

Etude de l'exposition aux ondes électromagnétiques du kit de communication au réseau Starlink

Février 2022

Direction de la Surveillance du marché et de l'Exposition du public (DSE)

INTRODUCTION	3
I. LE KIT DE COMMUNICATION STARLINK	3
a) Fonctionnement général	3
b) Matériel	3
c) La réglementation	5
II. RESULTATS DE MESURE	6
a) Mesure exploratoire	6
b) Analyse spectrale	11
c) Analyse générale	13
III. CONCLUSION	14
BIBLIOGRAPHIE	15

Introduction

Ce rapport étudie l'exposition au rayonnement radioélectrique créée par le kit de communication Starlink. Ce kit permet au grand public de bénéficier d'une connexion internet par satellite. Il s'agit d'un système émetteur-récepteur composé d'une antenne permettant de communiquer avec des satellites en orbite basse. L'objectif de l'étude est de présenter les résultats de mesure du niveau d'exposition aux ondes électromagnétiques rayonnées par le kit de communication Starlink.

Le réseau de communication Starlink est composé également de stations terrestres, dont l'une est implantée en France, à Villenave-d'Ornon (Gironde). Le présent rapport n'a pas pour objectif d'étudier l'exposition produite dans le voisinage de ces stations.

I. Le kit de communication Starlink

a) Fonctionnement général

Le réseau de communication par satellite Starlink ambitionne de fournir un accès à internet partout dans le monde. Il est composé de trois éléments principaux : des satellites de télécommunication, des stations terrestres et enfin l'équipement fourni au particulier, décrit dans la partie b) Matériel, qui permet de se connecter au réseau [1]. L'accès à internet est conditionné par l'achat du matériel et la souscription à un abonnement mensuel. Le réseau de communication Starlink repose sur le déploiement de milliers de satellites en orbite basse (550 km de la Terre). Cette orbite présente l'avantage d'induire une faible latence, contrairement aux satellites géostationnaires qui se situent à une distance près de 65 fois plus grande. En revanche, chaque satellite ne couvre qu'une petite fraction de la surface du globe. Offrir un service en tout point de la surface terrestre nécessite donc de déployer un grand nombre de satellites. Ces nombreux satellites permettent aussi d'accroître la capacité du réseau, contrairement au satellite géostationnaire qui, devant traiter seul les communications de continents entiers, offre en moyenne un débit plus réduit à chaque usager.

L'antenne proposée aux particuliers par l'entreprise américaine permet de les raccorder aux satellites en orbite. Les satellites, quant à eux, sont également en communication avec des stations terrestres équipées de plus grandes antennes qui les mettent en relation avec les fibres du réseau terrestre haut débit filaire.

L'équipement fourni aux particuliers utilise, pour le sens Terre vers espace, la bande de fréquence 14 – 14,5 GHz et pour le sens espace vers Terre, la bande 10,95 – 12,7 GHz.

b) Matériel

Le kit fourni aux particuliers est composé de trois éléments : une antenne à installer en extérieur, un routeur Wi-Fi et un boîtier pour raccorder l'antenne et le routeur. La Figure 1 montre les différents composants du kit Starlink.



Figure 1 Photographie du kit fourni aux particuliers pour se connecter au réseau Starlink

L'antenne est à droite de la photo, le routeur Wi-Fi blanc apparaît au milieu et le boîtier noir, à gauche, assure la connexion du tout. L'installation consiste à placer l'antenne à l'extérieur dans un environnement dégagé (c'est-à-dire sans obstacle vers le ciel). L'antenne, grâce à son moteur interne, s'oriente alors automatiquement vers le satellite le plus proche afin d'optimiser sa connexion à chaque instant. Une fois la liaison établie avec un satellite, le routeur Wi-Fi offre alors une connexion internet pour tout appareil domestique (ordinateur, smartphone, etc.). En complément, une application

Starlink permet d'avoir des informations sur le bon fonctionnement du système de communication et de paramétrer certaines options.

Bien que sa forme évoque une parabole, l'antenne d'émission et de réception Starlink fonctionne selon un principe différent : il s'agit d'un réseau à commande de phase [2]. L'antenne contient en effet un circuit imprimé avec des centaines de minuscules antennes planaires dont les phases sont contrôlables électroniquement, ce qui permet de former un faisceau directionnel. Une fois l'orientation optimisée grâce à son moteur, l'antenne Starlink communique avec les satellites passant au-dessus d'elle en formant un faisceau dont l'orientation change en permanence au cours du temps.

Diamètre	0,48 m
Fréquences (voie montante)	14 – 14,5 GHz
PIRE	38,2 dBW
Gain max	34,8 dBi
Gain min	32,2 dBi
Puissance transmise (faisceau perpendiculaire)	0,76 W
Puissance transmise (faisceau penché)	4,06 W
Efficacité d'ouverture	56,7 %
Rapport cyclique	11 %

Tableau 1 Paramètres de l'antenne Starlink*

Le Tableau 1 présente les caractéristiques de l'antenne Starlink. En formant le faisceau qui suit les satellites, l'antenne va également ajuster sa puissance en permanence de sorte qu'un niveau de réception constant soit reçu au niveau du satellite. L'antenne est donc capable de compenser le gain variable et l'affaiblissement dû à la propagation. La puissance transmise par l'antenne varie entre 0,76 W lorsque le faisceau est perpendiculaire à sa surface (satellite à la verticale de l'antenne) et 4,06 W lorsque le faisceau est plus incliné. Les paramètres indiquent également que le rapport cyclique de l'antenne est de 11 % : la plupart du temps (89 % du temps), elle n'émet pas.

c) La réglementation

Les valeurs limites de l'exposition du public sont inscrites dans le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002. Le Tableau 2 présente les valeurs limites d'exposition pour le public en termes de niveaux de référence aux fréquences de fonctionnement du système Starlink.

* Les paramètres de l'antenne Starlink ont été fournis par le constructeur

Bande de fréquence	Densité de Puissance S (W/m ²)	Niveau de champ électrique E (V/m)
10 GHz – 300 GHz	10	61

Tableau 2 Limites pour l'exposition du public

Pour les fréquences supérieures à 10 GHz, la densité de puissance doit être moyennée sur une période de $68/(f^{1,05})$ minutes (f étant la fréquence en GHz). À la fréquence d'émission de 14 GHz, il convient donc de retenir la moyenne sur 4 minutes et 15 secondes.

II. Résultats de mesure

a) Mesure exploratoire

Le kit de communication Starlink testé par l'ANFR a été installé au Centre de Contrôle International (CCI) de Rambouillet à Prunay-en-Yvelines. La mesure exploratoire consistait à effectuer des mesures du niveau global de l'exposition à l'aide d'une sonde de champ large bande WPF40 et du champ-mètre SMP2 du constructeur Wavecontrol dont la plage de fréquence s'étend de 20 MHz à 40 GHz, l'ensemble des équipements étant étalonné selon les exigences de la norme ISO 17025. Une mesure a été effectuée par le laboratoire accrédité COFRAC du CCI pour mesurer le champ électromagnétique *in situ* selon le protocole ANFR DR15-4 du 28 août 2017 entre 100 kHz et 6 GHz, elle a été publiée sur le site cartoradio.fr [3].

Les mesures ont été effectuées en sollicitant la voie montante du système Starlink c'est-à-dire en chargeant un fichier d'un giga-octet en boucle afin de s'assurer que l'antenne rayonne en continu pendant les mesures. Il a également été nécessaire de trouver un moyen astucieux de positionner la sonde sans trop perturber le faisceau de l'antenne parabolique. En effet, un obstacle en travers du faisceau de l'antenne, même aussi mince que le trépied qui supporte la sonde, suffit à couper la communication et les rayonnements radioélectriques.

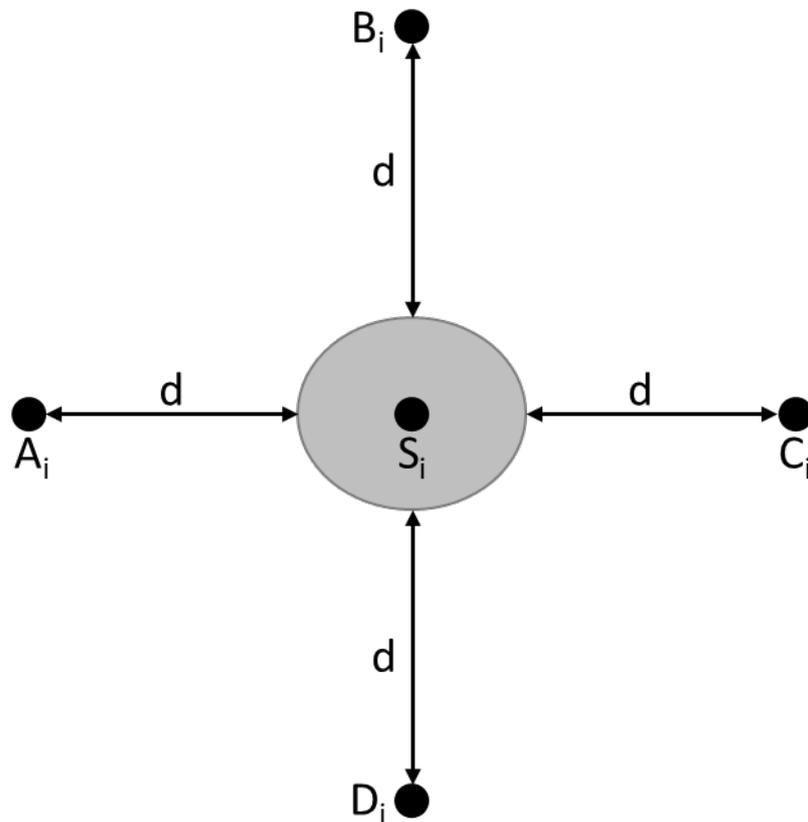


Figure 2 Schéma représentant les points de mesure au centre et autour de l'antenne Starlink (vue de dessus)

La Figure 2 représente les points de mesure définis autour de l'antenne Starlink. Le cercle gris au milieu du schéma représente l'antenne Starlink, le point S_i est le point à l'aplomb de l'antenne. Les points A_i , B_i , C_i et D_i sont des points situés à une distance d égale à 50 cm des bords de l'antenne respectivement à gauche, derrière, à droite et devant l'antenne Starlink. Les mesures ont été effectuées à des hauteurs de 50 cm, 1 m et 2 m par rapport au plan parallèle au sol et passant par le centre de l'antenne. Pour information, la hauteur de l'antenne sur son socle est de 35 cm. Dans la suite du rapport, les hauteurs des points S_i , A_i , B_i , C_i et D_i seront explicitées par l'indice $i = 50, 100$ et 200 .

Les figures 3, 5 et 6 représentent l'antenne Starlink avec la sonde large bande positionnée respectivement à 50 cm, 1 m et 2 m de l'antenne, dans le faisceau. Le positionnement du trépied et de la sonde a été choisi de telle sorte que la connexion du système de communication ne soit pas interrompue. Durant toutes les mesures,

l'orientation de l'antenne n'a pas changé. C'est un téléphone mobile connecté en Wi-Fi au routeur Starlink qui envoyait en boucle le même fichier vers un serveur afin de s'assurer que l'antenne soit toujours en émission.



Figure 3 Photographie de la sonde large bande positionnée 50 cm au-dessus de l'antenne Starlink (point S₅₀)

Le tableau de la Figure 4 présente les résultats de mesure du niveau global de l'exposition aux différentes positions et hauteurs autour de l'antenne Starlink. Ils montrent des niveaux inférieurs aux valeurs limites de l'exposition présentées au Tableau 2. Les résultats montrent que les niveaux les plus élevés sont mesurés aux positions se situant devant l'antenne. En effet, à chaque hauteur, les résultats de mesure aux points S_i, A_i et D_i sont supérieurs aux niveaux mesurés en B_i et C_i. L'antenne étant mécaniquement légèrement orientée vers A_i, les niveaux de champs mesurés sur le côté en A_i sont supérieurs à ceux mesurés de l'autre côté en C_i. Les niveaux mesurés en B_i et C_i sont toujours inférieurs au niveau de sensibilité de la sonde large bande qui est de 1 V/m.

Les niveaux mesurés à une hauteur de 50 cm montrent que le niveau le plus élevé qui se trouve à l'aplomb de l'antenne à la position S₅₀ est de 7,92 V/m.

Les niveaux mesurés à une hauteur de 1 m montrent que le niveau maximal relevé est de 8,98 V/m et se situe en face de l'antenne (point D₁₀₀). La Figure 7 présente la photographie de la sonde positionnée en D₁₀₀.

Les niveaux mesurés à une hauteur de deux mètres (points S₂₀₀, A₂₀₀, B₂₀₀, C₂₀₀, D₂₀₀) sont faibles. Ces niveaux sont inférieurs à la sensibilité de la sonde large bande qui s'élève à 1 V/m. Toutefois, à cette hauteur, les niveaux mesurés en S₂₀₀, A₂₀₀ et D₂₀₀ sont également supérieurs à ceux mesurés en B₂₀₀ et C₂₀₀.

H=2 m		B ₂₀₀	
		0,09	
	A ₂₀₀	S ₂₀₀	C ₂₀₀
	0,24	0,23	0,09
H=1 m		D ₂₀₀	
		0,66	
		B ₁₀₀	
		0,33	
	A ₁₀₀	S ₁₀₀	C ₁₀₀
	6,38	1,21	0,37
H=50 cm		D ₁₀₀	
		8,98	
		B ₅₀	
		0,36	
	A ₅₀	S ₅₀	C ₅₀
	4,44	7,92	0,58
		D ₅₀	
		1,23	

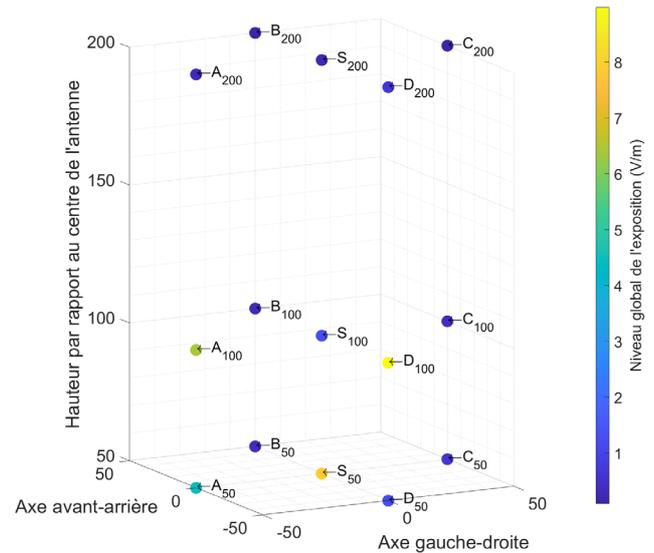


Figure 4 Résultats de mesure du niveau global de l'exposition (en V/m) aux points S_i, A_i, B_i, C_i et D_i sous forme de tableau et de graphique (coordonnées en cm).

En conséquence, les mesures montrent que les niveaux les plus élevés et supérieurs à 1 V/m sont, par ordre décroissant, aux positions D₁₀₀, S₅₀, A₁₀₀, A₅₀, D₅₀ et S₁₀₀. Il est fort probable que les niveaux élevés à 1 m, notamment en D₁₀₀ et A₁₀₀, s'expliquent par le fait que le faisceau pointe vers ces directions et que la formation du faisceau est plus efficace à une distance supérieure à 50 cm due à un phénomène de champ proche.

Cependant, comme cela a été mentionné précédemment, tout obstacle de grande taille interceptant le faisceau de l'antenne coupe la connexion à internet, ce qui perturbe le fonctionnement du dispositif de manière flagrante pour son usager. Une personne statique et proche de l'antenne ne serait exposée que très peu de temps, produisant une moyenne très faible pendant les 4 mn 15 s permettant d'évaluer l'exposition à ces fréquences.



Figure 5 Photographie de la sonde large bande positionnée 1 m au-dessus de l'antenne Starlink (point S100)



Figure 6 Photographie de la sonde large bande positionnée 2 m au-dessus de l'antenne Starlink (point S200)



Figure 7 Photographie de la sonde large bande à la position du niveau maximal relevé D₁₀₀

b) Analyse spectrale

Une analyse spectrale a été menée afin de comprendre comment la bande de fréquence allouée sur la voie montante est utilisée par le système Starlink. Durant toute la journée de mesure, c'est le même fichier qui était chargé sur le même serveur en boucle, c'est-à-dire que la voie montante était sollicitée systématiquement de la même manière. Le matériel utilisé est un analyseur de spectre Anritsu MS2090 connecté à une antenne cornet. Le constat a été fait que le système Starlink change de bande de fréquence à l'intérieur de l'intervalle allant de 14 à 14,5 GHz.

Les figures 8, 9 et 10 représentent les spectres d'émission du système à différents instants. La Figure 8 montre qu'à 9h38, la communication se fait par l'utilisation de deux intervalles de fréquences : 14,25 GHz à 14,31 GHz et 14,43 GHz à 14,50 GHz. La Figure 9 montre qu'à 9h39 la largeur du deuxième intervalle s'accroît pour s'étendre de 14,38 GHz à 14,45 GHz. Enfin, la Figure 10 montre qu'à 9h49 le spectre d'émission s'étend de 14,06 GHz à 14,50 GHz. Tout au long de la journée de mesure, les spectres d'émission du kit Starlink furent inclus dans l'intervalle allant de 14 à 14,5 GHz.

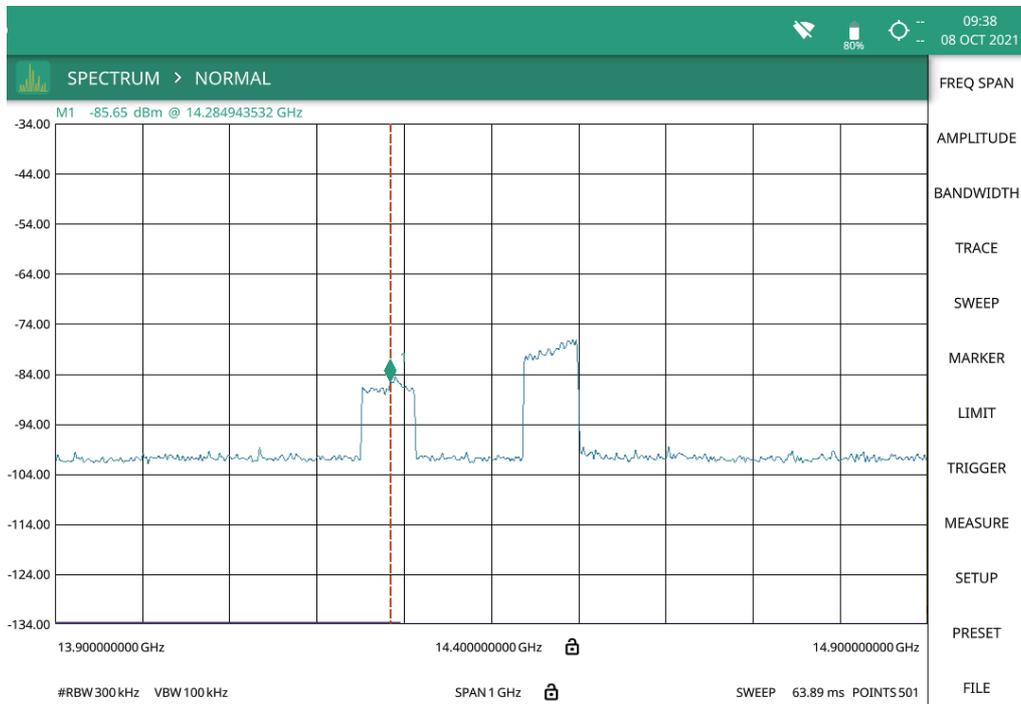


Figure 8 Spectre d'émission du système Starlink à 9h38



Figure 9 Spectre d'émission du système Starlink à 9h39

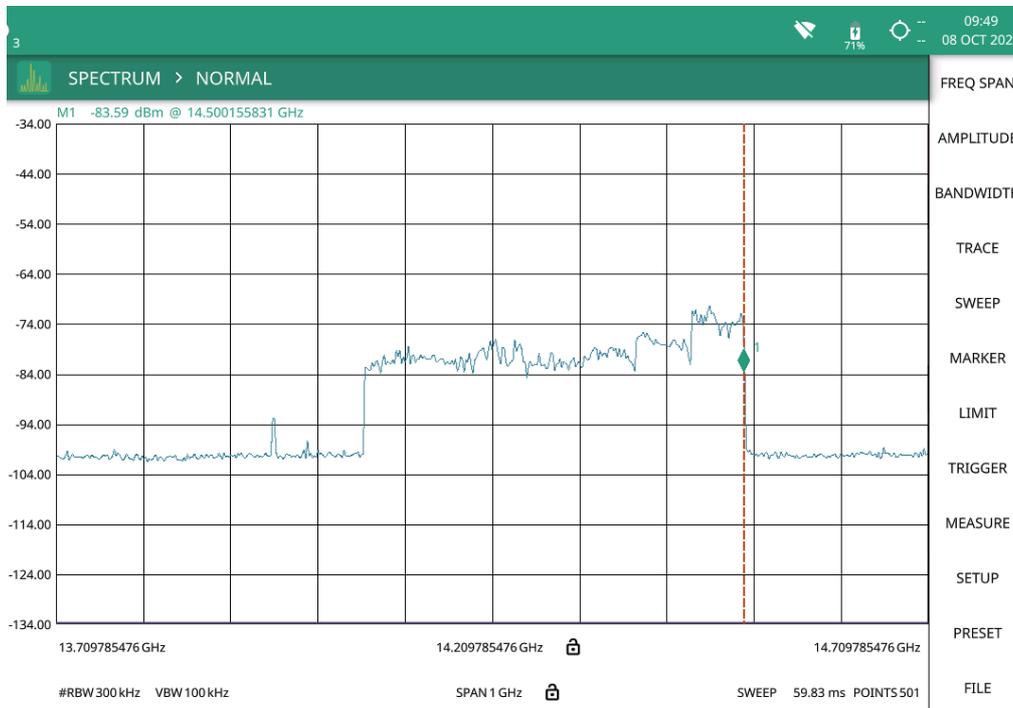


Figure 10 Spectre d'émission du système Starlink à 9h49

c) Analyse générale

La mesure exploratoire montre que le niveau mesuré maximal s'élève à 8,98 V/m à la position D₁₀₀. Cependant, les mesures présentent également une grande variabilité du niveau d'exposition, notamment entre la position S₁₀₀ par rapport aux positions A₁₀₀ et D₁₀₀. Cette variabilité s'explique par le fait que le faisceau formé par l'antenne n'est pas statique et balaye le ciel en permanence afin de suivre le satellite avec lequel elle communique. De surcroît, l'antenne peut changer de satellite avec lequel elle communique au cours d'une transmission, en atteste la vitesse conséquente à laquelle tournent les satellites Starlink [4].



Figure 11 Illustration de la vitesse de déplacement des satellites Starlink
 source : <https://satellitemap.space/>

La figure 11 représente la position des satellites à une minute d'intervalle. A T0, le satellite le plus proche de Rambouillet est le n° 2633 représenté par le cercle rouge dans le cliché de gauche. A T0 + 1 mn, ce satellite survole déjà l'Allemagne au niveau de la vallée du Rhin (cercle rouge en pointillés dans le cliché de droite). A cet instant, la desserte de Rambouillet a probablement été transférée au satellite n° 2460 (cercle jaune dans le cliché de droite), qui se trouvait approximativement à la verticale de la Vendée une minute plus tôt (cercle jaune en pointillés). Pendant les 4 mn 15 s correspondant à la mesure d'exposition, l'antenne aura ainsi suivi a priori plusieurs satellites différents : son orientation varie sans cesse.

Du point de vue de l'exposition, cela signifie que les résultats montrant les niveaux plus élevés correspondent à l'alignement du faisceau avec la sonde. Comme la position du faisceau varie constamment, la probabilité que la sonde l'intercepte est d'autant plus faible qu'elle est éloignée de l'antenne.

III. Conclusion

L'étude montre que le niveau global de l'exposition en présence du système de réception et d'émission Starlink reste très inférieur aux limites de l'exposition du public aux ondes. Aucune mesure n'a permis de constater une non-conformité en matière d'exposition.

De surcroît, la présence durable d'un obstacle en travers du faisceau généré par l'antenne interrompt la communication avec la constellation de satellites. Ceci signifie que

qu'une personne statique positionnée devant l'antenne Starlink sera très faiblement exposé aux ondes électromagnétiques. Il est toutefois préconisé d'installer l'antenne Starlink dans un environnement dégagé sans obstacle dans la direction du ciel, puisque la présence temporaire d'un obstacle interrompt le service. Il a été également montré que le spectre disponible pour la voie montante du système Starlink est utilisé de manière dynamique en fonction du temps.

Bibliographie

- [1] Starlink, «Page d'accueil,» [En ligne]. Available: <https://www.starlink.com/>.
- [2] J. Brodtkin, «Teardown of “Dishy McFlatface,” the SpaceX Starlink user terminal,» 12 Février 2021. [En ligne]. Available: <https://arstechnica.com/information-technology/2020/12/teardown-of-dishy-mcflatface-the-spacex-starlink-user-terminal/>.
- [3] Cartoradio.fr, «Rechercher Agence Nationale des Fréquences Avenue de Cerqueuse 78660 PRUNAY EN YVELINES,» [En ligne]. Available: https://www.cartoradio.fr/index.html#.
- [4] «Live Starlink Satellite and Coverage Map,» [En ligne]. Available: <https://satellitemap.space/>.