

TRANSMISSION DES DONNEES PAR SATELLITE POUR LE PROJET ECOLOGGING

Master 2 Ingénierie des Systèmes Embarqués



Réalisé par :

- **AZALLAL Mohamed**
- **CHALAL Katia**
- **GOUCHICHE Hani**
- **MARIR Badr Eddine**

Encadré par :

- **Mr P. Bordenave**
- **Mr P. Chaumeil**

Table des matières :

I. Introduction générale :	1
1) Contexte du projet ECOLOGGING :	1
2) Problématique de la transmission en zones isolées :	1
3) Objectifs de l'état de l'art :	2
4) Organisation du chapitre :	2
II. Contexte applicatif et contraintes du système embarqué :	2
1) Description d'une station instrumentée ECOLOGGING :	2
2) Contraintes environnementales :	3
3) Contraintes énergétiques :	3
4) Contraintes de communication :	3
5) Contraintes de coût et de déploiement :	4
III. Principes généraux de la communication par satellite IoT :	4
1) Notions de base des communications satellites :	4
2) Types d'orbites utilisées (LEO, MEO, GEO) :	5
3) Spécificités des communications satellite pour l'IoT :	6
4) Comparaison avec les réseaux terrestres (4G, LoRaWAN, Satellite IOT) :	6
IV. Solutions existantes de transmission satellite pour l'IoT :	7
1) Présentation générale des technologies disponibles :	7
2) Modules matériels compatibles systèmes embarqués :	7
3) Interfaces de communication avec le microcontrôleur :	8
4) Contraintes d'intégration matérielle et logicielle :	8
V. Gestion des données transmises par satellite :	10
1) Types de données environnementales à transmettre :	10
2) Format et structuration des messages :	10
3) Taille maximale des messages et débit autorisé :	11
4) Fréquence et volume de transmission journalière :	11
VI. Consommation énergétique et autonomie du système :	12
1) Profil énergétique des modules satellites :	12
2) Modes veille et émission :	12
3) Stratégies d'optimisation de la consommation :	13
4) Impact sur l'autonomie globale de la station :	13
VII. Synchronisation et gestion des communications satellites :	14
1) Principe de visibilité des satellites :	14
2) Synchronisation des transmissions :	14
3) Gestion des pertes de liaison :	15
4) Stockage local et retransmission des données :	16
VIII. Comparaison des solutions de transmission satellite :	17
1) Critères de comparaison :	17
2) Comparaison technique des solutions étudiées :	17
3) Comparaison énergétique :	17
4) Comparaison économique :	17

5)	18
IX. Choix d'une solution adaptée au projet ECOLOGGING :	18
1) Analyse de l'adéquation aux contraintes du projet :	18
2) Justification du choix technologique :	18
3) Limites de la solution retenue :	18
X. Proposition d'architecture système :	18
1) Architecture matérielle globale :	18
2) Architecture logicielle embarquée :	20
3) Cycle de fonctionnement de la station :	20
4) Scénario de transmission des données :	20
Liste des acronymes et abréviations:	21

Liste des acronymes et abréviations:

RF (Radio Frequency) : Domaine des fréquences électromagnétiques utilisées pour la transmission sans fil des signaux (radio, satellite, cellulaire).

IOT (Internet of Things) : Réseau d'objets connectés capables de collecter et d'échanger des données via des réseaux de communication.

M2M (Machine-to-Machine) : Communication automatique entre machines sans intervention humaine directe.

LEO (Low Earth Orbit) : Orbite terrestre basse, située entre environ 500 et 1 500 km d'altitude, offrant une faible latence.

MEO (Medium Earth Orbit) : Orbite terrestre moyenne, située entre 5 000 et 20 000 km, utilisée notamment pour les systèmes GNSS.

GEO (Geostationary Earth Orbit) : Orbite géostationnaire à 35 786 km d'altitude, permettant une couverture permanente d'une zone donnée.

GNSS (Global Navigation Satellite System) : Ensemble des systèmes de navigation par satellite (GPS, Galileo, etc.).

L-bande : Bande de fréquences comprise entre 1 et 2 GHz, très utilisée pour les communications satellitaires fiables.

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) : Interface de communication série asynchrone utilisée pour l'échange de données entre un microcontrôleur et des périphériques (modem, capteurs, PC).

I. Introduction générale :

1) Contexte du projet ECOLOGGING :

L'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE) mène des travaux en écologie fondés sur l'acquisition continue et à long terme de données environnementales. Ces données portent notamment sur les conditions météorologiques, les propriétés des sols, les dynamiques hydriques et les flux de gaz à effet de serre, autant d'éléments essentiels à la compréhension du fonctionnement et de l'évolution des écosystèmes.

Dans ce contexte, le projet ECOLOGGING s'inscrit dans une démarche d'innovation méthodologique visant à démocratiser l'instrumentation environnementale. Il repose sur le développement de stations de mesure à faible coût, conçues selon les principes de l'open source et de l'open hardware. L'ensemble des choix matériels et logiciels privilégie des solutions accessibles, documentées et reproductibles, afin de favoriser l'appropriation des outils par la communauté scientifique et technique.

Contrairement aux systèmes commerciaux propriétaires, souvent coûteux, peu flexibles et dépendants d'un fournisseur unique, les stations ECOLOGGING s'appuient sur des microcontrôleurs de type Arduino Mega, emblématiques d'une approche low-tech. Ce choix garantit une architecture modulaire, évolutive et facilement maintenable, tout en assurant le niveau de fiabilité et de précision requis pour des mesures scientifiques.

À ce jour, ces stations transmettent leurs données via des réseaux terrestres, notamment la 4G sécurisée utilisant des protocoles de type MQTT(S), ainsi que par des réseaux longue portée à bas débit comme LoRaWAN. Les données sont ensuite centralisées et exploitées à l'aide d'outils open source de supervision et de visualisation tels que Node-RED et Grafana. Toutefois, ces solutions demeurent dépendantes de la disponibilité d'infrastructures de communication locales, ce qui limite le déploiement des stations dans certains environnements isolés.

2) Problématique de la transmission en zones isolées :

Certains sites d'intérêt écologique peuvent se situer dans des zones géographiquement isolées, dépourvues d'infrastructures de télécommunication. Bien que de nombreux écosystèmes soient étudiés sur le territoire à l'aide de dispositifs instrumentés bénéficiant de réseaux terrestres, l'éloignement des infrastructures, la topographie ou la densité du couvert végétal peuvent, dans certains contextes spécifiques, limiter voire empêcher l'utilisation de technologies de communication telles que la 4G ou le LoRaWAN.

Dans ces situations, l'absence de transmission des données n'empêche pas le fonctionnement des stations de mesure, qui continuent à acquérir et stocker les données localement. En revanche, elle place les chercheurs dans une situation de manque de visibilité sur l'état de fonctionnement des dispositifs déployés. Sans retour d'information à distance, il devient impossible de savoir si l'équipement est toujours opérationnel, si l'alimentation est suffisante ou si les capteurs fonctionnent correctement. Ce fonctionnement « à l'aveugle » peut conduire à la découverte tardive de défaillances techniques, susceptibles d'entraîner des pertes de données exploitables ou des discontinuités dans les séries temporelles.

Dans ce contexte, la transmission des données par satellite apparaît comme une solution pertinente pour assurer un suivi à distance des stations IoT déployées sur des sites isolés, indépendamment des infrastructures terrestres. Elle permet d'élargir les possibilités d'étude en fonction des besoins scientifiques

des chercheurs. Toutefois, cette technologie impose des contraintes spécifiques aux systèmes embarqués, notamment en termes de consommation énergétique, de volume de données transmissibles, de latence, de coûts et de complexité d'intégration. L'enjeu central du projet ECOLOGGING consiste donc à évaluer dans quelle mesure une solution de transmission satellitaire peut répondre à ces besoins tout en restant compatible avec une approche low cost et open source.

3) Objectifs de l'état de l'art :

Le présent état de l'art a pour objectif d'analyser les technologies existantes de transmission de données par satellite applicables aux systèmes IoT et aux stations embarquées à ressources limitées, dans le contexte spécifique du projet ECOLOGGING.

Plus précisément, cette étude vise à :

- Présenter les principes fondamentaux des communications satellitaires appliquées à l'IoT,
- Recenser les principales technologies et solutions disponibles sur le marché,
- Analyser les contraintes techniques associées à ces solutions, notamment en termes de communication, de consommation énergétique et de volume de données,
- Évaluer leur compatibilité avec des systèmes embarqués de type Arduino,
- Comparer les différentes approches afin d'identifier celles susceptibles de répondre aux exigences scientifiques, techniques et économiques du projet.

L'objectif final est de fournir un socle de connaissances solide permettant d'orienter les choix technologiques futurs et de préparer une phase ultérieure de conception et de développement d'une solution de transmission satellitaire adaptée aux stations ECOLOGGING.

4) Organisation du chapitre :

Ce chapitre présente un état de l'art sur la transmission de données par satellite dans le cadre du projet ECOLOGGING. Il suit une progression logique destinée à guider le lecteur depuis la compréhension du contexte et des contraintes du système jusqu'à l'examen des solutions existantes.

Après une introduction générale et la présentation du contexte applicatif, le chapitre expose les principes des communications satellitaires appliquées à l'IoT, puis les solutions matérielles et technologiques actuellement disponibles. Il aborde ensuite les enjeux liés à la gestion des données, à la consommation énergétique et à la synchronisation des transmissions. Une analyse comparative permet d'identifier les approches les plus adaptées aux contraintes du projet. Le chapitre se conclut enfin par une synthèse ouvrant sur les perspectives de développement futures.

II. Contexte applicatif et contraintes du système embarqué :

1) Description d'une station instrumentée ECOLOGGING :

Une station ECOLOGGING est un système autonome de mesure environnementale, conçu pour fonctionner sur de longues périodes sans intervention humaine. Elle repose sur un microcontrôleur Arduino Mega, choisi pour son faible coût, sa robustesse et la richesse de son écosystème open source. L'Arduino permet de connecter de nombreux capteurs différents, chacun branché sur les entrées et sorties du microcontrôleur, ce qui rend la station flexible, facilement évolutive et adaptée à l'ajout futur de nouveaux capteurs ou modules de communication.

La station intègre ainsi un ensemble de capteurs permettant de mesurer des paramètres météorologiques, des mesures liées au sol (humidité, température, nutriments), des niveaux d'eau et des paramètres atmosphériques. Les données collectées sont horodatées, stockées localement, puis transmises périodiquement à un serveur distant pour être exploitées par les équipes de recherche. Cette architecture matérielle et logicielle a été conçue pour faciliter l'ajout ou le remplacement de modules de communication, notamment en vue d'une future transmission par satellite.

Le fonctionnement de la station repose sur un système asynchrone, dans lequel les phases d'acquisition, de stockage et de transmission sont exécutées indépendamment les unes des autres. Les capteurs mesurent les paramètres toutes les 20 secondes, les données sont horodatées et stockées localement, puis transmises automatiquement vers le serveur. Cette organisation permet de garantir la fiabilité des mesures tout en assurant une gestion efficace et continue des tâches du microcontrôleur.

2) Contraintes environnementales :

Les stations ECOLOGGING sont déployées dans des environnements naturels soumis à des conditions climatiques et mécaniques exigeantes. Elles doivent résister à de fortes variations de température, à une humidité élevée, à des précipitations prolongées et à une exposition continue au rayonnement solaire, autant de facteurs susceptibles d'accélérer le vieillissement des composants électroniques.

Elles peuvent également être exposées à des interactions avec la faune et la flore locales, telles que le rongement des câbles, l'encrassement des surfaces ou la dégradation des matériaux sous l'effet des ultraviolets. Les boîtiers doivent donc offrir une protection mécanique et une étanchéité adaptées à ces contraintes.

Enfin, l'accessibilité limitée des sites impose une fiabilité élevée du système, les opérations de maintenance étant rares, coûteuses et parfois impossibles sur de longues périodes.

3) Contraintes énergétiques :

L'autonomie énergétique constitue une contrainte majeure des stations ECOLOGGING. Déployées dans des zones dépourvues d'alimentation électrique, elles doivent fonctionner de manière totalement autonome, généralement à l'aide de batteries, éventuellement complétées par des sources d'énergie renouvelable telles que des panneaux solaires.

La consommation énergétique doit être maîtrisée à tous les niveaux du système. Le microcontrôleur, les capteurs et les modules de communication doivent fonctionner de manière intermittente, en exploitant des modes de veille entre les phases actives. La communication représente le poste de consommation le plus critique, en particulier dans le cadre d'une transmission satellitaire, ce qui impose une limitation de la fréquence des transmissions et une optimisation du volume de données échangées.

4) Contraintes de communication :

Les communications par satellite se caractérisent par des débits limités, une latence plus élevée que celle des réseaux terrestres et une disponibilité dépendante de la visibilité des satellites. Le système embarqué doit donc être conçu pour fonctionner sans connexion permanente et pour tolérer des interruptions temporaires de la liaison.

Les données transmises doivent être structurées de manière compacte et robuste afin de limiter les volumes échangés et de garantir leur intégrité. Un mécanisme de stockage local est indispensable pour conserver les données en cas d'échec de transmission et permettre leur envoi différé.

5) Contraintes de coût et de déploiement :

Le projet ECOLOGGING s'inscrit dans une démarche low cost visant le déploiement d'un grand nombre de stations instrumentées. Les coûts liés au matériel, aux abonnements de communication satellitaire et à la maintenance doivent donc être strictement maîtrisés.

La solution de transmission retenue devra être économiquement viable sur le long terme, facilement reproductible et compatible avec une approche open source. Elle devra également offrir une flexibilité suffisante pour s'adapter à différents contextes de déploiement et à l'évolution des besoins scientifiques.

III. Principes généraux de la communication par satellite IoT :

L'IoT par satellite permet de connecter des objets et capteurs déployés dans des zones où les réseaux terrestres (cellulaires ou filaires) sont inexistantes ou peu fiables, telles que les zones rurales, forestières ou agricoles isolées. Contrairement aux infrastructures cellulaires reposant sur des stations terrestres, les systèmes satellitaires opèrent depuis l'espace et offrent une couverture étendue, voire globale.

Dans ce contexte, l'IoT par satellite constitue une solution particulièrement adaptée aux applications de surveillance environnementale et agricole, où la continuité de collecte des données prime sur le débit. Par ailleurs, certaines technologies radio basse consommation, comme le LoRa, connaissent des évolutions visant leur utilisation via des infrastructures satellitaires spécifiques.

1) Notions de base des communications satellites :

Une communication par satellite repose sur la chaîne suivante :

Élément	Rôle / Fonction principale
Capteur (terrain)	Il mesure des grandeurs physiques (température, humidité, pression, etc.) et fournit une donnée brute.
Microcontrôleur (ex. Arduino)	Il récupère les données du capteur, formate le message (payload, ID, timestamp) et transmet les données au modem satellite (souvent via UART).
Modem satellite + antenne	Il convertit les données numériques en signal radiofréquence, assure la transmission vers le satellite (uplink) et peut également recevoir des messages descendants (downlink) selon la technologie utilisée.
Satellite (segment spatial)	Il reçoit le signal émis par l'objet connecté, agit comme relais radio en orbite et retransmet les

	données vers une station sol située sur Terre.
Station sol / Gateway satellite	Elle reçoit le signal transmis par le satellite, effectue la démodulation et le décodage des trames, puis injecte les données dans un réseau IP terrestre.
Internet	Elle transporte les données à travers les protocoles IP, permettant leur acheminement vers un serveur distant tout en garantissant accessibilité, sécurité et scalabilité.
Serveur / Cloud / Application	Il assure le stockage des données, leur traitement, leur visualisation et la gestion des alertes, tout en permettant l'accès utilisateur via une interface web ou une API.

La chaîne de communication satellite débute au niveau du capteur terrain, dont le rôle est de mesurer des grandeurs physiques telles que la température, l'humidité ou la pression. Ces mesures constituent des données brutes qui doivent être traitées avant transmission.

Les données issues du capteur sont ensuite récupérées par un microcontrôleur (par exemple une carte Arduino). Celui-ci assure le prétraitement des informations : mise en forme du message (payload), ajout d'un identifiant, horodatage éventuel et préparation du paquet de données selon le protocole de communication utilisé. Le microcontrôleur transmet ensuite ces données au modem satellite, généralement via une liaison série de type UART.

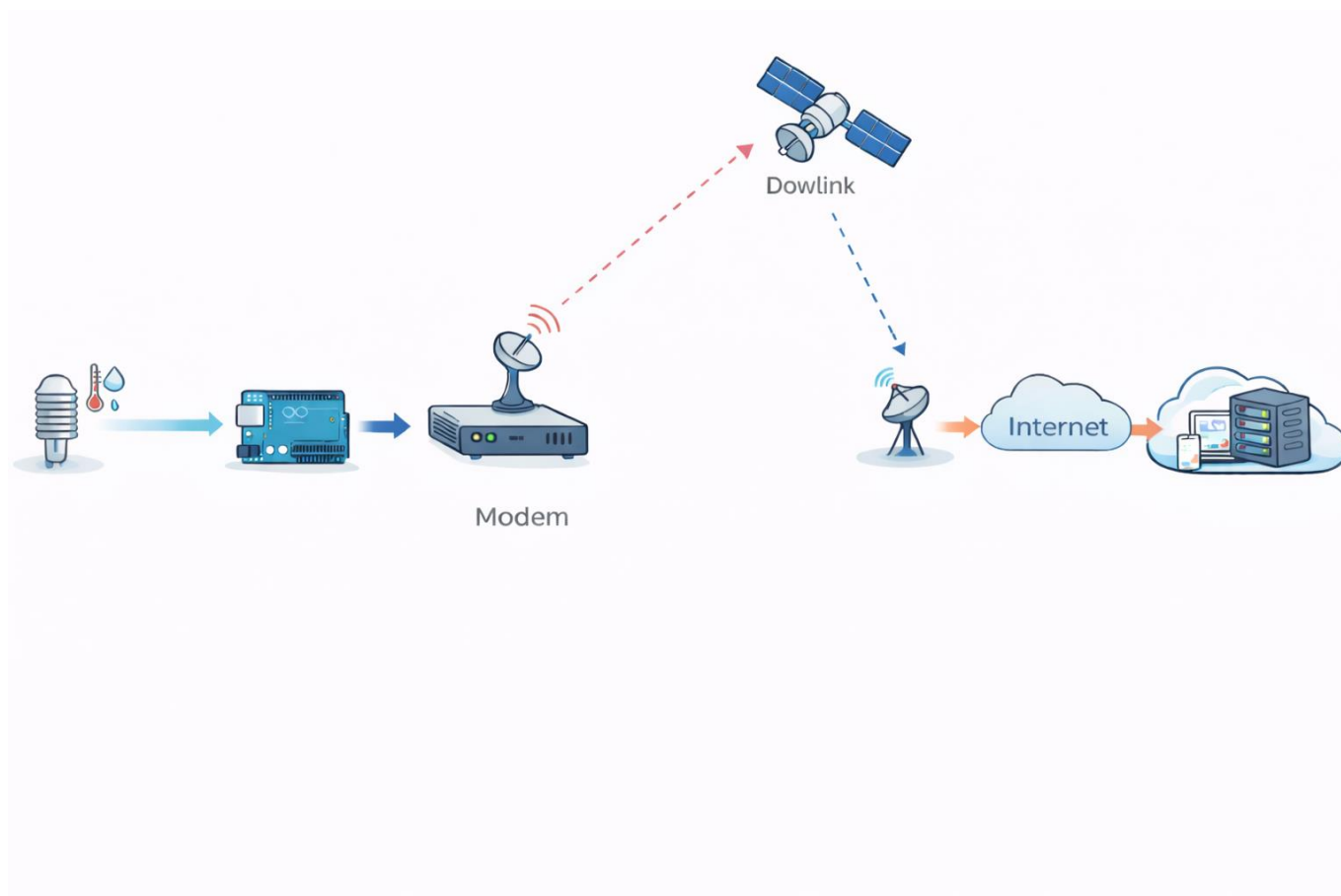
Le modem satellite convertit les données numériques en un signal radiofréquence adapté à la transmission spatiale. Ce signal est émis vers le satellite via l'antenne : cette étape correspond à la liaison montante (uplink). Le satellite reçoit alors le signal et joue le rôle de relais en orbite.

Après réception, le satellite retransmet le signal vers une station sol : il s'agit de la liaison descendante (downlink). La station sol reçoit le signal radio, effectue la démodulation et le décodage des trames afin de récupérer les données numériques initiales.

Les données sont ensuite injectées dans un réseau IP terrestre et acheminées via Internet vers un serveur distant ou une infrastructure cloud. Ce serveur assure le stockage, le traitement et la visualisation des données. Les utilisateurs peuvent alors accéder aux informations à distance via une interface web, une application ou une API.

Ainsi, la chaîne complète assure le transport fiable de l'information depuis un objet connecté situé sur le terrain jusqu'à une plateforme distante de supervision, en combinant communications radiofréquences satellitaires et réseaux IP terrestres.

Cette chaîne est illustré dans la figure ci-dessous:



Les notions fondamentales à considérer pour un système IoT par satellite sont :

- **Uplink / Downlink** : liaison montante (terminal → satellite) et descendante (satellite → terminal), souvent asynchrones selon la technologie.
- **Budget de liaison** : dépend de la puissance d'émission, du gain d'antenne, des pertes (distance, atmosphère), et de la sensibilité de réception.
- **Latence** : fortement influencée par l'orbite (GEO très latente, LEO plus réactive).
- **Débit utile et taille des messages** : l'IoT satellite vise des messages courts, avec un compromis robustesse/énergie/coût.

2) Types d'orbites utilisées (LEO, MEO, GEO) :

Les solutions IoT par satellite se distinguent largement par l'orbite, car elle conditionne la latence, la puissance nécessaire, la disponibilité et le modèle réseau.

Type d'orbite	Définition	Avantage	Inconvénient
LEO (Low Earth Orbit, orbite basse)	Satellites proches de la Terre.	latence faible, meilleur bilan de liaison pour des terminaux compacts, possibilité d'équipements plus "low power"	La couverture continue nécessite une constellation ; la disponibilité peut dépendre du passage des satellites et de la densité de constellation.
MEO (Medium Earth Orbit, orbite moyenne)	Compromis entre LEO et GEO (couverture/latence). Moins courante pour l'IoT grand public bas débit, mais existe dans certaines architectures.		
GEO (Geostationary Earth Orbit, géostationnaire)	Un satellite reste fixe au-dessus d'une zone.	disponibilité continue sur une large région.	latence élevée et exigences plus fortes en puissance/antenne, ce qui est souvent moins favorable aux capteurs fortement contraints en énergie.

Spécificités des communications satellite pour l'IoT :

Par rapport aux télécommunications "classiques", l'IoT satellite est optimisé pour des flux faibles et **intermittents** :

Aspect étudié	Conséquences sur la conception
Messages courts et périodiques	Typiquement des mesures environnementales (température, humidité, pression, etc.) envoyées à intervalle régulier ou sur événement.

Énergie	Le système passe la majorité du temps en veille. Toutefois, la phase d'émission peut générer des pics de consommation , ce qui impose un dimensionnement sérieux de l'alimentation (batterie, régulateur, découplage).
Disponibilité radio	En LEO, le terminal peut transmettre selon des "fenêtres" de visibilité (selon service). Les protocoles sont donc conçus pour du store-and-forward et des mécanismes de re-tentative.
Robustesse environnementale	En contexte forestier, l'atténuation (feuillage, masques, orientation antenne, humidité) peut dégrader le lien. Les technologies IoT satellite privilégient des bandes et des schémas radio robustes (souvent en L-band) ainsi qu'une logique applicative tolérante à la perte.
Bidirectionnalité	Certains services sont bidirectionnels (télécommande, configuration, acquittements), d'autres uniquement montants (simplex), ce qui impacte fortement l'architecture logicielle du système.

3) Comparaison avec les réseaux terrestres (4G, LoRaWAN, Satellite IOT) :

Le satellite IoT se positionne principalement face à deux grandes familles de réseaux terrestres :

Réseaux terrestres	Force	Faiblesse
4G / LTE-M / NB-IoT (cellulaire)	Débit supérieur, latence plus faible, intégration opérateur mature, coûts unitaires parfois compétitifs.	Dépendance à la couverture des antennes cellulaires ; en zones isolées (forêt, montagne), la connectivité peut être inexistante ou instable.

LoRaWAN (LPWAN)	Très basse consommation, simplicité radio côté capteur, portée locale importante, écosystème IoT large.	Nécessite une infrastructure locale (gateways LoRaWAN) ou un opérateur couvrant la zone ; la connectivité n'est pas intrinsèquement "globale".
Satellite IoT	Couverture en zones blanches, indépendance d'infrastructure locale, adapté à la télémétrie et au suivi environnemental à grande échelle.	Coût de module/abonnement, contraintes d'antenne, énergie en émission, latence variable selon orbite et service.

Dans le cadre d'ECOLOGGING (capteurs en milieu forestier, contrainte low-cost et faible consommation), le satellite devient pertinent dès lors que le besoin principal est la continuité de collecte en absence d'infrastructure terrestre.

IV. Solutions existantes de transmission satellite pour l'IoT :

1) Présentation générale des technologies disponibles :

Les solutions de transmission satellite pour l'IoT peuvent être organisées en trois grandes catégories, en fonction du mode de communication et de l'architecture réseau.

La première catégorie concerne les solutions de messagerie satellite IoT bidirectionnelle, basées sur des modules dédiés à l'échange de messages courts. Ces solutions sont conçues pour la télémétrie, le suivi et le monitoring d'objets connectés à faible débit. Elles permettent l'envoi de données depuis l'objet vers le réseau satellite, ainsi que la réception de messages descendants pour la configuration ou le contrôle à distance.

La deuxième catégorie regroupe les solutions satellite dites "simplex", dans lesquelles la communication est uniquement montante. Ces systèmes sont principalement utilisés pour des applications de suivi ou de collecte de données, où aucun retour vers l'objet n'est requis. Leur simplicité de fonctionnement et leur consommation énergétique maîtrisée en font des solutions adaptées à des capteurs très contraints.

La troisième catégorie correspond aux services M2M/IoT opérés en bande L, reposant sur une approche combinant réseau satellite et écosystème de terminaux. Ces services sont orientés vers la collecte événementielle de données et la télécommande à distance, avec une architecture globale intégrant le segment spatial, le segment sol et les plateformes applicatives.

En complément de ces catégories, on observe l'émergence de modems satellites IoT compacts destinés à une intégration directe dans des produits embarqués. Ces solutions visent à simplifier l'intégration matérielle et logicielle, tout en proposant une chaîne de communication complète vers des services cloud.

2) Modules matériels compatibles systèmes embarqués :

Plusieurs modules matériels sont aujourd'hui disponibles pour l'intégration de la communication satellite IoT dans des systèmes embarqués à base de microcontrôleur.

Les modules de type Short Burst Data (SBD) constituent une référence pour la transmission de messages courts bidirectionnels et sont spécifiquement conçus pour une intégration embarquée. Ils sont adaptés aux applications nécessitant robustesse et couverture globale.

Les modules simplex, quant à eux, se distinguent par leur architecture unidirectionnelle et leur faible complexité. Ils sont particulièrement adaptés aux applications de télémétrie montante et de suivi, où l'absence de lien descendant ne constitue pas une contrainte fonctionnelle.

Les solutions orientées service M2M/IoT, basées sur des terminaux et un réseau opérateur, offrent des fonctionnalités avancées de supervision et de télécommande, au prix d'une intégration généralement plus encadrée.

Enfin, des modems satellites IoT très compacts ont été développés pour répondre aux besoins des applications à très faible débit. Ces modules visent une intégration facilitée dans des systèmes embarqués contraints, tant en termes de taille que de consommation énergétique.

3) Interfaces de communication avec le microcontrôleur :

Dans les architectures IoT par satellite, l'interface la plus couramment utilisée entre le microcontrôleur et le modem satellite est la liaison série **UART**. Cette interface permet un pilotage simple du modem à l'aide de commandes et d'échanges de trames de données.

Le fonctionnement typique repose sur les étapes suivantes :

1. configuration initiale du modem par le microcontrôleur,
2. transmission du message utile (payload),
3. attente d'un retour d'état indiquant la prise en charge ou l'émission effective,
4. réception éventuelle d'un message descendant lorsque la technologie est bidirectionnelle.

En complément de la liaison UART, l'intégration inclut généralement :

- des **GPIO de contrôle** pour la gestion de l'alimentation, du réveil ou de la réinitialisation du modem,
- des **contraintes RF**, notamment liées à la connectique d'antenne et à son positionnement mécanique.

Ce modèle d'interface est particulièrement bien adapté aux plateformes de type Arduino Mega ou microcontrôleurs équivalents, qui disposent de ports série matériels et permettent d'isoler la fonction de communication satellite dans un module dédié.

4) Contraintes d'intégration matérielle et logicielle :

L'intégration d'un système de communication satellite IoT impose plusieurs contraintes, tant matérielles que logicielles.

Sur le plan matériel, l'antenne constitue un élément critique du système. Elle doit être adaptée à la bande de fréquence utilisée et positionnée de manière à offrir une exposition radio suffisante. En environnement

forestier, l'atténuation due au feuillage, l'orientation et le positionnement du boîtier peuvent fortement impacter la qualité du lien.

L'alimentation représente également un point clé. Bien que la consommation moyenne soit généralement faible, les phases de transmission radio entraînent des pics de courant qui doivent être pris en compte dans le dimensionnement de la batterie, du régulateur et du découplage électrique.

Par ailleurs, certaines solutions imposent des contraintes liées au réseau opérateur, telles que des procédures de certification ou des règles spécifiques d'intégration du terminal.

Sur le plan logiciel, il est nécessaire de mettre en œuvre une gestion rigoureuse de l'énergie, incluant des phases de veille profonde et des cycles de transmission optimisés. La connectivité satellite pouvant être intermittente, l'application embarquée doit également gérer les mécanismes de temporisation, de retransmission et de stockage local des données.

Les solutions de communication satellite IoT répondent principalement aux besoins de collecte de données en zones isolées, avec un compromis entre coût, consommation énergétique et latence. L'état de l'art met en évidence trois approches principales : les solutions bidirectionnelles orientées messagerie courte, les solutions simplex dédiées à la télémétrie montante, et les services M2M/IoT opérés en bande L. Dans notre cas, les services M2M ne seront pas retenus, car cette technologie n'est pas autorisée dans le cadre des projets menés au sein de l'INRAE. Les interfaces avec les microcontrôleurs reposent majoritairement sur des liaisons série de type UART, tandis que les principales contraintes d'intégration concernent l'antenne, l'alimentation lors des phases d'émission et la gestion logicielle d'une connectivité potentiellement intermittente.

V. Gestion des données transmises par satellite :

1) Types de données environnementales à transmettre :

Le projet ECOLOGGING s'inscrit dans un contexte de recherche environnementale visant la collecte continue de données in situ sur une grande diversité d'écosystèmes, tels que les milieux terrestres, marins, forestiers, lacustres, fluviaux ou désertiques. Les stations développées reposent sur une architecture embarquée low-cost, modulaire et ouverte, notamment basée sur des microcontrôleurs de type Arduino Mega, afin de garantir à la fois la flexibilité du système et la maîtrise des coûts de déploiement..

Les données environnementales mesurées par ces stations peuvent être regroupées en plusieurs catégories principales :

- ***Données météorologiques*** : température de l'air, humidité relative, pression atmosphérique, vitesse et direction du vent, pluviométrie, ainsi que le rayonnement solaire.
- ***Données du sol*** : humidité du sol, température du sol et conductivité électrique.
- ***Données hydrologiques*** : niveau d'eau, débit et température de l'eau.
- ***Données liées aux gaz à effet de serre (GES)*** : concentration de CO₂, CH₄ ou autres gaz mesurés ponctuellement.

Dans un contexte de transmission par satellite IoT, il est fondamental de distinguer les données brutes des données utiles à transmettre. En effet, les technologies satellites IoT (ARGOS, Kinéis, etc.) imposent des contraintes fortes sur le volume de données transmissibles. Les stations doivent donc effectuer un prétraitement local, incluant :

- ***l'agrégation temporelle (moyenne, minimum, maximum),***
- ***la suppression des valeurs redondantes,***
- ***la détection d'événements significatifs (seuils, anomalies).***

Cette approche permet de réduire drastiquement la quantité d'informations envoyées tout en conservant une valeur scientifique exploitable.

2) Format et structuration des messages :

Les systèmes Kinéis/Argos reposent sur un format de message contraint, typiquement de l'ordre de quelques dizaines d'octets utiles par transmission. Les documents techniques Kinéis indiquent que les messages utilisateurs sont encapsulés dans des trames Argos et peuvent contenir typiquement entre 20 et 30 octets de données utiles, selon le mode et le niveau de protection d'erreur choisi.

La structuration des messages doit donc être extrêmement compacte. Une approche classique consiste à :

- ***Encoder les mesures sous forme entière (par exemple température $\times 100$, humidité $\times 10$, etc.),***
- ***Utiliser des champs de taille fixe (par exemple 2 octets par mesure),***
- ***Éventuellement inclure un horodatage simplifié ou un compteur d'échantillons.***

Un exemple de message pourrait contenir :

- ***le nom ou l'identifiant de la station,***
- ***la date et l'heure de la période considérée,***
- ***un ensemble de valeurs environnementales agrégées,***
- ***un champ de contrôle d'intégrité (CRC).***

Cette structuration compacte permet de rester compatible avec les formats de messages Argos/Kinéis, tout en assurant une exploitation simple côté serveur.

3) Taille maximale des messages et débit autorisé :

Les systèmes de communication satellite IoT comme Kinéis reposent sur des débits extrêmement faibles (typiquement quelques centaines de bits par seconde pendant la transmission). Le volume de données transmissible par message est donc très limité.

Par exemple, dans le cas des modules de type KIM1/KIM2, la taille utile d'un message est de l'ordre de 20 à 30 octets. De plus, la politique du réseau impose généralement un nombre limité de messages par jour, et une répétition automatique des messages pour augmenter la probabilité de réception.

Ainsi, on ne raisonne pas en débit continu, mais en budget journalier de données, qui se situe typiquement dans une plage allant de quelques centaines d'octets à quelques kilo-octets par jour, selon l'abonnement et la configuration du système.

Cela impose une sélection très stricte des données réellement utiles à transmettre

4) Fréquence et volume de transmission journalière :

Compte tenu des fortes contraintes en débit et en énergie imposées par la transmission satellite, la stratégie retenue pour le projet ECOLOGGING repose sur une acquisition locale fréquente des mesures, suivie d'une agrégation temporelle avant transmission.

Concrètement, le fonctionnement de la station s'organise comme suit :

- *les données sont mesurées localement à des pas de temps courts, par exemple toutes les 20 secondes pour les paramètres météorologiques, et toutes les 1 minute pour le suivi du niveau d'eau ainsi que la température et l'humidité du sol.*
- *ces mesures sont stockées en mémoire locale.*
- *des résumés statistiques (par exemple moyennes, minima et maxima) sont ensuite calculés périodiquement, typiquement toutes les 30 minutes pour le suivi hydrologique et le sol, et toutes les 30 à 60 minutes pour les paramètres météorologiques.*
- *seuls ces résumés agrégés sont transmis par satellite.*

Cette approche permet de réduire drastiquement le volume de données à transmettre tout en conservant une information scientifiquement exploitable. À titre d'ordre de grandeur, avec quelques messages par jour de taille limitée (quelques dizaines d'octets), le volume de données journalier reste de l'ordre de quelques centaines d'octets par jour, ce qui est parfaitement compatible avec les contraintes du système.

VI. Consommation énergétique et autonomie du système :

1) Profil énergétique des modules satellites :

Les modules de communication satellite destinés à l'IoT sont conçus pour fonctionner dans des environnements fortement contraints en énergie, typiquement sur batterie ou sur alimentation hybride batterie–panneau solaire. Leur architecture interne est optimisée pour minimiser la consommation moyenne, tout en acceptant des pointes de puissance relativement élevées lors des phases de transmission.

De manière générale, le profil énergétique d'un module satellite IoT se décompose en plusieurs phases distinctes :

- ***une phase de veille profonde, durant laquelle la consommation est extrêmement faible ;***
- ***une phase de réveil et de préparation, nécessaire à l'initialisation des circuits et à la préparation du message ;***
- ***une phase de transmission RF, qui constitue la phase la plus énergivore du cycle ;***
- ***un retour en veille immédiatement après la fin de l'émission.***

Même si la consommation instantanée lors de l'émission peut être relativement élevée, la durée très courte de ces transmissions permet de limiter fortement l'impact énergétique global sur une journée. Ainsi, l'énergie consommée par le système dépend beaucoup plus du nombre de transmissions que de leur puissance instantanée.

Les modules modernes de communication satellite IoT intègrent généralement une gestion interne de l'alimentation et des états de fonctionnement, ce qui permet d'optimiser automatiquement la transition entre les différents modes de consommation.

2) Modes de fonctionnement et émission des données :

Dans le cadre du projet ECOLOGGING, les stations ne reposent pas sur une stratégie classique de mise en veille cyclique complète du système. Au contraire, la station fonctionne de manière quasi continue afin d'assurer l'acquisition et l'enregistrement des données environnementales sans interruption.

Les mesures sont ainsi acquises et stockées en permanence dans un buffer local. La gestion de l'énergie ne repose donc pas sur l'endormissement global du système, mais principalement sur la maîtrise du fonctionnement du module de communication satellite.

Le module satellite est, quant à lui, utilisé de manière opportuniste et asynchrone par rapport au fonctionnement de la station. Il reste inactif la majeure partie du temps et ne s'active que lorsqu'une fenêtre de transmission est détectée. À ce moment-là, les données accumulées dans le buffer sont transmises, puis le module retourne à un état inactif.

Cette architecture introduit un fonctionnement asynchrone entre la station de mesure et le module de communication Kineis, la station assurant en continu l'acquisition et le stockage des données, tandis que le module de communication ne s'active que ponctuellement pour assurer l'émission des messages.

Une telle organisation permet de concilier la continuité de l'observation scientifique avec les fortes contraintes énergétiques et de disponibilité du lien satellite, sans imposer de synchronisation stricte entre l'acquisition des données et leur transmission.

3) Stratégies d'optimisation de la consommation :

L'optimisation énergétique d'une station IoT satellitaire repose sur une approche globale, combinant des choix matériels, logiciels et architecturaux. Parmi les stratégies les plus importantes, on peut citer :

- *la réduction du nombre de transmissions satellite, qui sont les opérations les plus coûteuses énergétiquement ;*
- *la compression, l'agrégation ou la synthèse locale des données, afin de limiter le volume d'information transmis ;*
- *l'adaptation de la stratégie d'émission aux conditions de visibilité des satellites et aux besoins applicatifs ;*
- *l'optimisation de la chaîne radiofréquence (RF), notamment par l'utilisation d'antennes correctement adaptées, afin de maximiser l'efficacité de chaque transmission.*

Ces principes sont cohérents avec les objectifs des systèmes de télémessure par satellite pour l'Internet des objets (IoT), qui visent à concilier faible consommation énergétique, coût maîtrisé et autonomie élevée.

4) Impact sur l'autonomie globale de la station :

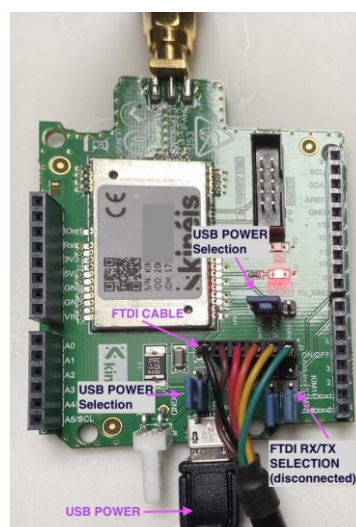
L'ensemble de ces choix techniques et architecturaux permet d'envisager une autonomie de la station pouvant aller de plusieurs mois à plusieurs années, en fonction de plusieurs paramètres :

- *la capacité de la batterie,*
- *la présence éventuelle d'un panneau solaire permettant une recharge partielle ou totale,*
- *la fréquence des mesures et, surtout, la fréquence des transmissions satellite.*

Bien que la transmission par satellite soit intrinsèquement plus énergivore qu'une communication radio locale de type LoRaWAN, elle reste parfaitement compatible avec un fonctionnement autonome de longue durée, à condition que le volume de données transmis et la fréquence d'émission soient strictement maîtrisés.

Ainsi, la contrainte énergétique, loin de constituer un obstacle, devient un paramètre structurant de la conception du système, conduisant à une architecture sobre, robuste et adaptée aux environnements isolés.

À titre d'exemple, des modules commerciaux tels que KIM1, KIM2 ou des transceivers basés sur ARTIC R3 illustrent concrètement ce type d'architecture basse consommation.



VII. Synchronisation et gestion des communications satellites :

1) Principe de visibilité des satellites :

Contrairement aux réseaux terrestres, les communications par satellite en orbite basse (LEO) reposent sur un principe fondamental de visibilité intermittente entre la station au sol et les satellites. Un satellite LEO n'est visible depuis un point géographique donné que pendant une durée limitée, typiquement de quelques minutes par passage, avec plusieurs passages par jour selon la latitude et la configuration de la constellation.

Dans le cas des systèmes de communication IoT par satellite tels que Kinéis/ARGOS, les satellites suivent des trajectoires orbitales déterministes et répétitives. La station au sol ne peut donc pas communiquer en continu, mais uniquement durant ces fenêtres de visibilité. Cela implique que le système embarqué doit être conçu pour fonctionner de manière asynchrone par rapport à la disponibilité du lien satellite.

Ainsi, une station autonome doit être capable de :

- *anticiper ou exploiter les périodes de passage des satellites,*
- *déclencher une transmission durant ces fenêtres temporelles,*
- *répéter éventuellement l'émission afin d'augmenter la probabilité de réception effective par le segment spatial.*

La visibilité intermittente des satellites nécessite une gestion temporelle spécifique du système embarqué. Dans le contexte du projet ECOLOGGING, où les stations sont déployées sur des sites isolés et peu accessibles, toute approche reposant sur une synchronisation précise ou des reconfigurations régulières apparaît peu adaptée.

2) Synchronisation des transmissions :

La synchronisation des transmissions entre une station au sol et une constellation de satellites LEO peut être envisagée selon deux approches principales.

Synchronisation prédictive

Dans cette approche, la station dispose d'un planning prévisionnel des passages satellites, calculé à partir des paramètres orbitaux. Le système embarqué doit alors :

- *posséder une horloge interne suffisamment précise,*
- *stocker ou recevoir périodiquement les paramètres orbitaux,*
- *déclencher les transmissions uniquement durant les fenêtres de visibilité prévues.*

Cette méthode permet en théorie d'optimiser le nombre d'émissions et donc la consommation énergétique. Cependant, elle présente plusieurs inconvénients majeurs dans un contexte low-cost et autonome :

- *complexité logicielle accrue,*
- *nécessité de maintenir une horloge précise sur de longues périodes,*
- *risque de dérive temporelle compromettant la synchronisation,*
- *dépendance à des données orbitales potentiellement obsolètes.*

Synchronisation opportuniste

Dans l'approche opportuniste, la station ne cherche pas à connaître précisément la position des satellites. Elle émet ses messages de manière périodique ou événementielle, indépendamment de la visibilité instantanée du satellite. Les messages sont alors reçus dès qu'un satellite passe à portée et se trouve en mesure de les capter.

Les systèmes Kinéis/ARGOS sont nativement conçus pour ce mode de fonctionnement, grâce à :

- *la répétition automatique ou programmée des messages,*
- *la robustesse du décodage côté segment spatial et sol,*
- *l'architecture asynchrone du service de collecte de données.*

Dans le cadre du projet ECOLOGGING, cette approche représente un compromis particulièrement pertinent entre simplicité de mise en œuvre, robustesse opérationnelle et maîtrise de la consommation énergétique. Elle permet d'éviter toute dépendance à une synchronisation fine, tout en garantissant une forte probabilité de livraison des messages.

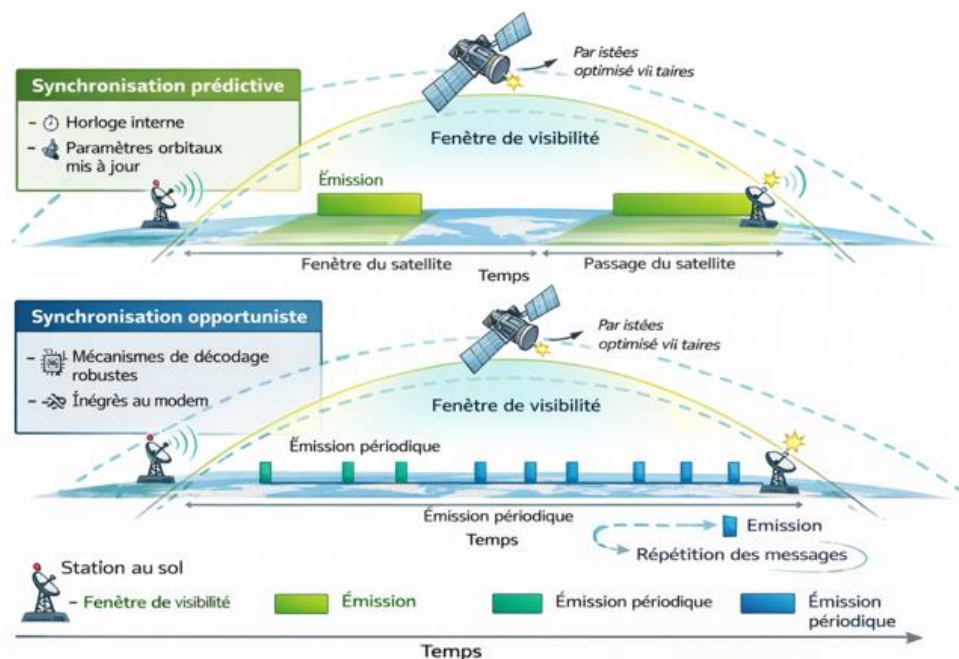


FIGURE 1 : Synchronisation des transmissions satellitaires

3) Gestion des pertes de liaison :

La perte de liaison est un phénomène inhérent aux communications par satellite IoT, résultant notamment :

- *de l'absence temporaire de satellite visible,*
- *des perturbations radioélectriques,*
- *de l'atténuation du signal liée à l'environnement (végétation dense, relief, conditions météorologiques),*
- *ou encore des collisions ou interférences radio.*

Il est donc impératif que le système soit conçu selon une philosophie tolérante aux pertes. Dans le cadre d'une station autonome, plusieurs mécanismes complémentaires peuvent être mis en œuvre :

- *répétition périodique des messages importants,*
- *identification unique de chaque trame transmise (numéro de séquence ou horodatage),*
- *vérification d'intégrité des données côté réception,*
- *maintien local d'une copie des données tant que leur transmission n'est pas considérée comme acquise.*

Le service Kinéis repose précisément sur ce principe de robustesse statistique, dans lequel la probabilité de réception est assurée non pas par une communication continue, mais par la multiplication des opportunités de réception au fil des passages satellites.

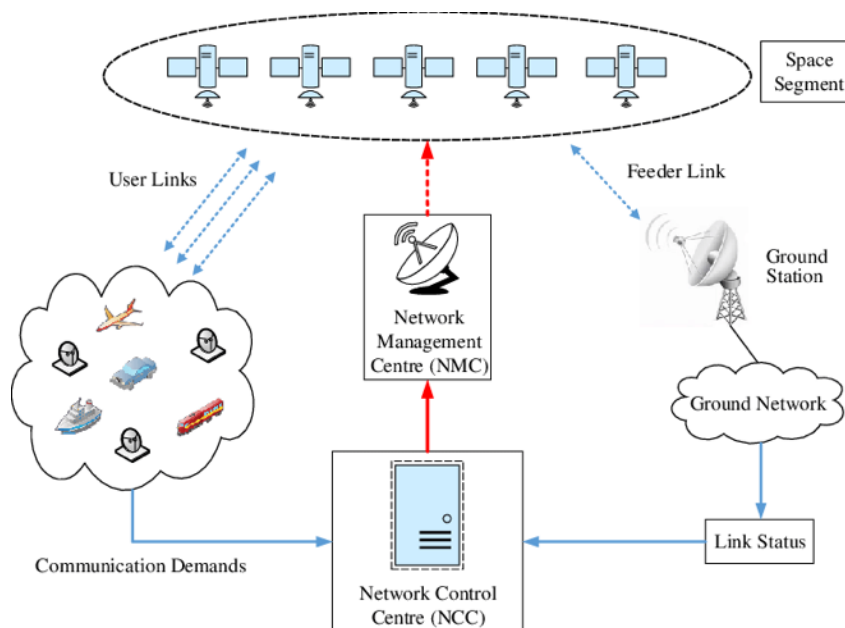


FIGURE 2 : Gestion des pertes de liaison dans les communications satellitaires IoT.

4) Stockage local et retransmission des données :

Dans le cadre d'une station autonome destinée à fonctionner pendant plusieurs mois sans intervention humaine, il est indispensable de prévoir un stockage local non volatile (mémoire flash, EEPROM ou carte SD).

Ce stockage local joue plusieurs rôles essentiels :

- *conservation des données en cas d'échec temporaire de transmission,*
- *possibilité de regrouper plusieurs mesures dans un même message synthétique,*
- *protection contre toute perte irréversible de données scientifiques,*
- *constitution d'un historique local servant de sauvegarde.*

Cette architecture est particulièrement bien adaptée aux contraintes du projet ECOLOGGING, où l'accès physique aux stations peut être très espacé dans le temps, et où la continuité des séries temporelles constitue un enjeu scientifique majeur.

VIII. Comparaison des solutions de transmission satellite :

1) Critères de comparaison :

Afin d'évaluer objectivement les différentes solutions de transmission par satellite pour un projet tel qu'ECOLOGGING, plusieurs critères ont été retenus :

- *compatibilité avec une approche low-cost,*
- *consommation énergétique globale,*
- *simplicité d'intégration matérielle et logicielle,*
- *adéquation aux faibles volumes de données,*
- *robustesse en environnement isolé,*
- *maturité et fiabilité du service.*

Ces critères découlent directement des contraintes exprimées dans le cahier des charges du projet.

2) Comparaison technique des solutions étudiées :

Les solutions satellitaires à haut débit (par exemple basées sur des modems large bande ou des constellations de type GEO ou MEO) offrent des capacités de transmission bien supérieures. Cependant, elles présentent plusieurs inconvénients majeurs dans le cadre d'ECOLOGGING :

- *consommation énergétique très élevée,*
- *complexité matérielle importante,*
- *coût élevé des équipements et des abonnements,*
- *surdimensionnement total par rapport aux besoins réels du projet.*

À l'inverse, les solutions IoT satellitaires bas débit telles que Kinéis/ARGOS sont spécifiquement conçues pour :

- *la transmission de messages courts,*
- *des systèmes autonomes,*
- *des objets à très faible consommation,*
- *des capteurs environnementaux déployés à grande échelle.*

3) Comparaison énergétique :

Du point de vue énergétique, la transmission satellite reste la phase la plus coûteuse du cycle de fonctionnement d'une station. Toutefois, dans le cas des systèmes Kinéis :

- *les émissions sont très courtes,*
- *la fréquence des transmissions est fortement limitée,*
- *le reste du temps, le système peut rester en veille profonde.*

Cela permet d'atteindre une consommation moyenne extrêmement faible, compatible avec une alimentation par batterie seule ou par batterie couplée à un petit panneau solaire.

4) Comparaison économique :

Le coût global d'une solution de transmission inclut :

- *le coût du matériel (module satellite, antenne),*
- *le coût d'intégration,*
- *le coût du service de transmission.*

Les solutions Kinéis/ARGOS sont historiquement utilisées dans des contextes scientifiques et environnementaux, avec des modèles économiques adaptés à des volumes de données faibles mais fiables, ce qui en fait un compromis particulièrement pertinent pour ECOLOGGING.

5) Bilan comparatif des solutions de transmission satellite:

Critère	Forces	Faiblesses
Couverture géographique	Couverture quasi mondiale, indépendante des infrastructures locales	Dépendance à la visibilité des satellites
Adaptation aux zones isolées	Fonctionne en forêt, montagne, sites reculés	Fenêtres de transmission limitées
Consommation énergétique	Compatible avec stations basse consommation si transmissions peu fréquentes	Pic de consommation lors de l'émission
Volume de données	Suffisant pour données environnementales synthétiques	Débit très faible, messages courts
Robustesse	Très fiable pour télémessure scientifique	Pas de communication temps réel
Coût global	Acceptable pour projets scientifiques ciblés	Plus coûteux que LoRaWAN lorsque disponible
Complexité d'intégration	Modules dédiés simplifiant la radio	Contraintes RF (antenne, adaptation)

La transmission par satellite apparaît comme une solution techniquement robuste et scientifiquement pertinente pour les stations environnementales déployées en zones isolées. Malgré des limitations en débit et en volume de données, ses avantages en termes de couverture et d'indépendance vis-à-vis des infrastructures terrestres en font une technologie incontournable lorsque les réseaux 4G ou LoRaWAN sont inexistantes.

Dans le cadre du projet ECOLOGGING, ces contraintes sont compatibles avec la nature des données environnementales mesurées, à condition de mettre en œuvre une gestion intelligente des données et de l'énergie.

IX. Choix d'une solution adaptée au projet ECOLOGGING :

1) Synthèse et justification du choix technologique :

Le choix d'une transmission satellite IoT bas débit repose sur une adéquation forte entre les contraintes du projet ECOLOGGING et les caractéristiques de cette technologie. Les données environnementales collectées sont peu volumineuses mais nécessitent une transmission fiable depuis des zones totalement isolées.

L'intégration d'un module satellite dédié, piloté par un microcontrôleur basse consommation, permet de répondre à ces exigences tout en conservant une architecture simple, évolutive et compatible avec une approche low-cost.

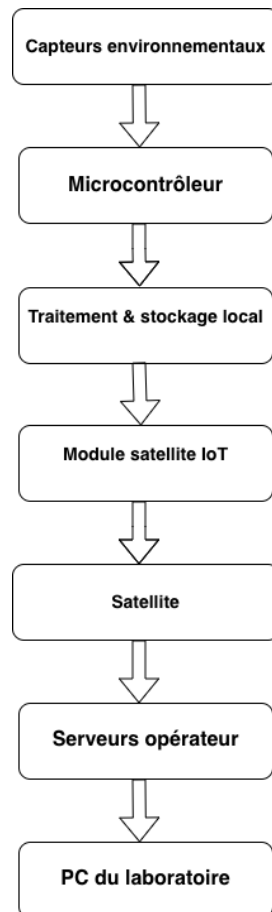


FIGURE 3: Architecture globale de la station ECOLOGGING

2) Analyse de l'adéquation aux contraintes du projet :

Au regard des contraintes identifiées :

- *déploiement en zones totalement isolées,*
- *très faible volume de données,*
- *exigence d'autonomie longue durée,*
- *volonté de maîtriser les coûts,*
- *approche open-source et modulaire,*

La transmission satellite IoT bas débit apparaît comme la seule solution véritablement universelle permettant de garantir la remontée des données dans tous les contextes géographiques.

3) Justification du choix technologique :

Le choix d'une solution basée sur le système Kinéis/ARGOS se justifie par :

- *sa compatibilité avec des microcontrôleurs simples,*
- *sa simplicité d'intégration,*
- *sa faible consommation énergétique,*
- *son historique éprouvé dans les applications de suivi environnemental et scientifique,*
- *l'existence d'une infrastructure sol complète pour la collecte et la distribution des données.*

4) Limites de la solution retenue :

Cette solution présente néanmoins certaines limites intrinsèques :

- *débit extrêmement faible,*
- *absence de communication bidirectionnelle continue,*
- *nécessité d'un prétraitement et d'une sélection rigoureuse des données à transmettre.*

Ces limitations sont toutefois parfaitement compatibles avec les objectifs du projet ECOLOGGING, qui privilégie la fiabilité, la robustesse et l'autonomie à la quantité de données transmises.

X. Proposition d'architecture système :

1) Architecture matérielle globale :

L'architecture proposée repose sur :

- *un microcontrôleur central (Arduino, STM32 ou équivalent),*
- *un module de communication satellite Kinéis,*
- *un sous-système de capteurs environnementaux,*
- *un stockage local non volatile,*
- *une alimentation autonome (batterie, éventuellement complétée par un panneau solaire).*

2) Architecture logicielle embarquée :

Le logiciel embarqué est structuré de manière modulaire :

- *couche d'acquisition des capteurs,*
- *couche de prétraitement et d'agrégation des données,*
- *couche de gestion énergétique,*
- *couche de gestion des communications satellites.*

Cette organisation facilite la maintenance, l'évolution et l'adaptation future du système.

3) Cycle de fonctionnement de la station :

Le cycle de fonctionnement typique comprend :

- *Réveil périodique du système,*
- *Acquisition des mesures,*
- *Stockage local,*
- *Éventuelle transmission satellite,*
- *Retour en veille profonde.*

4) Scénario de transmission des données :

Les mesures acquises par la station sont stockées localement puis regroupées sous forme de messages synthétiques avant leur transmission par satellite. Cette stratégie permet de réduire le nombre d'émissions radio, d'optimiser l'autonomie énergétique et d'assurer la continuité des données en cas de liaison intermittente.

5) Synthèse du fonctionnement global:

Le système repose sur un fonctionnement cyclique et majoritairement en veille, afin de limiter la consommation énergétique. Les mesures sont acquises localement, traitées et stockées, puis transmises de manière ponctuelle par satellite.

Cette organisation permet de garantir une autonomie élevée tout en assurant la continuité des données scientifiques, même en cas de perte temporaire de la liaison satellite.

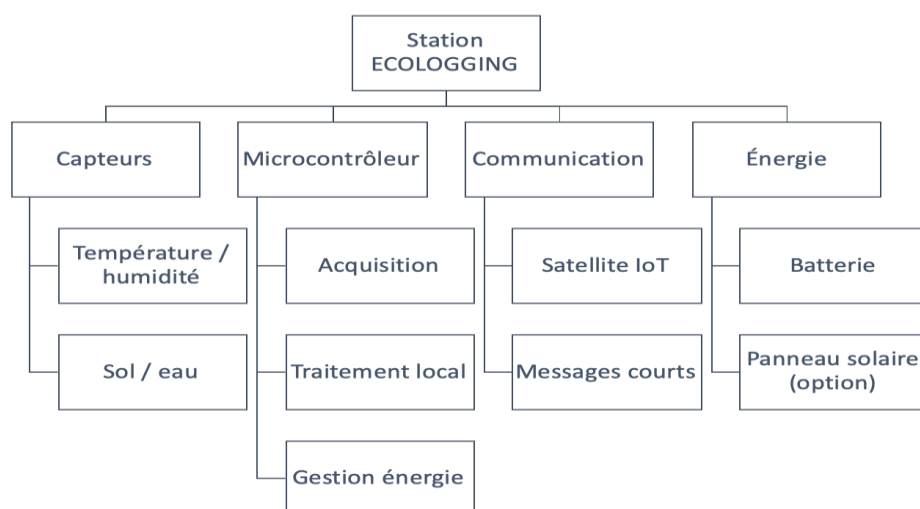


FIGURE 4: Carte mentale du fonctionnement de la station ECOLOGGING

XI. CONCLUSION GÉNÉRALE:

Ce projet tuteuré a permis de mettre en évidence les enjeux liés à la transmission des données environnementales depuis des zones isolées. L'étude réalisée montre que les solutions de communication par satellite, bien que contraignantes en termes de débit, répondent efficacement aux besoins de la recherche environnementale lorsque les infrastructures terrestres sont absentes.

En s'appuyant sur une architecture embarquée simple, une gestion intelligente des données et une transmission satellite optimisée, il est possible de concevoir une station environnementale low-cost, autonome et fiable. Cette approche s'inscrit pleinement dans la philosophie du projet ECOLOGGING, qui vise à concilier exigences scientifiques, contraintes de terrain et maîtrise des coûts.