

CONCEPTION ET DÉPLOIEMENT D'UNE STATION ENVIRONNEMENTALE SATELLITE ECOLOGGING : CHOIX STRATÉGIQUE & COMPARAISON

Master 2 - Ingénierie des Systèmes Embarqués



Réalisé par :

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

Encadré par :

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

Table des matières :

I. Étude des solutions de communication :	3
II. Justification du choix de la communication satellite :	3
III. Analyse des deux solutions :	4
1. Module KIM2 – Kinéis :	4
2. Carte SMD Wings – Arribada / CLS:	5
IV. Choix des capteurs :	5
V. Description détaillée des capteurs :	6
1. BME280 :	6
2. VEML7700 :	7
3. DS3231 :	7
4. Module de carte SD :	7
VI. Consommation énergétique du module KIM2:	8
VII. Conclusion Générale et Perspectives :	9

I. Étude des solutions de communication :

Dans le cadre du projet ECOLOGGING, plusieurs technologies de communication ont été étudiées afin d'identifier la solution la plus adaptée à une station de mesure environnementale autonome. Cette analyse a pris en compte différents critères essentiels tels que la portée, la consommation énergétique, la fiabilité, la dépendance aux infrastructures existantes, la facilité de déploiement et les coûts associés.

Les technologies terrestres comme le GSM/4G, le WiFi et le LoRa offrent des solutions efficaces dans des environnements connectés, mais restent fortement dépendantes de la présence d'infrastructures locales. Ces contraintes rendent leur utilisation difficile, voire impossible, dans des zones isolées ou naturelles peu couvertes par les réseaux classiques.

À l'inverse, la communication satellitaire se distingue par sa couverture mondiale et son indépendance vis-à-vis des réseaux terrestres. Bien que son coût soit plus élevé, elle représente une solution fiable et cohérente pour garantir la transmission des données dans des environnements reculés. Ce critère a été déterminant dans le choix technologique du projet, car l'objectif principal d'ECOLOGGING est de permettre un déploiement des stations sans contrainte géographique liée aux infrastructures de communication existantes.

• Tableau comparatif des technologies de communication :

Technologie	Avantages	Limites
GSM / 4G	Transmission rapide des données, large disponibilité en zone urbaine	Dépendance aux antennes relais, couverture limitée en zones rurales et isolées
WiFi	Faible coût, simplicité de mise en œuvre	Portée très courte, nécessite une infrastructure locale
LoRa/ LoRaWAN	Faible consommation énergétique, bonne portée locale	Dépendance à des passerelles, couverture non garantie selon les zones
Satellite	Couverture mondiale, indépendance totale des réseaux terrestres, fiabilité en zones isolées	Coût plus élevé, débit limité

II. Justification du choix de la communication satellite :

Dans le cadre du projet ECOLOGGING, la communication satellitaire s'est imposée comme la solution la plus pertinente pour garantir une transmission fiable des données dans des zones isolées, sans dépendance aux réseaux terrestres. Elle permet d'assurer une couverture étendue, une continuité de service et une exploitation scientifique des données sur le long terme. Dans cette logique, différentes solutions satellitaires ont été étudiées, notamment le module KIM2 de Kinéis et le SMD Wings d'Arribada, afin d'identifier la technologie la plus adaptée aux besoins du projet en termes de fiabilité, d'intégration et de compatibilité avec l'architecture ECOLOGGING. Le tableau suivant résume leurs principales caractéristiques techniques et fonctionnelles :

Critère	KIM2 (Kinéis)	SMD Wings (Arribada / CLS)
Type de module	Module SMT 48 broches, transceiver satellitaire bidirectionnel	Carte d'intégration (breakout) avec module SMD pré-soudé, compatible Feather
Protocole satellite	Constellation Kinéis (LEO polaire)	Argos (opéré par CLS/CNES)
Connectivité	UART 3,3 V, GPIO, I2C optionnel	UART via connecteur Feather, I2C (Qwiic), SPI optionnel
Alimentation	3,3 V – 5 V DC (typique 3,6 V)	Fournie par la carte Feather (USB/batterie) ou externe 3,3 V
Consommation	Faible puissance, modes veille profonde (optimisation en cours)	Gestion avancée de l'alimentation via convertisseur buck/boost TPS63901
Intégration	Footprint PCB dédié, manuel d'intégration détaillé	Plug-and-play avec Feather, idéal pour prototypage rapide
Certification	Kinéis, CNES, CE, FCC	Certifié CLS/CNES pour communication Argos
Firmware / AT Commands	Stack Kinéis, commandes AT documentées (ex. : AT+TX, AT+RCONF)	Firmware argos-smd-at-kineis, compatible avec CLS KimGUI
Antenne	Connecteur 50 Ω dédié (KIN_ANT)	Connecteur u.FL intégré
Programmation / Debug	Connecteur TC2030 (Tag-Connect), outil ST-Link ou J-Link	Connecteur TC2030-IDC-NL, flash via J-Link ou ST-Link
Documentation	Datasheet, manuel d'intégration, guide de configuration radio	Wiki GitHub, schémas open-source, guides de flash

III. Analyse des deux solutions :

1. Module KIM2 – Kinéis :

Le KIM2 est un module certifié prêt à l'emploi, conçu pour une intégration industrielle à grande échelle.



Figure 1: Module KIM2

Ses principaux atouts sont :

- **Bidirectionnalité native** : permet l'envoi de données (uplink) et la réception d'accusés ou de messages de télécommande (downlink).

- **Gestion avancée des profils MAC** : modes BASIC, BLIND, etc., pour optimiser la stratégie de transmission en fonction du cas d'usage.
- **Configuration radio flexible** : modulation LDA2, LDK, VLD4, plage fréquentielle 399,9–403 MHz, puissance jusqu'à 27 dBm.
- **Documentation complète** : manuels d'intégration, de configuration et de mise à jour firmware très détaillés.
- **Certifications multiples** : conforme aux réglementations CE, FCC et aux exigences Kinéis/CNES.
- **Points d'attention** : Nécessite une configuration radio spécifique (RCONF) fournie par Kinéis avant toute transmission.

Consommation en veille encore en cours d'optimisation dans les versions firmware futures.

2. Carte SMD Wings – Arribada / CLS:

Le SMD Wings est une plateforme de prototypage rapide basée sur le module Argos SMD, pré-flashée et certifiée CLS/CNES.

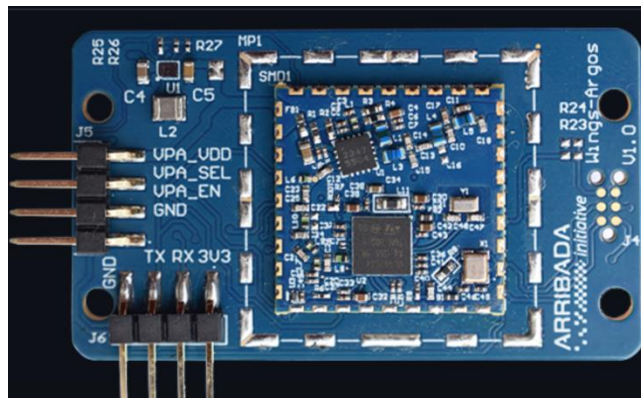


Figure 2: Module SMD Wings

Ses avantages majeurs sont :

- **Intégration simplifiée** : compatible Feather, permet de développer rapidement avec des cartes telles que le nRF52840 Feather.
- **Firmware open-source** : disponible sur GitHub, avec support Arduino et Zephyr (à venir).
- **Outils logiciels fournis** : CLS KimGUI pour tester les commandes AT, CLS Emulsat pour simuler les passes satellites.
- **Flexibilité d'alimentation** : peut être alimenté par USB, batterie ou source externe via connecteurs dédiés (J5, J6).
- **Points d'attention** : Conçu principalement pour le prototypage, une adaptation peut être nécessaire pour une industrialisation à grande échelle.

La communication s'effectue principalement en uplink ; le downlink est possible mais moins mis en avant que sur le KIM2.

IV. Choix des capteurs :

Pour ce projet, nous avons sélectionné plusieurs capteurs afin de mesurer les paramètres environnementaux et de stocker les données localement. Les critères de sélection ont été la précision, la

fiabilité, la facilité d'intégration avec notre microcontrôleur et la compatibilité avec les protocoles standards.

Capteur	Fonctionnement	Protocole	Caractéristiques principales	Broches principales
BME280	Mesure température, humidité et pression via des capteurs MEMS intégrés	I2C ou SPI	Temp: -40 à 85°C ±1°C Hum: 0-100% ±3% Press: 300-1100 hPa ±1 hPa	VCC, GND, SDA, SCL, CS, SDO
VEML770	Capteur de lumière ambiante, convertit l'intensité lumineuse en lux	I2C	Plage : 0-120000 lux Haute précision Faible consommation	VIN, GND, SDA, SCL, INT
RTC DS3231	Horloge temps réel avec compensation de température, conserve l'heure même hors tension grâce à sa pile intégrée	I2C	Horloge précise ±2ppm Alarme programmable Température interne	VCC, GND, SDA, SCL, SQW/OUT
Carte SD	Module de stockage local pour sauvegarder les données mesurées	SPI	Compatible SDHC jusqu'à 32 Go Tension 3.3V-5V	VCC, GND, MISO, MOSI, SCK, CS

V. Description détaillée des capteurs :

1. BME280 :

Le **BME280** mesure simultanément la température, l'humidité et la pression. Il utilise des capteurs MEMS et un convertisseur analogique-numérique intégré. Il peut communiquer via I2C ou SPI et est très précis pour les mesures environnementales.

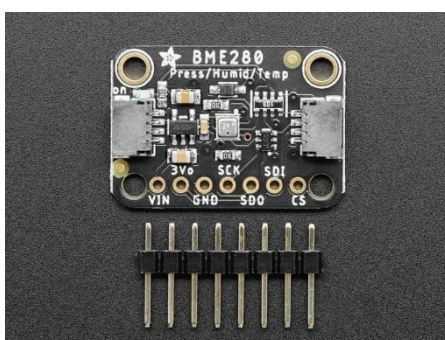


Figure 3: Capteur BME280

2. VEML7700 :

Ce capteur permet de mesurer l'intensité lumineuse en lux. Il est connecté via I2C et offre une haute précision avec une faible consommation d'énergie, ce qui le rend idéal pour les projets embarqués.

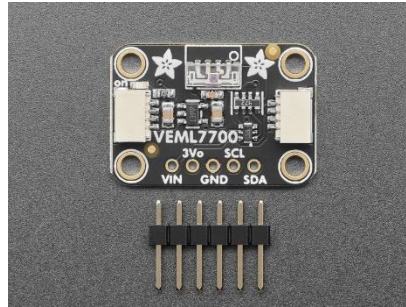


Figure 4: Capteur VELM7700

3. DS3231 :

Le module DS3231 est une horloge temps réel qui garde l'heure exacte grâce à son cristal compensé en température et sa pile intégrée. Il communique via I2C et fournit également des alarmes programmables.

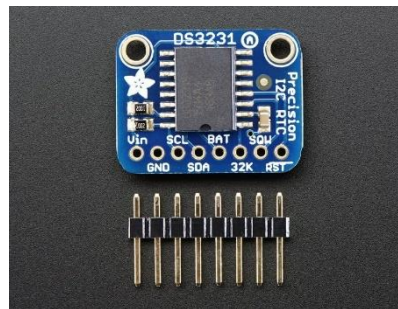


Figure 5: Capteur DS3231

4. Module de carte SD :

Le module de carte SD est utilisé pour stocker localement les données des capteurs. Il fonctionne en SPI et est compatible avec les cartes SDHC jusqu'à 32 Go.



Figure 6: Module de carte SD

VI. Consommation énergétique du module KIM2:

Dans le cadre de l'intégration du module KIM2, une analyse approfondie de sa consommation énergétique a été réalisée. Cette étape est cruciale pour dimensionner correctement les systèmes d'alimentation et garantir l'autonomie requise pour nos applications.



Figure 7: Mesure en temps réel de la consommation du module KIM2

Paramètres mesurés :

- Tension : 5,097V
- Courant : 0,0400A
- Puissance instantanée : 0,203W
- Énergie cumulée : 32219mWh
- Capacité : 98048mAh
- Résistance de charge : 127,4Ω

Les tests réalisés montrent que le module KIM2 consomme 0,203 W en mode transmission lorsque alimenté en 5 V, correspondant à un courant de 0,040 A. D'après la datasheet, en alimentation nominale 3,6 V, le courant de pic en transmission atteint 390 mA pendant environ 30 secondes, soit une énergie de 0,0117 Wh par trame envoyée.

Scénario d'utilisation : transmission périodique :

Pour notre application nécessitant un envoi de données toutes les 10 minutes, la fréquence est de 6 transmissions par heure, soit 144 transmissions par jour. La consommation énergétique quotidienne totale est ainsi de :

$$144 \times 0,0117 \text{ Wh} = 1,685 \text{ Wh/jour} \quad 144 \times 0,0117 \text{ Wh} = 1,685 \text{ Wh/jour}$$

Évaluation avec la batterie disponible :

La batterie Li-ion à notre disposition a les caractéristiques suivantes :

Tension : 3,7 V

Capacité : 10,4 Ah (10400 mAh)

Énergie totale : 38,48 Wh

En considérant une profondeur de décharge de 80% pour préserver la durée de vie de la batterie, l'énergie utilisable est de 30,78 Wh. L'autonomie théorique avec la batterie seule serait donc :

$$30,78 \text{ Wh} / 1,685 \text{ Wh/jour} = 18,3 \text{ jours}$$

Cette autonomie de moins de 3 semaines est insuffisante pour un déploiement terrain à long terme.

Solution d'alimentation autonome : système solaire :

Permanente, une solution incluant un panneau solaire est indispensable. Le dimensionnement minimal du panneau se calcule comme suit :

Hypothèses : 4 heures d'ensoleillement équivalent pleine puissance par jour, rendement système de 70%

Puissance panneau minimale requise :

$$P_{\min} = 1,685 \text{ Wh/jour} / (4 \text{ h} \times 0,70) = 0,6 \text{ W}$$

Pour une marge de sécurité et assurer la recharge même par temps nuageux, un panneau de 2 à 5 W est recommandé.

Configuration matérielle proposée :

- **La configuration retenue associe :**
 - Panneau solaire 5 V / 2-5 W (monocristallin)
 - Gestionnaire d'énergie Solar Power Manager V1.0
 - Batterie tampon Li-ion 10,4 Ah
 - Module KIM2
 - **Performances attendues avec un panneau de 2 W :**
 - Production quotidienne : $2\text{W} \times 4\text{h} \times 0,70 = 5,6\text{Wh}$
 - Consommation quotidienne : 1,685 Wh
 - Excédent quotidien : 3,915 Wh → recharge de la batterie
 - Autonomie sans soleil : 18 jours de réserve
- Le module KIM2, bien qu'efficace énergétiquement, nécessite une alimentation externe pour des transmissions fréquentes. La batterie seule ne fournit qu'une autonomie limitée à 18 jours pour un envoi toutes les 10 minutes. La solution optimale et indispensable est donc un système hybride batterie-panneau solaire. Cette configuration garantit une alimentation 100% autonome, renouvelable et pérenne, permettant le déploiement du dispositif dans des zones isolées sans infrastructure électrique.

VII. Conclusion Générale et Perspectives :

Ce projet a démontré avec succès la faisabilité et la pertinence d'une solution de monitoring environnemental basée sur la connectivité satellitaire via le module KIM2. Bien que des limitations telles que le coût, la latence des transmissions et la dépendance aux APIs externes subsistent, la technologie satellite reste la seule option viable pour une couverture véritablement globale en zones isolées. Les tests ont validé la robustesse et l'efficacité énergétique du système,

répondant aux exigences de collecte de données dans des environnements dépourvus d'infrastructure.

Pour l'avenir, une feuille de route ambitieuse se dessine, avec l'intégration de panneaux solaires pour une autonomie complète, l'optimisation des batteries, l'ajout de géolocalisation GPS, et le déploiement d'un réseau multi-stations. À plus long terme, l'intégration d'intelligence artificielle permettra d'optimiser les transmissions selon les conditions météorologiques et de développer des capacités prédictives. Ces améliorations positionneront le système comme une plateforme intelligente et autonome de surveillance environnementale.

En conclusion, ce projet valide non seulement l'approche technique et économique, mais ouvre également la voie à une nouvelle génération de solutions de monitoring résilientes et véritablement globales. Il constitue une étape fondamentale vers la création d'un réseau mondial d'observation environnementale, offrant des perspectives prometteuses pour la recherche scientifique et la protection des écosystèmes, tout en justifiant pleinement l'investissement dans cette technologie stratégique pour le suivi de notre planète.