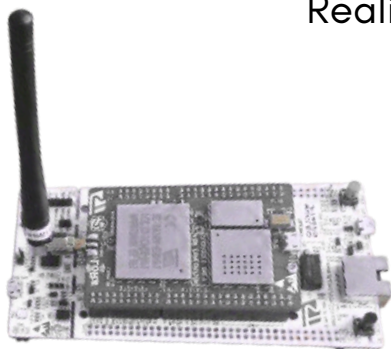


Rapport de projet

CAPTEURS SANS FILS ET SANS BATTERIES

Master 1 EEA ESET Paul Sabatier
2024/2025

Réalisé par Issa Faye, Xing Wei et Quentin Bernyer
Encadré par M. Takacs



RÉSUMÉ

Dans un contexte où les objets connectés et les systèmes embarqués autonomes prennent une place croissante, notamment dans les domaines de la surveillance, du suivi environnemental et de la maintenance prédictive, l'alimentation énergétique de ces dispositifs constitue un enjeu majeur. Ce projet de Master 1 a pour objectif la conception et la réalisation d'un capteur sans fil, totalement autonome et sans batterie, capable de transmettre ses données via le protocole LoRaWAN, tout en s'alimentant uniquement grâce à l'énergie solaire et, de manière complémentaire, par récupération d'énergie RF.

Le système repose sur trois sous-ensembles principaux :

- Un module de communication LoRaWAN basé sur une carte STM32 basse consommation.
- Un système d'alimentation autonome, composé d'une cellule solaire souple MP3-25, d'un PMU AEM30940, et d'une supercapacité de 50 mF.
- Une chaîne logicielle de collecte, traitement et visualisation des données, incluant un serveur LoRa, un backend Node.js et une interface web.

Le dimensionnement énergétique a été guidé par des estimations théoriques et validé par des mesures expérimentales. L'intégration finale du système a démontré la faisabilité d'un fonctionnement cyclique autonome : charge, activation du microcontrôleur, mesure et transmission, puis mise en repos.

Les résultats montrent que le capteur peut fonctionner avec un cycle complet toutes les 5 à 20 minutes selon l'intensité lumineuse, sans recours à une batterie. Ce projet prouve la viabilité d'un tel système pour des applications à faible fréquence de mesure, et ouvre des perspectives concrètes d'amélioration en vue d'une industrialisation future, via la miniaturisation et l'optimisation logicielle.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	1
1.1 Contexte du projet	1
1.2 Problématique	1
1.3 Nos objectifs	1
2. État de l’art et bibliographie	2
2.1 Technologies d’alimentation sans batterie	2
2.2 Communication faible consommation (LoRaWAN)	3
2.3 Applications aux capteurs autonomes	3
3. Organisation du projet	4
3.1 Planning des sous-tâches	4
3.2 Répartition du travail et méthodologie	4
4. Dimensionnement énergétique	5
4.1 Estimation des besoins énergétiques	5
4.2 Choix et caractérisation de la cellule solaire	5
4.3 Dimensionnement de la supercapacité	6
4.4 Intégration du PMU AEM30940	6
5. Prototypage et expérimentations	7
5.1 Maquette de communication LoRaWAN	7
5.2 Maquette d’acquisition et stockage d’énergie	10
5.3 Prototype final et tests d’intégration	12
6. Analyse critique du projet	13
6.1 Bilan des résultats obtenus	13
6.2 Réajustements et limites du système	13
7. Conclusion et perspectives	14
7.1 Difficultés techniques rencontrées	14
7.2 Perspectives d’amélioration et d’industrialisation	14
8. Annexe financière – Cas 2 : Prototype commercialisable	15
8.1 Budget prévisionnel détaillé	15
8.2 Hypothèses de calcul	15
8.3 Étude de rentabilité du produit	16
Annexes techniques (schémas, courbes, codes)	17

1- INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Dans un monde de plus en plus interconnecté, les systèmes embarqués autonomes occupent une place grandissante dans les domaines de la surveillance, de la maintenance prédictive, ou encore des réseaux de capteurs intelligents. Parmi ces systèmes, les capteurs sans fil, capables de transmettre périodiquement des données vers une passerelle ou un serveur distant, constituent un axe fort du développement technologique actuel.

Cependant, l'utilisation de batteries comme source d'alimentation pose de nombreuses limites : durée de vie restreinte, contraintes de maintenance, ou encore risques d'instabilité dans des environnements extrêmes. Face à cela, l'intégration de mécanismes de récupération d'énergie ambiante s'impose comme une solution prometteuse.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet de Master 1, centré sur l'étude et la mise en œuvre d'un capteur sans fil fonctionnant sans batterie, alimenté par une cellule photovoltaïque miniature, et utilisant le protocole LoRaWAN pour la transmission de données.

1.2 PROBLÉMATIQUE

La question centrale que nous avons abordée dans ce projet est la suivante :

Comment concevoir un système embarqué LoRaWAN capable de transmettre des données de capteur, en s'alimentant uniquement via un panneau solaire et la récupération d'énergie RF, capable de fonctionner sans accès au réseau électrique ?

Ce problème soulève plusieurs défis techniques :

- dimensionner précisément les besoins énergétiques du système embarqué,
- choisir des composants compatibles avec une alimentation très limitée,
- optimiser la consommation de la chaîne de transmission LoRa,
- garantir un fonctionnement stable, même en conditions lumineuses variables.

1.3 OBJECTIFS

Pour répondre à cette problématique, nous avons défini les objectifs suivants :

- Objectif 1 : Réaliser une maquette fonctionnelle de transmission LoRaWAN, permettant l'envoi de données de capteurs vers un serveur distant.
- Objectif 2 : Concevoir une maquette d'alimentation autonome basée sur une cellule solaire, une rectenna, une PMU (AEM30940), et une supercapacité de stockage.
- Objectif 3 : Intégrer les deux modules dans une maquette finale, capable de fonctionner sans batterie et de manière totalement autonome.
- Objectif 4 : Analyser le fonctionnement du système via des mesures expérimentales (temps de charge, fréquence de mesure possible, stabilité de la transmission) et proposer des pistes d'optimisation.

2- ÉTAT DE L'ART ET BIBLIOGRAPHIE

Dans cette section, nous présentons les bases scientifiques et techniques sur lesquelles repose notre projet. Il s'agit d'un état de l'art centré sur trois thématiques : l'alimentation autonome sans batterie, les communications longue portée à faible consommation, et les applications typiques des capteurs autonomes.

2.1 TECHNOLOGIES D'ALIMENTATION SANS BATTERIE

L'autonomie énergétique est aujourd'hui un enjeu central dans la conception de systèmes embarqués destinés à fonctionner en environnement contraint ou isolé, sans maintenance régulière. Parmi les alternatives aux batteries, l'utilisation de l'energy harvesting, c'est-à-dire la récupération d'énergie ambiante, a connu un fort développement.

Parmi les sources explorées dans la littérature, on retrouve notamment :

- les vibrations mécaniques (piézoélectricité),
- les gradients thermiques (effet Seebeck),
- les ondes radiofréquences (RF harvesting),
- et bien sûr, la lumière ambiante (récupération photovoltaïque).

Dans le cadre de notre projet, le choix s'est porté sur l'énergie solaire, qui reste la source la plus stable et la plus facilement exploitable pour des applications extérieures ou semi-intérieures. Le rapport de [Implementation of a Battery-Free Wireless Sensor for Cyber-Physical Systems Dedicated to Structural Health Monitoring Applications][1] sur les capteurs SHM sans batterie propose une approche avec alimentation solaire couplée à un système de stockage à supercapacité. Ils y démontrent qu'un cycle typique de mesure et transmission peut être assuré avec 245 mJ, stockés dans une supercapacité de 22 mF. Ces données ont directement servi de base au dimensionnement énergétique de notre système au début du projet.

La gestion efficace de cette énergie récoltée nécessite un PMU (Power Management Unit) capable de fonctionner avec des tensions très faibles et de gérer finement les phases de charge/décharge. Le composant AEM30940, utilisé dans notre projet, est issu de cette génération de PMU ultra-basse consommation. Il intègre une logique de seuils d'activation, permettant de démarrer une application embarquée uniquement lorsque suffisamment d'énergie est disponible.

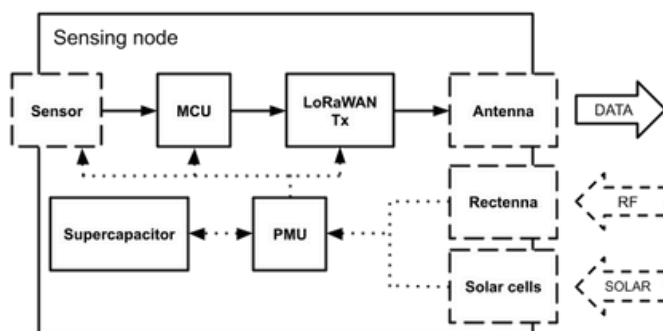


Fig 1 : Architecture du capteur communicant.

Le schéma ci-contre représente l'architecture globale de notre capteur communicant.

Elle montre que nos sources d'énergie (extérieur au système) sont gérées par le PMU et fournissent cette énergie à tous les modules de notre système.

2.2 COMMUNICATION FAIBLE CONSOMMATION (LORAWAN)

La transmission des données est un autre défi clé dans les systèmes sans fil autonomes. Pour limiter la consommation énergétique, des protocoles dits LPWAN (Low Power Wide Area Network) ont été développés. Parmi ceux-ci, LoRaWAN s'est imposé comme une technologie de référence, grâce à sa capacité à transmettre sur de longues distances (jusqu'à 10 km), avec des débits faibles, mais suffisants pour des capteurs.

LoRaWAN repose sur une modulation de type Chirp Spread Spectrum, qui utilise une méthode d'étalement de fréquence, robuste face au bruit, et permet une variation dynamique du facteur d'étalement (Spreading Factor), qui impacte directement la portée et la consommation :

SF faible → transmission rapide mais portée courte.

SF élevé → transmission lente mais longue portée (et consommation plus élevée).

Dans [Fair Adaptive Data Rate Allocation and Power Control in LoRaWAN, 2018][2] et d'autres publications industrielles, on observe que l'ajustement du bitrate et du duty cycle est un levier essentiel pour minimiser la consommation. Par exemple, réduire la fréquence des messages ou transmettre des données compressées permet d'économiser jusqu'à 80 % d'énergie dans certaines configurations.

Notre projet intègre un module LoRaWAN, associé à un microcontrôleur STM32, qui permet à la fois d'optimiser la transmission, et d'expérimenter des stratégies d'optimisation : mise en veille active, wake-up timer, optimisation de la consommation.

2.3 APPLICATIONS AUX CAPTEURS AUTONOMES

Les capteurs autonomes sans batterie trouvent une large application dans différents domaines tels que la surveillance à long terme d'infrastructures : ponts, bâtiments, pipelines, etc.

Ces applications, regroupées sous le terme de SHM (Structural Health Monitoring), nécessitent des dispositifs robustes, discrets, autonomes, et capables de communiquer à distance. Le retrait des batteries constitue un atout majeur dans ces environnements, en évitant la maintenance régulière ou les risques liés à l'usure chimique des cellules lithium-ion.

Plusieurs travaux récents, comme ceux présentés dans [Radiative Wireless Power Transfer: Where We Are and Where We Want to Go, 2023][3], insistent sur la complémentarité entre les différentes sources d'énergie ambiante et la nécessité d'une gestion intelligente de cette énergie.

Notre projet s'inscrit dans cette philosophie, en cherchant à démontrer qu'il est possible de concevoir un capteur sans batterie, utilisant uniquement une cellule solaire miniature, un PMU optimisé, et un protocole LoRaWAN configuré pour maximiser l'autonomie et la résilience du système.

3- ORGANISATION DU PROJET

Pour mener à bien le projet dans les délais impartis, nous avons organisé le travail en six grandes phases, représentant les étapes clés de la conception d'un capteur autonome sans batterie. Chacune de ces phases correspond à un objectif technique spécifique et inclut des tâches de recherche, de prototypage ou de validation expérimentale.

3.1 PLANNING DES SOUS-TÂCHES

Voici le découpage du projet :

Phase	Intitulé	Description
P1	Lancement du projet	Définition du sujet, rédaction de la problématique, planification globale.
P2	Recherche bibliographique	Étude des technologies disponibles (cellules solaires, PMU, LoRaWAN), analyse de projets similaires, sélection des composants.
P3	Dimensionnement énergétique	Estimation des besoins énergétiques, calcul de la puissance solaire requise, choix de la supercapacité.
P4	Réalisation de la maquette LoRaWAN	Mise en œuvre du module LoRa, programmation du microcontrôleur, configuration du serveur LoRaWAN.
P5	Réalisation de la maquette énergétique	Tests de la cellule solaire et du PMU AEM30940, mesure des temps de charge et de la tension sur la capa.
P6	Intégration finale et tests	Assemblage de l'ensemble (alimentation + communication), tests d'autonomie, évaluation de la fréquence de mesure possible.

Digramme de gant complet disponible en annexes p19

3.2 RÉPARTITION DU TRAVAIL ET MÉTHODOLOGIE

Le projet a été mené en binôme/trinôme (selon les périodes), avec une répartition souple, mais complémentaire des rôles.

La répartition n'était pas figée : les tâches ont été réalisées de manière collaborative, et certains tests ou réglages (ex. soudure, mesures, configuration des jumpers, code) ont été réalisés ensemble.

Nous avons adopté une approche itérative et expérimentale, basée sur :

- des cycles courts d'essai-erreur (tester – mesurer – ajuster),
- une validation régulière par rapport aux objectifs initiaux,
- la documentation de chaque phase via des rapports intermédiaires et photos.

Cette méthode a permis de maintenir une dynamique de groupe tout en assurant la traçabilité des choix techniques.

4. DIMENSIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE

4.1 ESTIMATION DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Pour déterminer la quantité d'énergie nécessaire, nous avons d'abord analysé les phases actives du système : mesure, traitement et transmission de données LoRaWAN. En nous appuyant sur la littérature, notamment le document [[Implementation of a Battery-Free Wireless Sensor...](#)][1], chaque cycle complet (mesure + traitement + émission) consomme environ 245 mJ, avec une durée active typique de 10 secondes.

Nous avons ensuite défini une fréquence de mesure d'une mesure par heure, soit 24 transmissions par jour. Ce choix représente un compromis réaliste entre performance et autonomie.

Ainsi, la consommation journalière peut être estimée théoriquement comme suit :

$$\text{Énergie quotidienne} = 0,245 \text{ J} \times 24 = 5,88 \text{ J}$$

Soit approximativement 11,76 mWh/jour, ce qui constitue la base pour dimensionner la cellule solaire.

4.2 CHOIX ET CARACTÉRISATION DE LA CELLULE SOLAIRE

Le choix de la cellule solaire repose sur plusieurs critères :

- taille réduite et intégrable dans une maquette,
- tension et courant adaptés au PMU AEM30940,
- performance sous faible éclairement.

Nous avons retenu une cellule solaire souple MP3-25, disponible chez Farnell, qui offre une bonne efficacité dans les conditions d'éclairage modérées à faibles.

Irradiance à Toulouse :

Selon les données du PVGIS (Commission Européenne), l'irradiance moyenne annuelle à Toulouse est d'environ 4,5 kWh/m²/jour, avec un minimum hivernal autour de 2 kWh/m²/jour. Pour garantir l'autonomie même en hiver, nous avons dimensionné la cellule pour les pires conditions.

Calcul de puissance nécessaire :

En considérant une efficacité de 15 % :

$$P_{\text{panneau}} = 11,76 \text{ mWh} / (2 \text{ kWh/m}^2/\text{jour} \times 0,15) \approx 40 \text{ mW}$$

Nous avons donc théoriquement besoin d'une cellule capable de produire au minimum 40 mW en condition d'ensoleillement faible. Des tests expérimentaux ont confirmé que la cellule choisie pouvait délivrer cette puissance sous lumière artificielle intense (lampe halogène ou LED forte intensité) sur une période prolongée.

4.3 DIMENSIONNEMENT DE LA SUPERCAPACITÉ

L'énergie récoltée étant intermittente, un stockage temporaire est nécessaire. Une supercapacité a été choisie pour sa capacité à se charger rapidement, son absence d'usure cyclique, et sa stabilité thermique.

Hypothèses de fonctionnement :

- Tension d'alimentation système : 3,3 V
- Durée d'un cycle actif : 10 secondes
- Courant moyen : 6 mA (Voir mesure page 9)

$E_{\text{cycle}} = U \cdot I \cdot t = 3,3 \cdot 6 \times 10^{-3} \cdot 10 \approx 0,2 \text{ J}$. Nous visons une capacité suffisante pour alimenter un cycle, avec une marge de sécurité de 50 %.

Calcul de la capacité : $E = 0.5 \cdot C \cdot (V_{\text{max}}^2 - V_{\text{min}}^2)$

Avec : $V_{\text{max}} = 4.5 \text{ V}$

$V_{\text{min}} = 3.6 \text{ V}$

$E = 0,2 \text{ J}$

$$C = (2 \cdot 0,2) / (4.5^2 - 3.6^2) \approx 50 \text{ mF}$$

Nous avons donc opté pour une supercapacité de 50 mF, à 5,5 V, avec faible ESR (quelques ohms) pour éviter une chute de tension rapide.

4.4 INTÉGRATION DU PMU AEM30940

Le PMU AEM30940 joue un rôle central dans la gestion de l'énergie :

Il permet la récupération à partir de faibles tensions (à partir de 275 mV).

Il dispose de deux sorties régulées (Tension réglable).

Il intègre une logique d'activation (cold start, seuils de tension, etc.).

Configuration retenue :

Source : Cellule solaire sur l'entrée V_{hary}

Stockage : Supercapacité sur l'entrée V_{store}

Sortie : 3,3 V pour l'alimentation du STM32 + LoRa

Nous avons adapté la configuration des jumpers du kit de développement pour activer la sortie uniquement lorsque la tension de stockage dépassait un seuil critique ($>3,6 \text{ V}$), garantissant un fonctionnement stable.

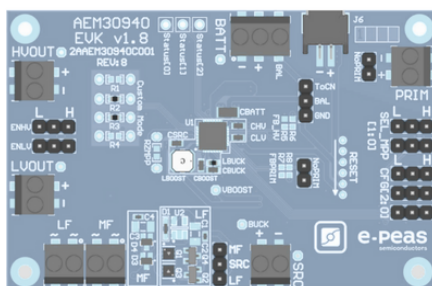


Fig 2 : PMU AEM30940.

Résultats expérimentaux :

Des mesures réalisées sous différentes conditions d'éclairage ont permis d'obtenir des temps de charge de la capacité d'environ 10 minutes selon l'intensité lumineuse. Les cycles de transmission sont possibles à fréquence horaire sans perte de fiabilité.

5. PROTOTYPAGE ET EXPÉRIMENTATIONS

5.1 MAQUETTE DE COMMUNICATION LORAWAN

Dans cette phase, l'objectif était de développer une maquette fonctionnelle de transmission de données via le protocole LoRaWAN, en s'appuyant sur un microcontrôleur basse consommation et un module radio adapté. Cette maquette constitue le cœur communicant de notre capteur sans batterie, et sa consommation énergétique devait être soigneusement mesurée afin d'orienter les phases ultérieures d'optimisation.

5.1.1 Objectifs de la maquette

- Émettre périodiquement des données simulées (valeurs de capteur)
- Utiliser un protocole LoRaWAN avec passerelle et serveur distant
- Vérifier la bonne réception des trames
- Évaluer la consommation énergétique par cycle de transmission
- Tester la portée de la communication dans un environnement réel

5.1.2 Architecture matérielle

La maquette a été réalisée à partir des éléments suivants :

- Carte nucleo WL55JC1 (Microcontrôleur STM32).
- Passerelle LoRaWAN (Nucleo F746ZG connectée au réseau du LAAS).
- Serveur LoRa (Network Server) : The Things Stack et Lorient.
- Logiciel de programmation CubelIDE et CubeProgrammer.

Des bibliothèques open source ont été utilisées pour piloter le module depuis le firmware embarqué.

5.1.3 Configuration du réseau

Le protocole LoRaWAN repose sur une architecture en trois niveaux :

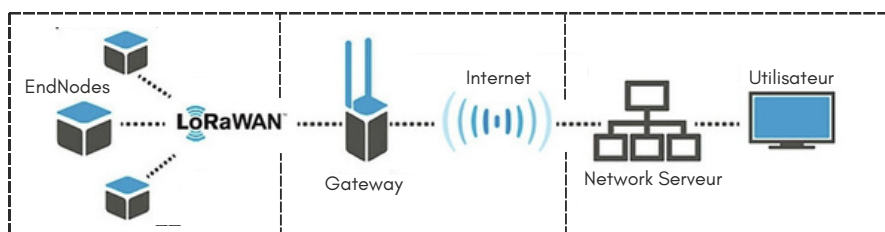


Fig 3 : Architecture LoRaWAN.

Pour la démonstration, une gateway a été connecté sur le réseau via son adresse MAC et enregistré sur notre serveur. Pour notre serveur, nous avons dans un premier temps utilisé The things stack puis Lorient.

Les trames LoRa étaient encapsulées en format binaire avec un payload simulé (valeurs aléatoires de température ou tension).

L'activation du device s'est faite en mode ABP afin de minimiser la consommation énergétique et accélérer la communication. L'OTAA (Over The Air Activation) nécessite une phase de jointure dynamique qui consomme beaucoup d'énergie et de temps, alors que l'ABP utilise des clés préconfigurées permettant une connexion immédiate.

5.1.4 Tests de fonctionnement

Les tests ont permis de valider :

- L'envoi correct de paquets toutes les heures,
- La réception sur le serveur avec enregistrement des trames,
- Une portée jusqu'à plus de 800m (Mesuré entre le LAAS et le bâtiment U4).



Fig 4 : Maquette de communication LoRaWan.

5.1.5 Mesure de consommation

Un test spécifique a été effectué pour mesurer la consommation électrique lors d'un cycle complet de transmission.

Les tests ont porté sur cinq paramètres logiciels clés influant directement sur le comportement énergétique du nœud LoRa.

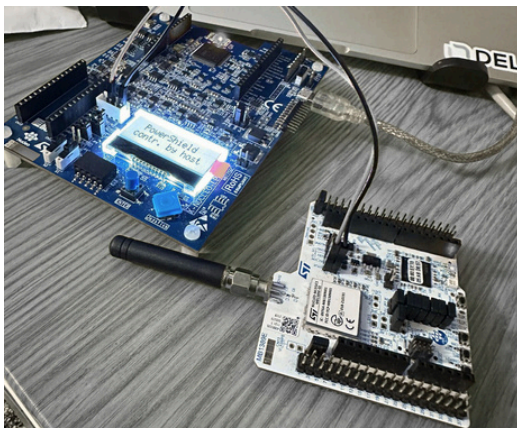


Fig 5 : Maquette de mesure de consommation LoRaWan.

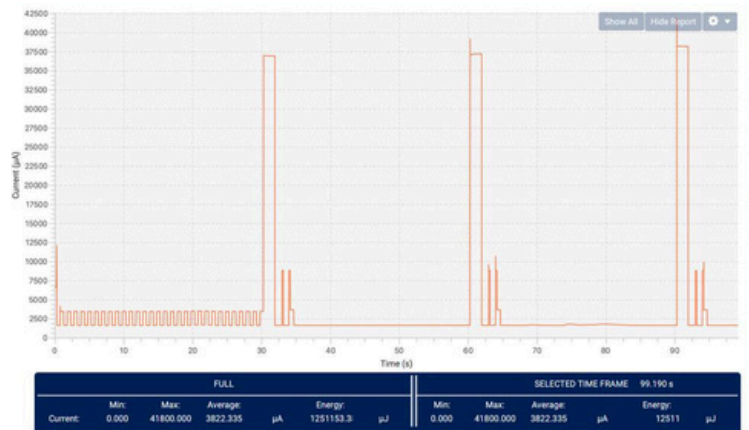


Fig 6 : Capture logicielle STM32PowerMonitor

Paramètres modifiés pour les mesures :

Paramètre	Ligne/section	Détail
Intervalle d'envoi	#define APP_TX_DUTYCYCLE	Modifié à 1s, 30s, 60s
Puissance d'émission	#define LORAWAN_DEFAULT_TX_POWER	TX_POWER_0 à TX_POWER_5
Taille du message	SendTxData()	Passage de 64 octets à 2 octets
Horloge système	SystemClock_Config()	MSI à 2.097 MHz, sans PLL

Résultat de la mesure :

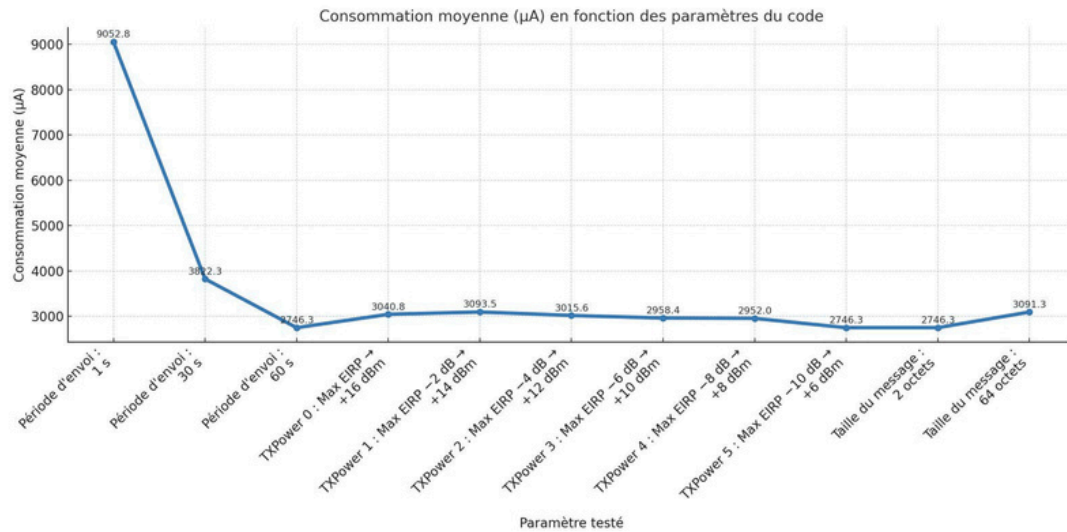


Fig 6 : Évolution de la consommation de la carte en fonction des paramètres.

→ Plus l'intervalle d'envoi est grand, plus la consommation diminue. Cela s'explique par une plus longue période passée en veille STOP2.

→ La puissance d'émission impacte peu la consommation globale.

→ La réduction du payload diminue le temps de transmission LoRa, donc la consommation.

Résultat : un pic de courant de 25 à 30 mA pendant quelques centaines de millisecondes, suivi d'un retour à la consommation de veille. Cela correspond bien aux valeurs annoncées dans la documentation du module.

5.1.5 Limites et ajustements

Quelques difficultés ont été rencontrées :

- Mauvaise configuration des nodes en ABP
- Difficultés à capter le signal à longue distance

Des ajustements ont été apportés :

- Optimisation du SF et du TX power pour maximiser la portée sans surconsommer
- Simplification du payload pour réduire la durée d'émission
- Mis en place ABP plutôt que OTAA

5.1.6 Conclusion de la phase

La maquette LoRaWAN a permis de valider la faisabilité technique d'une transmission fiable avec un système basse consommation. Elle constitue un socle essentiel pour l'intégration finale avec le système d'alimentation solaire, en vue d'un fonctionnement autonome.

5.2

MAQUETTE D'ACQUISITION ET STOCKAGE D'ÉNERGIE

L'objectif de cette phase était de concevoir et de tester une chaîne d'alimentation autonome, capable de fournir suffisamment d'énergie pour alimenter un capteur sans batterie. Cette maquette repose sur la récupération d'énergie solaire, la gestion intelligente de cette énergie via un PMU, et son stockage dans une supercapacité.

5.2.1 Objectifs de la maquette

- Valider le bon fonctionnement d'une cellule solaire en tant que source principale d'énergie.
- Mettre en œuvre un PMU AEM30940 pour gérer la récolte, le stockage, et la distribution de l'énergie.
- Dimensionner et tester une supercapacité capable de stocker l'énergie nécessaire à un cycle de transmission.
- Mesurer les temps de charge, tensions de seuil, et stabilité de l'alimentation.
- Intégrer une recharge par récupération d'énergie RF.

5.2.2 Architecture matérielle

La maquette a été réalisée avec les éléments suivants :

- Cellule solaire souple MP3-25, 3 V / 31 mA en plein éclairage.
- PMU AEM30940 (Dev Kit), utilisé pour gérer l'énergie entrante et alimenter la charge.
- Supercondensateur 50 mF – 5,5 V (AVX-BestCap) pour le stockage.
- Rectifieur 868 MHz et antennes patch.
- Outils de mesure : multimètre, oscilloscope, lampe pour simuler le soleil.

5.2.3 Tests de fonctionnement solaire

Plusieurs tests ont été réalisés pour évaluer le comportement énergétique du système :

- Mesure de tension en circuit ouvert :
 - Sous forte lumière : jusqu'à 3.3 V.
 - Sous lumière modérée : 2,5 à 3 V.
- Mesure en charge ($R = 1,5 \text{ k}\Omega$) :
 - Chute de tension observée après 10 min → signe d'instabilité sans régulation.
 - PMU nécessaire pour stabiliser la sortie.
- Temps de charge de la supercapacité (50 mF) :
 - Sous lumière forte : 8 minutes pour atteindre 3,63 V.
 - Sous lumière ambiante : >20 min (charge incomplète).
- Mesure de la tension de décharge :
 - Avec une charge de 8 mA (simulation transmission LoRa) pendant 10 s.
 - Chute maîtrisée de 3,63 V à 2,5 V → système resté dans la plage de fonctionnement.

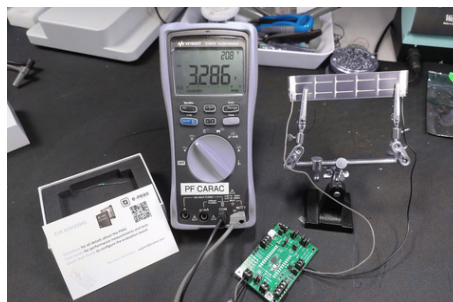


Fig 7 : Test fonctionnement solaire.

5.2.4 Tests de fonctionnement avec acquisition d'énergie RF

Les tests de la maquette énergie avec la cellule solaire et l'acquisition d'énergie RF ont permis de valider la combinaison des sources pour accélérer la recharge du système.

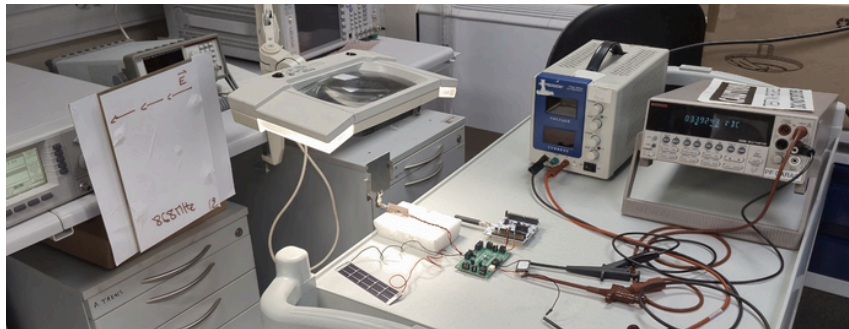


Fig 8 : Test fonctionnement acquisition énergie RF.

5.2.5 Analyse des résultats

Ces tests ont permis de valider les points suivants :

- La cellule solaire est suffisante pour recharger la supercapacité à condition d'un éclaircissement régulier.
- Le PMU assure efficacement la régulation et la protection contre les sous-tensions.
- Le dimensionnement de la supercapacité (50 mF) est adapté pour une consommation ponctuelle :

Type de recharge	solaire	solaire + RF
Temps moyen mesure (ensoleillement max)	5 min	2-3 min

- En condition réelle, le système peut fonctionner avec 1 cycle de transmission par 15 min sans difficultés.

5.2.6 Limites et axes d'amélioration

Quelques points critiques ont été identifiés :

- La cellule solaire a une efficacité variable selon l'angle d'exposition → une orientation optimisée est essentielle.
- Le temps de charge est trop élevé pour une faible exposition lumineuse.
- Des tests avec d'autres technologies de PMU (ex. BQ25504) pourraient permettre une gestion plus fine de la puissance

5.2.7 Conclusion de la phase

La maquette énergétique fonctionne comme prévu et fournit suffisamment d'énergie pour alimenter le module LoRa et son microcontrôleur, de manière totalement autonome. Elle constitue une base solide pour l'intégration finale du système, traitée dans la section suivante.

5.3

PROTOTYPE FINAL ET TESTS D'INTÉGRATION

Après avoir validé séparément les deux sous-systèmes du projet (la maquette LoRaWAN et la maquette énergétique), nous avons procédé à leur intégration finale pour obtenir un prototype fonctionnel, autonome et sans batterie, capable de capter de l'énergie solaire, de stocker cette énergie, puis de transmettre des données via LoRaWAN de manière périodique.

5.3.1 Objectif de l'intégration

- Coupler le système d'alimentation autonome (cellule solaire/RF + AEM30940 + supercapacité) avec le système de communication LoRaWAN.
- Assurer un fonctionnement stable et cyclique sans alimentation externe.
- Vérifier que le système peut effectuer une transmission réelle de données avec uniquement l'énergie récupérée.
- Mesurer le temps de recharge typique pour l'envoi d'une donnée.

5.3.2 Assemblage du prototype

Le prototype final repose sur le montage suivant :

- Entrée énergie : cellule solaire connectée à l'entrée Vharv du PMU AEM30940.
- Stockage : supercapacité 50 mF connectée à Vstore.
- Sortie régulée connectée à la carte STM32.
- Software : code réalisé et téléverser déclenchant une mesure et une transmission ABP à la mise sous tension et toutes les secondes.

Le système reste inactif jusqu'à ce que le PMU détecte que la tension aux bornes de la capacité dépasse le seuil de 3.63 V (réglable). À ce moment, le microcontrôleur est alimenté, exécute son code, puis s'éteint lorsque la tension redescend.

5.3.3 Fonctionnement en conditions réelles

Les tests ont été réalisés dans un environnement intérieur éclairé par une lampe halogène simulant une irradiance forte.

Cycle de fonctionnement observé :

1. Phase de 1^{re} charge : la cellule solaire recharge lentement la supercapacité via le PMU (environ 10 à 15 min avec uniquement le solaire).
2. Phase d'activation : lorsque la tension aux bornes de la capacité atteint 3.63 V (configurable) , la PMU active la sortie.
3. Acquisition et transmission : la carte STM32 exécute un cycle de mesure et envoie un paquet via LoRa. La supercapacité chute jusqu'à 2.5 V.
4. Recharge : La recharge redémarre automatiquement.

Résultat : le cycle complet est entièrement autonome et répétable, sans aucune intervention humaine.

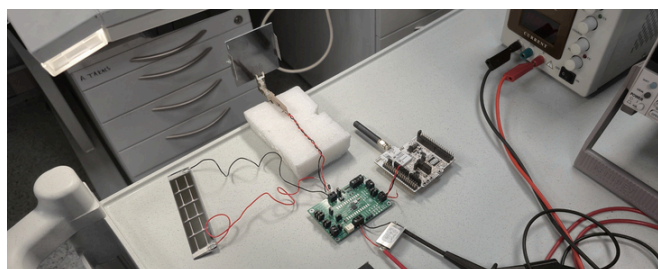


Fig 9 : Maquette finale.

5.3.4 Visualisation des données

Pour la démonstration finale, nous avons modifié le code pour réaliser des envois des données de température du capteur interne ainsi que la mesure de tension sur une broche analogique, cette dernière simulant le comportement d'un capteur supplémentaire.

Le backend, implémenté en Node.js, reçoit les données au format JSON. Un module de décodage (Render) interprète les valeurs brutes transmises par les capteurs, convertissant notamment la tension mesurée en volts et la température en degrés Celsius. Ces données sont alors mises à disposition et renvoient en temps réel les dernières mesures reçues.

Pour la visualisation, une interface web a été développée utilisant la plateforme Velo by Wix. Un script JavaScript intégré dans la page interroge régulièrement l'API backend, récupérant ainsi les données toutes les 5 secondes.

Cette architecture complète, du capteur jusqu'à la visualisation, offre un exemple concret de chaîne de mesure typique des capteurs IoT modernes.

Lien vers l'interface : <https://www.quentinbernyer.fr/lora-irp>



Fig 10 : Interface de mesure web.

5.3.5 Limites observées

- En condition de basse luminosité, le temps de charge devient excessif (>15 minutes).
- Le microcontrôleur ne revient pas en veille après transmission si le code n'est pas optimisé (risque de consommation parasite).
- L'absence de gestion intelligente du duty-cycle peut réduire l'efficacité en cas de météo variable.

5.3.6 Conclusion de la phase

L'intégration finale a permis de démontrer la faisabilité d'un capteur LoRaWAN 100 % autonome, fonctionnant sans batterie grâce à l'énergie solaire et RF. Ce prototype est capable d'effectuer une mesure et une transmission toutes les environ 10 minutes avec une exposition lumineuse suffisante.

L'interface de mesure vient compléter ce prototype et sa chaîne d'acquisition.

6. ANALYSE CRITIQUE DU PROJET

6.1 BILAN DES RÉSULTATS OBTENUS

Le projet avait pour objectif de démontrer la faisabilité d'un capteur sans batterie, alimenté uniquement par récupération d'énergie solaire, et capable de transmettre des données via LoRaWAN. L'ensemble des étapes nécessaires à cette démonstration ont été menées à bien :

- Une maquette de communication LoRaWAN fonctionnelle a été développée, avec réception des trames validée sur un serveur distant.
- Le dimensionnement énergétique a été effectué à partir d'hypothèses réalistes, confirmées par des mesures expérimentales.
- Une maquette d'alimentation autonome a été réalisée à l'aide d'un PMU AEM30940, d'une cellule solaire souple, d'un système d'acquisition d'énergie RF et d'une supercapacité de 50 mF.
- Enfin, une intégration complète a permis de faire fonctionner le système de manière totalement autonome, avec des cycles de charge, activation, transmission et repos.

Les objectifs fixés en début de projet ont donc été atteints dans leur ensemble, et le prototype final constitue une preuve de concept réussie. Le capteur peut transmettre un message toutes les 5 à 20 minutes en condition d'éclairement suffisant, ce qui correspond aux exigences minimales d'une application de type monitoring passif (température, humidité, vibration lente...).

6.2 RÉAJUSTEMENTS ET LIMITES DU SYSTÈME

Ce projet a nécessité plusieurs adaptations et réajustements au cours de sa réalisation, en lien avec les contraintes techniques et les conditions réelles de mise en œuvre.

Réajustements effectués :

- Fréquence de transmission revue à la baisse : initialement visée à 1 mesure toutes les 10 minutes, elle peut être ajustée à 1 mesure/15 min voire 30min en fonction de la luminosité extérieur.
- Ajoute d'une interface graphique pour la visualisation des données.

Limites identifiées :

- Le temps de charge dépend fortement de l'irradiance. En condition réelle, il peut dépasser plusieurs dizaines de minutes, ce qui limite la fréquence des transmissions.
- La maquette reste volumineuse et non miniaturisée, ce qui la rend peu adaptée à un déploiement réel sans optimisation mécanique et électronique.
- Le coût unitaire reste élevé pour un prototype, bien qu'il soit optimisable en série (cf. section 8).

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

7.1 DIFFICULTÉS TECHNIQUES RENCONTRÉES

Ce projet nous a confrontés à de nombreux défis techniques. Parmi les principales difficultés :

- Le dimensionnement énergétique a nécessité une approche rigoureuse sur l'estimation de la consommation, afin de garantir que la cellule solaire puisse fournir une énergie suffisante, même en conditions défavorables.
- L'intégration du PMU a demandé une bonne compréhension de son fonctionnement, de ses seuils de tension et de ses stratégies de gestion d'énergie.
- La mise en œuvre de la pile LoRaWAN a été source de difficultés en raison de la complexité du protocole, du code, et de problèmes de configuration réseau.
- Enfin, le synchronisme entre la charge énergétique et l'activation du microcontrôleur a exigé plusieurs itérations de tests pour stabiliser le comportement du système.

Ces obstacles nous ont amenés à ajuster régulièrement nos choix techniques, à itérer sur la conception, et à nous adapter aux contraintes du matériel disponible.

7.2 PERSPECTIVES D'AMÉLIORATION ET D'INDUSTRIALISATION

Ce projet constitue une preuve de concept fonctionnelle, mais de nombreuses pistes d'amélioration sont possibles pour envisager un passage à l'échelle :

- Intégrer un système de régulation dynamique de la fréquence d'envoi, basé sur la prévision d'énergie disponible (par ex. via un capteur de luminosité).
- Développer un PCB personnalisé intégrant le PMU, la cellule solaire, le LoRa, et les capteurs, pour miniaturiser le système.
- Étendre la récupération d'énergie à d'autres sources (ex : vibrations), pour accroître l'autonomie en milieu sombre.

D'un point de vue applicatif, ce capteur pourrait trouver sa place dans des cas d'usage variés : surveillance environnementale, agriculture connectée, suivi de structures (ponts, bâtiments), ou encore IoT urbain à déploiement longue durée.

7.3 RESENTI PERSONNEL SUR LE PROJET

Ce projet a été particulièrement formateur et stimulant.

Nous avons pu explorer un système embarqué complet, mêlant :

- électronique analogique (PMU, supercap, solaire),
- logiciel embarqué (programmation STM32, gestion d'énergie),
- télécommunications (protocole LoRaWAN, architecture réseau),
- et calcul énergétique (modélisation, mesure, optimisation).

Cette pluridisciplinarité nous a poussés à sortir de nos zones de confort.

Nous avons dû nous organiser efficacement, répartir les tâches selon les compétences de chacun. Ce projet représente donc bien plus qu'un simple exercice académique : il nous a permis de mettre en pratique des compétences d'ingénierie réelles, et constitue une expérience concrète et valorisante en vue de notre insertion professionnelle dans le domaine des systèmes embarqués.

8. ANNEXE FINANCIÈRE

CAS 2 : PROTOTYPE COMMERCIALISABLE

8.1 BUDGET PRÉVISIONNEL DÉTAILLÉ

Ce tableau présente une estimation des coûts associés à la réalisation du prototype, en distinguant les différentes natures de dépenses : main-d'œuvre, composants, outils, et frais indirects.

Catégorie	Détail	Quantité	Coût unitaire (€)	Total (€)
Main d'œuvre	Étudiant (600 h × 15 €/h)	1	9 000	9 000
Composants électroniques	Cellule solaire souple MP3-25	1	5	5
	PMU AEM30940 (dev kit ou IC)	1	6	6
	Supercondensateur 50 mF / 5,5 V	1	4	4
	Module nucleo	1	70	70
	Carte PCB prototype	1	20	20
Outils et tests	Outils, soudure, câbles, pinces, etc.	—	—	50
	Matériel de labo (oscilloscope, alim)	—	—	150
Frais indirects	Publicité (flyers, démo salon)	—	—	100
	Dépôt de brevet (INPI – France)	—	—	1 000
	Coût structure (hébergement serveur)	—	—	200
TOTAL				10 605€

8.2 ÉTUDE DE RENTABILITÉ DU PRODUIT

Prix estimé du produit : 120 €

Marge brute estimée (Marge fixée pour un produit qui coûte 70€)

Marge brute = 120-70 = 50 € par unité

Seuil de rentabilité (Seuil minimum de ventes de produits)

Seuil = Coût total de développement / Marge unitaire = 213 produits

9. ANNEXES

9.1 SOURCES

- [1] G. Loubet, A. Takacs and D. Dragomirescu, "Implementation of a Battery-Free Wireless Sensor for Cyber-Physical Systems Dedicated to Structural Health Monitoring Applications," in IEEE Access, vol. 7, pp. 24679-24690, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900161.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8643921>
- [2] K. O. Abdelfadeel, V. Cionca and D. Pesch, "Fair Adaptive Data Rate Allocation and Power Control in LoRaWAN," 2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM), Chania, Greece, 2018, pp. 14-15, doi: 10.1109/WoWMoM.2018.8449737.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8449737>
- [3] V. Palazzi et al., "Radiative Wireless Power Transfer: Where We Are and Where We Want to Go," in IEEE Microwave Magazine, vol. 24, no. 2, pp. 57-79, Feb. 2023, doi: 10.1109/MMM.2022.3210145.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10004795>
- [4] M. David, W. Derigent, G. Loubet, A. Takacs and D. Dragomirescu, "Communicating Materials: Communicating Concrete Development for Construction Industry," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 20, no. 4, pp. 6983-6994, April 2024, doi: 10.1109/TII.2024.3352261.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10415891>
- [5] Alexandru Takacs, Gael Loubet, Taki Djidjekh, Lamoussa Sanogo, Daniela Dragomirescu. Battery-free Wireless Sensors for IoT applications. 2024 15th International Conference on Communications (COMM), Oct 2024, Bucharest, Romania. pp.1-6, 10.1109/COMM62355.2024.10741486. hal-04786096.
https://laas.hal.science/hal-04786096v1/file/CoMM_Takacs.pdf
- [6] A. P. Sample, J. Braun, A. Parks and J. R. Smith, "Photovoltaic enhanced UHF RFID tag antennas for dual purpose energy harvesting," 2011 IEEE International Conference on RFID, Orlando, FL, USA, 2011, pp. 146-153, doi: 10.1109/RFID.2011.5764615.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/5764615>
- [7] M. Virili, A. Georgiadis, A. Collado, P. Mezzanotte and L. Roselli, "EM characterization of a patch antenna with thermo-electric generator and Solar Cell for hybrid Energy Harvesting," 2015 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), San Diego, CA, USA, 2015, pp. 44-46, doi: 10.1109/RWS.2015.7129773.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7129773>

9. ANNEXES

9.2 CODES

Lien vers le dossier du code final :

<https://drive.google.com/drive/folders/1ht7AFwh0EtF2PK5zxpw0HGuaWG6JEFtC?usp=sharing>

9.3 GANT

Lien	vers	le	GANT
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1CA3fRgUBK5ceAe8DG05Lh4KzASOUAKz2gxJRdDHZMMs/edit?usp=sharing			

