

Considérations sur l'impact des interférences dans les systèmes de partage du spectre GEO-LEO

Avril 2026



Table des matières

1. Synthèse	3
2. Implications opérationnelles	11
3. Enseignement clé	15
4. Introduction de l'étude	16
5. Champ d'application et objectif	17
6. Aspects de l'adaptation des systèmes NGSO au respect des limites EPFD	18
7. Objectifs des essais et principales mesures	23
8. Scénarios d'interférence fondamentaux	26
9. Principales caractéristiques NGSO ayant une incidence sur les interférences	27
10. Effets de propagation et de canal	28
11. Impact sur les performances des systèmes GSO	28
12. Techniques d'atténuation	29
13. Cadre mathématique d'évaluation des interférences	29
14. Méthodologie de simulation	30
15. Récapitulatif du chapitre	32
16. Description du modèle de simulation	33
17. Résultats de simulation du modèle	42
18. Impact des interférences sur l'efficacité spectrale GSO	60
Conclusions	66
Annexe 1 - Simulation avec une antenne satellitaire omnidirectionnelle	73

Tableaux

Tableau 1 : Synthèse des conditions des scénarios de simulation	39
Tableau 2 : Statistiques relatives aux satellites NGSO visibles	39
Tableau 3 : Observations propres à chaque site	60
Tableau 4 : Estimation de la dégradation de l'efficacité spectrale pour Anchorage	64
Tableau 5 : Estimation de la dégradation de l'efficacité spectrale pour Honolulu	65
Tableau 6 : Dégradation des performances des MODCOD lors des essais en laboratoire à différents niveaux de C/I	66
Tableau 7 : Valeurs EPFD correspondant à l'angle hors axe	67
Tableau 8 : Combinaison du C/N et du C/I dans les systèmes GSO sans ACM	70
Tableau 9 : Interprétation de la disponibilité dans les systèmes GSO sans ACM	71
Tableau 10 : Évolution des gains au niveau des composants dans les systèmes GSO sans ACM	72
Tableau 11 : Observations propres à chaque site	85
Tableau 12 : Caractéristiques de dépassement	87
Tableau 13 : Analyse rapide de l'arc d'évitement pour l'exemple de New York	96
Tableau 14 : Synthèse pour les douze sites de l'étude, classés par latitude	104
Tableau 15 : Valeurs typiques des principaux paramètres liés aux dépassements	105

1. Synthèse

Les satellites NGSO modernes peuvent coexister en toute sécurité avec les réseaux GSO

Les systèmes satellitaires en orbite non géostationnaire (NGSO) modernes peuvent coexister en toute sécurité avec les réseaux en orbite géostationnaire (GSO), même lorsque les limites EPFD sont nettement assouplies, mais le cadre de l'Union internationale des télécommunications (UIT) relatif à la puissance surfacique équivalente (EPFD, pour Equivalent Power Flux-Density) – inchangé depuis 1997 – reste technologiquement obsolète, imposant des coûts lourds et inutiles aux opérateurs NGSO tout en limitant la disponibilité mondiale du haut débit, sans offrir de protection supplémentaire significative aux services GSO. Les données disponibles plaident clairement en faveur d'une mise à jour formelle du cadre réglementaire : la modernisation des limites EPFD permettrait de préserver l'intégrité des services GSO, de dégager d'importants gains de capacité pour les systèmes NGSO, de réduire les coûts du haut débit, de limiter la taille des constellations et le risque associé de débris orbitaux, et d'améliorer les paramètres économiques qui déterminent, en dernier ressort, les coûts supportés par les utilisateurs finaux pour un accès haut débit fiable et indépendant du lieu d'utilisation. Le cadre actuel protège un monde qui n'existe plus.

Des règles dépassées

Les limites EPFD ont été définies il y a trente ans pour des déploiements NGSO peu denses, de grandes stations fixes en orbite terrestre géostationnaire (GEO) et des systèmes d'antennes statiques. Les constellations en orbite terrestre basse (LEO, pour Low Earth Orbit) d'aujourd'hui – Starlink, Amazon Leo, anciennement Project Kuiper, OneWeb – n'ont rien à voir avec les systèmes théoriques que ces règles avaient anticipés. Pour respecter des limites dépassées, les opérateurs NGSO doivent actuellement augmenter la taille de leurs constellations, réduire la puissance des émetteurs, désactiver des faisceaux à proximité de l'arc GEO et maintenir des angles d'évitement de 6 à 18°. Cela se traduit par une perte de couverture de 30 %, une hausse de 28 % des dépenses d'investissement et une efficacité spectrale fortement limitée. Certaines soumissions réglementaires relatives à des systèmes NGSO estiment que la modernisation des limites EPFD entraînerait une hausse de 700 % de la capacité de pointe – soit l'équivalent de l'ouverture de 13 100 MHz de nouveau spectre en bande Ka.

Ces contraintes entraînent une série de répercussions opérationnelles. Les désactivations obligatoires de faisceaux et la réduction de puissance à proximité de l'arc GEO créent des trous de couverture, diminuent la capacité instantanée et imposent des basculements plus fréquents – obligeant les opérateurs à lancer des satellites supplémentaires et à maintenir davantage de plans orbitaux simplement pour préserver la continuité du service. La gestion de la puissance et l'orientation des faisceaux deviennent des goulets d'étranglement opérationnels : les satellites doivent réduire leur puissance lorsqu'ils s'approchent de la ligne de visée GEO, et les systèmes multifaisceaux doivent désactiver des faisceaux dans certaines directions même lorsque la demande des utilisateurs est maximale, ce qui dégrade les bilans de liaison et augmente la latence. Il en résulte une asymétrie structurelle dans laquelle les

systèmes GEO fonctionnent sans modification, tandis que les opérateurs NGSO doivent s'adapter en permanence, en supportant des inefficacités opérationnelles qui n'apportent aucun bénéfice équivalent à la qualité des services GEO.

Éléments démontrant une coexistence sans risque

Cette étude associe des simulations EPFD à grande échelle réalisées sur 12 sites aux États-Unis, une analyse de la réglementation de l'UIT et des mesures d'interférence en conditions réelles afin d'évaluer si les limites actuelles reflètent le risque réel d'interférence. Les résultats sont cohérents et sans ambiguïté.

Les événements d'interférence sont rares, brefs et isolés. Sur l'ensemble des sites simulés, les dépassements EPFD se produisent environ 25 fois par jour, chacun durant 20 à 30 secondes, la durée totale de dépassement ne représentant que 0,2 à 0,6 % de la journée. Point essentiel, 95 % de la puissance d'interférence provient d'un seul satellite LEO à un instant donné, et non de l'interférence agrégée de plusieurs satellites que supposait le cadre initial de l'UIT. Les systèmes LEO modernes utilisent une planification dynamique des fréquences, recalculée en temps réel à mesure que les faisceaux se déplacent à la surface de la Terre à environ 27 000 km/h, ce qui empêche la superposition simultanée des interférences co-canal de plusieurs satellites.

Les technologies modernes d'antennes réduisent considérablement les interférences.

Les antennes réseau à commande de phase multifaisceaux, désormais standard sur les systèmes NGSO de génération actuelle, améliorent les valeurs EPFD de pointe d'environ 10 dB et réduisent les durées de dépassement d'un facteur de 3 à 10. Les opérateurs affirment qu'au vu de ces avancées, les limites actuelles offrent un niveau de protection 4 à 276 fois supérieur à ce qui est nécessaire.

La dégradation des performances GSO est minime et insignifiante sur le plan opérationnel. Les simulations montrent des pertes moyennes d'efficacité spectrale de 0,48 % aux latitudes nord (à Anchorage), et de 1,47 % aux latitudes sud (à Honolulu), ce dernier chiffre étant principalement dû à l'atténuation par la pluie, et non aux interférences LEO. Pour entraîner une perte de débit significative de 2,5 %, il faudrait que les rapports porteuse/interférence chutent à environ 14,9 dB ; les simulations montrent que le rapport porteuse/interférence (C/I, pour Carrier-to-interference) reste largement supérieur à ce seuil aux angles hors axe typiques supérieurs à 2°. Les systèmes existants de codage et modulation adaptatifs (ACM) absorbent les fluctuations de courte durée qui se produisent effectivement, évitant ainsi toute incidence sur les accords de niveau de service. Les opérateurs GEO n'ont pas besoin de modifier les équipements au sol, et les bilans de liaison GEO restent stables.

Les essais en conditions réelles confirment les simulations. Les essais sur le terrain menés par SpaceX en Roumanie (2024–2025) ont volontairement dépassé les limites EPFD avec jusqu'à huit satellites LEO se chevauchant, sans constater de dégradation préjudiciable des performances GEO, d'interruption de service ni d'instabilité des performances GEO, même lorsque les faisceaux brouilleurs s'approchaient à moins de 4 degrés de l'arc GEO.

Des mesures d'atténuation limitées permettent d'atteindre une conformité quasi complète.
L'application d'un angle d'évitement de 8° avec des antennes à réseau phasé sur un site représentatif aux États-Unis réduit le nombre d'événements de dépassement EPFD de 33 à 22, ramène l'événement le plus long de 30 à 10 secondes et réduit la durée totale de dépassement d'un facteur de 4,5, sans incidence notable sur la couverture des services NGSO.

Implications

Pour les opérateurs GSO, les résultats confirment que les systèmes NGSO modernes présentent un risque d'interférence minimal en conditions réelles. Les dépassements EPFD ne se traduisent pas par des interruptions de service ; l'ACM et l'adaptation de liaison absorbent la grande majorité des fluctuations C/I de courte durée.

Pour les opérateurs NGSO, les limites actuelles imposent des inefficacités structurelles, à savoir des constellations plus vastes, des dépenses d'investissement et des coûts d'exploitation plus élevés, ainsi qu'une efficacité spectrale réduite, que des règles actualisées pourraient éliminer, rendant ainsi possibles d'importants gains de capacité et améliorant l'équation économique.

Pour les réseaux de nouvelle génération, les enjeux vont encore plus loin. Les systèmes 5G-NTN et les architectures hybrides multiorbites nécessitent un partage flexible du spectre, une gestion dynamique des interférences et une coordination en temps réel entre les couches orbitales. Les règles EPFD actuelles, rigides, statiques et pensées pour une autre époque, sont fondamentalement incompatibles avec ces architectures et freineront leur développement si elles ne sont pas actualisées.

Mesures réglementaires recommandées

1. **Lancer un réexamen formel des limites EPFD.** Intégrer les caractéristiques des antennes modernes, le contrôle adaptatif de la puissance et l'orientation dynamique des faisceaux. Remplacer les hypothèses statiques de pire cas par des indicateurs fondés sur les performances et reposant sur les technologies actuelles.
2. **Réduire les exigences relatives aux angles d'évitement GEO.** Les données disponibles justifient de ramener les angles d'évitement obligatoires de 6-18° à 2-4°, sans dégrader les accords de niveau de service GSO.
3. **Adopter des critères d'interférence fondés sur les performances.** Remplacer les seuils statiques de puissance surfacique par des indicateurs fondés sur le rapport C/I, des tolérances de dépassement de courte durée et une conformité établie à partir de mesures en conditions réelles, en utilisant l'efficacité spectrale moyenne et la perte de débit utile comme indicateurs principaux.
4. **Formaliser les essais conjoints de coexistence entre systèmes GEO et NGSO.** L'essai mené par SpaceX en Roumanie constitue un modèle pour de futures campagnes de mesure collaboratives capables de valider les hypothèses réglementaires au regard de conditions opérationnelles réelles.

Résumé de l'étude

Les données disponibles plaident clairement en faveur d'une mise à jour de la réglementation EPFD afin de tenir compte des technologies actuelles et des réalités opérationnelles. La présente étude démontre que les **systèmes NGSO modernes peuvent coexister en toute sécurité avec les réseaux GEO, tout en ayant un impact minimal en matière d'interférences**, en particulier lorsque des diagrammes d'antenne réalistes et des techniques d'atténuation limitées sont pris en compte. Les anciennes limites EPFD, pensées pour une autre ère technologique, sont **excessivement conservatrices** et brident les performances des systèmes NGSO sans offrir de protection supplémentaire significative aux services GEO.

L'évolution chronologique du secteur des communications par satellite entre la création des règles de l'Union internationale des télécommunications en 1997, lorsque celle-ci a introduit les limites provisoires EPFD dans le cadre des opérations de partage du spectre, et 2026 se caractérise par une transition profonde, passant de la domination des systèmes géostationnaires (GSO) à une architecture orbitale complexe et multicouche dans laquelle les constellations non géostationnaires (NGSO) remettent en question les infrastructures traditionnelles. Cette évolution ne se limite pas à un changement d'altitude orbitale, mais constitue une transformation fondamentale de l'économie de la transmission de données, de la physique de la propagation des signaux et des cadres réglementaires qui régissent les « voies spatiales ». Les satellites GSO, positionnés à une altitude équatoriale de 35 786 km, ont longtemps constitué l'épine dorsale des télécommunications mondiales, en offrant une couverture régionale stable depuis un point fixe par rapport à la surface terrestre. À l'inverse, les systèmes NGSO, qui évoluent en orbite terrestre basse (LEO) à des altitudes inférieures à 2 000 km ou en orbite terrestre moyenne (MEO) entre 8 000 et 20 000 km, offrent une latence nettement plus faible et un débit utile plus élevé, au prix de vastes constellations nécessaires pour assurer une couverture mondiale continue.

Avancées techniques et convergence multiorbite

L'évolution observée depuis 1997 s'appuie sur plusieurs avancées techniques majeures qui ont brouillé les frontières entre les orbites. La première est le passage aux satellites définis par logiciel (SDS). Les charges utiles traditionnelles étaient des « répéteurs transparents », c'est-à-dire des transpondeurs essentiellement statiques. Les satellites GSO, MEO et LEO modernes intègrent désormais des charges utiles numériques capables de reconfigurer la forme des faisceaux, les niveaux de puissance et les attributions de fréquences une fois en orbite. Cela permet à des opérateurs comme SES, avec sa constellation O3b mPOWER, d'allouer dynamiquement une capacité de l'ordre du téraoctet à des navires de croisière ou à des opérations militaires en temps réel.

Deuxièmement, les progrès des technologies d'antennes, en particulier des réseaux phasés et des antennes à pointage électronique (ESA), ont permis le développement des terminaux au sol grand public nécessaires aux systèmes NGSO. Ces antennes utilisent la formation numérique de faisceaux pour suivre des satellites qui se déplacent rapidement dans le ciel, sans pièces mécaniques. Les terminaux de troisième génération, comme l'ALL.SPACE Hydra,

proposent désormais une architecture « véritablement multilink », permettant à un seul terminal de se connecter simultanément à des satellites LEO, MEO et GSO.

Bras de fer réglementaire : partage du spectre et limites EPFD

La croissance sans précédent des constellations NGSO a créé d'importantes tensions autour du partage du spectre avec les systèmes GSO historiques. Les deux technologies utilisent de plus en plus les mêmes bandes Ku et Ka, ce qui a conduit à un régime réglementaire fondé sur les limites de « puissance surfacique équivalente » (EPFD). Établies par l'UIT en 1997, les limites EPFD visaient à protéger les investissements considérables réalisés dans les infrastructures GSO contre les interférences causées par des milliers de satellites NGSO agiles.

Toutefois, le caractère « obsolète » de ces limites est désormais un point de friction. Les fournisseurs de services NGSO soutiennent que les règles EPFD, vieilles de 25 ans, reposaient sur des systèmes théoriques qui n'ont jamais été construits et surprotègent les réseaux GSO au prix d'une sous-utilisation du spectre. De grands acteurs NGSO, comme SpaceX et Amazon, ont déjà demandé à la FCC des dérogations à ces limites, en faisant valoir qu'elles restreignent la concurrence et la connectivité¹. À l'inverse, des opérateurs GSO comme Viasat et SES se sont vivement opposés à ces changements, affirmant qu'un assouplissement des limites EPFD « monopoliserait le spectre » et créerait des « risques d'interférence insurmontables » pour les applications de sauvegarde de la vie humaine².

Étude de l'impact des interférences dans les systèmes de partage du spectre GEO-LEO

Cette étude examine la manière dont les constellations modernes en orbite terrestre basse (LEO) affectent les systèmes satellitaires en orbite géostationnaire (GEO) en place lorsque les deux opèrent dans le spectre partagé des bandes Ku et Ka, dans le contexte de la réglementation pertinente de l'UIT. L'étude montre que les limites EPFD sont excessivement conservatrices et imposent des contraintes inutiles aux opérateurs NGSO. L'étude associe une modélisation théorique tenant compte des normes de communication GSO et NGSO actuelles de l'UIT, une analyse réglementaire fondée sur l'UIT, puis une simulation à grande échelle de l'impact EPFD généré par une constellation de satellites NGSO sur 12 sites précis aux États-Unis, couvrant les latitudes extrêmes du territoire américain, afin d'évaluer les impacts opérationnels réels des systèmes NGSO sur la réception au sol GEO, les résultats étant ensuite utilisés comme référence pour des mesures réelles en laboratoire, lesquelles comprenaient des modems satellitaires réels et un émulateur de canal satellite en temps réel permettant, dans un environnement entièrement contrôlé, d'analyser les interférences liées aux systèmes GSO et les performances de réception.

¹ ICFS File Nos.: Space Exploration Holdings, LLC - Federal Communications Commission, consulté le 18 mars 2026, <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-26-36A1.pdf>

² Viasat's Petition Against SpaceX Expansion | PDF | Communications Satellite - Scribd, consulté le 18 mars 2026, <https://www.scribd.com/document/838088513/Viasat-Petition-to-D>

Contexte et motivation

Deux trajets d'interférence dominant aujourd'hui, les interférences sur les liaisons de service, LEO → terminaux utilisateur GEO, et les interférences sur les liaisons de connexion, LEO → passerelles GEO. Le cadre réglementaire de l'UIT relatif aux limites EPFD est technologiquement obsolète ; la présente étude évalue donc ces limites à la lumière des évolutions récentes afin de déterminer si elles restent nécessaires ou si elles sont excessivement conservatrices et imposent des contraintes inutiles aux opérateurs NGSO.

Les limites EPFD actuelles imposent des coûts importants aux systèmes NGSO

Actuellement, pour se conformer à des limites EPFD dépassées, les opérateurs NGSO doivent accroître la taille de leurs constellations, réduire la puissance des transpondeurs, ce qui diminue la zone de couverture au sol des satellites, désactiver des faisceaux à proximité de l'arc GEO et maintenir de grands angles d'évitement, de 6 à 18°. Toutes ces mesures radicales entraînent une perte de couverture de 30 %, une hausse de 28 % des dépenses d'investissement liée à la taille des constellations, une augmentation des dépenses d'exploitation nécessaires à leur gestion et une efficacité spectrale réduite, certains dossiers déposés pour des systèmes NGSO estimant que la modernisation des limites EPFD permettrait d'augmenter la capacité de pointe de 180 % à 700 %, ce qui équivaldrait à ouvrir 13 100 MHz de nouveau spectre en bande Ka³.

Enjeu politique central : des limites EPFD dépassées

Les limites EPFD (pour Equivalent Power Flux Density, ou puissance surfacique équivalente), constituent le principal indicateur utilisé par l'UIT, à l'article 22, pour limiter la puissance de transmission des systèmes NGSO susceptible de se traduire par des interférences dans les réseaux GEO. Toutefois, ces limites ont été pensées pour les technologies des années 1990 et pour des déploiements NGSO peu denses, de grandes stations terriennes GSO, des antennes sans réseau phasé et des niveaux de puissance statiques. Les antennes NGSO modernes à réseau phasé, le contrôle adaptatif de la puissance et l'orientation dynamique des faisceaux ont considérablement réduit le risque d'interférence, les opérateurs soutenant que les limites sont 4 à 276 fois plus protectrices que nécessaire. Des essais NGSO en conditions réelles, menés par SpaceX en Roumanie en 2024-2025, ont volontairement dépassé les limites EPFD et n'ont fait apparaître aucune dégradation préjudiciable des systèmes GSO, la dégradation du rapport C/I des systèmes GSO est restée limitée, aucune interférence préjudiciable ni interruption de service n'a été observée même avec 8 satellites LEO en chevauchement, et les performances GEO sont restées stables, bien que les faisceaux brouilleurs se soient approchés jusqu'à 4 degrés, ce qui étaye l'affirmation selon laquelle les limites actuelles sont excessivement restrictives : « Le niveau d'interférence était très faible, même lorsque les faisceaux brouilleurs se sont approchés jusqu'à 4 degrés. »⁴

³ The Economic Benefits of Updating Regulations that Unnecessarily Limit Non Geostationary Satellite Orbit Systems- [The-Economic-Benefits-of-Updating-Regulations-that-Unnecessarily-Limit-Non-Geostationary-Satellite-Orbit-Systems.pdf](#) ; Before the FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION Washington, D.C. 20554, SB Docket No. 25-157-REPLY OF KUIPER SYSTEMS LLC

⁴ SpaceX Real-World Interference Measurements In Support Of Studies On Epfd Limits https://www.itu.int/dms_ties/itu-r/md/23/wp4a/c/R23-WP4A-C-0343!N20!MSW-E.docx

Principaux enseignements du cadre de simulation

1. À tout moment, les interférences sont dominées par un seul satellite LEO

Lors d'un rapprochement, la puissance reçue d'un seul satellite augmente nettement, ce qui représente environ 95 % de la contribution EPFD. Cela signifie que l'interférence est un problème lié à une seule source, et non une question d'interférence agrégée provenant de plusieurs satellites.

2. Les antennes NGSO directionnelles réduisent considérablement les interférences

Grâce aux technologies NGSO les plus récentes, principalement les antennes multifaisceaux à réseau phasé, la valeur EPFD de pointe s'améliore d'environ 10 dB, tandis que les durées de dépassement sont réduites d'un facteur 3 à 10 et que les valeurs atypiques observées aux hautes latitudes (à Anchorage et Seattle) deviennent gérables du point de vue des interférences.

3. Les simulations confirment que les événements d'interférence sont courts, rares et dominés par un seul satellite LEO

Il a été conclu que, **sur les 12 sites sélectionnés aux États-Unis**, on observe environ 25 événements de dépassement des niveaux EPFD par jour au regard des limites actuelles de l'UIT, chacun durant 20 à 30 secondes, la durée totale de dépassement ne représentant toutefois que 0,2 à 0,6 % de la journée, et que **95 % de la puissance d'interférence provient d'un seul satellite à la fois, grâce à la gestion des interférences co-canal (CCI) par planification des cofréquences, contrairement aux hypothèses initiales de l'UIT selon lesquelles plusieurs satellites utilisant les mêmes fréquences pouvaient se chevaucher simultanément**. Contrairement aux hypothèses initiales de l'UIT, selon lesquelles les systèmes NGSO reposaient sur des plans de co-fréquences **statiques**, les systèmes LEO utilisent une planification **dynamique** des fréquences. Comme les « cellules » (c'est-à-dire les faisceaux) se déplacent à la surface de la Terre à environ 27 000 km/h, le plan de fréquences doit être recalculé en temps réel par le processeur embarqué du satellite ou par un contrôleur de réseau défini par logiciel (SDN, pour software-defined network) au sol, afin d'assurer une atténuation rigoureuse des interférences co-canal.

4. La dégradation de l'efficacité spectrale GSO est minime

Pour les deux sites situés aux latitudes extrêmes nord et sud, les estimations sont les suivantes :

- ✦ Anchorage, Alaska : perte moyenne d'efficacité spectrale d'environ 0,48 %
- ✦ Honolulu, Hawaï : perte d'environ 1,47 % (principalement due à l'atténuation par la pluie, et non aux interférences LEO)
- ✦ Une perte de débit de 2,5 % ne survient que lorsque le rapport C/I tombe à environ 14,9 dB.

- Les simulations montrent que le rapport C/I reste largement supérieur à ce seuil pour les angles hors axe typiques (supérieurs à 2°).

La principale conclusion montre que, dans le cadre du partage du spectre en bande Ka, le niveau d'interférence généré par les systèmes NGSO entraîne une dégradation minimale des systèmes GSO, sans incidence sur les accords de niveau de service GSO globaux.

5. Des mesures d'atténuation limitées permettent d'atteindre une conformité quasi complète

Au vu des résultats de simulation pour les antennes directionnelles à réseau phasé sur le site de New York, l'application d'un angle d'évitement de 8° entraîne une réduction de 20 dB de la puissance NGSO, les événements de dépassement passant de 33 à 22, l'événement le plus long étant ramené de 30 à 10 secondes et le pourcentage global de dépassement étant réduit d'un facteur de 4,5. Il s'agit d'une amélioration spectaculaire en matière d'interférences, compte tenu des technologies NGSO les plus récentes fondées sur des antennes multifaisceaux à réseau phasé.

Implications stratégiques

1. Pour les opérateurs GEO

Les systèmes NGSO modernes actuels présentent un risque d'interférence minimal en conditions réelles, les technologies ACM et d'adaptation de liaison absorbent la plupart des fluctuations C/I de courte durée, et les dépassements EPFD ne se traduisent donc pas par des interruptions des services GSO.

Contrairement aux systèmes VSAT, les opérateurs GSO sans ACM (pour Adaptive Coding & Modulation) utilisent généralement, pour la conception des liaisons de diffusion en bande Ka, des codes de modulation très robustes, le plus souvent du DVB-S2 avec une modulation 8PSK et des codes FEC 2/3 ou 3/4, conçus pour atteindre un « objectif de disponibilité » de 99,7 à 99,9 %. Dans ce cas, la pénalité d'interférence par rapport à la marge d'atténuation par la pluie (soit une marge pluie de 6 à 8 dB selon **l'UIT-R P.618) n'est que de 1 à 2 dB, ce qui permet de conclure que la disponibilité des services des opérateurs GSO sans ACM dépend principalement des conditions d'affaiblissement météorologique et très peu du niveau d'interférence supplémentaire, puisque les interférences NGSO sont atténuées simultanément par les phénomènes météorologiques, tout comme le signal principal de diffusion GSO.

2. Pour les opérateurs LEO

Les limites EPFD actuelles de l'UIT imposent des contraintes inutiles, entraînant des constellations plus vastes, des dépenses d'investissement et d'exploitation plus élevées et une efficacité spectrale réduite, tandis que des règles actualisées pourraient rendre

possible une capacité de pointe supérieure de 700 % (selon les dossiers déposés par Amazon Leo).

3. Implications réglementaires pour les régulateurs (UIT, FCC, CEPT)

Les limites EPFD actuelles ne reflètent plus la réalité technologique, car elles ont été pensées pour un monde qui n'existe plus. Les systèmes LEO modernes utilisent les technologies les plus récentes, comme les antennes à réseau phasé, le contrôle adaptatif de la puissance, le pointage dynamique des faisceaux, les faisceaux spot étroits et la gestion des interférences en temps réel. Les données de la présente étude plaident en faveur d'une révision des limites EPFD afin de tenir compte de toutes les nouvelles technologies qui garantissent une atténuation fiable des interférences.

Les systèmes GEO demeurent protégés même en cas de dépassement des limites EPFD, les simulations et les tests menés sur le terrain ayant conclu à :

- ✦ L'absence d'interférences préjudiciables
- ✦ Aucune interruption de service
- ✦ Une incidence minimale sur l'efficacité spectrale
- ✦ Des fenêtres d'interférence brèves et prévisibles

L'actualisation des limites EPFD permettrait de dégager d'importants bénéfices d'intérêt public :

- ✦ Une baisse des coûts du haut débit
- ✦ Une capacité NGSO accrue
- ✦ Une amélioration de la connectivité dans les zones rurales et reculées
- ✦ Une réduction de la taille des constellations (avec une **diminution du risque de débris orbitaux**)
- ✦ Une utilisation plus efficace du spectre
- ✦ Une meilleure coexistence avec les systèmes 5G-NTN

Mesures réglementaires recommandées

1. Lancer un réexamen formel des limites EPFD :

- ✦ Intégrer les technologies modernes d'antennes
- ✦ Envisager des indicateurs dynamiques fondés sur les interférences
- ✦ S'affranchir des hypothèses statiques les plus défavorables

2. Autoriser une réduction des angles d'évitement GEO :

- ✦ Les données disponibles montrent qu'il est tout à fait possible de réduire les angles d'évitement de 6-18° à 2-4° sans dégrader les accords de niveau de service GSO.
3. Adopter des critères d'interférence fondés sur les performances :
- ✦ Des seuils fondés sur le rapport C/I
 - ✦ Des tolérances de dépassement de courte durée
 - ✦ Une conformité fondée sur des mesures en conditions réelles
 - ✦ Une estimation de la perte d'efficacité spectrale moyenne et de débit utile, permettant de déterminer le poids des différents facteurs dans la dégradation globale.
4. Encourager les essais conjoints de coexistence entre systèmes GEO et NGSO :
- ✦ L'essai mené par SpaceX en Roumanie peut servir de modèle à de futures campagnes collaboratives de mesure visant à confronter les résultats obtenus sur le terrain aux hypothèses théoriques obsolètes.

Conclusion essentielle à l'intention des régulateurs

Les systèmes NGSO modernes peuvent coexister en toute sécurité avec les réseaux GEO, même lorsque les limites EPFD sont nettement assouplies.

Le cadre EPFD actuel :

- ✦ Est technologiquement obsolète
- ✦ Surprotège les systèmes GEO dans une mesure largement supérieure au nécessaire
- ✦ Impose des contraintes importantes et inutiles aux opérateurs NGSO
- ✦ Limite la disponibilité et l'accessibilité financière du haut débit

L'actualisation des limites EPFD permettrait de :

- ✦ Préserver l'intégrité des services GEO
- ✦ Rendre possibles d'importants gains de capacité pour les systèmes NGSO
- ✦ Améliorer l'accès mondial au haut débit
- ✦ Adapter la réglementation aux technologies modernes

Conclusion générale

L'étude démontre que les **systèmes NGSO modernes peuvent coexister en toute sécurité avec les réseaux GEO, tout en ayant un impact minimal en matière d'interférences**, en particulier lorsque des diagrammes d'antenne réalistes et des techniques d'atténuation limitées sont pris en compte.

Les anciennes limites EPFD, pensées pour une autre ère technologique, sont **excessivement conservatrices** et brident les performances des systèmes NGSO sans offrir de protection supplémentaire significative aux services GEO.

« Ces valeurs correspondent à un niveau acceptable de dégradation de l'efficacité spectrale GSO, que les systèmes ACM existants peuvent compenser. »

Les données disponibles plaident clairement en faveur d'une mise à jour de la réglementation EPFD afin de tenir compte des technologies actuelles et des réalités opérationnelles.

2. Implications opérationnelles

Les constellations LEO modernes peuvent fonctionner aux côtés des systèmes GEO avec des interférences négligeables en conditions réelles. Les données issues des simulations, des essais en laboratoire et des mesures en orbite réalisées en conditions réelles montrent que les limites EPFD actuelles sont bien plus restrictives que nécessaire. Les règles actuelles, aujourd'hui dépassées et pensées pour un paysage technologique passé totalement différent, imposent d'importantes charges opérationnelles et économiques aux opérateurs NGSO, tout en n'offrant aux réseaux GEO qu'une protection supplémentaire limitée par rapport à celle que les récepteurs GEO modernes assurent déjà grâce à l'ACM, à l'adaptation de liaison et à l'amélioration des performances des antennes.

Du point de vue des politiques réglementaires, l'interaction entre les systèmes GEO et NGSO n'est plus une question purement réglementaire : elle a des conséquences opérationnelles directes sur la conception des constellations, la continuité du service, le comportement du segment sol et l'efficacité spectrale à long terme. Ces implications sont au cœur de tout effort de modernisation réglementaire.

Les opérations des constellations NGSO sont contraintes par le respect des limites EPFD

Angles d'évitement GSO obligatoires

Les opérateurs doivent maintenir des zones d'exclusion de 6 à 18° autour de la ligne de visée GEO. Cela oblige les satellites à désactiver des faisceaux, à réduire leur puissance ou à éviter de desservir des utilisateurs dans de vastes arcs géographiques.

« Les systèmes NGSO ne sont pas autorisés à émettre dans un angle d'évitement GSO donné... Cette restriction rend inutilisable une partie d'une constellation NGSO. »

Impact opérationnel :

- ✦ Trous de couverture
- ✦ Réduction de la capacité instantanée

- ❖ Augmentation de la fréquence des transferts
- ❖ Davantage de satellites requis pour assurer la continuité du service

Augmentation de la taille et du coût des constellations

Comme les satellites doivent fréquemment désactiver des faisceaux ou réduire leur puissance pour respecter les limites EPFD, les opérateurs compensent en :

- ❖ Lançant davantage de satellites
- ❖ Augmentant le nombre de plans orbitaux
- ❖ Ajoutant de la redondance afin de maintenir une couverture continue

« Les opérateurs NGSO paient aujourd'hui un surcoût de 28 % pour exploiter les satellites supplémentaires nécessaires à une continuité de service de 100 %. »

Impact opérationnel :

- ❖ Augmentation des dépenses d'investissement et d'exploitation
- ❖ Gestion de flotte plus complexe
- ❖ Charge accrue liée à l'évitement des collisions
- ❖ Obligations renforcées en matière d'atténuation des débris

La gestion de la puissance et l'orientation des faisceaux deviennent des goulets d'étranglement opérationnels

Les systèmes NGSO modernes reposent largement sur le contrôle dynamique de la puissance et l'orientation par réseau phasé. Selon les règles EPFD actuelles :

- ❖ Les satellites doivent réduire leur puissance lorsqu'ils s'approchent de la ligne de visée GEO
- ❖ L'orientation des faisceaux doit éviter les arcs GEO même lorsque la demande des utilisateurs est élevée
- ❖ Les satellites multifaisceaux doivent désactiver des faisceaux dans certaines directions

Cela entraîne :

- ❖ Des bilans de liaison sous-optimaux
- ❖ Une réduction du débit utile lors des pics de demande
- ❖ Une augmentation de la latence due aux transferts imposés

Les systèmes GEO subissent un impact opérationnel minimal

Malgré les dépassements EPFD observés dans les simulations et les essais en conditions réelles, les systèmes GEO ne présentent :

- ❖ Aucune interruption de service
- ❖ Qu'une dégradation minimale du rapport C/I
- ❖ Qu'une perte négligeable d'efficacité spectrale

« Le niveau d'interférence était très faible, même lorsque les faisceaux brouilleurs se sont approchés jusqu'à 4 degrés. »

Implication opérationnelle pour les systèmes GEO :

- ❖ Les opérateurs GEO n'ont pas besoin de modifier les équipements au sol
- ❖ L'ACM (Adaptive Coding and Modulation) absorbe les interférences de courte durée
- ❖ Les opérateurs sans ACM font face à une pénalité d'interférence minimale de 1 à 2 dB, bien inférieure aux contraintes habituelles d'affaiblissement météorologique qui déterminent la disponibilité des services
- ❖ Les bilans de liaison GEO restent stables

Les dépassements EPFD sont brefs, prévisibles et gérables sur le plan opérationnel

Ce que montrent les simulations :

- ❖ Environ 25 événements de dépassement par jour
- ❖ Chacun durant jusqu'à 20 à 30 secondes
- ❖ Dominés par un seul satellite à la fois
- ❖ Durée totale de dépassement : 0,2 à 0,6 % de la journée

Implication opérationnelle :

Les systèmes NGSO peuvent gérer ces événements au moyen de :

- ❖ Micro-ajustements de puissance
- ❖ Orientation de courte durée des faisceaux
- ❖ Arcs d'évitement localisés
- ❖ Planification prédictive

La charge opérationnelle pèse de manière disproportionnée sur les systèmes NGSO

Selon les règles actuelles :

- ❖ Les systèmes GEO fonctionnent normalement
- ❖ Les systèmes NGSO doivent s'adapter en permanence pour éviter de dépasser les limites EPFD

Cela crée une charge opérationnelle asymétrique, avec :

- ❖ d'un côté, des opérateurs GEO qui bénéficient d'une protection bien supérieure à ce qui est nécessaire
- ❖ de l'autre, des opérateurs NGSO confrontés à d'importantes inefficacités opérationnelles

La modernisation des limites EPFD améliorerait l'efficacité opérationnelle

Améliorations opérationnelles pour les systèmes NGSO :

- ❖ Des angles d'évitement plus faibles (2° à 4°)
- ❖ Moins de désactivations de faisceaux
- ❖ Une plus grande disponibilité de la puissance
- ❖ Des constellations de taille réduite
- ❖ Une fréquence des transferts moins élevée
- ❖ Une expérience utilisateur plus stable

Impact opérationnel pour les systèmes GEO :

- ❖ Aucune dégradation significative
- ❖ L'ACM continue de protéger l'intégrité des liaisons
- ❖ Aucune mise à niveau des équipements requise

Implications pour les réseaux 5G-NTN et les futurs réseaux hybrides

Le document indique que les futurs systèmes (5G-NTN, réseaux multi-orbitaires) nécessitent :

- ❖ Un partage flexible du spectre
- ❖ Une gestion dynamique des interférences
- ❖ Une coordination en temps réel entre les orbites

Les règles EPFD actuelles freinent ces évolutions en imposant des contraintes rigides et statiques incompatibles avec les architectures de réseau modernes.

Enseignement opérationnel essentiel à l'intention des régulateurs

Les éléments opérationnels sont clairs :

Les limites EPFD actuelles imposent aux systèmes NGSO de lourdes contraintes opérationnelles continues, tout en offrant aux systèmes GEO une protection bien supérieure à ce qui est nécessaire pour assurer un service fiable.

La modernisation des limites EPFD permettrait de :

- ❖ Réduire les inefficacités opérationnelles
- ❖ Réduire la taille et le coût des constellations
- ❖ Améliorer l'utilisation du spectre
- ❖ Favoriser des architectures multiorbites et 5G-NTN plus robustes
- ❖ Préserver l'intégrité des services GEO

En résumé, les implications opérationnelles plaident fortement en faveur d'une mise à jour réglementaire qui mette les règles EPFD en phase avec les technologies modernes d'antennes, le comportement réel des interférences et les besoins des réseaux satellitaires de nouvelle génération.

3. Enseignement clé

Les constellations LEO modernes peuvent coexister avec les systèmes GEO avec un niveau d'interférence maîtrisé en conditions réelles, les données issues des simulations, des essais en laboratoire et des mesures en orbite réalisées en conditions réelles montrant que les limites EPFD actuelles sont bien plus restrictives que nécessaire. Ces règles dépassées, pensées il y a près de trois décennies pour un paysage technologique totalement différent, imposent aujourd'hui d'importantes charges opérationnelles et économiques aux opérateurs NGSO, tout en n'offrant aux réseaux GEO qu'une protection supplémentaire limitée par rapport à celle que les récepteurs GEO modernes assurent déjà grâce à l'ACM, à l'adaptation de liaison et à l'amélioration des performances des antennes. L'assouplissement des limites EPFD afin de refléter les technologies actuelles permettrait de :

- ❖ Préserver l'intégrité des services GEO, comme le démontrent les essais de dépassement en conditions réelles, par simulation et en laboratoire, qui ne révèlent aucune interférence préjudiciable.
- ❖ Rendre possibles d'importants gains d'efficacité pour les systèmes NGSO, notamment une réduction de la taille des constellations, une diminution du nombre de faisceaux désactivés et une amélioration considérable de l'utilisation du spectre.
- ❖ Réduire les coûts mondiaux du haut débit en diminuant le besoin de constellations surdimensionnées et de contraintes de puissance inutiles.

- ❖ Favoriser des architectures multiorbites et 5G-NTN plus avancées, qui dépendent d'une gestion flexible et dynamique des interférences plutôt que d'hypothèses rigides héritées des années 1990.
- ❖ Améliorer la durabilité orbitale, puisqu'un nombre réduit de satellites serait nécessaire pour obtenir la même couverture et la même capacité, avec moins de débris, une moindre consommation de matériaux et, à terme, de meilleures économies d'échelle se répercutant sur les coûts d'accès des utilisateurs finaux à un Internet haut débit fiable et indépendant du lieu d'utilisation.

En résumé, l'enseignement central est le suivant : le cadre EPFD n'a pas suivi le rythme des technologies satellitaires modernes, et son actualisation apporterait des bénéfices substantiels d'intérêt public sans compromettre la protection des systèmes GEO. Les données montrent que la coexistence n'est pas seulement possible, elle est déjà une réalité sûre.

4. Introduction de l'étude

Avec l'avènement des nouvelles communications par satellites en orbite terrestre basse (LEO), qui offrent une meilleure couverture et des débits haut débit accrus, un nouveau mode d'exploitation harmonisé avec les systèmes de communication par satellites en orbite terrestre géostationnaire (GEO) déjà établis est nécessaire, principalement par la gestion du partage du spectre.

Les opérateurs GEO et LEO partageant actuellement les mêmes bandes de fréquences, comme la bande Ku (12-18 GHz) et la bande Ka (26,5-40 GHz), des techniques de partage du spectre doivent être déployées pour éviter les interférences. En règle générale, deux grands types d'interférences sont envisagés :

Interférences sur les liaisons de service (utilisateur-satellite/satellite-utilisateur)

Ce mécanisme se produit lorsqu'un terminal utilisateur GEO (station terrienne) reçoit le signal souhaité de son satellite GEO, mais reçoit aussi involontairement des interférences provenant d'un ou plusieurs satellites LEO de passage (liaison descendante), ou lorsque le satellite LEO se trouve à proximité du trajet en ligne de visée entre le terminal GEO et le satellite GEO (interférence liée à l'alignement). De même, les liaisons montantes des satellites LEO peuvent interférer avec le récepteur du satellite GEO.

Impact principal : dégradation de la qualité du signal de l'utilisateur GEO, entraînant une réduction du débit utile, une hausse du taux d'erreur binaire (BER) et de possibles interruptions de service.

Interférences sur les liaisons de connexion (passerelle-satellite/satellite-passerelle)

Ce mécanisme apparaît lorsque la station passerelle GEO (station terrienne qui achemine les données vers et depuis le satellite GEO) peut subir des interférences dues aux signaux des satellites LEO. En raison de la grande sensibilité des récepteurs des passerelles GEO et

du nombre potentiellement élevé de satellites LEO passant au-dessus d'elles, l'interférence agrégée peut être importante.

Impact principal : les interférences sur les liaisons de connexion GEO peuvent être particulièrement perturbatrices, car ces liaisons transportent un trafic de grande capacité pour tout un faisceau GEO ou tout un transpondeur.

Limites de puissance surfacique équivalente (EPFD)

Les limites de **puissance surfacique équivalente (EPFD)**, établies par le Règlement des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT), principalement à l'article 22, constituent le principal outil réglementaire de gestion des interférences LEO vers GEO.

Par définition, l'EPFD est une mesure conçue pour tenir compte de l'**interférence agrégée** produite par l'ensemble d'un système en orbite non géostationnaire (NGSO, par exemple LEO) sur une antenne de station terrienne GEO donnée. Il s'agit d'une valeur calculée qui convertit la somme des émissions de tous les satellites LEO visibles, en tenant compte de la directivité de l'antenne GEO, en une puissance surfacique (PFD) équivalente provenant d'une source théorique unique.

Les limites EPFD ont pour finalité de constituer les « limites strictes » que les constellations LEO doivent respecter afin d'assurer la protection des systèmes GEO existants, **sans** nécessiter de coordination individuelle avec chaque réseau GEO dans le monde. La conformité est généralement démontrée au cours du processus de dépôt auprès de l'UIT.

La difficulté aujourd'hui est que les limites EPFD initiales ont été fixées il y a plus de 25 ans, à une époque où les systèmes LEO n'étaient encore qu'envisagés et où les systèmes GEO remplissaient des missions opérationnelles différentes. Les règles de l'Union internationale des télécommunications (UIT) relatives à la puissance surfacique équivalente, élaborées il y a 28 ans, limitent la capacité et l'efficacité des systèmes NGSO du service fixe par satellite (FSS), ce qui réduit la disponibilité et augmente le coût des services fournis par ces systèmes NGSO FSS. Adoptées à titre provisoire en 1997 puis définitivement en 2000⁵, les limites EPFD ont été élaborées pour quantifier le niveau de protection des réseaux GSO contre les interférences inacceptables au titre du numéro 22.2 du Règlement des radiocommunications. Ces limites visaient à assurer la protection des réseaux GSO contre les interférences inacceptables provenant des transmissions NGSO FSS. Les principaux acteurs NGSO estiment que les règles EPFD en vigueur sont dépassées et qu'elles privent les consommateurs d'un plus grand nombre de services fournis par des systèmes satellitaires LEO à des prix plus bas⁶. Les technologies satellitaires ont considérablement progressé au cours des 28 dernières années. Les limites EPFD de 1997 sont dépassées, car elles ne tiennent pas compte des évolutions technologiques qui réduisent la probabilité d'interférence, notamment les suivantes : des

⁵ Voir Final Acts WRC-97, Article S22 ; Final Acts WRC-2000, Article S22 ; et Resolution 58 (WRC-2000).

⁶ The Economic Benefits of Updating Regulations that Unnecessarily Limit Non Geostationary Satellite Orbit Systems Harold Furchtgott-Roth

faisceaux spot plus petits et orientables pour les systèmes NGSO FSS⁷ ; une géométrie et une conception améliorées des constellations NGSO ; des technologies de codage et de modulation adaptatifs permettant aux réseaux GSO de maintenir leurs liaisons face aux dégradations naturelles ; et des équipements de stations terriennes améliorés, tant pour les réseaux GSO que pour les systèmes NGSO FSS.

Avec l'arrivée des nouvelles **constellations** de satellites LEO multiorbites et le déploiement de différents cas d'usage des opérations GSO, tels que les services de type haut débit et les **antennes utilisateur GEO** plus petites et plus sensibles, présentant un gain de lobes secondaires relativement plus élevé, un débat et des travaux sont en cours au sein de la CMR (Conférence mondiale des radiocommunications) afin de réexaminer ces limites et, potentiellement, de les mettre à jour pour refléter les technologies et la densité actuelles⁸.

5. Champ d'application et objectif

Ce document analyse les mécanismes d'interférence et les impacts au niveau système introduits par les constellations en orbite non géostationnaire (NGSO), principalement en orbite terrestre basse (LEO), sur les services géostationnaires (GSO) en place, y compris les systèmes GEO et les systèmes MEO pertinents, opérant dans les bandes satellitaires K (Ku et Ka). L'analyse porte à la fois sur les liaisons aller et retour, les effets d'interférence agrégée et les contraintes réglementaires et techniques applicables aux déploiements NGSO haut débit modernes.

La première partie du document comprend l'analyse théorique, fondée sur des modèles de simulation logicielle, qui couvre les principaux aspects de l'impact du partage du spectre et, en particulier, l'influence du niveau EPFD des systèmes NGSO sur une station de réception GSO au sol.

Les annexes présentent des cas d'essai RF réels en laboratoire, fondés sur des modems DVB-S2 et sur l'émulateur de canal satellite CELEOS, avec les résultats associés.

6. Aspects de l'adaptation des systèmes NGSO au respect des limites EPFD

Plusieurs documents ont été examinés afin de déterminer le consensus scientifique quant à l'approche à adopter pour l'analyse globale du système. Ci-dessous figurent certains extraits jugés pertinents pour la mise en place du futur cadre d'essai.

Extrait de : [SB 25-157 CCIA Comments Modernizing Spectrum Sharing](#)

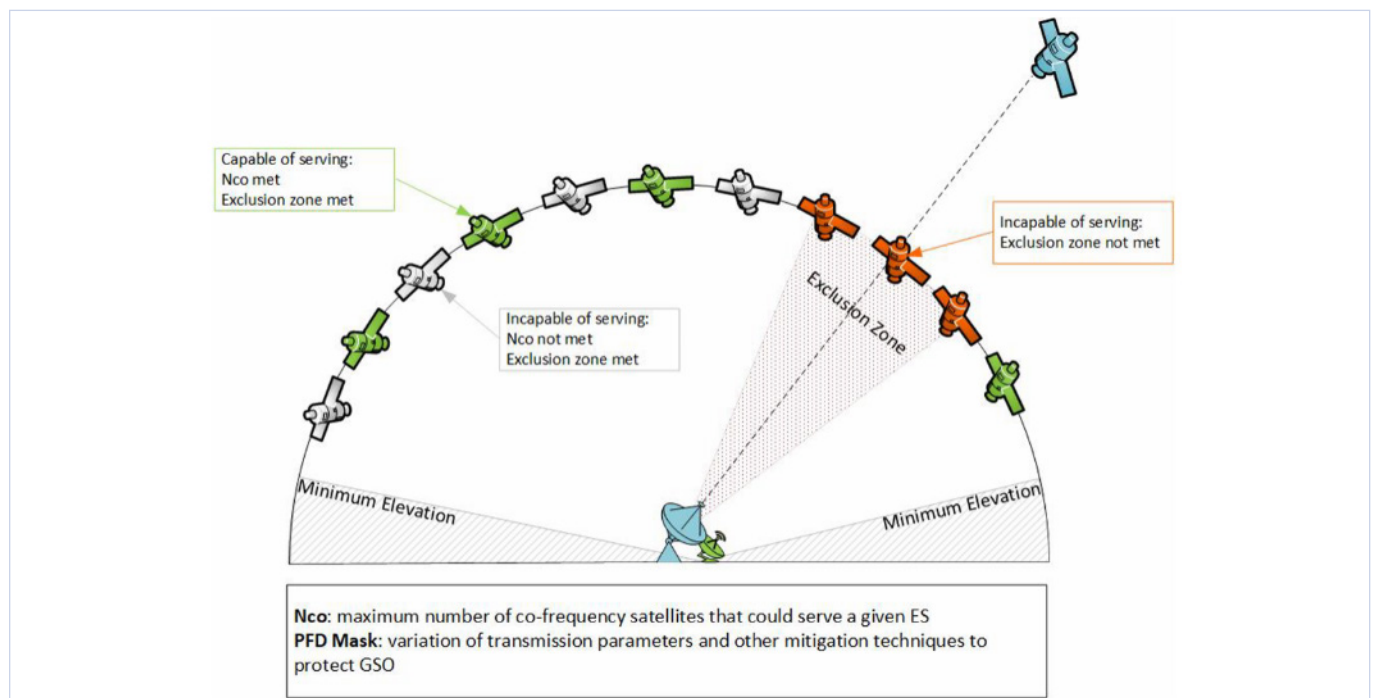
⁷ Voir, par exemple, Telesat Technical Information Supplement to Schedule S, FCC, 4 novembre 2021, [13337277.pdf \(fcc.report\)](#) ; OneWeb Technical Information Supplement to Schedule S, FCC, [2379706.pdf \(fcc.report\)](#) ; SpaceX, Technical Information Supplement to Schedule S, FCC, 15 novembre 2016, [1158350.pdf \(fcc.report\)](#) ; Technical Appendix to the Application of Kuiper Systems LLC for Authority to Launch and Operate a Non-Geostationary Satellite Orbit System in the Ka-band Frequencies, [Technical Appendix \(arstechnica.net\)](#), 4 juillet 2019.

⁸ [A Novel Frequency Reuse Model for Co-Existing LEO and GEO Satellites - SmartSat CRC](#)

Pour respecter les limites EPFD existantes, les systèmes NGSO doivent adapter leurs opérations de quatre manières :

- ❖ limiter leur puissance RF,
- ❖ orienter leurs antennes de manière à éviter les systèmes GSO,
- ❖ actualiser les angles d'élévation,
- ❖ Globalement, limiter le nombre de satellites capables de desservir les utilisateurs au sol⁹.

Figure 1 : Interaction globale GSO-NGSO



L'impact cumulé des restrictions imposées aux systèmes NGSO ne se limite pas à une seule région. Par nature, les satellites NGSO entrent et sortent constamment de ces zones d'exclusion nécessaires au respect des limites EPFD lorsqu'ils orbitent autour de la Terre. Cela peut déclencher un effet en cascade : les satellites peuvent alors être dans l'impossibilité de desservir plusieurs régions, ce qui entraîne une perte importante de capacité et des lacunes de couverture pour l'ensemble de la constellation NGSO. En outre, cela peut rendre nécessaire le lancement de satellites supplémentaires, ce qui augmente le coût global de la constellation.

⁹ ITU Working Party 4A, Working document towards a preliminary draft new Report, (19 avril 2024) ITU-R Doc. R23-WP4A-C-0084, <https://www.itu.int/md/R23-WP4A-C-0084/en> (consulté pour la dernière fois le 14 juillet 2025).

Les angles d'évitement GSO entravent l'exploitation des systèmes satellitaires NGSO¹⁰

Les systèmes NGSO ne sont pas autorisés à émettre dans un angle d'évitement GSO donné en direction d'une station terrienne GSO. Cette restriction rend inutilisable une partie d'une constellation NGSO.

En résumé :

- ❖ avec un angle d'exclusion GSO de 6 degrés, la perte de couverture est d'environ 10 % ;*
- ❖ à 16 degrés, la perte de couverture triple pour atteindre 30 %.*

Extrait de [la réponse de Leo sur l'EPFD du 27 août 2025](#) :

*Le dossier montre déjà un soutien massif à la proposition de la Commission visant à refondre le régime de partage du spectre vieux de plusieurs décennies entre les systèmes satellitaires GSO et NGSO, à savoir les limites de puissance (exprimées sous forme de « puissance surfacique équivalente » ou « EPFD ») élaborées par l'Union internationale des télécommunications (« UIT ») et incorporées par renvoi dans les règles de la FCC (les « **limites EPFD de l'UIT** »).*

Le remplacement des limites EPFD de l'UIT, excessivement protectrices, par un régime de protection raisonnable pourrait réduire de plus de moitié les coûts de déploiement des systèmes NGSO tout en augmentant leur capacité de pointe jusqu'à 700 %³. Rien que dans la bande Ka, remplacer les limites EPFD de l'UIT par une méthodologie fondée sur la dégradation du débit utile équivaldrait à ouvrir 13 100 MHz supplémentaires de spectre de premier ordre aux opérations NGSO. Ces avantages n'auraient aucune conséquence significative pour les opérations GSO, les éléments non contestés du dossier démontrant que celles-ci ne subiraient que des impacts correspondants faibles, voire indétectables, sur leurs opérations co-fréquence⁴.

Leo Systems LLC, filiale détenue à 100 % par Amazon.com Services LLC (collectivement, « Amazon »), soumet respectueusement la présente réponse à l'avis de projet de réglementation (« Notice ») de la Federal Communications Commission (« FCC » ou la « Commission »), qui examine la méthodologie de partage du spectre régissant l'exploitation des systèmes du service fixe par satellite (« FSS ») en orbite non géostationnaire (« NGSO ») et des systèmes FSS en orbite géostationnaire (« GSO ») dans les bandes 10,7-12,7, 17,3-18,6 et 19,7-20,2 GHz.

Dans ses observations, Amazon a fait valoir que les limites EPFD de l'UIT « sont inutilement prescriptives, profondément dépassées et excessivement protectrices des opérations GSO », et

¹⁰ 37 « Quels angles d'évitement de l'arc GSO, c'est-à-dire quelles restrictions quant aux directions dans lesquelles les systèmes NGSO FSS peuvent orienter les faisceaux de leurs antennes afin de prévenir les événements d'interférence liés à l'alignement avec les réseaux satellitaires GSO, les opérateurs NGSO adoptent-ils pour respecter les limites EPFD actuelles, et en quoi ces angles diffèrent-ils de ceux avec lesquels ils pourraient fonctionner dans le cadre de limites moins restrictives ? », NPRM ¶ 23. 38 Int'l Telecomm. Union Working Party 4A, Working document towards a preliminary draft new Report (19 avril 2024), ITU-R Doc. R23-WP4A-C-0084, <https://www.itu.int/md/R23-WP4A-C-0084/en> (consulté pour la dernière fois le 14 juillet 2025).

qu'elles doivent être remplacées. Amazon a expliqué que ces limites avaient été élaborées il y a près de trente ans sur la base des technologies des années 1990 et d'un système NGSO qui n'a jamais été déployé. **Amazon a montré que les limites EPFD de l'UIT sont excessivement protectrices : elles sont 4 à 5 fois plus protectrices que les protections GSO-GSO de l'UIT, qui prémunissent contre tous les niveaux d'interférence sauf les niveaux négligeables⁸, et 276 fois plus protectrices dans la bande Ka supérieure que les niveaux recommandés ailleurs par l'UIT⁹, n'autorisant que des hausses indétectables de l'indisponibilité et des baisses du débit utile relatif d'au plus 0,162 % dans la bande Ka inférieure et 0,0148 % dans la bande Ka supérieure¹⁰.** Pour le formuler plus concrètement, les limites EPFD de l'UIT permettent effectivement aux systèmes NGSO de causer environ une seconde et demie d'indisponibilité supplémentaire aux systèmes GSO tous les 50 ans. Quel que soit le critère retenu, les limites EPFD de l'UIT protègent les systèmes GSO non seulement contre les interférences nuisibles ou inacceptables, mais aussi contre l'éventualité même d'une interférence.

Ces problèmes sont particulièrement marqués dans la bande Ka supérieure. Les limites EPFD de l'UIT exigent des niveaux EPFD nettement inférieurs à ceux de la bande Ka inférieure dans la grande majorité des cas, par exemple -175,4 dB (W/m²) contre -166 dB (W/m²)²¹. Comme Amazon l'a expliqué dans l'étude jointe à ses observations (la « Leo EPFD Study »), cela signifie qu'il faut réduire considérablement les niveaux de puissance NGSO lors de l'utilisation de la bande Ka supérieure, et protéger les opérateurs GSO bien au-delà même des interférences négligeables qu'ils pourraient subir dans la bande Ka inférieure.²

Extrait des [mesures d'interférence en conditions réelles de SpaceX à l'appui des études sur les limites EPFD](#)

En 2024, SpaceX a lancé une série de campagnes de mesure des interférences en conditions réelles dans plusieurs pays des différentes régions de l'UIT. L'objectif est de démontrer, données mesurées à l'appui, que lorsque les limites EPFD de l'article 22 sont dépassées, les services GSO ne subissent pas d'interférences inacceptables. Le premier essai a été mis en place en Roumanie en juillet 2024, s'est déroulé sur plusieurs mois et s'est achevé en mars 2025. Quatre autres essais sont actuellement en cours dans d'autres pays, et plusieurs autres seront menés au cours de l'année 2025. Cette contribution porte sur les résultats de l'essai mené en Roumanie, et SpaceX entend soumettre l'ensemble complet des résultats obtenus dans les autres pays de test lors de la réunion du WP 4A d'octobre 2025.

Les données mesurées doivent venir compléter le rapport sur les études EPFD actuellement en cours d'élaboration par le WP 4A.

Starlink est un système flexible, dont les émissions et les paramètres opérationnels peuvent être contrôlés par le centre de contrôle du réseau. Pour cette campagne d'essai en Roumanie, ainsi que pour les essais en cours et les essais ultérieurs, les opérations de Starlink au-dessus

de la zone de test (rayon de 15 à 25 km) ont été modifiées pendant toute la durée de l'essai, et les limites EPFD ont été volontairement dépassées.

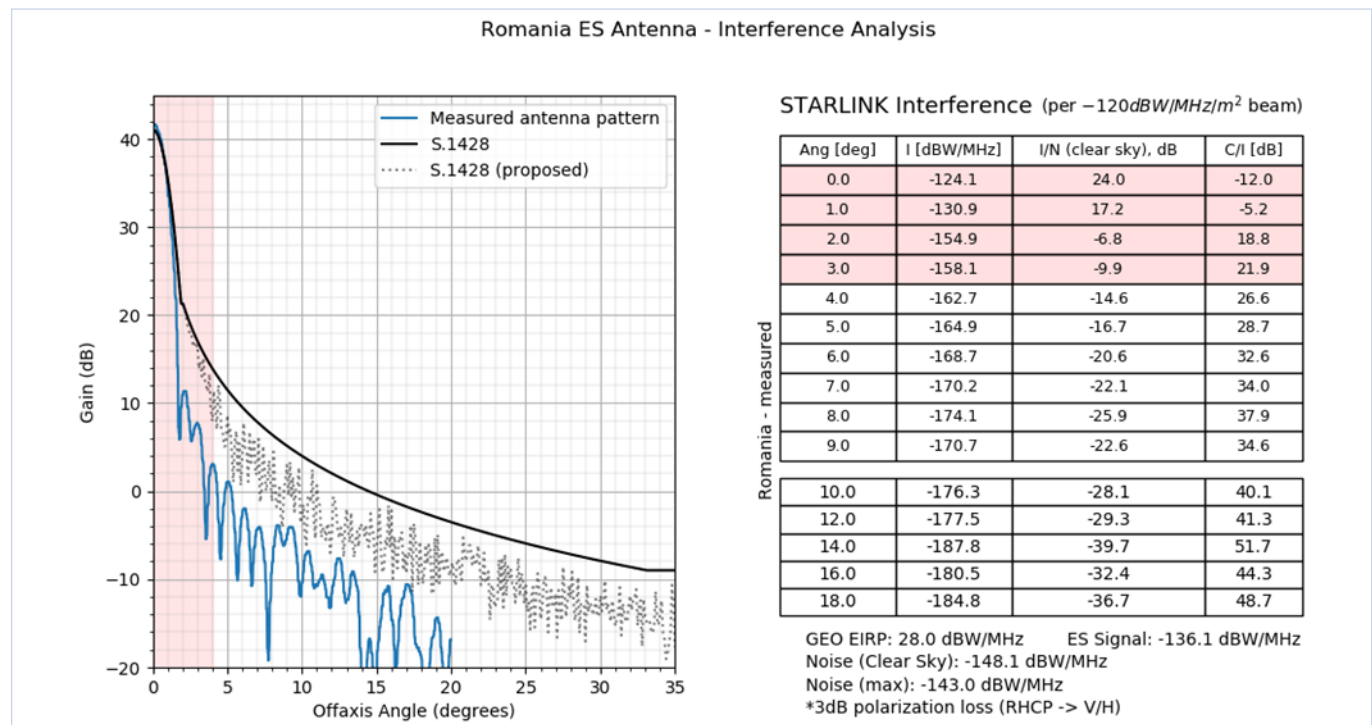
Pour l'expérience, le signal descendant en bande Ku (10,7-12,75 GHz) du satellite GEO Intelsat 39, situé à 62° E, a été utilisé.

Les essais en conditions réelles de SpaceX sont aujourd'hui les plus concluants, car ils ont évalué l'impact sur des services GSO en direct ainsi que les mesures de dégradation associées, confirmant avec précision ce que les études théoriques précédentes avaient également montré, à savoir que la dégradation globale des services GSO est insignifiante au regard du gain de couverture des services NGSO.

Les essais de SpaceX ont réduit l'angle alpha de 4 à 2 degrés, tout en mesurant le niveau du rapport C/I et la désensibilisation. Jusqu'à 8 satellites se chevauchant simultanément ont été pris en compte pour ces essais, avec des configurations nco4 et nco8 testées dans des faisceaux co-fréquence.

Le niveau d'interférence est resté très faible, même lorsque les faisceaux brouilleurs se sont approchés à 4 degrés seulement de la direction de pointage de l'antenne.

Figure 2 : Analyse des interférences selon SpaceX

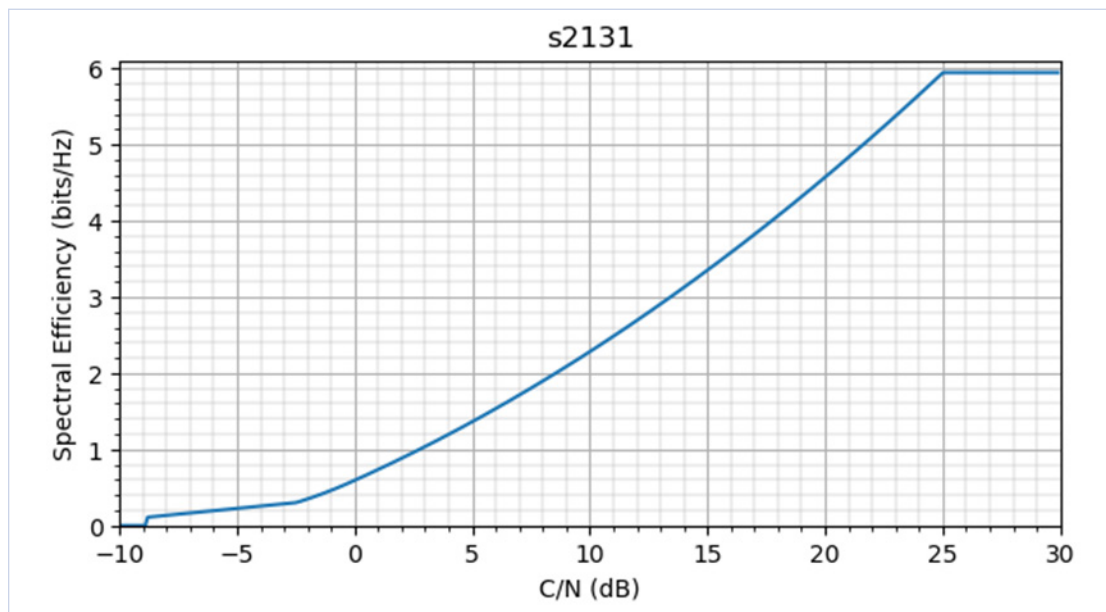


Cette figure montre la relation théorique entre l'angle de séparation du satellite brouilleur et le niveau d'interférence correspondant.

Dégradation du débit utile – Conclusions

La technologie DVB-S2X prend en charge le codage et la modulation adaptatifs, conçus pour fonctionner sur une plage de niveaux de signal, le débit de données étant ajusté de manière adaptative en fonction de l'environnement du signal. Les interférences de signal augmentent effectivement le niveau de bruit du récepteur et réduisent le rapport signal/bruit (C/N). Les différents systèmes réagissent différemment à ces variations, et la recommandation [UIT-R S.2131](#) montre comment modéliser le débit de données en fonction de l'intensité du signal.

Figure 3 : Recommandation UIT-R S.2131 montrant comment modéliser le débit de données en fonction de l'intensité du signal



Il a également été conclu qu'une désensibilisation de 0,1 dB du rapport C/N, de 15 à 14,9 dB, entraîne une réduction insignifiante de l'efficacité spectrale, d'environ 0,7 %, qui passe de 3,35 à 3,27 bit/Hz.

Selon les limites EPFD actuellement fixées par l'UIT, les systèmes NGSO FSS peuvent nécessiter des angles d'évitement de l'arc GSO compris entre 6 et 18 degrés, en fonction du nombre de satellites de leur constellation et du gain de leurs antennes satellitaires. L'utilisation d'un angle d'évitement de l'arc de huit degrés dans des démonstrations EPFD accessibles au public a été soumise au Bureau des radiocommunications de l'UIT et évaluée par celui-ci¹¹. Des simulations en laboratoire ont été réalisées afin de déterminer le bon compromis entre le nombre optimal de satellites, les plans orbitaux et l'angle minimal d'évitement de l'arc, en supposant qu'un angle alpha allant jusqu'à quatre degrés suffisait à protéger les réseaux GSO contre les interférences de courte durée dans le cadre des nouvelles limites d'interférence. La conclusion révèle une économie de 28 % sur les dépenses d'investissement liées aux satellites

¹¹ Voir « EPFD data and EPFD examination results », Secteur des radiocommunications, UIT, <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/Pages/epfdData.aspx>

nécessaires pour assurer une connectivité continue, autrement dit, les opérateurs NGSO supportent aujourd'hui un surcoût de 28 % pour exploiter les satellites supplémentaires requis afin d'offrir une continuité de service de 100 %, tout en respectant les objectifs conservateurs de protection à court terme prescrits par les limites EPFD actuelles. Les coûts d'exploitation augmenteront également en raison de la gestion quotidienne d'un système NGSO plus vaste ainsi que des installations au sol, des équipements et du personnel supplémentaires nécessaires à l'exploitation des satellites additionnels¹².

En définitive, la plupart des essais et analyses ont permis de quantifier l'angle minimal d'évitement de l'arc GSO susceptible d'entraîner une certaine augmentation du niveau EPFD, avec un impact sur la sensibilité du récepteur de la station terrienne GSO ainsi que sur l'efficacité spectrale, laquelle affecte le codage et la modulation adaptatifs en raison de valeurs plus élevées du rapport C/I.

Néanmoins, les limites EPFD imposées par l'UIT sont définies de manière à protéger les performances DVB-S2X ; il convient donc d'examiner les performances de codage et de modulation adaptatifs liées au DVB2, en tenant compte d'un niveau EPFD spécifique atteint pour un angle d'évitement GSO ciblé donné et une configuration Nco spécifique (4-8).

Plans d'atténuation prévus

Les stratégies d'atténuation actuelles s'appliquent aux domaines réglementaire, spatial, spectral et énergétique :

Domaine	Technique d'atténuation	Description
Réglementaire	Conformité aux limites EPFD	Les systèmes LEO doivent démontrer leur conformité aux limites EPFD de l'UIT (par exemple, au moyen d'une validation logicielle) afin de limiter au maximum l'interférence agrégée.
Spatial	Zones d'exclusion/isolement	Les satellites LEO peuvent appliquer un angle d'exclusion ou une zone d'exclusion autour de la ligne de visée des stations terriennes GEO, en se désactivant ou en réduisant leur puissance lorsqu'ils la traversent. Cela protège la liaison GEO, mais crée des trous de couverture temporaires pour le système LEO.
Spatial	Formation de faisceaux / annulation de gain	Les systèmes GEO comme LEO peuvent utiliser des antennes avancées à réseau phasé pour orienter dynamiquement les faisceaux et créer des zones d'annulation (zones de gain minimal) dans la direction de la source d'interférence (satellites LEO ou terminaux GEO).
Énergétique	Contrôle adaptatif de la puissance (APC)	Les satellites LEO peuvent ajuster dynamiquement leur puissance d'émission en fonction de leur position orbitale et de leur proximité avec les systèmes GEO, en réduisant leur puissance lorsqu'ils se trouvent près de la ligne de visée GEO.
Spectral	Radio cognitive (CR)	Les systèmes LEO peuvent détecter l'état du spectre et adapter de manière autonome leurs paramètres d'exploitation (fréquence, puissance, faisceau) afin d'exploiter les trous spectraux ou de limiter les interférences causées à l'utilisateur GEO principal.

¹² <https://allianceforsatellitebroadband.org/wp-content/uploads/2023/10/The-Economic-Benefits-of-Updating-Regulations-that-Unnecessarily-Limit-Non-Geostationary-Satellite-Orbit-Systems.pdf>

Domaine	Technique d'atténuation	Description
Modulation	Codage et modulation adaptatifs (ACM)	Les systèmes GEO peuvent utiliser des schémas de modulation et de codage plus robustes, à débit plus faible (comme dans le DVB-S2X), pendant les périodes de forte interférence afin de maintenir une liaison, mais avec un débit utile réduit.

7. Objectifs des essais et principales mesures

Limites de puissance surfacique équivalente (EPFD)

Les limites de **puissance surfacique équivalente (EPFD)**, établies par le Règlement des radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UIT), à l'article 22, constituent le principal outil réglementaire de gestion des interférences LEO vers GEO.

- ❖ **Définition de l'EPFD :** l'EPFD est une mesure conçue pour tenir compte de l'interférence **agrégée** produite par l'ensemble d'un système en orbite non géostationnaire (NGSO, par exemple LEO) sur une antenne de station terrienne GEO donnée. Il s'agit d'une valeur calculée qui convertit la somme des émissions de tous les satellites LEO visibles, en tenant compte de la directivité de l'antenne GEO, en une puissance surfacique (PFD) équivalente provenant d'une source théorique unique.
- ❖ **Finalité :** les limites EPFD sont des « limites strictes » que les constellations LEO doivent respecter afin d'assurer la protection des systèmes GEO existants, **sans** nécessiter de coordination individuelle avec chaque réseau GEO dans le monde. La conformité est généralement démontrée au cours du processus de dépôt auprès de l'UIT.
- ❖ **Difficulté :** les limites EPFD initiales ont été fixées à une époque où les systèmes LEO n'étaient encore qu'envisagés et où les systèmes GEO répondaient à des cas d'usage différents de ceux d'aujourd'hui. Compte tenu de la stratégie actuelle de partage du spectre pour les communications par satellite avec des satellites LEO multiorbites, ainsi que du déploiement de différents cas d'usage des opérations GSO, tels que les services de type haut débit et les **antennes utilisateur GEO** plus petites et plus sensibles, présentant un gain de lobes secondaires relativement plus élevé, un débat et des travaux sont en cours au sein de la CMR (Conférence mondiale des radiocommunications) afin de réexaminer ces limites et, potentiellement, de les mettre à jour pour refléter les technologies et la densité actuelles.

Niveaux absolus de puissance reçue et rapport C/I

La dégradation des performances est fondamentalement une question de bilan de liaison définie par le **rapport porteuse/interférence (C/I)**.

- ❖ Niveaux absolus de puissance reçue : la puissance reçue absolue (P_R) du signal GEO souhaité est calculée à partir de la puissance isotrope rayonnée équivalente du satellite GEO ($EIRP_{GEO}$), de l'affaiblissement de propagation (L_{Path}) et du gain du récepteur de la station terrienne GEO, G_R :

$$P_{R,GEO} = EIRP_{GEO} - L_{Path,GEO} + G_{R,GEO} \quad (\text{en dBW})$$

- ❖ La puissance d'interférence totale reçue (I_{LEO}) correspond à la puissance agrégée provenant de tous les satellites LEO visibles (i), qui varie dynamiquement en raison du déplacement des satellites LEO :

$$I_{LEO} = \sum_i P_{R,i} = \sum_i (EIRP_{LEO,i} - L_{Path,i} + G_{R,i}) \quad (\text{en dBW})$$

- ❖ Rapport porteuse/interférence (C/I) : il s'agit du principal indicateur déterminant la qualité de service, où C correspond à la puissance de porteuse reçue ($P_{R,GEO}$) et I à la puissance d'interférence totale (I_{LEO}) :

$$C/I = P_{R,GEO} - I_{LEO} \quad (\text{en dB})$$

Afin d'assurer la continuité du service, le rapport résultant porteuse sur interférence plus bruit, $C/(I+N)$, doit rester supérieur au seuil minimal (par exemple C/N_{min}) requis par le schéma de modulation et de codage (par exemple DVB-S2X). Une baisse significative du rapport C/I due aux interférences LEO dégrade directement le rapport $C/(I+N)$ et peut entraîner une dégradation de la qualité de liaison ou une interruption.

Bandes de fréquences et contexte de service

- ❖ **Bande Ku** : environ 10,7 à 12,75 GHz (liaison descendante), environ 13,75 à 14,5 GHz (liaison montante)
- ❖ **Bande Ka** : environ 17,7 à 21,2 GHz (liaison descendante), environ 27,5 à 31 GHz (liaison montante)

Services GSO en place

- ❖ Service fixe par satellite (FSS)
- ❖ Service de radiodiffusion par satellite (BSS, pour Broadcasting Satellite Service)
- ❖ Systèmes GEO de satellites à haut débit (HTS, pour High Throughput Satellite)

Ces systèmes reposent sur un espacement orbital strict, une orientation stable des antennes et des environnements d'interférence prévisibles.

Hypothèses numériques de base et paramètres de référence

Afin de garantir la reproductibilité et la pertinence réglementaire, cette étude adopte un ensemble d'**hypothèses numériques représentatives**, mais non propres à un système particulier, cohérentes avec les dossiers NGSO accessibles au public et les recommandations UIT-R. Ces valeurs sont fournies à titre indicatif et peuvent être adaptées aux analyses propres à certains opérateurs.

Paramètres de constellation NGSO (LEO) de référence

- ✦ **Type d'orbite** : orbite LEO circulaire **Altitude** : 550 à 1 200 km (référence nominale : 600 km)
- ✦ **Inclinaison** : 53° à 98° (cas de référence : inclinaison intermédiaire et quasi polaire)
- ✦ **Nombre de satellites** : 1 000 à 10 000 (densité de référence : 4 000 satellites)
- ✦ **Plans orbitaux** : 20 à 80
- ✦ **Vitesse des satellites** : environ 7,5 km/s

Hypothèses d'émission des satellites NGSO

- ✦ **Bandes de fréquences** :
 - ✦ Liaison descendante Ku : 10,7 à 12,75 GHz
 - ✦ Liaison descendante Ka : 17,7 à 21,2 GHz
 - ✦ Liaison montante Ka : 27,5 à 30,0 GHz
- ✦ **Densité EIRP maximale** :
 - ✦ Ku : 10 à 20 dBW/Hz
 - ✦ Ka : 15 à 25 dBW/Hz
- ✦ **Contrôle de puissance** : dynamique, au niveau du faisceau
- ✦ **Empreinte au sol du faisceau** : diamètre de 100 à 500 km (selon l'altitude)

Caractéristiques des antennes NGSO

- ✦ **Type d'antenne** : antenne à réseau phasé **Gain du lobe principal** :
 - ✦ Ku : 30 à 38 dBi
 - ✦ Ka : 38 à 45 dBi
- ✦ **Enveloppe des lobes secondaires** : conforme aux diagrammes de référence UIT-R S.1528 / S.672
- ✦ **Plage d'orientation des faisceaux** : $\pm 60^\circ$ par rapport au nadir

Paramètres du système GSO de référence

- ✦ **Orbite** : GEO à 35 786 km (MEO pris en compte le cas échéant)
- ✦ **Espacement orbital** : 2° à 3°
- ✦ **Service** : FSS / HTS
- ✦ **PIRE typique des satellites GEO** :
 - ✦ Ku : 50 à 60 dBW

- ✦ Ka : 60 à 70 dBW

Hypothèses relatives aux antennes des stations terriennes GSO

- ✦ **Diamètre d'antenne :**

- ✦ Ku : 1,2 à 2,4 m
- ✦ Ka : 0,6 à 1,8 m

- ✦ **Gain maximal de l'antenne :**

- ✦ Ku : 42 à 50 dBi
- ✦ Ka : 48 à 60 dBi

- ✦ **Diagramme de rayonnement :** enveloppes de référence UIT-R S.465 / S.580

- ✦ **Précision de pointage :** $\leq 0,1^\circ$

Limites EPFD et critères de protection

- ✦ **Base réglementaire des limites EPFD :** Règlement des radiocommunications de l'UIT, article 22
- ✦ **Indicateur de protection :** dégradation à long terme du rapport C/I

8. Scénarios d'interférence fondamentaux

Interférences NGSO → GSO

- ✦ **Interférences en liaison montante :** terminaux utilisateur ou passerelles NGSO éclairant des satellites GEO ou des stations terriennes GEO.
- ✦ **Interférences en liaison descendante :** satellites NGSO émettant dans les lobes principaux ou secondaires des antennes de stations terriennes GEO.

Effets d'interférence agrégée

- ✦ Les brouilleurs NGSO individuels peuvent être négligeables, mais l'**interférence agrégée** provenant de centaines ou de milliers de satellites devient le facteur de dégradation dominant.
- ✦ L'interférence agrégée variable dans le temps due au mouvement des satellites constitue une distinction essentielle par rapport à la coordination GSO-GSO traditionnelle.

Événements d'alignement et de quasi-alignement

- ✦ Périodes durant lesquelles les satellites NGSO s'alignent avec l'arc GEO du point de vue d'une station terrienne GEO.

- ✦ Ces événements peuvent produire des pics d'interférence de courte durée mais à fort impact.

9. Principales caractéristiques NGSO ayant une incidence sur les interférences

Paramètres orbitaux

- ✦ Altitude (généralement 500 à 1 500 km pour les systèmes LEO)
- ✦ Inclinaison et nombre de plans orbitaux
- ✦ Vitesse angulaire des satellites par rapport à l'arc GEO

Les altitudes plus basses augmentent la puissance reçue, mais réduisent le temps de présence ; les inclinaisons plus élevées augmentent la fréquence des traversées de l'arc GEO.

Densité de la constellation

- ✦ Nombre total de satellites
- ✦ Répartition spatiale en latitude et en longitude
- ✦ Visibilité simultanée depuis une station terrienne GEO donnée

Les constellations à forte densité augmentent significativement la probabilité d'interférence agrégée.

Caractéristiques d'émission

- ✦ Densité de PIRE (dBW/Hz)
- ✦ Contrôle adaptatif de la puissance
- ✦ Saut de faisceau et mise en forme dynamique des faisceaux

Les faisceaux spot très directionnels réduisent les interférences moyennes, mais peuvent accroître les pics d'interférence lors des croisements de faisceaux.

Diagrammes d'antenne

- ✦ Niveaux des lobes secondaires des antennes satellitaires
- ✦ Performances des antennes des terminaux utilisateur
- ✦ Conformité aux enveloppes de diagrammes d'antenne de l'UIT-R

Le comportement des lobes secondaires est souvent le principal facteur contributif lors des événements d'interférence.

Utilisation du spectre et formes d'onde

- ❖ Largeur de bande des canaux et masques spectraux
- ❖ Formes d'onde basées sur l'OFDM et régénération spectrale
- ❖ Comportement de synchronisation et de temporisation

Les fuites spectrales et un filtrage imparfait peuvent exacerber les interférences entre canaux adjacents.

10. Effets de propagation et de canal

Affaiblissement en espace libre (FSPL, pour Free-Space Path Loss)

- ❖ Une altitude NGSO plus faible réduit l'affaiblissement en espace libre par rapport aux systèmes GEO, ce qui augmente le potentiel d'interférence instantanée.

Effets atmosphériques

- ❖ Atténuation par la pluie (critique en bande Ka)
- ❖ Scintillation et absorption gazeuse

Si la pluie peut réduire les interférences, elle ne peut pas être considérée comme un mécanisme d'atténuation fiable.

Désadaptation de polarisation

- ❖ Discrimination de polarisation croisée (XPD)
- ❖ Erreurs dynamiques d'alignement de polarisation dans les liaisons NGSO

11. Impact sur les performances des systèmes GSO

Rapport porteuse/interférence (C/I)

- ❖ Dégradation de courte durée du rapport C/I lors des événements d'alignement
- ❖ Réduction de la disponibilité à long terme due à la répétition des événements

Indicateurs de qualité de service

- ❖ Perte de débit utile
- ❖ Augmentation du taux d'erreurs de paquets
- ❖ Érosion de la marge de liaison

Conséquences opérationnelles

- ❖ Repli du codage et de la modulation adaptatifs (ACM)

- ❖ Exigences accrues en matière de diversité des passerelles
- ❖ Garanties de disponibilité de service réduites

12. Techniques d'atténuation

Mesures d'atténuation côté NGSO

- ❖ Contrôle de puissance et désactivation des faisceaux lors des franchissements de l'arc GEO
- ❖ Zones d'évitement de l'arc GEO
- ❖ Planification adaptative et mise en forme des faisceaux

Mesures d'atténuation côté GSO

- ❖ Discrimination améliorée des antennes de stations terriennes
- ❖ Diversité de sites et relocalisation des passerelles
- ❖ Mécanismes de détection et de signalement des interférences

Coordination au niveau système

- ❖ Partage des éphémérides en temps réel
- ❖ Algorithmes cognitifs d'évitement des interférences
- ❖ Interfaces de coordination intersystèmes

13. Cadre mathématique d'évaluation des interférences

EPFD et indicateurs réglementaires

Le principal indicateur réglementaire régissant la coexistence NGSO-GSO est la **puissance surfacique équivalente (EPFD)**, définie comme la puissance surfacique agrégée produite au niveau de l'antenne d'une station terrienne GSO par l'ensemble des satellites NGSO visibles, pondérée par le gain de l'antenne dans leurs directions respectives. L'EPFD est évaluée comme suit :

$$EPFD = \sum (PFD_i \cdot G_{ES}(\theta_i, \varphi_i))$$

où PFD_i est la puissance surfacique provenant du i -ième satellite NGSO, et G_{ES} le gain de l'antenne de la station terrienne GSO dans la direction de ce satellite. L'**EPFD ↓** (espace vers Terre) et l'**EPFD ↑** (Terre vers espace) doivent toutes deux être prises en compte, selon le sens de la liaison.

L'article 22 du Règlement des radiocommunications de l'UIT précise des limites EPFD statistiques (par exemple, non dépassées pendant plus de X % du temps), ce qui impose une analyse temporelle et probabiliste plutôt qu'une évaluation statique du pire cas.

Rapport porteuse/interférence (C/I)

L'impact sur les performances du système est généralement évalué au moyen de :

$$C/I = C / (I_{\text{GSO}} + I_{\text{NGSO,agg}})$$

où $I_{\text{NGSO,agg}}$ représente l'interférence NGSO agrégée variable dans le temps. La dégradation à court terme lors des événements d'alignement et la perte de disponibilité à long terme doivent toutes deux être évaluées.

Modélisation de l'interférence agrégée

L'interférence agrégée est modélisée en additionnant les contributions de tous les satellites NGSO visibles simultanément, en tenant compte des éléments suivants :

- ❖ Les éphémérides des satellites
- ❖ L'orientation et la planification des faisceaux
- ❖ Le contrôle dynamique de la puissance
- ❖ Le couplage des diagrammes d'antenne

14. Méthodologie de simulation

Simulation dans le domaine temporel

- ❖ Les positions des satellites sont mises à jour avec une résolution appropriée ; la résolution choisie doit permettre de saisir les temps de présence des faisceaux NGSO et les événements d'alignement, tout en restant exploitable sur le plan du calcul.
- ❖ La visibilité et le gain d'antenne sont calculés dynamiquement
- ❖ L'interférence agrégée est calculée à chaque pas de temps

Analyse du pire cas et analyse statistique

- ❖ Identification des événements d'alignement
- ❖ Analyse du dépassement des limites EPFD pendant X % du temps
- ❖ Estimation de la disponibilité du service à long terme

Propagation orbitale et géométrie

- ❖ Les orbites des satellites NGSO sont propagées à l'aide du modèle SGP4 ou de modèles képlériens à deux corps.
- ❖ Les satellites GEO sont considérés comme fixes dans le référentiel inertiel géocentrique.

✦ À chaque pas de temps :

- ✦ La visibilité des satellites est calculée par rapport au masque d'élévation de la station terrienne GSO.
- ✦ Les angles hors axe par rapport à l'arc GEO sont calculés.

Deux paramètres géométriques sont fondamentaux : le **masque d'élévation de la station terrienne GSO** et l'**angle hors axe par rapport à l'arc GEO**.

Le masque d'élévation de la station terrienne GSO définit l'angle d'élévation minimal au-dessus de l'horizon local à partir duquel un signal satellitaire est considéré comme recevable par la station terrienne GSO. Il modélise les obstacles physiques (relief, bâtiments), les contraintes mécaniques de l'antenne et les pratiques opérationnelles de protection contre les interférences. Les valeurs typiques sont les suivantes : stations terriennes passerelles : 5° à 10° et terminaux utilisateur : 10° à 15°.

Pour un satellite NGSO donné i à l'instant t , la visibilité est déterminée comme suit :

1. Calculer le vecteur de position du satellite dans les coordonnées terrestres géocentriques (ECEF, pour Earth-centered Earth-fixed).
2. Transformer le vecteur dans le repère topocentrique local (Est-Nord-Haut) de la station terrienne GSO.
3. Calculer l'angle d'élévation :

$$\varepsilon_i(t) = \arcsin(r_{up}/|r|)$$

4. Le satellite est considéré comme visible si :

$$\varepsilon_i(t) \geq \varepsilon_{\text{mask}}$$

Seuls les satellites satisfaisant à ce test de visibilité contribuent aux calculs d'interférence. Cette étape limite considérablement le nombre de satellites NGSO contribuant simultanément aux interférences et elle est essentielle à l'efficacité des calculs.

Les angles hors axe par rapport à l'arc GEO permettent de quantifier l'écart entre un satellite NGSO brouilleur et la direction principale de pointage de l'antenne de la station terrienne GSO, normalement alignée avec le satellite GEO cible.

Pour chaque satellite NGSO visible :

1. Définir le vecteur unitaire de visée principale de l'antenne de la station terrienne GSO, pointant vers le satellite GEO souhaité.
2. Définir le vecteur unitaire allant de la station terrienne vers le satellite NGSO.
3. Calculer l'angle hors axe :

$$\vartheta_i(t) = \arccos(u_{\text{GEO}} \cdot u_{\text{NGSO},i})$$

Cet angle détermine directement le gain d'antenne appliqué au moyen du diagramme de référence UIT-R.

Comme les satellites GEO occupent un arc étroit, environ $\pm 0,1^\circ$ en latitude et s'étendant sur plusieurs longitudes, la gravité des interférences augmente lorsqu'un satellite NGSO se trouve près de cet arc vu depuis la station terrienne :

- ❖ **Événement d'alignement** : $\theta_i(t) \leq 1^\circ$
- ❖ **Événement de quasi-alignement** : $1^\circ < \theta_i(t) \leq 3^\circ$

Lors de ces événements, l'antenne GSO fonctionne dans la région proche de son lobe principal ou dans celle de son premier lobe secondaire, ce qui produit des niveaux d'interférence de pointe.

Ce calcul de l'angle hors axe est donc le principal facteur déterminant pour :

- ❖ Le couplage du gain d'antenne
- ❖ Les événements EPFD de pointe
- ❖ Le comportement statistique des distributions d'interférences

Calcul de l'interférence par satellite, pour chaque satellite NGSO i à l'instant t :

- ❖ Calculer l'affaiblissement en espace libre (FSPL)
- ❖ Appliquer les pertes atmosphériques (absorption gazeuse + pluie, si elles sont modélisées)
- ❖ Calculer la puissance d'interférence reçue :

$$I_i(t) = EIRP_i(t) - FSPL_i(t) - L_a t m + G_E S(\theta_i(t))$$

Toutes les grandeurs sont calculées de manière cohérente en unités linéaires ou logarithmiques.

Interférence agrégée et EPFD

- ❖ L'interférence agrégée est obtenue comme suit :

$$I_{agg}(t) = \sum I_i(t)$$

- ❖ L'EPFD est calculée en normalisant la puissance reçue agrégée par la surface effective de l'antenne et la largeur de bande.
- ❖ Les séries temporelles de l'EPFD(t) et du C/I(t) sont stockées en vue du post-traitement statistique.

15. Récapitulatif du chapitre

L'interférence provenant des constellations LEO NGSO et affectant les services GSO en place dans les bandes satellitaires K constitue un problème multidimensionnel et variable dans le temps, dominé par les effets de l'interférence agrégée et les dynamiques à l'échelle des constellations. Une évaluation robuste nécessite une analyse statistique fondée sur l'EPFD, une modélisation réaliste des antennes et des simulations dans le domaine temporel. À mesure que les bandes Ku et Ka deviennent de plus en plus encombrées et que les systèmes NGSO évoluent vers des paradigmes 5G-NTN, des mécanismes de coexistence dynamiques et coopératifs seront essentiels pour assurer un partage durable du spectre et la protection à long terme des services GSO.

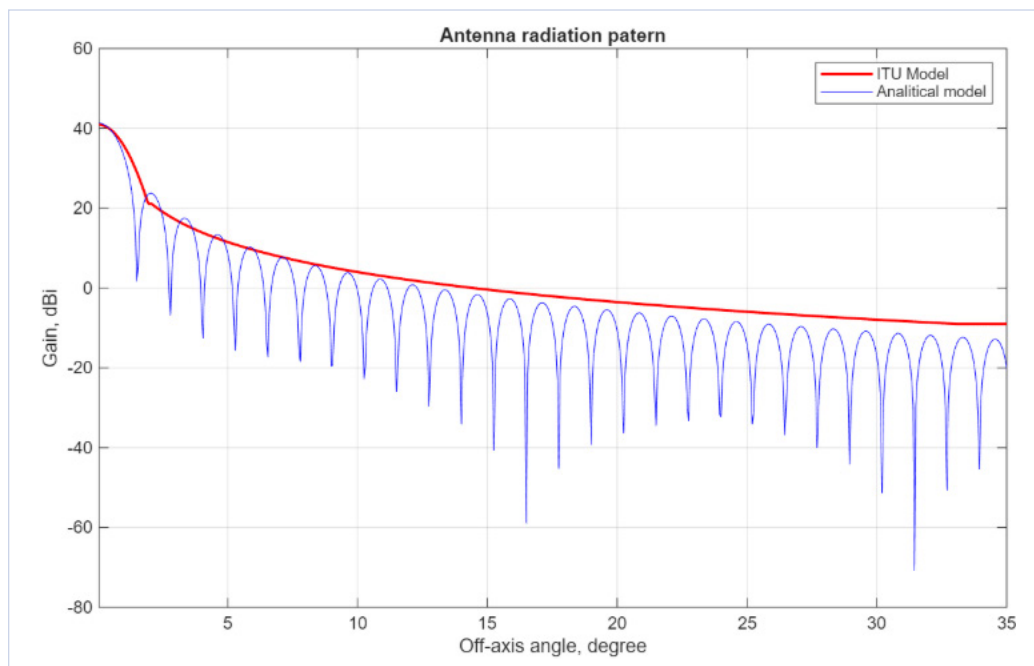
16. Description du modèle de simulation

Modélisation du diagramme d'antenne de la station terrienne GSO

La précision du calcul de l'EPFD dépend fortement de la caractérisation du diagramme d'antenne. Il existe, pour les antennes paraboliques, un diagramme théorique décrit par une équation sous forme fermée. L'UIT fournit des diagrammes de référence dans plusieurs Recommandations :

- ❖ UIT-R S.465, diagrammes d'antenne de station terrienne pour le FSS
- ❖ UIT-R S.1428, diagrammes de référence pour les antennes de stations terriennes du FSS
- ❖ UIT-R F.699, diagrammes de référence pour les antennes du service fixe

Figure 4 : Diagramme d'antenne parabolique de 0,7 m de diamètre à 19,7 GHz selon les modèles analytique et UIT



La figure 4 représente les diagrammes d'antenne des modèles analytique et UIT pour une antenne parabolique de 0,7 m de diamètre à la fréquence de 19,7 GHz, utilisée dans les simulations comme antenne de station terrienne GSO.

Ces diagrammes utilisent des fonctions analytiques par morceaux pour décrire les régions du faisceau principal, des lobes secondaires et du lobe arrière. Toutefois, les performances réelles de l'antenne peuvent s'écarter des diagrammes de référence en raison des tolérances de fabrication, ainsi que des effets liés au montage et au radôme.

La comparaison entre les modèles analytique (bleu) et UIT-R S.1428 (rouge) pour l'antenne parabolique de 0,7 m à 19,7 GHz apporte des enseignements utiles. La figure montre une bonne concordance dans le lobe principal, mais une divergence notable dans la région des lobes secondaires (au-delà d'environ 5 degrés hors axe), où le modèle de l'UIT fournit une enveloppe de lobes secondaires plus conservatrice, c'est-à-dire plus élevée.

La modélisation des antennes satellitaires présente des difficultés supplémentaires. Les satellites modernes utilisent des réseaux phasés avec des faisceaux orientables électroniquement, ce qui crée des diagrammes de rayonnement complexes et variables dans le temps, susceptibles de modifier considérablement les distributions EPFD.

Afin d'évaluer les avantages supplémentaires des antennes à réseau phasé en matière d'isolation des interférences, deux modèles d'antennes satellitaires ont été étudiés et simulés.

Simulation avec une antenne satellitaire omnidirectionnelle

Pour tenir compte du scénario le plus défavorable, une antenne satellitaire omnidirectionnelle a été considérée, en supposant qu'elle éclaire l'antenne de réception terrestre selon des positions angulaires maximisant l'EPFD résultante. Le choix de modéliser l'antenne du satellite NGSO comme omnidirectionnelle constitue une hypothèse valable pour le scénario le plus défavorable. Toutefois, il est utile de quantifier dans quelle mesure cette approche surestime l'EPFD par rapport au diagramme réaliste d'une antenne satellitaire à réseau phasé. Pour l'événement d'interférence dominant (passage d'un satellite NGSO à proximité de l'arc GEO), le faisceau du satellite dessert des utilisateurs au sol et n'est généralement pas orienté vers la station terrienne GSO. L'angle hors axe au niveau du satellite en direction de la station terrienne GSO dépend de l'endroit où le faisceau satellitaire dessert effectivement les utilisateurs et de la position du satellite par rapport à la station terrienne GSO.

Statistiquement, pour un satellite multifaisceaux doté de 8 à 16 faisceaux simultanés, chacun d'une largeur de 3 à 5 degrés et couvrant une empreinte d'environ ± 25 à ± 45 degrés par rapport au nadir, la probabilité qu'un faisceau soit orienté à moins de 3 degrés de la station terrienne GSO est d'environ 5 à 15 % du temps. Pendant les 85 à 95 % du temps restants, l'angle hors axe est généralement de 10 à 25 degrés, ce qui donne une surestimation moyenne statistiquement représentative d'environ 20 à 25 dB.

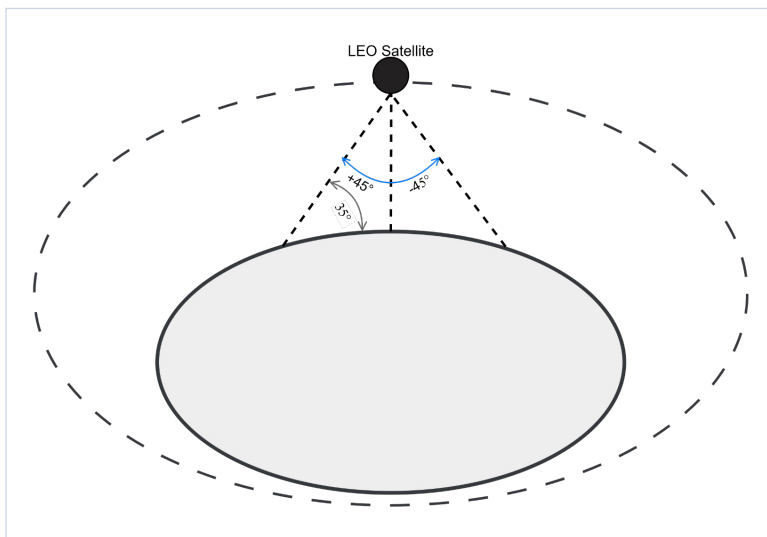
L'hypothèse d'une antenne NGSO omnidirectionnelle surestime l'EPFD agrégée d'environ 20 dB en moyenne par rapport à une antenne à réseau phasé typique en bande Ka, présentant

un gain de crête de 36 dBi et une largeur de faisceau spot de 3 à 5 degrés. Cette surestimation varie de 0 dB (lorsque le faisceau du satellite est orienté directement vers la station affectée) à plus de 35 dB (lorsque le faisceau est orienté dans une autre direction). L'hypothèse omnidirectionnelle introduit donc une marge de prudence qui encadre simultanément tous les scénarios possibles d'orientation des faisceaux, mais les niveaux d'interférence réels avec une planification opérationnelle des faisceaux devraient être sensiblement plus faibles.

Simulation avec un modèle de diagramme d'antenne multifaisceau NGSO

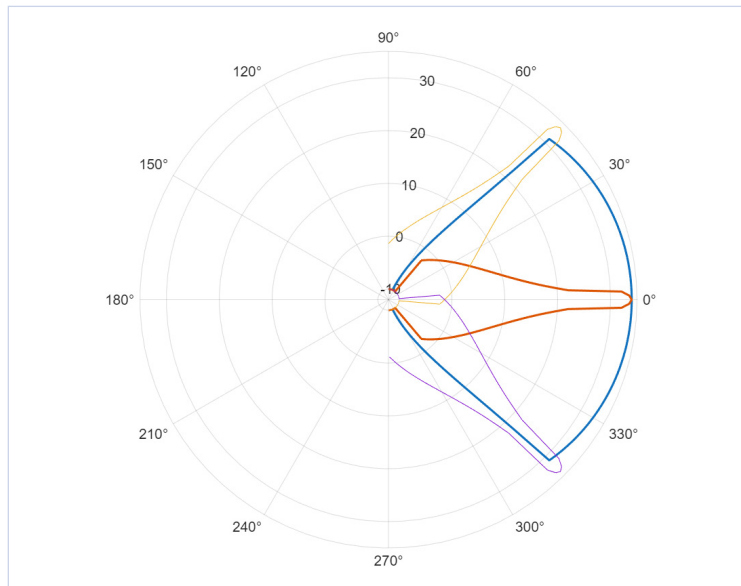
Dans la deuxième série de simulations, nous considérons le diagramme d'antenne satellitaire NGSO multifaisceau comme l'enveloppe des différents faisceaux, couvrant la même plage d'orientation et présentant le même gain qu'une antenne à faisceau unique dans un scénario multifaisceau. En général, une antenne NGSO utilise plusieurs faisceaux orientables pour desservir les utilisateurs dans la zone de couverture. Dans un scénario multifaisceau, chaque faisceau présente une largeur d'environ 3° à 5° et couvre une empreinte d'environ ± 25 à ± 45 degrés mesurés par rapport au nadir.

Figure 5 : Plage d'orientation des faisceaux utilisateur pour une antenne satellitaire à réseau phasé



Dans le lobe principal, le gain de l'antenne est modélisé selon une forme parabolique ; au-delà de l'angle à 3 dB, le gain suit une loi logarithmique conformément à la recommandation UIT-R S.1428, et le gain minimal est de -10 dB.

Figure 6 : Diagramme d'antenne d'un satellite NGSO multifaisceau modélisé comme l'enveloppe des différents faisceaux



La figure 6 représente, superposés en coordonnées polaires, les deux diagrammes d'antenne : en bleu, l'enveloppe prise en compte dans les simulations, et en magenta, rouge et jaune, les faisceaux étroits pointant à 0 degré ainsi qu'aux angles de balayage maximaux à gauche et à droite.

Outre l'angle hors axe, qui représente l'angle entre les vecteurs station terrienne-GSO et station terrienne-NGSO et sert à prendre en compte le gain de l'antenne de la station terrienne, nous calculons l'angle entre les vecteurs NGSO-centre de la Terre (nadir) et NGSO-station terrienne, afin de prendre en compte le gain de l'antenne NGSO.

L'hypothèse d'un diagramme d'antenne NGSO modélisé comme l'enveloppe introduit elle aussi une marge de prudence, mais elle devrait offrir une meilleure précision qu'un diagramme d'antenne omnidirectionnel.

Méthodologie de calcul de l'EPFD et cadre de simulation

Présentation de l'approche d'évaluation de l'EPFD

L'évaluation de la puissance surfacique équivalente (EPFD) aux fins de conformité réglementaire est réalisée au moyen de simulations numériques, afin de refléter la complexité et la nature variable dans le temps des systèmes satellitaires non géostationnaires. Les solutions analytiques sous forme fermée ne sont généralement pas applicables en raison de la géométrie dynamique des constellations, de la directivité des antennes et des mécanismes d'interférence agrégée en jeu.

Deux approches de simulation complémentaires peuvent généralement être adoptées :

- ❖ Une simulation déterministe résolue dans le temps, fondée sur des données orbitales réelles des satellites et une géométrie définie du récepteur à protéger, destinée à saisir le comportement de l'EPFD dans le scénario le plus défavorable et en fonction du temps, dans des conditions opérationnelles réalistes.
- ❖ Un cadre de simulation probabiliste, destiné à évaluer les caractéristiques statistiques de l'EPFD sur un vaste ensemble de géométries satellite-récepteur.

Dans ce qui suit, seul le premier modèle est pris en compte.

Modèle du système et hypothèses

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- ❖ Caractéristiques du réseau satellitaire
 - ❖ Système satellitaire non géostationnaire opérant dans la bande de fréquences considérée
 - ❖ Constellation complète supposée
 - ❖ Transmission continue à la puissance nominale
 - ❖ Diagrammes d'antenne satellitaire modélisés au moyen d'enveloppes de gain omnidirectionnelles et directionnelles propres aux cas d'utilisation.
- ❖ Station de réception terrestre
 - ❖ Station au sol fixe située à une position géographique définie
 - ❖ Antenne de réception modélisée à l'aide d'un diagramme de référence UIT-R approprié
 - ❖ Aucune protection par le terrain ni perte due au fouillis n'est supposée, sauf mention explicite
- ❖ Modèle de propagation
 - ❖ Perte de propagation en espace libre fondée sur la distance oblique instantanée
 - ❖ Pertes atmosphériques négligées ou bornées de manière prudente
 - ❖ Aucun mécanisme supplémentaire d'évanouissement ou de masquage appliqué

Ces hypothèses garantissent une évaluation EPFD prudente et transparente.

Méthodologie de simulation EPFD déterministe

La simulation déterministe vise à évaluer l'évolution temporelle de l'EPFD au niveau d'une station de réception GSO donnée, due à une population de satellites connue et variable dans le temps, dans des conditions géométriques explicitement définies.

Cette approche est particulièrement utile pour :

- ❖ Identifier les pics d'EPFD
- ❖ Comprendre la dynamique temporelle des interférences
- ❖ Démontrer la conformité dans des scénarios réalistes correspondant aux cas les plus défavorables

Données orbitales et sélection des satellites

Les positions des satellites sont dérivées de données TLE (Two-Line Element), qui représentent l'ensemble des satellites disponibles appartenant au système non GSO considéré. L'utilisation d'une propagation fondée sur les données TLE garantit que la simulation reflète des configurations orbitales et une évolution temporelle réalistes.

À chaque pas de temps de la simulation :

- ❖ Tous les satellites sont propagés jusqu'à leurs positions instantanées
- ❖ La visibilité est déterminée en fonction de l'horizon radio et des contraintes d'élévation
- ❖ Seuls les satellites satisfaisant aux critères de visibilité sont inclus dans le calcul de l'EPFD
- ❖ Aucun filtrage supplémentaire fondé sur l'orientation des faisceaux ou l'association de service n'est appliqué, ce qui garantit une inclusion prudente des stations spatiales potentiellement brouilleuses.

Géométrie du récepteur affecté

Le récepteur affecté est modélisé comme une station terrienne de satellite géostationnaire, caractérisée par :

- ❖ Une position fixe de la station au sol
- ❖ Une station spatiale GEO sélectionnée de manière à rester visible sous un angle d'élévation moyen pendant toute la période de simulation

L'antenne de réception de la station affectée est supposée suivre en continu le satellite GEO sélectionné, et sa réponse hors axe en direction des satellites LEO brouilleurs est calculée en conséquence.

Résolution temporelle et durée de la simulation

La simulation déterministe est réalisée sur une période continue de 24 heures, choisie pour :

- ❖ Saisir les variations diurnes
- ❖ Inclure plusieurs passages LEO
- ❖ Observer les regroupements potentiels d'événements d'interférence

La résolution temporelle a été fixée à 1 seconde pour la simulation fondée sur le modèle de diagramme d'antenne NGSO multifaisceau, en raison de la variation rapide de l'angle hors axe, tandis que, pour la simulation fondée sur l'antenne satellitaire omnidirectionnelle, une résolution temporelle de 5 secondes a été choisie, jugée suffisamment fine pour saisir avec précision les variations rapides de l'EPFD dues au mouvement des satellites et aux variations du gain de l'antenne omnidirectionnelle.

Procédure de calcul de l'EPFD

À chaque pas de temps de la simulation :

- ❖ L'angle d'élévation et la distance oblique entre chaque satellite LEO visible et la station de réception terrestre sont calculés.
- ❖ Les angles hors axe relatifs à l'antenne d'émission LEO et à l'antenne de réception GEO sont déterminés.
- ❖ Les contributions EPFD individuelles sont calculées à l'aide de la formulation théorique.
- ❖ Toutes les contributions individuelles sont additionnées dans le domaine linéaire afin d'obtenir l'EPFD instantanée.
- ❖ La série temporelle EPFD qui en résulte est conservée en vue du post-traitement et de l'analyse statistique.

Représentation des résultats déterministes

Les résultats de la simulation déterministe sont présentés sous la forme suivante :

- ❖ Graphique de la visibilité des satellites NGSO en fonction du temps
- ❖ Graphiques de l'EPFD de chaque satellite NGSO individuel en fonction du temps
- ❖ Valeurs d'EPFD agrégée sur la période de simulation
- ❖ Analyse statistique dans le temps

Les paramètres des scénarios de simulation sont synthétisés dans le tableau 1. À noter que l'EIRP des systèmes GSO comme NGSO est exprimée en dB/W/1 MHz, mais qu'elle a été ramenée, dans le graphique des résultats, à une largeur de bande de 40 kHz aux fins de conformité avec l'UIT.

Le satellite GSO a été choisi de manière aléatoire, le seul critère étant de disposer d'un angle d'élévation approprié au niveau du site au sol. Deux satellites GSO sont pris en compte : SES-22 à 139,0° ouest pour les sites situés à haute latitude mais à longitude similaire (par exemple Anchorage et Seattle), et SES-2 à 87° ouest pour les sites de plus basse latitude, ce qui permet d'obtenir des angles d'élévation raisonnables ($> 10^\circ$). Le choix de deux satellites GEO pour l'évaluation de l'EPFD, en particulier pour certains sites, pourrait entraîner quelques incohérences apparentes dans le modèle global, ce qui constitue un compromis inévitable du scénario de simulation.

Synthèse des conditions des scénarios de simulation :

Tableau 1 : Synthèse des conditions des scénarios de simulation

Système GSO	Fréquence GSO	19,2 GHz
	PIRE GSO	42,54 dBW/MHz
	Taille de l'antenne GSO	0,70 m
	Modèle de l'antenne GSO	UIT R S.1428
	Gain Rx maximal de l'antenne GSO	40,95 dBi
	Élévation GSO	20,1° – 57,8° dépend de la latitude de la station au sol
Système NGSO	Nombre de satellites NGSO	180
	PIRE NGSO	19,86 dBW/MHz
	Antenne NGSO	Omnidirectionnelle/directionnelle
	Altitude NGSO	590, 610, 630 km
	Inclinaison de l'orbite NGSO	33°, 42°, 51.9°

La visibilité des satellites NGSO par rapport à une station terrienne GSO située à Honolulu est illustrée à la figure 5 pour l'ensemble de la durée de simulation de 24 heures, puis dans un extrait plus détaillé d'environ 2 heures à la figure 6. Le regroupement des satellites au sein de la constellation est nettement visible.

Le nombre de satellites visibles simultanément est représenté aux figures 7 et 8 pour deux sites (Anchorage et Honolulu). Les statistiques relatives aux satellites NGSO visibles montrent un minimum de 2 satellites visibles pour 8 sites, de 1 pour un site et de 0 pour 3 sites. Le nombre maximal de satellites visibles simultanément varie entre 17 et 23, avec une moyenne de 20,42 sur l'ensemble des sites.

Tableau 2 : Statistiques relatives aux satellites NGSO visibles

	Minimum (tous sites confondus)	Maximum	Moyenne
Nombre moyen de satellites visibles	7,01 (Anchorage)	10,50 (Denver)	9,33

	Minimum (tous sites confondus)	Maximum	Moyenne
Nombre minimal de satellites visibles	0 (3 sites)	2 (8 sites)	1,42
Nombre maximal de satellites visibles	17 (San Juan)	23 (Denver)	20,42

La forte dépendance à la latitude est clairement visible. Les sites situés à des latitudes élevées (Anchorage à 61,1, Seattle à 47,6) ainsi qu'à de très basses latitudes (San Juan à 18,4, Honolulu à 21,3) présentent une visibilité moyenne plus faible, de 7 à 9 satellites, ce qui concorde avec des inclinaisons orbitales de 33 à 51,9 degrés favorisant les latitudes intermédiaires.

Les 3 sites pour lesquels le nombre minimal de satellites visibles est de 0 (Anchorage, Honolulu et San Juan), à certains instants, laissent entrevoir de possibles lacunes de couverture, susceptibles d'affecter également la distribution temporelle de l'EPFD.

La structure de regroupement visible sur le graphique de visibilité est caractéristique des géométries de constellation de type Walker-delta, dans lesquelles des groupes de satellites appartenant à un même plan orbital défilent successivement.

Figure 7 : Visibilité des satellites NGSO par rapport à la station terrienne d'Honolulu

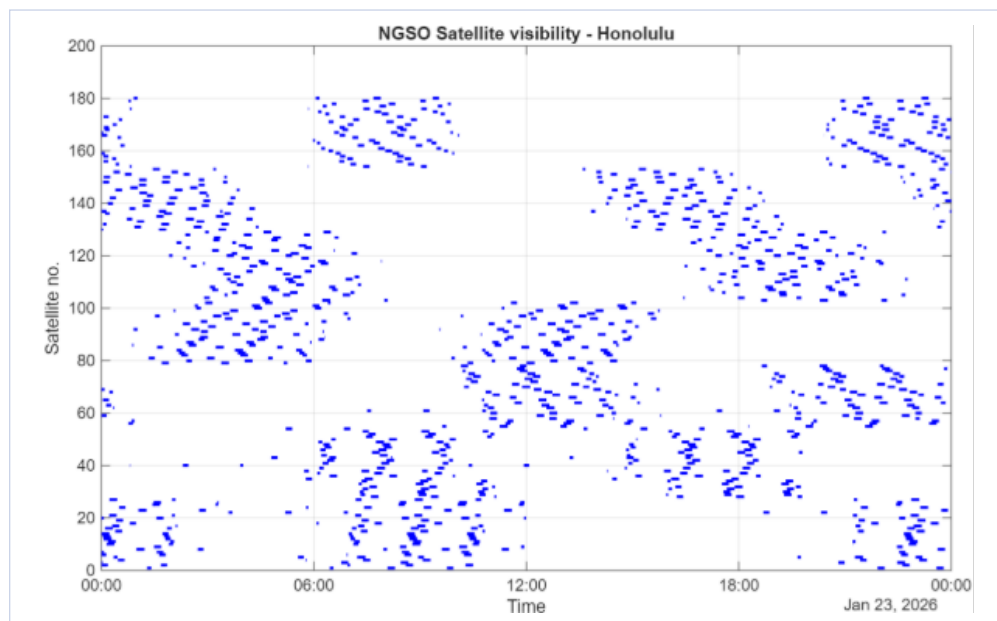


Figure 8 : Visibilité des satellites NGSO par rapport à la station terrienne d'Honolulu sur une durée de deux heures

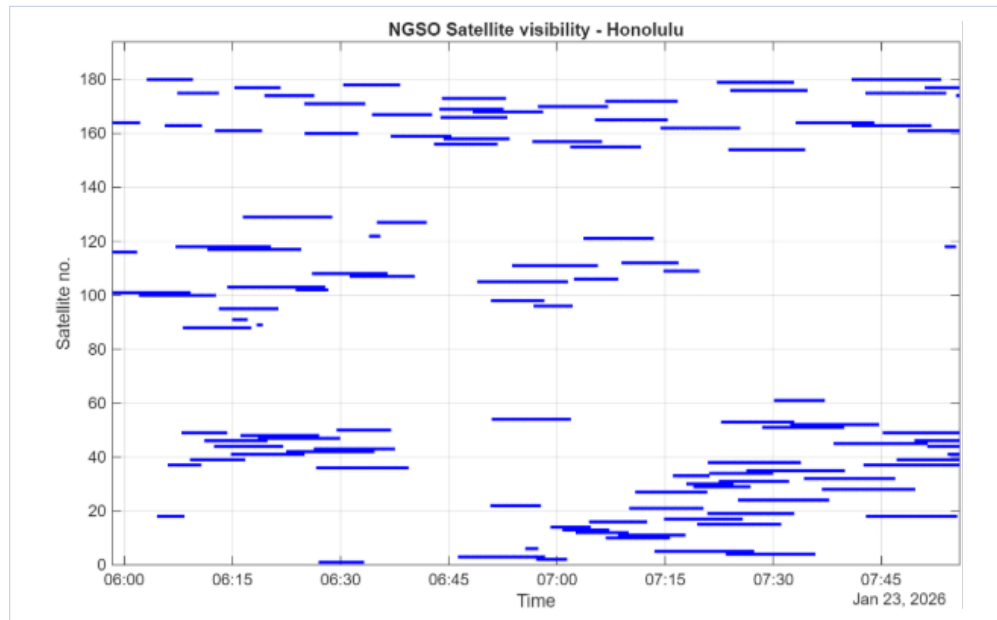


Figure 9 : Nombre de satellites visibles simultanément à Anchorage

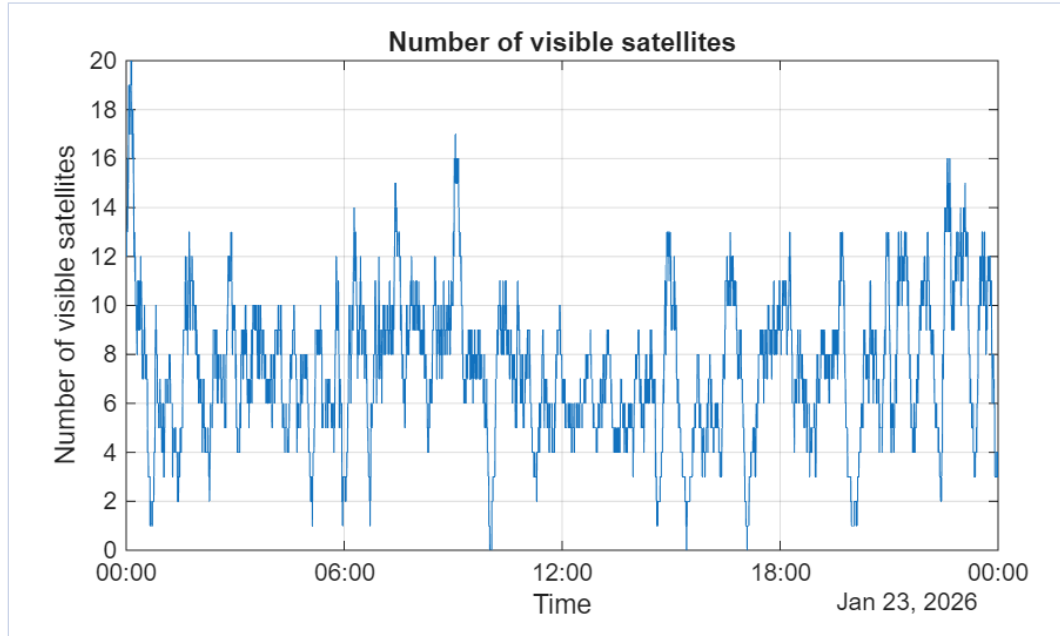
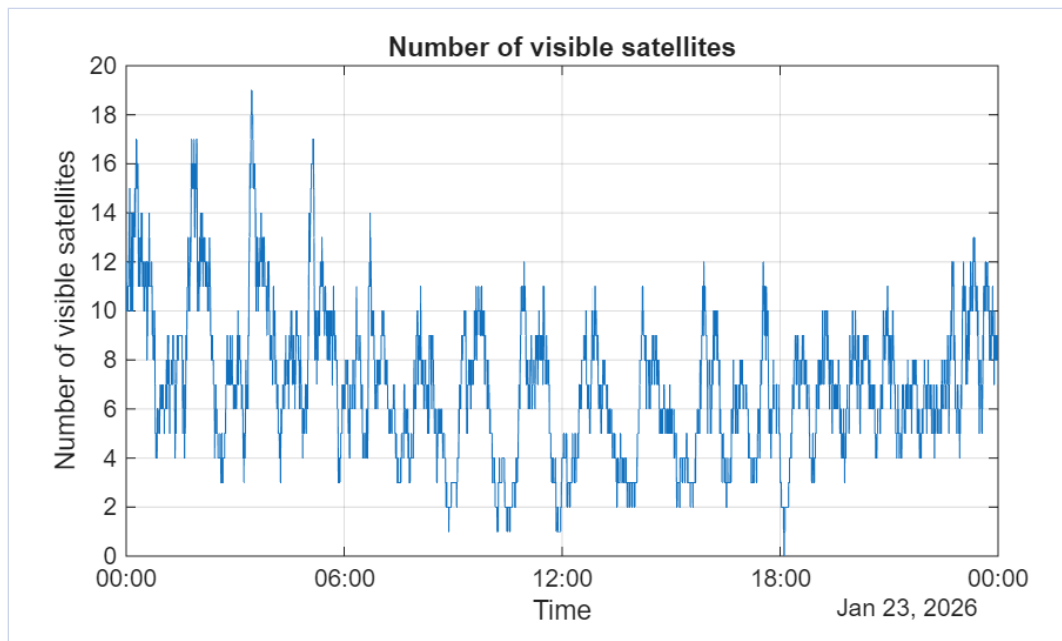


Figure 10 : Nombre de satellites visibles simultanément à Honolulu



17. Résultats de simulation du modèle

Deux simulations ont été réalisées en fonction du diagramme d'antenne satellitaire retenu, celui d'une antenne omnidirectionnelle ou celui d'une antenne directionnelle, comme indiqué au chapitre 14, Description du modèle de simulation.

Pour comparer les niveaux EPFD obtenus avec le diagramme d'une antenne omnidirectionnelle et celui d'une antenne directionnelle, 5 sites pertinents ont été retenus parmi les 12 sites considérés, afin de couvrir l'éventail des latitudes les plus élevées et les plus basses de l'ensemble des sites, d'Anchorage, Alaska, à Honolulu, Hawaï.

La simulation fondée sur une antenne satellitaire omnidirectionnelle portant sur 12 sites est détaillée à l'annexe 1 ; certains résultats de ces sites ont été utilisés dans les résultats de simulation avec antenne directionnelle à des fins de comparaison, plus précisément pour Anchorage, Alaska, Honolulu, Hawaï, Los Angeles, Californie, New York, État de New York, et Seattle, Washington.

Résultats de simulation avec modèle d'antenne directionnelle

Dans les résultats suivants, la « simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO » désigne une simulation utilisant un modèle d'antenne directionnelle.

Résolution temporelle et durée de la simulation

La simulation déterministe est réalisée sur une période continue de 24 heures, choisie pour :

- ❖ Saisir les variations diurnes
- ❖ Inclure plusieurs passages LEO
- ❖ Observer les regroupements potentiels d'événements d'interférence

La résolution temporelle a été portée à 1 seconde.

Les figures suivantes montrent l'angle hors axe, la valeur EPFD par satellite contributeur et l'EPFD agrégée totale pour chacun des 5 sites retenus parmi les 12 sites initialement sélectionnés.

La limite de l'UIT selon l'article 22, pour la fréquence et l'antenne considérées, est superposée aux graphiques EPFD. Le niveau de signal reçu pour le système GSO est également représenté à titre de référence et sera utilisé pour estimer les paramètres SINR et C/I dans le cadre des mesures en laboratoire.

Figure 11 : Anchorage, simulation avec antenne NGSO omnidirectionnelle

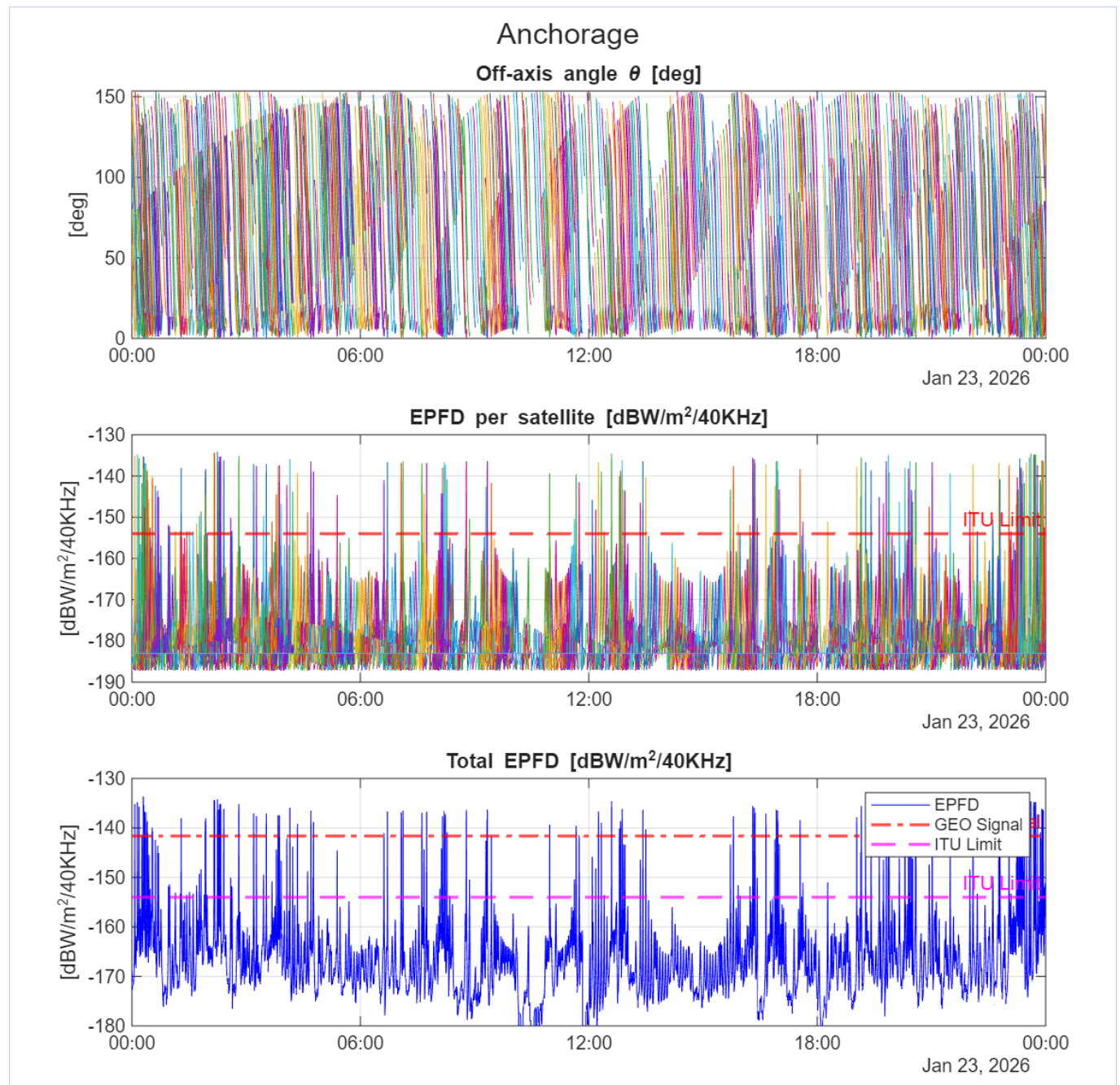


Figure 12 : Anchorage, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

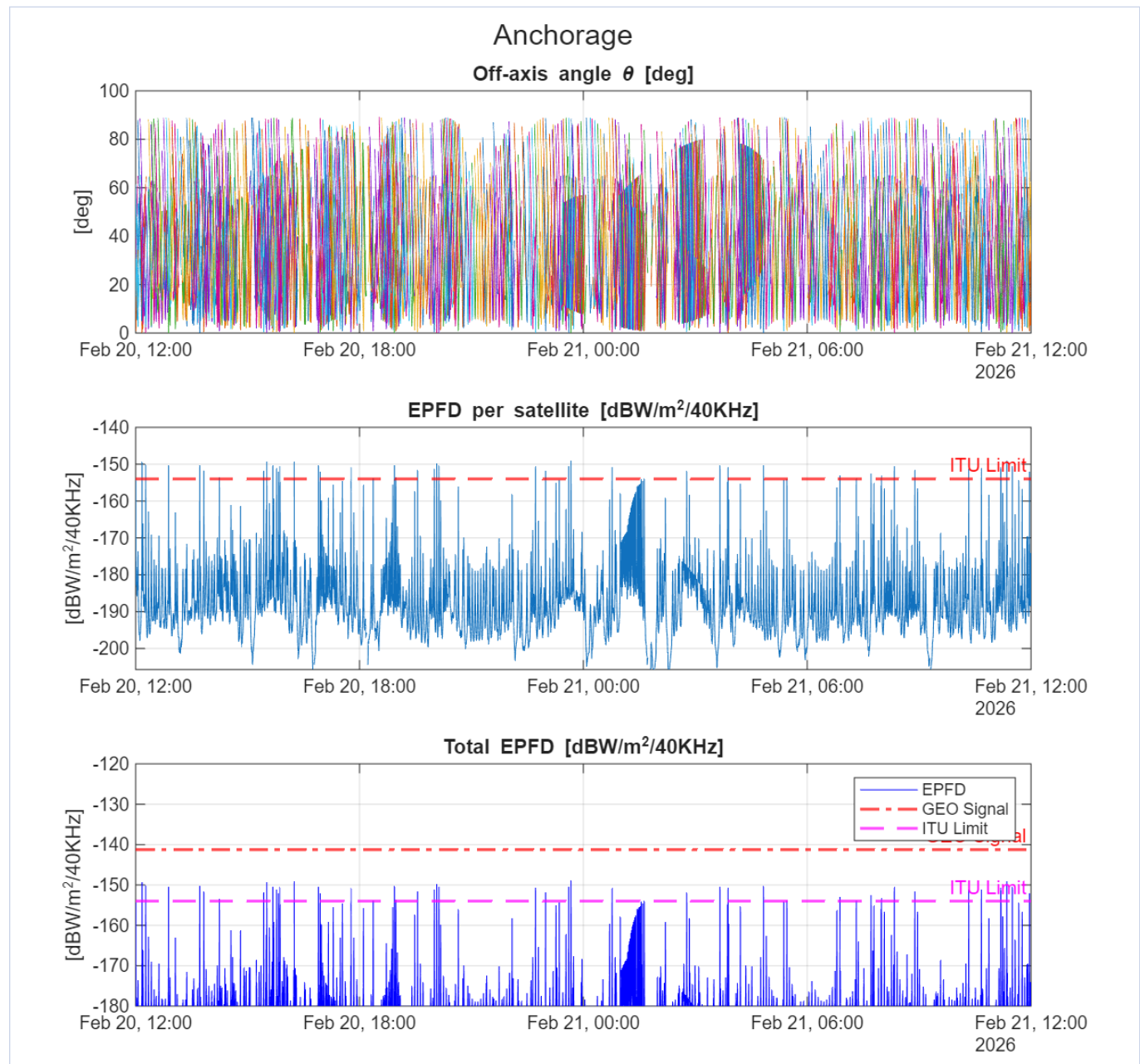


Figure 13 : Honolulu, simulation avec antenne NGSO omnidirectionnelle

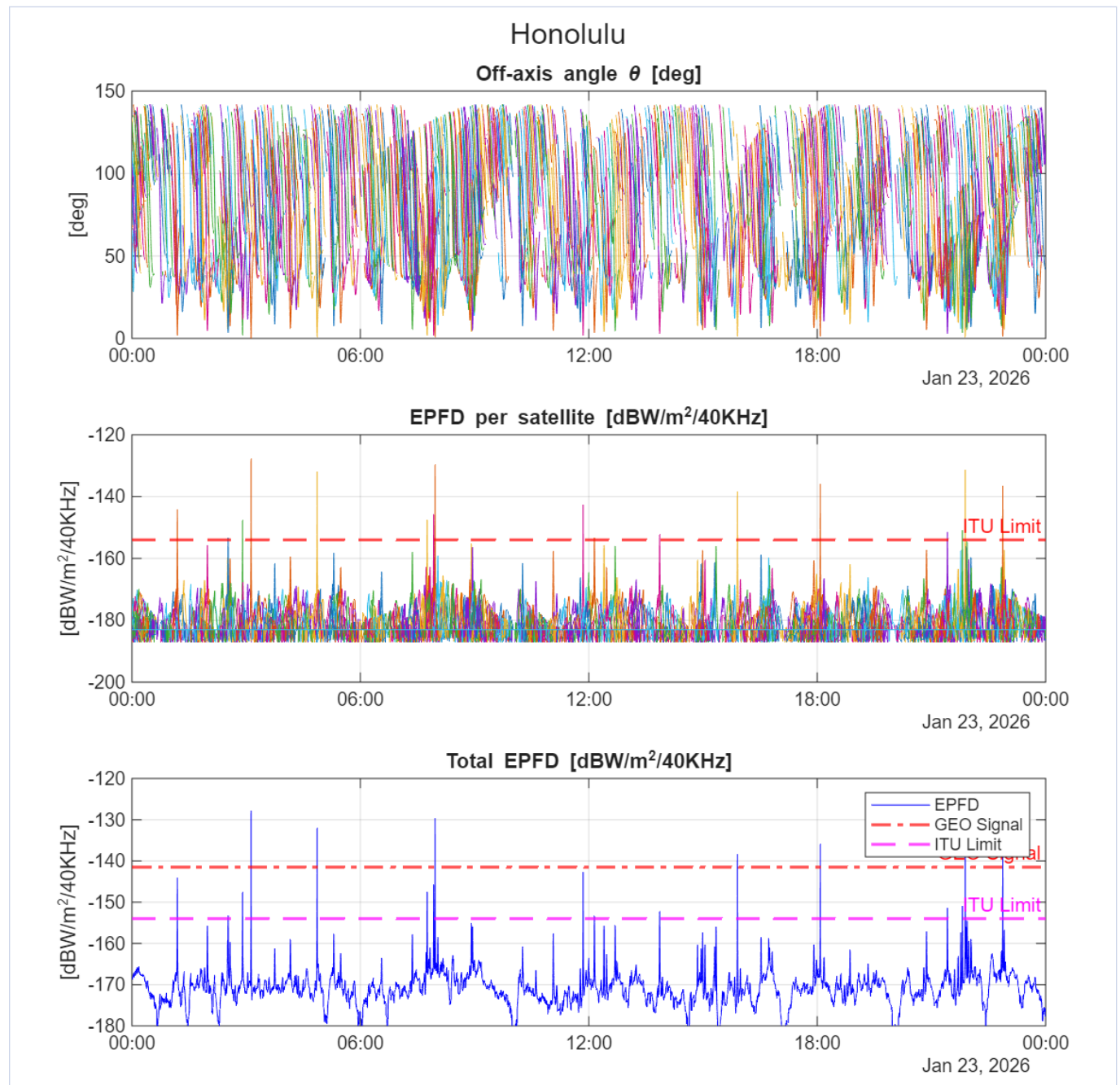


Figure 14 : Honolulu, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

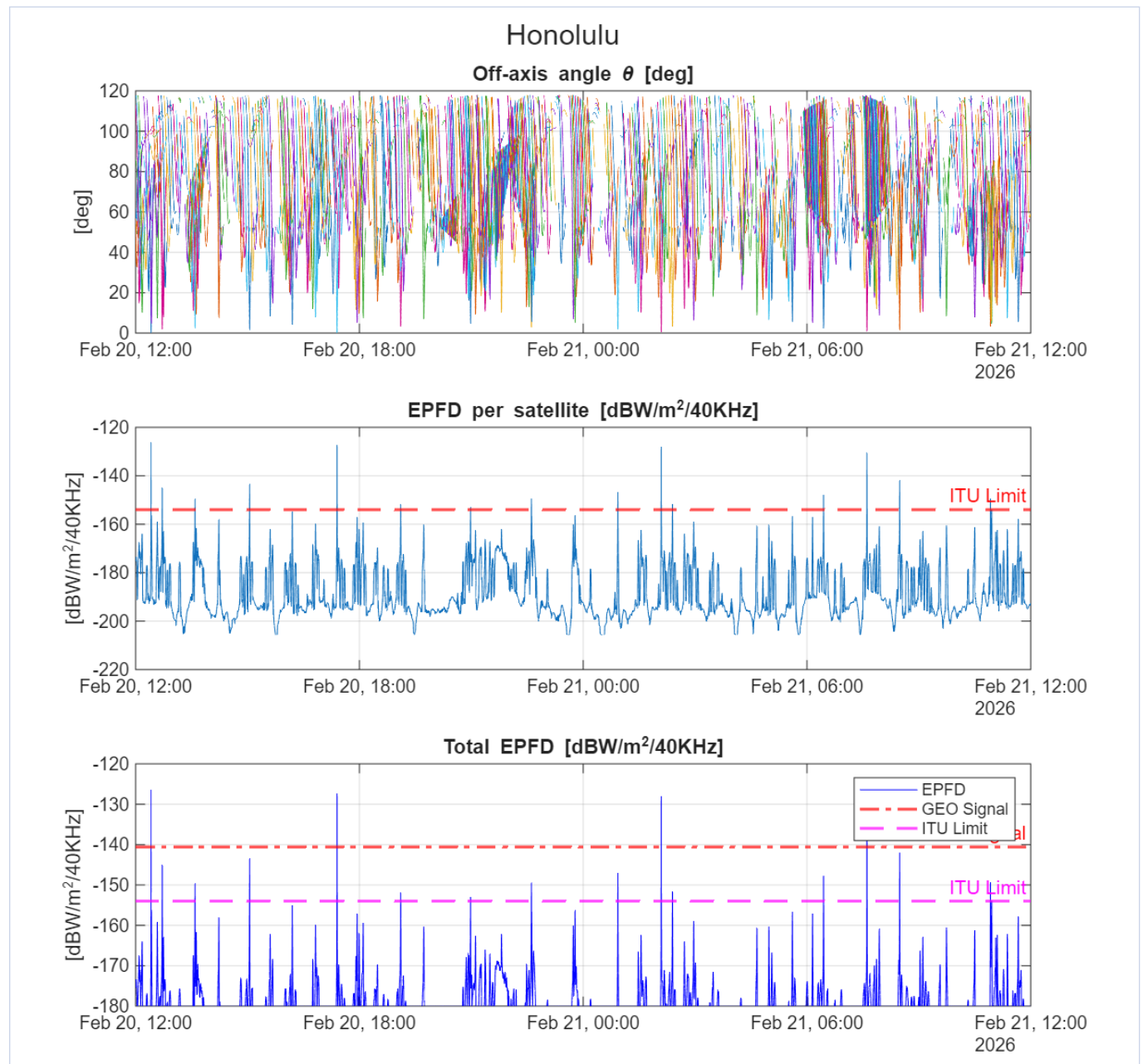


Figure 15 : Los Angeles, simulation avec antenne NGSO omnidirectionnelle

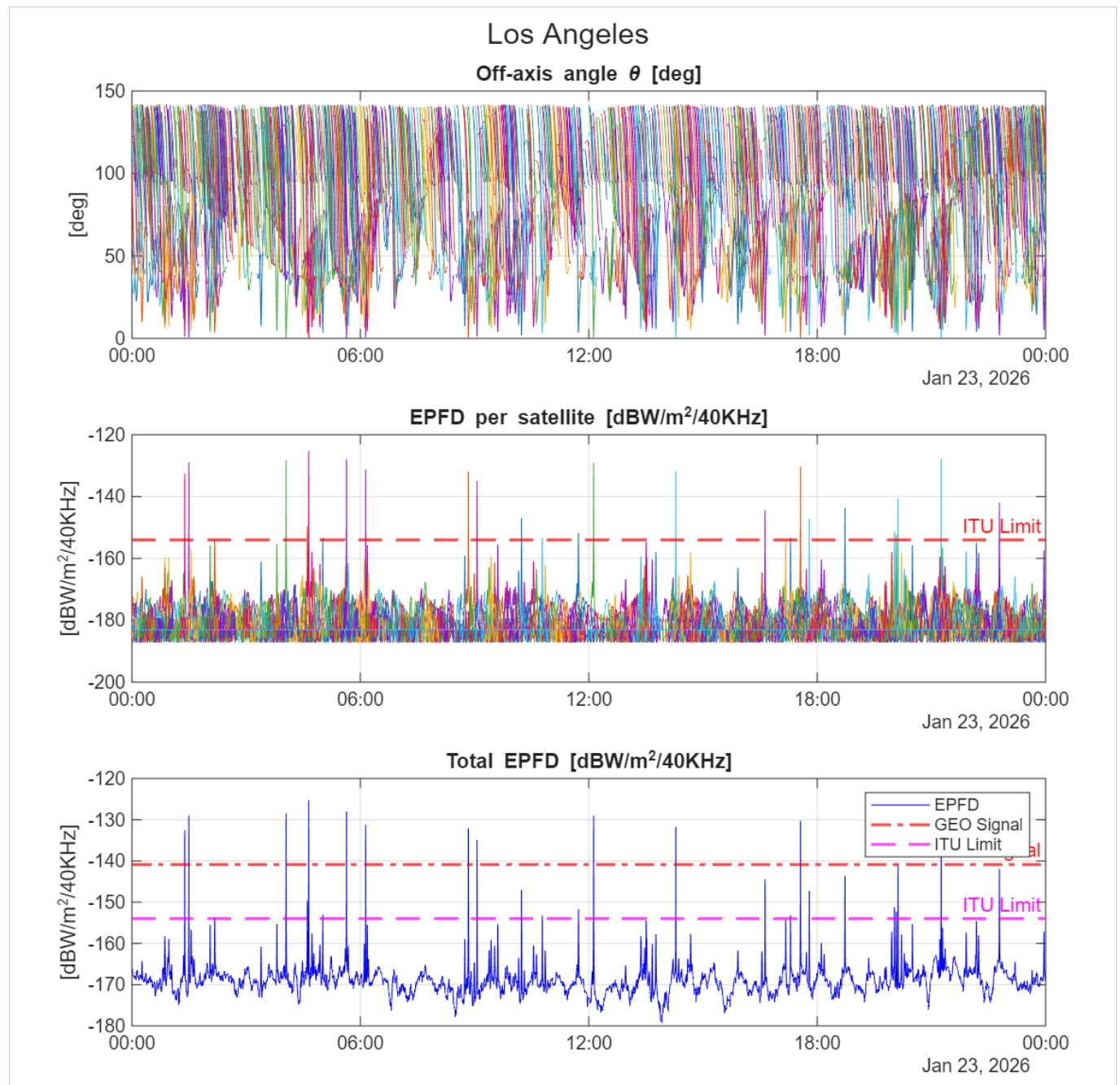


Figure 16 : Los Angeles, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle ; Simulation avec élévation GSO de 38 degrés

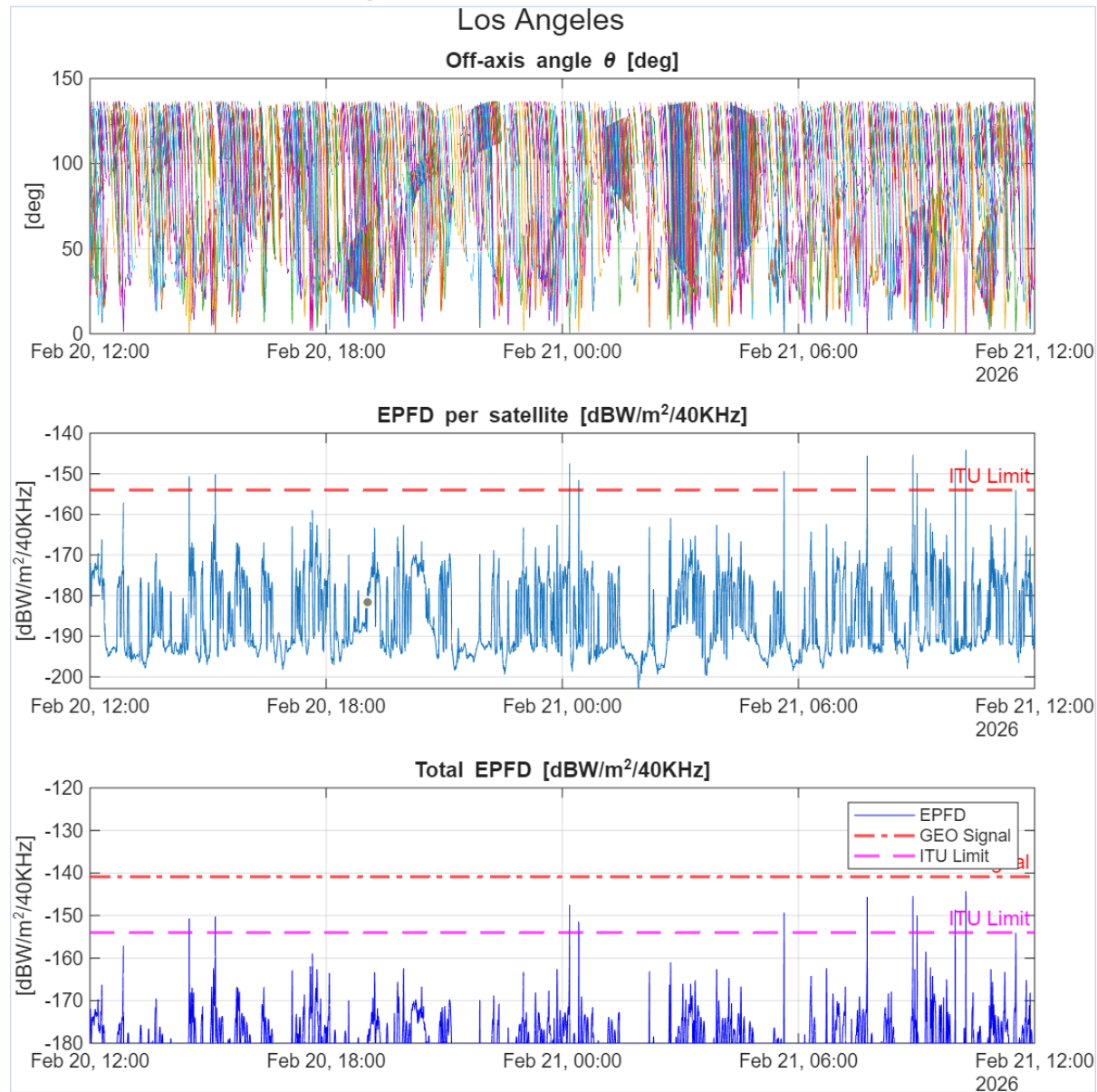


Figure 17 : Los Angeles, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle ; Simulation avec élévation GSO de 44 degrés

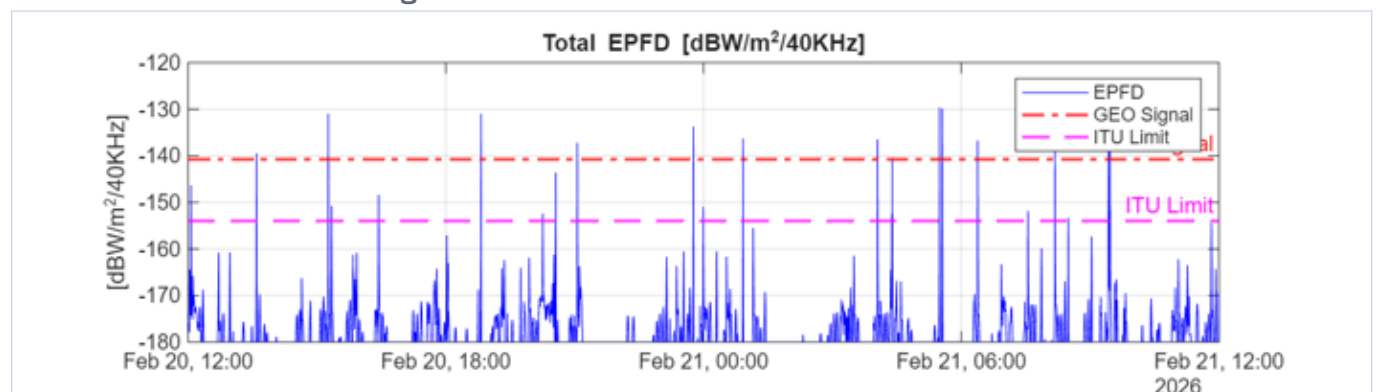


Figure 18 : New York, simulation avec antenne NGSO omnidirectionnelle

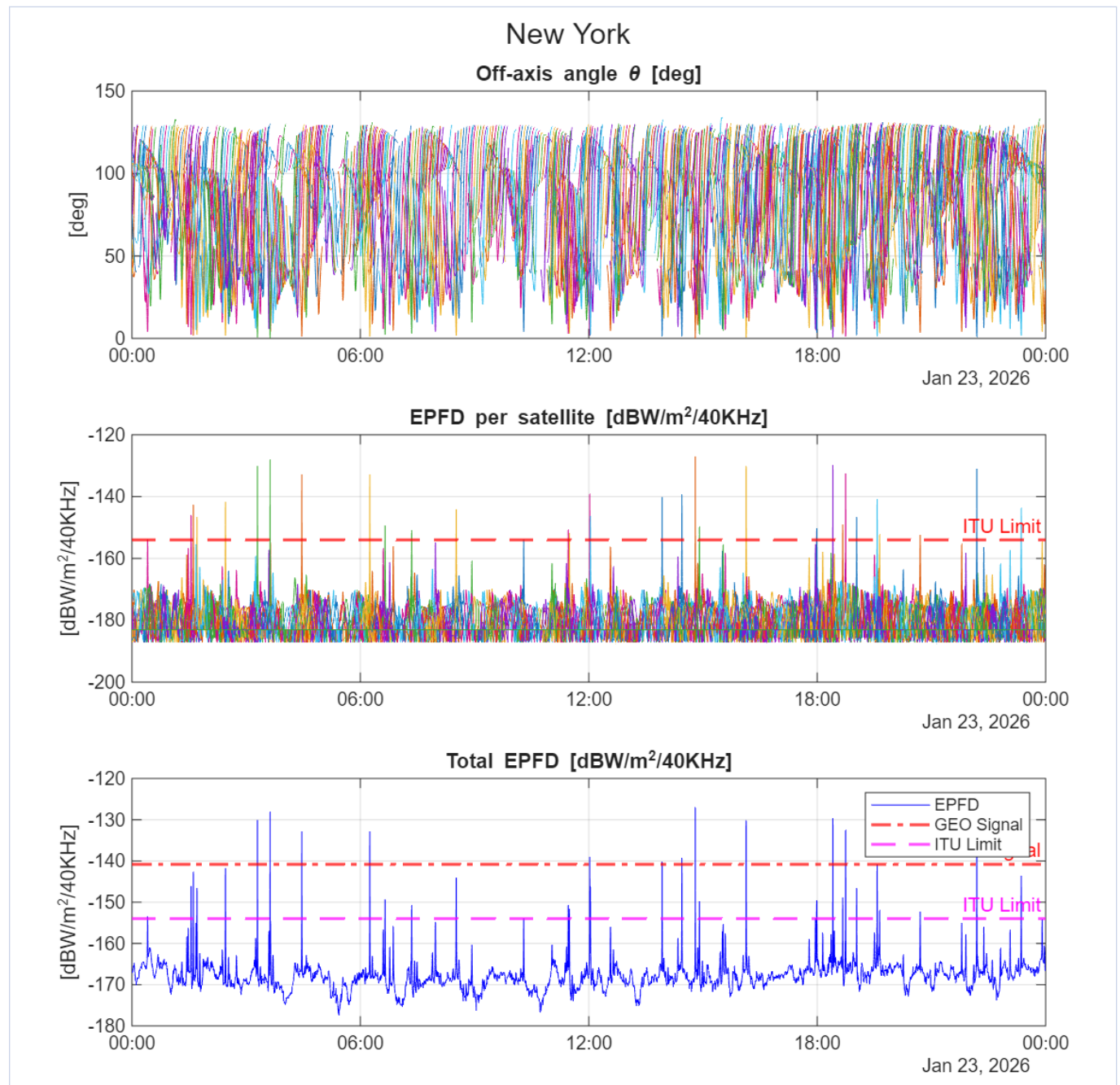


Figure 19 : New York, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

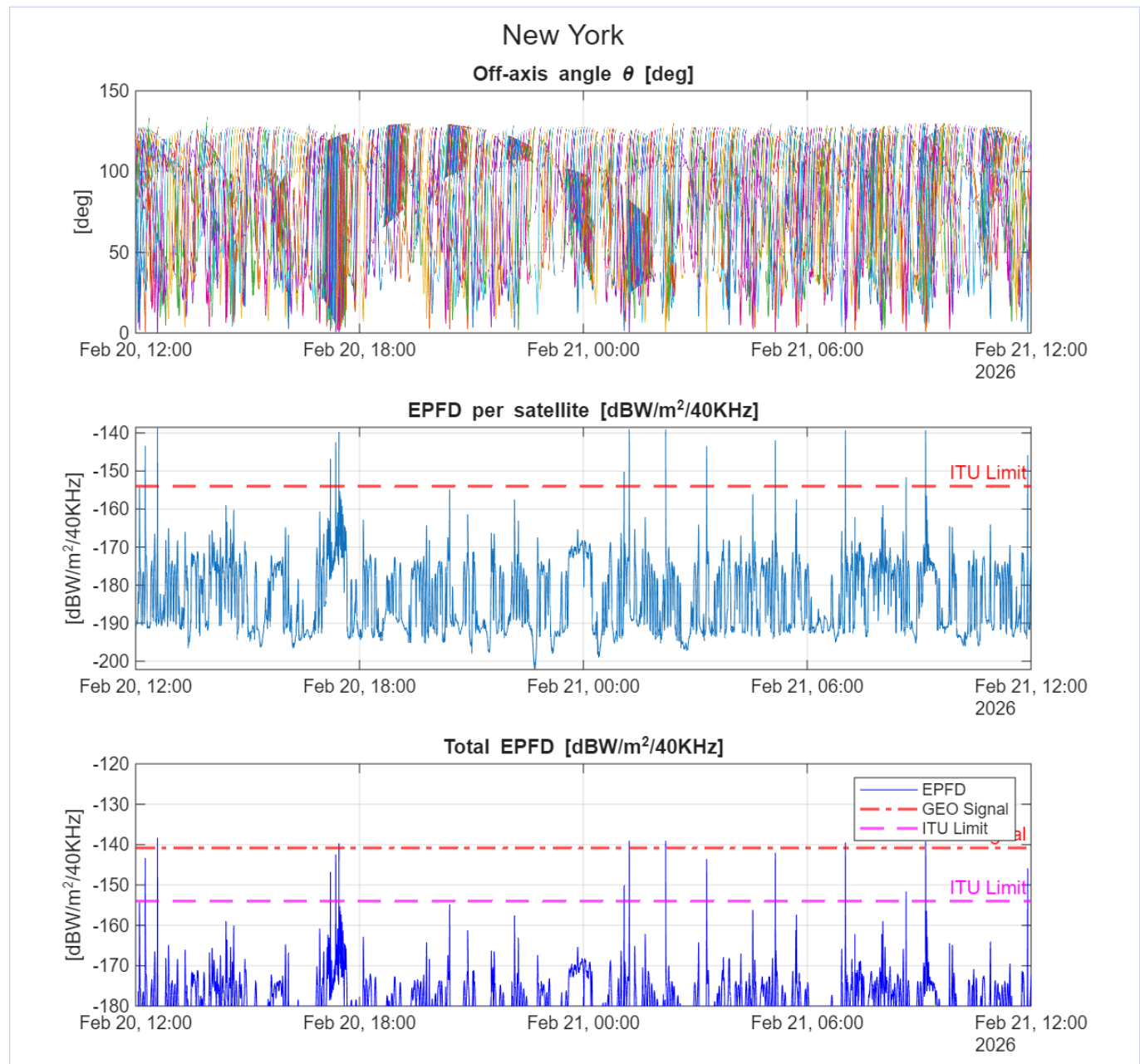


Figure 20 : Seattle, simulation avec antenne NGSO omnidirectionnelle

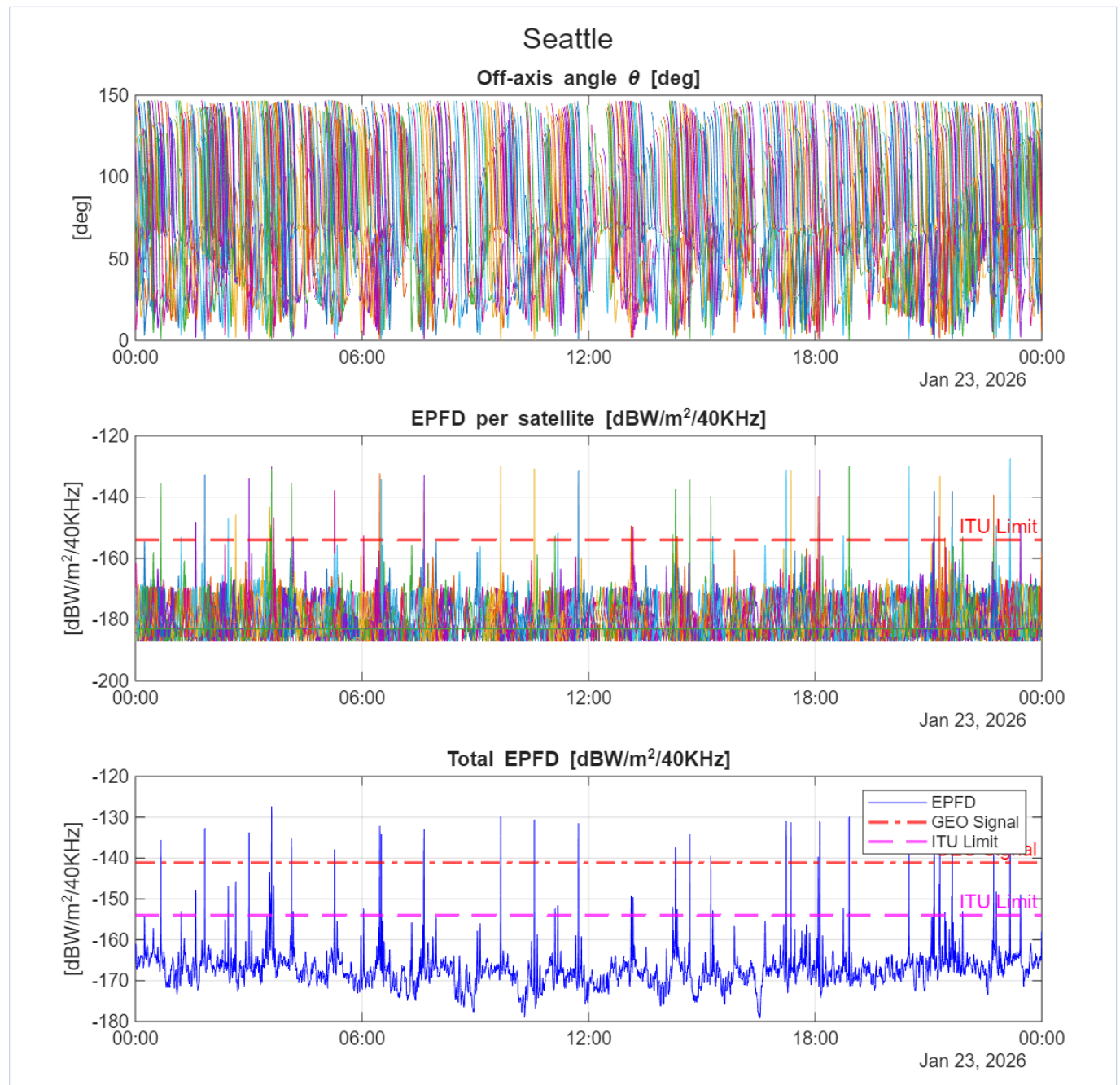
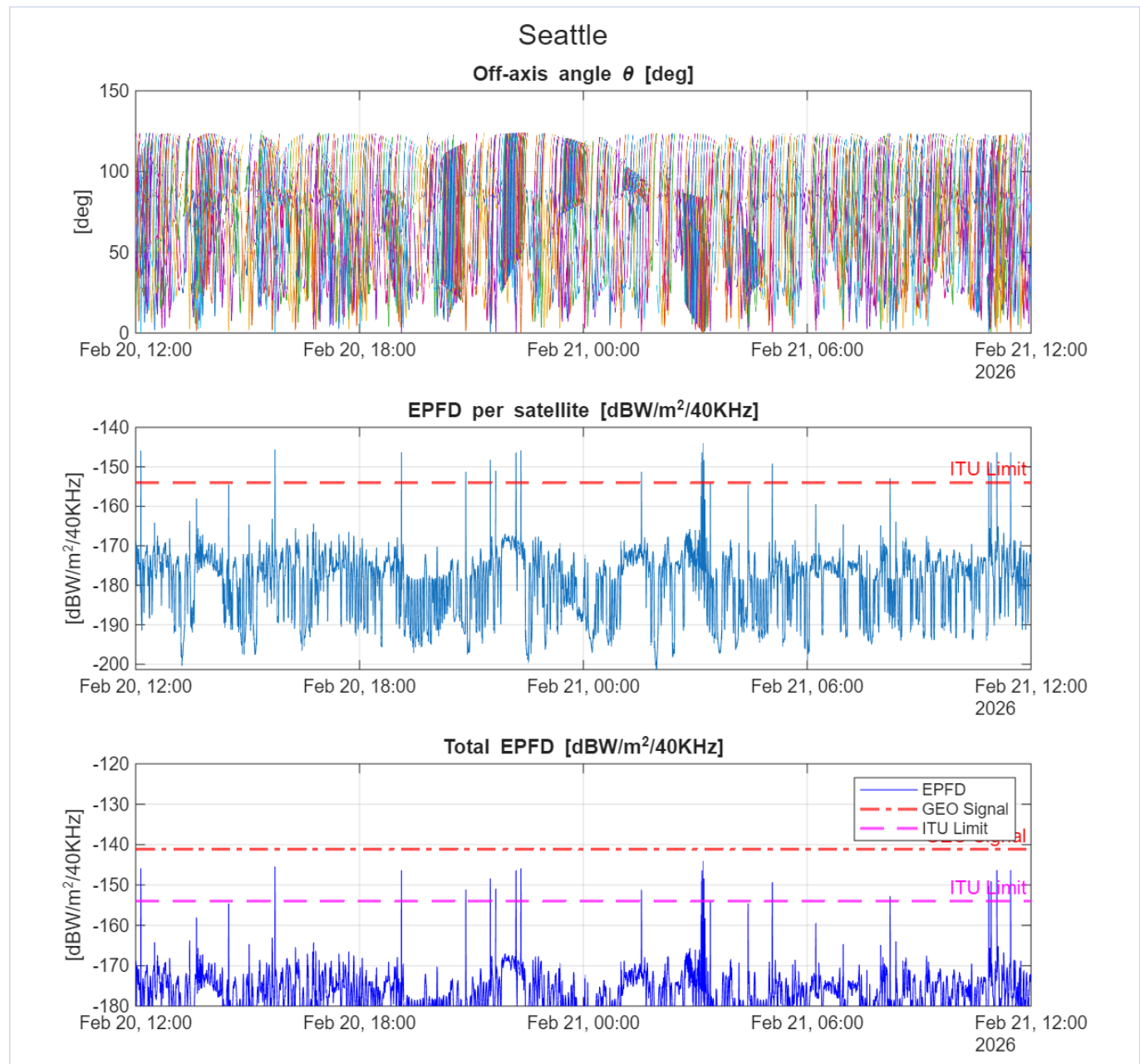


Figure 21 : Seattle, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle



L'analyse des graphiques des 5 sites fait apparaître une tendance générale commune à l'ensemble des sites. Par rapport à la première série de simulations avec modèle d'antenne omnidirectionnelle, une nette amélioration de la situation peut être observée. L'introduction d'un diagramme d'antenne directionnelle à réseau phasé pour les satellites NGSO renforce l'isolation des interférences, car la contribution de certains satellites NGSO qui « voient » l'antenne de la station au sol sous un angle d'orientation élevé est exclue de l'EPFD agrégée reçue au sol par le système GSO.

- ❖ L'EPFD agrégée de fond présente de faibles variations ; elle fluctue généralement entre -165 et -175 dBW/m²/40 kHz, comme dans les simulations précédentes avec antenne omnidirectionnelle.
- ❖ Avec une antenne NGSO directionnelle, les valeurs d'EPFD de pointe se situent dans une plage de -140 à -150 dBW/m²/40 kHz, contre environ -130 à -140 dBW/m²/40 kHz dans le scénario omnidirectionnel ; lors des événements de rapprochement, les pics d'EPFD sont nettement réduits d'environ 10 dB, ce qui peut se traduire par une amélioration de 10 dB du rapport C/I et permettre l'utilisation de MODCOD plus élevés pour les communications GSO.

Pour un même site (Los Angeles), deux simulations ont été réalisées avec des satellites GSO différents : la première avec SES-2 (à 87 degrés ouest), qui donne un angle d'élévation de 38 degrés, et la seconde avec SES-22 (à 139 degrés ouest), qui donne un angle d'élévation plus élevé, de 44 degrés. Les graphiques et le tableau de synthèse final montrent que, lorsque l'angle d'élévation du satellite GSO est plus faible, l'effet des systèmes NGSO sur l'EPFD diminue et la situation globale s'améliore. Cela apparaît également clairement pour Anchorage, le site le plus au nord, situé à 61,21 degrés de latitude, dont l'angle d'élévation vers le satellite GSO n'est que de 20 degrés.

L'analyse statistique fondée sur les graphiques de fonction de répartition empirique (ECDF, pour Empirical Cumulative Distribution Function) ci-dessous montre la probabilité que l'EPFD soit inférieure ou égale à la valeur de référence à 99 %, représentée en rouge. L'analyse ECDF montre que tous les sites pris en compte à l'étape de simulation avec modèle d'antenne directionnelle atteignent 99 % à des valeurs EPFD inférieures à celles observées précédemment. Le site le plus septentrional (Anchorage), avec une élévation plus faible, présente la plus forte amélioration, d'environ 12 dB (de -140 dB à -152 dB), par rapport au cas omnidirectionnel (figure 24), tandis que pour les autres sites, l'amélioration est d'environ 6 à 9 dB, ce qui place les résultats très près de la limite UIT. Bien qu'Anchorage ait constitué une valeur atypique à l'étape précédente, la prise en compte d'un diagramme d'antenne NGSO directionnelle réaliste améliore désormais la situation, et l'EPFD se rapproche de la limite UIT.

Figure 22 : CDF empirique pour antennes NGSO directionnelles multiples - Anchorage

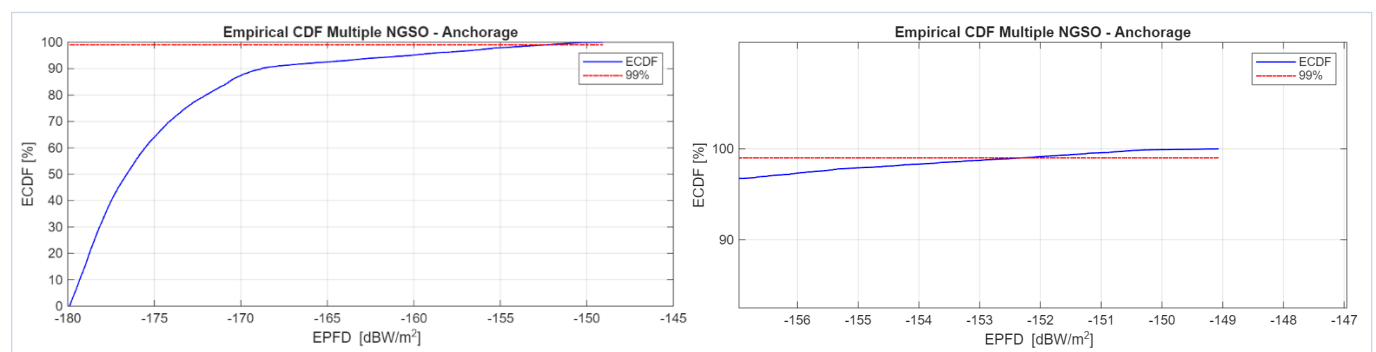


Figure 23 : CDF empirique pour antennes NGSO directionnelles multiples - Seattle

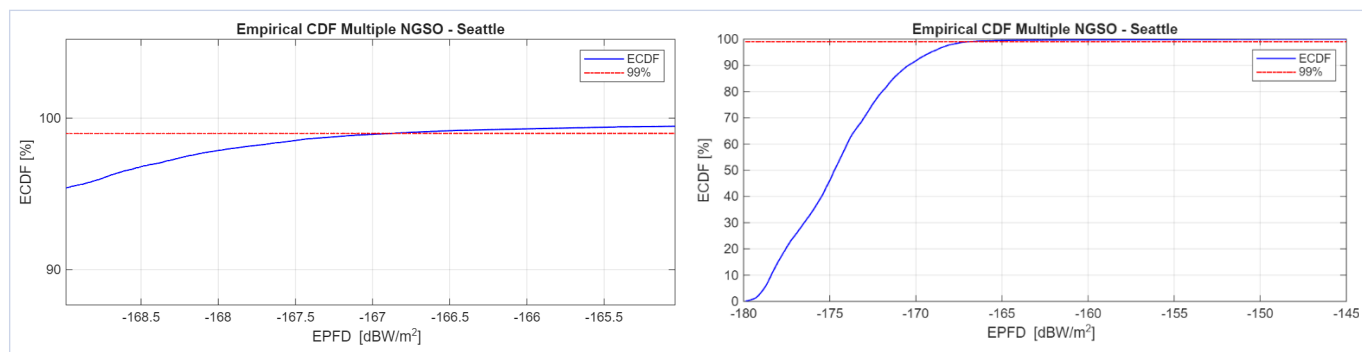


Figure 24 : CDF empirique pour antennes NGSO directionnelles multiples - New York

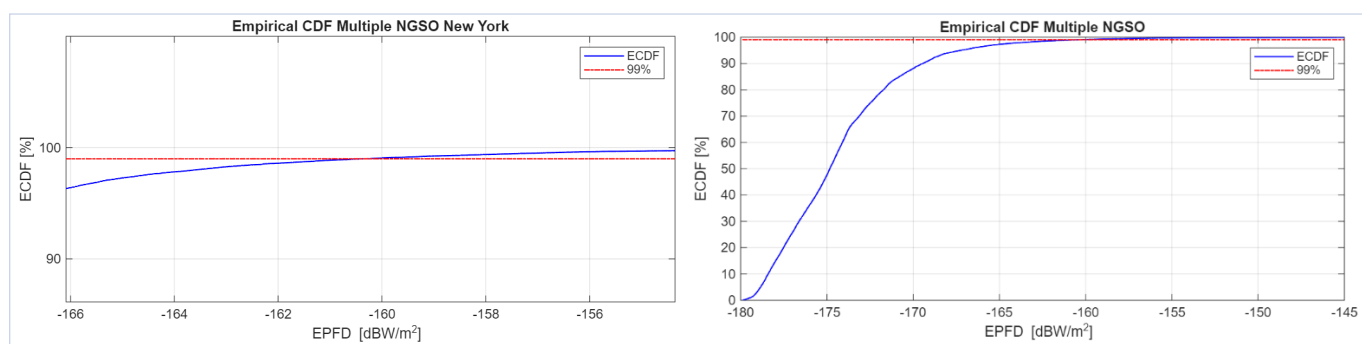


Figure 25 : CDF empirique pour antennes NGSO directionnelles multiples - Los Angeles

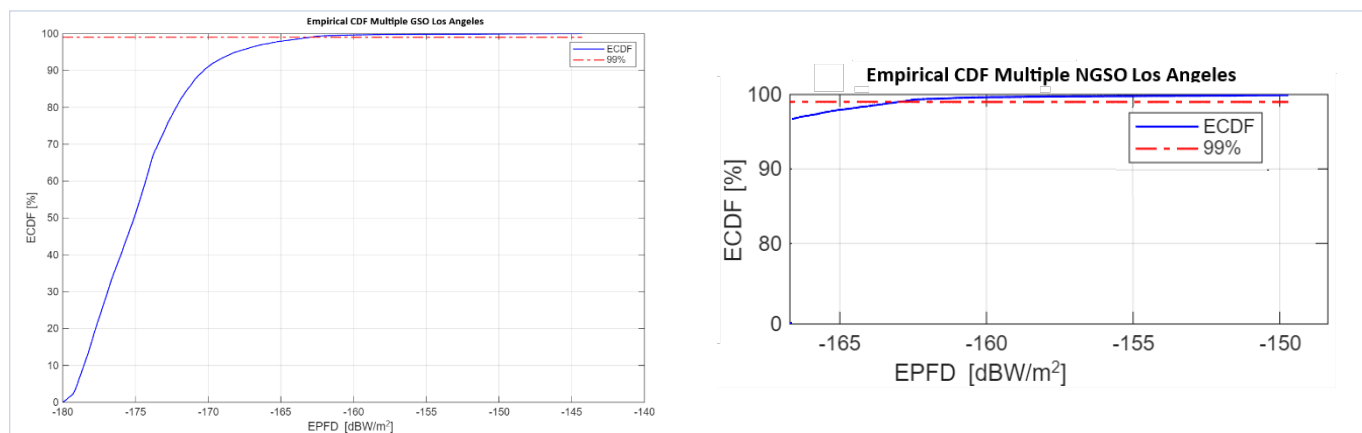
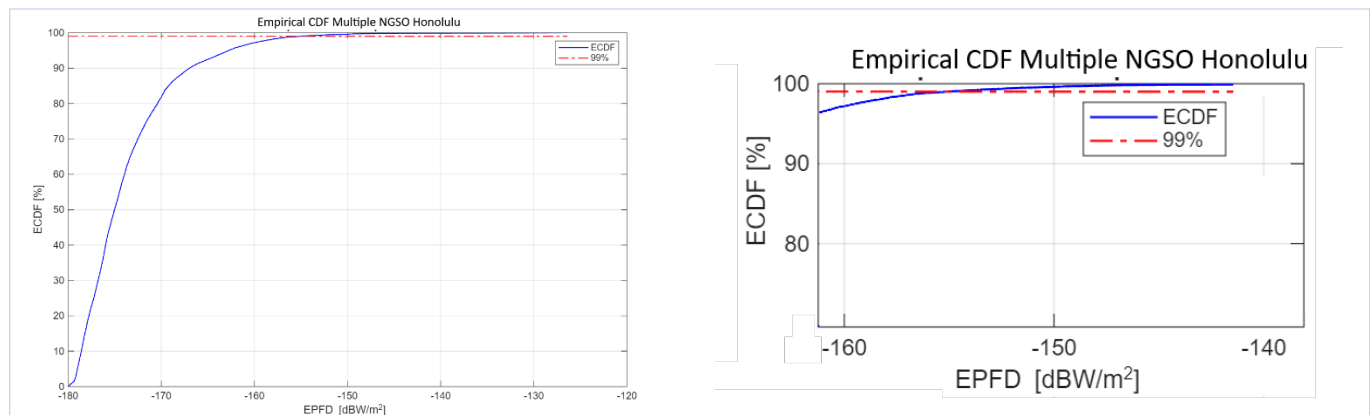


Figure 26 : CDF empirique pour antennes NGSO directionnelles multiples - Honolulu



Répartition dans le temps des intervalles pendant lesquels la limite UIT est dépassée

Les graphiques suivants montrent la répartition dans le temps des intervalles pendant lesquels la limite UIT est dépassée.

Pour chaque site, le premier graphique reprend les simulations avec antenne NGSO omnidirectionnelle, et le second les résultats obtenus avec un diagramme d'antenne NGSO directionnelle multifaisceau réel.

La répartition de la durée des dépassements de l'EPFD montre une situation nettement meilleure. Pour chaque site, la durée maximale de dépassement est inférieure à celle observée auparavant, la réduction la plus marquée étant relevée à Anchorage, où le maximum passe de 80 s (1 événement) à 7 s (1 événement).

Figure 27 : Anchorage, répartition des dépassements de PFD avec antenne NGSO omnidirectionnelle

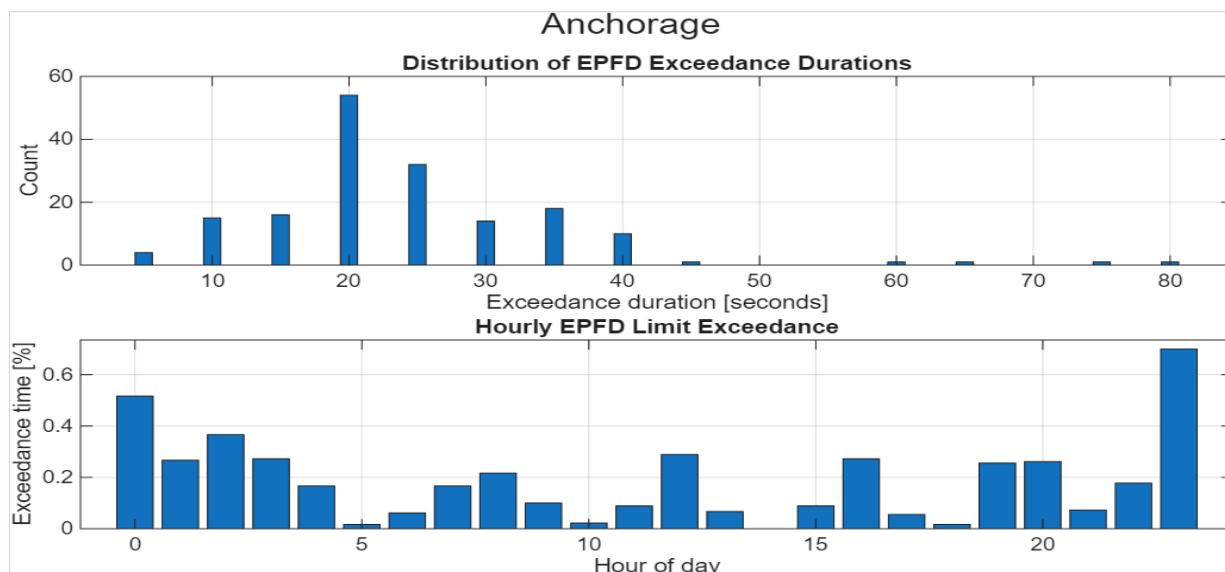


Figure 28 : Anchoage, répartition des dépassements de PFD avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

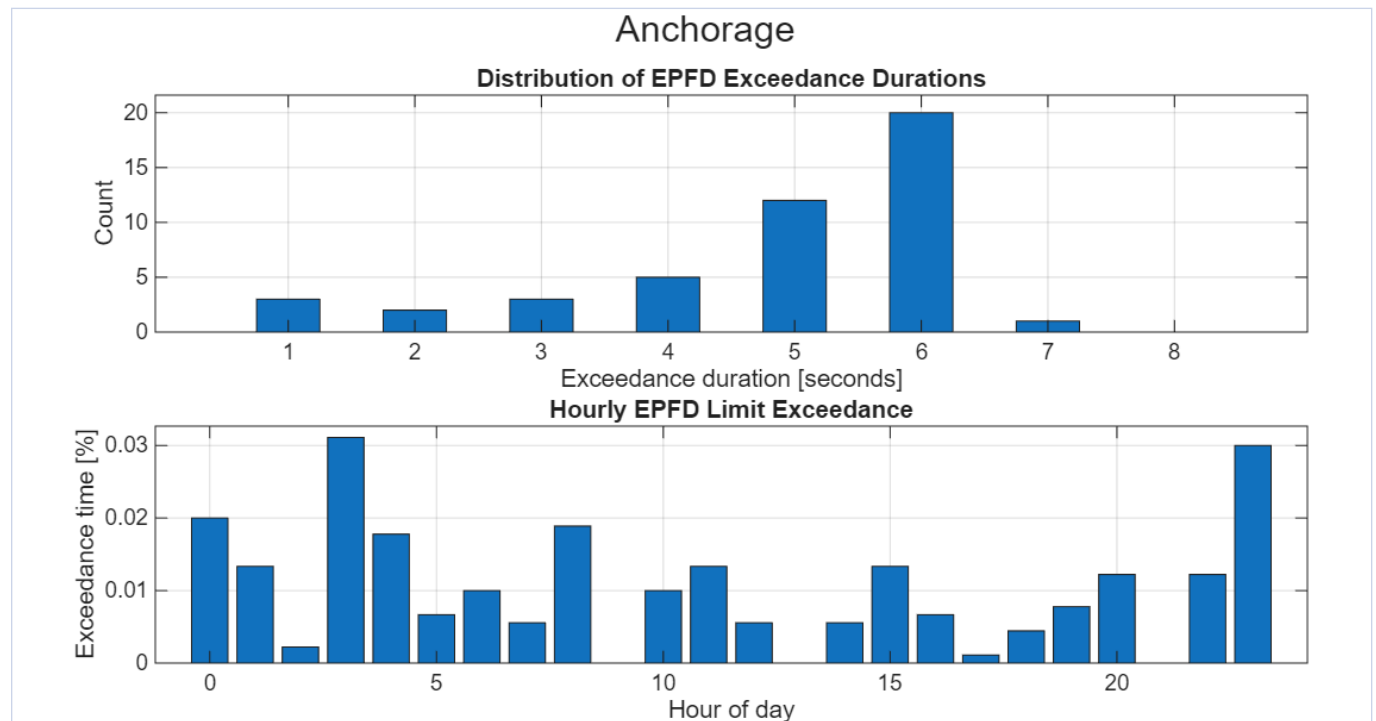


Figure 29 : Honolulu, répartition des dépassements de PFD avec antenne NGSO omnidirectionnelle

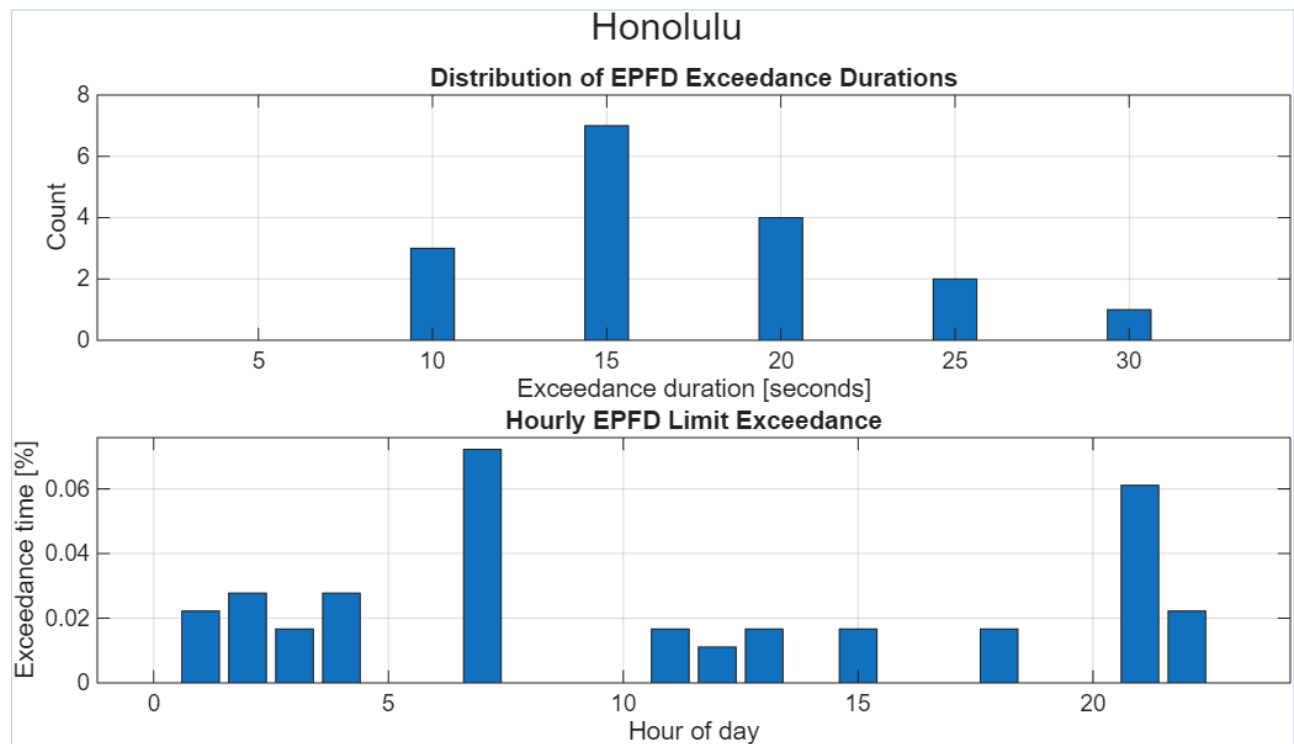


Figure 30 : Honolulu, répartition des dépassements de PFD avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

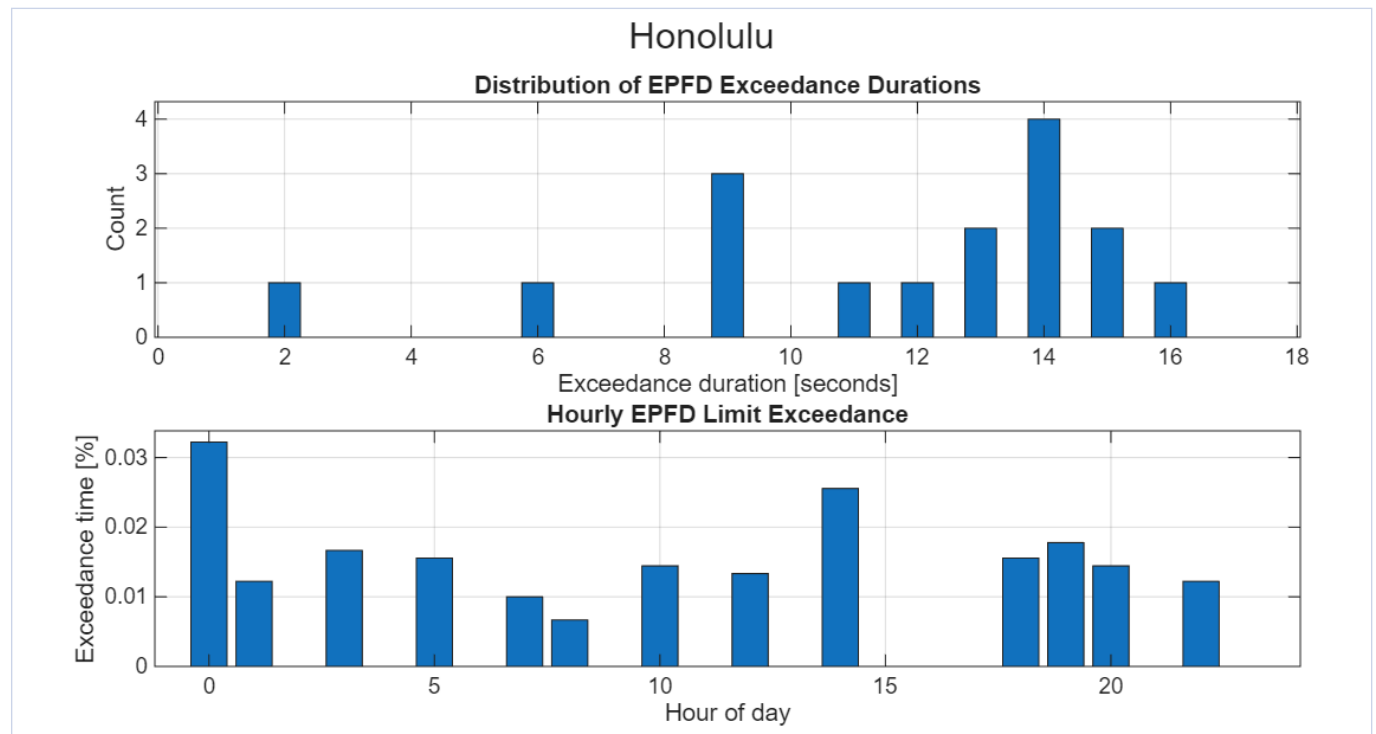


Figure 31 : Los Angeles, répartition des dépassements de PFD avec antenne NGSO omnidirectionnelle

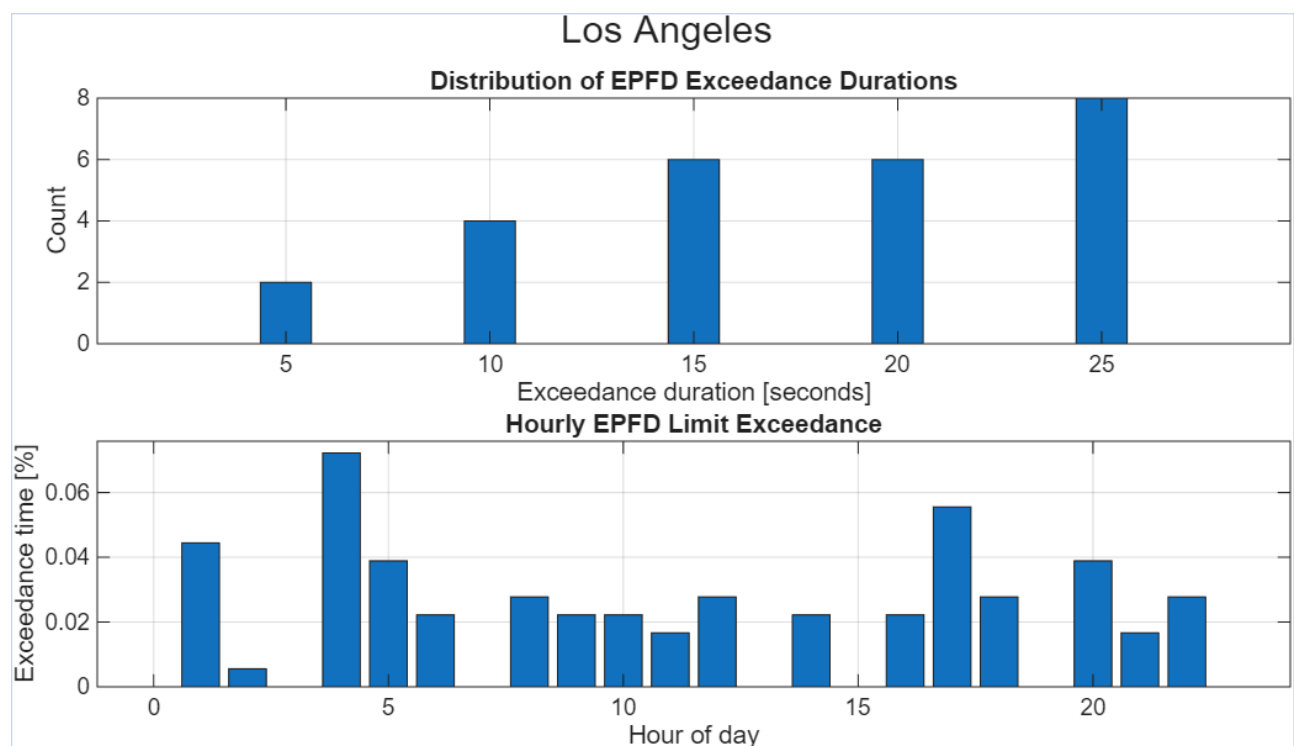


Figure 32 : Los Angeles, répartition des dépassements de PFD avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

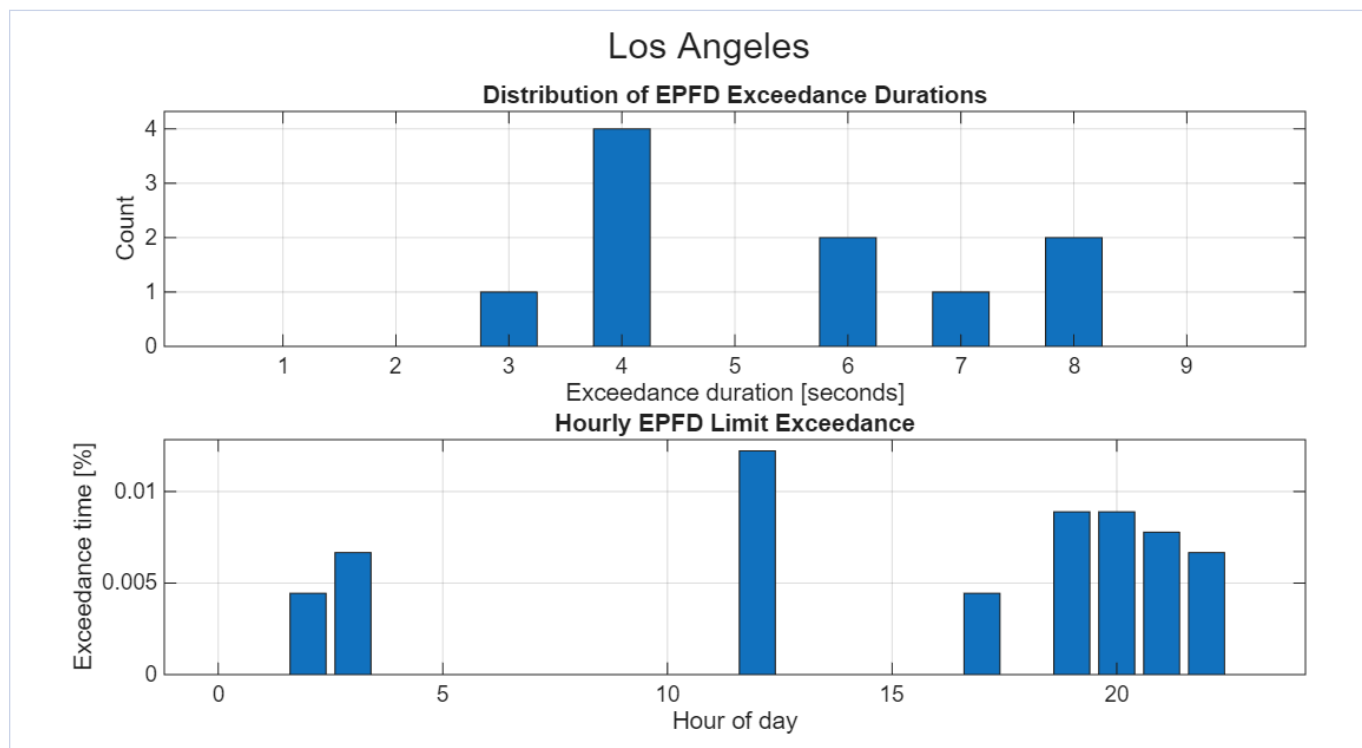


Figure 33 : New York, répartition des dépassements de PFD avec antenne NGSO omnidirectionnelle

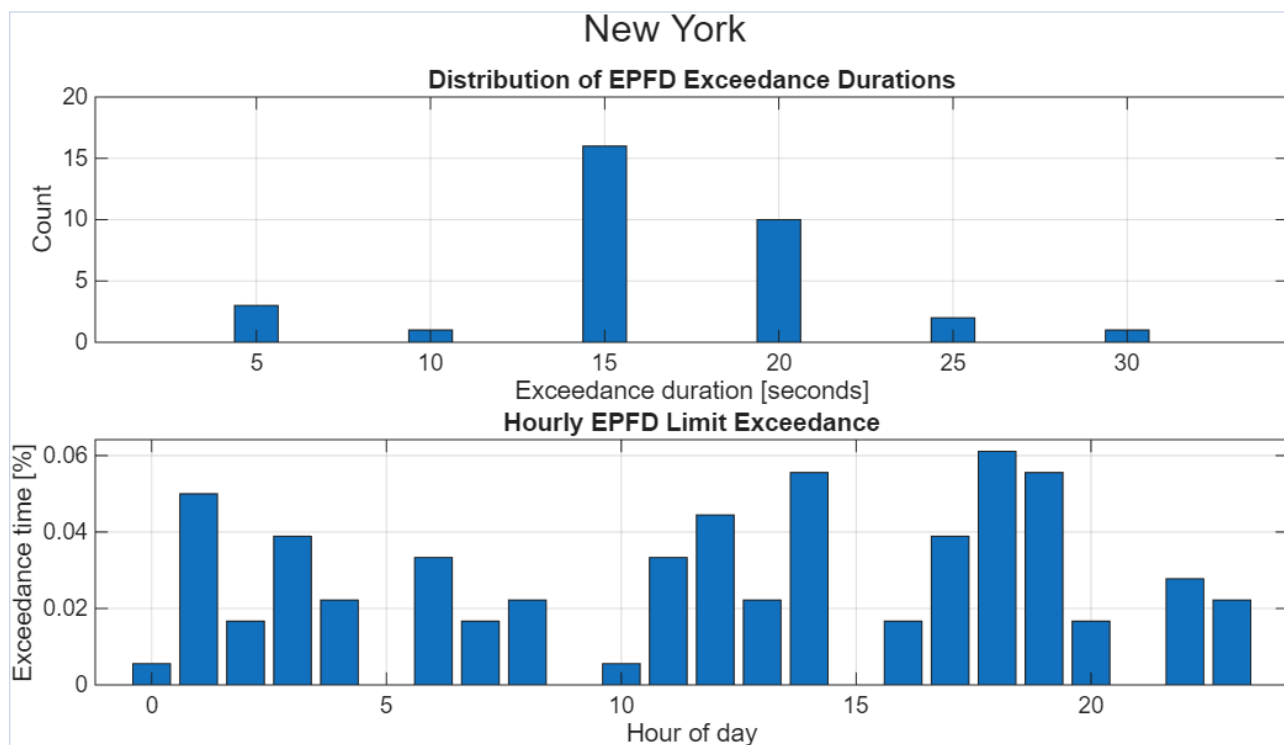


Figure 34 : New York, répartition des dépassements de PFD avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

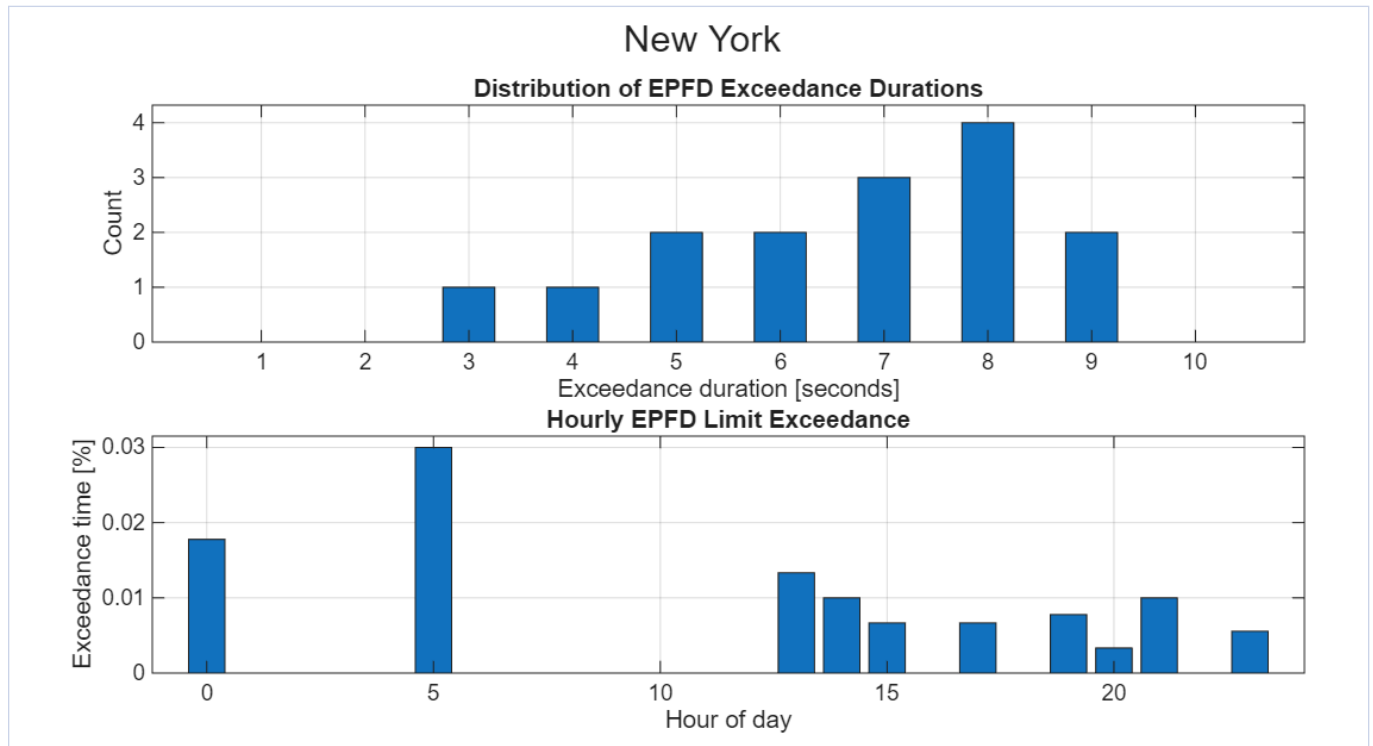


Figure 35 : Seattle, répartition des dépassements de PFD avec antenne NGSO omnidirectionnelle

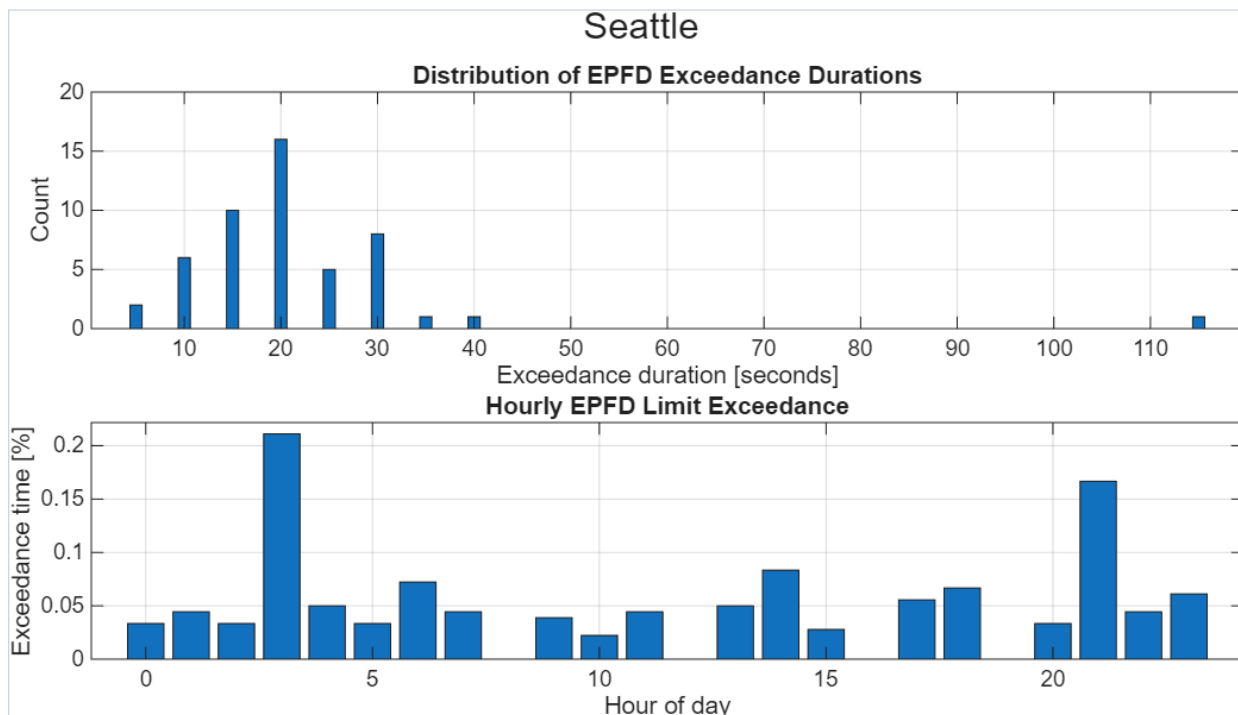
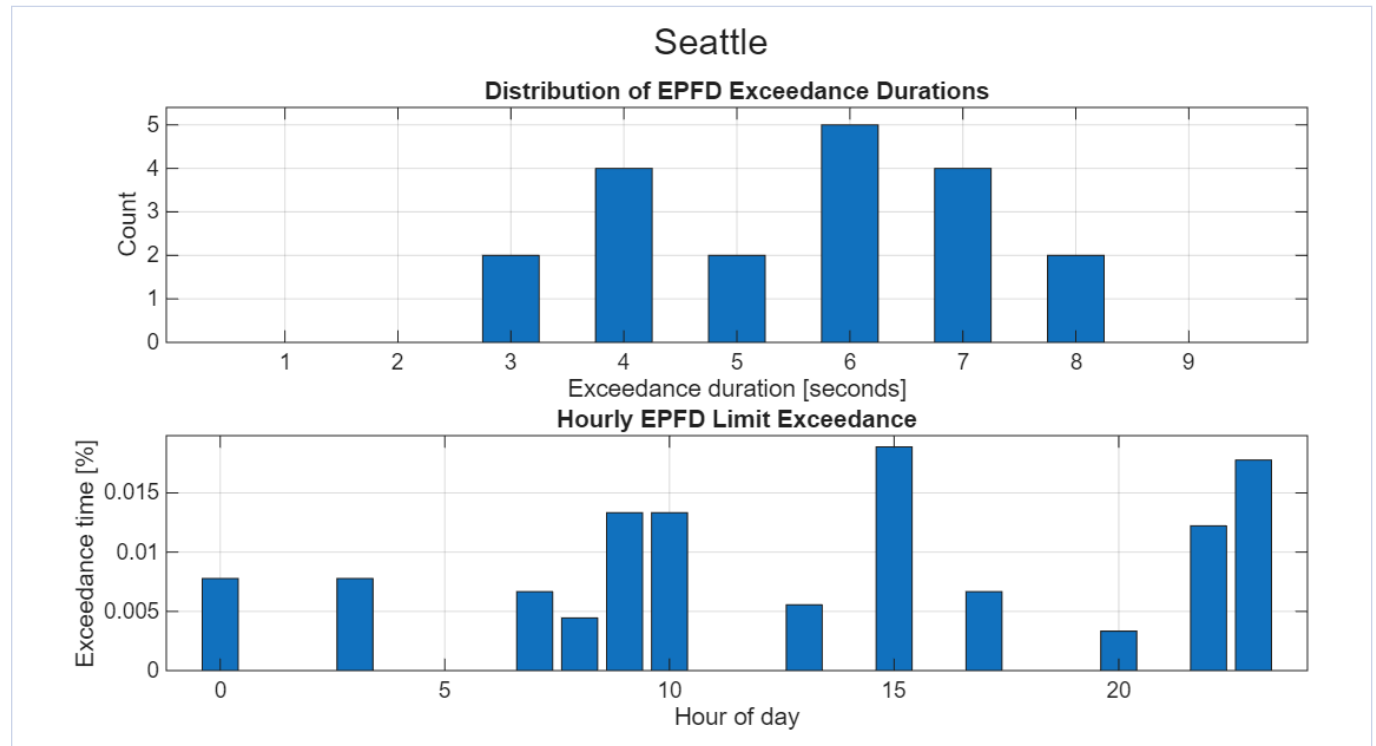


Figure 36 : Seattle, répartition des dépassements de PFD avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle



Synthèse des observations propres à chaque site

Les observations propres à chaque site sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3 : Observations propres à chaque site

	Nombre moyen de satellites visibles	Nombre minimal de satellites visibles	Nombre maximal de satellites visibles	Durée totale d'observation, en heures	Durée totale de dépassement, en min	Pourcentage de dépassement, %	Nombre d'événements	Durée de l'événement le plus long, en s	Durée de conformité la plus longue, en min	Latitude, en degrés
Anchorage	7,01	0	19	24	67,75	4,7	168	80	132,8	61,1°
	5,06	0	14	24	3,72	0,26	46	7	155,2	
Seattle	9,91	2	21	24	18,25	1,27	50	115	121,17	47,6°
	8,45	1	19	24	1,77	0,12	19	50	215,53	
New York	10,43	2	20	24	9,08	0,63	33	30	112,58	40,69°
GSO _{elev} 44°	8,91	2	20	24	1,67	0,12	15	9	458,2	

	Nombre moyen de satellites visibles	Nombre minimal de satellites visibles	Nombre maximal de satellites visibles	Durée totale d'observation, en heures	Durée totale de dépassement, en min	Pourcentage de dépassement, %	Nombre d'événements	Durée de l'événement le plus long, en s	Durée de conformité la plus longue, en min	Latitude, en degrés
Los Angeles	10,29	2	21	24	7,67	0,53	26	25	161,5	34,02°
GSO _{elev} 44°	8,05	1	20	24	4,17	0,29	24	14	187,67	
GSO _{elev} 38°	8,05	1	20	24	0,9	0,06	10	8	539	
Honolulu	7,41	0	20	24	4,92	0,34	17	30	232,83	21,32°
	5,48	0	18	24	3,1	0,22	16	16	242,85	

Conclusions préliminaires

L'utilisation des antennes directionnelles multifaisceaux à réseau phasé actuelles des satellites NGSO réduit significativement les valeurs de pointe de l'EPFD et les durées de dépassement, des latitudes nord aux latitudes les plus méridionales, ce qui permet une analyse plus poussée de l'ajustement des valeurs de CIR et montre que les communications GSO, du point de vue de la perte de débit utile et de l'efficacité spectrale, restent peu affectées, y compris lorsque les conditions météorologiques sont prises en compte.

18. Impact des interférences sur l'efficacité spectrale GSO

Les valeurs EPFD analysées ci-dessus, dans différentes conditions de modélisation des antennes, ont montré que les nouvelles technologies de transmission radio NGSO utilisées pour l'accès Internet haut débit, comme les antennes multifaisceaux à réseau phasé, associées aux techniques d'atténuation en co-fréquence, ont considérablement réduit les niveaux d'interférence générés par les systèmes NGSO conformément à la zone d'exclusion définie à l'article 22 de l'UIT, au moyen de masques EPFD réglementés, jusqu'à 10 dB par rapport à une antenne classique non orientable, ce qui permet de réduire davantage l'angle hors axe avec un impact minimal sur l'efficacité spectrale et les performances des stations terriennes GSO.

L'un des principaux critères de protection des systèmes GSO définis par l'UIT et actuellement débattus concerne la définition des performances des communications GSO en fonction du temps d'indisponibilité, la recommandation UIT-R S.1323 indiquant que l'interférence agrégée provenant de tous les systèmes non GSO du service fixe par satellite partageant des fréquences avec une liaison GSO ne devrait pas représenter plus de 10 % de la marge temporelle allouée au BER (ou à la valeur C/N) spécifiée dans les objectifs de performance à court terme du réseau souhaité et correspondant au plus faible pourcentage de temps (valeur C/N la plus basse) ;

À titre d'exemple, pour une liaison GSO dont la disponibilité requise est de 99,5 %, l'indisponibilité correspondante est de $100 - 99,5 \% = 0,5 \%$, soit environ 263 minutes par an. D'après la déclaration de l'UIT mentionnée ci-dessus, cela signifie que les interférences des systèmes non GSO ne sont autorisées à créer que $263 * 0,1 = 26,3$ minutes d'indisponibilité sur cette liaison par an¹³. Cette approche ne tient pas compte des nouvelles techniques ACM, qui ajustent dynamiquement le MODCOD afin d'assurer l'efficacité spectrale la plus élevée possible et donc une bien meilleure protection contre divers facteurs liés au canal.

Cette réglementation, initialement définie en 1997, est aujourd'hui considérée comme conservatrice, car, par ailleurs, les systèmes modernes de communication par satellite utilisent des techniques plus avancées de codage et de modulation adaptatifs, qui adaptent dynamiquement les MODCOD (modulation et codes FEC) afin d'améliorer en permanence l'efficacité spectrale en fonction des conditions du canal radio, auquel cas le temps d'indisponibilité devient relatif.

Selon la recommandation plus récente UIT-R S.2131-1, qui prend en compte le codage et la modulation adaptatifs, l'un des paramètres clés définissant une communication par satellite concerne le débit utile et l'efficacité spectrale dans diverses conditions de propagation, y compris des conditions climatiques et météorologiques spécifiques, notamment l'atténuation par la pluie. La nouvelle recommandation indique également que les Recommandations existantes relatives aux performances d'erreur (par exemple la Recommandation UIT-R S.1062-4) couvrent les HRDP à débit binaire constant et ne sont donc pas applicables aux systèmes utilisant des techniques ACM¹⁴.

Les performances de nombreux systèmes satellitaires modernes sont spécifiées en termes de taux d'erreurs de paquets (PER, pour Packet Error Rate), en tenant compte des transmissions par paquets, et les caractéristiques du PER présentent un comportement de décroissance rapide presque identique à celui du BER. Ce comportement implique que les performances satellitaires exprimées en PER en fonction du temps ne sont pas pertinentes pour les systèmes satellitaires utilisant des techniques ACM, car ces systèmes s'adaptent aux conditions dégradées en réduisant le débit utile global et ne sont donc plus des systèmes à débit binaire constant. Le concept consistant à mesurer les performances des liaisons satellitaires utilisant des techniques ACM au moyen du débit utile moyen ou dégradé a déjà été étudié précédemment¹⁵. L'article cité examine des applications ACM tolérant une réduction du débit d'information.

La probabilité que le PER d'un système satellitaire utilisant l'ACM se dégrade jusqu'à un niveau inutilisable est extrêmement faible tant que l'ensemble des MODCOD ACM n'a pas épuisé les alternatives de codage disponibles. Par conséquent, il n'est plus nécessaire de fournir à la fois une performance en matière d'erreurs et une valeur de disponibilité pour spécifier les performances HRDP satellitaires. En outre, l'objectif de performance approprié serait indépendant du débit du canal et pourrait être appliqué à tout débit « désigné » utilisé.

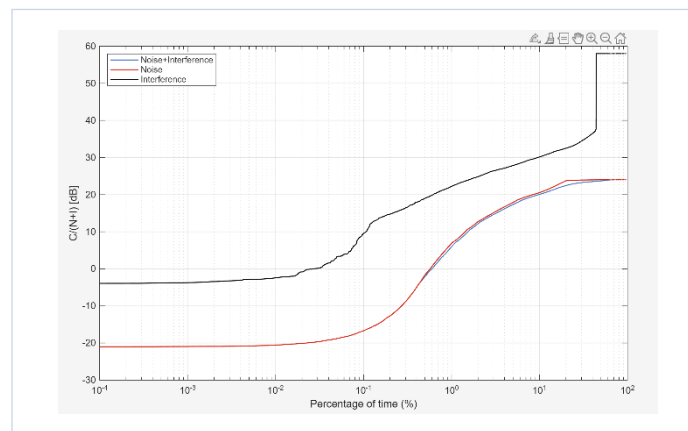
¹³ [EPFD Part I Overview WRS-2024.pdf](#)

¹⁴ Recommandation UIT-R S.2131-1

¹⁵ Gerald Shewan, « Alternative Measure of Performance for Satellite Links Employing Adaptive Coding and Modulation », 30^e édition de l'AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC-2012), 24-27 septembre 2012, Ottawa, Canada.

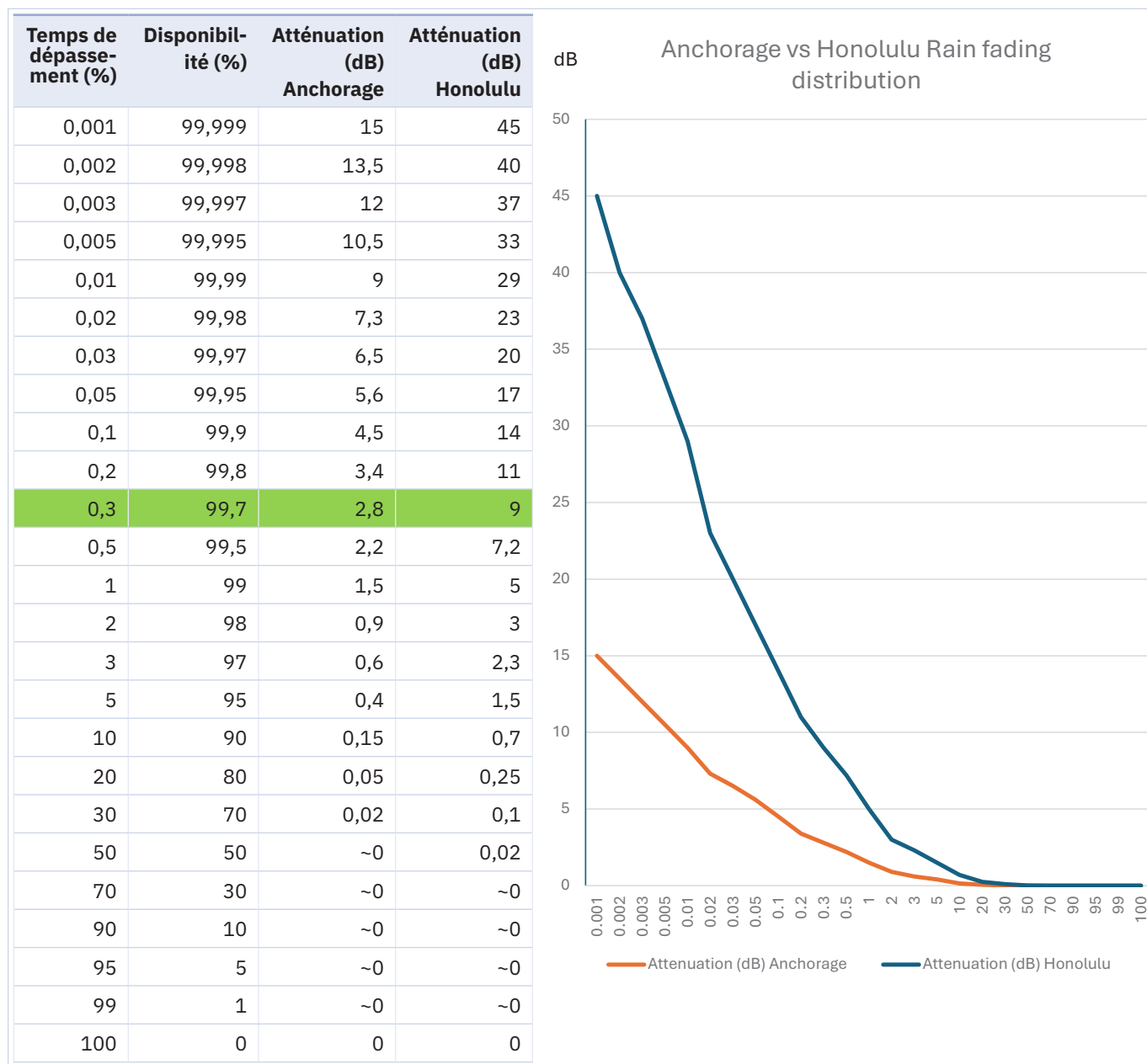
Au regard de l'ensemble des éléments ci-dessus, la présente étude a approfondi, sur la base de la méthodologie UIT-R S.2131-1, l'analyse visant à déterminer quelle serait la dégradation du débit utile et de l'efficacité spectrale de la liaison utilisateur au sol GSO pour deux sites représentatifs situés à des latitudes extrêmes, Anchorage (Alaska) et Honolulu (Hawaï), en intégrant également dans la méthodologie de l'UIT les interférences des satellites NGSO, puisque le rapport C/I suit la même distribution que le rapport C/N en raison de la distribution de l'affaiblissement météorologique selon le temps de dépassement, conformément à la Recommandation UIT-R P.618 pour une connexion satellitaire utilisant l'ACM.

Figure 37 : Corrélation entre la distribution des interférences et du bruit sur la base du temps de dépassement de l'affaiblissement météorologique



La distribution de l'affaiblissement dû à la pluie a donc été estimée pour les sites d'Anchorage et d'Honolulu, afin d'évaluer l'impact global du rapport C/N+I sur la dégradation de l'efficacité spectrale, en fonction du temps de dépassement de l'affaiblissement météorologique, pour une disponibilité du système de 99,7 %.

Figure 38 : Distribution de l'affaiblissement dû à la pluie à Anchorage et Honolulu



L'efficacité spectrale a également été calculée selon la méthodologie UIT-R S.2131-1, en intégrant aussi l'impact des interférences dans la dégradation de l'efficacité spectrale. L'efficacité spectrale théorique maximale selon l'UIT-R S.2131-1, pour un rapport C/N = 24 dB, est d'environ 5,653 b/s/Hz.

Les tableaux suivants présentent la dégradation moyenne de l'efficacité spectrale en fonction du temps de dépassement lié à l'affaiblissement météorologique, qui correspond également à une dégradation moyenne équivalente du débit utile, pour les sites d'Anchorage et d'Honolulu, en tenant compte de l'estimation du niveau d'interférence I fondée sur les valeurs EPFD calculées précédemment.

Tableau 4 : Estimation de la dégradation de l'efficacité spectrale pour Anchrage

				Efficacité spectrale			Dégradation de l'efficacité spectrale						
T %	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	ΔT %	φ(T %) ΔT % C/N	φ(T %) ΔT % C/I	φ(T %) ΔT % C/N+I
0,3	21,930	13,360	13,055	5,080	2,983	2,917	0,101	0,472	0,484	0,100	0,010	0,047	0,048
0,4	22,230	14,688	14,272	5,161	3,279	3,185	0,087	0,420	0,437	0,100	0,009	0,042	0,044
0,5	22,530	15,732	15,215	5,243	3,519	3,400	0,072	0,377	0,399	0,100	0,007	0,038	0,040
0,6	22,670	17,183	16,479	5,282	3,864	3,695	0,066	0,316	0,346	0,100	0,007	0,032	0,035
0,7	22,810	18,401	17,491	5,320	4,163	3,939	0,059	0,264	0,303	0,100	0,006	0,026	0,030
0,8	22,950	19,436	18,264	5,359	4,424	4,129	0,052	0,217	0,270	0,100	0,005	0,022	0,027
0,9	23,090	20,847	19,352	5,398	4,791	4,403	0,045	0,153	0,221	0,100	0,005	0,015	0,022
1	23,230	22,063	20,168	5,437	5,116	4,613	0,038	0,095	0,184	0,500	0,019	0,047	0,092
1,5	23,530	27,488	21,845	5,520	5,653	5,057	0,023	0,000	0,105	0,500	0,012	0,000	0,053
2	23,830	32,000	22,665	5,605	5,653	5,280	0,009	0,000	0,066	0,500	0,004	0,000	0,033
2,5	23,980	32,000	23,035	5,647	5,653	5,382	0,001	0,000	0,048	0,500	0,001	0,000	0,024
3	24,130	32,000	23,275	5,653	5,653	5,449	0,000	0,000	0,036	0,500	0,000	0,000	0,018
3,5	24,180	32,000	23,578	5,653	5,653	5,534	0,000	0,000	0,021	0,500	0,000	0,000	0,011
4	24,230	32,000	23,865	5,653	5,653	5,614	0,000	0,000	0,007	0,500	0,000	0,000	0,003
4,5	24,280	32,000	24,020	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000	0,000	0,000
5	24,330	32,000	24,146	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,600	0,000	0,000	0,000
5,6	24,360	32,000	24,205	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
6,6	24,410	32,000	24,305	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	1,400	0,000	0,000	0,000
8	24,480	32,000	24,391	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,000	0,000	0,000	0,000
10	24,580	32,000	24,494	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,200	0,000	0,000	0,000
12,2	24,602	32,000	24,584	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,300	0,000	0,000	0,000
14,5	24,625	32,000	24,607	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,500	0,000	0,000	0,000
17	24,650	32,000	24,634	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,000
20	24,680	32,000	24,665	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
30	24,710	32,000	24,706	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
40	24,720	32,000	24,719	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
50	24,730	32,000	24,729	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	50,000	0,000	0,000	0,000
100	24,730	32,000	24,730	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
							Dégradation de l'efficacité spectrale [%]				0,084	0,269	0,480

Tableau 5 : Estimation de la dégradation de l'efficacité spectrale pour Honolulu

				Efficacité spectrale			Dégradation de l'efficacité spectrale						
T %	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	C/N	C/I	C/(N+I)	ΔT %	φ(T %) ΔT % C/N	φ(T %) ΔT % C/I	φ(T %) ΔT % C/N+I
0,3	15,730	15,432	13,480	3,519	3,450	3,010	0,378	0,390	0,468	0,100	0,038	0,039	0,047
0,4	16,630	16,704	14,130	3,731	3,749	3,154	0,340	0,337	0,442	0,100	0,034	0,034	0,044
0,5	17,530	17,632	14,777	3,948	3,973	3,299	0,302	0,297	0,416	0,100	0,030	0,030	0,042
0,6	17,970	18,482	15,351	4,056	4,183	3,431	0,282	0,260	0,393	0,100	0,028	0,026	0,039
0,7	18,410	19,190	15,852	4,165	4,362	3,548	0,263	0,228	0,372	0,100	0,026	0,023	0,037
0,8	18,850	19,864	16,275	4,276	4,534	3,647	0,244	0,198	0,355	0,100	0,024	0,020	0,035
0,9	19,290	20,385	16,719	4,387	4,669	3,752	0,224	0,174	0,336	0,100	0,022	0,017	0,034
1	19,730	20,890	17,093	4,500	4,802	3,842	0,204	0,151	0,320	0,500	0,102	0,075	0,160
1,5	20,730	22,817	18,409	4,760	5,322	4,165	0,158	0,059	0,263	0,500	0,079	0,029	0,132
2	21,730	24,579	19,336	5,026	5,653	4,399	0,111	0,000	0,222	0,500	0,055	0,000	0,111
2,5	22,080	26,134	20,040	5,121	5,653	4,580	0,094	0,000	0,190	0,500	0,047	0,000	0,095
3	22,430	27,154	20,545	5,216	5,653	4,711	0,077	0,000	0,167	0,500	0,039	0,000	0,083
3,5	22,630	28,057	21,074	5,271	5,653	4,851	0,068	0,000	0,142	0,500	0,034	0,000	0,071
4	22,830	28,734	21,584	5,326	5,653	4,987	0,058	0,000	0,118	0,500	0,029	0,000	0,059
4,5	23,030	29,224	21,899	5,381	5,653	5,071	0,048	0,000	0,103	0,500	0,024	0,000	0,051
5	23,230	32,000	22,142	5,437	5,653	5,137	0,038	0,000	0,091	0,600	0,023	0,000	0,055
5,6	23,326	32,000	22,388	5,463	5,653	5,204	0,034	0,000	0,079	1,000	0,034	0,000	0,079
6,6	23,486	32,000	22,667	5,508	5,653	5,281	0,026	0,000	0,066	1,400	0,036	0,000	0,092
8	23,710	32,000	23,029	5,571	5,653	5,381	0,015	0,000	0,048	2,000	0,029	0,000	0,096
10	24,030	32,000	23,356	5,653	5,653	5,472	0,000	0,000	0,032	2,200	0,000	0,000	0,071
12,2	24,129	32,000	23,685	5,653	5,653	5,564	0,000	0,000	0,016	2,300	0,000	0,000	0,036
14,5	24,233	32,000	24,042	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	2,500	0,000	0,000	0,000
17	24,345	32,000	24,158	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	3,000	0,000	0,000	0,000
20	24,480	32,000	24,300	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
30	24,630	32,000	24,582	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
40	24,670	32,000	24,659	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	10,000	0,000	0,000	0,000
50	24,710	32,000	24,701	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	50,000	0,000	0,000	0,000
100	24,730	32,000	24,730	5,653	5,653	5,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
							Dégradation de l'efficacité spectrale [%]				0,734	0,293	1,470

Conclusions

En appliquant la procédure UIT-R S.2131-1 à la dégradation moyenne annuelle de l'efficacité spectrale, on constate que, pour deux sites situés à des latitudes extrêmes, l'effet combiné C/N+I est le suivant :

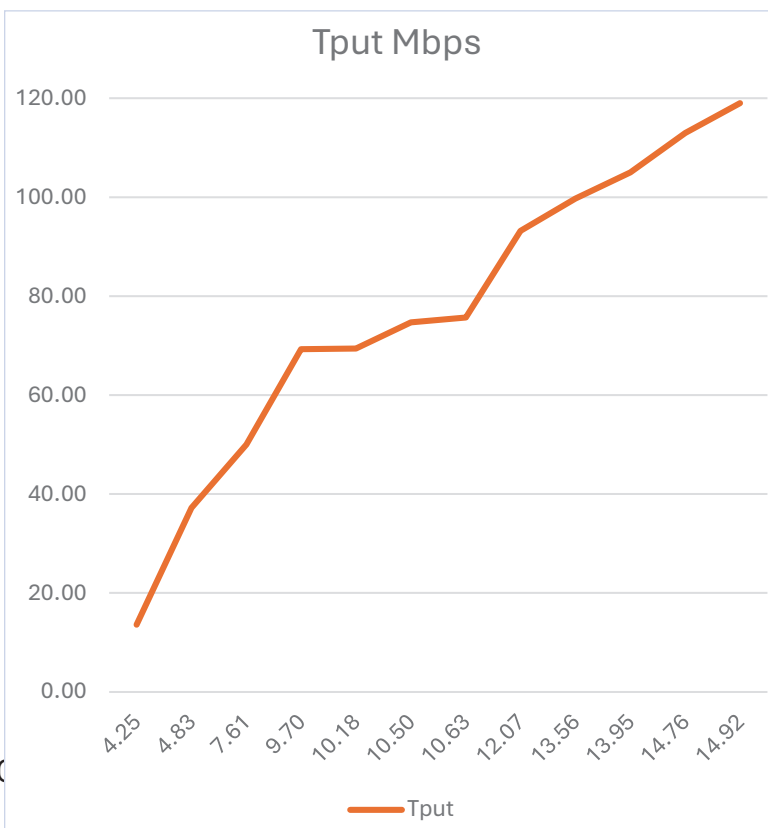
- ❖ Anchorage (lat. 61,1°) : une dégradation allant jusqu'à 0,48 % de l'efficacité spectrale moyenne et, respectivement, de la perte de débit utile peut être observée.
- ❖ Honolulu (lat. 21,32°) : une dégradation allant jusqu'à 1,47 % de l'efficacité spectrale moyenne et, respectivement, de la perte de débit utile peut être observée, principalement en raison de l'affaiblissement dû aux pluies tropicales, qui dégrade encore davantage le rapport C/I+N.

Ces valeurs correspondent à un niveau acceptable de dégradation de l'efficacité spectrale GSO, que les systèmes ACM existants peuvent compenser.

Afin d'évaluer l'impact de telles dégradations, des essais en laboratoire ont été réalisés sur un véritable modem DVB-S2 NewTec 470 EL470, avec une CBW de 36 MHz, sur un canal satellite émulé, afin de déterminer la limite d'un système GSO en présence d'interférences NGSO.

Tableau 6 : Dégradation des performances des MODCOD lors des essais en laboratoire à différents niveaux de C/I

MODCOD	CIR	Débit utile (Mbit/s)	Perte de débit utile
QPSK-1/4	4,25	13,60	-2,2 %
QPSK-2/3	4,83	37,20	-0,8 %
QPSK-9/10	7,61	50,00	-2,2 %
8PSK-5/6	9,70	69,30	-2,3 %
8PSK-5/6	10,18	69,40	-2,1 %
8PSK-9/10	10,50	74,70	-2,5 %
8PSK-9/10	10,63	75,70	-1,2 %
16APSK-5/6	12,07	93,20	-1,2 %
16 APSK-9/10	13,56	99,70	-2,3 %
32APSK-3/4	13,95	105,00	-0,9 %
32APSK-5/6	14,76	113,00	-1,7 %
32APSK-9/10	14,92	119,00	-2,5 %



En conséquence, pour le type de MODCOD maximal atteignable en laboratoire de dégradation du débit utile, de 2,5 %, intervient à un rapport C/I de 14,92 dB. Par conséquent,

du point de vue du rapport C/I, un système DVB-S2 GSO au sol réel est capable de tolérer un niveau d'interférence nettement inférieur au rapport C/N idéal de 24 dB, comme indiqué précédemment dans l'UIT-R S.2131-1.

Afin d'évaluer l'angle hors axe correspondant pour lequel le rapport C/I dépasse la valeur critique de 14,92 dB, les simulations précédentes ont pris en compte un site représentatif de la région de New York, afin d'établir une corrélation entre l'EPFD, le C/I et les angles hors axe, et de déterminer l'angle hors axe minimal permettant d'atteindre un rapport C/I de 14,92 dB.

Figure 39 : Pics d'EPFD pour New York, simulation avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle

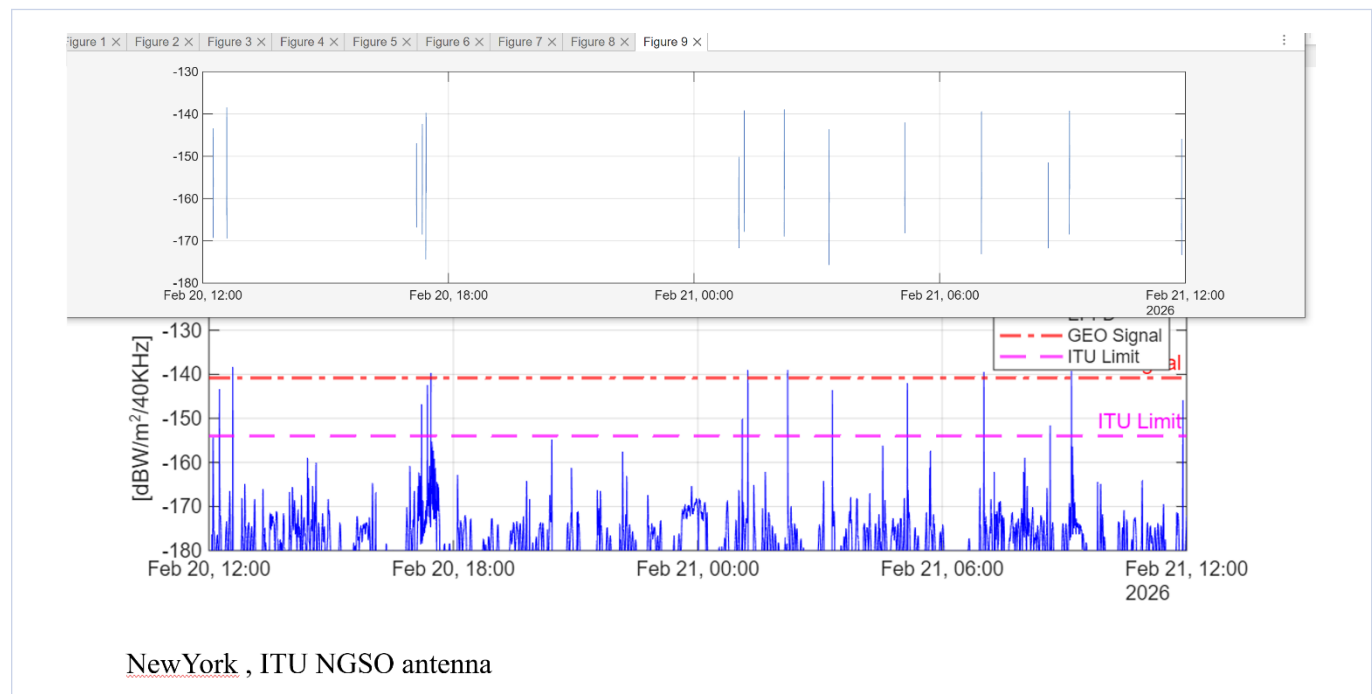
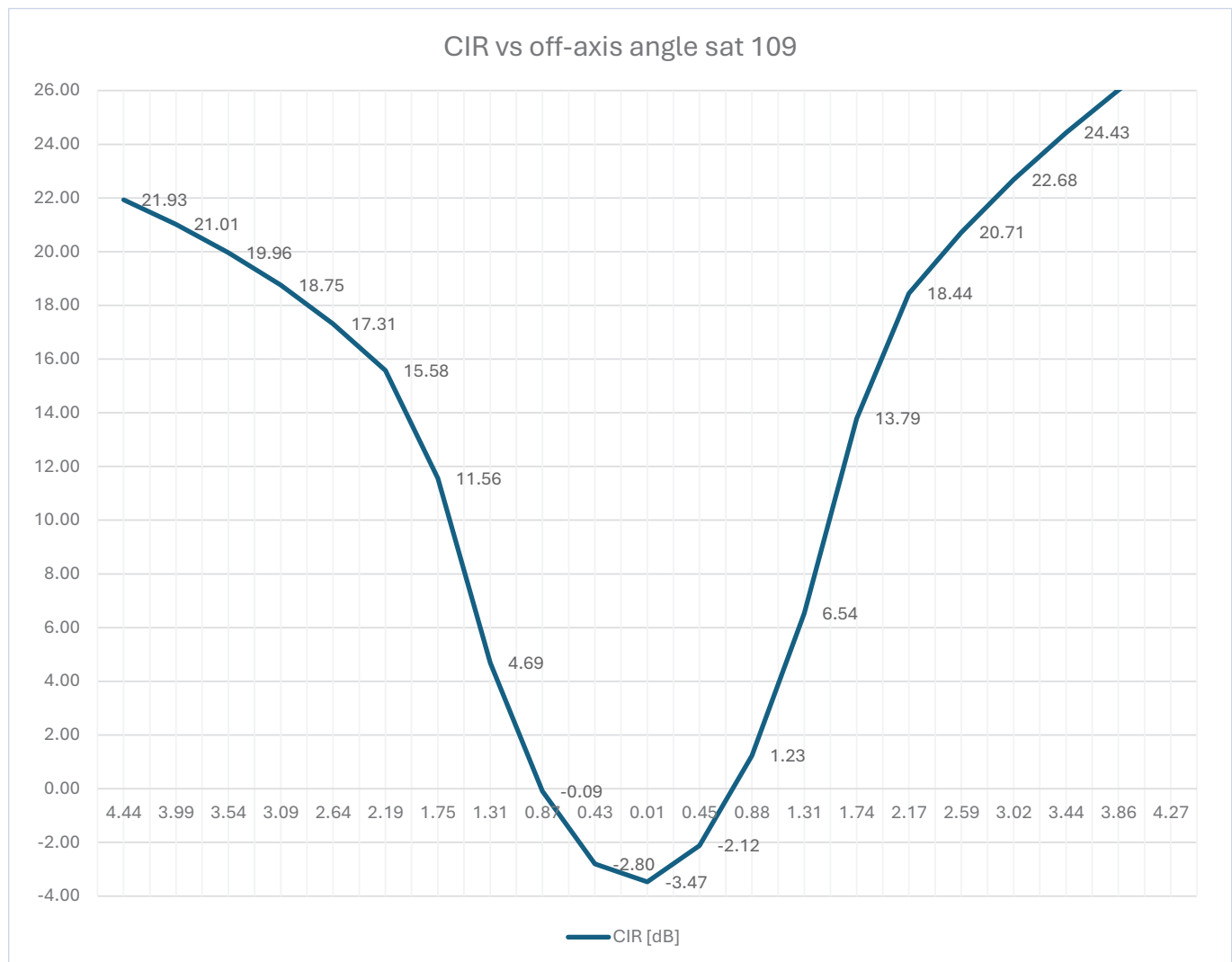


Tableau 7 : Valeurs EPFD correspondant à l'angle hors axe

Heure	ID du pic	ID du satellite	EPFD	Angle hors axe	CIR GEO
20/02/2026 12:35	2	109	-163,9	4,44	21,9
20/02/2026 12:35	2	109	-163	3,99	21,0
20/02/2026 12:35	2	109	-162	3,54	20,0
20/02/2026 12:35	2	109	-160,7	3,09	18,7
20/02/2026 12:35	2	109	-159,3	2,64	17,3
20/02/2026 12:35	2	109	-157,6	2,19	15,6
20/02/2026 12:35	2	109	-153,6	1,75	11,6
20/02/2026 12:35	2	109	-146,7	1,31	4,7
20/02/2026 12:35	2	109	-141,9	0,87	-0,1
20/02/2026 12:35	2	109	-139,2	0,43	-2,8

Heure	ID du pic	ID du satellite	EPFD	Angle hors axe	CIR GEO
20/02/2026 12:35	2	109	-138,5	0,01	-3,5
20/02/2026 12:35	2	109	-139,9	0,45	-2,1
20/02/2026 12:35	2	109	-143,2	0,88	1,2
20/02/2026 12:35	2	109	-148,5	1,31	6,5
20/02/2026 12:35	2	109	-155,8	1,74	13,8
20/02/2026 12:35	2	109	-160,4	2,17	18,4
20/02/2026 12:35	2	109	-162,7	2,59	20,7
20/02/2026 12:35	2	109	-164,7	3,02	22,7
20/02/2026 12:35	2	109	-166,4	3,44	24,4
20/02/2026 12:35	2	109	-168	3,86	26,0
20/02/2026 12:35	2	109	-169,5	4,27	27,5

Figure 40 : CIR en fonction de l'angle hors axe



Parmi les 15 pics d'EPFD relevés dans la simulation de New York avec modèle UIT d'antenne NGSO directionnelle, le deuxième pic observé (Peak ID=2) a été pris comme exemple ; on constate que, pour un rapport C/I = 15,6 dB (> 14,92 dB), l'angle hors axe théorique correspondant est d'environ 2,2°, soit une valeur nettement inférieure à un angle hors axe typique, sans même tenir compte d'un contrôle de puissance d'émission.

Cette estimation montre que, même en franchissant largement la zone d'exclusion UIT typique définie par l'angle alpha (+/- 15° environ), le rapport C/I obtenu reste à un niveau opérationnel, susceptible de n'entraîner qu'une dégradation spectrale de 2,5 %, comme mesuré lors des essais en laboratoire.

D'autre part, l'analyse des tableaux 4 et 5 permet de conclure que, théoriquement, pour une dégradation maximale de 2,5 % de l'efficacité spectrale d'un récepteur au sol GSO, correspondant à 5,43 b/s/Hz, le rapport C/(N+I) devrait être d'au moins environ 23 dB, ce qui correspond théoriquement à un angle hors axe d'environ 4,4°, encore nettement inférieur à l'angle hors axe typique, permettant d'envisager de futures études en vue d'un nouveau resserrement de la zone d'exclusion et d'une augmentation de la capacité du réseau NGSO.

Impact sur certains services GSO sans ACM

Entre les générations DVB-S de 2005 et DVB-S2 de 2025 dans des systèmes de diffusion comme DirecTV, le rapport C/N requis est passé d'environ 5 à 6 dB à environ 9,5 à 10,5 dB en raison de la modulation d'ordre supérieur, mais cette hausse a été compensée par un gain système cumulé d'environ 5 à 6 dB, grâce à des LNB moins bruyants, à une meilleure efficacité des antennes, à une PIRE satellitaire plus élevée et surtout à un gain d'environ 2 dB apporté par la démodulation DVB-S2 fondée sur LDPC. Ainsi, les liaisons modernes atteignent des marges en ciel clair nettement plus élevées (~4 à 5 dB contre ~3 dB auparavant) et une disponibilité améliorée (de l'ordre de ~99,9 %), tout en devant également tenir compte de nouvelles contraintes d'interférence, comme le bruit agrégé des systèmes NGSO.

Pour les services de diffusion GSO en bande Ka sans ACM (par exemple DirecTV), reposant sur le DVB-S2 (généralement avec un MODCOD 8PSK 2/3 à 3/4), le système est dimensionné pour un seuil de réception requis d'environ 8 à 9 dB C/(N+I), tout en fonctionnant en conditions de ciel clair avec un rapport C/N d'environ 14 à 16 dB et un rapport C/I de 18 à 22 dB, ce qui donne une marge utile effective d'environ 5 à 6 dB une fois les interférences prises en compte. Comme le système des services utilise un MODCOD fixe (sans ACM), cette marge doit absorber à la fois l'atténuation par la pluie (généralement 6 à 8 dB pour une disponibilité de ~99,7 %) et une pénalité d'interférence d'environ 1 à 2 dB.

Dans les systèmes de diffusion en bande Ka, l'atténuation par la pluie affecte de manière similaire la porteuse et les interférences, en raison de trajets de propagation fortement corrélés ; ainsi, même si les interférences peuvent être légèrement réduites, le rapport C/I reste relativement constant et la liaison devient rapidement limitée par le bruit, ce qui signifie que l'affaiblissement dû à la pluie dégrade principalement le rapport C/N et provoque des interruptions de service, plutôt que d'offrir une atténuation significative des interférences.

Seuil minimal de fonctionnement

Pour une liaison DVB-S2 sans ACM utilisant le 8PSK 3/4 (typique des opérations de diffusion), la valeur clé minimale requise du rapport C/(N+I) est d'**environ 8,5 à 9 dB**

Cela correspond à :

- ❖ Un fonctionnement quasi sans erreur (QEF, pour Quasi-Error-Free)
- ❖ Un BER après FEC d'environ 10^{-7}
- ❖ Des performances normales de décodage LDPC/BCH en **DVB-S2**

Valeur d'ingénierie pratique

Dans les systèmes réels, les opérateurs ne dimensionnent pas exactement au seuil, mais plutôt selon un **minimum opérationnel (avec marge)** :

- ❖ **Environ 9,5 à 10,5 dB C/(N+I)**

Cette valeur tient compte des pertes de mise en œuvre (~0,5 à 1 dB), du bruit de phase et des non-linéarités, ainsi que des erreurs d'estimation du canal.

Combinaison du C/N et du C/I

Puisque :

$$\frac{1}{C/(N+I)} = \frac{1}{C/N} + \frac{1}{C/I}$$

Le système devient inexploitable lorsque les effets combinés font passer le rapport sous le seuil MODCOD sans ACM d'environ 8,5 à 9 dB.

Tableau 8 : Combinaison du C/N et du C/I dans les systèmes GSO sans ACM

C/N	C/I	C/(N+I) résultant	État
14 dB	20 dB	~13 dB	Sûr
10 dB	20 dB	~9,6 dB	Marge
9 dB	20 dB	~8,6 dB	Seuil
8 dB	20 dB	~7,7 dB	Interruption

Pour une liaison de diffusion DVB-S2 8PSK 3/4 sans ACM, la condition minimale de fonctionnement est atteinte à environ **8,5 à 9 dB C/(N+I)** (seuil QEF), tandis que le dimensionnement pratique du système vise environ **10 dB** afin de garantir la robustesse face aux pertes de mise en œuvre et aux interférences, ce qui signifie que toute combinaison de bruit et d'interférences faisant passer le rapport effectif sous ce niveau entraîne une interruption de service accélérée.

Les résultats des essais en laboratoire sur les performances des MODCOD DVB-S2, présentés dans le tableau 6, corrélés aux vastes simulations d'estimation des valeurs EPFD des systèmes NGSO, montrent que, pour un rapport C/I de 20,0 dB, l'angle hors axe peut être réduit à 3,54°, avec une incidence limitée sur les systèmes avec et sans ACM, à un niveau pouvant être géré soit par l'ACM, soit par les codes FEC.

Disponibilité des services sans ACM

Pour une liaison de diffusion DVB-S2 8PSK 3/4 sans ACM, les interférences NGSO réduisent généralement le rapport C/(N+I) effectif de 1 à 3 dB selon les niveaux d'interférence, consommant directement la marge limitée de 4 à 6 dB prévue pour l'affaiblissement dû à la pluie et déplaçant le seuil d'interruption vers des épisodes de pluie plus modérés, ce qui entraîne une dégradation de la disponibilité du service, d'environ 99,7 % à environ 99-99,5 % dans des scénarios réalistes, l'interférence agrégée dans le scénario le plus défavorable pouvant faire passer la disponibilité sous les 99 % en raison de l'incapacité du système à adapter la modulation ou le codage.

Tableau 9 : Interprétation de la disponibilité dans les systèmes GSO sans ACM

Scénario	Marge d'affaiblissement	Disponibilité
Sans NGSO	~5 à 6 dB	~99,7 %
NGSO faible	~4 dB	~99,5 %
NGSO modéré	~3 dB	~99,2 %
NGSO élevé	~2 dB	~98,5 à 99 %

Évolution des réseaux de diffusion GSO sans ACM

D'autre part, au cours des deux dernières décennies, les systèmes de services de diffusion ont amélioré la qualité de réception et la disponibilité en combinant les progrès des technologies de récepteurs DVB-S2 (notamment le codage LDPC et une démodulation améliorée, apportant ~2 à 3 dB), une réduction significative du facteur de bruit des LNB (~1 à 2 dB) et de meilleures performances d'antenne, tant en matière de gain que de rejet des interférences (~1 à 2 dB), ainsi qu'une PIRE satellitaire plus élevée et une meilleure mise en forme des faisceaux, ce qui a généré un gain système cumulé de ~3 à 6 dB permettant d'obtenir une efficacité spectrale plus élevée et un fonctionnement plus robuste en cas d'affaiblissement dû à la pluie et d'interférences, sans recourir à l'ACM.

Domaines dans lesquels les systèmes plus récents sont plus résilients

Les récepteurs DVB-S2 modernes offrent une meilleure démodulation grâce à l'introduction du codage LDPC + BCH (comportement de seuil très marqué), à un meilleur suivi du bruit de phase, à une amélioration de l'AGC et du filtrage, ainsi qu'à une perte de mise en œuvre plus faible (amélioration de ~0,5 à 1 dB). En conséquence, le système peut fonctionner plus près du seuil avec une meilleure stabilité, une tolérance accrue aux courtes salves d'interférences

et de meilleures performances en cas de dégradation faible à modérée du rapport C/I. En résumé, cela représente un gain pratique d'environ **1,5 à 3 dB en matière de robustesse du C/(N+I) par rapport à l'ère DVB-S.**

L'amélioration de l'étage d'entrée RF (LNB + filtrage) garantit un facteur de bruit plus faible (0,3 à 0,5 dB contre ~1 dB), avec une meilleure sélectivité et une stabilité accrue de l'oscillateur local (LO), ce qui se traduit par une légère amélioration du rejet des interférences et une sensibilité moindre aux interférences de type bruit de phase, pour un gain effectif et une robustesse du C/I d'environ **0,5 à 1 dB.**

De meilleurs diagrammes d'antenne offrent un contrôle amélioré des lobes secondaires et une meilleure discrimination de polarisation croisée, ce qui réduit la sensibilité aux sources d'interférence hors axe (y compris les satellites NGSO situés en dehors du faisceau principal), avec une amélioration du C/I d'environ **1 à 2 dB (selon la géométrie).**

Tableau 10 : Évolution des gains au niveau des composants dans les systèmes GSO sans ACM

Sous-système	2005	2025	Gain
Facteur de bruit du LNB	~0,9 dB	~0,4 dB	+1,0 dB C/N
Démodulateur/FEC	DVB-S	DVB-S2 (LDPC)	+2,0 à 2,5 dB
Efficacité de l'antenne	plus faible	source optimisée	+0,5 à 1 dB
PIRE satellitaire	~51 dBW	~53 dBW	+2 dB
Pertes de mise en œuvre	~1,2 dB	~0,5 dB	+0,7 dB

Amélioration totale du gain système : gain net d'environ 5 à 6 dB

Les systèmes DVB-S2 modernes de type DirecTV sont intrinsèquement plus robustes au niveau de la couche physique grâce au codage LDPC avancé, à des étages d'entrée RF améliorés et à une meilleure discrimination d'antenne, qui augmentent ensemble la tolérance à la dégradation du C/(N+I) d'environ 2 à 4 dB par rapport aux anciens systèmes DVB-S. Toutefois, comme ces systèmes fonctionnent également plus près des limites théoriques d'efficacité avec une modulation d'ordre supérieur, leur marge disponible est plus contrainte, ce qui signifie que l'interférence NGSO agrégée peut malgré tout avoir un impact comparable au niveau système si elle n'est pas explicitement prise en compte dans la planification des liaisons et du spectre.

Annexe 1 – Simulation avec une antenne satellitaire omnidirectionnelle

Les figures suivantes montrent l'angle hors axe, la valeur EPFD par satellite contributeur et l'EPFD agrégée totale pour chacun des 12 sites considérés.

La limite de l'UIT selon l'article 22, pour la fréquence et l'antenne considérées, est superposée aux graphiques EPFD. Le niveau de signal reçu pour le système GSO est également représenté à titre de référence et sera utilisé pour estimer les paramètres SINR et C/I dans le cadre des mesures en laboratoire.

Figure 41 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Anchorage

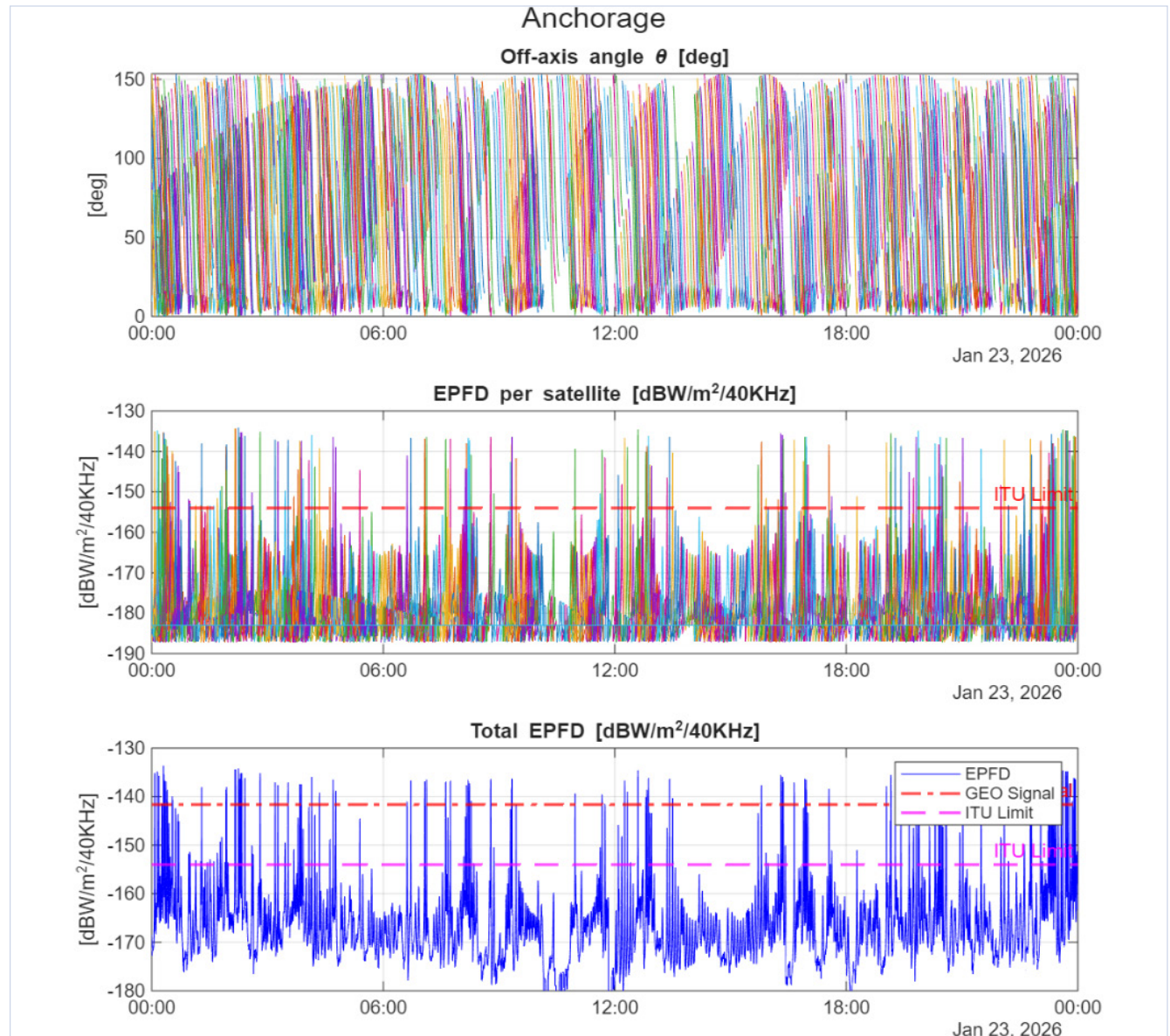


Figure 42 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Chicago

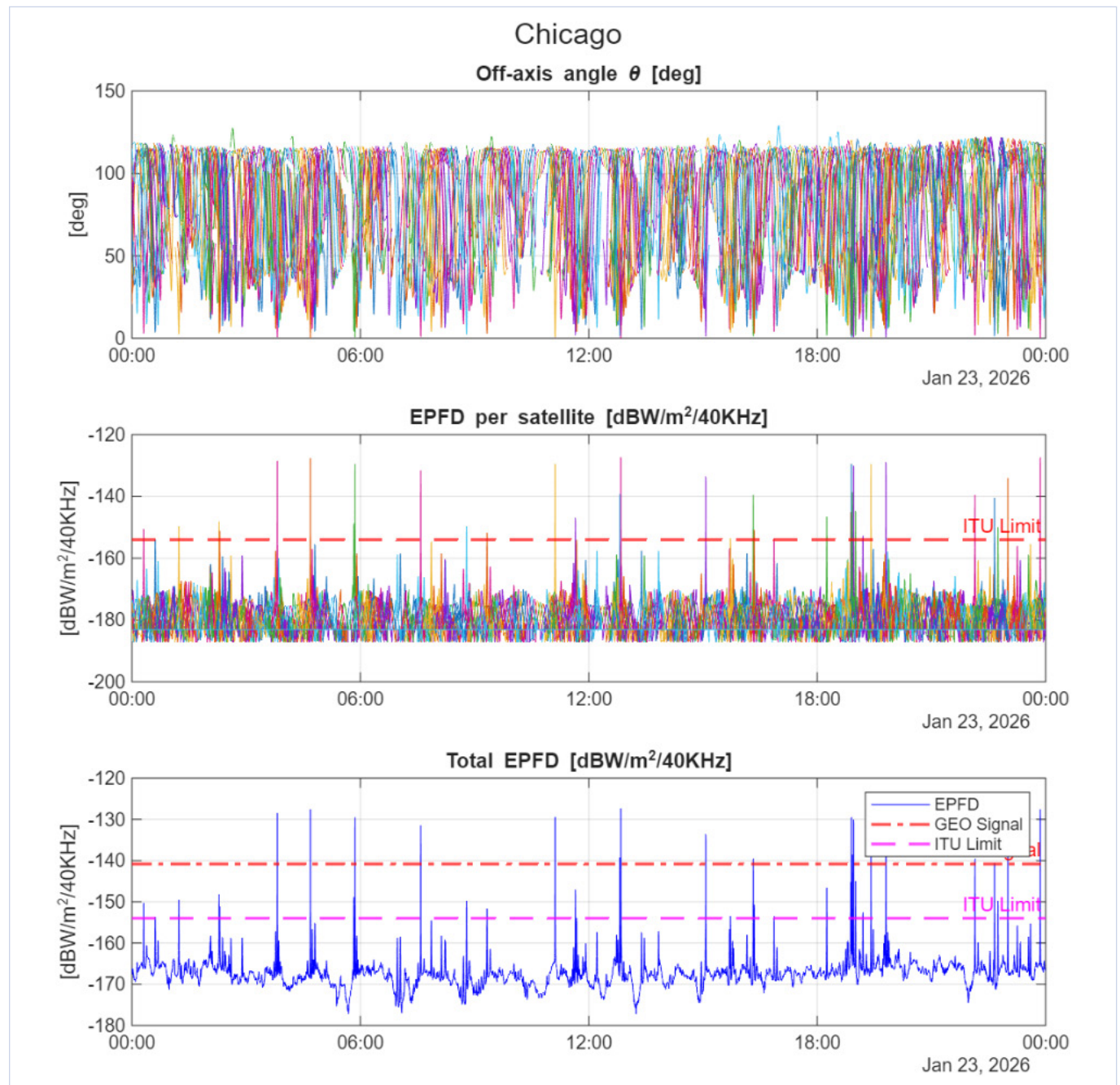


Figure 43 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Dallas

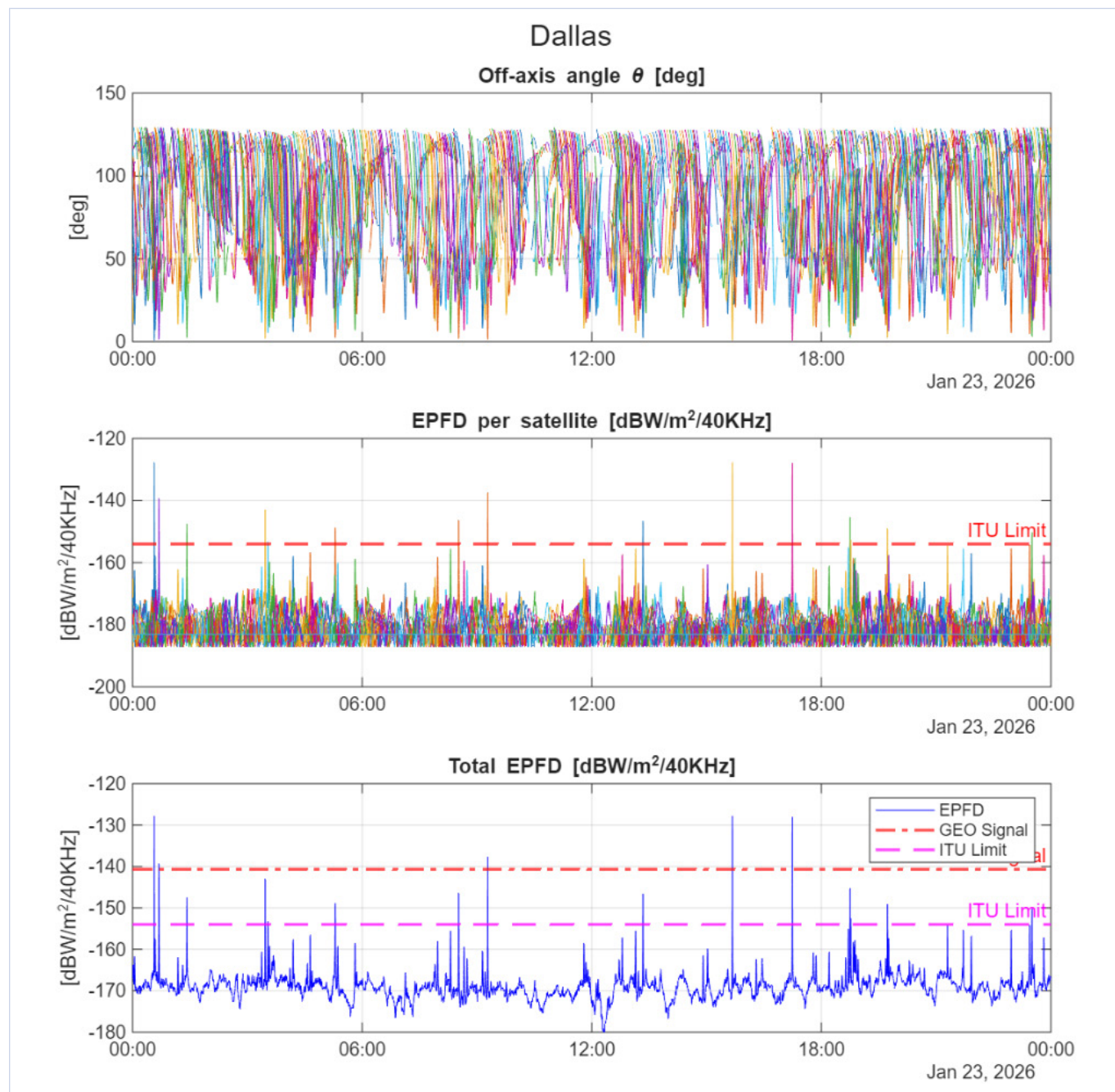


Figure 44 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Denver

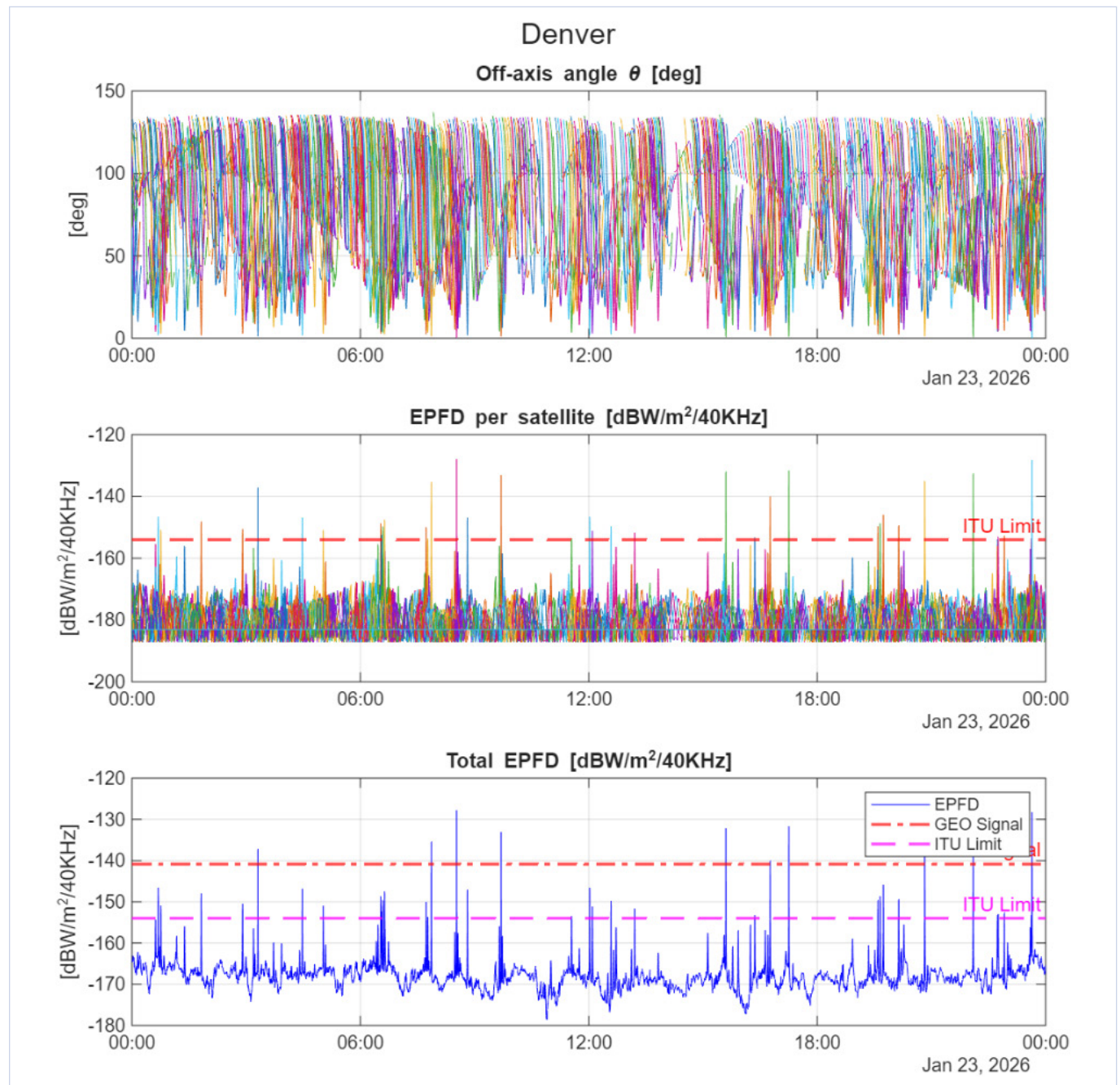


Figure 45 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Honolulu

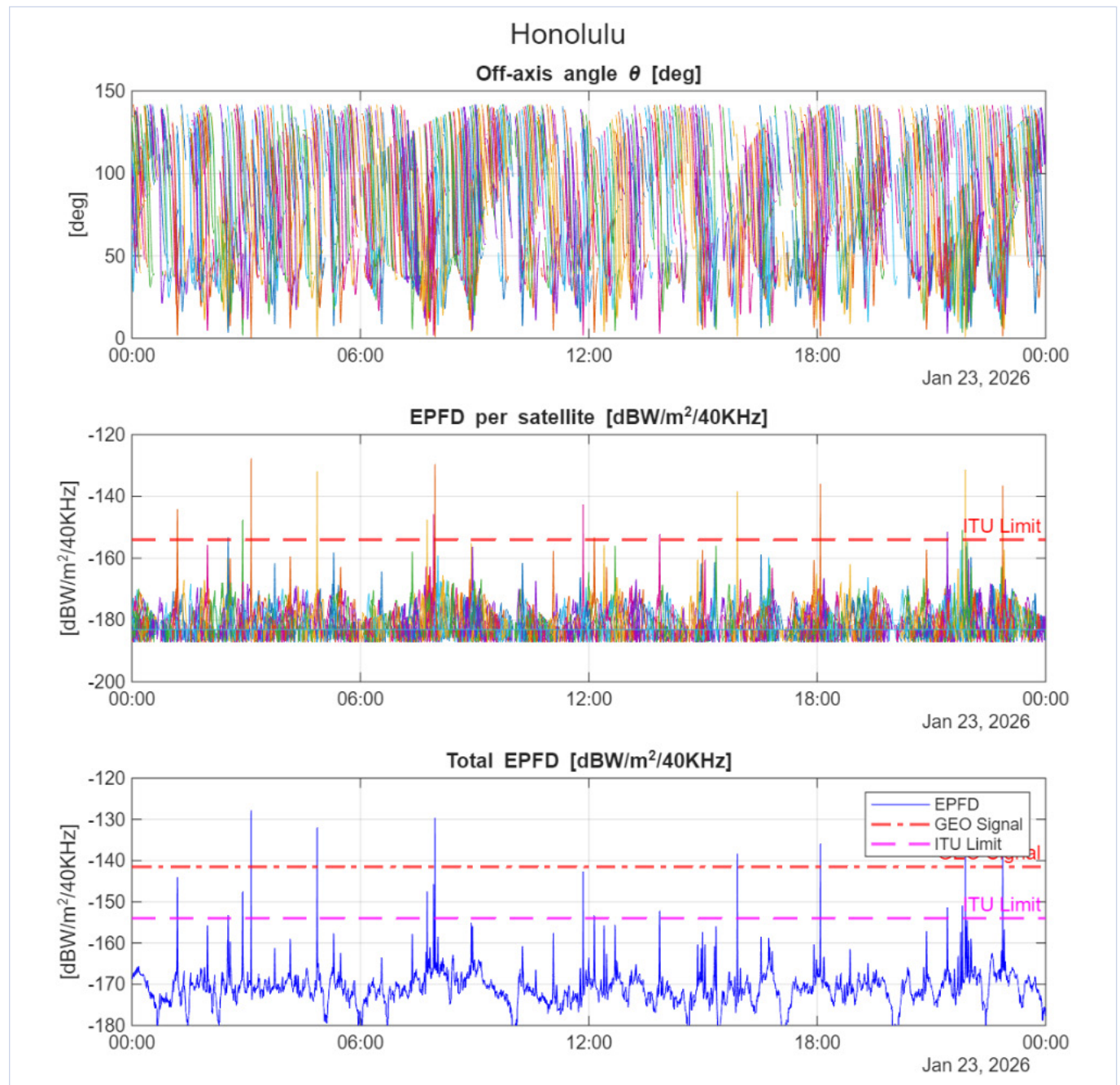


Figure 46 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Kansas

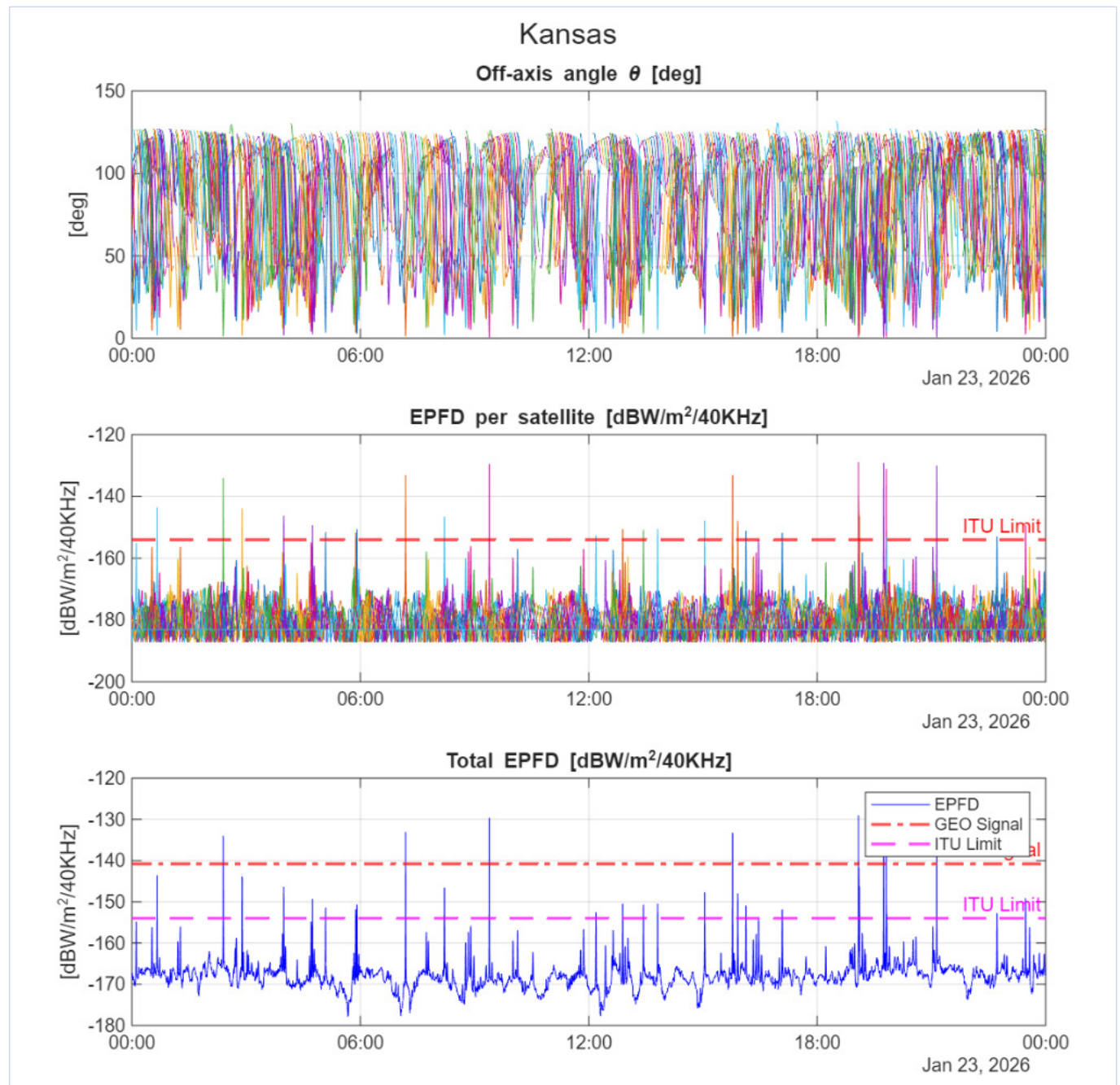


Figure 47 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Los Angeles

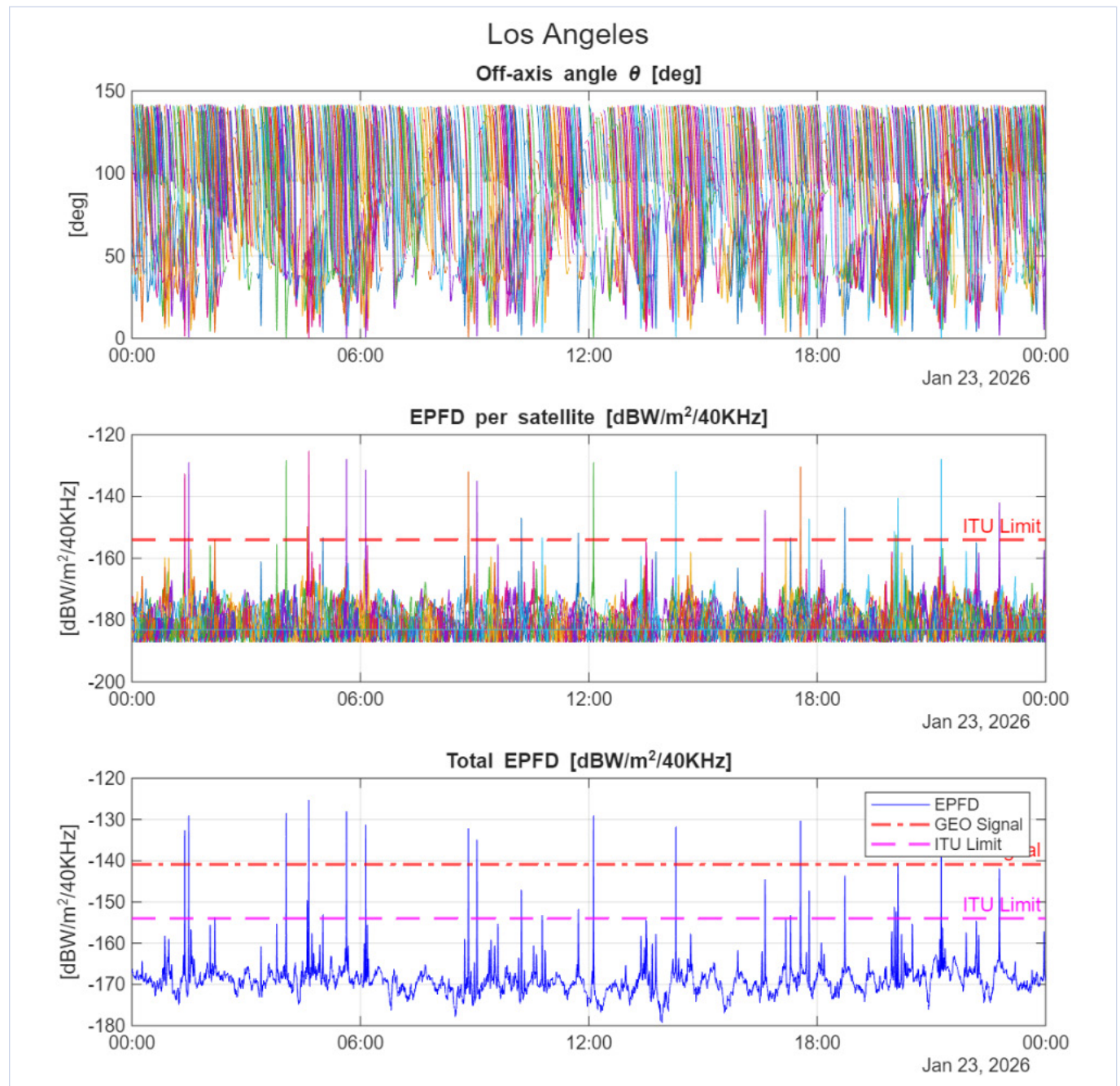


Figure 48 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Miami

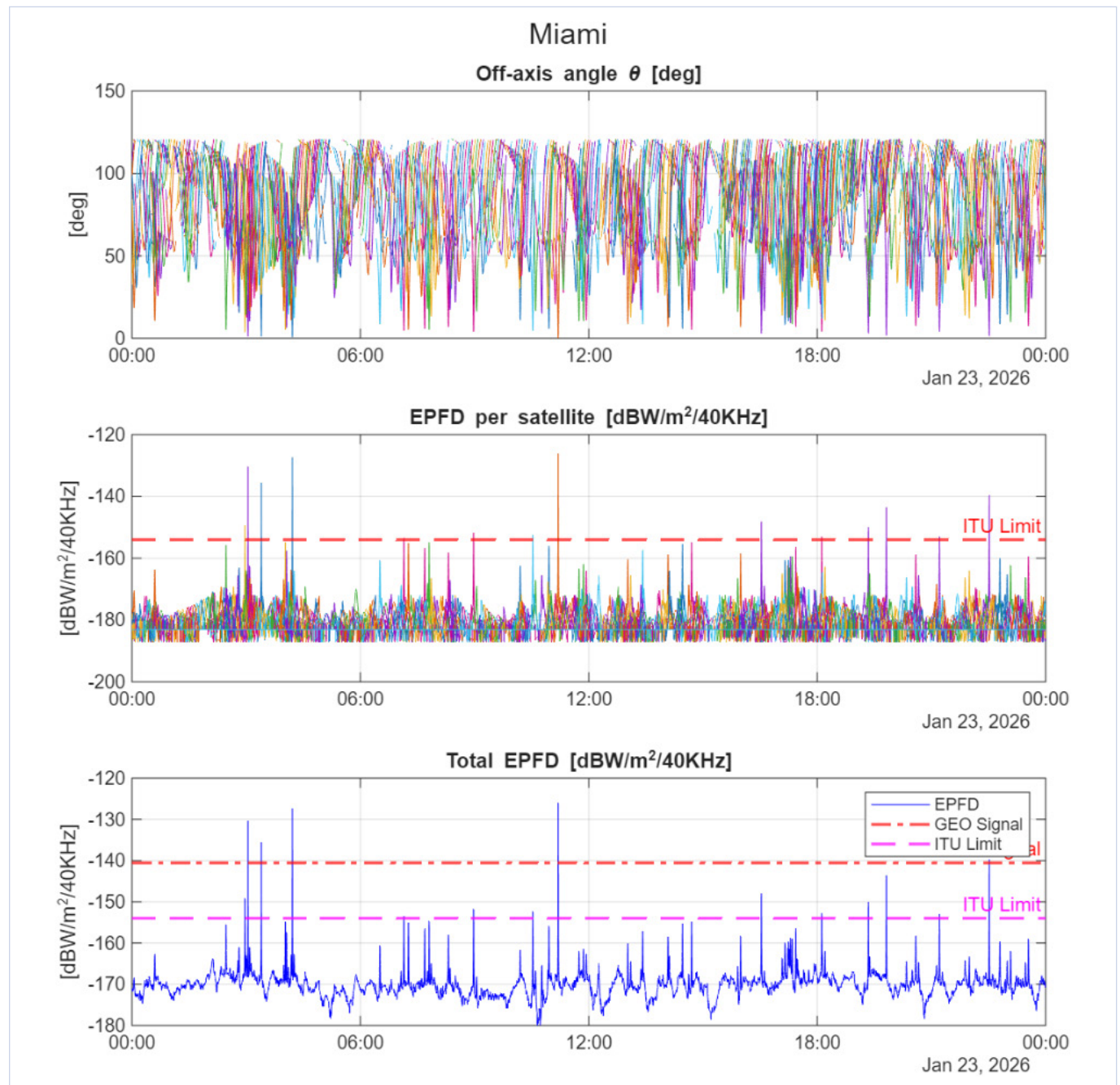


Figure 49 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, New York

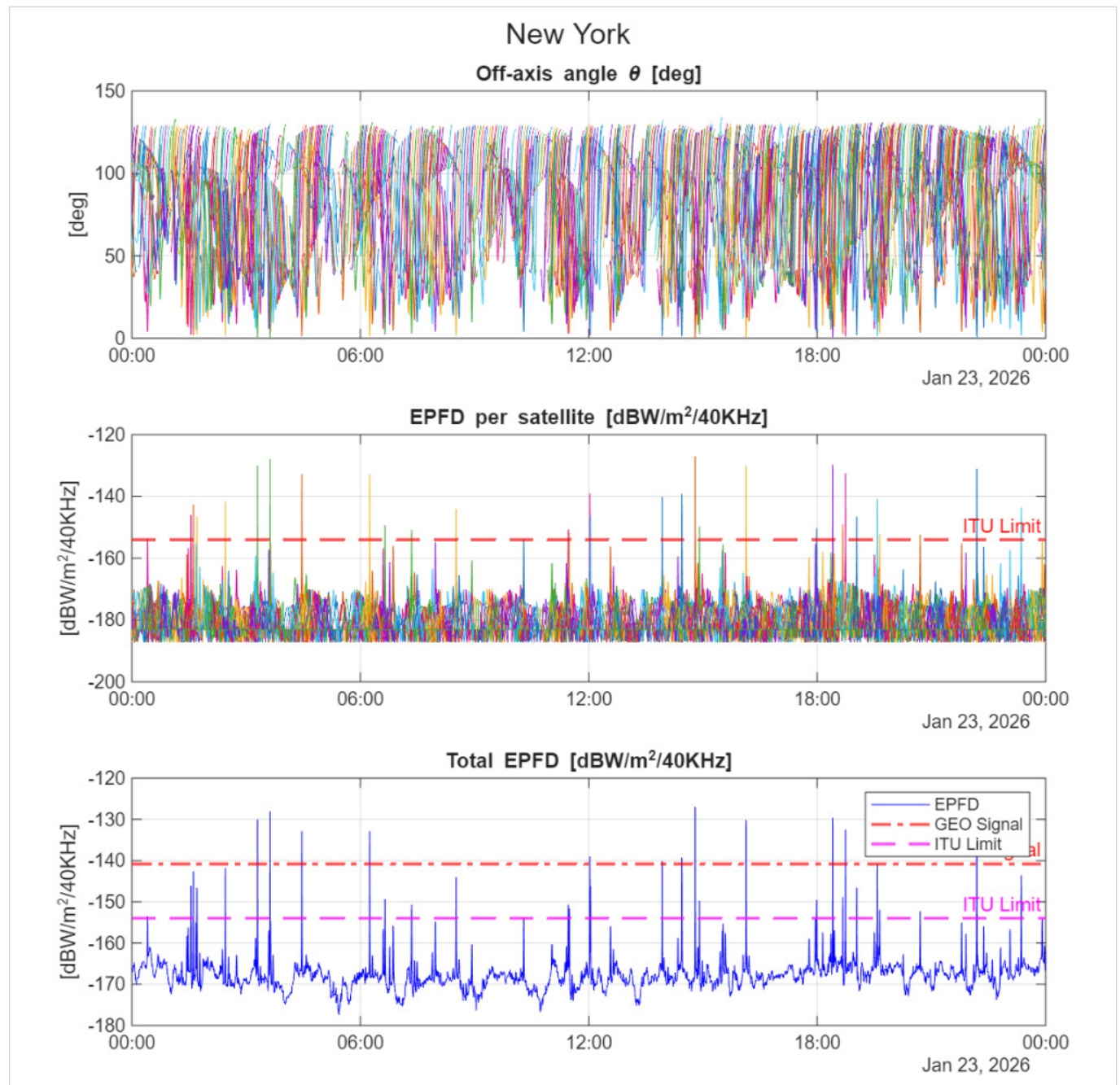


Figure 50 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Phoenix

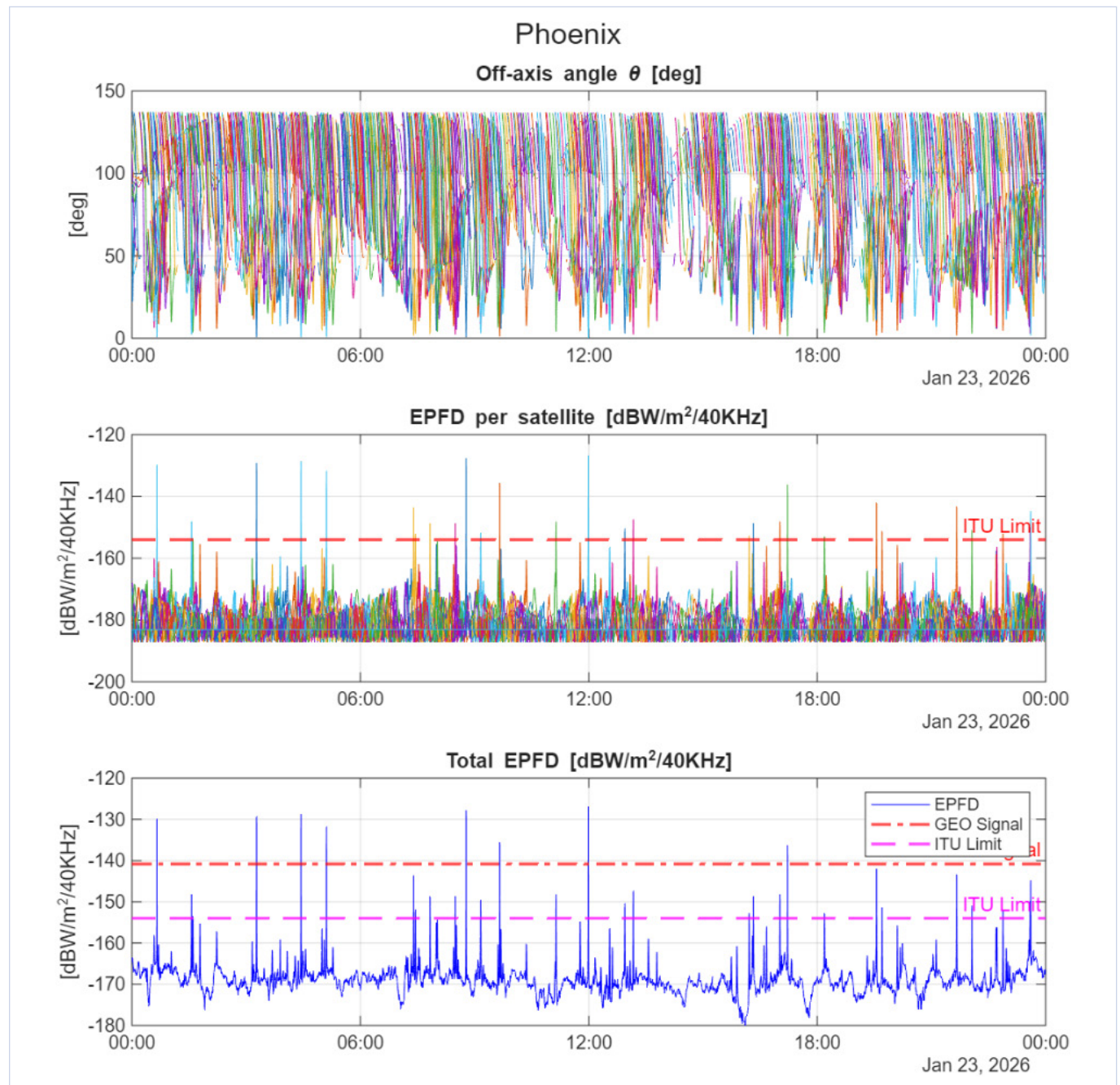


Figure 51 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, Seattle

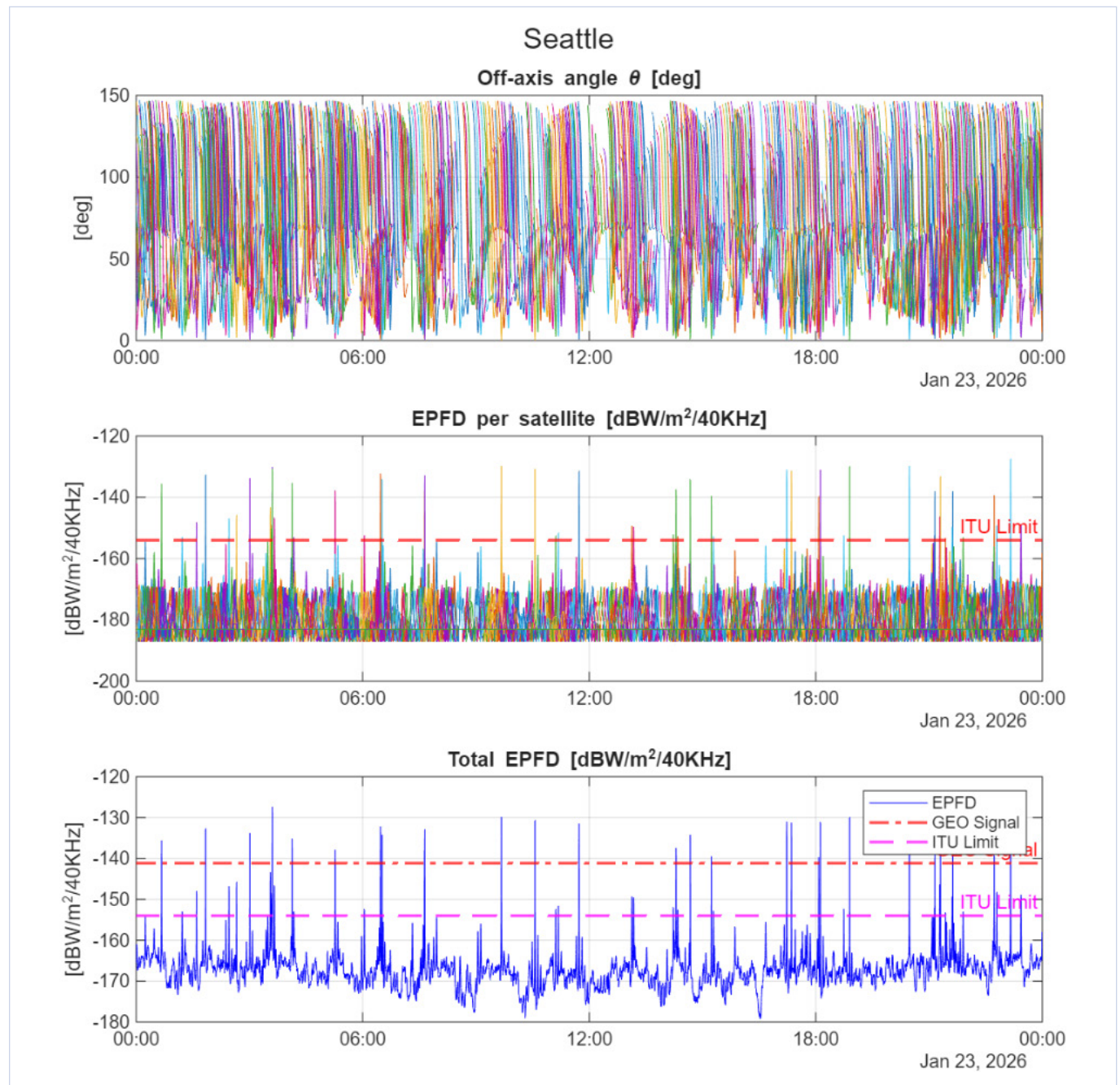
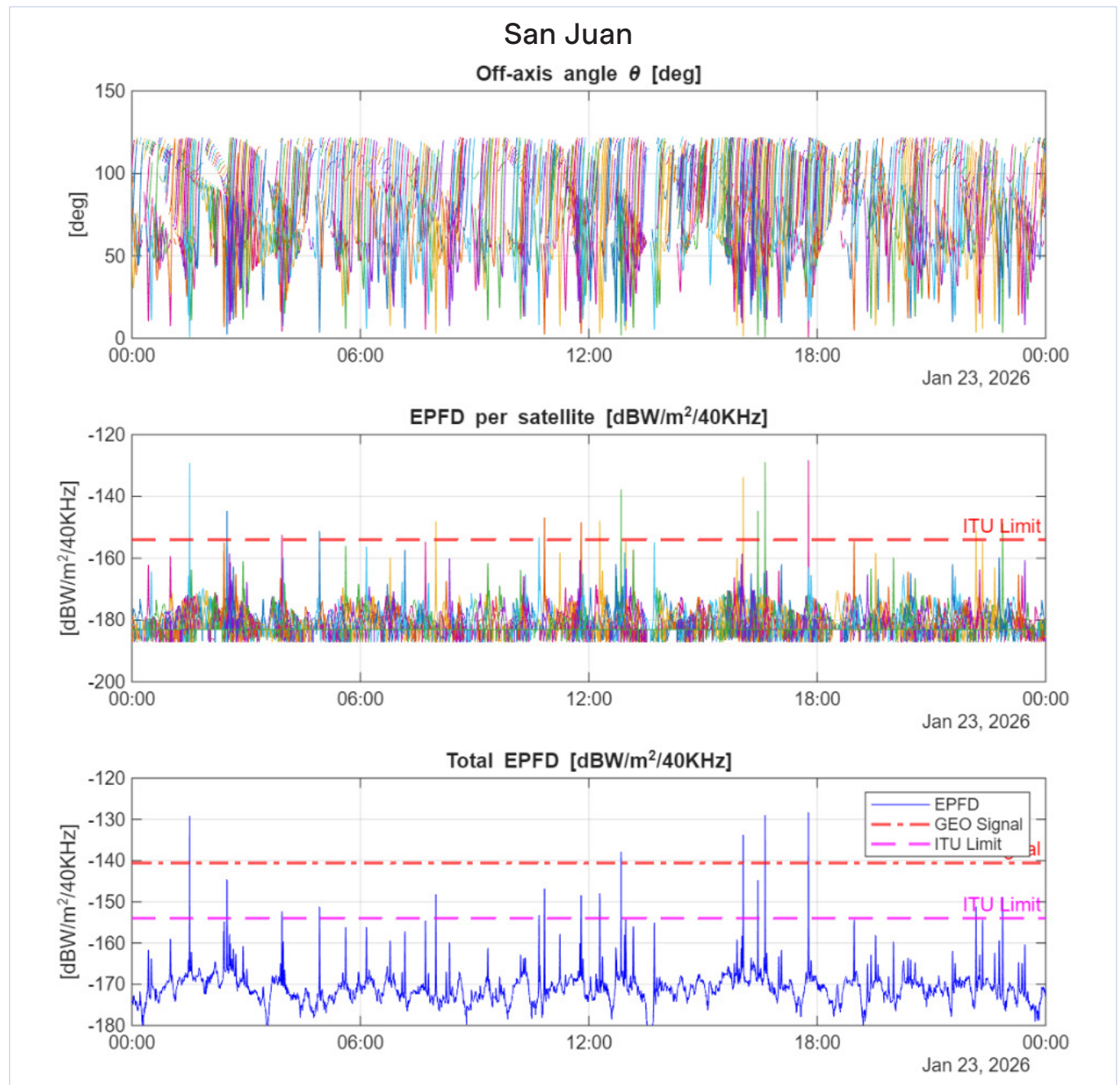


Figure 52 : Angle hors axe, valeur EPFD par satellite contributeur et EPFD agrégée totale, San Juan



Résultats de l'analyse des sites

L'analyse des graphiques des 12 sites fait apparaître une tendance générale commune à l'ensemble des sites :

- ❖ L'EPFD agrégée de fond fluctue généralement entre -165 et -175 dBW/m²/40 kHz.
- ❖ Les pics d'EPFD atteignent environ -130 à -140 dBW/m²/40 kHz lors des événements de rapprochement.
- ❖ La limite de l'article 22 de l'UIT (ligne pointillée magenta) apparaît à environ -150 à -152 dBW/m²/40 kHz.
- ❖ Le niveau du signal GEO (ligne rouge en tirets-points) est d'environ -138 à -142 dBW/m²/40 kHz.

Les observations propres à chaque site sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

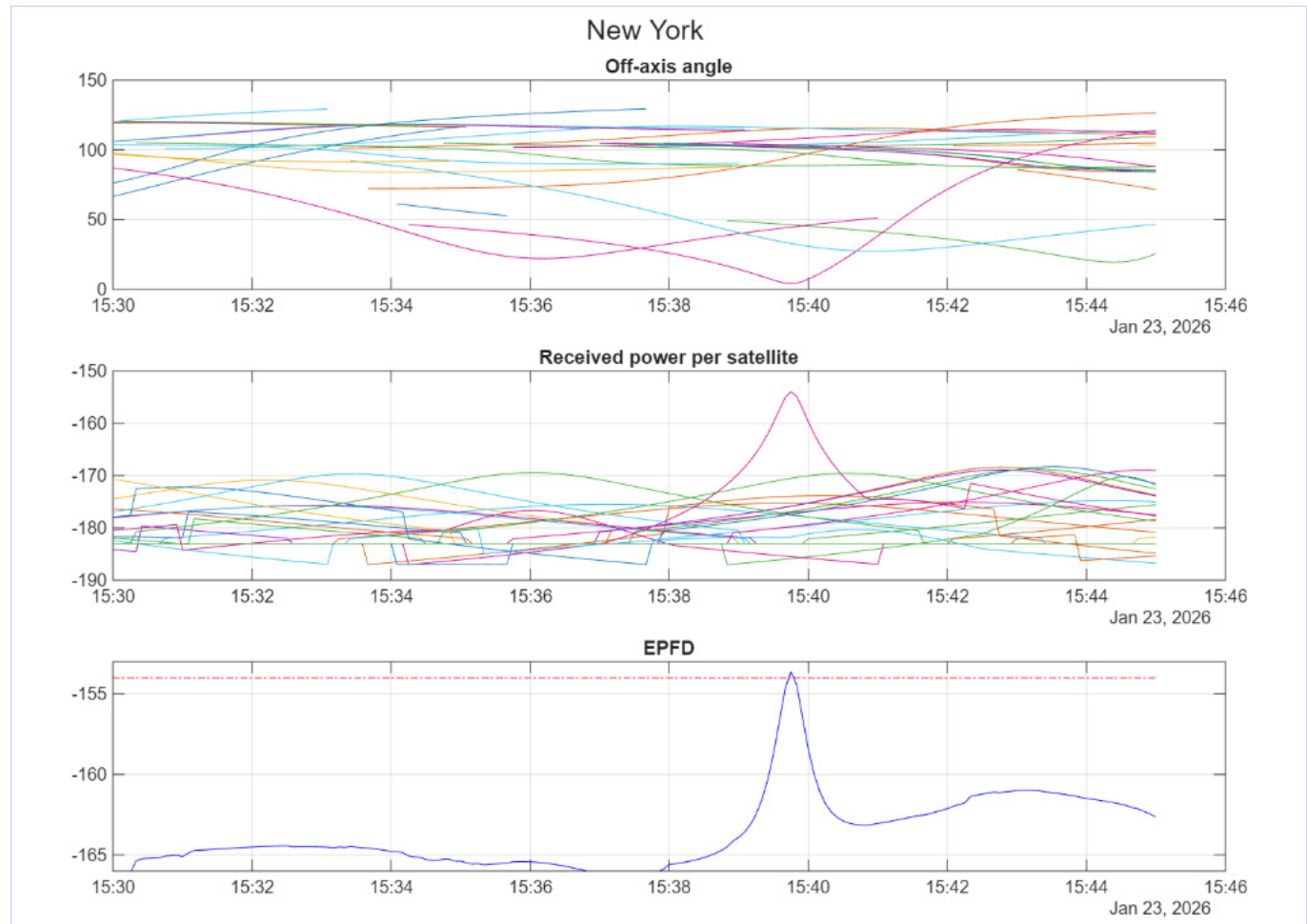
Tableau 11 : Observations propres à chaque site

Site	Lat.	Plage EPFD typique	Pics de pointe	Gravité des dépassements des limites UIT
Anchorage	61,1	-155 à -170	Fréquents, jusqu'à ~-135	La plus forte, avec la densité de dépassements la plus élevée
Seattle	47,6	-155 à -170	Multiples et prolongés	La deuxième plus forte, avec des événements de longue durée
Chicago	41,8	-160 à -175	Ponctuels et marqués	Modérée
New York	40,7	-158 à -175	Ponctuels et marqués	Modérée
Denver	39,8	-160 à -175	Ponctuels	Modérée
Kansas	39,1	-160 à -175	Ponctuels	Modérée
Los Angeles	34,0	-162 à -175	Moins fréquents	Plus faible
Phoenix	33,6	-162 à -175	Moins fréquents	Plus faible
Dallas	32,8	-165 à -175	Rares	Faible
Miami	25,8	-165 à -175	Rares	La plus faible
Honolulu	21,3	-163 à -175	Rares	Faible
San Juan	18,4	-163 à -175	Rares	Faible

Une analyse détaillée présentée à la figure 21 révèle qu'un seul satellite NGSO, celui qui présente l'angle hors axe minimal, apporte la principale contribution à l'EPFD agrégée, tandis que la contribution des satellites NGSO voisins, situés à des angles hors axe plus élevés, est négligeable. La figure suivante présente en détail la contribution EPFD de chaque satellite NGSO visible ainsi que l'EPFD agrégée, confirmant que l'EPFD agrégée est dominée par un seul satellite, celui qui présente l'angle hors axe minimal par rapport à l'arc GEO. Le graphique détaillé (New York, 15:30-15:46, choisi à titre d'exemple) confirme que la puissance reçue en provenance d'un seul satellite augmente nettement lors d'un rapprochement, tandis que toutes les autres restent inférieures de 15 à 25 dB, le principal satellite NGSO actif

représentant environ 95 % de la contribution EPFD, tandis que les lobes secondaires des 4 à 18 autres satellites NGSO adjacents contribuent à hauteur d'environ 5 %. Cela signifie que l'interférence constitue en pratique un problème à source unique malgré la constellation multisatellite, et que les stratégies d'atténuation n'ont besoin de cibler que le satellite le plus proche à un instant donné.

Figure 53 : La puissance reçue en provenance d'un seul satellite augmente nettement lors d'un rapprochement, tandis que celle de tous les autres reste inférieure de 15 à 25 dB, New York



Conclusions préliminaires

Il convient de souligner que ces résultats théoriques ont été déterminés dans des conditions UIT conservatrices, qui prennent en compte les interférences de plusieurs satellites co-fréquence. En outre, par prudence, une antenne isotrope a été prise en compte pour le trajet de transmission LEO, comme défini dans le tableau 4. Ces conditions sont idéalisées et ne prennent en compte ni les diagrammes d'antennes à réseau phasé ni les techniques avancées d'orientation des faisceaux utilisées dans les services d'accès haut débit LEO actuels. Lors de la prochaine étape de recherche, qui sera ajoutée en annexe au présent rapport et utilisera des techniques de calcul plus avancées tenant compte des caractéristiques des antennes

d'émission NGSO à réseau phasé et des limites d'orientation des faisceaux, les résultats théoriques initiaux fondés sur les conditions UIT devraient être affinés en fonction des mises en œuvre techniques réelles des systèmes NGSO.

Fonction de répartition empirique (ECDF) et statistiques temporelles

Une analyse statistique fondée sur la fonction de répartition empirique (ECDF) et les statistiques temporelles est présentée ci-après.

L'ECDF montre la probabilité que l'EPFD soit inférieure ou égale à une valeur donnée et fournit une représentation visuelle complète de l'ensemble de la distribution des valeurs EPFD. La ligne des 99 % est représentée en rouge, à titre de référence. L'analyse ECDF montre que, pour tous les sites, l'ECDF atteint 99 % à environ -150 à -155 dBW/m²/40 kHz, ce qui est très proche de la limite UIT. Dans les conditions actuellement définies, le site d'Anchorage apparaît clairement comme un cas atypique, la courbe ECDF étant décalée vers la droite (valeurs EPFD plus élevées) de plus de 10 dB par rapport aux autres sites.

Tableau de synthèse des caractéristiques de dépassement :

Tableau 12 : Caractéristiques de dépassement

Site	Pourcentage de dépassement	Nombre d'événements	Durée maximale (s)	Durée de conformité la plus longue (min)
Anchorage	4,70	168	80	132,8
Seattle	1,27	50	115	121,2
Chicago	0,65	36	20	139,9
New York	0,63	33	30	112,6
Denver	0,65	37	20	143,4
Kansas	0,54	29	20	167,8
Phoenix	0,54	29	25	182,3
Los Angeles	0,53	26	25	161,5
Honolulu	0,34	17	30	232,8
Dallas	0,25	15	20	243,1
San Juan	0,27	16	20	263,9
Miami	0,21	14	20	319,8

Il existe une corrélation nette avec la latitude : Anchorage (latitude 61,1⁰) présente un taux de dépassement de 4,70 %, contre 0,21 % pour Miami (25,8⁰), soit un rapport d'environ 22.

Si l'on exclut les deux cas atypiques (Anchorage et Seattle), les 10 autres sites présentent un comportement très cohérent : un taux de dépassement compris entre 0,21 et 0,65 %, une durée maximale des événements de 20 à 30 secondes et 14 à 37 événements sur 24 heures.

Anchorage et Seattle constituent des cas atypiques, car leur latitude élevée les place près du bord des plans orbitaux, ce qui entraîne des temps de présence plus longs à de faibles angles hors axe par rapport à la direction de l'arc GEO, en considérant un diagramme d'antenne d'émission isotrope. L'angle hors axe devrait être beaucoup plus élevé avec un véritable diagramme d'antenne à réseau phasé, ce qui réduirait encore la valeur EPFD.

La répartition horaire des dépassements ne montre pas de tendance diurne marquée pour la plupart des sites (répartition à peu près uniforme), ce qui est attendu puisque les périodes orbitales LEO (~95 min) sont courtes par rapport à la durée de simulation de 24 heures. Toutefois, Anchorage présente une variabilité légèrement plus importante, probablement due à l'effet combiné de la rotation de la Terre et des orientations propres aux plans orbitaux.

Figure 54 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Anchorage

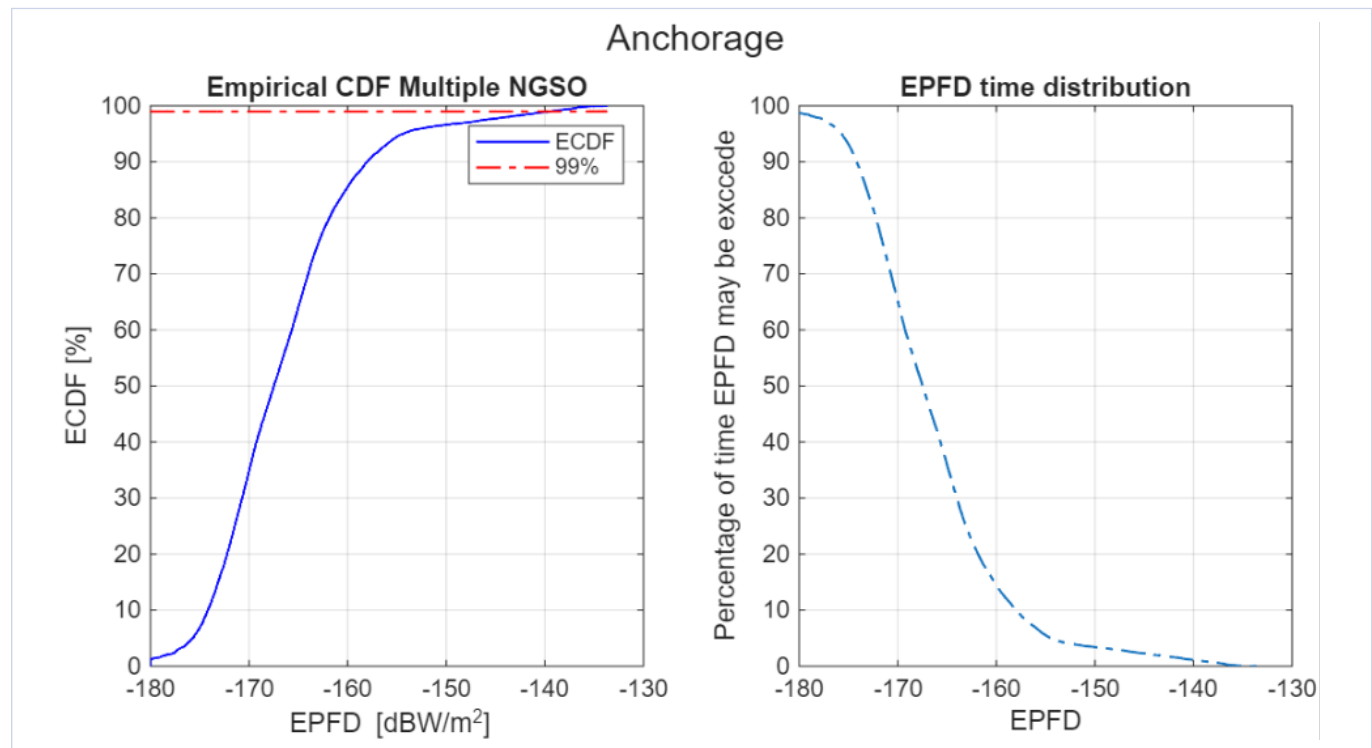


Figure 55 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Chicago

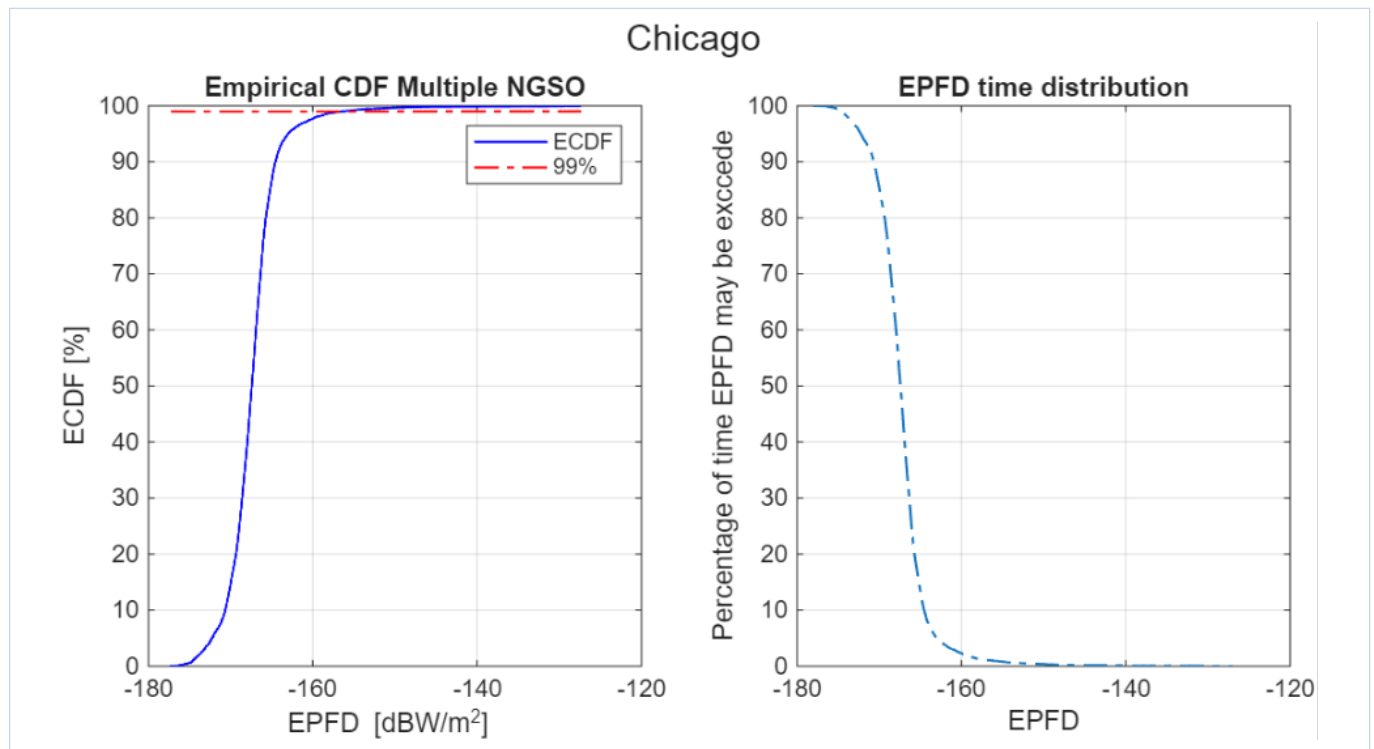


Figure 56 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Dallas

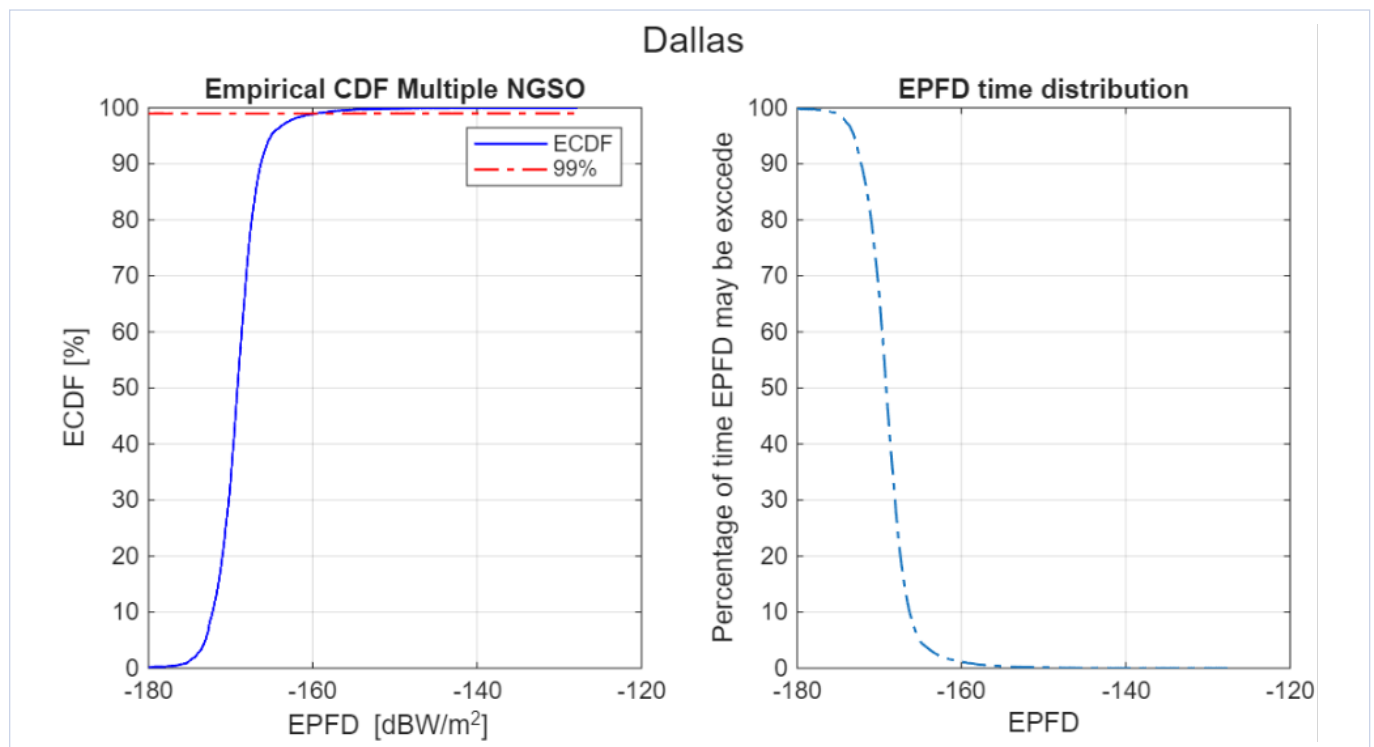


Figure 57 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Denver

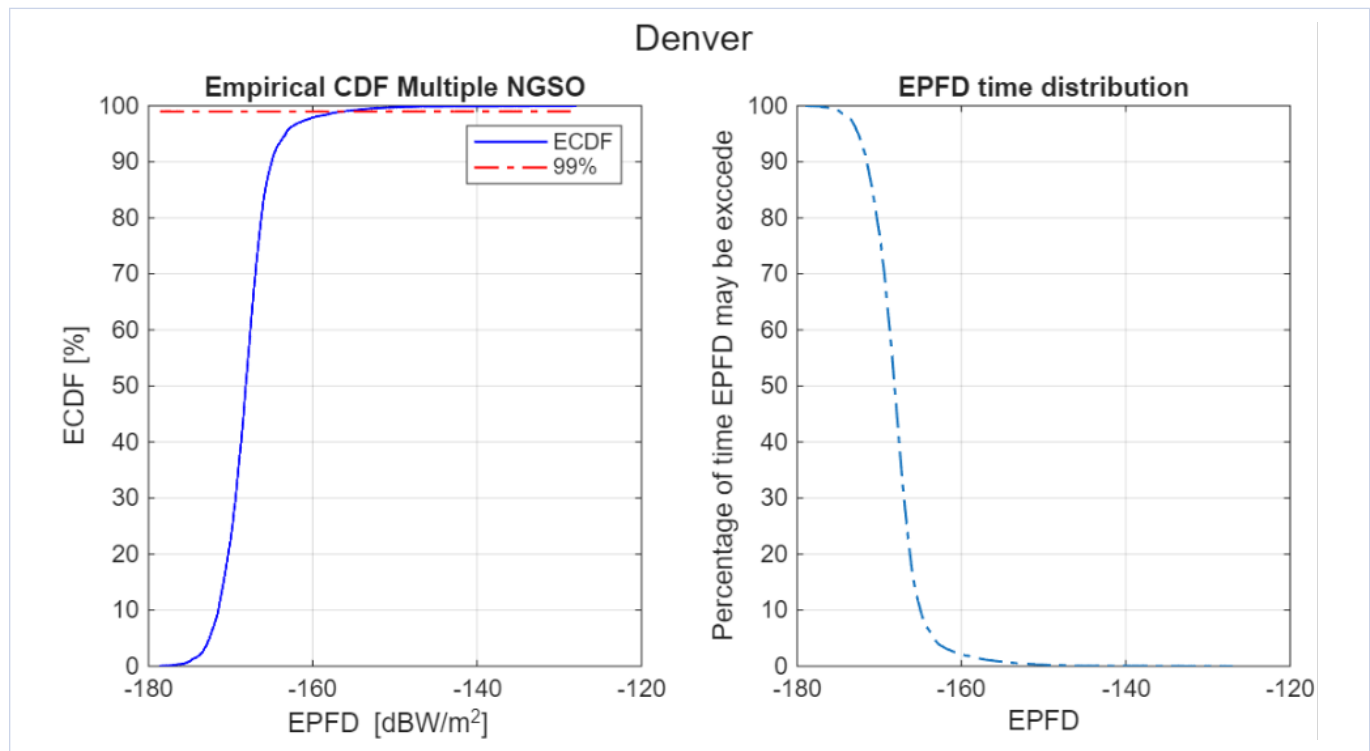


Figure 58 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Honolulu

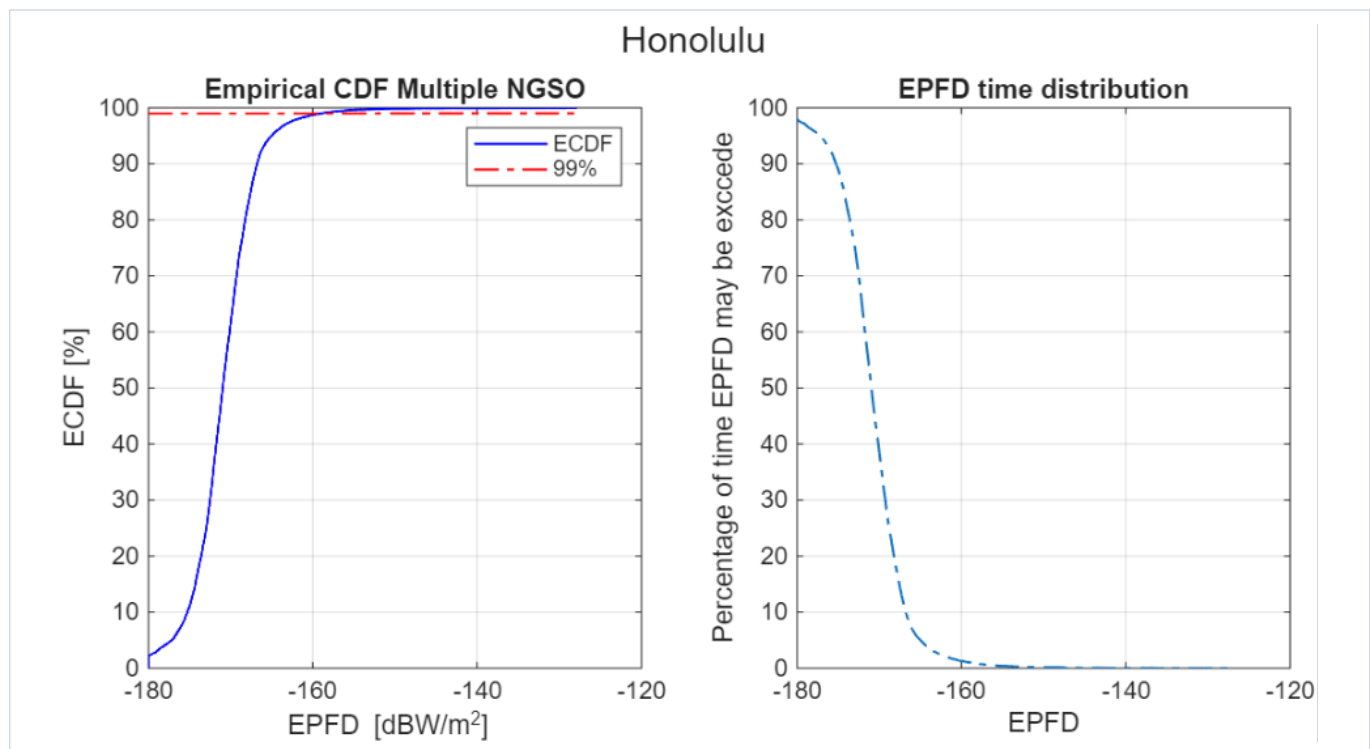


Figure 59 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Kansas

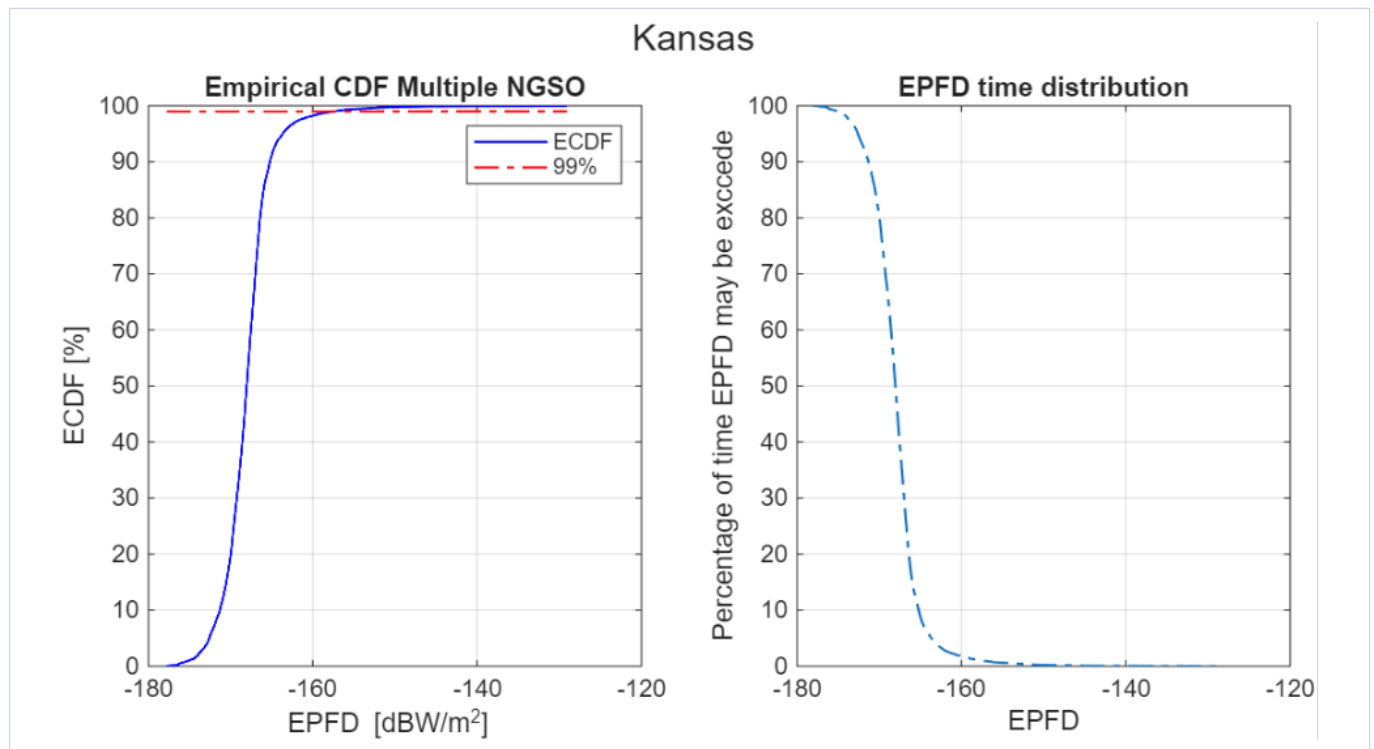


Figure 60 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Los Angeles

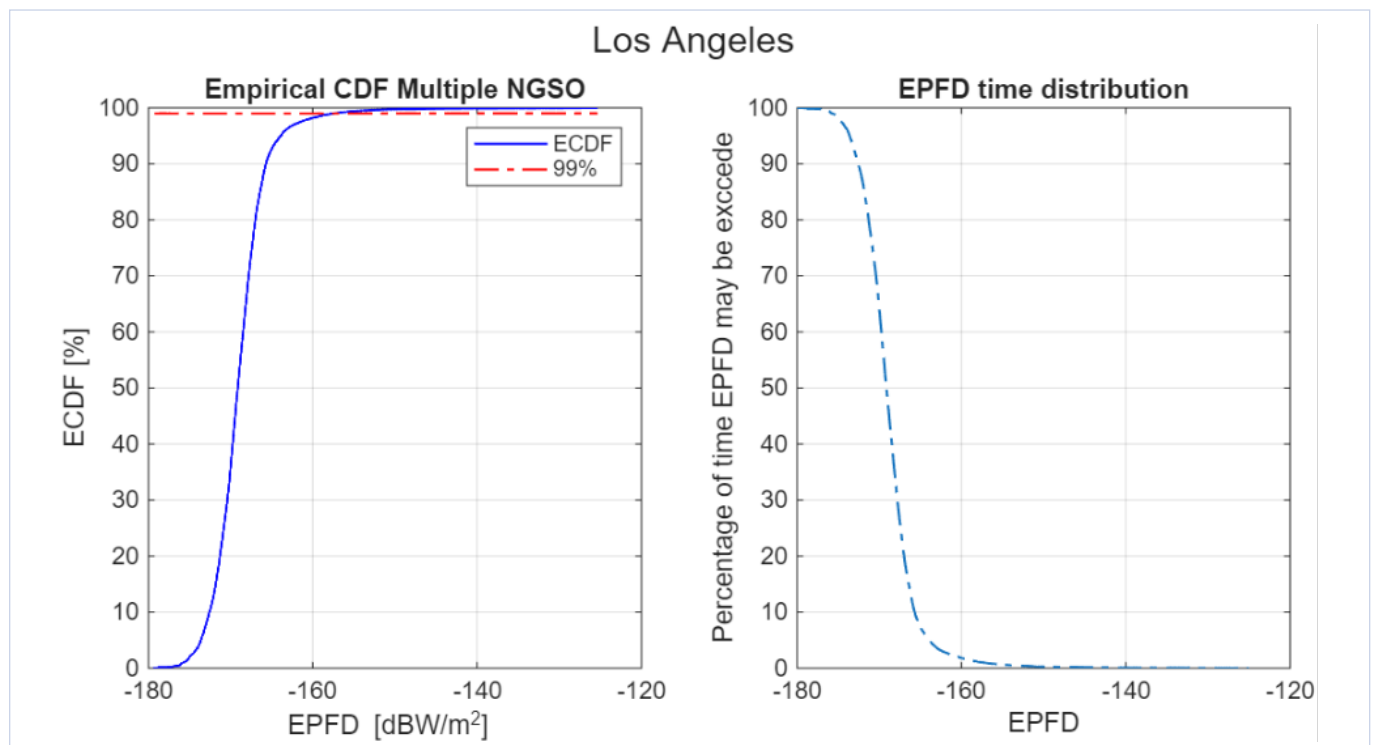


Figure 61 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Miami

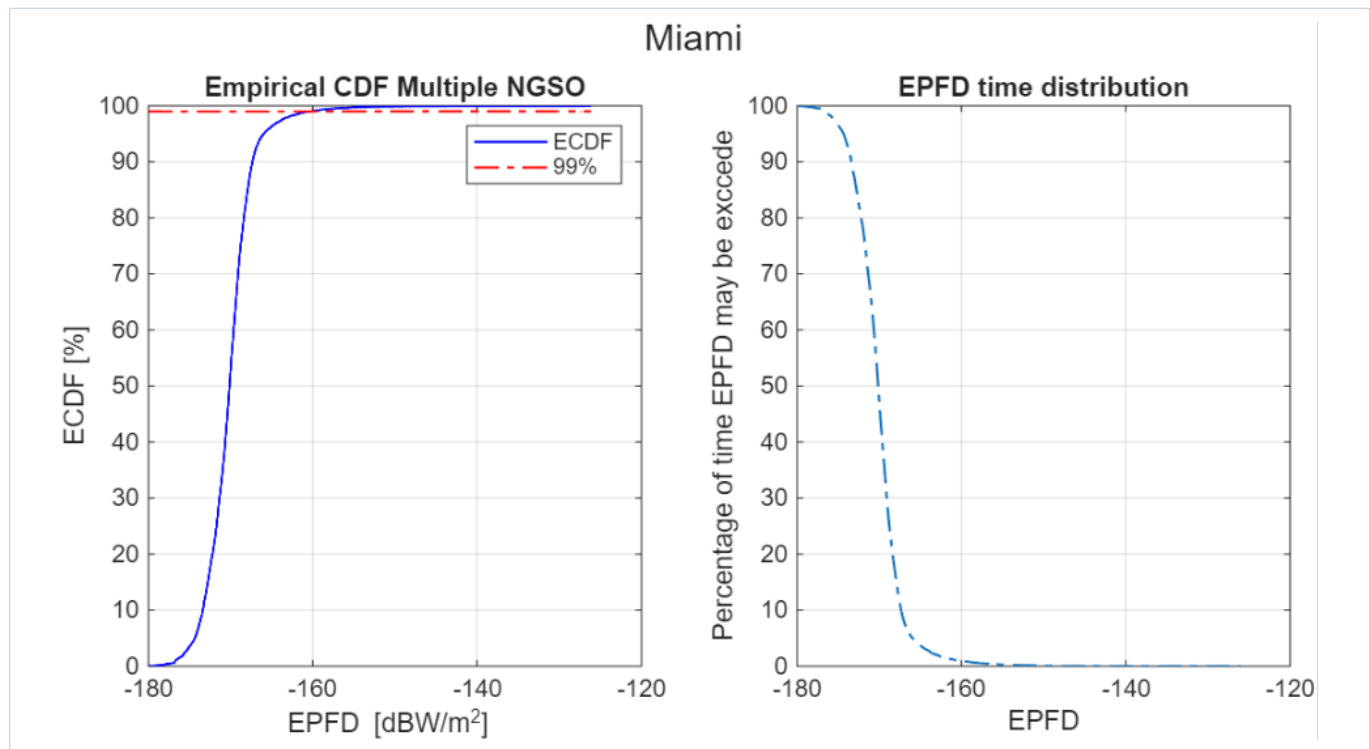


Figure 62 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, New York

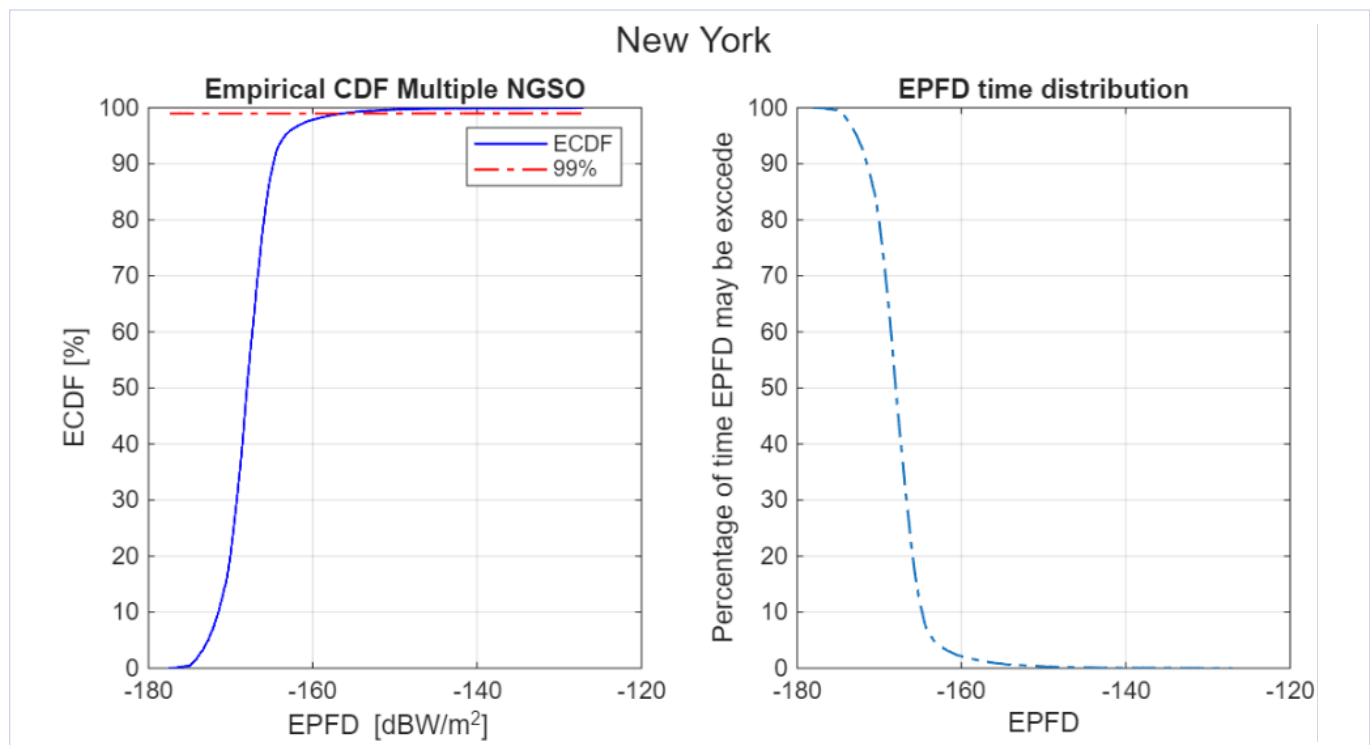


Figure 63 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Phoenix

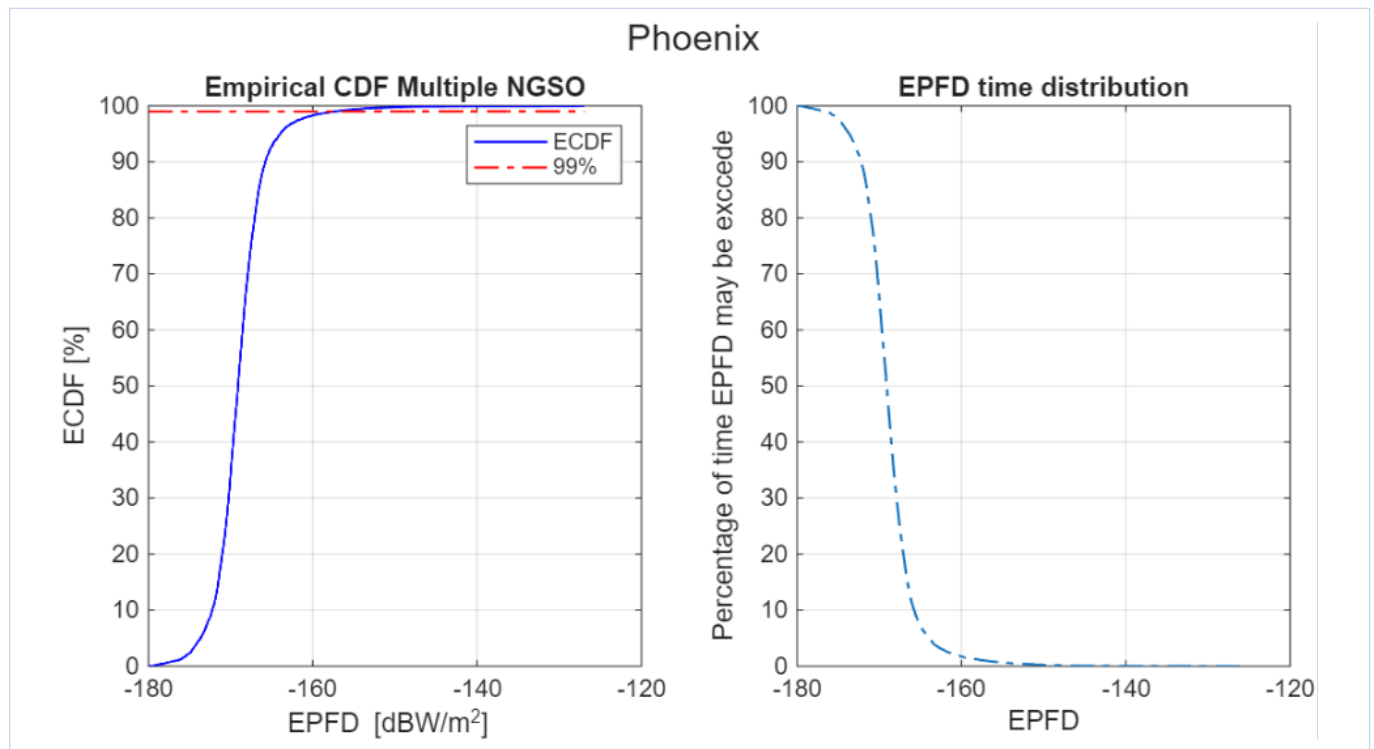


Figure 64 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, Seattle

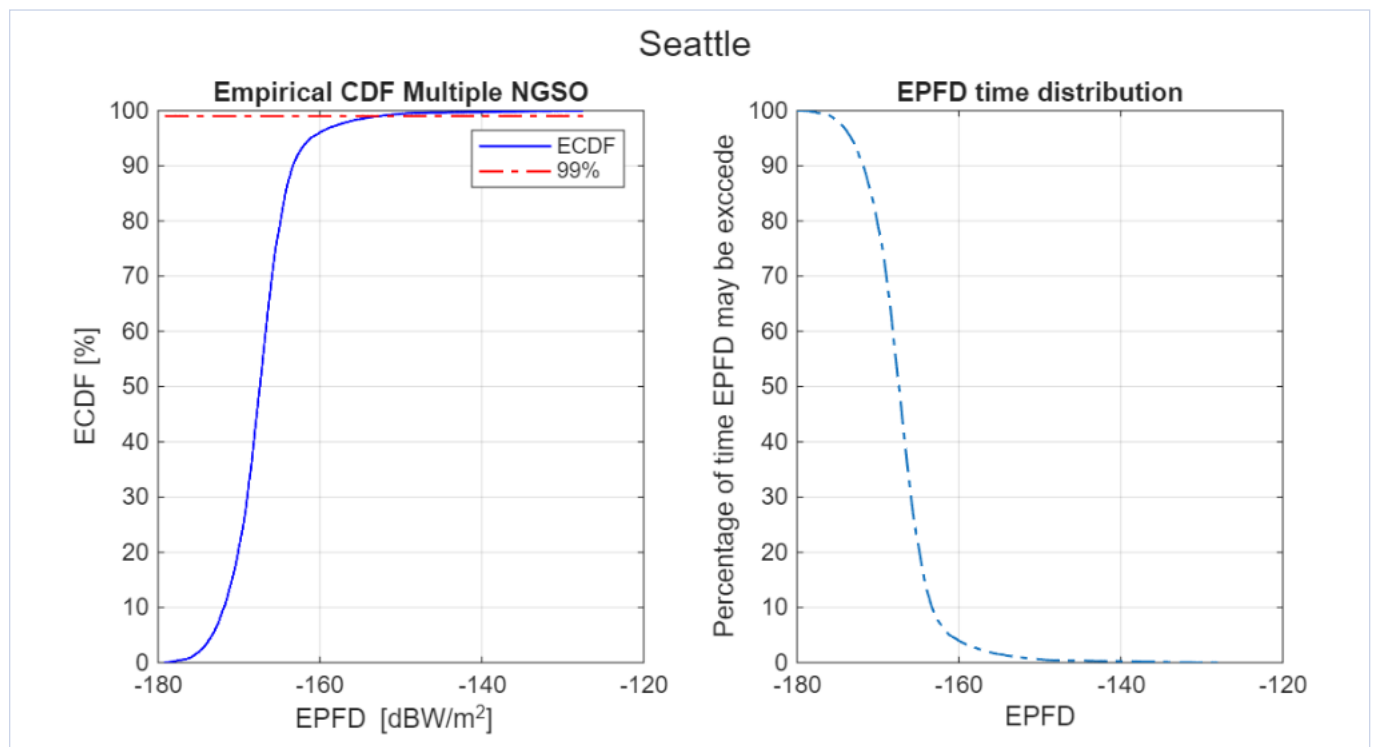
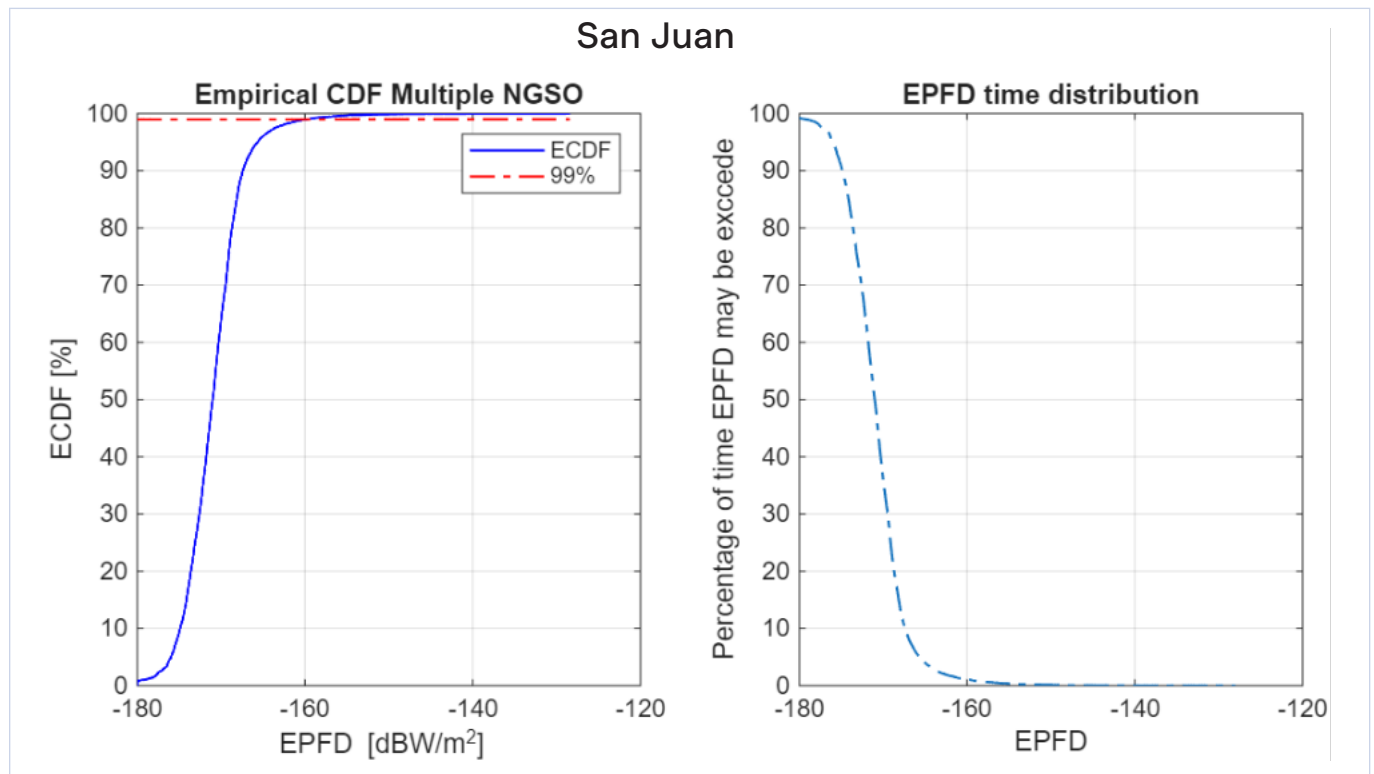


Figure 65 : Fonction de répartition empirique (ECDF) et distribution temporelle de l'EPFD, San Juan



Dans le graphique suivant, afin de faciliter la comparaison, la fonction de répartition empirique de tous les sites considérés a été superposée sur un même graphique. Une vue détaillée du franchissement de la ligne des 99 % est également représentée. Le graphique CDF composite montre clairement le regroupement de tous les sites, à l'exception d'Anchorage, dans une bande relativement étroite, avec un écart d'environ 3 à 5 dB au niveau des 99 %.

Figure 66 : Fonction de répartition empirique pour tous les sites considérés

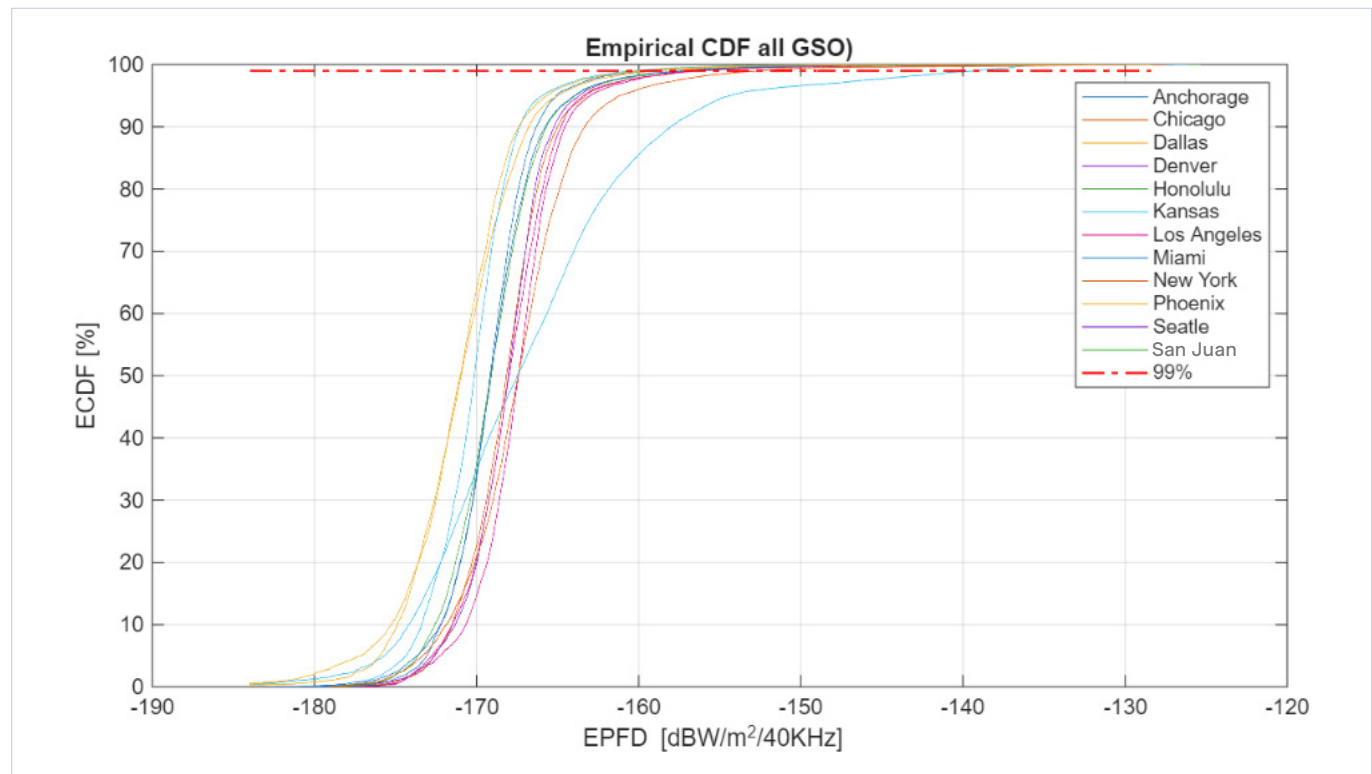
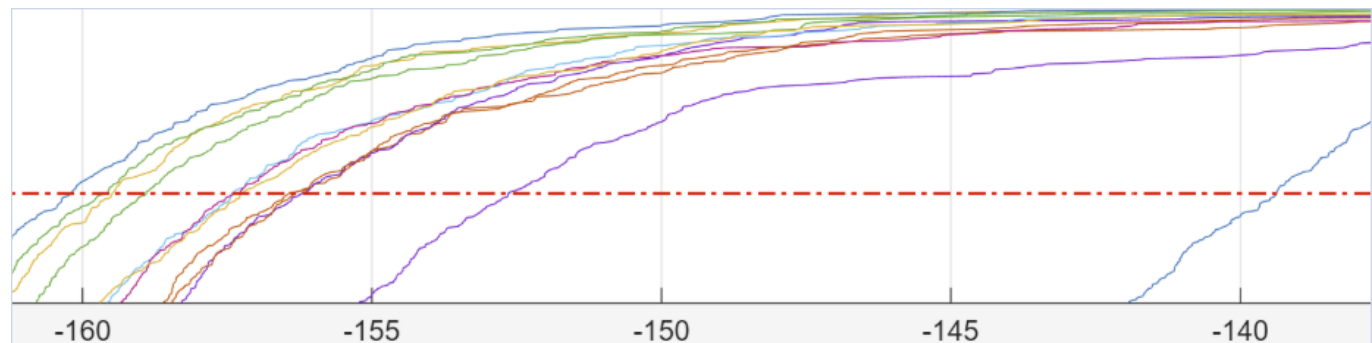


Figure 67 : Vue détaillée du franchissement de la ligne des 99 % sur la CDF

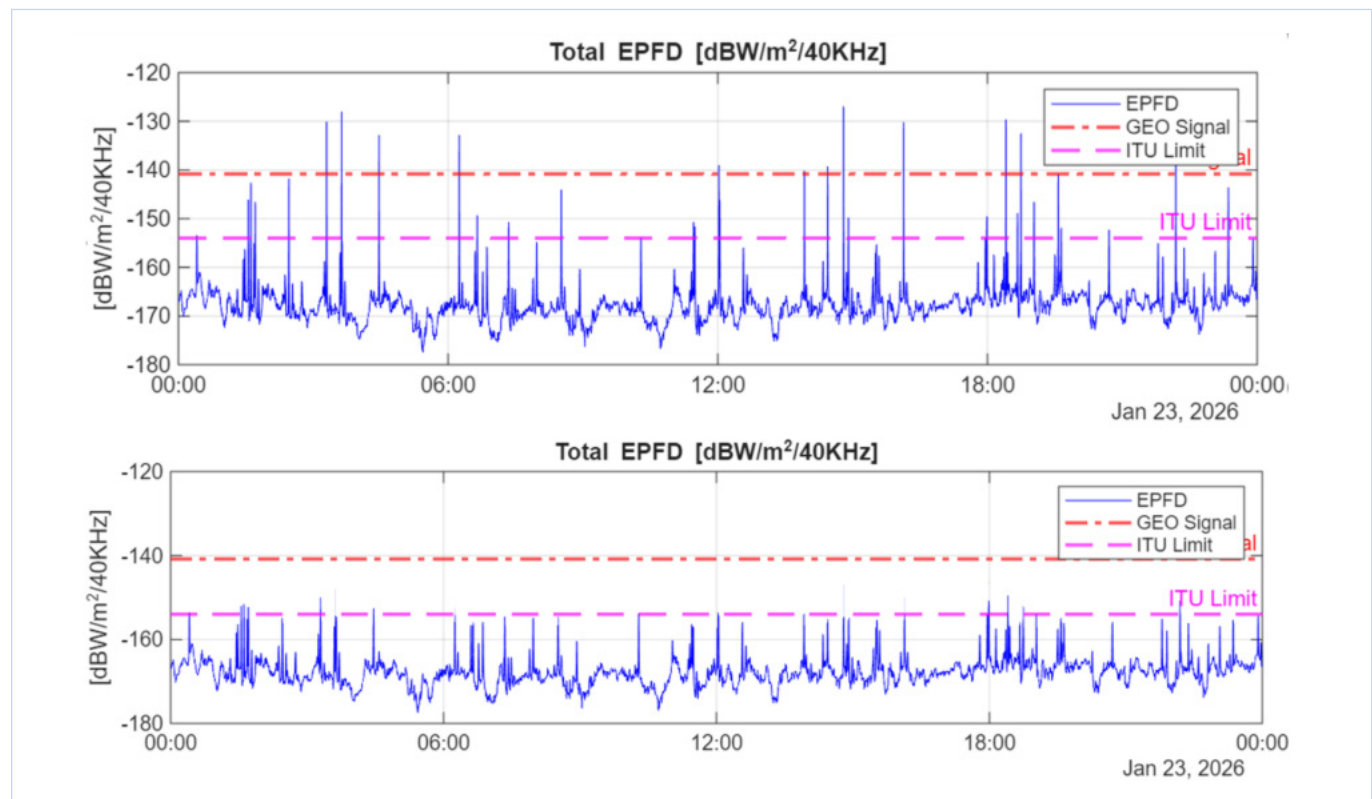


Considérations relatives à l'arc d'évitement GSO

Dans les simulations réalisées, aucun arc d'évitement GSO n'a été pris en compte pour les satellites NGSO. Les résultats ayant été conservés sous une forme appropriée, l'arc d'évitement GSO pourrait être facilement intégré à l'analyse actuelle. De ce fait, la limite UIT prévue à l'article 22 est constamment dépassée pour tous les sites. L'étude a mis en évidence une non-conformité EPFD minimale des systèmes NGSO, qui peut être corrigée facilement par une réduction minimale de la puissance NGSO dans l'angle d'évitement au sein de la zone d'exclusion.

À titre d'exemple pour le site de New York, la figure suivante montre une comparaison de l'EPFD totale, sans angle d'évitement (en haut), comme dans la figure 17 précédente, et avec un angle d'évitement de 8° et une réduction de puissance de 20 dB pour le NGSO (en bas). Dans ce cas, le nombre d'événements de dépassement n'est plus que de 22 au lieu de 33, la durée du plus long événement est ramenée de 30 à 10 secondes, la durée de conformité la plus longue passe de 112 min à 242 min, et le pourcentage global de dépassement est réduit d'environ 4,5 fois, passant de 0,6308 % à seulement 0,1389 %.

Figure 68 : Comparaison de l'EPFD totale, sans angle d'évitement (en haut) et avec angle d'évitement (en bas), New York



Cette analyse rapide de l'arc d'évitement appliquée à l'exemple de New York, avec un angle d'évitement de 8 degrés et une réduction de puissance NGSO de 20 dB, synthétisée dans le tableau ci-dessous, montre que des mesures d'atténuation relativement modestes, reposant sur le contrôle de puissance et l'orientation des faisceaux, rapprochent nettement le système du niveau de conformité UIT :

Tableau 13 : Analyse rapide de l'arc d'évitement pour l'exemple de New York

	Sans évitement	Avec évitement (8°, -20 dB)	Amélioration
Événements de dépassement	33	22	Réduction de 33 %
Durée du plus long événement	30 s	10 s	Amélioration d'un facteur 3
Durée de conformité la plus longue	112 min	242 min	Amélioration d'un facteur 2,2
Pourcentage de dépassement	0,63 %	0,14 %	Amélioration d'un facteur 4,5

Répartition dans le temps des intervalles pendant lesquels la limite UIT est dépassée

Les graphiques suivants montrent la répartition dans le temps des intervalles pendant lesquels la limite UIT est dépassée.

Pour chaque site, le premier graphique montre l'histogramme de la durée des dépassements de l'EPFD. Le graphique montre que, à l'exception de deux sites (Anchorage et Seattle), la durée maximale de dépassement est d'environ 20 à 30 secondes pour une durée d'observation de 24 heures. Si l'on tient compte également du nombre d'événements de dépassement de la limite UIT, on peut conclure que le pourcentage de temps de dépassement se situe entre environ 0,2 et 0,63 %. Les deux sites susmentionnés (Anchorage et Seattle) constituent des exceptions, avec une durée maximale de dépassement de 80 s et 115 s et un pourcentage de temps de dépassement de 4,7 % et 1,26 % respectivement.

Figure 69 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Anchorage

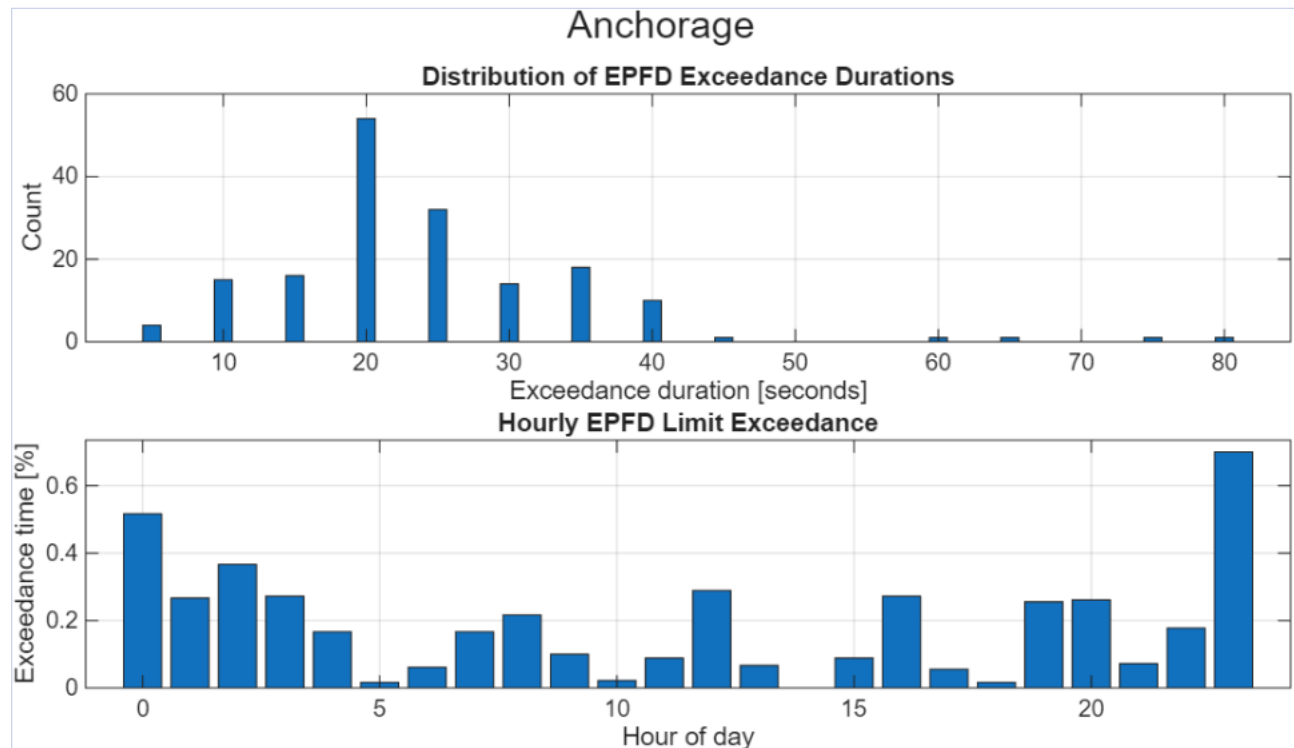


Figure 70 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Chicago

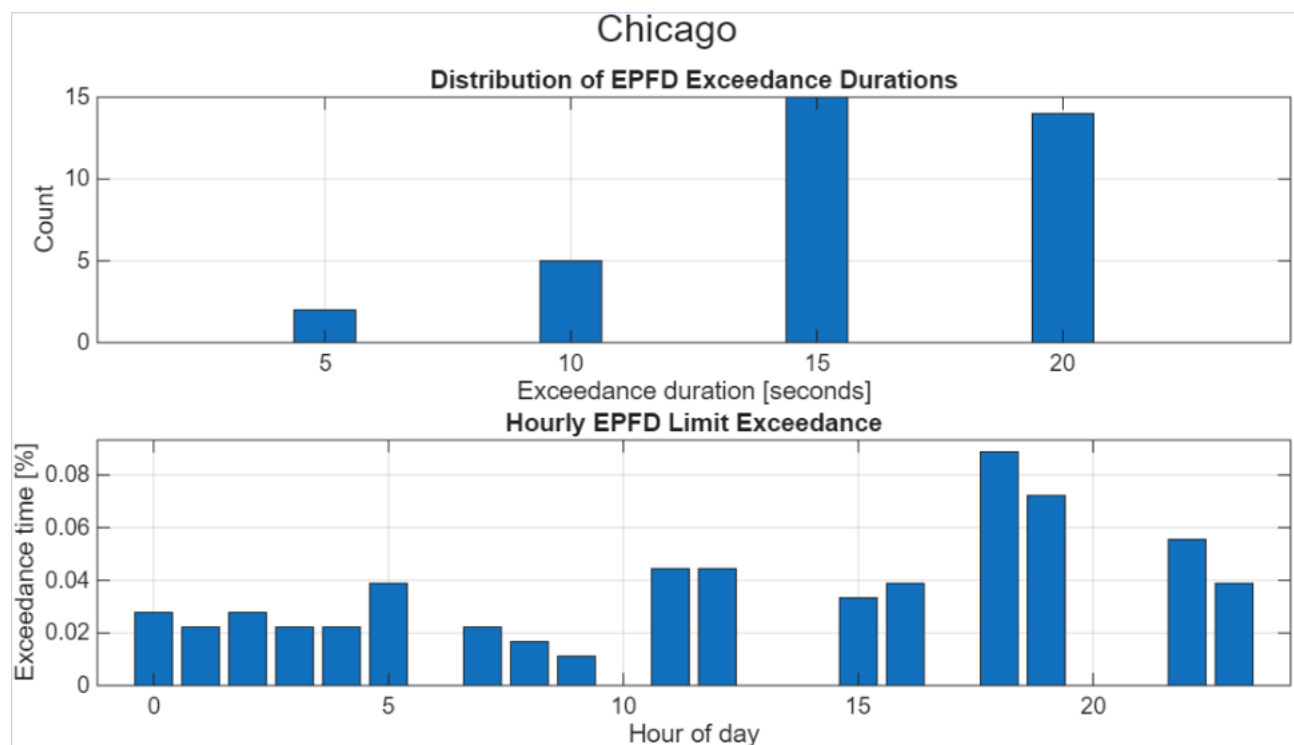


Figure 71 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Dallas

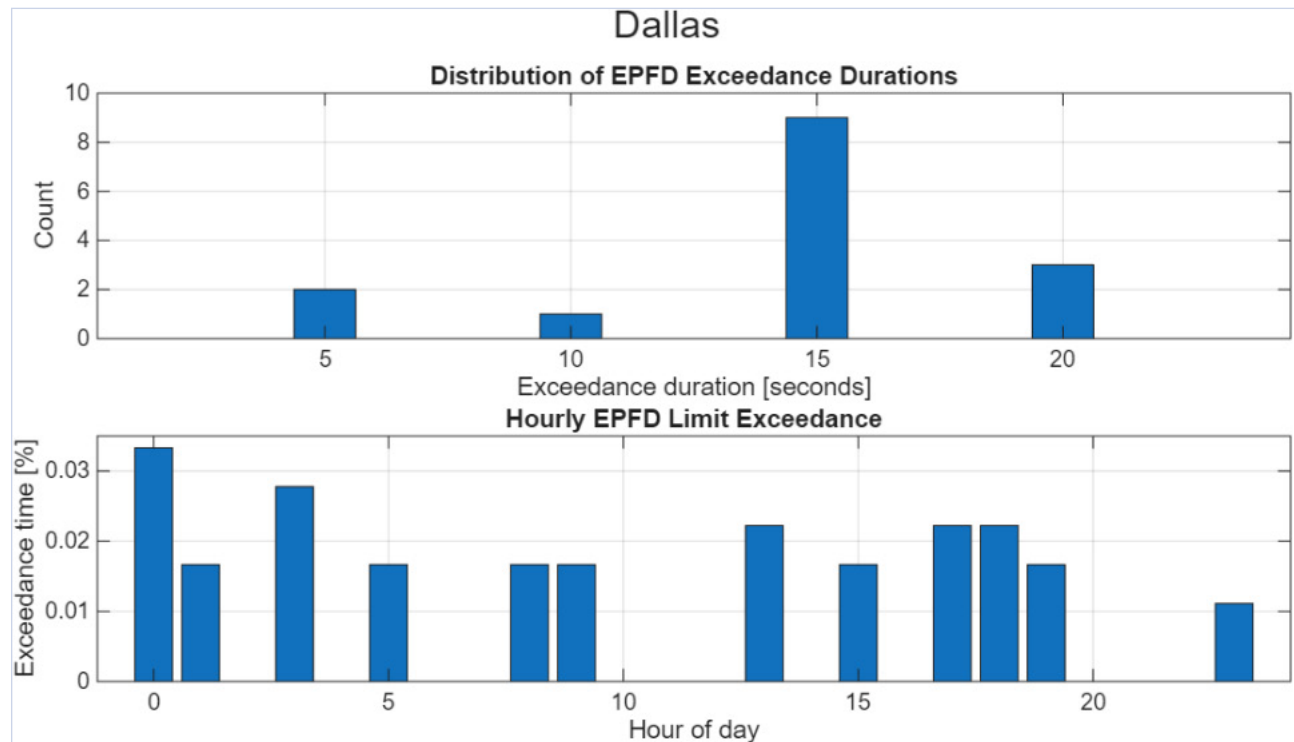


Figure 72 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Denver

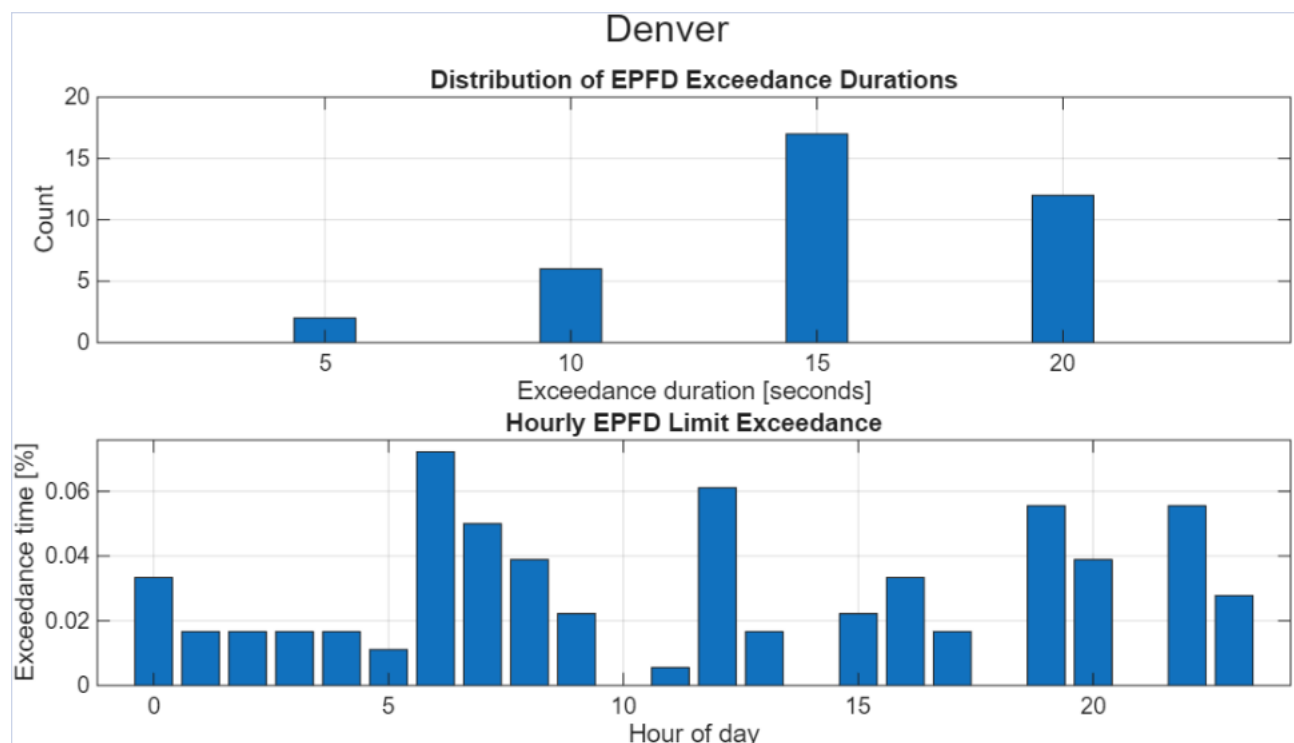


Figure 73 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Honolulu

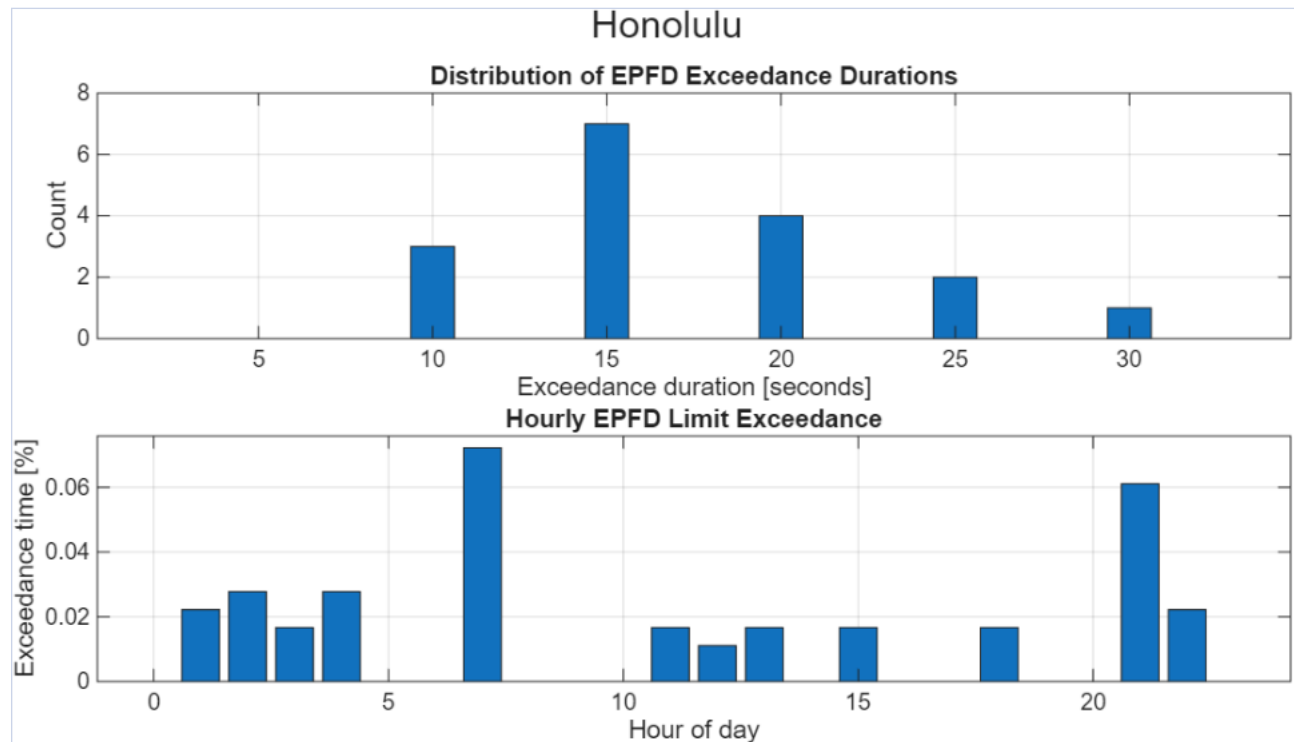


Figure 74 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Kansas

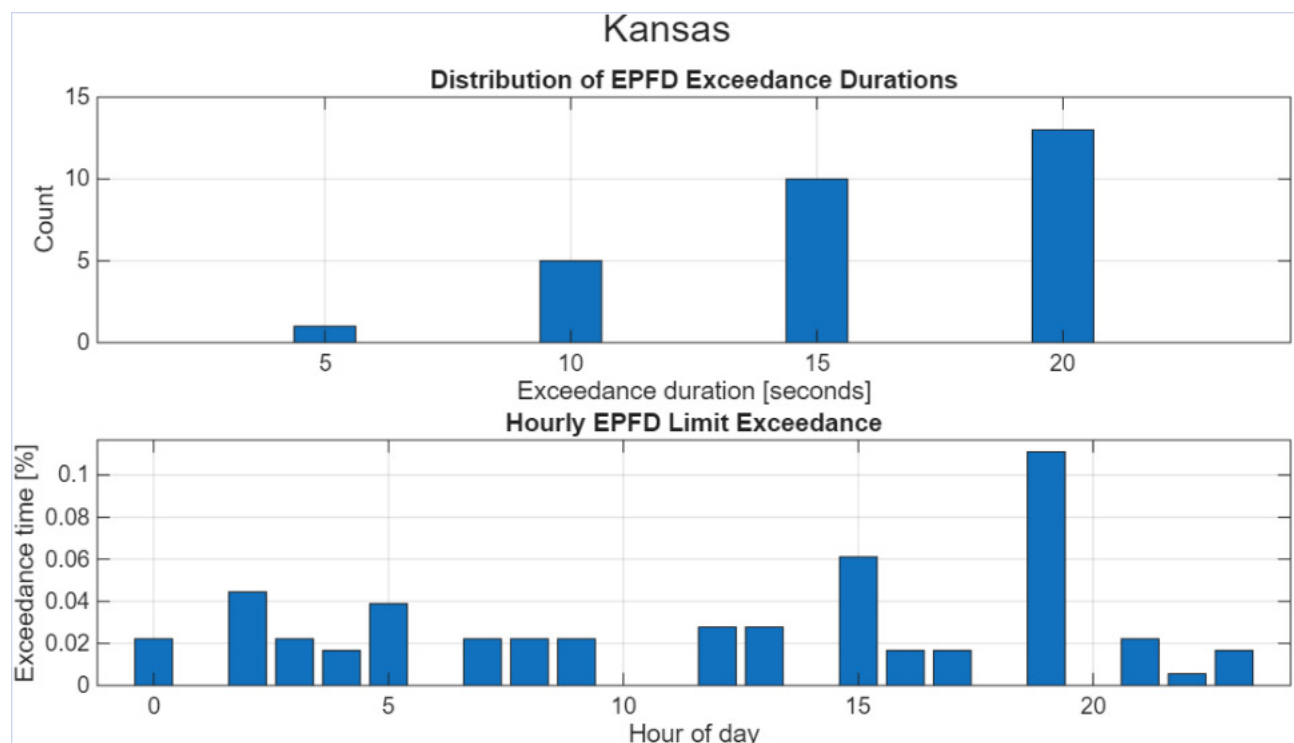


Figure 75 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Los Angeles

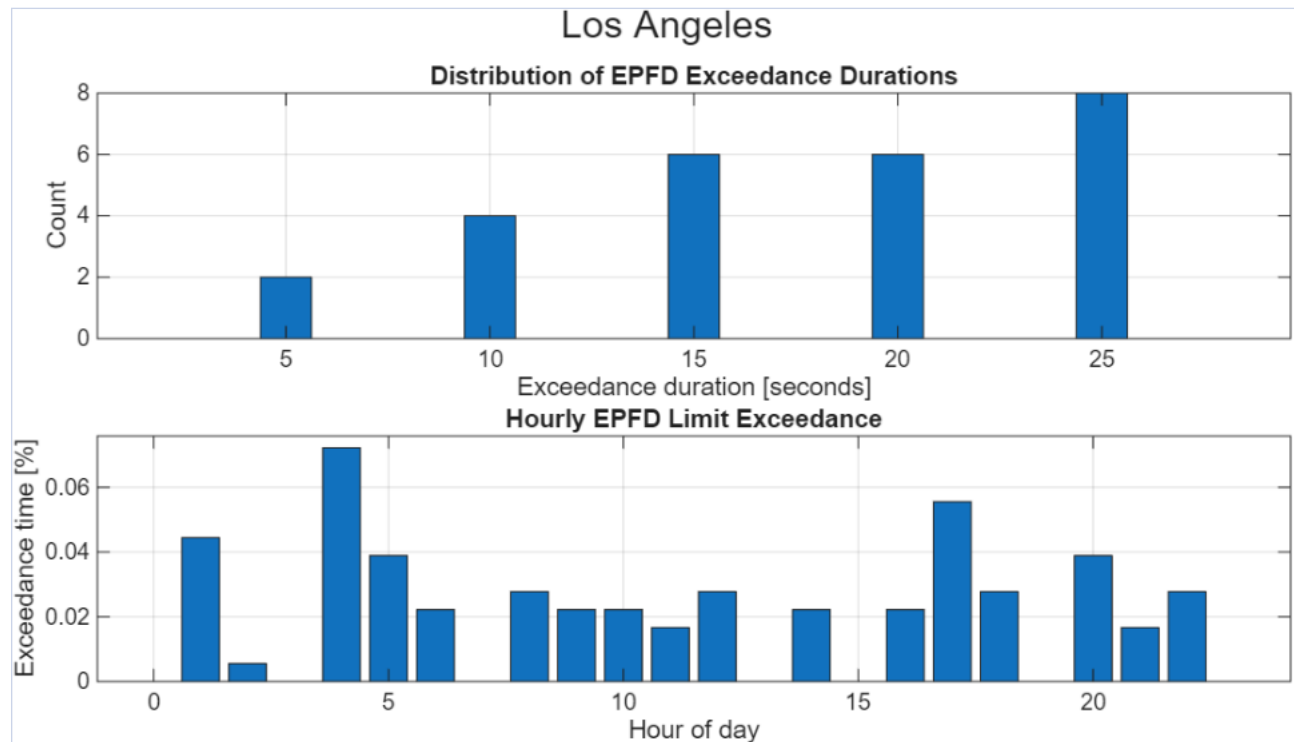


Figure 76 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Miami

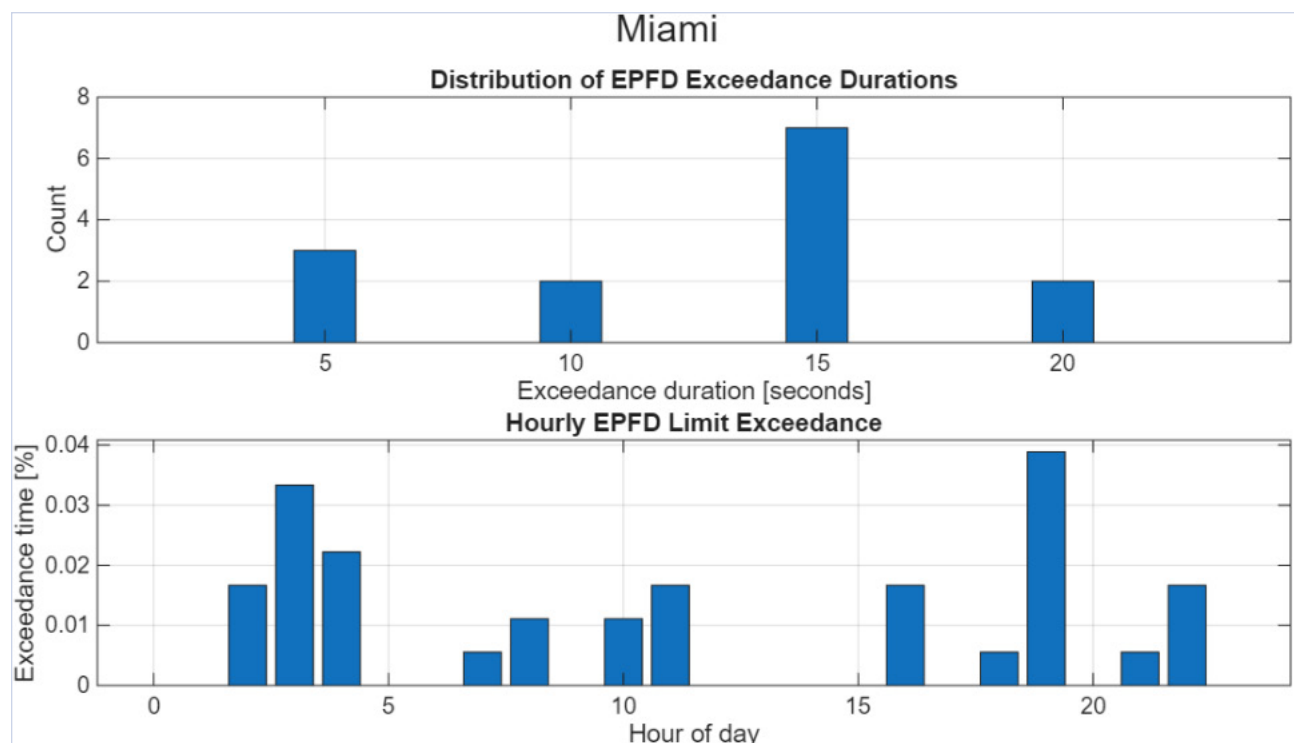


Figure 77 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, New York

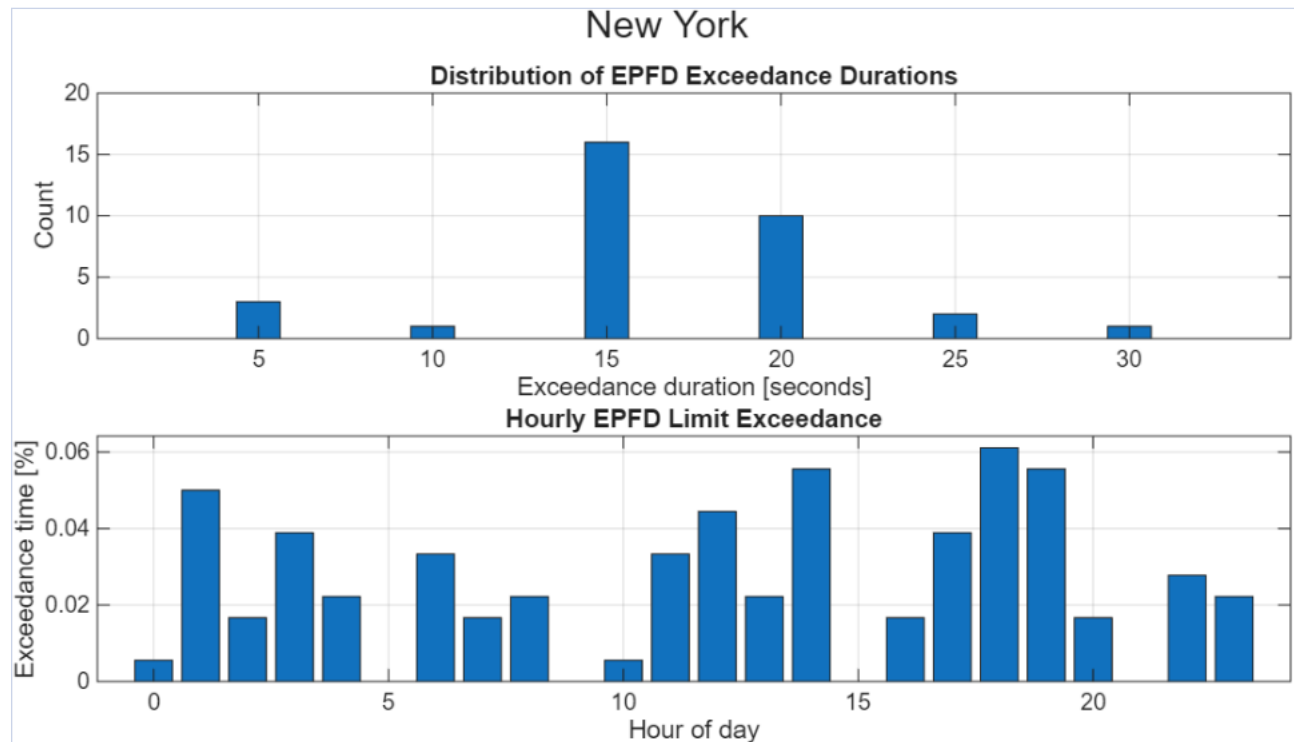


Figure 78 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Phoenix

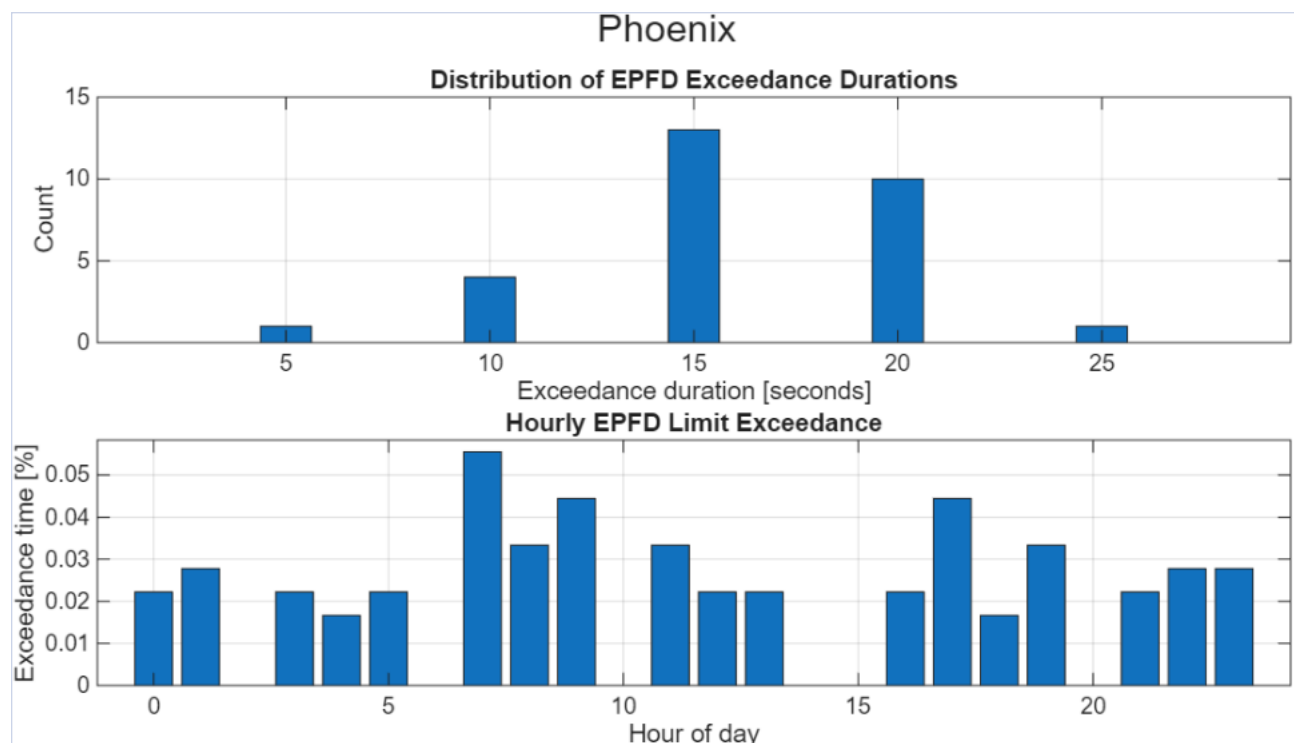


Figure 79 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, Seattle

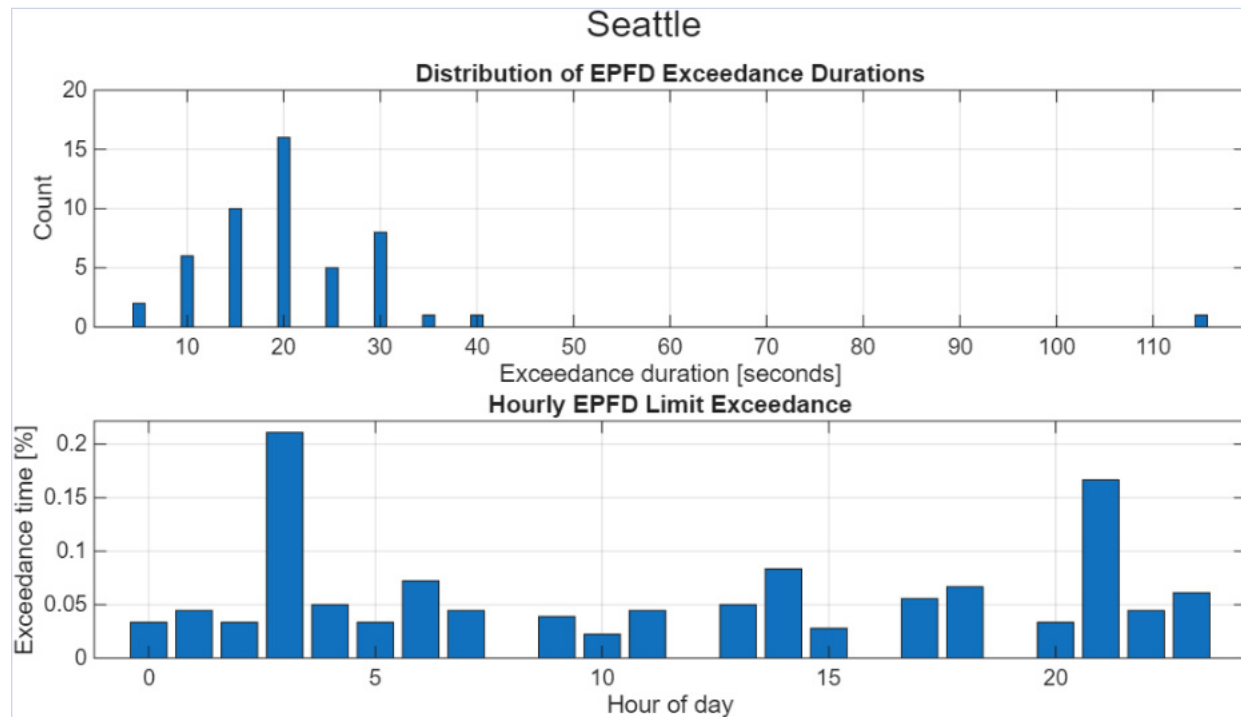


Figure 80 : Répartition des durées de dépassement de l'EPFD et dépassements horaires de la limite EPFD, San Juan



Tableau 14 : Synthèse pour les douze sites de l'étude, classés par latitude

	Nombre moyen de satellites visibles	Nombre minimal de satellites visibles	Nombre maximal de satellites visibles	Durée totale d'observation, en heures	Durée totale de dépassement, en min	Pourcentage de dépassement, %	Nombre d'événements	Durée de l'événement le plus long, en s	Intervalle de l'événement le plus long	Durée de conformité la plus longue, en min	Intervalle de conformité le plus long	Latitude, en degrés
Anchorage	7,01	0	19	24	67,75	4,7	168	80	01:55:15 01:56:35	132,8	13:30:05 15:42:55	61,1
Seattle	9,91	2	21	24	18,25	1,2674	50	115	03:35:00 03:36:55	121,17	07:38:55 09:40:05	47,6
Chicago	10,4	1	20	24	9,42	0,6539	36	20	01:13:45 01:14:05	139,9	19:48:30 22:08:25	41,83
New York	10,43	2	20	24	9,08	0,6308	33	30	17:59:00 17:59:30	112,58	12:02:45 13:55:20	40,69
Denver	10,5	2	23	24	9,42	0,6539	37	20	06:38:05 06:38:25	143,42	13:12:25 15:35:50	39,76
Kansas	10,47	2	22	24	7,75	0,5382	29	20	00:39:25 00:39:45	167,83	09:23:20 12:11:10	39,09
Los Angeles	10,29	2	21	24	7,67	0,5324	26	25	04:02:50 04:03:15	161,5	06:08:30 08:50:00	34,02
Phoenix	10,29	2	22	24	7,75	0,5382	29	25	09:09:25 09:09:50	182,25	13:10:20 16:12:35	33,6
Dallas	10,1	2	21	24	3,58	0,2488	15	20	3:27:50 3:28:10	243,08	09:17:05 13:20:10	32,81
Miami	8,15	2	19	24	3	0,2083	14	20	04:12:45 04:13:05	319,83	11:12:00 16:31:50	25,78
Honolulu	7,41	0	20	24	4,92	0,3414	17	30	21:53:10 21:53:40	232,83	07:58:00 11:50:50	21,32
San Juan	7,03	0	17	24	3,83	0,2662	16	20	01:30:55 01:31:15	263,92	17:46:25 22:10:20	18,4

Tableau 15 : Valeurs typiques des principaux paramètres liés aux dépassements

	Minimum	Maximum	MOYENNE
Nombre moyen de satellites visibles	7,01	10,50	9,33
Nombre minimal de satellites visibles	0,00	2,00	1,42
Nombre maximal de satellites visibles	17,00	23,00	20,42
Durée totale d'observation, en heures	24,00	24,00	24,00
Durée totale de dépassement, en min	3,00	67,75	12,70
Pourcentage de dépassement, %	0,21	4,70	0,88
Nombre d'événements	14,00	168,00	39,17
Durée de l'événement le plus long, en s	20,00	115,00	35,42
Intervalle de l'événement le plus long	Sans objet	Sans objet	Sans objet
Durée de conformité la plus longue, en min	112,58	319,83	185,09
Intervalle de conformité le plus long	Sans objet	Sans objet	Sans objet

Conclusions de la simulation avec modèle d'antenne omnidirectionnelle

D'après la synthèse des tableaux 6 et 7 pour les douze sites, les conclusions statistiques suivantes peuvent être tirées :

- ❖ En moyenne, pour 80 % des sites situés entre 18 et 42 degrés de latitude nord, le niveau UIT a été dépassé 25 fois par site sur 24 heures, avec une durée moyenne des événements de dépassement de 23 secondes, ce qui représente un pourcentage de dépassement de 0,46 % sur 24 heures.
- ❖ Les sites de haute latitude, Anchorage et Seattle, présentent une occurrence de dépassement plus élevée, principalement en raison d'une géométrie particulière entre la longitude du satellite GEO utilisé (139° ouest pour le GEO SES-22), les longitudes des sites au sol et l'inclinaison des satellites LEO, dont les valeurs élevées (par exemple 51,9°) entraînent un alignement coplanaire presque parfait qui renforce l'alignement angulaire entre la direction de communication GEO et la direction de transmission LEO, ce qui provoque une occurrence de dépassements étonnamment élevée. Ce cas est théoriquement valable compte tenu du modèle d'antenne isotrope utilisé, même si l'alignement coplanaire et angulaire devrait être beaucoup plus limité par les limites d'orientation des faisceaux de l'antenne à réseau phasé LEO, comme l'ont montré les résultats de simulation avec modèle d'antenne directionnelle à partir de la p.47.