

Starlink

Starlink est un fournisseur d'accès à Internet par satellite de la société SpaceX qui s'appuie sur une constellation de satellites comportant des milliers de satellites de télécommunications placés sur une orbite terrestre basse. Starlink est le premier fournisseur d'internet par satellite à choisir cette orbite plutôt que l'orbite géostationnaire, car elle permet de diminuer la latence (le temps de réponse) en la faisant passer de 600 ms à environ 20 ms. La constellation est en cours de déploiement depuis 2019 et repose sur environ 4 700 satellites opérationnels mi décembre 2023. Fin 2023, Starlink compte environ deux millions de clients dans une cinquantaine de pays, dont la France, qui ont autorisé la société à utiliser les fréquences nécessaires au système.

Pour atteindre ses objectifs commerciaux, SpaceX prévoit de disposer vers 2025 de 12 000 satellites, chiffre qui doit être porté à terme à 42 000. Sur le plan technique, chaque satellite dispose d'une capacité de 20 gigabits par seconde et utilise la bande Ku pour les liaisons avec les terminaux des utilisateurs ainsi que la bande Ka pour les liaisons avec les stations terriennes. Le satellite, qui circule sur une orbite circulaire à une altitude d'environ 550 kilomètres, a une masse approximative de moins de 300 kilogrammes et dispose d'un moteur ionique pour atteindre et maintenir sa position sur son orbite et réduire celle-ci en fin de vie (environ six ans) afin d'être détruit par sa rentrée atmosphérique. Le terminal utilisateur repose sur une antenne réseau à commande de phase comportant un dispositif mécanique pour l'orientation en hauteur.

La viabilité économique de Starlink dépend notamment du coût de fabrication et de mise en orbite des satellites. SpaceX utilise ses lanceurs Falcon 9 pour déployer sa constellation à des coûts fortement réduits grâce à la ré-utilisabilité de ce lanceur et à la compacité des satellites, qui permet de placer en orbite 50 à 60 de ces engins à chaque lancement. Plusieurs sociétés concurrentes ont prévu de mettre en service des constellations analogues. OneWeb est la plus avancée.

Le déploiement d'une constellation de satellites aussi importante en nombre sur l'orbite basse suscite plusieurs problèmes compte tenu du fait que le nombre de satellites en orbite basse va être décuplé par la seule présence des satellites Starlink (en configuration cible à 42 000 satellites). Le risque de collisions entre satellites va augmenter dans des proportions importantes qui rendent inadéquates les dispositifs anti-collision existants. Les observations astronomiques par les grands observatoires terrestres sont gênées, aussi par la pollution lumineuse engendrée, en particulier les programmes de recensement et de suivi des objets célestes.

Contexte

Le projet Starlink de la société américaine SpaceX prévoit le lancement de 12 000 puis 42 000 minisatellites pour offrir un service Internet à haut débit partout sur la planète mais surtout destiné aux zones les moins densément peuplées qui n'ont pas d'accès à l'internet à haut débit parce que la mise en place d'un réseau terrestre (fibre optique, autre) ne peut être rentabilisée faute d'un nombre d'utilisateurs suffisants ou de son isolement par rapport aux zones densément peuplées. Selon un rapport du Congrès américain, malgré de nombreux projets ayant contribué à réduire la fracture numérique, environ 14,5 millions d'américains n'avaient pas accès en 2021 à l'internet haut débit (défini par un débit de 25 mégabits/s). Le projet Starlink se démarque aussi par un temps de latence réduit par rapport aux offres d'internet par satellite actuelles qui s'appuient sur de gros satellites placés en orbite géostationnaire. Le temps de latence envisagé se situe entre 25 et 35 ms contre les 600 ms des satellites en orbite géostationnaire, mais selon Elon Musk, il pourrait être inférieur à 20 ms, voire bien plus bas.

Selon SpaceX, le projet répond à un besoin suscité par la croissance des nouveaux usages d'internet tels que les jeux vidéo en réseau et les appels en visioconférence. Mais le projet, qui revient à multiplier par vingt le nombre de satellites opérationnels présents en orbite basse, est contesté notamment par les autres opérateurs de satellites parce qu'il peut contribuer à accroître fortement le risque de collisions. Les techniques utilisées sont déjà mises en œuvre par les constellations Iridium et Globalstar (téléphone satellitaire), LeoSat (liaison point à point), mais surtout par d'autres projets visant exactement le même objectif que Starlink, comme OneWeb. Ce dernier repose sur un nombre de satellites beaucoup plus réduit (moins de 1 000), avec une date de mise en service annoncée pour 2022.

Starlink



Logo de Starlink

Données générales

Organisation	 SpaceX
Domaine	Télécommunications
Type de mission	Internet par satellite
Constellation	12000 (phase 1)
Statut	En cours de déploiement
Lancement	2018-présent
Lanceur	Falcon 9, Starship (v2)
Site	www.starlink.com (https://www.starlink.com/)

Caractéristiques techniques

Masse au lancement	selon version entre 300 et 2000 kg/satellite
Orbite	
Orbite	Orbite terrestre basse
Altitude	9 "coques" entre 340 et 614 km
Inclinaison	33, 38,43,46,53, 70, 98, 115 et 148°

Technique	Débit liaison descendante	Débit liaison montante	Latence	Cout abonnement	Cout terminal	Limitations
ADSL	5-35 mégabits/s	1-10 mégabits/s		~ 50 \$/mois		Éloignement central téléphonique
Câble	10-500 mégabits/s	5-50 mégabits/s		~ 52 \$/mois		Population peu dense, éloignée, pergélisol
Fibre optique	250-1000 mégabits/s	250-1000 mégabits/s		~ 59 \$/mois		Population peu dense, éloignée, pergélisol
Internet par satellite (géostationnaire) Viasat	100 mégabits/s	3 mégabits/s	638 ms	~120 \$/mois	300-500 \$	Latitudes élevées, reliefs
Internet par satellite (orbite basse) Starlink	~100 mégabits/s	20 mégabits/s	30 ms	100 \$/mois	600 \$	Latitudes élevées, zones densément peuplées
Internet par satellite (orbite basse) OneWeb	200 mégabits/s	50 mégabits/s	30-60 ms			Latitudes élevées, zones densément peuplées

Plan initial

Le projet Starlink est annoncé pour la première fois par SpaceX en janvier 2015⁸. Un bâtiment consacré au projet est construit en 2016 à Redmond près de Seattle⁹. Les plans initiaux sont d'achever le déploiement de la constellation vers 2020, mais des changements dans les caractéristiques techniques retardent le calendrier¹⁰. Deux prototypes de satellites baptisés *Tintin A* et *Tintin B* sont placés en orbite en février 2018 pour valider les techniques mises en œuvre et réaliser les démonstrations exigées par les autorités réglementant les communications aux États-Unis (FCC)¹¹. La FCC donne son accord en mars 2018 pour le déploiement d'un tiers de la constellation sous réserve que les résultats des tests exigés soient satisfaisants¹².

Première constellation de 1 600 satellites

Le plan initial prévoit le déploiement de 12 000 satellites² entre 1 100 et 1 300 kilomètres d'altitude. Mais les projets de sociétés concurrentes obligent SpaceX à accélérer son projet et la société annonce à l'automne 2018 qu'elle déploie une première constellation de 1 600 satellites à une altitude plus basse (550 kilomètres). Par ailleurs, les satellites sont simplifiés pour permettre le lancement des premiers exemplaires en juin 2019. Au lieu d'émettre à la fois dans les bandes Ku et Ka, le satellite n'émet qu'en bande Ku. SpaceX doit déployer 2 200 satellites de ce type en cinq ans qui doivent servir de prototypes aux satellites suivants¹³.

Début avril 2021, plus de 1 300 satellites Starlink ont été lancés¹⁴.

Historique

2015-2017

Le projet d'internet par satellite Starlink est annoncé par la société américaine SpaceX en janvier 2015. La largeur de bande prévue est suffisante pour acheminer jusqu'à 50 % de tout le trafic de communication en réseau d'amenée et jusqu'à 10 % du trafic Internet local dans les villes à forte densité^{8,15}. Elon Musk, président-directeur général de SpaceX, déclare qu'il existe une demande non satisfaite importante de capacités à large bande à faible coût à l'échelle mondiale¹⁶.

L'inauguration d'un établissement consacré au développement des satellites Starlink à Redmond est annoncé par SpaceX en janvier 2015, pour développer et construire le nouveau réseau de communication. À l'époque, le bureau de la région de Seattle prévoit d'embaucher environ 60 ingénieurs, et peut-être 1 000 personnes au cours des années suivantes¹⁷. La société exploite 2 800 mètres carrés de locaux loués à la fin de 2016 et, en janvier 2017, elle a acquis une deuxième installation de 3 800 mètres carrés, toutes deux à Redmond¹⁸. En août 2018, SpaceX regroupe toutes ses activités de la région de Seattle et déménage dans une installation plus grande de trois bâtiments au Redmond Ridge Corporate Center pour soutenir la fabrication de satellites en plus des activités de recherche et développement¹⁹.

En janvier 2016, la société annonce publiquement son intention de faire voler deux prototypes de satellites en 2016²⁰ et de mettre la constellation de satellites initiale en orbite et opérationnelle vers 2020¹⁵. En octobre 2016, SpaceX développe les premiers satellites qu'elle espère lancer et tester en 2017, mais la division satellite se concentre sur un défi commercial important : parvenir à une conception suffisamment économique pour l'équipement utilisateur, visant quelque chose qui puisse être installé facilement dans les locaux de l'utilisateur final pour environ 200 dollars. Dans l'ensemble, Gwynne Shotwell, directrice générale de SpaceX, déclare à l'époque que le projet en est encore à la « phase de conception, alors que l'entreprise cherche à résoudre les problèmes liés au coût des terminaux pour les utilisateurs »²¹. Le déploiement, s'il est effectué, n'a lieu qu'« à la fin de cette décennie ou au début de la suivante »¹⁶. Les deux satellites d'essai d'origine ne sont pas mis à l'essai et ne sont utilisés qu'au sol. Le lancement prévu de deux satellites révisés est reporté à 2018¹⁰.

En juillet 2016, SpaceX acquiert un espace créatif de 740 mètres carrés à Irvine, dans l'agglomération de Los Angeles²². Les offres d'emploi de SpaceX indiquent que le bureau de Irvine inclut le traitement du signal, le circuit intégré de radiofréquence et le développement d'un circuit intégré propre à une application pour le programme satellite²³.

En novembre 2016, SpaceX dépose auprès de la Commission fédérale des communications (FCC) une demande pour un « système satellitaire en orbite non géostationnaire (NGSO) dans le service fixe par satellite utilisant les bandes de fréquences Ku et Ka »²⁴. En mars 2017, SpaceX dépose auprès de la FCC des plans pour la mise en service d'un deuxième ensemble de plus de 7 500 « satellites en bande V sur orbites non géosynchrones pour fournir des services de communications » dans une bande du spectre électromagnétique qui n'est pas encore très utilisée par les services de communications commerciaux. Appelée « constellation de l'orbite terrestre basse en bande V (VLEO) »²⁵, elle comprend 7 518 satellites en orbite à seulement 340 kilomètres d'altitude²⁶, tandis que le petit groupe initialement prévu de 4 425 satellites fonctionne dans les bandes Ka et Ku et en orbite à 1 200 kilomètres^{25,26}. L'architecture technique de la constellation de SpaceX présente deux caractéristiques originales : l'utilisation de la bande V du spectre des communications, peu utilisée, et le choix d'une orbite terrestre très basse d'environ 340 km d'altitude, où la traînée atmosphérique est assez élevée, ce qui entraîne de courtes durées de vie en orbite²⁷. SpaceX n'a pas rendu publique la technologie de vol spatial spécifique qu'elle a l'intention d'utiliser pour faire face à l'environnement à forte traînée

de VLEO. Le plan de mars 2017 prévoit que SpaceX lance les premiers prototypes utilisant les bandes Ka/Ku en 2017 et 2018, et commence à placer en orbite les satellites opérationnels en 2019. Il est prévu que la constellation de 4 425 satellites à basse altitude de 1 110 km à 1 325 km soit entièrement déployée d'ici 2024²⁸.

En 2015-2017, une controverse éclate avec la FCC au sujet de l'octroi de licences d'utilisation du spectre des communications par les futures constellations de satellites géantes dont le représentant le plus avancé est Starlink. La réglementation en matière d'octroi de licence d'utilisation du spectre impose traditionnellement à l'opérateur de satellites de « lancer un seul engin spatial pour respecter la date limite de mise en service [du régulateur]. Cette règle permet à un opérateur de bloquer l'utilisation de fréquences radio précieuses pendant des années sans déployer sa flotte »²⁹. En 2017, l'autorité de régulation américaine modifie cette règle et fixe un délai maximum de six ans pour le déploiement complet d'une constellation géante. L'organisation intergouvernementale technique de coordination, l'Union internationale des télécommunications, propose à la mi-2017 une ligne directrice qui est beaucoup moins restrictive. En septembre 2017, Boeing et SpaceX demandent à la FCC une dérogation à la règle des six ans²⁹, mais celle-ci n'est finalement pas accordée. En 2019, la FCC assouplit sa position : la moitié de la constellation doit être en orbite au bout de six ans et le système complet doit être déployé au bout de neuf ans³⁰.

SpaceX dépose le nom *Starlink* pour son réseau à large bande par satellites en 2017³¹. L'entreprise dépose des documents à la fin de 2017 auprès de la FCC américaine pour clarifier son plan de réduction des débris spatiaux. La société prévoit une désorbitation contrôlée des satellites à la fin de leur durée de vie utile (environ cinq à sept ans) à un rythme beaucoup plus rapide que ne l'exigent les normes internationales. Les satellites seront désorbités en réduisant leur orbite à l'aide de leur propulsion, de manière qu'ils pénètrent dans l'atmosphère terrestre dans l'année qui suit la fin de leur mission³². En mars 2018, la FCC donne son accord au déploiement de la constellation de SpaceX sous certaines conditions. SpaceX doit obtenir une approbation distincte de l'Union internationale des télécommunications (UIT)^{33,34}. La FCC appuie la demande de la NASA de demander à SpaceX d'atteindre un niveau de fiabilité de désorbitation encore plus élevé que la norme que la NASA utilise auparavant pour elle-même : désorbiter de façon fiable 90 % des satellites une fois leurs missions terminées³⁵.

2018-2019

En mai 2018, SpaceX actualise le coût total du développement et de la construction de la constellation, qui est chiffré à dix milliards de dollars. Au milieu de l'année 2018, SpaceX réorganise la division de développement de satellites à Redmond et licencie plusieurs membres de la haute direction¹⁹. En novembre 2018, SpaceX reçoit l'accord des autorités réglementaires américaines pour déployer 7 518 nouveaux satellites à large bande, en plus des 4 425 approuvés précédemment. Ces premiers satellites de SpaceX sont demandés dans les documents réglementaires de 2016 pour être mis en orbite à des altitudes de 1 110 à 1 325 km, bien au-dessus de la Station spatiale internationale. La nouvelle autorisation porte sur l'ajout d'une constellation NGSO (orbite non géostationnaire de satellites) en orbite terrestre très basse, à des altitudes comprises entre 335 et 346 km, sous la Station spatiale internationale¹⁹. Toujours en novembre, SpaceX dépose de nouveaux documents réglementaires auprès de la FCC pour demander la possibilité de modifier sa licence précédemment accordée afin d'exploiter environ 1 600 des 4 425 satellites en bande Ka et Ku dont l'exploitation est approuvée à 1 150 km dans une « nouvelle couche inférieure de la constellation » à seulement 550 km d'altitude. Ces satellites fonctionnent effectivement sur une troisième orbite, une orbite de 550 km, tandis que les orbites supérieures et inférieures à ~1 200 km et ~340 km ne sont utilisées que plus tard, une fois qu'un déploiement considérablement plus important de satellites est possible dans les dernières années du processus de déploiement. La FCC approuve la demande en avril 2019, approuvant le placement de près de 12 000 satellites dans trois coquilles orbitales : d'abord environ 1 600 dans une coquille de 550 kilomètres d'altitude^{36,37}, puis environ 2 800 en bandes Ku et Ka à 1 150 km, et environ 7 500 en bande V à 340 km³⁰.

Les plans de plusieurs fournisseurs visent à construire des mégaconstellations commerciales de milliers de satellites dans l'espace. Internet étant de plus en plus susceptible de devenir réalité, l'armée américaine commence à effectuer des études d'essais en 2018 pour évaluer comment les réseaux peuvent être utilisés. En décembre 2018, la US Air Force émet un contrat de 28 millions de dollars pour des services d'essais spécifiques sur Starlink³⁸.

En avril 2019, SpaceX passe de la phase de recherche et développement à celle la fabrication de ses satellites, prévoyant le premier lancement d'un important lot de satellites en orbite l'atteinte d'un taux de lancement moyen de « 44 satellites spatiaux à hautes performances et à faible coût construits et lancés chaque mois pendant les 60 prochains mois » afin de lancer les 2 200 satellites nécessaires à la conservation de la plage de fréquences attribuée par la Commission fédérale des communications³⁹. SpaceX se donne comme objectif de déployer en orbite la moitié de la constellation dans les six ans et, suivant l'autorisation, le système complet au bout de neuf ans³⁰.

Déploiement de la constellation de satellites (2019-)

Après le lancement des deux prototypes en 2018, le premier déploiement massif de 60 satellites est effectué en mai 2019 par un lanceur unique Falcon 9 bloc 5 qui, malgré sa charge utile d'une masse totale de 13 620 kg (sans compter les adaptateurs et les mécanismes de déploiement), dispose de suffisamment d'ergols pour permettre l'atterrissage et la réutilisation du premier étage. Ces satellites font partie d'une sous-série (bloc V0.9) qui ne sont pas opérationnels car ils ne disposent pas des émetteurs en bande Ka. Ils doivent permettre d'identifier les problèmes de conception résiduels en vérifiant les procédures de déploiement et de désorbitage ainsi que le fonctionnement opérationnel. Les premiers satellites opérationnels (V 1.0) sont placés en orbite 6 mois plus tard en novembre 2019 et font partie de la première phase du déploiement de la constellation Starlink, qui porte sur 1 584 satellites qui doivent être placés sur une orbite de 550 kilomètres avec une inclinaison orbitale de 53°. Les satellites de cette première vague sont répartis sur 40 plans orbitaux différents dans lesquels circulent 66 satellites. Le déploiement des satellites de cette phase nécessite l'utilisation de 24 lanceurs Falcon 9^{40,41}. Pour qu'un service minimal puisse débuter il faut qu'au moins 420 satellites soient placés en orbite⁴². Ce chiffre est atteint au cours de l'année 2020. Le deuxième lancement des satellites opérationnels comprend un exemplaire baptisé *DarkSat*, qui a été modifié pour réduire l'impact sur les observations astronomiques. Cette variante n'est pas retenue et une autre solution est mise au point, la version *VisorSat*, reposant sur des pare-soleil déployables en orbite dont les premiers exemplaires sont lancés en mai 2020. Alors que tous les satellites sont placés sur une orbite caractérisée par l'inclinaison orbitale de 53°, environ 70 satellites sont placés sur une orbite polaire (98° et 70°) au cours de l'année 2021, pour permettre une couverture des latitudes septentrionales. À compter de septembre 2021, une nouvelle version (1.5) du satellite est déployée. Celle-ci comprend des équipements permettant des liaisons inter-satellites simultanées avec quatre autres satellites Starlink. Du fait de l'alourdissement du satellite, le nombre emporté à chaque lancement passe de 60 à 53⁴³.

Mi-mai 2022, SpaceX a lancé 2 600 satellites, dont 2 350 sont encore en orbite et 2 320 sont opérationnels. Cette flotte représente plus du tiers des quelque 6 000 satellites en orbite terrestre à cette date et les deux tiers des satellites américains⁴⁴.



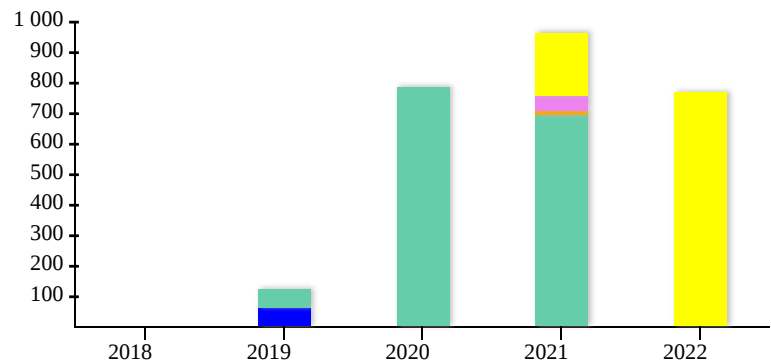
Lancement par une fusée SpaceX des 60 premiers satellites Starlink opérationnels en novembre 2019.

Le taux de panne de satellites semble plus élevé que prévu. Au printemps 2021, alors que Starlink se félicite d'un taux de perte inférieur à 5 %, celui-ci dépasse en réalité 9 %, ce avant la perte de 40 des 49 satellites lancés le 3 février 2020 à cause d'un orage magnétique le lendemain, dû à une éruption solaire^{45,46}.



Largage dans l'espace des 60 satellites de la mégaconstellation Starlink de SpaceX en mai 2019.

Nombre de satellites lancés par type et année (mise à jour 27 juin 2022)⁴⁷



- Prototypes (2018)
- v 0.9
- v 1.0
- v 1.0 polaire 97,6°
- v 1.0 polaire 70°
- v 1.5

Historique des lancements des satellites Starlink

Numéro	Mission	Date et heure (UTC)	Site de lancement	Lanceur	Altitude	Inclinaison	Nombre de satellites	Version	Résultat du lancement
0	Tintin	22 février 2018, 14:17 ^{48, 49}	Vandenberg, SLC-4E	F9 FT Δ B1038.2 ⁵⁰	372-384 km ⁵¹	97.4° ⁵¹	2	–	Succès
		Deux prototypes de satellites conçus sous les noms de <i>Tintin A</i> et <i>B</i> ⁵² (MicroSat-2a and 2b) qui ont été déployés en parallèle du satellite Paz. Masse de 400kg ⁵³ .							
1	v0.9	24 mai 2019, 02:30 ⁵⁴	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ B1049.3 ⁵⁰	376-530 km ^{55, 56}	53.0° ⁵⁵	60 ^{57, 58}	v0.9	Succès
		Premier lancement de 60 prototypes de satellites version 0.9. Annoncés comme la version de production ⁵⁹ , ils ont pour objectif de tester les différents aspects de la constellation ainsi que la désorbitation. Ils ne sont pas équipés de la liaison inter satellites et communiquent seulement avec les stations terrestres. Masse unitaire de 227 kg ⁶⁰ . Un satellite a déjà été désorbité ⁶¹ . Les satellites sont probablement en cours de désorbitation ⁵⁹ .							
2	v1.0 L1	11 novembre 2019, 14:56 ⁶²	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ B1048.4	387-567 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60 ⁶³	v1.0	Succès
		Premier lancement de 60 satellites opérationnels (v1.0) ⁶⁴ , premiers à être équipés des émetteurs en bande Ka et de la liaison optique inter satellites ^{65, 66} .							
3	v1.0 L2	7 janvier 2020, 02:19 ⁶⁷	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ B1049.4	548-551 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60	v1.0	Succès
		Un des satellites, surnommé <i>DarkSat</i> ⁶⁸ , bénéficie d'un revêtement expérimental pour le rendre moins réfléchissant et réduire sa perturbation de l'observation astronomique ^{69, 70} . Au vu des observations, ce revêtement le rend 55 % moins visible, mais ce n'est vraisemblablement pas suffisant pour satisfaire la communauté astronomique ⁷¹ .							
4	v1.0 L3	29 janvier 2020, 14:06 ⁷²	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ B1051.3	307-551 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60	v1.0	Succès
5	v1.0 L4	17 février 2020, 15:05 ⁷³	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ B1056.4	380-558 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60	v1.0	Succès
6	v1.0 L5	18 mars 2020, 12:16:39 ⁷⁴	KSC, LC-39A	F9 Block 5 Δ B1048.5	370-571 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60	v1.0	Succès
		Nouveau plan de vol permettant de séparer les satellites à T+15 minutes (contre + 1 heure auparavant). Le premier étage effectuant son 5 ^e vol ne parvient pas à se poser sur la barge <i>Of Course I Still Love You</i> .							
7	v1.0 L6	22 avril 2020, 19:30:30 ⁷⁵	KSC, LC-39A	F9 Block 5 Δ B1051.4	380-535 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60	v1.0	Succès
8	v1.0 L7	4 juin 2020, 01:25:00 ⁷⁶	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ B1049.5	216-352 km ⁵⁵	53.0° ⁵⁵	60	v1.0	Succès
		Un satellite est équipé d'un pare-soleil (VisorSat) ⁷⁷ .							
9	v1.0 L8	12 juin 2020 ⁷⁸	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5 Δ	550 km	53.0°	58	v1.0	Succès
		Un des satellites est équipé d'un pare-soleil (VisorSat) ⁷⁷ . De plus, trois satellites d'observation terrestre SkySat 16, 17 et 18 de la société Planet Labs sont lancés en même temps ⁷⁹ .							
10	v1.0 L9	7 août 2020 ⁷⁸	KSC, LC-39A	F9 Block 5 Δ	550 km	53.0°	57	v1.0	Succès
		Deux satellites d'observation terrestre de Blacksky sont lancés en même temps.							
11	v1.0 L10	18 août 2020	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5	550 km	53.0°	58	v1.0	Succès
12	v1.0 L11	3 septembre 2020	Cap Canaveral, LC-39A	F9 Block 5	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
13	v1.0 L12	6 octobre 2020	Cap Canaveral, LC-39A	F9 Block 5	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
14	v1.0 L13	18 octobre 2020	Cap Canaveral, LC-39A	F9 Block 5	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
15	v1.0 L14	24 octobre 2020	Cap Canaveral, SLC-40	F9 Block 5	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès

16	v1.0 L15	25 novembre 2020	Cap Canaveral SLC-40	F9 Block 5	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
17	v1.0 L16	20 janvier 2021	Cap Canaveral LC-39A	F9 Block 5	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
-	v1.0 Tr-1	24 janvier 2021, 15:00 ⁸⁰	<u>Cap Canaveral, SLC-40</u>	F9 Block 5 Δ B1058.5 ⁸¹	560 km	97.5°	10	v1.0	Succès
Premier lancement de satellites de production pour l'orbite polaire, lancés lors de la mission Transporter-1 ⁸² .									
18	v1.0 L18	4 février 2021, 06:19 ⁸³	<u>Cap Canaveral, SLC-40</u>	F9 Block 5 Δ B1060.5 ⁵⁰	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
19	v1.0 L19	16 février 2021, 03:59 ⁸⁴	<u>Cap Canaveral, SLC-40</u>	F9 Block 5 Δ B1059.6 ⁵⁰	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
SpaceX a perdu le booster de la Falcon 9 dans l'océan ⁸⁴ .									
20	v1.0 L17	4 mars 2021, 08:24 ⁸⁵	<u>KSC, LC-39A</u>	F9 Block 5 Δ B1049.8 ⁵⁰	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
21	v1.0 L20	11 mars 2021, 08:13 ⁸⁶	<u>Cap Canaveral, SLC-40</u>	F9 Block 5 Δ B1058.6 ⁵⁰	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
22	v1.0 L21	14 mars 2021, 10:01 ⁸⁷	<u>KSC, LC-39A</u>	F9 Block 5 Δ B1051.9 ⁵⁰	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès
23	v1.0 L22	24 mars 2021, 08:28 ⁸⁸	<u>Cap Canaveral, SLC-40</u>	F9 Block 5 Δ B1060.6 ⁵⁰	550 km	53.0°	60	v1.0	Succès

Réalisation de l'infrastructure terrestre

Le système Starlink repose sur un réseau de stations terriennes qui assurent la liaison entre les satellites et le réseau internet. En fonctionnement standard (sans recours aux liaisons inter-satellites), un satellite ne peut jouer son rôle que s'il peut communiquer avec une station terrienne qui lui permet d'être connecté au réseau internet. Cela implique de construire dans les régions desservies des stations terriennes espacées régulièrement. Toutefois, la desserte d'un pays est conditionnée à l'autorisation d'utilisation des fréquences par ses autorités réglementaires. Des considérations politiques peuvent également entrer en jeu. Les pays hostiles aux États-Unis (ex. : Chine, Russie) ou ceux qui veulent disposer d'un contrôle total de l'information accessible au public (ex. : Chine) s'opposent à la mise en œuvre de Starlink sur leur territoire national. Par ailleurs, compte tenu de l'investissement nécessaire, Starlink privilégie les pays où est présente une clientèle suffisamment importante disposant des moyens financiers impliqués.

L'implantation des stations terriennes suit l'ouverture des pays au service Starlink (certains pays de taille modeste peuvent être desservis mais ne pas disposer de stations terriennes). En juin 2022 les pays hébergeant des stations terriennes opérationnelles étaient les États-Unis, le Canada (4), le Royaume-Uni (6), l'Espagne (4), l'Italie (3), l'Allemagne (2), l'Irlande (2), le Portugal (1), la France (1), la Pologne (1), la Lituanie (1), la Turquie (1), le Nigéria (1), l'Arabie Saoudite (1), le Japon (1), l'Australie (~15), la Nouvelle-Zélande (5), le Brésil (12), l'Argentine (1) et le Chili (6)⁸⁹.

Commercialisation de Starlink

Phase pilote

En octobre 2020, le service internet est ouvert à un nombre restreint d'utilisateurs pendant une phase pilote. Ces tests sont limités temporairement aux utilisateurs situés au nord des États-Unis, qui bénéficient d'une meilleure couverture (le nombre de satellites survolant une zone augmente avec la latitude). SpaceX commercialise l'équipement (antenne, routeur et trépied supportant l'antenne) pour 499 US\$ et facture le service internet 99 US\$ par mois⁹⁰. D'un point de vue réglementaire, Starlink dispose depuis février 2021 d'un numéro ASN, ce qui en fait officiellement un fournisseur d'accès à Internet⁹¹.

Évolution du nombre d'utilisateurs

En juin 2022, alors qu'environ 2 000 satellites sont déployés, 500 000 clients sont abonnés au service fourni par Starlink, selon les chiffres communiqués par SpaceX. Toutefois, la majeure partie des clients étant concentrée dans les zones peuplées de quelques pays essentiellement occidentaux (États-Unis, Canada, Europe occidentale, Australie, Nouvelle-Zélande, Brésil, Chili), seule 10 % de la bande passante est utilisée. Par ailleurs, les États-Unis, qui concentrent une grande partie des utilisateurs, ne sont survolés en moyenne à un instant donné que par 2 % des satellites (donc environ 40 satellites en juin 2022), ce qui limite la capacité pour cette région du monde⁹².

Déploiement en France

L'autorité de régulation des télécommunications française, l'Arcep, chargée de coordonner les besoins de bande passante radio entre les différents utilisateurs, autorise initialement en février 2021 l'utilisation sur le sol français des fréquences mises en œuvre par le système Starlink. En avril 2022, à la suite d'un recours devant le Conseil d'État par les associations environnementales Priartem et Agir pour l'environnement, Starlink perd ses autorisations de fréquence allouées un an auparavant. Le Conseil d'état suspend cette attribution au motif qu'aucune consultation publique n'a précédé l'attribution des deux bandes de

fréquence⁹³. En juin 2022 les autorisations de fréquence sont accordées par l'Arcep après la mise en place de la consultation publique exigée⁹⁴. L'ARCEP donne à la même date son feu vert pour la construction d'une station terrienne assurant la passerelle entre les satellites et le réseau internet sur le territoire de la commune de Carros dans les Alpes-Maritimes⁹⁵. Deux autres projets de stations terriennes qui devaient être construites dans la Manche (Saint-Senier-de-Beuvron) et dans le Nord (Gravelines) ont été abandonnés à la suite, dans le premier cas, du rejet de la population par « peur des ondes électromagnétiques »⁹⁶. En juin 2022, la seule station terrienne opérationnelle en France métropolitaine est installée dans la banlieue de Bordeaux à Villenave-d'Omon.

En septembre 2022, Starlink lance une offre à destination des PME. Elle propose des antennes qui garantissent des débits de données plus élevées et de meilleures performances « dans des conditions météorologiques extrêmes », dont des débit de données en téléchargement « de 100 à 350 Mbit/s » (contre 50 à 200 Mbit/s pour les particuliers) et « une latence de 20 à 40 ms », sans limitation de consommation de données^{6,97}.

En décembre 2022, Starlink comptait 10 000 abonnés en France⁹⁸.

Soutien à l'Ukraine dans le cadre du conflit russo-ukrainien

En 2022, au début de l'invasion de l'Ukraine, l'entreprise y envoie des milliers de ses terminaux afin que les Ukrainiens aient accès à Internet sans dépendre du réseau terrestre⁹⁹. Le 4 avril 2022, Elon Musk affirme que 150 000 utilisateurs ukrainiens ont accès au réseau Starlink.

Caractéristiques techniques

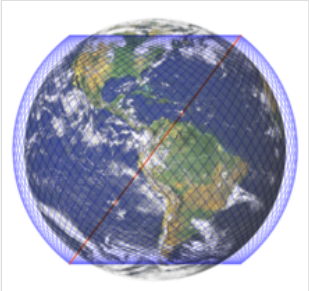
Principes de fonctionnement de l'internet par satellite

L'internet par satellite utilise des satellites de télécommunications pour mettre en relation l'utilisateur et le réseau internet. Il permet d'accéder à internet depuis un lieu non desservi par les réseaux terrestres (y compris en mer, dans le désert, en rase campagne) ou ne disposant que d'un débit réduit du fait de l'absence de fibre optique ou de l'éloignement des centraux de télécommunications. Les fournisseurs d'accès internet par satellite existants, tels que Viasat ou Hughes Network Systems, utilisent actuellement des satellites positionnés en orbite géostationnaire. Ces satellites présentent l'avantage de pouvoir desservir pratiquement un tiers de l'hémisphère en restant en permanence au-dessus de la même région (leur vitesse orbitale est identique à la vitesse de rotation de la Terre et ils sont en orbite au-dessus de l'équateur). Un seul satellite est suffisant pour desservir l'ensemble de la zone avec comme seule limite le nombre d'utilisateurs utilisant le service de manière simultanée. Par ailleurs les faisceaux d'ondes peuvent être concentrés sur les régions où se situent les utilisateurs potentiels. Toutefois, l'utilisation de l'orbite géostationnaire présente également des inconvénients. Le principal découle de l'altitude du satellite (36 000 km), qui entraîne un délai notable dans la circulation des signaux car ceux-ci doivent faire l'aller-retour entre la station au sol et le satellite puis entre celui-ci et le terminal de l'utilisateur du service internet. Le temps de latence, qui peut atteindre 600 millisecondes, dégrade de manière significative la réactivité lors d'appels vidéo (visioconférence) ou de l'utilisation des jeux en ligne. Par ailleurs les régions polaires ne peuvent être desservies car les ondes sont obligées de traverser une large couche atmosphérique¹⁰⁰.

Constellation en orbite basse

SpaceX choisit d'abaisser fortement l'altitude des satellites servant de relais pour diminuer le temps de latence. Une altitude basse présente toutefois deux inconvénients. Le satellite n'est plus fixe au-dessus d'une zone mais défile rapidement et il n'est visible que depuis une région beaucoup plus limitée de la surface de la Terre. Pour assurer une couverture planétaire, la constellation Starlink est constituée d'une première flotte de 4 425 satellites. La liaison internet d'un utilisateur donné est assurée par une succession de satellites défilant à une fréquence élevée. Pour assurer la coordination rendue nécessaire par ce défilement, les satellites communiqueront entre eux par liaison laser¹⁰⁰.

Selon les plans initiaux, les satellites devaient être déployés à une altitude comprise entre 1 150 et 1 325 kilomètres. Chaque satellite est visible depuis le sol dans un rayon de 1 060 km sous une élévation (hauteur) d'au minimum 40°. Une fois cette constellation en place, SpaceX prévoit de lancer environ 7 518 satellites sur une orbite plus basse (340 kilomètres) pour garantir un débit élevé en accroissant la capacité du système et pouvoir entrer en compétition avec les services assurés par des réseaux terrestres¹⁰⁰. SpaceX a révisé ces plans en avril 2020 et tous ses satellites sont lancés sur une orbite dont l'altitude est comprise entre 540 et 570 kilomètres¹⁰¹.



Orbite des 1 584 premiers satellites répartis sur 72 plans orbitaux.

Orbites des 4 425 premiers satellites de première génération selon la demande déposée auprès des autorités réglementaires américaines (FCC) le 17 avril 2020¹⁰¹.

Désignation	Altitude	Inclinaison	Nbre plans orbitaux	Nbre satellites par plan orbital	Nombre total de satellites	Commentaire
Groupe 1	550 km	53°	72	22	1584	
Groupe 2	570 km	70°	36	20	720	
Groupe 3	560 km	97,6°	6	58	348	
Groupe 4	540 km	53,2°	72	22	1584	
	560 km	97,6°	4	43	172	

À l'issue de la phase 1 du déploiement, la constellation Starlink comprendra 12 000 satellites¹⁰², 2 800 satellites émettant dans les bandes Ku et Ka doivent circuler à une altitude de 1 150 km, et environ 7 500 satellites émettant en bande V sont placés à une altitude de 340 miles (environ 550 km). La bande V (de 40 à 75 GHz), qui est située immédiatement après la bande Ka (de 12 à 40 GHz), n'a jusque-là pas été utilisée par les satellites de télécommunications, et son usage est donc expérimental. Cette gamme de fréquence est considérée comme prometteuse car elle permet de très grands débits, mais elle est sensible aux fluctuations météorologiques (pluie, mauvais temps), ce qui impose des solutions de contournement³⁰.

Désignation	Altitude	Inclinaison	Nbre plans orbitaux	Nbre satellites par plan orbital	Nombre total de satellites	Commentaire
	340 km	53°	48	110	5 280	
	345 km	46°	48	110	5 280	
	350 km	38°	48	110	5 280	
	360 km	96,9°	30	120	3 600	
Groupe 6	525 km	53°	28	120	3 360	
Groupe 5	530 km	43°	28	120	3 360	
	535 km	33°	28	120	3 360	
	604 km	148°	12	12	144	
	614 km	115,7°	18	18	324	

Caractéristiques des satellites

Caractéristiques générales

Les deux premiers prototypes lancés en février 2018 ont une taille de $1,1 \times 0,7 \times 0,7$ mètre et comprennent deux panneaux solaires de 2×8 mètres déployés en orbite. Les satellites déployés en mai 2019, qui sont toujours des prototypes et qui ne disposent pas de liaison intersatellites, ont une masse de 227 kilogrammes. La plate-forme est équipée de propulseurs à effet Hall (moteurs qui utilisent l'énergie fournie par les panneaux solaires) qui produisent leur poussée en expulsant du krypton. Ce gaz remplace le xénon habituellement utilisé sans doute car il est moins coûteux, au prix d'un rendement plus faible (l'atome de krypton est moins lourd). Ces propulseurs sont utilisés pour placer le satellite, qui est largué à une altitude de 440 km, sur son orbite opérationnelle (550 km), pour maintenir l'orientation du satellite durant sa vie opérationnelle, et pour abaisser l'orbite en fin de vie afin d'accélérer la rentrée atmosphérique et ne pas encombrer l'orbite basse.

La charge utile comprend des antennes réseau à commande de phase plates chargées des liaisons montantes et descendantes avec les utilisateurs finaux fonctionnant en bande Ku (10,7-12,7 GHz pour la liaison descendante et 14-14,5 GHz pour la liaison montante) et deux antennes orientables assurant la liaison avec deux stations terriennes en bande Ka ^{104,105,106}.

Prototypes

Plusieurs prototypes des satellites Starlink ont été lancés avant le déploiement des versions opérationnelles :

- deux prototypes, *Tintin A* et *B* (également désignés par *MicroSat 2a* et *2b*), sont lancés le 22 février 2018 pour tester dans l'espace la plateforme et les sous-systèmes associés ainsi que l'antenne réseau à commande de phase prévue à l'époque pour les satellites qui devaient être placés sur une orbite haute non géostationnaire³³ ;
- soixante satellites pré-opérationnels (version 0.9) ne disposant pas d'émetteurs en bande Ka sont lancés par une seule fusée Falcon 9 V1.2 en mai 2019. Ce lancement permet de vérifier le système de largage complètement passif (ne reposant sur aucun système de déploiement mécanique)¹⁰⁷.

Premières versions opérationnelles : les *Starlink V1* et *V1.5*

Les premières versions opérationnelles sont la version 1.0 et sa variante 1.5 qui apporte la liaison intersatellite.

Le premier lancement de satellites opérationnels (version 1.0) comprenant les émetteurs en bande Ka a lieu en novembre 2019. Le deuxième lancement, qui a lieu en janvier 2020, emporte des satellites légèrement modifiés (version *Darksat*) pour réduire la réflexion du Soleil sur le corps de l'engin spatial, qui perturbe les observations effectuées par les observatoires astronomiques au sol. L'équipement employé pour atteindre cet objectif est remplacé par un pare-soleil déployé en orbite (version *VisorSat*) qui est testé par un prototype lancé en mai 2020¹⁰⁸.

Les trois premiers satellites équipés d'une liaison inter-satellites (version 1.5) sont lancés en juin 2021. Ils emportent chacun quatre systèmes de communication laser pouvant être pointés de manière indépendante vers d'autres satellites jusqu'à une distance de 5 000 kilomètres. Ceux-ci permettent des liaisons à haut débit qui contribuent à réduire la latence. Deux de ces équipements sont pointés vers des satellites situés dans le même plan orbital tandis que les deux autres établissent des liaisons avec des satellites circulant sur des plans orbitaux adjacents. À compter de septembre 2020, tous les satellites mis en orbite disposent de cet équipement. Les équipements optiques alourdissent la masse

Starlink Satellite de télécommunications	
	
Données générales	
Organisation	SpaceX
Constructeur	SpaceX
Domaine	Internet par satellite
Nombre d'exemplaires	Tintin : 2 v0.9 : 60 v1.0 : 2000 v1.5 : ~500 mini v2 : 21 v2.0 : 0
Constellation	oui
Statut	en cours de déploiement
Lancement	2019-
Lanceur	Falcon 9 block 5
Durée	6 ans
Site	www.starlink.com (https://www.starlink.com/)
Caractéristiques techniques	
Masse au lancement	v0.9 : ~227 kg v1.0 : ~260 kg v1.5 : ~305 kg mini v2 : 750-830 kg v2 : 1 250–2 000 kg
Propulsion	Propulseurs à effet Hall
Ergols	v1.0 et 1.5 : Krypton mini v2 : Argon
Contrôle d'attitude	stabilisé 3 axes
Source d'énergie	Panneaux solaires
Orbite	
Orbite	orbite basse non polaire et polaire
Altitude	Entre 540 km et 570 km
Inclinaison	53°, 53,2°, 70°, 97,6°;
Charge utile	

du satellite, qui atteint sans doute 290 kilogrammes, malgré l'abandon du pare-soleil au profit d'un revêtement réduisant la réflexion du rayonnement solaire sur le corps des satellites. En conséquence, le nombre de satellites lancés par la fusée Falcon 9 passe de 60 à 53^{109,110}.

Charge utile

Répéteurs en bande Ka,
Ku , V (mini V2)
Liaison optique inter-
satellites (v1.5)

Les Starlink mini V2 (2023-)

Pour augmenter la bande passante totale par satellite, SpaceX développe une deuxième version de ses satellites, nommée *Starlink V2*), beaucoup plus lourds (entre 1 250 et 2 000 kilogrammes). Leurs dimensions ($6,4 \times 2,7$ mètres) sont conçues pour la coiffe du lanceur super-lourd Starship et de ce fait ils ne tiennent pas sous la coiffe de la fusée Falcon 9. Cette nouvelle version du satellite est annoncée en mai 2020, alors que le développement de la fusée Starship est encore peu avancé. Le premier vol du Starship prenant du retard, une version de taille réduite de ces satellites, compatible avec la coiffe de la Falcon 9, est rendue publique en août 2022. Baptisé *Starlink mini V2*, le satellite a une masse estimée comprise entre 750 et 830 kilogrammes, aussi la Falcon 9 ne peut en placer en orbite qu'une vingtaine d'exemplaires. Les mini-V2 auraient une bande passante quatre fois plus importante que les V1.5. Les 21 premiers exemplaires sont placés en orbite le 27 février 2023^{111,103}.

Peu d'informations officielles sont disponibles sur les caractéristiques des *Starlink mini V2*. La masse est comprise entre 750 et 830 kilogrammes (305 kg pour la V1.5) et les dimensions de la plateforme sont de $4,1 \times 2,7$ mètres. L'envergure du satellite, une fois les panneaux solaires déployés, est de 30 mètres. Chacun des deux panneaux solaires mesure $12,8 \times 4,1$ mètres et leur superficie totale est de 120 m^2 , contre 30 m^2 pour la version précédente. La forte augmentation potentielle de la magnitude apparente vue de la Terre inquiète beaucoup la communauté des astronomes. SpaceX utilise, comme sur la version précédente, des moteurs électriques à effet Hall, mais a remplacé l'ergol. Le krypton est remplacé par de l'argon, beaucoup moins cher (1 à 20 US\$ le kilogramme). Le choix de l'argon pourrait également être lié aux risques qui pèsent sur l'approvisionnement en krypton, qui est extrait principalement en Ukraine. La masse atomique de l'argon, plus élevée, implique de produire plus d'énergie (panneaux solaires de plus grande surface), mais les moteurs ont une poussée 2,4 fois supérieure et une impulsion spécifique 1,5 fois supérieure. Les télécommunications des *Starlink mini V2* sont assurées en bande Ku et Ka comme dans la génération précédente, auxquelles s'ajoute la bande E (de 71 à 79 GHz et de 81 à 86 GHz)^{111,103}.

Futurs satellites lourds Starlink V2

Le déploiement des futurs satellites Starlink V2 n'est possible qu'avec la fusée Starship du fait de leurs dimensions : le bus aurait une section de $6,4 \times 2,7$ mètres. Leur masse serait comprise entre 1 250 et 2 000 kilogrammes. La superficie totale du satellite, une fois les deux panneaux solaires déployés, serait de 294 m^2 . Les dimensions de chaque panneau solaire seraient de $12,7 \times 4,1 \text{ m}$ ^{112,111}.

Segment terrestre

La liaison entre les satellites et le réseau internet passe par des stations terriennes qui sont réparties sur l'ensemble de la planète. Chaque satellite dispose de deux antennes lui permettant d'être en liaison permanente avec autant de stations terriennes. Une station terrienne dispose de huit antennes paraboliques opérationnelles de relativement petite taille (moins de deux mètres de diamètre), qui peuvent être connectées à huit satellites chacune, et d'une antenne de secours. Une centaine de stations sont prévues à terme aux États-Unis. Ce nombre permettrait de maintenir la liaison avec 800 satellites, ce qui suppose que la constellation atteigne 40 000 satellites puisque le territoire américain est survolé à un instant donné par 2 % de la flotte. Un nombre non précisé de stations sont construits sur les territoires des pays où l'offre Starlink est commercialisée (en juin 2022 : La majeure partie de l'Europe occidentale, le sud du Canada, certaines régions de l'Australie et de la Nouvelle-Zélande)^{113,114}.

Par ailleurs deux stations installées respectivement sur les côtes ouest et est des États-Unis collectent les télemesures transmises par les satellites pour surveiller leur fonctionnement.

Terminal utilisateur

Pour utiliser les services Starlink l'utilisateur dispose d'un terminal conçu et vendu par SpaceX, qui comprend une antenne à installer à l'extérieur, un routeur Wifi et un boîtier raccordant l'antenne et le routeur. L'antenne doit être installée à l'extérieur dans un environnement dégagé pour permettre l'établissement de la liaison avec un des satellites de la constellation Starlink. L'antenne utilise conjointement un système de pointage électronique et mécanique pour pouvoir maintenir la liaison avec les satellites qui se déplacent très rapidement dans le ciel : un satellite donné se déplace rapidement et ne reste visible au maximum que durant huit minutes. Un système motorisé inclus dans l'antenne est utilisé pour modifier (relativement lentement) l'élévation (hauteur) tandis que l'antenne à réseau à commande de phase utilise des centaines de minuscules antennes planaires contrôlées électroniquement pour maintenir en temps réel le faisceau pointé vers le satellite dont la position change en permanence. Les fréquences utilisées sont de 14–14,5 GHz pour le sens Terre vers espace, et 10,95–12,7 GHz pour le sens espace vers Terre. Le gain maximum est de 34,8 décibels et la puissance transmise est comprise entre 0,76 watts (faisceau perpendiculaire à l'antenne) et 4,06 watts¹¹⁵. L'antenne fournie à l'origine était circulaire d'un diamètre de 58,9 centimètres et une masse de 7,3 kilogrammes. Une antenne moins coûteuse à produire est commercialisée depuis 2022. De forme rectangulaire elle est produite en deux versions : 50×30 centimètres ou 57×51 centimètres pour une masse de 7,2 ou 4,2 kilogrammes¹¹⁶.

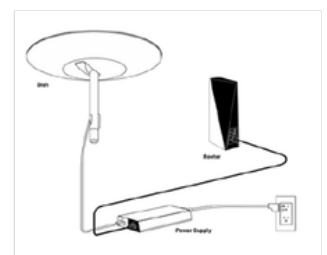


Schéma des trois composants du terminal utilisateur : l'antenne qui constitue l'élément le plus complexe et le plus coûteux, le routeur wifi et le boîtier de raccordement entre l'antenne et le routeur.

Capacité et performances du système

Chaque satellite Starlink opérationnel en 2022 (versions 1.0 et 1.5) a une capacité totale d'environ 20 gigabits par seconde (par comparaison, les satellites géostationnaires les plus récents (*ViaSat-2* placé en orbite en 2017) ont une capacité d'environ 300 gigabits par seconde). Pour une constellation de 4 425 satellites et avec 0,1 utilisateur actif par kilomètre carré, le système Starlink peut fournir un débit maximum de 25 mégabits par seconde. Avec une constellation de 40 000 satellites aux caractéristiques similaires à ceux déjà lancés, ce débit (25 Mb/s) devient disponible pour un utilisateur actif par kilomètre carré¹¹⁷. SpaceX a toutefois prévu de fortement accroître les capacités des 28 000 derniers satellites lancés (version 2.0), qui, selon les annonces de juin 2022, devraient avoir une capacité dix fois plus importante.

Pour qu'une communication puisse s'établir entre le terminal utilisateur et le satellite, celui-ci doit se trouver à environ 50° au-dessus de l'horizon. En conséquence, en faisant abstraction du relief, un satellite est visible dans un rayon de 800 km par un terminal utilisateur.

L'offre standard de Starlink prévoit un débit en téléchargement (en fonctionnement normal) compris entre 50 et 150 mégabits par seconde avec un temps de latence de 20 millisecondes contre 600 ms pour les liaisons internet par satellite existantes et 10 ms pour les liaisons fournies par les meilleurs fournisseurs internet utilisant un réseau terrestre. Starlink commercialise une offre premium (abonnement cinq fois plus coûteux) qui fournit un débit de 500 Mb/s¹¹⁸.

Établissements de SpaceX

La fabrication des satellites Starlink est réalisée dans un établissement de SpaceX situé à Redmond, Washington. Celui-ci abrite les activités de recherche, de développement, de fabrication et de contrôle en orbite pour le projet Internet par satellite.

Enjeux internationaux

Objectifs commerciaux et modèle économique

La viabilité économique de Starlink dépend de nombreux facteurs dont le coût de fabrication des satellites, celui des terminaux utilisateurs, le coût de lancement en orbite, la concurrence des fournisseurs d'accès utilisant des réseaux terrestres et les performances effectives du système. Elon Musk tablait en 2020 sur 40 millions d'abonnés vers 2025 et un coût de développement et de mise en place évalué à 10 milliards de dollars américains. Ce volume de clients générerait selon Musk un chiffre d'affaires dix fois supérieur à l'activité des lanceurs de SpaceX, soit 30 milliards de dollars (750 dollars par abonné et par an). Musk compte sur cette manne pour financer ses projets de colonisation de la planète Mars^{119,120}. Le magazine *Forbes* estime le nombre d'abonnés à moins de quinze millions, procurant à l'entreprise environ dix milliards de dollars de chiffre d'affaires d'ici 2025¹²¹. Selon Tim Farrar (consultant en communication par satellite et chercheur ayant travaillé sur le projet Teledesic (en)), le modèle économique de Starlink est discutable dans le contexte où la 5G devient disponible, que les opérateurs des marchés mal desservis investissent massivement dans les réseaux cellulaires terrestres et que, selon les projections de Cisco, le prix de détail des connexions à large bande existantes doit descendre sous 0,10 dollar par gigaoctet^{122,123}. Par ailleurs, alors qu'en 2015 SpaceX annonce que le prix d'un terminal Starlink sera entre 100 et 300 dollars, Farrar estime qu'il coûtera plutôt au moins 1 000 dollars^{124,123}.

Le tarif mensuel de l'abonnement standard en France (similaire au coût aux États-Unis) en juin 2022 est de 50 euros par mois, auxquels il faut ajouter environ 300 euros pour l'acquisition du terminal de l'utilisateur. En août 2023, le tarif mensuel passe à 40 euros par mois en France, concurrençant ainsi plusieurs offres d'opérateurs « traditionnels » sur le territoire. Le tarif d'acquisition du terminal de l'utilisateur est en revanche augmenté, passant à 450 euros. Pour ce tarif, le débit annoncé est de 50 à 150 mégabits par seconde¹²⁵. Le client peut bénéficier d'un débit plus important en réglant un abonnement cinq fois plus élevé.

Enjeux stratégiques

Consciente de l'importance stratégique que constitue le réseau Starlink, la Chine s'intéresse de près à ce système, dans un objectif de surveillance et possiblement de destruction des satellites le composant. Starlink est en effet utilisé par l'armée américaine pour augmenter la vitesse de transmission des données dans l'armée de l'air ainsi que pour le contrôle des drones. Par ses 2 000 satellites en orbite basse en 2022, Starlink représente un important potentiel militaire^{126,127}.

Controverses

En multipliant le nombre d'objets en orbite, les projets de mégaconstellations de fournisseurs d'Internet par satellite soulèvent des inquiétudes et critiques à travers le monde. D'une petite dizaine de milliers en 2020, ces objets seraient en effet plusieurs dizaines de milliers à terme^{128,2,129,130}. Le déploiement d'une constellation de satellites géante en orbite basse présente trois problèmes :

- le nombre de satellites en orbite basse va être décuplé par la seule présence des satellites Starlink (en configuration cible à 40 000 satellites). Le risque de collision entre satellites augmentera dans des proportions très importantes ;
- du fait du nombre élevé de satellites, les observations astronomiques par les grands observatoires terrestres sont gênées, en particulier les programmes de recensement et de suivi des objets célestes ;
- la constellation monopolise à l'échelle planétaire des plages de fréquence importantes qui constituent désormais une ressource très disputée.

Débris spatiaux

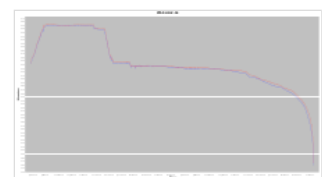
La multiplication des satellites lancés fait craindre la multiplication de fait du nombre potentiel des débris spatiaux susceptibles d'être générés par ce type de projet¹³¹. En effet, au risque de collision des satellites en fonctionnement s'ajoute celui de pannes, qui rendraient incontrôlables les satellites, risque d'autant plus élevé qu'ils sont nombreux². Dans le pire des cas, un syndrome de Kessler rendrait les orbites basses totalement impraticables.

En réponse aux inquiétudes suscitées par le projet, SpaceX a déclaré qu'une grande partie des satellites seraient placés en orbite basse autour de 550 km d'altitude, contre 1 150 km prévus à l'origine, afin de réduire la latence de communication. Cette basse altitude permet une désorbitation naturelle des satellites en cinq ans en l'absence de propulsion¹³².

En septembre 2019, l'Agence spatiale européenne ordonne à l'un de ses satellites, *ADM-Aeolus*, d'effectuer une manœuvre afin d'éviter une collision potentielle avec Starlink 44. Ce dernier, mis en orbite quelques mois plus tôt à 550 kilomètres d'altitude, est ensuite utilisé pour tester des manœuvres de désorbitation. Starlink le place sur une orbite plus basse, en dessous de 350 km, ce qui le rapproche dangereusement du satellite d'observation de l'Agence spatiale européenne ; les risques de collision étant estimés à un pour mille, une probabilité dépassant le seuil d'alerte de l'agence¹³³.



Le terminal utilisateur dans sa version commercialisée au début du déploiement de Starlink.



Déclin d'orbite du satellite Starlink-26.

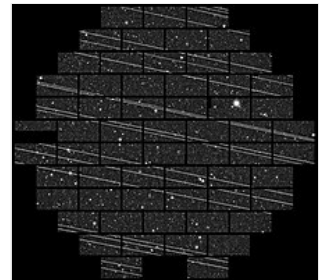
En juillet et octobre 2021, la station spatiale chinoise doit effectuer des manœuvres pour éviter de possibles collisions avec un satellite *Starlink*. La Chine porte plainte au bureau des affaires spatiales des Nations unies¹³⁴.

Pollution lumineuse du ciel nocturne



Passage d'une série de satellites Starlink à Tübingen (Allemagne).

Cette multitude de satellites rejoint l'ensemble des projets en cours de déploiement (12 000 satellites voire 42 000 pour *Starlink*^{3,2}, 3 250 pour Kuiper d'*Amazon*¹³⁵, 650 à 2 000 pour *OneWeb*^{2,136}, etc.), qui pose le problème de la pollution lumineuse spatiale du ciel nocturne. Celle-ci s'ajoute à la pollution lumineuse terrestre (issue de l'éclairage à la surface). De fait, 110 satellites devraient être visibles à l'œil nu à tout instant, atteignant une magnitude de 5. Des centaines de flashs lumineux par nuit sont également attendus, une centaine atteignant la magnitude de *Vénus* ou de la *Station spatiale internationale*¹³⁷. Cette pollution perturbe le travail des astronomes, professionnels et amateurs, ainsi que des photographes de paysages de nuit qui devront filtrer ces sources indésirables de lumière². Elle menace aussi de détruire les optiques sensibles des télescopes à large champ de vue, tel l'observatoire *Vera-C.-Rubin*¹³⁷.



Pollution du signal d'une image du CTIO par le passage des trains de satellites starlink (333 secondes d'exposition).

Ainsi, le 20 novembre 2019, le télescope Blanco du CTIO enregistre une forte perturbation de son signal avec l'impression de 19 lignes blanches sur l'image captée (photo ci-contre). Cette surexposition correspond au passage des trains de satellites Starlink lancés la semaine précédente et rend impossible l'observation de l'espace profond¹³⁸.

En réponse à ces préoccupations, SpaceX a dans un premier temps développé une version des satellites équipée d'un « pare-soleil déployé en orbite » visant à réduire la « réflexion solaire sur les corps des satellites »¹³⁹. Le dispositif « est en fait une mousse sombre spéciale qui est en grande partie transparente aux ondes radio, afin de ne pas affecter les antennes à réseaux phasés »¹⁴⁰. Deux satellites emportant cet équipement et baptisés *VisorSat* sont lancés en juin 2020, pour permettre leur évaluation par les astronomes¹³⁹. Une solution testée quelques mois plus tôt n'avait pas convaincu : la luminosité des satellites « *DarkSat* » restait quatre milliards de fois supérieure à la sensibilité des instruments de mesure des astronomes¹⁴¹.

Pollution de l'atmosphère

Les nombreux vieux satellites désorbités sont conçus pour brûler intégralement dans l'atmosphère afin de minimiser le risque d'impact au sol. Ainsi décomposés en poussières dans la haute atmosphère, ils y constituent une forme nouvelle de pollution d'autant plus problématique qu'elle est persistante, la stratosphère étant plus stable et surtout non « lessivée » par les pluies. Ces particules, dont la masse totale ne représente qu'une infime fraction du flux de matière extraterrestre tombant sur Terre (plusieurs milliers de tonnes par an) diffèrent par leur composition chimique (essentiellement des oxydes d'aluminium, de lithium, de cuivre et de plomb), et peuvent ainsi dégrader la couche d'ozone et modifier l'albédo de la Terre^{142,143}.

Notes et références

Notes

Références

- ^(en) Magdalena Petrova, « Starlink's rapid growth and influence has made it an indispensable part of Elon Musk's SpaceX » (<https://www.cnn.com/2023/11/11/the-rapid-rise-of-elon-musks-starlink-s-atellite-internet-business.html>), sur *CNN*, 11 novembre 2023 (consulté le 16 décembre 2023)
- Fabrice Mottez et Lucas Gierczak, « Starlink, un cauchemar pour les astronomes », *Pour la science*, n^o 509, mars 2020, p. 7 (lire en ligne (<https://www.pourlascience.fr/sd/astronomie/starlink-un-cauchemar-pour-les-astronomes-18885.php>)).
- Alice Vitard, « SpaceX veut déployer 30 000 satellites supplémentaires pour son projet de réseau Internet Starlink » (<http://www.usine-digitale.fr/article/spacex-veut-deployer-30-000-satellites-supplementaires-pour-son-projet-de-mega-constellation-starlink.N894964>), sur *L'Usine digitale*, 16 octobre 2019 (consulté le 29 mars 2020).
- Christian Olivier, « La latence et la bande passante de Starlink seront suffisantes pour permettre un usage typique d'Internet » (<http://www.developpez.com/actu/296681/La-latence-et-la-bande-passante-de-Starlink-seront-suffisantes-pour-permettre-un-usage-typique-d-Internet-incluant-le-Cloud-gaming-et-le-visionnage-de-films-en-HD-d-apres-Elon-Musk/>), sur *Developpez.com*, 11 mars 2020 (consulté le 29 mars 2020).
- ^(en) Congressional Research Service, « Low Earth Orbit Satellites: Potential to Address the Broadband Digital Divide » (<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46896>), sur *Congrès des États-Unis*, 31 août 2021.
- Michel Cabirol, « Le crash pour la constellation satellitaire OneWeb ? » (<https://www.la Tribune.fr/entreprises-finance/industrie/aeronautique-defense/le-crash-pour-la-constellation-satellitaire-one-web-843662.html>), sur *La Tribune*, 28 mars 2020 (consulté le 29 mars 2020).
- Stefan Barensky, « Starlink : Cadeau empoisonné de la FCC à SpaceX » (<https://www.aerospatium.info/starlink-cadeau-empoisonne-de-la-fcc-a-spacex/>), sur *Aerospatium*, 31 mars 2018 (consulté le 29 mars 2020).
- ^(en) Dominic Gates, « Elon Musk tout launch of 'SpaceX Seattle' » (<https://www.seattletimes.com/business/elon-musk-touts-launch-of-spacex-seattle/>), sur *The Seattle Times*, 16 janvier 2015 (consulté le 31 mars 2020).
- ^(en) Alan Boyle, « SpaceX adds a big new lab to its satellite development operation in Seattle area » (<https://www.geekwire.com/2017/spacex-lab-satellite-development-redmond/>), sur *GeekWire* ^(en), 27 janvier 2017 (consulté le 31 mars 2020).
- ^(en) « SpaceX FCC Application Technical Application - question 7: purpose of experiment » (<https://apps.fcc.gov/els/GetAtt.html?id=185534>) » [PDF].
- Vincent Lamigeon, « Starlink, le nouveau projet fou d'Elon Musk » (https://www.challenges.fr/entreprise/aeronautique/4-400-satellites-internet-en-orbite-starlink-le-nouveau-projet-fou-d-elon-musk_569643), sur *Challenges*, 23 février 2018.
- Mélissa Chevreuil, « SpaceX a le feu vert pour lancer Starlink, son projet d'Internet satellite très haut débit » (<https://www.numerama.com/sciences/339681-spacex-a-le-feu-vert-pour-lancer-starlink-son-projet-dinternet-satellite-tres-haut-debit.html>), sur *Numerama*, 30 mars 2018.

13. (en) « **Starlink Satellite Constellation of SpaceX** (<https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/starlink>) » (Archive.org (<https://web.archive.org/web/https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/starlink>) • Wikiwix (<https://archive.wikiwix.com/cache?url=https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/starlink>) • Archive.is (<https://archive.is/https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/starlink>) • Google (<https://webcache.googleusercontent.com/search?hl=fr&q=cache:https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/starlink>) • Que faire ?), sur *EO Portal*, Agence spatiale européenne (consulté le 24 mai 2019).
14. « Internet par satellite : la nouvelle bataille de l'espace », *Le Monde*, 2 avril 2021 (lire en ligne (https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/04/02/internet-par-satellite-la-nouvelle-bataille-de-l-espace_6075300_3234.html), consulté le 30 mai 2021).
15. Cliff O, « SpaceX Seattle 2015 (<https://www.youtube.com/watch?v=AHeZHyOnsm4>) », 17 janvier 2015 (consulté le 13 mai 2019).
16. (en-us) Jeff Foust, « Shotwell says SpaceX "homing in" on cause of Falcon 9 pad explosion (<https://spacenews.com/shotwell-says-spacex-homing-in-on-cause-of-falcon-9-pad-explosion/>) », sur *SpaceNews*, 10 octobre 2016 (consulté le 13 mai 2019).
17. (en) Melody Petersen, « Elon Musk and Richard Branson invest in satellite-Internet ventures (<https://www.latimes.com/business/la-fi-satellite-entrepreneurs-20150117-story.html>) », sur *Los Angeles Times*, 16 janvier 2015 (consulté le 13 mai 2019).
18. (en) Alan Boyle, « SpaceX adds a big new lab to its satellite development operation in Seattle area (<https://www.geekwire.com/2017/spacex-lab-satellite-development-redmond/>) », sur *GeekWire* (en), 27 janvier 2017 (consulté le 13 mai 2019).
19. (en) Alan Boyle, « SpaceX reorganizes Starlink satellite operation, reportedly with high-level firings (<https://www.geekwire.com/2018/spacex-reorganizes-seattle-starlink-satellite/>) », sur *GeekWire* (en), 31 octobre 2018 (consulté le 13 mai 2019).
20. (en) Alan Boyle, « How SpaceX Plans to Test Its Satellite Internet Service in 2016 (<https://www.nbcnews.com/science/space/how-spacex-plans-test-its-satellite-internet-service-2016-n370196>) », sur *NBC News*, 5 juin 2015 (consulté le 13 mai 2019).
21. (en) Peter B. de Selding, « SpaceX's Shotwell on Falcon 9 inquiry, discounts for reused rockets and Silicon Valley's test-and-fail ethos (<https://spacenews.com/spacexs-shotwell-on-falcon-9-inquiry-discounts-for-reused-rockets-and-silicon-valleys-test-and-fail-ethos/>) », sur *SpaceNews*, 5 octobre 2016 (consulté le 13 mai 2019).
22. (en) Gene, « SpaceX expands to new 8,000 sqft office space in Orange County, CA (<https://www.teslarati.com/spacex-expands-office-space-in-orange-county/>) », sur *teslarati.com*, 8 juillet 2016 (consulté le 13 mai 2019).
23. (en) « **Open Positions - SpaceX** (<https://www.spacex.com/careers/list>) » (Archive.org (<https://web.archive.org/web/https://www.spacex.com/careers/list>) • Wikiwix (<https://archive.wikiwix.com/cache?url=https://www.spacex.com/careers/list>) • Archive.is (<https://archive.is/https://www.spacex.com/careers/list>) • Google (<https://webcache.googleusercontent.com/search?hl=fr&q=cache:https://www.spacex.com/careers/list>) • Que faire ?), sur *SpaceX* (consulté le 13 mai 2019).
24. (en) « FCC international bureau (https://licensing.fcc.gov/cgi-bin/ws.exe/prod/ib/forms/reports/swr031b.hts?q_set=V_SITE_ANTE_NNA_FREQ.file_numberC/File%20Number/=SATLOA201611500118&prepare=&column=V_SITE_ANTENNA_FREQ.file_numberC/) », sur *Commission fédérale des communications* (consulté le 13 mai 2019).
25. (en) Caleb Henry, « FCC gets five new applications for non-geostationary satellite constellations (<https://spacenews.com/fcc-gets-five-new-applications-for-non-geostationary-satellite-constellations/>) », sur *SpaceNews*, 2 mars 2017 (consulté le 13 mai 2019).
26. (en-us) Caleb Henry, « SpaceX asks FCC to make exception for NGSO constellations in Connect America Fund decisions (<https://spacenews.com/spacex-asks-fcc-to-make-exception-for-leo-constellations-in-connect-america-fund-decisions/>) », sur *SpaceNews*, 19 septembre 2017 (consulté le 13 mai 2019).
27. (en) Doug Messier, « SpaceX Wants to Launch 12,000 Satellites (<http://www.parabolicarc.com/2017/03/03/spacex-launch-12000-satellites/>) », sur *Parabolic Arc*, 2 mars 2017 (consulté le 13 mai 2019).
28. (en) Rich McCormick, « SpaceX plans to launch first internet-providing satellites in 2019 (<https://www.theverge.com/2017/5/4/15539934/spacex-satellite-internet-launch-2019>) », sur *The Verge*, 4 mai 2017 (consulté le 13 mai 2019).
29. (en) Peter B. de Selding, « SES asks ITU to replace 'one and done' rule for satellite constellations with new system (<https://www.spaceintelreport.com/ses-asks-itu-replace-one-done-rule-satellite-constellations-new-system/>) », sur *Space Intel Report*, 4 septembre 2017 (consulté le 13 mai 2019).
30. (en) Caleb Henry, « FCC OKs lower orbit for some Starlink satellites (<https://spacenews.com/fcc-oks-lower-orbit-for-some-starlink-satellites/>) », sur *SpaceNews*, 26 avril 2019 (consulté le 31 mars 2020).
31. (en) Alan Boyle, « SpaceX seeks to trademark the name 'Starlink' for satellite broadband network (<https://www.geekwire.com/2017/spacex-seeks-trademark-name-starlink-satellite-broadband-network/>) », sur *GeekWire* (en), 19 septembre 2017 (consulté le 13 mai 2019).
32. (en) Jon Brodtkin, « SpaceX and OneWeb broadband satellites raise fears about space debris (<https://arstechnica.com/information-technology/2017/10/spacex-and-oneweb-broadband-satellites-raise-fears-about-space-debris/>) », sur *Ars Technica*, 10 avril 2017 (consulté le 13 mai 2019).
33. (en) « FCC Authorizes SpaceX to Provide Broadband Satellite Services (<https://www.fcc.gov/document/fcc-authorizes-spacex-provide-broadband-satellite-services>) », sur *Commission fédérale des communications*, 29 mars 2018 (consulté le 13 mai 2019).
34. (en) Jon Brodtkin, « FCC approves SpaceX plan to launch 4,425 broadband satellites (<https://arstechnica.com/information-technology/2018/03/spacex-gets-fcc-approval-to-build-worldwide-satellite-broadband-network/>) », sur *Ars Technica*, 30 mars 2018 (consulté le 13 mai 2019).
35. (en) Caleb Henry, « FCC approves SpaceX constellation, denies waiver for easier deployment deadline (<https://spacenews.com/us-regulators-approve-spacex-constellation-but-deny-waiver-for-easier-deployment-deadline/>) », sur *SpaceNews*, 29 mars 2018 (consulté le 13 mai 2019).
36. (en) William M. Wiltshire, « Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC [SAT-MOD-20181108-00083] (<https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083>) », sur *fcc.report* (consulté le 13 mai 2019).
37. « Attachment Technical Information SAT-MOD-20181108-00083 (<https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860>) », sur *fcc.report* (consulté le 13 mai 2019).
38. (en) Sandra Erwin, « Air Force laying groundwork for future military use of commercial megaconstellations (<https://spacenews.com/air-force-laying-groundwork-for-future-military-use-of-commercial-megaconstellations/>) », sur *SpaceNews*, 28 février 2019 (consulté le 13 mai 2019).
39. (en) Eric Ralph, « SpaceX's first dedicated Starlink launch announced as mass production begins (<https://www.teslarati.com/spacex-starlink-first-launch-date/>) », sur *teslarati.com*, 8 avril 2019 (consulté le 13 mai 2019).
40. (en) Chris Gebhardt, « First Starlink mission to be heaviest payload launch by SpaceX to date (<https://www.nasaspacesflight.com/2019/05/first-starlink-mission-heaviest-payload-launch-space-x/>) », sur *nasaspacesflight.com*, 23 mai 2019 (consulté le 31 mars 2020).
41. (en) Gunter Krebs, « Starlink Block v0.9 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v0-9.htm) », sur *skyrocket.de* (consulté le 15 mai 2019).
42. Rémi Amalvy, « SpaceX réussit le lancement de ses 60 premiers mini-satellites Starlink (<https://www.usinenouvelle.com/article/vidéo-spacex-reussit-le-lancement-de-ses-60-premiers-mini-satellites-starlink.N843170>) », sur *L'Usine nouvelle*, 15 mai 2019 (consulté le 31 mars 2020).
43. (en) Gunter Krebs, « Starlink Block v1.0 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v1-0.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 29 juin 2022).
44. (es) Daniel Marin, « Más de 2500 satélites Starlink (<https://danielmarin.naukas.com/2022/05/15/mas-de-2500-satelites-starlink/>) », sur *Eureka*, 15 mai 2022 (consulté le 18 juin 2022).
45. Dorian De Schaepmeester, « Les satellites Starlink retombent-ils plus vite que prévu ? (<https://www.cieletespace.fr/actualites/les-satellites-starlink-retombent-ils-plus-vite-que-prevu>) », sur *Ciel et Espace*, 8 février 2022 (consulté le 8 avril 2022).
46. Dorian De Schaepmeester, « SpaceX perd 40 satellites Starlink à cause d'une tempête solaire (<https://www.cieletespace.fr/actualites/spacex-perd-40-satellites-starlink-a-cause-d-une-tempete-solaire>) », sur *Ciel et Espace*, 9 février 2022 (consulté le 8 avril 2022).

47. (en) Gunter Krebs, « Falcon-9 v1.2 (Block 5) (Falcon-9FT (Block 5)) (https://space.skyrocket.de/doc_lau_det/falcon-9_v1-2_b5.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 29 juin 2022).
48. (en-us) William Graham, « SpaceX launches Falcon 9 with PAZ, Starlink demo and new fairing (<https://www.nasaspacelife.com/2018/02/spacex-falcon-9-paz-launch-starlink-demo-new-fairing/>) », sur *NASASpaceFlight.com*, 22 février 2018 (consulté le 12 mai 2019).
49. (en) Mike Wall, « SpaceX's Prototype Internet Satellites Are Up and Running (<https://www.space.com/39785-spacex-internet-satellites-starlink-constellation.html>) », sur *Space.com*, 22 février 2018 (consulté le 12 mai 2019).
50. (en) « Falcon-9 (https://space.skyrocket.de/doc_lau/falcon-9.htm) », sur *space.skyrocket.de* (consulté le 18 mai 2019).
51. « Technical details for satellite *TINTIN A* (<https://www.n2yo.com/satellite/?s=43216>) », sur *N2YO.com - Real Time Satellite Tracking and Predictions* (consulté le 6 juin 2020).
52. (en) elonmusk, « First two Starlink demo satellites, called Tintin A and B, deployed and communicating to Earth stations (<https://twitter.com/elonmusk/status/966703261699854336>) », sur *Twitter*, 22 février 2018 (consulté le 22 février 2018).
53. (en) Gunter Krebs, « *MicroSat 2a, 2b (Tintin A, B)* (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/microsat-2.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 24 juin 2022).
54. (en) « **Starlink Press Kit** (https://www.spacex.com/sites/spacex/files/starlink_press_kit.pdf) » (Archive.org (https://web.archive.org/web/*/https://www.spacex.com/sites/spacex/files/starlink_press_kit.pdf) • Wikiwix (https://archive.wikiwix.com/cache?url=https://www.spacex.com/sites/spacex/files/starlink_press_kit.pdf) • Archive.is (https://archive.is/https://www.spacex.com/sites/spacex/files/starlink_press_kit.pdf) • Google (https://webcache.googleusercontent.com/search?hl=fr&q=cache:https://www.spacex.com/sites/spacex/files/starlink_press_kit.pdf) • Que faire ?), sur *SpaceX*, 15 mai 2019 (consulté le 23 mai 2019).
55. (en) « CelesTrak: (<https://celestrak.com/NORAD/elements/supplemental/table.php?tleFile=starlink>) », sur *celestrak.com* (consulté le 6 juin 2020).
56. « <https://twitter.com/planet4589/status/1268342020621434880> (<https://twitter.com/planet4589/status/1268342020621434880>) », sur *Twitter* (consulté le 6 juin 2020).
57. (en) elonmusk, « First 60 SpaceX Starlink satellites loaded into Falcon fairing. Tight fit. (<https://twitter.com/elonmusk/status/1127388838362378241>) », sur *Twitter*, 11 mai 2019 (consulté le 12 mai 2019).
58. elonmusk, « Much will likely go wrong on 1st mission. Also, 6 more launches of 60 sats needed for minor coverage, 12 for moderate. (<https://twitter.com/elonmusk/status/1127391581072347137>) », sur *Twitter*, 11 mai 2019.
59. « <https://twitter.com/elonmusk/status/1127390620111081473> (<https://twitter.com/elonmusk/status/1127390620111081473>) », sur *Twitter* (consulté le 6 juin 2020).
60. « Starlink Block v0.9 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v0-9.htm) », sur *space.skyrocket.de* (consulté le 6 juin 2020).
61. (en) TESMANIAN, « It appears SpaceX tested deorbiting a Starlink satellite - It reentered Earth's atmosphere (<https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/starlink-deorbit>) », sur *TESMANIAN* (consulté le 6 juin 2020).
62. (en) Ben Cooper, « Rocket Launch Viewing Guide for Cape Canaveral (http://www.launchphotography.com/Delta_4_Atlas_5_Falcon_9_Launch_Viewing.html) », sur *Launchphotography.com*, 17 octobre 2019 (consulté le 18 octobre 2019).
63. (en) Steven Pietrobon, « United States Commercial ELV Launch Manifest (<http://www.sworld.com.au/steven/space/uscom-manifest>) », 22 juillet 2019 (consulté le 22 juillet 2019).
64. (en) « Successful launch continues deployment of SpaceX's Starlink network (<https://spaceflightnow.com/2019/11/11/successful-launch-continues-deployment-of-spacexs-starlink-network/>) », 11 novembre 2019 (consulté le 11 novembre 2019).
65. (en) « SpaceX says upgraded Starlink satellites have better bandwidth, beams, and more (<https://www.teslarati.com/spacex-starlink-satellite-upgrade-more-bandwidth-more-beams/>) », 12 novembre 2019.
66. « Starlink Block v1.0 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v1-0.htm) », sur *space.skyrocket.de* (consulté le 6 juin 2020).
67. (en) Stephen Clark, « Launch Log (<https://spaceflightnow.com/launch-log/>) », sur *Spaceflight Now* (consulté le 15 mars 2020).
68. « SpaceX modifies Starlink network design (<https://spaceflightnow.com/2020/04/21/spacex-modifies-starlink-network-design-as-another-60-satellites-gear-up-for-launch/>) », sur *spaceflightnow.com*, Spaceflight Now (consulté le 22 avril 2020).
69. « SpaceX travaille sur la correction des satellites Starlink pour qu'ils ne perturbent pas l'astronomie, en appliquant un revêtement spécial sur le fond des engins (<https://embarque.developpez.com/actu/286833/SpaceX-travaille-sur-la-correction-des-satellites-Starlink-pour-qu'ils-ne-perturbent-pas-l-astronomie-en-appliquant-un-revetement-special-sur-le-fond-des-engins/>) », sur *Developpez.com* (consulté le 4 juin 2020).
70. (en) « SpaceX working on fix for Starlink satellites so they don't disrupt astronomy (<https://spacenews.com/spacex-working-on-fix-for-starlink-satellites-so-they-dont-disrupt-astronomy/>) », sur *SpaceNews*, 7 décembre 2019 (consulté le 10 décembre 2019).
71. (en-us) Eric Ralph, « SpaceX "DARKSAT" results: can Starlink and astronomy happily coexist? (<https://www.teslarati.com/spacex-starlink-darksat-astronomy-impact-photos/>) », sur *TESLARATI*, 27 mars 2020 (consulté le 6 juin 2020).
72. (en) Stephen Clark, « SpaceX boosts 60 more Starlink satellites into orbit after weather delays (<https://spaceflightnow.com/2020/01/29/spacex-boosts-60-more-starlink-satellites-into-orbit-after-weather-delays/>) », sur *Spaceflight Now*, 29 janvier 2020 (consulté le 15 mars 2020).
73. (en) Stephen Clark, « SpaceX delivers more Starlink satellites to orbit, booster misses drone ship landing (<https://spaceflightnow.com/2020/02/17/spacex-delivers-more-starlink-satellites-to-orbit-booster-misses-drone-ship-landing/>) », sur *Spaceflight Now*, 17 février 2020 (consulté le 18 février 2020).
74. (en) Stephen Clark, « Launch Schedule (<https://spaceflightnow.com/launch-schedule/>) », sur *Spaceflight Now*, 17 mars 2020 (consulté le 17 mars 2020).
75. Stephen Clark, « SpaceX's Starlink network surpasses 400-satellite mark after successful launch (<https://spaceflightnow.com/2020/04/22/spacexs-starlink-network-surpasses-400-satellite-mark-after-successful-launch/>) », *Spaceflight Now*, 22 avril 2020 (consulté le 28 avril 2020).
76. (en) « Rock Launch Viewing Guide for Cape Canaveral (http://www.launchphotography.com/Delta_4_Atlas_5_Falcon_9_Launch_Viewing.html) », sur *launchphotography.com* (consulté le 5 juin 2020).
77. (en) « SpaceX to debut satellite-dimming sunshade on Starlink launch next month (<https://spaceflightnow.com/2020/04/28/spacex-to-debut-satellite-dimming-sunshade-on-starlink-launch-next-month/>) », sur *SpaceFlightNow*, 28 avril 2020 (consulté le 29 avril 2020).
78. <https://twitter.com/nextspaceflight/status/1268997874559225856>
79. (en) « Launch Schedule (<https://spaceflightnow.com/launch-schedule/>) », sur *spaceflightnow.com*, SFN, 23 mai 2020 (consulté le 23 mai 2020).
80. (en-us) Stephen Clark, « SpaceX smashes record with launch of 143 small satellites – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/01/24/spacex-launches-record-setting-rideshare-mission-with-143-small-satellites/>) » (consulté le 25 mars 2021).
81. (en) « Falcon-9 (https://space.skyrocket.de/doc_lau/falcon-9.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 25 mars 2021).
82. (en-GB) Editor, « SpaceX plans 'ride share' Starlink launch (<https://advanced-television.com/2021/01/07/spacex-plans-ride-share-starlink-launch/>) », sur *advanced-television.com* (consulté le 25 mars 2021).
83. (en-us) Stephen Clark, « Live coverage: SpaceX launches 60 more Starlink satellites – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/02/04/falcon-9-starlink-v10-i18-mission-status-center/>) » (consulté le 25 mars 2021).
84. (en-us) Stephen Clark, « SpaceX successfully deploys 60 Starlink satellites, but loses booster on descent – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/02/16/spacex-successfully-deploys-60-more-starlink-satellites-but-loses-booster-on-descent/>) » (consulté le 25 mars 2021).
85. (en-us) Stephen Clark, « SpaceX sticks 75th Falcon rocket landing after launching 60 more Starlink satellites – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/03/04/spacex-sticks-75th-falcon-rocket-landing-after-launching-60-more-starlink-satellite/>) » (consulté le 25 mars 2021).

86. (en-us) Stephen Clark, « SpaceX adds more satellites to Starlink internet fleet – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/03/11/spacex-adds-more-satellites-to-starlink-internet-fleet/>) » (consulté le 25 mars 2021).
87. (en-us) Stephen Clark, « SpaceX extends its own rocket reuse record on Starlink launch – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/03/14/spacex-extends-its-own-rocket-reuse-record-on-starlink-launch/>) » (consulté le 25 mars 2021).
88. (en-us) Stephen Clark, « SpaceX launches 25th mission for Starlink internet network – Spaceflight Now (<https://spaceflightnow.com/2021/03/24/spacex-launches-25th-mission-to-build-out-starlink-internet-network/>) » (consulté le 25 mars 2021).
89. (en) « Carte dynamique des stations terriennes et des satellites (https://starlink.sx/) » (consulté le 26 juin 2022).
90. (en) Jon Brodtkin, « SpaceX Starlink has some hiccups as expected, but users are impressed (https://arstechnica.com/information-technology/2020/11/spacex-starlink-has-some-hiccups-as-expected-but-users-are-impressed/) », sur *arstechnica.com*, 12 novembre 2020.
91. « SpaceX Starlink a maintenant son propre système autonome avec un numéro ASN (Autonomous System Number) et est présent au Seattle Internet Exchange (https://www.developpez.com/actu/305271/SpaceX-Starlink-a-maintenant-son-propre-systeme-autonome-avec-un-numero-ASN-Autonomous-System-Number-et-est-present-au-Seattle-Internet-Exchange/) », sur *Developpez.com*, 4 juin 2020 (consulté le 18 février 2021).
92. (en) Brian Wang, « SpaceX Starlink Revenue Forecast to 2025 (https://www.nextbigfuture.com/2022/06/spacex-starlink-revenue-forecast-to-2025.html#more-176174) », sur *Nextbigfuture*, 20 juin 2022 (consulté le 25 juin 2022).
93. Agence France-Presse, « **Starlink perd ses autorisations de fréquence en France** (https://information.tv5monde.com/info/starlink-perd-ses-autorisations-de-frequence-en-france-451728) » (Archive.org (https://web.archive.org/web/*/https://information.tv5monde.com/info/starlink-perd-ses-autorisations-de-frequence-en-france-451728) • Wikiwix (https://archive.wikiwix.com/cache/?url=https://information.tv5monde.com/info/starlink-perd-ses-autorisations-de-frequence-en-france-451728) • Archive.is (https://archive.is/https://information.tv5monde.com/info/starlink-perd-ses-autorisations-de-frequence-en-france-451728) • Google (https://webcache.googleusercontent.com/search?hl=fr&q=cache:https://information.tv5monde.com/info/starlink-perd-ses-autorisations-de-frequence-en-france-451728) • Que faire ?), sur *TV5 Monde*, 5 avril 2022 (consulté le 8 avril 2022).
94. Florian Bayard, « Starlink : la France autorise à nouveau l'Internet par satellite d'Elon Musk (https://www.phonandroid.com/starlink-la-france-autorise-a-nouveau-l-internet-par-satellite-delon-musk.html) », sur *PhonAndroid*, 3 juin 2022 (consulté le 16 juin 2022).
95. Brian Wang, « Après consultation publique, l'Arcep attribue une nouvelle autorisation d'utilisation de fréquences à Starlink (https://www.arcep.fr/actualites/les-communiqués-de-presse/detail/n/freq-020622.html) », ARCEP, 2 juin 2022 (consulté le 25 juin 2022).
96. Nicolas Furno, « Starlink jette l'éponge et n'installera pas sa station terrestre en Normandie (https://www.macg.co/services/2022/01/starlink-jette-leponge-et-ninstallera-aucune-station-terrestre-en-normandie-126789) », sur *macg.co*, 24 janvier 2022.
97. Raphaële Karayan, « Internet par satellite : Starlink lance une offre pour les entreprises en France », *L'Usine digitale*, 12 septembre 2022 (lire en ligne (https://www.usine-digitale.fr/article/internet-par-satellite-starlink-lance-une-offre-pour-les-entreprises-en-france.N2042917), consulté le 2 octobre 2023).
98. Margaux Vulliet, « Internet : Starlink baisse ses prix en France pour gagner des clients dans les zones blanches (https://www.bfmtv.com/tech/actualites/telecoms/internet-starlink-baisse-ses-prix-en-france-pour-gagner-des-clients-dans-les-zones-blanches_AV-202307100314.html) », sur *BFM TV*, 10 juillet 2023 (consulté le 17 novembre 2023).
99. Agence France-Presse, « Des terminaux du service internet Starlink d'Elon Musk sont arrivés en Ukraine (https://www.lapresse.ca/affaires/entreprises/2022-02-28/des-terminaux-du-service-internet-starlink-d-elon-musk-sont-arrivees-en-ukraine.php) », sur *La Presse*, 28 février 2022 (consulté le 4 mai 2022).
100. (en) Eric Mack, « How SpaceX plans to bring speedy broadband to the whole world (https://www.cnet.com/news/how-spacex-brings-starlink-broadband-satellite-internet-to-low-earth-orbit/) », sur *CNET*, 21 février 2018 (consulté le 31 mars 2020).
101. (en) *Application for modification of authorization for the SpaceX NGSO satellite system* [« Demande d'avenant au dossier d'accord des autorités réglementaires américaines pour le déploiement de la constellation Starlink »], SpaceX, 17 avril 2020, 11 p. (lire en ligne (https://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2021/01/spacex-satellite-application-polar-orbits.pdf) [PDF]).
102. Nicolas Martin, « Starlink : tout ce qui brille (https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mardi-04-fevrier-2020) », sur *franceculture.fr*, 4 février 2020 (consulté le 24 mars 2021).
103. (en) Alejandro Alcantarilla Romera, « SpaceX launches first Starlink v2 satellites to orbit (https://www.nasaspacespaceflight.com/2023/02/starlink-6-1-2-7/) », sur *Eureka*, 27 février 2023.
104. (en) Patric Blau, « MicroSat-2a & 2B (http://spaceflight101.com/falcon-9-paz/microsat-2a-2b/) », sur *spaceflight101.com* (consulté le 6 avril 2018).
105. (en) Jonathan Amos, « SpaceX puts up 60 internet satellites (https://www.bbc.com/news/science-environment-48289204) », sur *BBC*, 24 mai 2019 (consulté le 31 mars 2020).
106. (en) Stephen Clark, « SpaceX's first 60 Starlink broadband satellites deployed in orbit (https://spaceflightnow.com/2019/05/24/spacexs-first-60-starlink-broadband-satellites-deployed-in-orbit/) », sur *spaceflightnow.com*, 24 mai 2019 (consulté le 31 mars 2020).
107. (en) Gunter Krebs, « Starlink Block v0.9 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v0-9.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 24 juin 2022).
108. (en) Gunter Krebs, « Starlink Block v1.0 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v1-0.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 24 juin 2022).
109. (en) Gunter Krebs, « Starlink Block v1.5 (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v1-5.htm) », sur *Gunter's Space Page* (consulté le 24 juin 2022).
110. (en) Aizaz Chaudhry et Halim Yanikomeroglu, « Laser Inter-Satellite Links in a Starlink Constellation », *Arxiv*, n° x, 2021 (DOI 10.48550/ARXIV.2103.00056 (https://dx.doi.org/10.48550/ARXIV.2103.00056 (https://arxiv.org/abs/abs/2103.00056))).
111. (es) Daniel Marin, « Lancement des premiers satellites Starlink v2 Mini de SpaceX (https://danielmarin.naukas.com/2023/02/28/lanzados-los-primeros-satelites-starlink-v2-mini-de-spacex/) », sur *Eureka*, 28 février 2023.
112. (en) Gunter Krebs, « **Starlink Block v2.0** (https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-0.htm) » (Archive.org (https://web.archive.org/web/*/https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-0.htm) • Wikiwix (https://archive.wikiwix.com/cache/?url=https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-0.htm) • Archive.is (https://archive.is/https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-0.htm) • Google (https://webcache.googleusercontent.com/search?hl=fr&q=cache:https://space.skyrocket.de/doc_sdat/starlink-v2-0.htm) • Que faire ?), sur *Gunter's Space Page* (consulté le 24 juin 2022).
113. Mathieu Chartier, « Starlink : après les satellites, les stations terrestres (https://www.lesnumeriques.com/vie-du-net/starlink-apres-satellites-stations-terrestres-n83879.html) », sur *Les Numériques*, 13 février 2019 (consulté le 31 mars 2020).
114. (en) « Attachment App. Narrative SES-LIC-INTR2019-00217 (https://fcc.report/IBFS/SES-LIC-INTR2019-00217/1616678) », sur *fcc.report*, Federal Communications Commission (consulté le 13 mai 2019).
115. « Etude de l'exposition aux ondes électromagnétiques du kit de communication au réseau Starlink (https://www.anfr.fr/fileadmin/mmediatheque/documents/expac/20220224-etude-exposition-starlink.pdf) », Agence nationale des fréquences, février 2022.
116. (en) « Quelles sont les spécifications de mon Starlink? (https://support.starlink.com/?topic=e4aa37dc-190d-ff0-ae37-e7ef731ec24) », SpaceX (consulté le 25 juin 2022).
117. (en) Osoro B. Ogutu et Edward J. Oughton, « A Techno-Economic Cost Framework for Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper », *IEEE Access*, IEEE, vol. 9, 13 octobre 2021, p. 141611 - 141625 (DOI 10.1109/ACCESS.2021.3119634 (https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119634 (https://arxiv.org/pdf/2108.10834.pdf))), lire en ligne (https://arxiv.org/pdf/2108.10834.pdf))


118. (en) Jon Brodtkin, « With latency as low as 25ms, SpaceX to launch broadband satellites in 2019 (<https://arstechnica.com/information-technology/2017/05/spacex-falcon-9-rocket-will-launch-thousands-of-broadband-satellites/>) », sur *Ars Technica*, 5 mars 2017 (consulté le 31 mars 2020).
119. Matthieu Delacharler, « Internet spatial : Starlink, la "machine à fric" d'Elon Musk pour financer les voyages vers Mars (<https://www.lci.fr/sciences/internet-spatial-starlink-la-machine-a-fric-d-elon-musk-pour-financer-les-voyages-vers-mars-space-x-satellite-2122152.html>) », sur *LCI*, 24 mai 2019 (consulté le 29 mars 2020).
120. (en) Rolfe Winkler et Andy Pasztor, « Exclusive Peek at SpaceX Data Shows Loss in 2015, Heavy Expectations for Nascent Internet Service (<https://www.wsj.com/articles/exclusive-peek-at-spacex-data-shows-loss-in-2015-heavy-expectations-for-nascent-internet-service-1484316455>) », sur *The Wall Street Journal*, 13 janvier 2017 (consulté le 29 mars 2020).
121. (en) « SpaceX's Satellite Internet Service Could Warrant A \$30 Billion Valuation (<https://www.forbes.com/sites/greatspeculations/2019/10/11/spacex-satellite-internet-service-could-warrant-a-30-billion-valuation/#764406ef1ff8>) », sur *Forbes*, 11 octobre 2019 (consulté le 29 mars 2020).
122. (en) Benjamin Romano, « Amazon to launch new satellite-communications headquarters in Redmond (<https://www.seattletimes.com/business/amazon/amazons-satellite-communications-venture-to-grow-in-redmond/>) », sur *The Seattle Times*, 18 décembre 2019 (consulté le 30 mars 2020).
123. (en) « Starlink revenue plans questioned (<https://advanced-television.com/2019/12/16/starlink-revenue-plans-questioned/>) », sur *advanced-television.com*, 16 décembre 2019 (consulté le 30 mars 2020).
124. « Elon Musk dit qu'un terminal ressemblant à un 'OVNI sur un bâton' permettra de se connecter à Internet via les satellites de SpaceX (<https://www.businessinsider.fr/elon-musk-terminal-ovni-baton-permettra-connecter-internet-satellites-spacex>) », sur *Business Insider*, 8 janvier 2020 (consulté le 30 mars 2020).
125. Célia Garcia-Montero, « Starlink : zoom sur l'alternative à l'ADSL d'Elon Musk (<https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1498265-starlink-zoom-sur-l-alternative-a-l-adsl-d-elon-musk-20220609/>) », sur *journaldunet.fr*, 9 juin 2022.
126. Fabrice Auclert, « Les Chinois sont prêts à désintégrer les satellites d'Elon Musk (<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/querre-futur-chinois-sont-prets-desintegrer-satellites-elon-musk-98711/>) », Futura Science, 30 mai 2022 (consulté le 30 mai 2022).
127. (en) Stephen Chen, « China military must be able to destroy Elon Musk's Starlink satellites if they threaten national security: scientists (<https://www.scmp.com/news/china/science/article/3178939/china-military-needs-defence-against-potential-starlink-threat>) », *South China Morning Post*, 25 mai 2022 (consulté le 30 mai 2022).
128. « Combien y a-t-il de satellites au-dessus de nos têtes ? (<https://www.caminteresse.fr/economie-societe/combien-y-a-t-il-de-satellites-au-dessus-de-nos-tetes-1163438/>) », *Ça m'intéresse*, 26 août 2015 (consulté le 26 mai 2019).
129. Pierre Barthélémy, « Le casse-tête croissant des débris spatiaux (https://www.lemonde.fr/sciences/article/2019/01/26/le-casse-tete-croissant-des-debris-spatiaux_5415059_1650684.html) », *Le Monde*, 26 janvier 2019 (consulté le 28 mai 2019).
130. Blandine Le Cain, « Combien y a-t-il de satellites autour de la Terre ? (<https://www.letelegramme.fr/soir/combien-y-a-t-il-de-satellites-autour-de-la-terre-26-02-2020-12510933.php>) », *Le Télégramme*, 22 février 2020 (consulté le 8 avril 2022).
131. Remy Decourt, « Les centaines de satellites OneWeb ne produiront pas de débris spatiaux (<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/constellation-satellites-centaines-satellites-oneweb-ne-produiront-pas-debris-spatiaux-60189/>) », sur *Futura*, 24 octobre 2015.
132. (en-US) « Starlink failures highlight space sustainability concerns (<https://spacenews.com/starlink-failures-highlight-space-sustainability-concerns/>) », sur *SpaceNews*, 2 juillet 2019 (consulté le 24 mars 2021).
133. Camille Gévaudan, « Collision de satellites évitée : l'ESA réclame un code de la route spatial (https://www.liberation.fr/sciences/2019/09/04/collision-de-satellites-evitee-l-esa-reclame-un-code-de-la-route-spatial_1749211) », *Libération*, 4 septembre 2019 (consulté le 30 mars 2020).
134. « Les satellites Starlink dans le collimateur de la Chine (<https://www.lemondeinformatique.fr/actualites/lire-les-satellites-starlink-dans-le-collimateur-de-la-chine-85266.html>) », *Le Monde informatique*, 29 décembre 2021 (consulté le 29 décembre 2021).
135. « Amazon va envoyer des milliers de satellites en orbite pour fournir un accès internet partout sur Terre (<https://www.journaldugEEK.com/2019/04/06/amazon-va-envoyer-milliers-de-satellites-orbite-fournir-acces-internet-partout-terre/>) », sur *Journal du Geek*, 2019-04-06 consulté le=2019-05-26.
136. (en-US) « OneWeb weighing 2,000 more satellites (<https://spacenews.com/oneweb-weighing-2000-more-satellites/>) », sur *SpaceNews*, 24 février 2017 (consulté le 18 avril 2020).
137. (en) Olivier R. Hainaut et Andrew P. Williams, « Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains », *Astronomy & Astrophysics*, 3 mars 2020 (lire en ligne (<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/orth/aa37501-20.pdf>)) [PDF].
138. (en-US) « Starlink Satellites Imaged from CTIO — IOTW1946 (<http://nationalastro.org/news/starlink-satellites-imaged-from-ctio/>) », sur *NOIRLab*, 20 novembre 2019 (consulté le 3 mai 2020).
139. « Comment SpaceX cherche à rendre les satellites Starlink moins visibles (<https://sciencepost.fr/comment-spacex-cherche-a-rendre-les-satellites-starlink-moins-visibles/>) », sur *Sciencepost*, 30 avril 2020 (consulté le 30 avril 2020).
140. « Les satellites StarLink seront bientôt moins visibles (<https://www.fredzone.org/les-satellites-starlink-seront-bientot-moins-visibles-177>) », sur *Fredzone*, 30 avril 2020 (consulté le 30 avril 2020).
141. Roland Lehoucq et François Graner, « Constellation Starlink : la « pollution spatiale » d'Elon Musk (<https://www.latribune.fr/opinion/tribunes/constellation-starlink-la-pollution-spatiale-d-elon-musk-855739.html>) », *La Tribune*, 5 septembre 2020.
142. (en) Tereza Pultarova, « Burned-up space junk pollutes Earth's upper atmosphere, NASA planes find (<https://www.space.com/air-pollution-reentering-space-junk-detected>) », sur *Space.com*, 19 octobre 2023 (consulté le 20 octobre 2023).
143. (en) Tereza Pultarova, « Air pollution from reentering megaconstellation satellites could cause ozone hole 2.0 (<https://www.space.com/starlink-satellite-reentry-ozone-depletion-atmosphere>) », sur *Space.com*, 7 juin 2021 (consulté le 20 octobre 2023).

Documents de référence

- (en) Osoro B. Ogutu et Edward J. Oughton, « A Techno-Economic Cost Framework for Satellite Networks Applied to Low Earth Orbit Constellations: Assessing Starlink, OneWeb and Kuiper », *IEEE Access*, IEEE, vol. 9, 13 octobre 2021, p. 141611 - 141625 (DOI 10.1109/ACCESS.2021.3119634 (<https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119634>), lire en ligne (<https://arxiv.org/pdf/2108.10834.pdf>))

Voir aussi

Sur les autres projets Wikimedia :

 *Starlink* (<https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Starlink?uselang=fr>), sur Wikimedia Commons

Articles connexes

- [Internet par satellite](#)
- [Constellation de satellites](#)
- [Télécommunications optiques spatiales](#)
- [Syndrome de Kessler](#)
- [Satellite de télécommunications](#)
- [OneWeb](#), [LeoSat](#)

Liens externes

- Site officiel (<http://www.starlink.com>).
 - (en) The Signal Path, « TSP #181 - Starlink Dish Phased Array Design, Architecture & RF In-depth Analysis (vidéo) » (<https://www.youtube.com/watch?v=h6MfM8EFkGg>) », The Planetary Society, 11 janvier 2021 — Architecture d'une antenne de terminal utilisateur Starlink (vidéo).
 - (en) Carte des stations terriennes du réseau Starlink courant 2021 (https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1H1x8jZs8vfjy60TvKgpbYs_grgargieVw&ll=37.76493699561089%2C-57.25610806523959&z=4)
 - « Starlink : tout ce qui brille », *La Méthode scientifique* (<https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mardi-04-fevrier-2020>), France Culture, 4 février 2020.
 - Tout savoir sur Starlink, la constellation qui veut mettre la fibre en orbite (<https://www.clubic.com/spacex/article-875742-1-galaxie-starlink-fibre-orbite.html>) : genèse détaillée du projet, par Eric Bottlaender.
 - Find Starlink (<https://findstarlink.com/>), carte et éphémérides des passages des satellites Starlink.
-

Ce document provient de « <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Starlink&oldid=210618133> ».

▪