Transmission de données océanographiques via le réseau IoT LoRaWAN sur une bouée instrumentée du Service National d'Observation ReefTEMPS

Sylvie Fiat
ENTROPIE, IRD, Univ. La Réunion, CNRS, Ifremer, Univ. Nouvelle-Calédonie
Centre IRD de Nouméa, 98848 Nouméa Cedex, Nouvelle-Calédonie

Régis Hocdé
MARBEC, Univ. Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD
Université de Montpellier, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5, France

David Varillon
IMAGO, IRD
Centre IRD de Nouméa, 98848 Nouméa, Nouvelle-Calédonie

Résumé

En cas d'événements extrêmes, comme des cyclones, des tempêtes tropicales ou des épisodes de blanchissement corallien, pouvoir accéder en temps réel à des données de houle, de température, de salinité est précieux pour permettre les prises de décisions dans l'esprit de systèmes d'alerte précoce mais également pour l'étude de ces événements.

Le Service National d'Observation (SNO) ReefTEMPS a déployé une centaine de capteurs immergés autonomes, en zone littorale et dans les lagons de plusieurs pays et États insulaires du Pacifique Sud. L'accès aux données n'étant possible qu'à la relève des capteurs, nous avons initié une expérimentation de transmission de données en temps réel.

Pour cela, nous avons acquis en 2020 une passerelle LoRaWAN pour le Centre IRD (Institut de Recherche pour le Développement) de Nouvelle-Calédonie avec comme objectif l'utilisation de la technologie Internet of things (IoT) entre le réseau de capteurs et la base de données océanographique.

Une bouée de prototypage a été mise en place dans la baie de l'Anse Vata à Nouméa. Le dispositif comprend un capteur de température de type Sea Bird SBE16 immergé à une profondeur de 3 m et une bouée de surface permettant sa signalisation et la transmission des données. Le capteur est relié à la surface par un câble de connexion jusqu'à un nano ordinateur autonome muni d'une antenne radio. Le système embarqué procède à la transmission des informations par le réseau IoT.

Dans cet article nous détaillerons le système de communication réalisé par les étudiants du Lycée technologique du Mont-Dore ainsi que le montage complet réalisé par nos soins. Ce prototype démontre la faisabilité et la généricité d'une solution IoT LoRaWAN pour transmettre en temps réel des données océanographiques in situ issues de capteurs immergés en profondeur dans le domaine côtier.

Mots-clefs

IoT, communication radio, capteurs physico-chimiques, lagon, récifs coralliens, plateformes éloignées

1 Introduction

ReefTEMPS[1] est un observatoire des océans côtiers dans le sud, le sud-ouest et l'ouest du Pacifique qui permet de surveiller à long terme le changement climatique et ses effets sur l'état des récifs coralliens et de leurs ressources. Depuis 1958, le réseau déploie des capteurs de température, de pression, de salinité et d'autres paramètres sur 98 sites répartis dans la zone côtière de quelques 20 États et territoires insulaires.

ReefTEMPS, labellisé Service National d'Observation (SNO), fait partie de l'Infrastructure française de Recherche Littorale et COtière (IR ILICO) [1].

Les plateformes du réseau ont été positionnées stratégiquement par rapport aux processus observés et aux enjeux scientifiques sous-jacents, dans des lieux parfois difficiles d'accès et pour lesquels très peu de données existent. En effet, pour la température, la télédétection par satellite ne permet d'acquérir que des données de surface de la mer (SST), limitées en résolution et en précision, et pouvant de plus combiner des mesures terrestre et marine en zones côtières. La variance minimale est encore limitée à 0.4°C et la résolution minimale à 0,05° soit des mailles de plusieurs centaines de mètres [2]. Des capteurs autonomes, dont les fréquences d'acquisition vont de 30 minutes à 1 seconde (haute fréquence), sont donc immergés pendant des périodes allant de 6 mois à 2 ans, puis sont déchargés. Les données acquises sont ensuite ajoutées à la base de données par les ingénieurs en instrumentation. Un processus de validation impliquant des océanographes qualifie les données et produit de longues séries temporelles ou "séries historiques". Le réseau a été déployé dans toute la région des îles du Pacifique à partir de 2010, mais il a intégré des stations beaucoup plus anciennes, dont certaines sont en service depuis 1958.

Le système d'information, développé en 2011, a été conçu autour des principes du FAIR[2] (Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability)et propose une palette de services web d'accès aux données basés sur différents formats et standards [3] [4] [5]. Le système d'information est un composant de l'océanographie opérationnelle de l'IR ILICO [1].

ReefTEMPS est utilisé pour mesurer les changements de tendance à long terme (ex : la température de l'eau de mer), les événements rares ou extrêmes (ex : les tempêtes tropicales) et pour comprendre les processus physiques, chimiques et biologiques à l'œuvre dans la dynamique globale des systèmes (ex : le blanchissement des coraux) [6].

L'enjeu de rendre les données in situ accessibles en temps-réel ou semi-différé revêt plusieurs intérêts:

1. documenter l'intensité d'un phénomène rare (ex : hauteur des vagues lors du passage d'un cyclone ou d'une tempête tropicale) ou caractériser un phénomène (ex : augmentation de la température de l'eau lors d'un épisode de blanchissement de coraux) sans attendre que les données soient déchargées 6 mois à 2 ans après chaque événement ;
2. actualiser et prolonger les séries historiques au quotidien pour rendre accessible les tendances et les cycles les plus récents ;
3. offrir un accès à des données d'intérêt à un public plus large que les communautés de spécialistes (ex : collectivités territoriales, bureaux d'études, médias, grand public… dont les usagers de la mer comme les surfeurs).

Après avoir testé les connexions satellitaires, nous avons exploré et testé en conditions opérationnelles la technologie LoRaWAN IoT pour transmettre en temps réel des données océanographiques *in situ* de température de l'eau de mer issues d'un capteur immergé en profondeur dans le domaine côtier du territoire de Nouvelle-Calédonie.

1 http://www.reeftemps.science

2 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4792175

Notre article présentera dans la deuxième partie l'état de l'art du protocole LoRaWAN et des technologies IoT, les infrastructures existantes et notre réseau de capteurs, ainsi qu'un état des cas de déploiement d'applications de surveillance de l'environnement basées sur IoT LoRaWAN. La troisième partie présentera la conception du système de communication prototype réalisée par les étudiants du Lycée technologique du Mont-Dore et la quatrième partie détaillera les matériels et méthodes ayant permis le montage complet réalisé par nos soins. La cinquième partie présentera les avantages et limites de cette technologie LoRaWAN dans notre contexte d'application. La sixième partie ouvrira sur des perspectives à l'échelle du SNO ReefTEMPS et plus généralement pour l'océanographie côtière et la surveillance des milieux marins isolés.

2 État de l'art

2.1 Aperçu du protocole LoRaWAN et des technologies pour l'IoT

LoRaWAN est un protocole de télécommunication, OpenSource et libre de droits. Ce protocole LoRaWAN permet la communication à bas débit, par radio, d'objets à faible consommation électrique communiquant selon la technologie de modulation des ondes radios LoRa et connectés à l'Internet via des passerelles, participant ainsi à l'Internet des objets (IoT). Les informations peuvent transiter sur des distances plus longues via LoRaWAN que sur les réseaux télécoms traditionnels. LoRaWAN présente plusieurs autres avantages comme celui d'être une technologie à faible coût, d'offrir une ouverture étendue dans les environnements extérieurs tout en ne nécessitant qu'une faible consommation d'énergie au niveau des objets connectés [7].

2.2 Réseau LoRaWAN de Nouvelle-Calédonie

Le territoire de Nouvelle-Calédonie dispose de plusieurs réseaux privés dédiés à l'Internet des objets utilisant la technologie LoRaWAN. L'opérateur Télécom local en propose notamment un qui dispose d'une cinquantaine d'antennes [8].

L'IRD a fait l'acquisition en 2020 d'une antenne LoRa qui a été déclarée sur le réseau LoRa Alliance afin de rendre son utilisation publique. Il est prévu d'acquérir d'autres antennes pour la Nouvelle-Calédonie.

2.3 Capteurs de température autonomes et connectables du SNO ReefTEMPS

Le Réseau d'observation des eaux côtières du Pacifique insulaire (SNO ReefTEMPS) est un réseau de capteurs de température, pression, salinité et autres observables dans le domaine côtier du Pacifique Sud, Ouest et Sud Ouest [6] [9] [1]. Les capteurs déployés sont pour l'essentiel des capteurs autonomes, qui enregistrent les données d'observation durant des périodes comprises entre 6 mois et 2 ans selon l'éloignement et l'isolement du site. L'accès aux données n'est donc possible qu'après la relève de chaque sonde, ce qui induit une transmission en temps différé des données à la communauté des utilisateurs. Le SNO ReefTEMPS dispose également de quelques capteurs connectés par voie satellite et donc qui permettent la transmission en temps réel des données d'observations, mais les coûts d'abonnement satellitaires sont très élevés.

A ce jour le SNO ReefTEMPS dispose de 94 plateformes géographiquement distribuées dans 20 États et territoires insulaires. Chaque plateforme dispose de un ou plusieurs capteurs: température, pression, salinité et autres observables. L'ensemble du parc de sondes de température SBE16 du SNO ReefTemps dispose d'une interface RS232 permettant optionnellement d'être reliée à la surface par un câble. Cette interface d'échange devient un atout en substituant la liaison filaire prévue par le constructeur par un protocole d'échange IoT LoRaWAN. Chaque plateforme est donc connectable dès lors qu'elle peut être équipée d'une sonde ad hoc.

2.4 Réseau de capteurs immergés en domaine littoral et côtier et transmission temps-réel

La technologie LoRaWAN semble en théorie avantageuse pour les applications dans les domaines de l'agriculture, la détection des fuites ou les mesures environnementales, lorsque le nombre de messages périodiques/apériodiques est réduit et des contraintes de délai relâchées [7]. Le déploiement en phase opérationnelle de réseau de capteurs environnementaux basés sur LoRaWAN se révèle plus avancé en milieu urbain ou terrestre. Des déploiements de capteurs de température et de salinité ont été récemment réussis en zone estuarienne pour monitorer le champ proche environnant des installations aquacoles [10]. Une évaluation expérimentale des performances de la technologie LoRaWAN a été conduite dans un scénario marin, de durée limitée, combinant des capteurs déployés sur un navire de passagers et un navire de recherche naviguant dans une zone côtière restreinte, avec des résultats prometteurs hormis les limites imposées par les reliefs naturels de la côte [11]. Nos travaux ont permis d'explorer le déploiement d'une sonde CTD (Conductivity Temperature Depth) immergée combinant capteurs de température et de conductivité, en milieu récifal et côtier, avec transmission en temps réel des données acquises in situ via LoRaWAN IoT dans des conditions opérationnelles.

3 Conception du prototype

3.1 Description du prototype

Le prototype que nous avons conçu pour les tests est composé d'une bouée océanographique sur laquelle est fixée un nano ordinateur, muni d'une puce GPS, installé dans une caisse étanche et chargé de la transmission des données par IoT. Le nano ordinateur est connecté, au moyen d'un câble de transmission sous-marin, à la sonde immergée sous la bouée. Les données reçues de la sonde sont transformées pour envoi par le protocole LoRa. Le détail de l'encodage est décrit en 4.2.

Le nano ordinateur envoie les données à intervalles réguliers, la ou les passerelles LoRaWan réceptionnant le message le transforme au format JSON (JavaScript Object Notation) et le transmet par le protocole HTTP via des web services.

Le service d'intégration des données de ReefTEMPS, positionné en mode écoute, récupère les données et procède à leur traitement avec notification des administrateurs en cas de réception d'un message d'alerte ou de dérive et intégration des données en mode nominal (4.5).

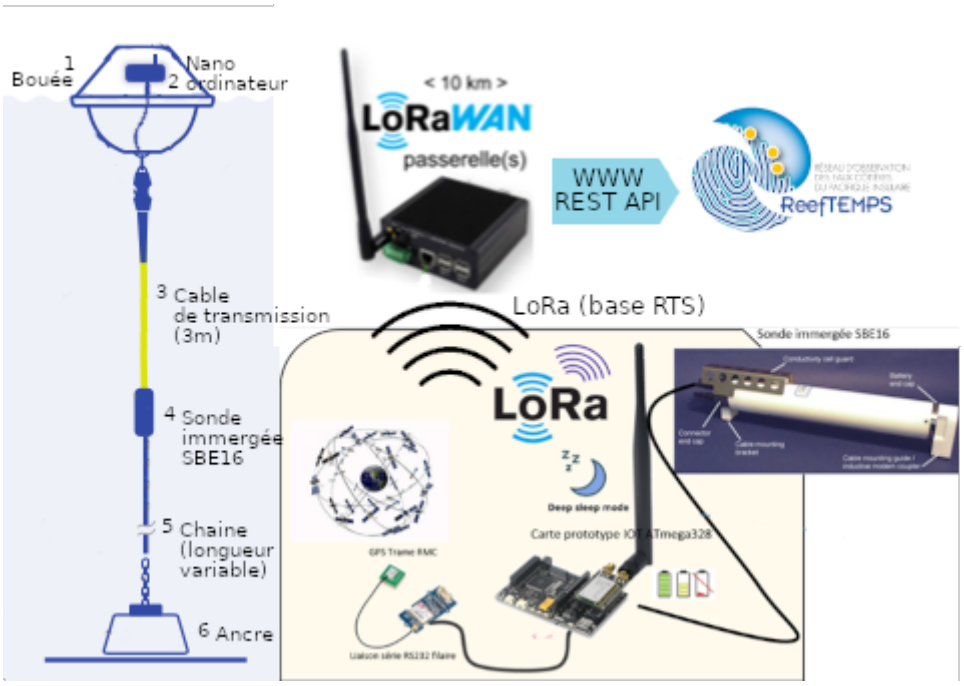


Figure 1 - Schéma du prototype - à gauche, le schéma de montage du prototype, en bas, le détail des appareils mis en œuvre et en haut les protocoles d'envoi des données du réseau LoRa vers base de données océanographique du SNO ReefTEMPS.

3.2 Cahier des charges du système

Les contraintes transmises pour la réalisation du projet de transmission des données par les étudiants du Lycée du Mont-Dore sont les suivantes :

- Communiquer via un port série avec une sonde de type SBE16 afin d'envoyer des commandes, recevoir des informations et les décoder ;
- Communiquer avec un GPS via un port série afin de recevoir des informations et les décoder de manière à en extraire la position : latitude et longitude ;
- Communiquer avec un émetteur LoraWan afin d'envoyer des informations via une passerelle ;
- Détecter les anomalies : le système pourra être positionné soit en mode par défaut « ACQUISITION » des données de la sonde SBE16, soit dans le mode « ALERTE » dès lors que la tension de la batterie est faible, soit dans le mode « DERIVE » dès modification des positions GPS révélant un déplacement de la bouée ;
- Développer un workflow d'intégration des données reçues dans la base de données ReefTEMPS.

mode de fonctionnement
ACQUISITION: GPS ok et Vbat ok --> envoi T, C, S
DERIVE: dérive position --> envoi position GPS RMC
ALERTE: Vbat<seuil envoi --> Vbat + pos GPS RMC
HELP: Pas de GPS ou pas de sonde --> envoi N° sonde et type défaut

Figure 2 - Fonctionnement des différents états du système connecté.

4 Matériels et méthode de montage du dispositif

4.1 Nano ordinateur ATmega328

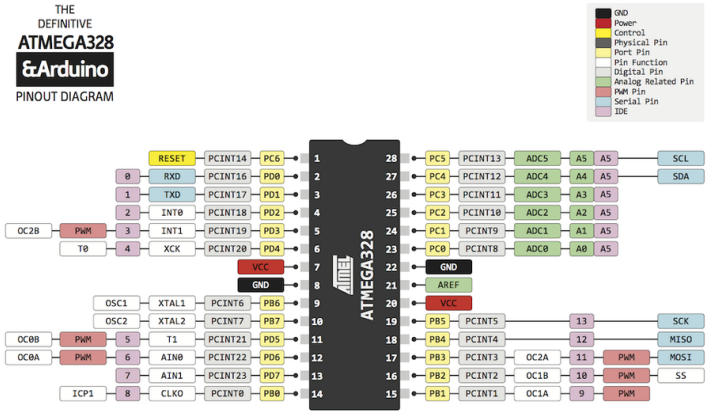


Figure 3 - ATmega328 schéma de câblage pour démarrage avec chargeur Arduino Optiboot

Le microcontrôleur 8 bits AVR RISC d'Atmel a été choisi pour ses capacités suivantes [12] :

- une mémoire flash ISP[3] de 32 Ko avec des capacités de lecture et d'écriture, dans lequel nous stockons le code de programmation ;
- une EEPROM[4] de 1 Ko, stockage relativement sûr, qui sert à stocker les données d'observations ;
- un USART[5] programmable en série, qui sert à la transmission avec la sonde;
- un *watchdog timer* programmable avec oscillateur interne, qui permet de réveiller le système régulièrement en utilisant le minimum de batterie ;
- 5 modes d'économie d'énergie sélectionnables par logiciel, que l'on utilise pour mettre le système en veille ;
- un débit proche de 1 MIPS/MHz, qui nous permet d'optimiser la batterie.

La charge de la batterie est largement économisée par l'utilisation du *watchdog timer* e qui permet de rallumer le nano ordinateur pour envoyer les données toutes les 12h et nous permet donc de pouvoir couvrir les délais de relève des sondes sans inquiétude.

4.2 Encodage des messages

Les messages réceptionnés depuis la sonde sont sous deux formats différents, spécifiques au modèle de sonde qui est de type SeaBird, le format TS (Test Sampling) pour la transmission des données d'observations et le format DS (Display Status) pour la transmission des données sur l'état de la sonde qui nous permet de récupérer l'état de la batterie.

L'encodage de la trame TS est fait en hexadécimal sur 8 caractères dans notre cas, la première partie pour la température et la seconde pour la conductivité. Le message commence par un "#" (caractère d'attention) et termine par un saut à la ligne.

L'encodage de la trame DS est plus long et comprend notamment le nom de l'instrument, la date et l'heure d'envoi du message, l'état de la batterie ainsi que d'autres paramètres d'état de la sonde.

3 In-System Programming

4 Electrically-erasable programmable read-only memory

5 Universal Synchronous & Asynchronous Receiver Transmitter

4.3 Encodage Trame GPS

La trame GPS est composée, entre autres, d'informations concernant la précision de la mesure, des coordonnées au format degré décimal (DD), du nombre de satellites utilisés pour calculer les coordonnées, etc.

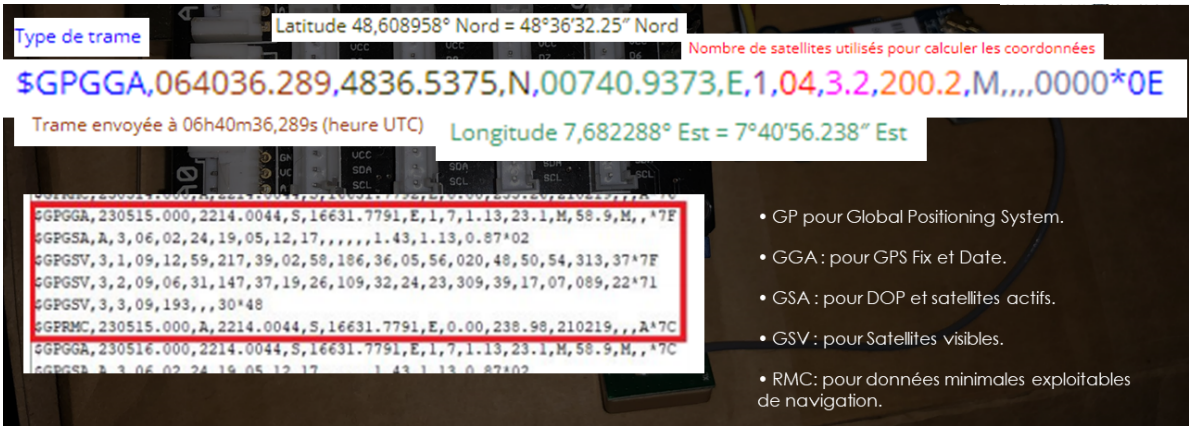


Figure 4 - Lecture de la trame GPS fournie par la puce GPS

4.4 Transmission LoRa

La transmission se fait depuis le nano ordinateur embarqué sur la bouée océanographique qui émet les informations sur une bande de fréquence radio libre (la ISM 868 MHz) selon le protocole LoRa (Figure 5).

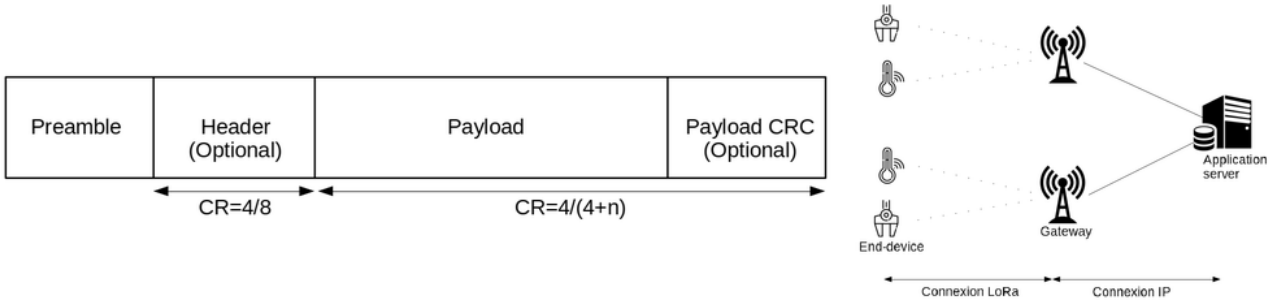


Figure 5 - (gauche) Format d'une trame physique LoRa et (droite) Illustration d'une architecture LoRaWAN (source Wikipedia)

Figure -

Les données sont alors reçues par une ou plusieurs passerelles LoRaWAN, qui ont en moyenne une portée de réception de 20 km, qui les émettent à leur tour sur le réseau Internet.

4.5 Intégration des données

Le système d'information du SNO ReefTEMPS utilise, pour l'intégration de ses données, le logiciel de suivi des workflow Apache Airflow[6]. Ce dernier permet de définir un graphique acyclique dirigé (DAG) ou pipeline qui représente une suite de tâches à exécuter comme le présente la figure 6 ci-dessous.

6 https://airflow.apache.org/

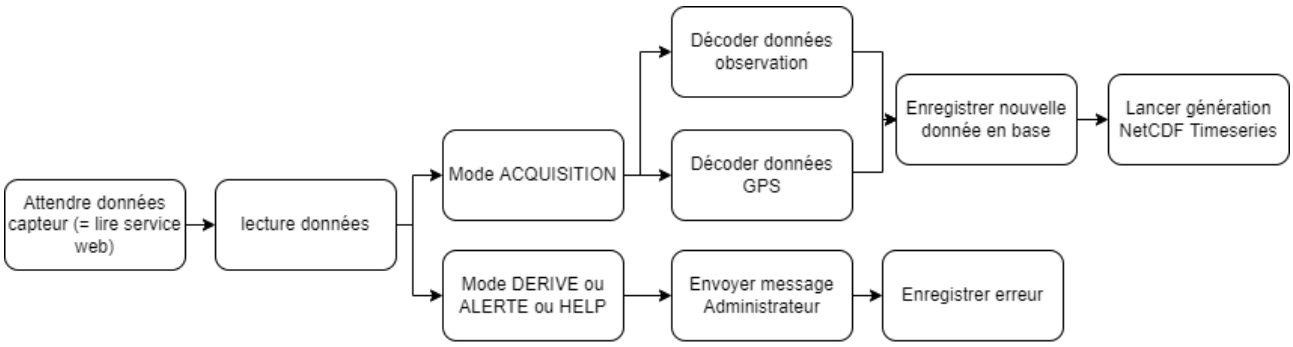


Figure 6 - DAG d'intégration des données dans ReefTEMPS

5 Avantages et limites

5.1 (Avantage 1) Déploiement en absence d'infrastructures

Le déploiement d'une antenne radio et d'émetteurs LoRaWAN sur chaque bouée permet de suppléer avantageusement à l'absence de réseau GSM ou à la mise en oeuvre de solutions lourdes comme la pose de de câbles sous-marins ou encore coûteuse comme l'utilisation de balises satellites communiquant par abonnement avec les constellations de satellites "conventionnels".

5.2 (Avantage 2) Faible coût

Le coût des transmissions est faible comparée à des communications satellitaires dont le coût d'abonnement présente un ordre de grandeur moyen de 1000 € par an et par bouée instrumentée. De même, la transmission GSM se révèle coûteuse si on communique entre plusieurs pays. La technologie LoRa permet de diminuer les coûts, rendant possible sous certaines conditions (faible nombre de messages, utilisation de canaux publiques, etc.), la communication gratuite.

5.3 (Avantage 3) Libre

Le développement de cette solution de transmission de données a été développé dans l'esprit de l'open science à l'image du système d'information pré-existant du SNO ReefTEMPS [5]. L'architecture technique, les choix technologiques dont les protocoles d'échanges et le workflow de données sont basés sur des solutions libres. Le réseau LoRaWAN déployé est public et donc ouvert à tous.

5.4 (Avantage 4) Généricité

La solution a été testée avec deux premières variables: la température de l'eau de mer et la conductivité mesurée par une sonde CTD Seabird SBE16. Toutefois, la généricité de la solution pour toutes autres variables et pour pouvoir être raccordée à d'autres types de sonde a été prise en compte dès le début. L'architecture actuelle permet de connecter toutes sondes mono ou multi-capteurs ayant un port de transmission RS232 (ex marque RBR etc).

5.5 (Limite 1) Nécessité d'infrastructure de communication radio, de type LoRaWAN

Le déploiement à grande échelle de sondes connectées océanographiques en domaine côtier implique la préexistence ou le déploiement d'une infrastructure terrestre de passerelles de réception LoRaWAN, connectées à Internet. Si une infrastructure locale est difficilement utilisable ou

inexistante, le déploiement d'un réseau d'antennes radio LoRaWAN à terre est possible à des coûts raisonnables. Les contraintes sont alors de disposer d'une source d'énergie et d'un raccordement à internet.

5.6 (Limite 2) Limite géographique liée à la portée des ondes radio

La limite de portée du signal radio étant dépendante de plusieurs facteurs dont le relief, il est nécessaire de considérer une zone de couverture optimale de 20 km autour de chaque antenne radio en zone découverte [13][14]. La cartographie des antennes à déployer doit donc tenir compte des contraintes de relief et des facilités de raccordement. Les sites isolés et trop éloignés ne peuvent à l'inverse bénéficier de communication IoT LoRaWAN par antenne relais terrestre.

5.7 (Limite 3) Présence d'une bouée en surface

Les capteurs actuellement déployés par le réseau ReefTEMPS sont autonomes et immergés à des profondeurs entre -6 et -50 m. Aucune bouée ni marque en surface ne permet de les repérer. A l'inverse, la bouée connectée IoT LoRaWAN nécessite un flotteur en surface pour les communications radio avec l'antenne relais située à terre. La présence d'une bouée en surface, sans être spécifique aux liaisons IoT LoRaWAN, constitue une gêne à la navigation et un obstacle pour les marins pêcheurs. La bouée en surface est aussi une marque signalant le dispositif et peut être l'objet de vol ou de dégradation.

6 Perspectives

6.1 Ajout de la salinité et de la pression

La généricité du développement étant un élément de notre cahier des charges, la première perspective d'amélioration de notre bouée connectée par LoRaWAN est double. Les sondes Seabird pouvant posséder plusieurs capteurs à l'image des CTD qui enregistre température de l'eau de mer et conductivité, le premier objectif sera de connecter la salinité en plus de la température et de la conductivité et donc de vérifier que la chaîne de transmission et de traitement des données jusqu'à notre base de données gère correctement les information relative à plusieurs paramètres. Le second objectif sera de connecter d'autres types de capteur comme nos capteurs de pression qui enregistrent fréquence et hauteur de vagues à haute-fréquence, cette seconde évolution de notre dispositif connecté permettra de valider la transmission de données acquises à haute-fréquence (1 hz).

6.2 Comparaison de différents modèles de sonde

De la même manière, la généricité du développement permet de connecter indifféremment les sondes de constructeurs autres que Seabird dès lors qu'une sonde dispose d'une interface RS232. Une perspective consiste à tester la transmission de données à partir de modèles commercialisés par plusieurs fournisseurs du domaine de l'océanographie (Seabird, RBR…). .

6.3 Capsule mobile d'envoi des messages

La présence d'une bouée en surface constituant une limitation forte au déploiement (cf § 5.7), une perspective de développement pour le futur constituerait à substituer le flotteur de surface par une capsule mobile capable d'effectuer des itérations entre un dispositif immergé et la surface selon une fréquence donnée, et permettant de déployer l'antenne émettrice le temps de la communication LoRaWAN.

6.4 Vers l'IoT satellitaire

Un réseau IoT basé sur le protocole LoRaWAN représente aujourd'hui une des technologies de réseau étendu à faible consommation d'énergie (LPWAN) performante qui permet l'échange de données à faible débit, mais sur des longues distances et une diversité de zones y compris marines dès lors qu'elles sont couvertes.

Nos résultats montrent que le déploiement de capteurs océanographiques en zone côtière, isolée et éloignée, communiquant par IoT LoRaWAN est possible dès lors qu'il existe une infrastructure de réception radio. La principale limite étant la présence minimale d'antennes radio terrestres et d'une zone de couverture suffisante.

Cette preuve de concept ouvre la voie à une alternative envisageable dans un futur proche, basée sur des communications IoT LoRaWAN via nanosatellites.

L'évolution des systèmes satellitaires et l'introduction des CubeSats, famille de nanosatellites à faible altitude, comme technologie satellitaire à faible coût a rendu possible la fourniture de services de communication massifs pour les applications IoT, ouvrant ainsi la l'opportunité pour les pays ou acteurs n'ayant aucune expérience en matière de sciences spatiales de bénéficier de ces technologies de manière compétitive [13][15]. Pouvoir déployer des capteurs océanographiques communiquant par IoT avec une constellation de nano-satellites en orbite basse constitue la future étape des travaux du SNO ReefTEMPS à l'échelle du Pacifique Sud et plus largement devient une réelle perspective pour l'observation et la surveillance des milieux côtiers [16].

Bibliographie

[1] Cocquempot L., Delacourt C., Paillet J., Riou P., Aucan J., Castelle B., Charria G., Claudet J., Conan P., Coppola L., Hocdé R., Planes S., Raimbault P., Savoye N., Testut L. & Vuillemin R. 2019. Coastal Ocean and Nearshore Observation: A French Case Study. Front. Mar. Sci. 6, 324 DOI:10.3389/fmars.2019.00324Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J. & Watteyne T. 2017. Understanding the Limits of LoRaWAN. IEEE Commun. Mag. 55, 34–40 doi:10.1109/MCOM.2017.1600613.

[2] Carr M., Lamont T. & Krug M. 2021. Satellite Sea Surface Temperature Product Comparison for the Southern African Marine Region. Remote Sensing 13, 1244 doi:10.3390/rs13071244.

[3] Fiat S, Varillon D, Pelletier B, Aucan J, Hocdé R. 2020. ReefTEMPS, Network of coastal oceanic sensors, Open access data portal [Poster]. Research Data Alliance, RDA's 15th Plenary Meeting, Melbourne (Australia), 18-20 March 2020. https://www.rd-alliance.org/reeftemps-network-coastal-oceanic-sensors-open-access-data-portal

[4] Hocdé R., Fiat S. 2013. Le système d'information du « réseau de capteurs de température des eaux côtières dans la région du Pacifique Sud et Sud-Ouest ». Netcom, Special issue « Les données environnementales en libre accès: politiques, expériences, usages » 170–173 DOI:10.4000/netcom.1294

[5] Fiat S., Aucan J., Varillon D. & Hocdé R. 2021.. ReefTEMPS, FAIRs access to Reef ecosystem environmental measurements. IMDIS 2021, Apr 2021, Amsterdam, Denmark. Bollettino di Geofisica, Vol.62 - Supplement, 2021, 321 pages, 62, pp.307-308, Bollettino di Geofisica. HAL: ird-03216386

[6] Hocdé R., Sylvie Fiat S., Varillon D., Magron F., Allenbach M., Hoibian T., N'Yeurt A.D.R., Le Gendre R. Ganachaud A., Menkes C., Pelletier B., Aucan J.. ReefTEMPS documente l'impact local du changement climatique et les paramètres qui influent sur la résilience des écosystèmes récifaux [Poster]. EvolEco 2021 Long Term Evolution of Coastal Ecosystems, La Rochelle, France, 2-5 nov. 2021.

[7] Haxhibeqiri J., De Poorter E., Moerman I. & Hoebeke J. 2018. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. Sensors 18, 3995 doi:10.3390/s18113995.

[8] OPT Nouvelle-Calédonie. Dossier de presse du Conseil d'administration du 25/08/2020. https://office.opt.nc/fr/media/fichier/conseil-d-administration-du-25-08-2020

[9] Hocdé R., Fiat S., Varillon D., Aucan J. 2021. ReefTEMPS: the Pacific Insular Coastal Waters Observation Network [Poster]. 9th EuroGOOS International Conference – Advances in Operational Oceanography: Expanding Europe's ocean observing and forecasting capacity, May 3-5 2021, Virtual. HAL: hal-03335231.

[10] Bates H., Pierce M. & Benter A. 2021. Real-Time Environmental Monitoring for Aquaculture Using a LoRaWAN-Based IoT Sensor Network. Sensors 21, 7963 doi:10.3390/s21237963.

[11] Pensieri S., Viti F., Moser G., Serpico S. B., Maggiolo L., Pastorino M., Solarna D., Cambiaso A., Carraro C., Degano C., Mainenti I., Seghezza S. & Bozzano R. 2021. Evaluating LoRaWAN Connectivity in a Marine Scenario. JMSE 9, 1218 doi:10.3390/jmse9111218.

[12] ATMega https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p

[13] Fraire J. A., Iova O. & Valois F. 2021. Challenges and Opportunities in Integrated Space-Terrestrial Internet of Things. arXiv:2110.11518 [cs] http://arxiv.org/abs/2110.11518. Accessed January 6, 2022.

[14] Adelantado F. , Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J. and Watteyne T., "Understanding the Limits of LoRaWAN," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, Sept. 2017, doi:10.1109/MCOM.2017.1600613.

[15] Curnick D. J., Davies A. J., Duncan C., Freeman R., Jacoby D. M. P., Shelley H. T. E., Rossi C., Wearn O. R., Williamson M. J. & Pettorelli N. 2021. SmallSats: a new technological frontier in ecology and conservation? Remote Sens Ecol Conserv rse2.239 doi:10.1002/rse2.239.

[16] Ferrer T., Céspedes S. & Becerra A. 2019. Review and Evaluation of MAC Protocols for Satellite IoT Systems Using Nanosatellites. Sensors 19, 1947 doi:10.3390/s19081947.