



Rapport Projet IoTsat-LoRa

AMBIBARD Timéo

RABAHI Enzo

DOMON Quentin

DEBEVER Léon

COUZINET Lorenzo

Juin 2025



ESIEE

PARIS

Sommaire :

1. Différent type de satellites
 - LEO
 - MEO
 - GEO
2. Périodicité des passages
 - Définition
 - Loi de Kepler
 - Illustration
3. Ondes
 - Effet Doppler
 - Utilisation
 - Aspect énergétique
 - Angles d'élévation et couvertures
 - LOS (Line Of Sight)
 - ISM
4. LoRa et LoRaWAN
 - Définition de LoRa
 - Définition de LoRaWAN
 - Exemples
5. Méthode d'envoi de donnée
 - Spreading factor (SF)
 - LRFHSS
 - Comparatif entre les deux
 - Fonctionnement détaillé du LRFHSS
6. Celestrak
 - Définition de TLE
 - Décryptage d'un TLE
7. Bibliothèque pythons utilisés
8. Algorithme SGP4
 - Définition

Différents types de satellites

Types d'orbites :

Orbite basse - LEO (Low Earth Orbit)

Altitude 600 à 1500 km

LEO est densément peuplé de milliers de satellites en service aujourd'hui, répondant principalement aux besoins de la science, de l'imagerie et des télécommunications à faible bande passante. La prochaine génération de satellites HTS LEO a l'intention de servir les marchés de communication tels que l'Internet haut débit grand public et les entreprises.

Latence réduite & rafraîchissement fréquent

LEO (600–1500 km) offre une latence typique de 50–150 ms, idéale pour des applications IoT temps-réel (suivi d'actifs, capteurs industriels) : chaque satellite passe ~ 90 minutes en orbite, assurant jusqu'à 14–16 fenêtres de communication par jour avec chaque terminal .

Architecture store-and-forward et constellations :

Les opérateurs (Lacuna Space, Plan-S, EchoStar Mobile...) déploient des satellites LEO en "store-and-forward" : le terminal IoT envoie ses petits paquets (quelques octets à quelques kbit) quand le satellite est visible, stocke les données à bord, puis les relaie vers une station au sol lors du survol suivant .

Technologies & bandes :

- **LoRaWAN sub-GHz** (868 MHz/915 MHz) via modules COTS, faible puissance (< 100 mW) et petits antennes omnidirectionnelles.
- **NB-IoT NTN** (3GPP Rel-17) en bande L/S pour bidirectionnel léger, bientôt en production.
- Taille de trame : typiquement 20–200 octets, cadence de 1 à 4 envois/jour par capteur en basse consommation.
- **Cas d'usage**
 - **Environnemental** : suivi de la qualité de l'eau, qualité de l'air (Teifi River, Ceredigion, projet Lacuna) .
 - **Agriculture** : surveillance du sol, irrigation, suivi de bétail sur grandes étendues.
 - **Infrastructure critique** : détection de fuites, capteurs de sécurité dans zones isolées.

Orbite moyenne - MEO (Medium Earth Orbit) :

Altitude 5000 à 20 000 km

MEO a toujours été utilisé pour le GPS et d'autres applications de navigation. Plus récemment, les constellations HTS MEO ont été déployées pour fournir une connectivité de données à faible latence et à large bande passante aux fournisseurs de services, aux agences gouvernementales et aux entreprises commerciales.

Les satellites MEO apportent des performances de type fibre aux zones éloignées où la pose de fibre n'est pas viable, telles que les croisières, les plates-formes maritimes commerciales, aéronautiques, offshore, les réseaux de retour en terrain difficile et les opérations de secours humanitaire.

Couverture étendue & latence intermédiaire :

MEO (2 000 – 20 000 km) combine couverture régionale plus large et latence modérée (200–400 ms). Utile pour IoT impliquant des volumes de données moyens ou flux plus réguliers (suivi maritime, logistique aérienne) .

Réseaux 5G NTN

Essor des réseaux 5G Non-Terrestrial Networks (NTN) : l'essai d'Eutelsat/OneWeb a démontré le premier lien 5G via LEO avec un plan IRIS² comprenant 270 LEO et 18 MEO, ciblant une mise en service d'ici 2030 pour fournir connectivité 5G native à des objets IoT partout sur Terre .

- **Bent-pipe vs régénératif**
- **Bent-pipe** : simple relais (amplification et redirection) en bande S ou Ku.
- **Payload régénératif** : démodulation/remodulation à bord, optimisation QoS pour supports IoT à bande étroite (NB-IoT NTN).

Applications type

- **Suivi maritime & aviation** : rapport de position toutes les 2–10 min, suivi de cargaisons sensibles.
- **Services d'urgence** : capteurs de détresse en zones sans couverture.

Orbite géostationnaire - GEO (Geostationary Earth Orbit) :

Altitude 36 000 km

Les satellites GEO correspondent à la rotation de la Terre au fur et à mesure qu'ils voyagent, et restent ainsi au-dessus du même point au sol. Des centaines de satellites GEO sont en orbite aujourd'hui, fournissant traditionnellement des services tels que des données météorologiques, la télévision et certaines communications de données à faible débit. Au cours des dernières années, GEO a été considérablement amélioré par les satellites à haut débit (HTS), qui sont spécialement conçus pour les données.

Couverture permanente & latence élevée :

GEO ($\approx 35\,786$ km) offre une visibilité continue sur $\sim \frac{1}{3}$ du globe, avec une latence RTT de $\approx 550\text{--}600$ ms, adaptée aux applications IoT peu sensibles à la latence (< 1 s) mais nécessitant une disponibilité constante.

Relais de données & EDRS

ESA exploite l'European Data Relay System (EDRS) : constellation GEO qui relaie en "quasi-temps réel" (délais de l'ordre de $50\text{--}100$ ms via lasercom) les données issues de LEO/SSO vers le sol, étendant ainsi la fenêtre de transmission des capteurs IoT orbitaux .

- **Direct-to-GEO IoT**

- **LoRa® en bande S** : EchoStar Mobile déploie un réseau pan-européen LoRa® direct vers GEO, permettant des échanges bi-directionnels (quelques centaines d'octets) et réduisant la taille/poids des capteurs grâce à un fort link-budget .

Cas d'usage

suivi de compteurs électriques et hydriques, surveillance de parcs solaires, détection de feux de forêt en continu.

- Contraintes & station-keeping
- Allocation de slots par l'UIT, séparation minimale de 2° en longitude.
- Besoin de manœuvres north-south et east-west (~ 50 m/s/an) ; limite de vie opérationnelle $\approx 15\text{--}20$ ans.

Comparatif rapide :

Critère	LEO	MEO	GEO
Distance (km)	600 - 1500	5000 - 20 000	36 000
Latence	50–150 ms	200–400 ms	550–600 ms

Couverture	Fenêtres courtes (~ 10 min)	Passage fréquent, plus large	Continue ($\frac{1}{3}$ du globe)
Volume de données	Faible à modéré	Modéré	Faible (LPWAN)
Typ. techno IoT	LoRaWAN, NB-IoT NTN	5G NTN (NB-IoT), bent-pipe	LoRa® S-band, store-&-forward, lasercom (EDRS)
Exemples	Lacuna, Plan-S, Starlink IoT	IRIS ² (OneWeb/Eutelsat)	EDRS, EchoStar LoRa, Omnispace

	GEO (36,000km)	MEO (5,000-20,000km)	LEO (500-1,200km)
Altitude latency ¹	High	Low	Very low
Earth coverage	Very large	Large	Small
Satellites required	Three	Six	Hundreds
Data gateways	Few fixed	Regional flexible	Local numerous
Antenna speed	Stationary	1-hour slow tracking	10-minute fast tracking

Advantages	High throughput (HTS) technologies enable basic broadband internet applications	Proven low latency comparable to terrestrial networks, offers fibre-equivalent performance	Claims support for high-frequency trading, virtual gaming, and high-performance computing applications
	Fewer satellites over very large fixed geographical areas	Simple equatorial orbit covers 96% of global population	Smaller, lower power satellites batch-launched more cheaply than GEO
Disadvantages	High altitude and distant ground networking impacts latency-sensitive applications	Dual tracking antennas required to maintain continuous connectivity	Very complex tracking and ground network, plus complete constellation must be in place before service starts
	Signal power losses require larger satellites and antennas	Inclined plane orbits needed to cover high latitudes	Unproven business model, risky technology, and space debris risk

¹Total end-to-end network latency is dependent on ground infrastructure

Table 1: Comparison of GEO, MEO, and LEO satellites

Principales constellations LEO

1. Starlink (SpaceX)

Starlink vise à fournir un accès Internet haut débit à l'échelle mondiale.

La constellation compte déjà plus de 7 000 satellites déployés, à une altitude d'environ 550 km.

Le service est opérationnel et poursuit son expansion.

Sa particularité réside dans un réseau dense avec liaisons inter-satellites, permettant une latence très faible.

2. OneWeb (Eutelsat)

OneWeb a pour objectif d'offrir une connectivité Internet mondiale, en ciblant notamment les zones éloignées.

Environ 650 satellites sont actuellement en orbite, à 1 200 km d'altitude.

Le service est opérationnel, et Eutelsat prévoit l'ajout de 100 satellites supplémentaires en partenariat avec Airbus.

3. Project Kuiper (Amazon)

Le projet d'Amazon a pour but de fournir un Internet haut débit et abordable à travers le monde.

Il prévoit le déploiement d'environ 3 200 satellites, positionnés à 630 km d'altitude.

Le projet est en phase de déploiement initial, avec 27 satellites lancés en avril 2025.

4. Iridium NEXT

Cette constellation fournit des services de téléphonie et de données à l'échelle mondiale.

Elle compte 66 satellites opérationnels, ainsi que des unités de rechange déjà en orbite.

Les satellites évoluent à une altitude d'environ 780 km.

Le service est entièrement opérationnel.

5. Telesat Lightspeed

Telesat vise à fournir un accès Internet haut débit pour les entreprises et les gouvernements.

La constellation comptera entre 292 et 512 satellites, à une altitude comprise entre 1 000 et 1 200 km.

Elle est actuellement en développement, avec plusieurs prototypes déjà lancés.

6. Hongyan (Chine)

Hongyan ambitionne de couvrir l'ensemble de la planète, avec un focus sur la Chine et ses partenaires.

Le programme prévoit entre 320 et 864 satellites, en orbite à environ 1 100 km.

Il est en phase de déploiement initial.

7. Kinéis (France)

Kinéis est une constellation française dédiée à l'Internet des objets (IoT), destinée à la collecte de données à l'échelle mondiale.

Elle comprendra 25 satellites, à une altitude d'environ 650 km.

Le lancement est prévu pour 2025.

Constellation	Opérateur	Satellites prévus	Altitude (km)	Objectif principal	Statut actuel
Starlink	SpaceX	12 000+	~550	Internet grand public	Opérationnel
OneWeb	Eutelsat	648 + 100	~1 200	Internet mondial	Opérationnel
Project Kuiper	Amazon	~3 200	~630	Internet grand public	Déploiement initial
Iridium NEXT	Iridium	66	~780	Téléphonie et données	Opérationnel
Telesat Lightspeed	Telesat	292–512	~1 000–1 200	Internet pour entreprises	En développement
Hongyan	Chine	320–864	~1 100	Internet mondial	Déploiement initial
Kinéi	CLS (France)	25	~650	Internet des objets (IoT)	Opérationnel

Exemples concrets d'usages par orbite

LEO – Low Earth Orbit (600 à 1 500 km)

Satellite / Constellation	Utilisation principale
Starlink	Internet haut débit, télécom
OneWeb	Connectivité mondiale, télécom
Swarm	IoT à très faible débit
Kinéis	Suivi d'objets et capteurs IoT
Sentinel-2 (ESA)	Observation de la Terre
Lacuna	IoT "store-and-forward" en LoRa

Ces satellites sont en orbite basse pour permettre une **latence faible**, une **transmission rapide**, et un **rafraîchissement fréquent** des données.

MEO – Medium Earth Orbit (5 000 à 20 000 km)

Satellite / Constellation	Utilisation principale
GPS (États-Unis)	Géolocalisation mondiale
Galileo (Europe)	Géolocalisation + synchronisation
BeiDou (Chine)	Positionnement et navigation
GLONASS (Russie)	Géolocalisation

Les satellites MEO sont principalement utilisés pour des services de **navigation** et de **positionnement global**, avec une **couverture régionale large** et une **latence modérée**.

GEO – Geostationary Earth Orbit (~36 000 km)

Satellite / Constellation	Utilisation principale
EUMETSAT (MétéoSat)	Observation météo continue
EchoStar (LoRa GEO)	IoT bidirectionnel via bande S
Inmarsat	Communications en mer, aviation
GOES (NOAA)	Météo, surveillance des catastrophes
Telecom satellites (ex. Astra)	TV, télécom fixes

Ces satellites offrent une **couverture fixe** et constante, bien adaptée à des services **stables**, comme la météo, la télé, ou des relevés à basse fréquence.

Périodicité des passages

La **périodicité de passage d'un satellite** désigne le **temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs d'un satellite au-dessus d'un même point sur Terre**, ou plus précisément, au-dessus d'une **même zone d'observation**. Elle dépend principalement de **l'orbite du satellite**, notamment :

1. Les grands types d'orbite

Type d'orbite	Altitude typique	Exemple de satellites	Caractéristiques
LEO (orbite basse)	200–2 000 km	Starlink, Sentinel, ISS	Courte période, nombreux passages
MEO (orbite moyenne)	~20 000 km	GPS, Galileo	Période de ~12 h
GEO (géostationnaire)	~35 786 km	Météo, communications TV	Fixe au-dessus d'un point de l'équateur

2. Période orbitale (formule de base)

La **période de révolution** TTT (temps pour faire un tour complet autour de la Terre) est donnée par la **loi de Kepler** adaptée :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

- T : période en secondes
- a : demi-grand axe de l'orbite (en mètres)
- $\mu = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ (constante gravitationnelle terrestre)

✚ Exemple pour un satellite LEO à 500 km d'altitude :

- Rayon Terre : $\approx 6\,371 \text{ km}$
- $a = 6371 + 500 = 6871 \text{ km} = 6.871 \times 10^6 \text{ m}$

$$T \approx 2\pi\sqrt{\frac{(6.871 \times 10^6)^3}{3.986 \times 10^{14}}} \approx 5676 \text{ s} \approx 94 \text{ min}$$

👉 Donc un satellite LEO fait un tour de la Terre environ toutes les 1h34.

3. Périodicité de survol d'un point donné

Même si un satellite repasse au-dessus de la même **orbite au sol** tous les 90–100 minutes, il **ne repasse pas tout de suite au-dessus du même point géographique**, car :

- **La Terre tourne** sous le satellite ($\approx 15^\circ/\text{heure}$ vers l'est),
- Le plan orbital peut être incliné (ex. 98° pour les satellites d'observation).

Résultat : un satellite LEO peut repasser au-dessus d'une **même zone géographique** toutes les **12 à 24 heures** environ.

🕒 Exemple :

- Un satellite d'observation comme Sentinel-2A (LEO) repasse environ tous les **5 jours** exactement au-dessus du **même point**.

4. Périodicité pour une constellation (comme Starlink, Swarm...)

Si l'on utilise une **constellation de satellites** :

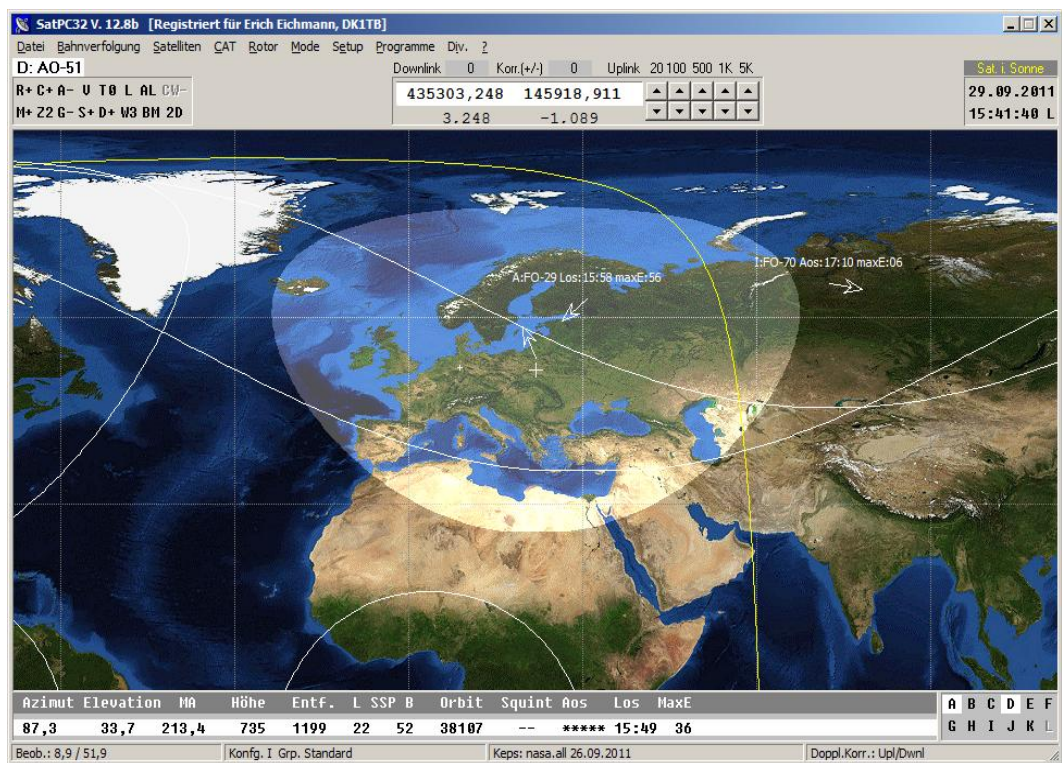
- Chacun suit une orbite LEO différente,
- Ils se répartissent autour du globe,
- Cela permet une **couverture quasi-continue**.

Exemple :

- **Swarm** (pour IoT) : avec ~150 satellites, chaque capteur est survolé **toutes les 30 à 60 minutes**, selon sa latitude.
- **Starlink** : couverture quasi permanente, jusqu'à **latence de 20 ms**.

Résumé

Orbite	Période orbitale (T)	Temps entre 2 passages au-dessus d'un point
LEO (~500 km)	≈ 90 min	≈ 12 h (ou plus pour le même point exact)
MEO (GPS)	≈ 12 h	≈ 12 h
GEO	24 h	Constamment visible
Constellation LEO	≈ 90 min	≈ 30 à 60 min (avec couverture mondiale)



<https://f5svp.fr/2020/07/27/comment-predire-et-suivre-un-passage-satellite/>

Ondes

L'effet Doppler est un phénomène physique observé lorsque la source d'une onde (comme le son ou la lumière) se déplace par rapport à un observateur. Il provoque une variation apparente de la fréquence de l'onde perçue par l'observateur.

Effet Doppler pour les ondes sonores



Principe

Lorsque la source sonore se rapproche de l'observateur :

- La fréquence perçue **augmente** (le son est plus aigu).

Lorsque la source s'éloigne de l'observateur :

- La fréquence perçue **diminue** (le son est plus grave).

Formule générale (pour le son dans l'air)

Formule générale (pour le son dans l'air)

$$f' = f \cdot \frac{v + v_o}{v - v_s}$$

où :

- f' : fréquence perçue par l'observateur
- f : fréquence réelle émise par la source
- v : vitesse du son dans le milieu (environ 343 m/s dans l'air à 20°C)
- v_o : vitesse de l'observateur (positive s'il s'approche de la source)
- v_s : vitesse de la source (positive si elle s'éloigne de l'observateur)

Important : les signes des vitesses dépendent du sens de déplacement. Si l'observateur s'approche, on **ajoute** sa vitesse. Si la source s'approche, on **soustrait** sa vitesse.

Effet Doppler pour la lumière (relativiste)

Pour la lumière, on utilise les formules relativistes car la lumière voyage à une vitesse constante dans le vide ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) et les effets ne sont pas les mêmes que pour le son (car il n'y a pas de "milieu").

Quand la source s'éloigne (décalage vers le rouge)

$$f' = f \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Quand la source s'approche (décalage vers le bleu)

$$f' = f \cdot \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

où :

- f : fréquence de la lumière émise
- f' : fréquence observée
- $\beta = \frac{v}{c}$: vitesse relative entre la source et l'observateur, exprimée en fraction de la vitesse de la lumière

Effet Doppler pour les ondes radio

Les ondes radio se déplacent à la **vitesse de la lumière** dans le vide (ou presque dans l'air), soit :

$$c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Donc, on utilise les formules relativistes de l'effet Doppler, comme pour la lumière :

$$f' = f \cdot \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (\text{source qui s'approche})$$

$$f' = f \cdot \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \quad (\text{source qui s'éloigne})$$

avec :

- f = fréquence émise par la source radio
- f' = fréquence reçue par l'observateur
- $\beta = \frac{v}{c}$ = vitesse relative source-observateur / vitesse de la lumière

Exemples d'applications concrètes

1. **Radar Doppler** : utilisé pour mesurer la vitesse d'un objet (voiture, avion) en analysant le décalage Doppler des ondes radio réfléchies.
2. **GPS** : les satellites GPS corrigent en permanence l'effet Doppler dû à leur mouvement rapide pour fournir des positions précises.
3. **Radioastronomie** : les astronomes mesurent le décalage Doppler des ondes radio émises par les galaxies pour connaître leur vitesse d'éloignement (preuve de

l'expansion de l'univers).

4. **Suivi spatial** : les stations au sol suivent les satellites ou sondes spatiales en analysant les variations de fréquence des signaux radio qu'ils émettent.

1. Distance minimale entre satellite et voiture

Le point où la distance est la plus faible entre un satellite et une voiture est lorsque le satellite est à la verticale de la voiture, c'est-à-dire à un angle d'élévation de 90° (juste au-dessus dans le ciel).

Distance minimale :

Si le satellite est à une altitude h , alors la distance minimale entre lui et une voiture sur Terre est simplement :

$$d_{\min} = h$$

Exemple :

- Satellite GNSS (comme GPS) : $h \approx 20\,200\text{ km}$
- Satellite Starlink (orbite basse) : $h \approx 550\text{ km}$

Influence de l'angle d'élévation sur la distance

Quand le satellite est vu à un angle θ par rapport à l'horizon (angle d'élévation), la distance augmente selon la géométrie sphérique Terre-satellite.

Formule géométrique (simplifiée, avec R = rayon Terre) :

-

Est-ce que l'angle réduit la fréquence émise ?

Non, la fréquence émise par le satellite reste constante.

Mais : ce que l'observateur au sol (la voiture) **perçoit** peut **changer légèrement** à cause de l'**effet Doppler**, **uniquement si le satellite est en mouvement** (ce qui est presque toujours le cas en orbite basse).

Composante Doppler

L'effet Doppler dépend de la **vitesse relative le long de la ligne de visée** (radiale) :

$$\Delta f = f \cdot \frac{v_r}{c}$$

- v_r = composante radiale de la vitesse du satellite
- c = vitesse de la lumière

Quand le satellite est **à la verticale**, v_r est **maximale** (il s'approche ou s'éloigne en ligne droite), donc le **décalage Doppler est maximal**.

Quand il est **près de l'horizon**, $v_r \approx 0$, car le satellite traverse plus latéralement → **décalage Doppler minimal**.

Résumé

Position satellite	Distance avec voiture	Effet Doppler	Fréquence perçue
À la verticale (90°)	minimale = h	maximale (\pm)	Max décalage
À l'horizon (0°)	maximale	quasi nul	Presque inchangée

1. Puissance d'émission d'un satellite

Un satellite communiquant par ondes radio utilise des antennes pour transmettre des signaux. La **puissance typique d'émission radio** dépend de la mission :

Type de satellite	Puissance émise radio typique
Satellite GPS	~ 50 W

Satellite géostationnaire TV 100–250 W

Satellite Starlink (LEO) quelques watts à ~50 W

Satellite militaire ou science jusqu'à plusieurs kW

Remarque : ces puissances sont faibles en apparence car :

- Les signaux sont très concentrés (grâce à des antennes directionnelles).
- Les **récepteurs sont extrêmement sensibles**, capables de détecter des signaux de l'ordre du **nanowatt (nW)**.

2. Formule énergétique simplifiée : puissance reçue

La **puissance reçue** P_r par une antenne est donnée par l'**équation de Friis** :

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

où :

- P_t = puissance transmise par le satellite
- G_t, G_r = gains d'antenne (émetteur et récepteur)
- λ = longueur d'onde du signal
- d = distance entre les antennes

▼ En termes de pertes :

On parle souvent de **pertes de propagation** :

$$\text{Perte (en dB)} = 20 \log_{10}(4\pi d/\lambda)$$

Ces pertes augmentent avec la distance et avec la fréquence (car λ diminue).

Vidéo explicative :

[Module 15: Friis Equation](#)



3. Énergie consommée pour envoyer un signal

Si un satellite émet un signal de puissance P_t pendant un temps Δt , alors :

$$E = P_t \cdot \Delta t$$

Exemple :

- Signal GPS : 50 W
- Transmission pendant 1 seconde

$$E = 50 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 50 \text{ J}$$

Mais attention :

- Le satellite n'émet pas en continu pour toutes les directions.
- Des systèmes d'économie d'énergie sont intégrés.
- Le satellite fonctionne souvent sur batteries rechargées par panneaux solaires.

4. Coût énergétique d'une liaison complète

On peut additionner les consommations :

- **Émission** (radiofréquence, contrôle d'antenne) : quelques watts à centaines de watts
- **Systèmes de pointage et pilotage** (orientation, suivi) : consommation électromécanique
- **Traitement numérique** (modulation, codage) : quelques watts supplémentaires

Par exemple, un terminal Starlink au sol peut consommer **50 à 100 W en continu** juste pour suivre les satellites et maintenir la liaison.

5. Facteurs influents sur la consommation énergétique

Facteur	Impact énergétique
Distance satellite-terre	↑ distance = ↑ pertes, donc ↑ énergie requise
Fréquence du signal	↑ fréquence = ↑ pertes de propagation
Type de modulation et codage	↑ complexité = ↑ énergie de traitement
Bande passante	Plus large = plus d'énergie
Conditions atmosphériques	Humidité, pluie = atténuation du signal

Synthèse

L'énergie nécessaire pour envoyer un signal entre un satellite et une voiture dépend :

- De la **puissance de l'émetteur**
- De la **distance** (donc de l'angle d'élévation et de l'orbite)
- Du **gain des antennes**
- De la **fréquence utilisée**
- Du **temps d'émission**
- Et des **pertes liées à la propagation** (atmosphère, obstacles)

1. Contraintes énergétiques des capteurs IoT

Les capteurs IoT sont conçus pour :

- **Émettre très peu souvent** (1 message par heure, par jour, voire moins),

- **Utiliser très peu d'énergie** : typiquement quelques **milliJoules par transmission**,
- Avoir une **autonomie de plusieurs années** avec une pile bouton ou une petite batterie.

Exemple de budget énergétique typique :

- Consommation totale pour une émission = **50 mJ à 200 mJ**.
- Autonomie visée : **5 à 10 ans** sur une pile CR2032.

2. Communication IoT vers satellite (ou base)

Certains réseaux permettent à des **objets très basse puissance** de communiquer avec des satellites (ou relais terrestres) :

Protocole / Réseau	Portée	Bande utilisée	Consommation
LoRaWAN	~15 km (terrestre)	ISM (868/915 MHz)	Très faible (~10 mA pendant 50 ms)
Sigfox	~40 km	ISM	Ultra faible (~50 mJ/message)
NB-IoT	Cellulaire	LTE/4G	Modérée
Swarm (satellite)	global	VHF	~150 mJ/message
Iridium IoT	global	L-band	Plus énergivore
Satelist, Lacuna, Kinéis	global (LEO)	ISM ou UHF	Faible à modérée

3. Pourquoi ça fonctionne à si faible énergie ?

- Les satellites LEO (basse orbite) sont **proches** (~500–700 km), donc besoin de **moins de puissance d'émission**.
- Les transmissions sont **très brèves** et souvent **unidirectionnelles**.
- La **bande passante** est étroite → moins d'énergie nécessaire.
- Les satellites ont des **antennes à haut gain** capables de **recevoir des signaux très faibles**.



4. Exemple chiffré d'une transmission IoT vers satellite

Imaginons un capteur de température IoT envoie un message de 12 octets (96 bits) via une modulation simple (ex. FSK), à 1000 bps pendant 100 ms, avec 20 mA sous 3 V :

- Énergie = $P \times t = (3 \text{ V} \times 20 \text{ mA}) \times 0.1 \text{ s} = 6 \text{ mJ}$

👉 Cela représente l'énergie de levage d'un grain de sable de 1 mm de haut. Ridicule, mais suffisant pour être capté par un satellite si bien conçu.

5. Limitations

- Les capteurs doivent **attendre le passage** du satellite (fenêtre de communication).
- L'envoi est souvent **asynchrone** (pas en temps réel).
- Le débit est **très limité** (quelques octets par message).
- La **latence** peut être de plusieurs minutes à heures selon l'orbite et la constellation.

En résumé

Critère	Satellite traditionnel	Capteur IoT
Source d'énergie	Panneaux solaires, batteries	Batterie/pile
Puissance d'émission	10–500 W	10–100 mW
Énergie par transmission	Joules à kJ	milliJoules
Fréquence d'émission	Continue ou régulière	Très rare (1×/h ou 1×/jour)
Bande	L, Ku, Ka	ISM, VHF, L
Antenne	Directive, haute puissance	Faible gain
Latence	Faible à modérée	Modérée à élevée

Angles d'élévation et couvertures

1. Paramètres orbitaux

Constellation	Altitude orbitale h	Rayon orbitale $r = R_e + h$	Rapport $\rho = R_e / r$
Sateliot	550 km	6 378 km + 550 km = 6 928 km	$\rho \simeq 0,9207$
Kinéis	650 km	6 378 km + 650 km = 7 028 km	$\rho \simeq 0,9077$

($R_e = 6\,378\text{ km}$)

2. Calcul de l'angle central de couverture ϕ

D'après la géométrie d'un satellite en orbite circulaire et un angle d'élévation minimal β , on montre (cf. § "Geometrical preliminaries" dans Earth Coverage by Satellites in Circular Orbit) que :

$$\varphi = \arccos(\rho) - \beta$$

où

- $\rho = R_e / (R_e + h)$
- β = angle minimal d'élévation (mask)

3. Résultats numériques

Constellation	ρ	$\arccos \rho$	$\phi = \arccos \rho - 10^\circ$	ϕ (rad)	Rayon de couverture $R_e \cdot \phi$ (km)
Sateliot	0,9207	23,1°	23,1° – 10° = 13,1°	0,2287	6 378 × 0,2287 ≈ 1 458 km
Kinéis	0,9077	25,0°	25,0° – 10° = 15,0°	0,2611	6 378 × 0,2611 ≈ 1 666 km

- Angle central $\phi \simeq 13,1^\circ$ pour Sateliot, $\simeq 15,0^\circ$ pour Kinéis
- Rayon de couverture (distance sub-satellite → bord de zone) $\simeq 1\,460$ km (Sateliot) et $\simeq 1\,670$ km (Kinéis)

En résumé

- Les nanosatellites Sateliot (~550 km d'altitude) offrent une zone de couverture circulaire d'environ 1 460 km de rayon, pour un angle d'élévation minimal de 10°.
- Les nanosatellites Kinéis (~650 km d'altitude) couvrent quant à eux un cercle d'environ 1 670 km de rayon, toujours pour une élévation minimale de 10°.

Bande ISM :

Exemples de bandes ISM utilisées pour l'IoT spatial

- 433 MHz : utilisé par certains modules radio à longue portée.
- 868 MHz : courant en Europe (LoRaWAN).
- 915 MHz : courant en Amérique du Nord.
- 2,4 GHz : bande mondiale (mais plus sensible aux interférences).

Qu'est-ce qu'une bande ISM ?

- Acronyme de "Industrial, Scientific and Medical".
- Bandes de fréquences radio libres de licence pour des usages non commerciaux.
- Exemple de fréquences typiques : 433 MHz, 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz, 5,8 GHz.
- Utilisées par : Wi-Fi, Bluetooth, fours à micro-ondes, IoT, etc.
- Accessible à tous sous réserve de respecter certaines puissances et normes.

Lien avec l'IoT :

- Libres de licence (pas besoin d'allouer une fréquence exclusive).

- Déjà utilisées par de nombreux objets connectés (ex : capteurs LoRa à 868 MHz ou 915 MHz).
- Faibles en consommation d'énergie, idéales pour de petits capteurs distants.

Son fonctionnement en quelques points :

1. Les capteurs au sol (IoT) envoient leurs données en bande ISM.
2. Un satellite en orbite basse (LEO) passe au-dessus et collecte les messages.
3. Les données sont ensuite relayées vers une station au sol.

Globalement, c'est une bonne chose d'utiliser l'ISM car le coût est réduit, on ne loue pas de fréquence dédiée. C'est compatible avec les capteurs déjà existants, et pour les capteurs IoT qui nécessitent de faire attention à l'énergie utilisée, utiliser l'ISM va favoriser une faible consommation d'énergie.

En revanche il y a quelques points à prendre en considération, il peut y avoir des interférences avec d'autres appareils ISM terrestres. La réglementation est stricte en matière d'émission depuis l'espace. Le débit est faible et adapté aux envois de petits paquets et bien sûr les messages ne sont transmis que lors du passage d'un satellite tous les X temps.

Voici en quelques points comment sont gérés les interférences par l'entreprise Lacuna Space, fonctionnement en mode NI/NP :

- Les opérations se font sur une base Non-Interference, Non-Protection (NI/NP), acceptant les interférences sans protection réglementaire spécifique.
- Les technologies comme LoRaWAN sont conçues pour fonctionner dans des environnements bruyants, ce qui permet une cohabitation avec d'autres systèmes.

Article de l'entreprise EchoStar Mobile (<https://echostarmobile.com/blog/standards-for-ntn-lorawan-are-vital-for-achieving-global-connectivity/>) :

Importance de la standardisation :

- Pour une couverture mondiale efficace, il est crucial d'établir une norme pour le LoRaWAN sur les réseaux non terrestres (NTN).
- Cela permettrait une interopérabilité entre les différents opérateurs et technologies, facilitant le déploiement à grande échelle.

Défis liés aux bandes ISM :

- Comme je l'ai déjà dit précédemment, bien que les bandes ISM soient libres d'accès, elles sont sujettes à des interférences et à des restrictions réglementaires, notamment sur l'utilisation des liaisons descendantes.
- Ces limitations compliquent le passage à l'échelle pour des applications IoT massives.

Avantages des bandes licenciées (l'inverse d'ISM) :

- EchoStar Mobile utilise la bande S licenciée (environ 2 GHz) avec des satellites en orbite géostationnaire (GEO), offrant une connectivité plus fiable et moins sujette aux interférences.

Objectif :

- Unir les efforts des opérateurs utilisant des bandes licenciées et non licenciées, ainsi que des satellites en orbite basse (LEO) et géostationnaire (GEO), pour créer un écosystème unifié et standardisé.

Article de l'entreprise Sirin Software (<https://sirinsoftware.com/blog/satellites-in-iot-unlocking-the-potential-of-space-based-communication>) :

Évolution des satellites IoT :

- Les satellites, notamment “les CubeSats” et les constellations en orbite basse (LEO), jouent un rôle croissant dans la connectivité IoT, en particulier dans les zones éloignées ou mal desservies.

Défis techniques :

- Les satellites doivent gérer des contraintes de puissance, de latence et de bande passante, tout en assurant une couverture fiable.
- L'intégration avec les réseaux terrestres et la gestion des interférences dans les bandes ISM sont des aspects critiques.

Images :

1. En France et en Europe
2. Aux Etats-Unis

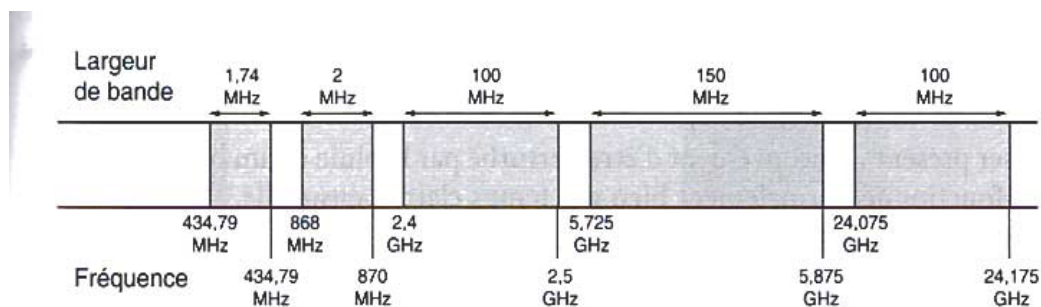
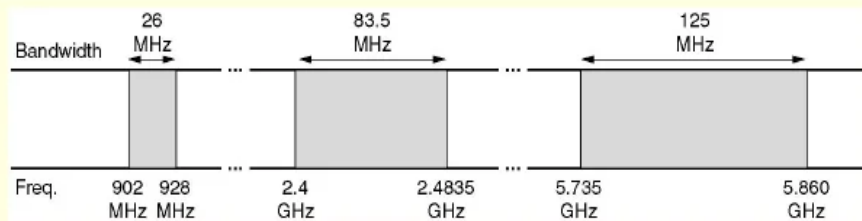


Figure 2.13 • Répartition des bandes ISM en France et en Europe.

La bande ISM

- **ISM Spectrum** (Industrial, Scientific and Medical)
 - Utilisation sans licence individuelle



Bande ISM aux États-Unis

LoRa et LoRaWAN

Contexte IoT et LPWAN

Les projets IoT (Internet des Objets) impliquent souvent des capteurs disséminés dans l'environnement, nécessitant une connectivité longue portée tout en préservant l'autonomie des dispositifs sur batterie. Les réseaux cellulaires classiques ou le Wi-Fi sont trop énergivores ou trop coûteux pour ces usages. C'est là qu'intervient la famille des **LPWAN** (Low Power Wide Area Network), qui vise à offrir des communications longue distance à très faible consommation.

Rôle de Semtech et naissance de LoRa

Semtech a développé la couche physique propriétaire **LoRa** (pour “Long Range”), basée sur une modulation **Chirp Spread Spectrum**(CSS). Cette technique permet d’étendre spectralement les « chirps » (impulsions dont la fréquence croît ou décroît linéairement), offrant une sensibilité exceptionnelle (jusqu’à -137 dBm) et des portées allant souvent au-delà de 10 km en milieu rural sans nécessiter de liaison filaire ni de licence spectrale.

Avantages et compromis de LoRa

- Longue portée & faible débit : en sacrifiant le débit (quelques centaines de bits par seconde), on gagne plusieurs kilomètres de couverture.
 - Faible consommation : les modules restent en veille profonde ($< 1 \mu A$) et ne s’activent que pour émettre ou recevoir, ce qui peut préserver des années d’autonomie sur batterie.
 - Robustesse au bruit et aux interférences : le CSS supporte bien la cohabitation dans les bandes ISM et résiste aux effets de multi-trajets ou Doppler, idéal pour des nœuds en mouvement.
-

Positionnement de LoRaWAN

LoRa ne définit que la couche physique ; c’est la spécification **LoRaWAN** (prise en charge par la LoRa Alliance) qui apporte la gestion réseau (passerelles, serveurs réseau et serveurs applicatifs), la sécurité AES-128, l’**ADR** (Adaptive Data Rate) et les mécanismes d’activation OTAA/ABP.

LoRa et LoRaWAN : principes fondamentaux



LoRa

- **LoRa** (Long Range) est une technologie de modulation en spectre étalé (Chirp Spread Spectrum) développée par Semtech, qui permet à un émetteur basse-consommation d'envoyer de petits paquets de données (0,3 kbps à 5,5 kbps) sur plusieurs kilomètres.
- Un **nœud LoRa** (end node) se compose d'un module radio + antenne et d'un microprocesseur pour traiter les données des capteurs, le tout souvent alimenté par batterie.
- Une **passerelle LoRa** associe elle aussi un module radio + antenne et un processeur, mais est alimentée en permanence et connectée à Internet pour relayer les trames reçues.

LoRaWAN

- **LoRaWAN** est la spécification de couche MAC et réseau définie par la LoRa Alliance, positionnée au-dessus de LoRa (couche physique).
- Le réseau adopte une topologie **étoile** : les nœuds envoient des **uplinks** vers tous les gateways à portée, lesquels les transmettent au **serveur réseau** via IP.
- Le serveur réseau réalise la **dé-duplication** des messages reçus par plusieurs gateways, choisit la meilleure réception, applique le chiffrement et l'ADR (Adaptive Data Rate), puis achemine les données au **serveur applicatif**. Celui-ci peut renvoyer un **downlink** via le même chemin inversé.

Principales différences

Aspect	LoRa	LoRaWAN
Niveau OSI	Couche Physique (PHY)	Couches MAC + Réseau + Application
Fonction	Modulation CSS pour longue portée et bas débit	Gestion des sessions, sécurité, ADR, classes A/B/C
Topologie	Point-à-Point ou Point-à-Multipoint	Star-of-Stars (end-devices -> Gateways -> Network Server)
Sécurité	Aucun mécanisme intégré	AES-128, OTAA/ABP
Gestion du Débit	Paramètres Statiques (SF, BW, CR)	ADR Dynamique
Device Management	N/A	Enregistrement, Activation, Mise à jour des clés

La **modulation Chirp Spread Spectrum (CSS)** encode chaque symbole en émettant un “chirp” dont la fréquence monte ou descend linéairement sur toute la bande allouée, ce qui étale l’énergie du signal, améliore fortement la sensibilité du récepteur (jusqu’à –137 dBm) et offre une robustesse élevée face au bruit, aux interférences et aux effets Doppler.

La **gestion des sessions** en LoRaWAN désigne le mécanisme d’activation des nœuds (OTAA ou ABP) et le maintien de clés de session (DevAddr, NwkSKey, AppSKey) pour chaque appareil ; la **sécurité** repose sur un chiffrement AES-128 bout en bout et la validation d’intégrité (MIC) des messages ; l’**ADR (Adaptive Data Rate)** ajuste automatiquement le facteur d’étalement et la puissance d’émission pour optimiser la fiabilité et la consommation ; enfin, les **classes A/B/C** définissent différents modes de réception (fenêtres RX uniquement après un uplink pour A, fenêtres synchronisées sur balises pour B, écoute permanente pour C) afin d’équilibrer autonomie et latence de downlink.

En LoRa, les nœuds communiquent directement en **point-à-point** (un émetteur vers un récepteur) ou en **point-à-multipoint** (un émetteur vers plusieurs récepteurs LoRa placés dans l’environnement), sans couche réseau formalisée ; en LoRaWAN, on adopte une **topologie étoile-d’étoiles** (« star-of-stars ») où chaque nœud envoie son uplink vers toutes les passerelles à portée (première étoile), puis toutes ces passerelles relaient les trames vers un serveur réseau central (seconde étoile).

LoRaWAN utilise un chiffrement **AES-128** pour garantir à la fois l’intégrité et la confidentialité des messages : deux clés de session sont générées – **NwkSKey** pour valider et chiffrer les échanges réseau (MIC) et **AppSKey** pour chiffrer le payload applicatif – assurant un chiffrement de bout en bout. L’**OTAA** (Over-The-Air Activation) est la méthode d’activation dynamique où

l'appareil envoie une requête de "join" chiffrée avec sa **AppKey** pour obtenir DevAddr, NwkSKey et AppSKey, renouvelés à chaque session. En revanche, l'**ABP** (Activation By Personalization) précharge statiquement DevAddr, NwkSKey et AppSKey dans l'appareil et le serveur, évitant la procédure de "join" mais sans rotation automatique des clés.

En LoRa, le **débit** est déterminé **statistiquement** par trois paramètres radio que l'on fixe à la configuration :

- **Spreading Factor (SF)** (7 à 12)
- **Bandwidth (BW)** (125, 250 ou 500 kHz)
- **Code Rate (CR)** (1–4)

Chaque combinaison de ces valeurs correspond à un **Data Rate** fixe, qui définit à la fois le **débit utile**, la **durée d'antenne** (Time-on-Air) et l'**autonomie** du nœud. Par exemple, un SF élevé améliore la portée mais allonge fortement le Time-on-Air et réduit le débit .

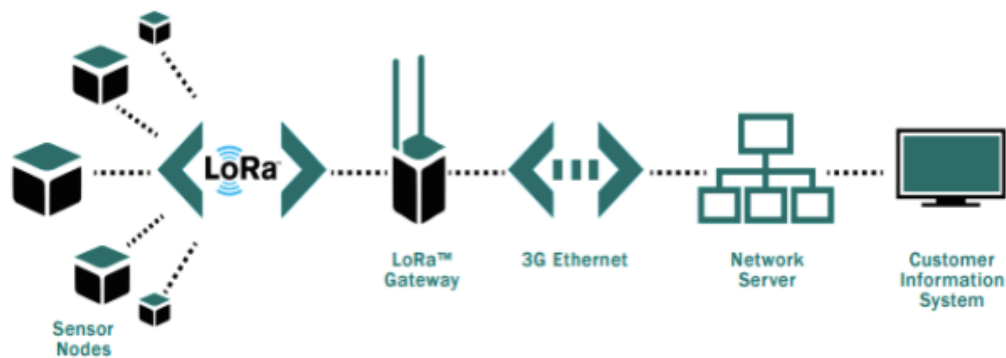
En LoRaWAN, on utilise l'**ADR (Adaptive Data Rate)** pour **ajuster dynamiquement** ces mêmes paramètres (SF, BW et puissance d'émission) : le **Network Server** analyse les dernières mesures de SNR et de Data Rate de chaque nœud, calcule une **marge** optimale, puis renvoie au nœud les réglages optimisés pour garantir un lien fiable tout en minimisant la consommation batterie .

Le **device management** en LoRaWAN englobe l'ensemble des opérations pour prendre en charge un nœud tout au long de son cycle de vie : son **enregistrement** dans le serveur réseau (association d'un DevEUI/AppEUI et des droits d'accès), son **activation** (via OTAA ou ABP pour lui attribuer ou lui précharger une adresse et des clés de session), et la **mise à jour** de ces clés ou de ses paramètres (par MAC-commands envoyées en downlink) pour garantir sécurité et performance.

En résumé, LoRa fournit le **canal radio** pour des transmissions longue portée et basse consommation, tandis que LoRaWAN ajoute la **couche réseau** complète – gestion des clés, adaptation de débit, routage, sécurité et prise en charge de millions de capteurs dans une infrastructure scalable.

LoRa

Architecture



La **pile LoRa** se limite à la **couche physique (PHY)** définie par Semtech. Chaque nœud (end-device) embarque :

1. Capteur(s)

Convertit la grandeur physique (température, humidité, position...) en signal électrique.

2. Microcontrôleur (MCU)

- Prépare les données du capteur
- Gère le protocole MAC minimal LoRa (cadence d'envoi, temporisation)
- Communique avec le module radio via SPI ou UART.

3. Module LoRa (Transceiver)

- Modulation **Chirp Spread Spectrum (CSS)** pour étaler le signal et augmenter la sensibilité (jusqu'à -137 dBm)
- Paramètres configurables :
 - **Spreading Factor (SF)** (7–12)
 - **Bandwidth (BW)** (125/250/500 kHz)
 - **Code Rate (CR)** (1–4)
- Contrôle automatique de gain et détection d'activité de canal (CAD) .

4. Antenne

- Accordée à la bande 868 MHz (Europe) ou 915 MHz (US)
- Types courants : dipôle, monopôle, PCB, céramique.

5. Alimentation

- Batterie (Li-Po, AA) ou alimentation externe
- MCU et module LoRa ont des modes veille profonds ($< 1 \mu A$) pour maximiser l'autonomie.

Fonctionnement simplifié

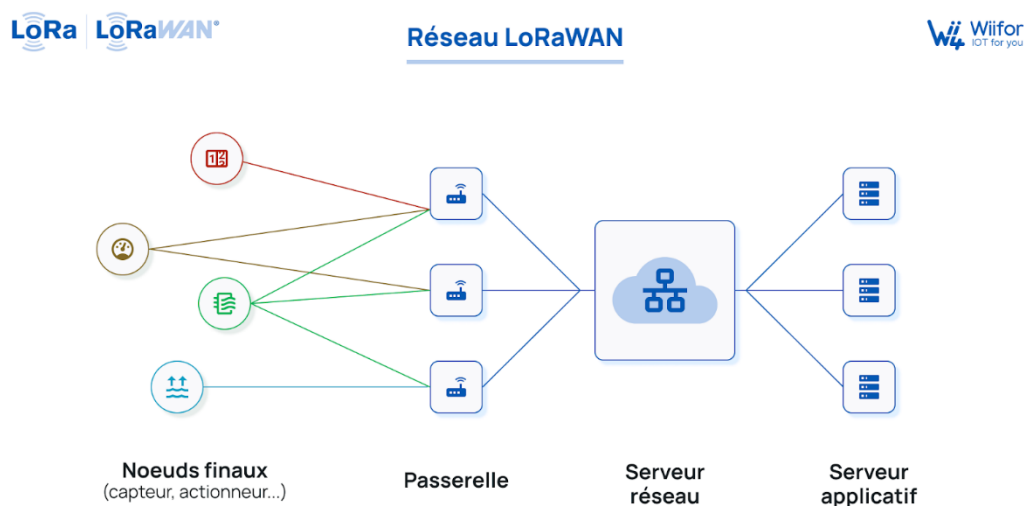
Le MCU orchestre les mesures, formate un paquet PHY LoRa, commande le transceiver pour émettre un « chirp » via l'antenne, puis bascule celui-ci en réception courte (mode CAD ou RX single) avant de retourner en veille.

Cette **architecture matérielle simple** (capteur–MCU–transceiver–antenne) garantit :

- **Ultra-basse consommation**,
- **Longue portée** (jusqu'à 15 km en champ libre),
- **Robustesse** face aux interférences grâce au CSS.

LoRaWAN

Architecture



L'architecture LoRaWAN se compose de quatre éléments principaux, organisés en une topologie **star-of-stars** (architecture où les capteurs communiquent en étoile vers plusieurs passerelles, qui à leur tour forment une seconde étoile en relayant toutes ces données vers un serveur réseau central) :

1. Nœuds (End Devices)

Les capteurs ou actionneurs IoT, appelés « nœuds », sont équipés d'un module radio LoRa. Ils génèrent des **uplinks** (données des capteurs) à intervalles programmés ou sur événement. Selon leurs besoins en énergie et latence, ils opèrent en **Classe A, B** ou **C**, dictant leurs fenêtres de réception pour les **downlinks** (commandes ou confirmations).

2. Passerelles (Gateways)

Les passerelles reçoivent les signaux LoRa RF des nœuds et les transmettent au serveur réseau via un back-haul Internet (Ethernet, Wi-Fi, cellulaire). Elles ne filtrent pas les paquets, chaque trame est envoyée au serveur réseau, souvent via le **Semtech UDP Packet Forwarder** ou le **ChirpStack Gateway Bridge**.

- Protocoles de transport : UDP/TCP avec TLS pour la sécurité au niveau IP.
- Fonctions : multi-canaux (jusqu'à 8 canaux simultanés), décodage PHY minimal, relais.

3. Serveur Réseau (Network Server)

Le cœur de la logique LoRaWAN :

- **Dé-duplication** des trames reçues par plusieurs gateways.
- **Sécurité** : vérification des MIC, gestion des clés session (OTAA/ABP).
- **ADR (Adaptive Data Rate)** : ajuste dynamiquement le **Spreading Factor** et la puissance pour optimiser la fiabilité et la consommation.
- Routage des paquets vers le serveur applicatif approprié.

4. Serveur Applicatif (Application Server)

Module final qui déchiffre et formate le **payload** (via JSON, Cayenne LPP, etc.), puis offre les données :

- **API MQTT** ou **REST** pour récupérer en temps réel les mesures.
- **Webhooks** pour pousser automatiquement les événements vers votre application web.
- Intégration avec des bases de données, plateformes BI ou dashboards IoT.

Flux de données

- **Uplink** :

Nœud → Gateway (RF LoRa) → Network Server (IP back-haul) → Application Server → Application Web

- **Downlink** :

Application Web → Application Server → Network Server → Gateway → Nœud

Chaque transmission RF est chiffrée de bout en bout (AES-128) : la couche réseau (NwkSKey) assure l'intégrité, et la couche applicative (AppSKey) protège le contenu des capteurs .

Cet agencement **star-of-stars** garantit :

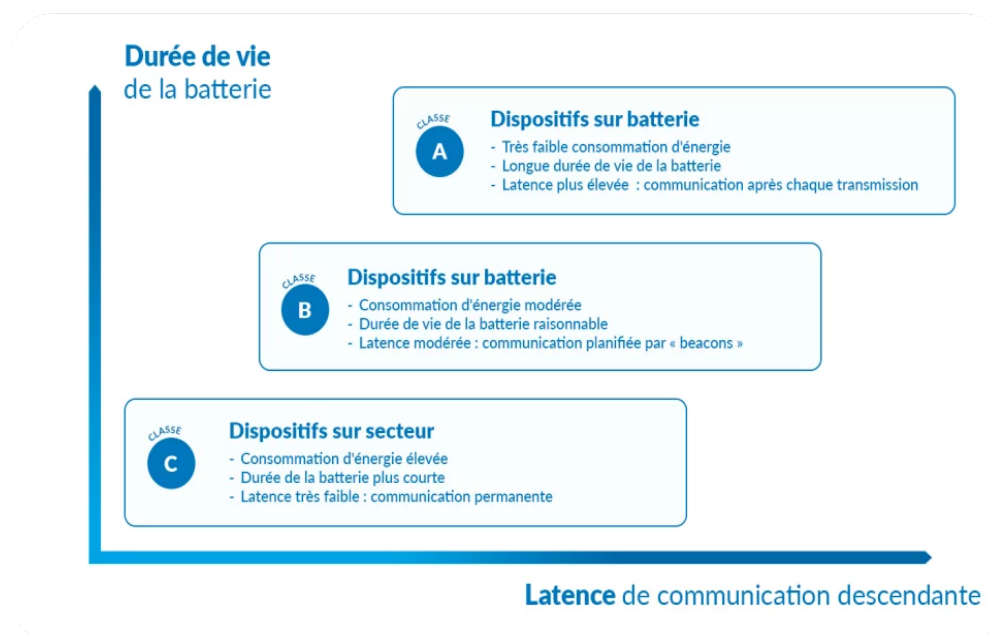
- **Scalabilité** : des milliers de nœuds par secteur couvert par quelques gateways.

- **Fiabilité** : redondance des réceptions par plusieurs gateways.
- **Flexibilité** : support multi-applications via des serveurs applicatifs distincts.

La visualisation schématique ci-dessus illustre clairement ces interactions et la séparation des responsabilités réseau et applicative.

Architecture et classes de dispositifs

Classes de dispositifs LoRaWAN



Une **passerelle** LoRaWAN agit comme un simple “relay” : elle capte toutes les trames radio en 868 MHz (EU) ou 915 MHz (US) et les achemine vers le serveur réseau via Internet (packet forwarder Semtech). Le **serveur réseau** filtre les doublons, gère l’adaptation dynamique du débit (ADR) et la sécurité (OTAA/ABP), puis transmet les données au **serveur applicatif**, qui les stocke, analyse ou expose via une API.

Trois classes de dispositifs existent :

- **Classe A** (la plus économe) : chaque envoi d’uplink ouvre deux courtes fenêtres de downlink, le reste du temps l’émetteur reste éteint.
- **Classe B** : ajoute des fenêtres de réception planifiées (beacons) pour des downlinks synchrones, au prix d’un léger surcoût énergétique.
- **Classe C** : l’émetteur reste à l’écoute en permanence, limitant l’économie d’énergie mais minimisant la latence de downlink.

Paramètres radio et performances

Pour dimensionner un lien, on calcule le **link budget** : somme de la puissance d'émission (EIRP), des gains d'antenne, moins les pertes en espace libre et sur câble. Les notions de **RSSI** (signal reçu) et **SNR** (rapport signal sur bruit) déterminent si une trame est décodable. Les réglementations européennes fixent un EIRP maximal à 14 dBm en bande 868 MHz, et un cycle de service limité à 1 % (duty-cycle).

Lien avec Projet

1. Angles d'élévation et fenêtres de visibilité

- **Angle d'élévation minimal** : pour garantir un niveau de signal suffisant, on considère généralement une élévation minimale de **10°** tant pour la liaison montante (UE → satellite) que pour la liaison descendante (satellite → gateway) .
- **Fenêtre de visibilité** : la durée pendant laquelle le satellite reste au-dessus de cet angle dépend de l'orbite (LEO/MEO/GEO) et de la latitude de l'UE, et doit être calculée via les TLE. Par exemple, pour un LEO à 600 km, la visibilité typique autour du zénith peut durer ~10–15 min selon la trajectoire .

2. Budget de liaison et distance maximale

- **Distance maximale** au point de visibilité minimale (10°) :
- LEO 600 km : ~1 932 km
- LEO 1 200 km : ~3 131 km
- GEO 35 786 km : ~40 581 km
- **Liberté spatiale (Free-Space Path Loss)** : intégrez la formule FSPL pour estimer l'affaiblissement en fonction de la fréquence LoRa (868 MHz) et de ces distances.

3. Latence (Round-Trip Delay)

- **RTD maximal** (propagation only) sur l'interface radio satellite–gNB :
 - GEO transparent : **541,5 ms**
 - LEO transparent à 600 km : **25,8 ms**
 - LEO régénératif à 600 km : **12,9 ms**
 - Impact sur LoRaWAN : pour une classe A, prévoir que la fenêtre de réception après un uplink (RX1/RX2) peut être décalée de plusieurs dizaines de ms ; ajustez les timers RxWindow en conséquence.
-

4. Effets Doppler et fréquence

- **Décalage Doppler maximal** (UE stationnaire) :
 - LEO 600 km : **24 ppm** (~20 kHz à 868 MHz)
 - LEO 1 200 km : **21 ppm**
 - **Variation de Doppler** : jusqu'à **0,27 ppm/s** pour LEO 600 km, soit ~230 Hz/s.
 - **Conséquence** : même si la modulation CSS de LoRa tolère un certain Doppler, il peut être nécessaire de recalibrer la fréquence porteuse en temps réel ou d'augmenter la marge CF-offset dans le récepteur.
-

5. Différences de délai à l'intérieur d'une cellule

- **Différentiel de délai maximal** dû à la taille du faisceau :
- GEO : ~10,3 ms
- LEO 600 km : ~3,1 ms
- LEO 1 200 km : ~3,2 ms
- À prendre en compte si on multiplie plusieurs capteurs sur la même liaison ou si on envisage des retransmissions HARQ/RLC.

Méthode d'envoi de données

Spreading Factor (SF) :

Exemples de valeurs de Spreading Factor utilisées avec LoRa :

SF7 : rapide, portée réduite, faible robustesse au bruit.

SF9 : bon compromis portée/débit.

SF12 : très lent mais très robuste, utile pour les longues distances ou signaux faibles.

Qu'est-ce que le Spreading Factor ?

Le Spreading Factor (SF) désigne le facteur d'étalement du signal LoRa.

C'est un paramètre qui détermine combien de symboles LoRa sont utilisés pour transmettre un bit.

Il permet d'ajuster la portée, la vitesse de transmission et la robustesse du lien radio.

Plus la valeur de SF est élevée, plus la transmission est lente mais résistante au bruit.

Lien avec l'IoT :

Permet de s'adapter à la distance entre le capteur et la passerelle ou satellite.

Permet une communication même avec un signal très faible, utile pour les capteurs isolés.

Contribue à l'optimisation énergétique, surtout dans les zones rurales ou mal couvertes.

Son fonctionnement en quelques points :

Le capteur choisit (ou reçoit dynamiquement) un SF selon la qualité du lien.

Un SF bas (SF7) est rapide, donc économise du temps de transmission.

Un SF élevé (SF12) prend plus de temps, mais permet de recevoir un message plus faible dans un environnement bruyant.

Le réseau peut activer l'ADR (Adaptive Data Rate) pour ajuster dynamiquement le SF.

Globalement, c'est une bonne chose d'avoir un large éventail de SF, cela permet d'optimiser le compromis entre portée, débit et énergie consommée, selon chaque cas d'usage.

Mais il faut garder à l'esprit que plus le SF est élevé, plus le temps à l'antenne est long, ce qui peut saturer le réseau si trop de capteurs l'utilisent en même temps.

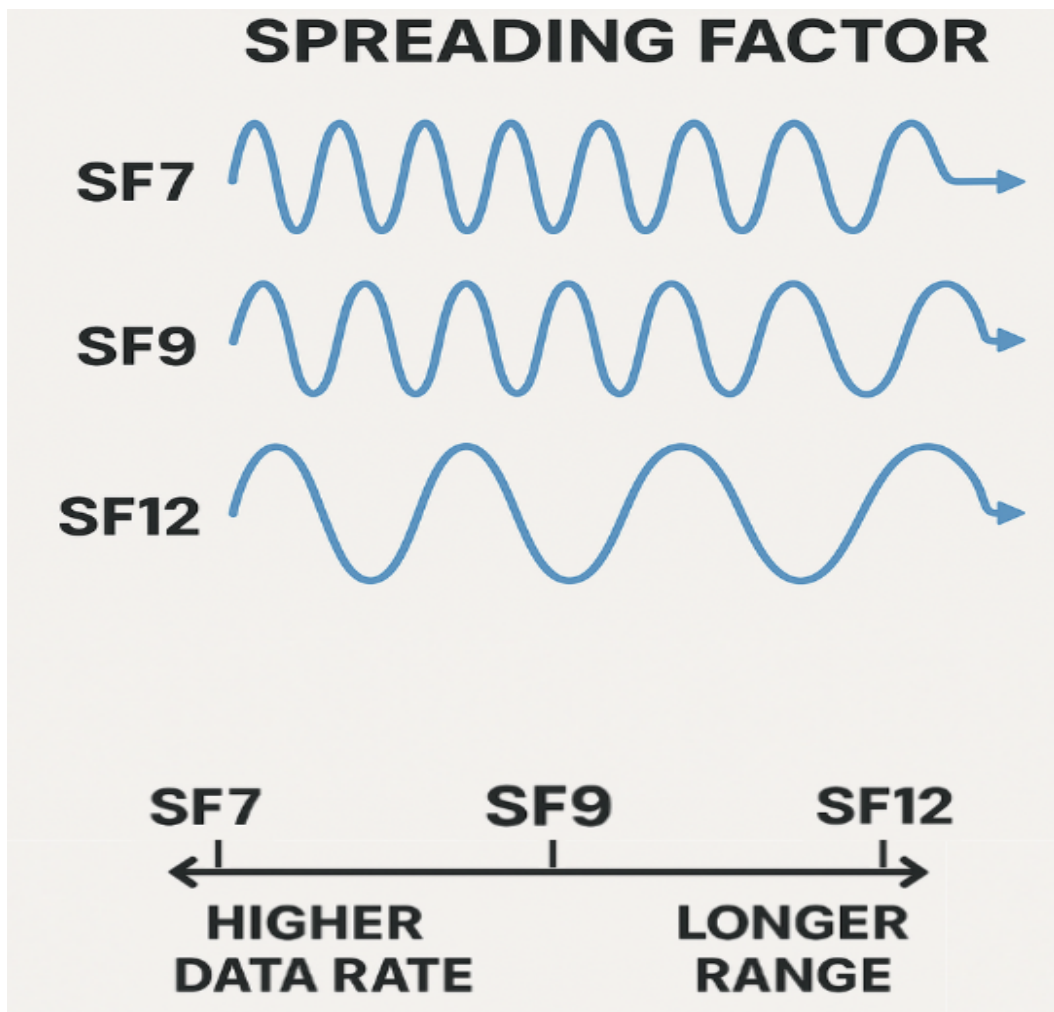
Dans le contexte spatial (IoT par satellite), on privilégie des SF élevés (ex. SF12) car les signaux sont très faibles et les fenêtres de communication sont courtes.

Voici en quelques points pourquoi le SF est adapté aux environnements bruités :

Il étale le signal dans le temps, ce qui permet de le distinguer du bruit de fond.

La modulation LoRa permet d'extraire un message même s'il est noyé dans le bruit.

Les SF sont partiellement orthogonaux, donc plusieurs messages avec des SF différents peuvent être reçus en parallèle sans interférence directe.



LRFHSS

Le **LR-FHSS** (Long Range – Frequency Hopping Spread Spectrum) est une **technologie de modulation** radio récente, utilisée notamment dans la **version 2.4** du protocole **LoRaWAN**, conçue pour permettre des **communications longue portée à très faible débit**, avec une **robustesse accrue aux interférences** et une **capacité réseau bien plus élevée** que les versions précédentes.

Définition rapide

LR-FHSS = *Long Range – Frequency Hopping Spread Spectrum*

C'est un **mécanisme de modulation** qui combine deux choses :

- La **longue portée** de LoRa (ou plutôt d'une modulation robuste similaire),
- Le **saut de fréquence** rapide (FHSS) pour éviter les interférences.

Pourquoi utiliser LR-FHSS ?

Les protocoles LoRa classiques (LoRaWAN 1.0/1.1) utilisent une modulation appelée **Chirp Spread Spectrum (CSS)**. Cette modulation est très robuste mais **limite le nombre d'appareils** pouvant transmettre en même temps sur un canal donné.

LR-FHSS a été introduit pour :

- **Augmenter la capacité réseau** (plusieurs millions de capteurs par satellite ou passerelle),
- **Mieux résister aux interférences** (milieux industriels, satellites, ISM partagée),
- **Réduire les collisions** entre capteurs,
- **Permettre des communications vers satellite** (notamment avec constellations LEO).

Comment fonctionne le LR-FHSS ?

1. FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

- Le message est **découpé en petits paquets**,
- Chaque paquet est envoyé sur une **fréquence différente**,

- Le récepteur connaît la séquence de fréquences (pseudo-aléatoire) pour reconstruire le message.

Cela réduit :

- les **risques de brouillage** (si une fréquence est perturbée),
- les **interférences** avec d'autres utilisateurs de la bande.

2. Long Range

Contrairement au LoRa classique :

- On utilise ici des modulations **plus simples** (non chirpées) mais **plus codées** (FEC + redondance).
- La portée est **similaire voire supérieure** à celle de LoRa classique (jusqu'à 150 km dans des cas extrêmes).
- Le débit est **extrêmement bas** (parfois < 300 bps) mais très robuste.

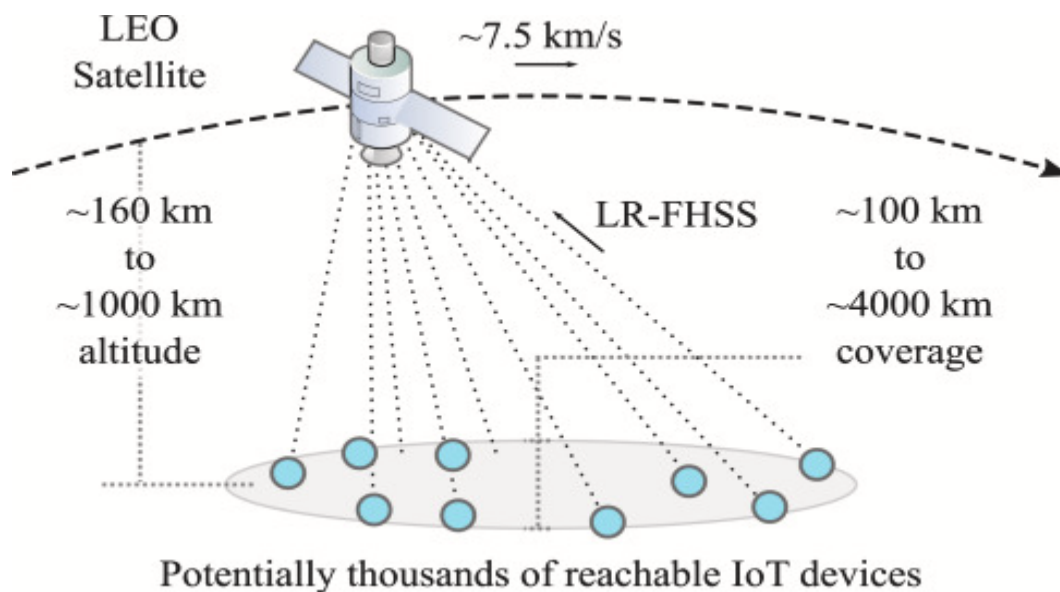
Caractéristiques techniques

Paramètre	Valeur typique LR-FHSS
Débit	100 à 300 bps (très bas)
Bande	ISM (ex : 868 MHz, 915 MHz)
Largeur de bande effective	152.34 kHz à 392.19 kHz (selon région)

Saut de fréquence	Oui, sur plusieurs canaux dans la bande
Temps d'émission (ToA)	Long (jusqu'à plusieurs secondes)
Robustesse	Très élevée
Nombre d'utilisateurs	>10× plus que LoRa classique
Puissance typique	14 dBm (25 mW)
Réglementation	Conforme ETSI / FCC / ARIB

Sources fiables

1. **ResearchGate – LR-FHSS Overview and Performance Analysis**
https://www.researchgate.net/publication/351293395_LR-FHSS_Overview_and_Performance_Analysis
2. **LoRa Alliance – LoRaWAN 1.0.4 / 1.1 specifications**
<https://lora-alliance.org>
3. **White Paper Semtech sur LR-FHSS pour satellite :**
<https://www.semtech.com/company/press/semtechs-long-range-frequency-hopping-spread-spectrum-lr-fhss-technology-extends-the-range-and-capacity-of-lorawan-networks>

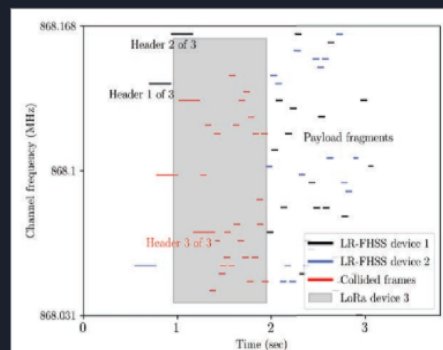
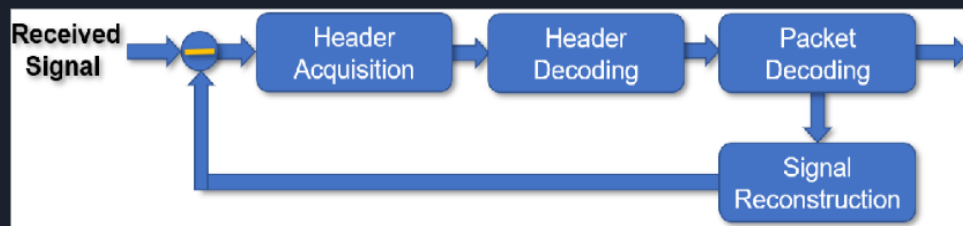


https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS1389128624008508&psig=AOvVaw3O0J53mdEW_wjAmeaSz1Wr&ust=1747744319455000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQQjRxqFwoTCOjOvlzFr40DFQAAAAAdAAAAABAM

Comparatif entre SF et LR-FHSS :

Critères techniques	Spreading Factor	LR-FHSS
Type de modulation	Chirp Spread Spectrum (CSS)	Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Largeur de bande OCW	125 kHz	137 kHz (DR8/9) ou 336 kHz (DR10/11)
Canaux physiques (OBW)	– (pas de fragmentation)	35 (DR8/9) ou 86 (DR10/11)
Portée	Modérée selon SF utilisé	Optimisée
Vitesse	de 250 bit/s à 5470 bit/s pour les SF les plus bas	Entre 162 et 325 bit/s
Gestion des interférences	ALOHA simple – collisions fréquentes	Sauts de fréquence + redondance de fragments
Surconsommation énergétique	Base	+ 30 %

Images du fonctionnement plus en détail du LR-FHSS ainsi qu'un code de redondance associé au LR-FHSS :



```

1 import reedsolo
2
3 # Initialisation du code RS(7,3) : 3 données utiles, 4 redondantes
4 rs = reedsolo.RSCodec(nsym=4)
5
6 # Données à transmettre : 3 octets
7 message = b'\x01\x05\x0c'
8
9 # Encodage : production de 7 octets (3 + 4)
10 encoded = rs.encode(message)
11 print("Encodé :", encoded)
12
13 # Corruption simulée de 2 octets
14 corrupted = bytearray(encoded)
15 corrupted[1] = 0x00
16 corrupted[5] = 0x00
17 print("Corrompu :", corrupted)
18
19 # Décodage avec correction d'erreurs
20 try:
21     decoded = rs.decode(corrupted)
22     print("Décodé :", decoded)
23 except reedsolo.ReedSolomonError as e:
24     print("Erreur de décodage :", e)
25

```

Console

Exécuter

Encodé : bytearray(b'\x01\x05\x0c\xead\x18\x9e')

Corrompu : bytearray(b'\x01\x00\x0c\xead\x00\x9e')

Décodé : (bytearray(b'\x01\x05\x0c'), bytearray(b'\x01\x05\x0c\xead\x18\x9e'), bytearray(b'\x05\x01'))

Celestrak

CelesTrak, TLE et omnetpp

1. CelesTrak

CelesTrak est un service en ligne qui fournit des données orbitales à jour pour les objets spatiaux, notamment les satellites. Il est largement utilisé pour :

- Suivi de satellites en temps réel,
- Fourniture de fichiers TLE (Two-Line Elements),
- Études scientifiques et ingénierie spatiale.

Il est très utile pour les développeurs de systèmes de suivi de satellites, les simulateurs, ou encore les applications d'observation de la Terre.

2. TLE (Two-Line Element set)

Les TLE sont des fichiers de données textuels qui contiennent les éléments orbitaux d'un satellite à un moment donné. Un TLE contient :

- Le nom du satellite (optionnel),
- Deux lignes codées avec des paramètres orbitaux (inclinaison, excentricité, etc.).

Ces données permettent de calculer la position d'un satellite dans le ciel à tout moment avec des logiciels comme SGP4, STK ou avec un script python.

3. OMNeT++

OMNeT++ est un simulateur de réseau open-source, très utilisé dans :

- Les réseaux sans fil (wireless),
- Les réseaux mobiles, IoT, VANETs, réseaux spatiaux, etc.
- La modélisation de protocoles et topologies personnalisées.

Utilisation conjointe :

Dans certains projets (ex. simulation de réseaux de satellites), on peut utiliser :

- TLE de CelesTrak pour positionner correctement les satellites,
- OMNeT++ pour simuler la communication entre satellites, stations au sol, etc.

Exemple TLE :

ISS (ZARYA)

```
1 25544U 98067A 24126.54861111 .00016717 00000-0 10270-3 0 9990
2 25544 51.6443 184.1583 0005141 20.9186 339.2132 15.50376215 21312
```

Champ	Position (ex. ligne ci-dessus)	Description
1	1	Numéro de ligne (toujours "1")
Satellite Number	25544	Numéro NORAD du satellite
Classification	U	Type (U = Unclassified, C = Classified, S = Secret)
International Designator	98067A	Année de lancement (98), numéro de lancement de l'année (067), pièce (A)

Epoch (JJJ.jjj)	24126.54861111	Date julienne du TLE : jour de l'année (126 = 6 mai), fraction du jour
1st Derivative of Mean Motion	.00016717	Variation moyenne de l'orbite (résistance atmosphérique, etc.)
2nd Derivative of Mean Motion	00000-0	Deuxième dérivée (souvent négligée)
BSTAR drag term	10270-3	Paramètre de traînée atmosphérique (coefficient empiriquement ajusté)
Ephemeris type	0	Toujours 0 (non utilisé actuellement)
Element set number	999	Numéro de version des éléments
Checksum	0	Somme de contrôle (modulo 10) pour vérifier l'intégrité

Champ	Position (ex. ligne ci-dessus)	Description
2	2	Numéro de ligne (toujours "2")
Satellite Number	25544	Doit correspondre à la ligne 1
Inclination [°]	51.6443	Inclinaison orbitale (angle par rapport à l'équateur)
RAAN [°]	184.1583	Longitude du nœud ascendant (Ω)
Eccentricity	0005141	Excentricité orbitale (sans virgule, donc 0.0005141)
Argument of Perigee [°]	20.9186	Angle entre le nœud ascendant et le périhélie

Mean Anomaly [°]	339.2132	Position actuelle sur l'orbite
Mean Motion [rev/jour]	15.50376215	Nombre de révolutions complètes par jour
Revolution number at epoch	21312	Compteur de révolutions depuis le lancement
Checksum	2	Somme de contrôle (comme pour la ligne 1)

Application

https://drive.google.com/file/d/1LTaP-F2bXDn3N6tQwpdkjdtV7JGKnDP9/view?usp=drive_link



Documentation Celestrak

<https://celestrak.org/NORAD/documentation/>

Bibliothèques Python utilisées

Comparatif Skyfield, PyEphem, AstroPy :

Caractéristique	Skyfield	PyEphem	AstroPy
Support des satellites artificiels	Oui, complet (via TLE)	Oui (via TLE, mais limité)	Non intégré nativement
Format d'entrée satellites	TLE (Two-Line Elements)	TLE	Aucun
Moteur de calcul orbital	Algorithme SGP4 conforme NORAD	SGP4 aussi (implémentation en C intégrée)	Aucun moteur orbital
Mises à jour des TLE	Facile via <code>load.tle()</code> ou fichiers Celestrak / Space-Track	Manuel (doit parser fichier texte TLE)	Non concerné
Référentiel / frame	ITRF, GCRS, TEME, ECI, observer position Earth-fixed disponible	TEME uniquement	AstroPy peut transformer les coordonnées mais pas les générer
Position observateur personnalisée	Oui, lat/lon/alt ou vecteur	Oui	En support de transformation, mais pas en calcul initial
Éphéméride du satellite vs observateur	Très précis (sub-mètre, dépendant du TLE et propagation)	Précis, mais moins bien intégré aux référentiels modernes	Non prévu

Sorties	Vecteurs position/velocity, alt/az, élévation, passes	Alt/az, élévation, next pass	Pas applicable
Utilisation avec JPL SPK ?	Non (pour satellites, seulement TLE)	Non	Non
Support de l'occultation / visibilité	Oui (élévation, illumination du satellite, etc.)	Partiel (élévation, pas d'ombre/illumination natif)	Non applicable
Exemple satellite : ISS	Très facile avec <code>EarthSatellite.from_tle() + at(t).observe()</code>	Possible mais API plus rigide	Nécessite Skyfield ou autre bibliothèque

Comparatif : Calcul de positions de satellites artificiels

Résumé ciblé

Besoin	Meilleure bibliothèque
Calcul précis de l'orbite TLE	Skyfield
Script léger, sans dépendances	PyEphem
Transformations coordonnées only	AstroPy (en support)

Pour tout projet sérieux ou moderne de suivi de satellites (ISS, Starlink, etc.), Skyfield est clairement la meilleure option :

- Il supporte directement les TLE modernes,
- Il intègre le modèle SGP4 officiel (via `sgp4` Python package),
- Il permet d'ajuster la position d'un observateur sur Terre avec des références actuelles (ITRF),

- Il donne les éphémérides alt/az, vitesse, élévation, visibilité, etc.
-

Algorithme SGP4

Algorithme SGP4

1. Définition

- **SGP4** signifie **Simplified General Perturbations model 4**.
- C'est un **algorithme orbital** qui permet de **calculer la position et la vitesse d'un satellite** à un instant donné.
- Il est utilisé avec des fichiers **TLE (Two-Line Elements)** pour prédire la trajectoire des satellites.

2. Entrées nécessaires

- Un **fichier TLE**, qui contient deux lignes de données orbitales standardisées :
 - Inclinaison orbitale
 - Excentricité
 - Moment de passage au périhélie
 - Mouvement moyen (orbites/jour), etc.

- Une **date et heure précises** (sous forme de datetime)

3. Sorties de l'algorithme

- **Position du satellite** dans l'espace (coordonnées X, Y, Z ou latitude, longitude, altitude)
- **Vitesse du satellite**
- **Prévision de trajectoire** (passages, élévation, visibilité depuis un point au sol)

4. Utilité dans un projet IoT spatial

- Prédire **quand un satellite passera à portée** d'un capteur au sol.
- **Calculer les fenêtres de communication** entre un objet connecté et un satellite.
- Optimiser les transmissions : envoyer les données **au bon moment** pour maximiser les chances de réception.
- Utilisé pour **l'analyse de couverture** ou la simulation du réseau.

5. Implémentation (Python)

- Utilisation possible avec la bibliothèque **sgp4** directement, ou via **Skyfield** qui intègre SGP4 avec des fonctions plus simples.

- Exemple de bibliothèques utiles :
 - sgp4.api pour traiter les lignes TLE manuellement
 - Skyfield pour obtenir les coordonnées géographiques facilement
 - geopandas, matplotlib pour visualiser les orbites

6. Exemple d'application

Un capteur situé dans une forêt doit envoyer des données via un satellite LEO. Grâce à SGP4, on peut prédire le passage du satellite au-dessus du capteur et déclencher l'envoi uniquement à ce moment-là, ce qui permet **d'économiser de l'énergie** et de **garantir la réception**.

7. Pourquoi c'est important ?

- Sans SGP4, on ne peut **pas exploiter les TLE** pour connaître la position réelle d'un satellite.
 - C'est un **standard reconnu** dans le monde spatial (NASA, CelesTrak, NORAD, etc.).
 - Permet de **modéliser un réseau satellite en temps réel**, indispensable dans un projet IoT non-terrestre.
-

Sources :

https://cnes.fr/sites/default/files/migration/automne/standard/2014_10/p10688_2fd578009e14ecf8e083c10a877b6060CNESMAG-Poster-GEO-MEO-LEO-v2.pdf

https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits

<https://www.theverge.com/space/657113/starlink-amazon-satellites>

<https://www.reuters.com/markets/deals/eutelsat-announces-contract-with-airbus-100-satellites-2024-12-17>

<https://apnews.com/article/1a1c53a6a44f3f9bd9426bb1f56405c9>

<https://www.satellitetoday.com/content-collection/ses-hub-geo-meo-and-leo/>

Balanis, C. A. – *Antenna Theory: Analysis and Design*

Référence de base pour comprendre le lien entre puissance, gain d'antenne et distance.

Friis Transmission Equation (théorie classique)

Présentée dans tout cours ou article sur la transmission radio :

↳ [Wikipedia - Friis Transmission Formula](#)

ITU (International Telecommunication Union)

Rapports techniques sur les pertes de propagation, puissances typiques, bandes satellites :

↳ <https://www.itu.int/>

NASA & ESA educational resources

Pour les données d'orbite, distances, et angles de visibilité.

↳ <https://www.nasa.gov/>

↳ <https://www.esa.int/>

U.S. NAVSTAR GPS specifications (IS-GPS-200)

Donne les puissances typiques, fréquences, modulation et structure des signaux GPS.

↳ <https://www.gps.gov/technical/icwg/>

Swarm Technologies (filiale de SpaceX) – Données techniques sur IoT via satellite.

↳ <https://www.swarm.space/>

Sigfox & LoRa Alliance white papers

Très clairs sur les budgets énergétiques et la faible puissance utilisée.

↳ <https://www.sigfox.com>

↳ <https://lora-alliance.org/>

Sateliot / Kinéis / Lacuna – Fournisseurs de services IoT via satellite en orbite basse.

↳ <https://www.sateliot.space>

↳ <https://www.kineis.com>

↳ <https://www.lacuna.space>

Texas Instruments, STMicroelectronics, Semtech – Fiches techniques de composants radio IoT (LoRa, Zigbee, etc.)

↳ <https://www.ti.com>

↳ <https://www.st.com>

↳ <https://www.semtech.com>

IEEE papers sur l'optimisation de l'énergie pour les capteurs sans fil et satellites.

[EFFET DOPPLER](#)  [Explication + Formules](#) | [Terminale spécialité](#)

https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html

<https://www.thethingsnetwork.org/>