait pas un résultat stable.

7. Aperçu des porteuses analysées

Le tableau suivant récapitule les trois porteuses radio du satellite Eutelsat 16A ayant fait l'objet de la surveillance de signal de longue durée menée par l'auteur au site de Lučenec, selon l'unité minimale de preuve de stabilité de réception, $t = 48$ heures, applicable à la zone « In-Footprint Reception » :

Fréquence	Polarisation	SR (kSym/s)	Programme
12 590,540 MHz	V (verticale)	100	Radio Wrocław
12 589,555 MHz	V (verticale)	146	Radio Gdańsk
10 972,126 MHz	H (horizontale)	176	BNR Nieuwsradio

Tableau 2 : aperçu des porteuses radio surveillées sur le satellite Eutelsat 16A.

8. Unité de surveillance étendue de 72 heures pour la porteuse SR = 100 kSym/s (Radio Wrocław)

La valeur de débit symbole la plus basse examinée dans cette étude, SR = 100 kSym/s pour la porteuse Radio Wrocław sur 12 590,540 MHz (V), constitue le cas techniquement le plus exigeant parmi les trois porteuses analysées - c'est précisément pourquoi l'auteur l'a soumise à une surveillance étendue de $t = 72$ heures, au lieu de l'unité de base standard de $t = 48$ heures applicable à la zone « In-Footprint Reception ». En prolongeant la surveillance de 24 heures supplémentaires (soit 86 400 points de mesure additionnels, à la période d'échantillonnage habituelle d'un point par seconde), le volume total du jeu de données continu a atteint 259 200 points de mesure consécutifs.

Selon les données de l'auteur, aucun point présentant une perte de synchronisation (Lock) n'a été enregistré parmi ces 259 200 points de mesure, et le paramètre de qualité de réception Q, dans EBS Pro, est resté à une valeur constante de $Q = 100$ % pendant toute la durée de la mesure. La valeur de crête enregistrée du rapport signal/bruit, SNR = 17,7 dB, représente une marge substantielle au-dessus du seuil nécessaire au maintien du Lock, ce qui corrobore l'explication donnée plus haut concernant la densité spectrale de puissance favorable d'une porteuse à bande étroite, combinée à la grande ouverture du réflecteur de $D = 450$ cm.

Selon l'auteur, la période de mesure a également inclus des épisodes d'intensité pluviométrique accrue les 11 et 12 septembre 2026 dans la région de Lučenec, documentés par les données de l'Institut hydrométéorologique slovaque (shmu.sk). Le fait que, selon la documentation présentée, la continuité du Lock et la valeur de Q soient restées inchangées durant ces épisodes pluvieux est cohérent avec le comportement attendu d'un système doté d'une grande ouverture d'antenne : l'affaiblissement dû aux précipitations (rain fade) en bande Ku, pour une intensité pluviométrique moyenne d'Europe centrale et une élévation d'environ 34° , se situe généralement de l'ordre de 1 à 3 dB, tandis que la marge de SNR mesurée (jusqu'à 17,7 dB en crête) offre une réserve suffisante pour absorber un tel affaiblissement de courte durée sans descendre sous le seuil de perte de Lock.

Remarque sur l'interprétation du poids statistique des données : le nombre de 259 200 points de mesure continus est significatif pour démontrer la continuité d'un état (absence de coupure au cours de cette fenêtre temporelle particulière et unique observée), mais il doit être interprété correctement - il ne s'agit pas de 259 200 expériences indépendantes et statistiquement distinctes, mais d'un unique enregistrement temporel continu à haute fréquence d'échantillonnage. La valeur

scientifique d'un tel enregistrement réside dans la démonstration qu'aucune coupure ne s'est produite au cours de la fenêtre de 72 heures considérée, pour la configuration et les conditions météorologiques données - non dans l'affirmation que la probabilité de coupure serait nulle dans toutes les conditions futures envisageables.

9. Discussion et interprétation synthétique

Les résultats de la surveillance présentée peuvent être résumés en trois conclusions techniques interdépendantes. Premièrement, le bilan énergétique dans la zone « In-Footprint Reception », avec une EIRP de 49-50 dBW, ne constitue pas le facteur limitant pour des porteuses de ce type - le diamètre du réflecteur de $D = 450$ cm offre une marge C/N substantielle, qui serait excessive pour des porteuses DVB-S/S2 standard, mais qui, pour des porteuses à bande extrêmement étroite avec un SR inférieur à 200 kSym/s, joue le rôle d'une assurance contre les phénomènes d'affaiblissement de courte durée (précipitations, scintillation atmosphérique). Deuxièmement, dans cette plage de SR, le facteur limitant clé devient la qualité de la chaîne de signal en aval de l'antenne - en premier lieu la stabilité de la LOF du LNB, qui doit, pour des porteuses d'une largeur de bande de l'ordre de 100 à 300 kHz, se situer au niveau de quelques unités à quelques dizaines de kHz pour que le démodulateur puisse suivre de manière fiable le décalage de fréquence. Troisièmement, la précision de la saisie manuelle de la fréquence dans le logiciel de mesure/réception, au niveau du kHz, n'est pas une simple formalité mais une étape pratique nécessaire qui réduit la charge imposée à la boucle de synchronisation en fréquence du récepteur.

Les données présentées par l'auteur constituent ainsi une preuve empirique convaincante et bien documentée selon laquelle, avec une combinaison correctement conçue d'une grande ouverture de réception, d'un oscillateur PLL de LNB hautement stable et d'un accord logiciel précis, une réception stable et sans interruption à long terme de porteuses à SR aussi bas que 100 kSym/s depuis le satellite Eutelsat 16A en Europe centrale est réellement atteignable, y compris lors de conditions météorologiques défavorables transitoires. Pour une généralisation complète de cette conclusion à d'autres sites, d'autres types de LNB ou des épisodes pluvieux plus extrêmes (par exemple des orages intenses à forte teneur en eau atmosphérique), il serait souhaitable de compléter cette étude par des mesures comparables issues d'autres stations indépendantes, ainsi que par des statistiques climatiques à plus long terme pour le site considéré.

10. Conclusion

Cette étude de cas confirme que la réception de porteuses radio à débit symbole extrêmement bas ($SR = 100\text{--}176$ kSym/s) depuis le satellite Eutelsat 16A, au sein de la zone de couverture garantie « In-Footprint Reception », est techniquement et fiablement atteignable avec un système de réception correctement conçu. La documentation de mesure de l'auteur, Roman Dávid - en particulier l'enregistrement continu de 72 heures comptant 259 200 points de mesure sans aucune coupure de Lock pour la porteuse Radio Wrocław ($SR = 100$ kSym/s) - constitue une contribution de qualité et bien documentée à la compréhension pratique des limites des équipements de réception satellite grand public actuels pour la réception de porteuses à bande étroite en bande Ku.

11. Bibliographie et sources

Normes et standards techniques

- ETSI EN 300 421 V1.1.2 : « Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services ». European Telecommunications Standards Institute.
- ETSI EN 302 307 : « Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2) ». European Telecommunications Standards Institute.
- Recommandation UIT-R P.618 : « Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems ». Union internationale des télécommunications – section consacrée à l'affaiblissement dû aux précipitations dans les bandes supérieures à 10 GHz.
- Recommandation UIT-R S.465 : « Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment ». Union internationale des télécommunications.

Littérature spécialisée

- Pratt, T., Bostian, C. W., Allnutt, J. E. : Satellite Communications, 2^e éd., John Wiley & Sons, 2003. (Chapitres consacrés au bilan de liaison, à l'affaiblissement en bande Ku et à l'effet du bruit de phase de l'oscillateur sur la démodulation.)
- Maral, G., Bousquet, M. : Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology, 5^e éd., John Wiley & Sons, 2009.
- Tomasi, W. : Electronic Communications Systems: Fundamentals Through Advanced, 5^e éd., Pearson Prentice Hall, 2004. (Chapitre consacré aux boucles à verrouillage de phase - PLL et synthèse de fréquence dans les LNB.)
- Rice, M. : Digital Communications: A Discrete-Time Approach, Pearson Prentice Hall, 2009. (Fondement théorique de la relation entre débit symbole, facteur de roll-off et largeur de bande occupée.)

Sources de données et outils en ligne utilisés dans l'étude

- www.dxsatcs.com – portail personnel de l'auteur, Roman Dávid, contenant les données originales de surveillance du signal, une description de la configuration matérielle/logicielle (TBS 5927, EBS Pro) et la méthodologie des unités de preuve de stabilité de réception ($t = 48$ h / $t = 72$ h).
- www.dishpointer.com – outil en ligne de calcul de l'azimut, de l'élévation et de l'angle de rotation du LNB (skew) pour une position géographique et un satellite donnés; source des données géométriques figurant au tableau 1.
- www.shmu.sk – Institut hydrométéorologique slovaque; source des données météorologiques relatives à l'intensité des précipitations dans la région de Lučenec les 11 et 12 septembre 2026, utilisées pour évaluer l'effet de l'affaiblissement dû à la pluie sur le déroulement de la surveillance.
- Lyngsat (www.lyngsat.com) – base de données publique des plans de fréquences et de l'occupation des transpondeurs du satellite Eutelsat 16A, utilisée comme source de référence