

# Conception d'un système temps réel LoRa pour compétitions sportives

---

Travail de Bachelor - Pré-étude

Auteur : Bise Léonard  
Conseiller : Bressy Pierre  
Filière : Informatique Embarquée (ISEC)  
Période de travail : 9 Mars au 1<sup>er</sup> Juin 2018



# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>3</b>
<b>Table des figures</b>	<b>4</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>5</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>6</b>
<b>2 Concept</b>	<b>7</b>
<b>3 Objectifs</b>	<b>8</b>
<b>4 Description du système</b>	<b>9</b>
4.1 Fréquence de transmission . . . . .	11
<b>5 LoRa et LoRaWAN</b>	<b>12</b>
5.1 La couche physique LoRa . . . . .	12
5.2 La couche MAC LoRaWAN . . . . .	13
5.3 Utilisation de LoRaWAN . . . . .	15
<b>6 Description du capteur</b>	<b>16</b>
6.1 Position GPS . . . . .	17
6.2 Rythme cardiaque . . . . .	18
6.3 Cadence de pas . . . . .	19
6.4 Radio LoRa . . . . .	21
6.5 Matériel . . . . .	21
<b>Bibliographie</b>	<b>26</b>

# Table des figures

4.1	ElemSystem . . . . .	10
5.1	Architecture LoRaWAN . . . . .	14
5.2	Couches LoRa . . . . .	14
5.3	Architecture LoRaWAN . . . . .	15
6.1	Processus Capteur . . . . .	16
6.2	Antenne GPS . . . . .	18
6.3	Sangle Pectorale . . . . .	19
6.4	Adafruit Feather . . . . .	22
6.5	Adafruit Featherwing GPS . . . . .	22
6.6	SODAQ One . . . . .	23
6.7	Multitech mDot . . . . .	24

# Liste des tableaux

6.1	Adafruit Feather Caractéristiques . . . . .	22
6.2	SODAQ One Caractéristiques . . . . .	23
6.3	Multitech mDot Caractéristiques . . . . .	24
6.4	A floating table . . . . .	25
6.5	A floating table . . . . .	25

# 1 Introduction

Ce travail de Bachelor vise à coupler deux disciplines qui m'intéressent particulièrement, d'une part les communications sans-fil dans le monde de l'informatique embarquée et de l'autre la course à pied. Étant moi-même coureur amateur et participant de temps en temps à des compétitions, je me suis demandé s'il serait possible de créer un système qui pourrait contribuer à impliquer davantage les spectateurs de ce genre de manifestation.

Le rythme auquel se déroule une compétition sportive, que ce soit de course à pied ou de cyclisme par exemple, associe la plupart du temps des moments de forte excitation avec des instants plus calmes. On peut découper ce genre d'événement en trois grosses phases. Avant le début de la compétition, il y a généralement beaucoup d'animation dans la zone de départ, les bénévoles s'occupant de l'événement mettent les dernières touches à l'organisation tout en remplissant les tâches requises par leur poste, les sportifs sont en train de s'échauffer et le public arrive peu à peu pour assister au départ de la compétition. Une fois que la course a commencé l'excitation retombe rapidement, les participants quittent la zone de départ pour rejoindre l'arrivée et les spectateurs vont souvent se déplacer le long du parcours pour les regarder passer ou au contraire se diriger directement vers la zone d'arrivée. Tout ceci fait que les spectateurs se retrouvent parfois loin de l'action. Enfin, lorsque les sportifs arrivent petit à petit à la fin de la course, de plus en plus de gens se retrouvent dans l'aire d'arrivée, ce qui a pour effet de remettre l'ambiance.

Tout ceci fait que parfois le spectateur vit des moments de temps mort où il ne se passe pas forcément beaucoup de choses, de plus il est rare qu'il ait la possibilité de connaître la situation à un instant donné de la course. Seul les gros événements disposent parfois d'une retransmission télévisuelle, et à ma connaissance très peu proposent un outil utilisable par les spectateurs permettant de visualiser sur une carte la position des coureurs.

C'est sur cet axe que ce projet se positionne : proposer un outil interactif que les spectateurs d'événements sportifs peuvent utiliser à tout moment et de n'importe quel endroit pour connaître l'état actuel de la course.

## 2 Concept

L'idée du projet est de développer un système de suivi en temps réel de la compétition qui se base sur les informations transmises par un capteur porté par les sportifs. Cela permettrait de pouvoir à tout moment afficher la position actuelle des sportifs le long du parcours ainsi que d'autres informations intéressantes comme la vitesse moyenne, le rythme cardiaque et le nom du coureur par exemple. Le but étant, à l'aide d'une application mobile, de permettre aux spectateurs de pouvoir suivre le déroulement de l'événement plus aisément et de manière globale et ainsi d'essayer de rendre la compétition plus vivante pour lui.

Afin de pouvoir exploiter les données enregistrées par les capteurs, il faut les récupérer et les centraliser sur un serveur. Pour se faire une des solutions les plus communes serait d'utiliser le réseau de téléphonie mobile, ceci comporte un désavantage important qui est le besoin d'acquérir des cartes SIM pour chaque capteur pour pouvoir leur permettre de communiquer sur le réseau. D'autres part, suivant l'endroit où la course se déroule la couverture du réseau peut être faible voire inexistante.

Pour pallier à ses défauts ce projet vise l'utilisation du protocole LoRa qui ne nécessite pas de surcoût pour son utilisation et dont les modules de transmission et réception ont un faible coût. Ensuite un système de borne posé à certains endroits le long du parcours, des passerelles, est utilisé pour garantir une couverture du réseau optimal. Ce système permet la flexibilité de rajouter ou au contraire d'enlever certaines passerelles en fonction de la couverture du réseau souhaitée. Grâce à ses passerelles le système est capable de récupérer les données transmises par les capteurs et de les stocker dans une base de données qui peut ensuite être exploitée par des applications.

Une autre plus-value de ce système par rapport aux solutions existantes actuellement est qu'il vise à proposer une mise à jour en temps réel des informations, c'est-à-dire que les données produites par les capteurs sont disponibles pratiquement instantanément aux utilisateurs au travers de l'application mobile associée, cela permet de visualiser l'évolution de la course avec plus de précision et d'interactivité. La majorité des solutions existantes actuellement enregistrent des données durant la course mais il faut attendre la fin de l'activité pour pouvoir les télécharger sur un site web afin de visualiser le parcours et les statistiques.

### 3 Objectifs

L'objectif principal du projet est le développement d'un prototype du système dans son entier, c'est-à-dire d'un capteur, d'un gateway et d'une application mobile permettant la récupération et l'affichage des données ainsi que le développement et la mise en place de tous les logiciels qui sont nécessaire à son bon fonctionnement. Même si le but est de développer un prototype fonctionnel les réflexions nécessaires pour en faire un produit seront apportées au mémoire, en particulier en ce qui concerne le capteur.

Afin de permettre de pouvoir contrôler et appréhender complètement le concept, au lieu d'utiliser une solution déjà existante sur le marché, le gateway sera également développé dans le cadre du travail de Bachelor à partir de module existant dans le marché. Cela rendra possible une étude plus fine au niveau des débits de transferts des informations produite par le capteur.

Un autre élément très important du projet est l'utilisation des communications sans fil de type LoRa, il sera évalué si l'utilisation de ce protocole pour ce genre d'application est possible ou si au contraire les contraintes qui y sont liées sont trop fortes.



## 4 Description du système

Le but principal du système est de pouvoir récupérer des informations relatives à plusieurs sportifs puis de centraliser les données. Par la suite une application mobile exploitera ses informations pour montrer à l'utilisateur la situation globale de la course au moyen d'une carte.

Pour se faire le système est composé de trois éléments principaux :

- Un capteur contenant une antenne GPS, une sonde rythme cardiaque et un accéléromètre
- Un gateway ou passerelle qui récupère les données transmises par le ou les capteurs
- Une application mobile qui est chargée d'analyser et d'afficher les informations de chaque sportif

Les sportifs seront équipés d'un capteur qui permettra l'acquisition des différentes données, à intervalles réguliers les capteurs vont transmettre les informations récoltées, une passerelle est ensuite chargée de récupérer les données puis de les stocker dans une base de données relationnelles.

Une ou plusieurs passerelles seront placées le long du parcours afin de pouvoir garantir une récupération optimale des données des capteurs et ainsi limiter les zones d'ombres ce qui péjorerait l'efficacité du système. C'est principalement la topologie de l'endroit où se tient la course qui déterminera le nombre de passerelles qui devront être employé, cependant le nombre de participant sera également un facteur à prendre en compte. Dans le cadre du travail de Bachelor et à cause des contraintes de temps qui y sont relatives, une seule passerelle ainsi qu'un capteur seront assemblés, la démonstration du système se tiendra donc dans un endroit permettant l'utilisation d'une seule passerelle dans des conditions permettant le fonctionnement optimal du système avec un seul coureur.

Une fois que les données des coureurs ont été reçues, traitées et stockées, l'application mobile récupère les informations depuis la base de données et les analyse pour pouvoir les restituer au spectateur au moyen d'une carte géographique ainsi que de tableaux de statistiques.

Le système de capteur utilisera la technologie LoRa afin de transmettre les informations récoltées à la passerelle. Un des avantages principaux du protocole LoRa pour le genre d'application visé par ce projet de diplôme est qu'il ne nécessite pas d'autorisation spéciale pour son utilisation car la bande de fréquence qu'il utilise fait partie du domaine libre. Ces bandes de fréquences peuvent être utilisées dans un espace réduit pour des applications diverses dans les domaines industrielles, scientifiques, médicales domestiques ou similaires. De plus il ne nécessite aucun surcoût, à contrario du GSM (Global System for Mobile Communications) par exemple, qui requiert une carte SIM pour pouvoir communiquer sur le réseau. On comprend tout de suite l'avantage du

LoRa par rapport au GSM si l'on pense au fait que pour un seul événement en théorie plusieurs centaines de capteurs pourraient être utilisés en même temps.

Les capteurs et la passerelle communiquent grâce à la couche physique LoRa. C'est un protocole de télécommunication radio à bas-débit destiné à des objets connectés à basse consommation électrique et de petite taille. Cette couche est détaillée plus loin dans le rapport, son gros avantage réside dans le fait qu'elle permet l'envoi de message avec de longue portée, entre 2 km dans un milieu urbain voir jusqu'à 15 km dans un environnement dépourvu d'obstacle, de plus cette couche physique utilise des mécanismes qui rendent les messages résistants aux interférences externes.

Une fois que les données ont été traitées et stockées dans la base de données, l'application mobile doit pouvoir les récupérer. Pour le prototype la base de données sera directement localisée sur la passerelle, celle-ci doit être connectée à un réseau qui doit également être accessible à travers l'application mobile. Pour se faire, la solution la plus simple est de connecter la passerelle au réseau en utilisant soit une connexion de type WiFi ou alors de type Ethernet standard. Ceci permettra ensuite, à condition que le téléphone portable ou la tablette exécutant l'application mobile soit connecté à ce même réseau, à l'application de faire des requêtes à destination de la base de données. Pour des raisons de logistique, il se peut qu'une connexion de type 3G ou 4G soit plus appropriée si par exemple il n'est pas possible à la passerelle de se connecter par d'autres moyens à la base de données. Cet aspect ne sera pas abordé dans le cadre du travail de diplôme mais cela peut être une voie d'évolution pour la suite.

La figure 4.1 montre la situation d'ensemble et les interactions des éléments du système.

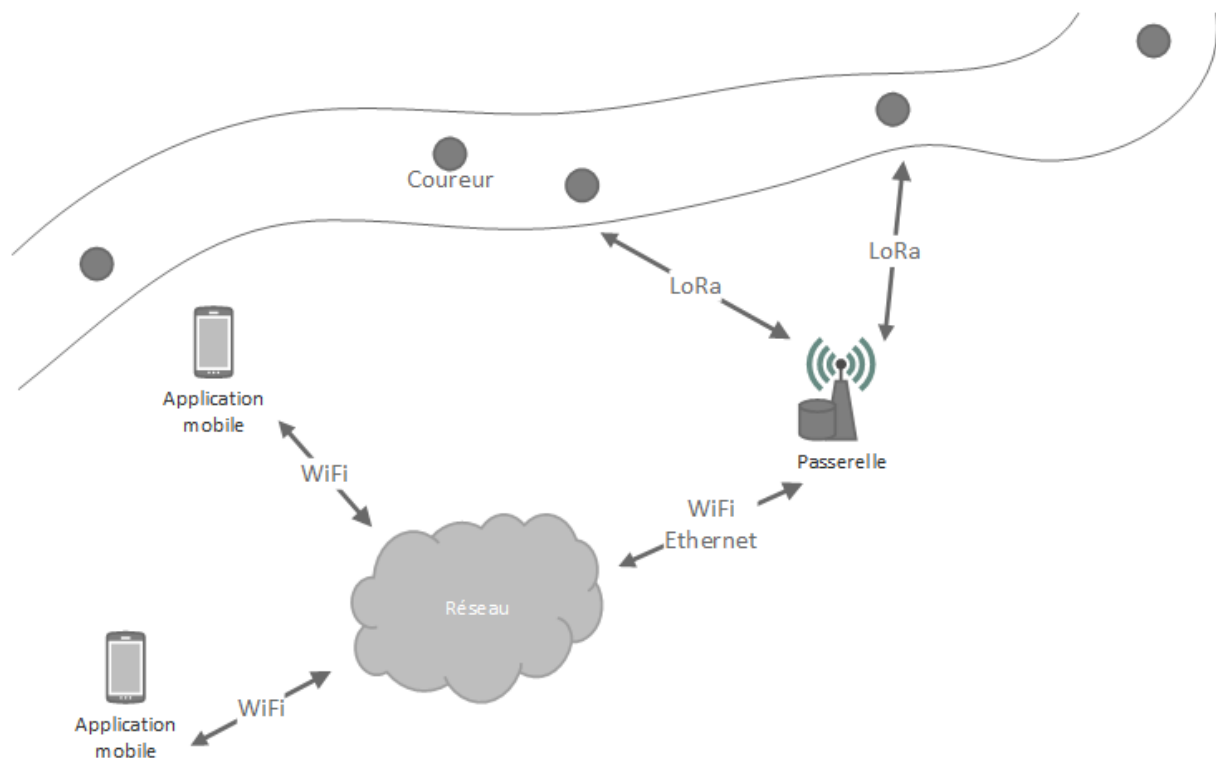


FIGURE 4.1 – Schéma de description du système

## 4.1 Fréquence de transmission

La fréquence de transmission des données est un des points critique du projet. En effet elle doit être assez élevée pour permettre au système de fonctionner correctement, c'est-à-dire de garantir une réactivité suffisante pour rendre l'application agréable à l'utilisation, mais elle doit également respecter les contraintes liées à la technologie LoRa.

Dans le cadre du projet et parmi les paramètres qui vont être enregistrés par le capteur, l'élément qui va permettre de dimensionner la fréquence de transmission est la position GPS du coureur car c'est cette position qui doit être transmise assez souvent pour permettre une mise à jour fréquente de la carte géographique par l'application mobile. D'un point de vu temporel, les autres éléments, c'est-à-dire le rythme cardiaque et la cadence de pas son moins critique.

Pour se faire il est nécessaire de définir la fréquence d'acquisition de la position GPS afin d'obtenir le résultat voulu. L'être humain le plus rapide au monde, Usain Bolt, peut atteindre la vitesse de  $44.72 \text{ km h}^{-1}$ , bien sur cette vitesse ne peut être maintenue que sur une courte distance de sprint. Ce projet est destiné à des courses à pied plus longue, de fond, c'est-à-dire à partir de  $5 \text{ km}$  de distance. Chez les hommes le record de cette distance est détenu par l'Ethiopien Kenenisa Bekele avec un temps de  $12 :37.35$  minutes ce qui correspond à une vitesse moyenne d'environ  $23.8 \text{ km h}^{-1}$  et chez les femmes par l'Ethiopienne Tirunesh Dibaba avec un temps de  $14 :11.15$  minutes c'est-à-dire environ  $21.1 \text{ km h}^{-1}$ . [IAFF(2018)]

Si l'on part du principe qu'un coureur très rapide peu atteindre une vitesse de  $20 \text{ km h}^{-1}$  ou environ  $5.5 \text{ m s}^{-1}$ , une fréquence d'acquisition de la position GPS toutes les  $30$  secondes, ce qui correspond à une distance d'environ  $165 \text{ m}$ , doit permettre de pouvoir afficher le parcours du coureur sur la carte avec assez de précision.

Il faudra encore approfondir cette question durant la réalisation du projet pour vérifier si cette valeur suffit ou s'il est nécessaire d'augmenter la fréquence d'acquisition. Une analyse devra également être menée pour définir si cette fréquence est compatible avec le duty cycle imposé par l'utilisation de la bande de fréquence ISM. Le duty cycle définit le temps pendant lequel un élément est autorisé à transmettre des données en utilisant cette bande de fréquence, c'est une contrainte que tous les éléments doivent respecter et qui dépend de la quantité de donnée à transférer ainsi que du débit.

## 5 LoRa et LoRaWAN

Il existe deux couches distinctes dans l'écosystème LoRa, premièrement il y a la couche physique LoRa et ensuite la couche protocolaire LoRaWAN, parfois également appelé LoRa MAC.

La couche LoRa est une couche physique qui définit le type de modulation utilisé pour envoyer les données brute grâce à des ondes électromagnétiques. Cette couche n'a pas la connaissance des hautes couches et peut donc être utilisé avec n'importe quel protocole.

La couche LoRaWAN quant à elle est une couche protocolaire MAC qui s'appuie sur la couche physique LoRa. Elle définit les aspects réseaux comme la topologie employée, le moyen de relayer les messages entre les acteurs ainsi que les aspects sécuritaires comme le chiffrement des données.

Il est possible de n'utiliser que la couche physique LoRa sans le LoRaWAN, ceci simplifie beaucoup le système par contre cela implique la perte d'un certain nombre de fonctionnalité qui sont proposées par le protocole.

Le choix ou non d'utiliser la couche protocolaire LoRaWAN est détaillé à la fin du chapitre.

### 5.1 La couche physique LoRa

La couche physique LoRa définit de quelle manière les données sont transformées pour être transmises par des ondes radios. La technique de modulation de base pour transformer les informations en signal se porte sur le principe d'étalement de spectre (spread spectrum), l'idée est d'étaler les données sur une largeur de spectre plus grande que le signal en modifiant la phase de la fréquence porteuse du transmetteur en suivant une séquence pseudo aléatoire.

L'avantage de la technique de l'étalement de spectre réside dans le fait que les signaux émis sont par définition plus résistants aux interférences externes que si le signal était transmis normalement. Le Direct Sequence Spread Spectrum est une technique de modulation qui applique ce principe. Cette technique est beaucoup utilisée, notamment par la norme 802.11b (WiFi). Le prix à payer pour utiliser cette méthode est qu'elle nécessite la présence d'une horloge très précise sur le récepteur et le transmetteur afin de pouvoir coder et décoder les signaux correctement. En plus l'opération en elle-même est également un processus qui prend passablement de temps et de ressource et qui dépend de la séquence de codage utilisée. Ses aspects font que le

Direct Sequence Spread Spectrum n'est pas approprié pour des applications à bas coût et basse consommation comme ceux requis pour ce projet.

La couche physique LoRa vise à corriger ses défauts en utilisant également une méthode d'étalement de spectre un peu différente que le Direct Sequence Spread Spectrum. Elle se base sur une autre technique nommée Chirp Spread Spectrum. Cette technique a été développée dans les années 1940 pour être employé dans les radars. L'étalement de spectre est toujours un élément central cependant la séquence pseudo aléatoire a été abandonnée ce qui simplifie la gestion de la modulation et permet à des équipements basse consommation de l'utiliser sans contrepartie coûteuse. [Semtech(2015)]

La technique de modulation utilisé par la couche physique Lora se nomme logiquement LoRa Spread Spectrum, elle utilise la bande de fréquence libre Industrielle, scientifique et médicale (ISM) qui, pour l'Europe, utilise la bande de fréquence 868 Mhz. Cette bande de fréquence n'est pas soumise à autorisation pour être utilisée, ce qui est donc un avantage de taille et qui limite les coûts supplémentaires. Cette modulation permet au moyen de paramètre changeable, des débits de transferts allant de 0.3 kbps à 27 kbps, suivant le débit sélectionné on pourra envoyer plus ou moins de données, entre 51 à 222 octets par message. [Adelantado et al.(2017)Adelantado, Vilajosana, Tuset-Peiro, Martinez, M

## 5.2 La couche MAC LoRaWAN

La couche radio LoRa est une technique propriétaire de la société Semtech, cependant la couche protocolaire LoRaWAN qui fait partie du groupe des Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), est entièrement ouverte et son standard ainsi que ses évolutions sont gérés par la LoRa Alliance qui est une association qui regroupe diverses entreprises ou groupes qui sont actifs dans le domaine des communications sans fils.

Le protocole LoRaWAN définit les acteurs qui font partis du réseau. Ils sont décrits dans la figure 5.1 .

Les aspects sécuritaires, à travers l'utilisation de la cryptographie symétrique, la définition des procédures pour rejoindre le réseau et la gestion des taux de transferts des nœuds sont également des éléments abordés dans ce standard. Un des aspects intéressant du LoRaWAN est qu'il peut employer une technique appelé Adaptive Data Rate (ADR) qui est une façon de maximiser la vie des batteries des nœuds et la capacité du réseau en donnant la possibilité à l'infrastructure du réseau LoRaWAN de changer le taux de transfert et la fréquence de transmission pour chaque nœud individuellement. Cela permet au réseau de diminuer le taux de transferts d'un nœud très éloigné tout en augmentant son facteur d'étalement, ce qui fera qu'il prendra plus de temps à envoyer les données mais elles auront plus de chance de parvenir jusqu'à la passerelle, inversement les nœuds proches auront leur taux de transfert augmenté mais leur facteur d'étalement diminué.

La figure 5.2 montre l'architecture d'une application utilisant le LoRaWAN.

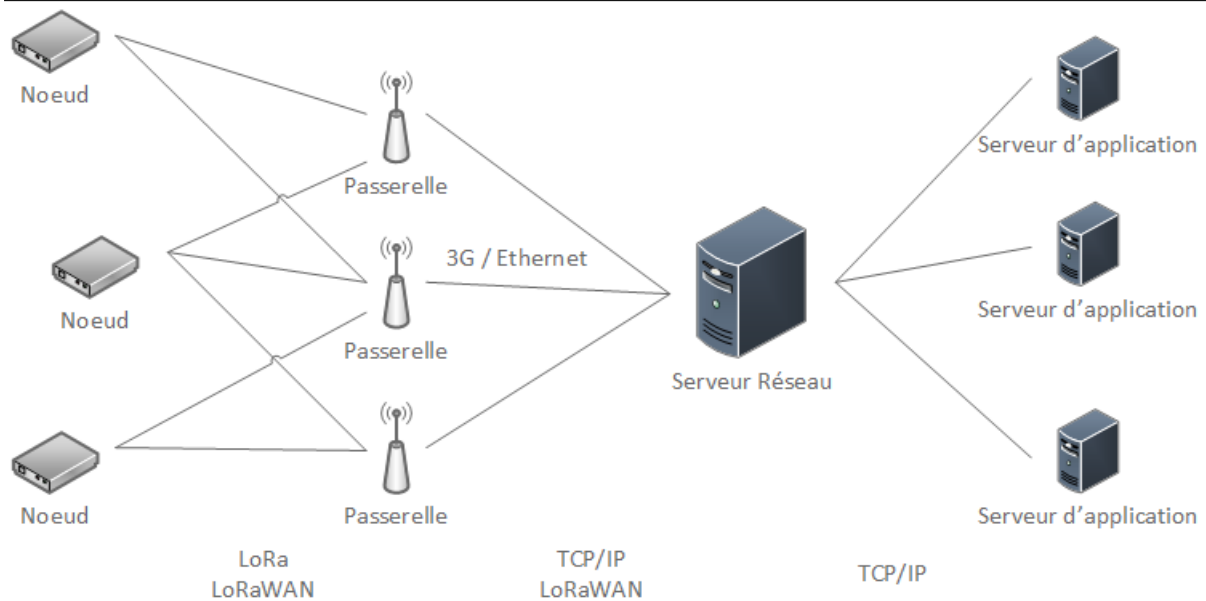


FIGURE 5.1 – Architecture des réseaux LoRaWAN

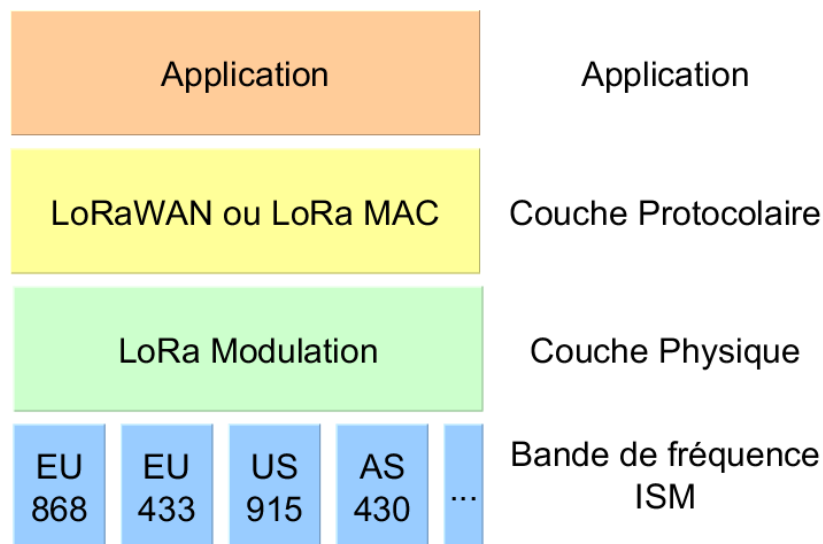


FIGURE 5.2 – Couches LoRa – Document LoRaWAN Specification v1.1

C'est également dans ce standard qu'est définie l'architecture du réseau dans son ensemble, c'est-à-dire comment les données sont acheminées d'un nœud jusqu'au serveur réseau qui traite et stock les données. Les données sont acquises par le nœud et ensuite transmises à la couche LoRaWAN qui les envoie grâce à la couche radio LoRa. Une fois le paquet reçu par la passerelle, un packet forwarder est en charge de l'envoyer à destination du serveur réseau, généralement en utilisant le protocole UDP. Le serveur réseau est ensuite responsable de la gestion du protocole LoRaWAN, c'est lui, si nécessaire, qui génère les acquittements des paquets et les retransmet à une passerelle pour être envoyé au nœud. Enfin le serveur réseau transmet les données utiles reçues des nœuds aux serveurs d'application qui vont les exploiter pour par exemple montrer l'évolution de la température dans une région ou encore la position

d'un élément mobile. [Committee(2017)]

La figure 5.3 montre l'architecture d'un réseau LoRaWAN dans son ensemble ainsi que le détails de chaque éléments.

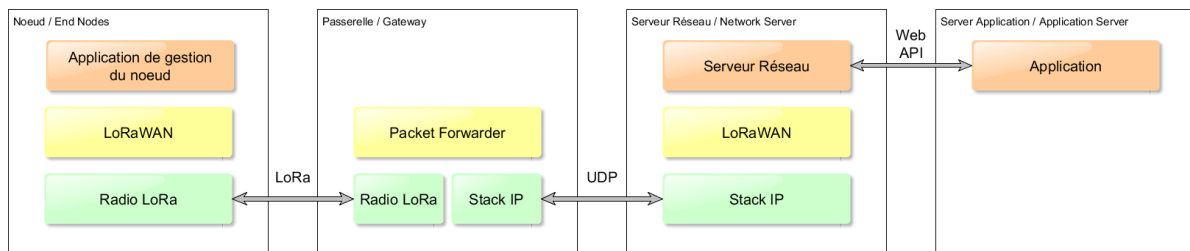


FIGURE 5.3 – Architecture des réseaux LoRaWAN

## 5.3 Utilisation de LoRaWAN

La couche protocolaire LoRaWAN offre beaucoup d'avantage cependant elle nécessite énormément de travail pour être entièrement mise en place pour un réseau privé comme c'est le cas dans ce projet. Dans le cas où un nombre important de nœuds ainsi que plusieurs passerelles sont exploités, cette couche prend tout son sens car elle offre des moyens de gestion de l'ensemble du réseau et permet de centraliser l'information. Elle offre également une interface web moderne qui permet la récupération des données produite par les nœuds afin de les exploiter dans de diverses applications. Elle s'occupe aussi de la gestion du chiffrement des données transmises par les nœuds jusqu'aux passerelles par exemple.

Dans le cadre du travail de Bachelor et dans un esprit de simplification, la couche LoRaWAN ne sera pas utilisée. Comme expliqué elle nécessite la mise en place d'une infrastructure réseau complexe ce qui complique passablement la mise au point du projet. Il est clair que dans une optique de développement d'un produit, ce protocole prendrait tout son sens mais le développement du prototype mais l'accent sur la définition du système, principalement du capteur, ainsi que des logicielles associés. L'utilisation d'un serveur hébergé sur internet rajoute également de la complexité au niveau de la passerelle, puisque le système sera testé en extérieur, cela nécessite l'ajout d'une interface de communication par le réseau mobile, 3G par exemple, afin de pouvoir transmettre les données récoltées par la passerelle au serveur. Enfin, puisque le prototype ne sera composé que d'un seul capteur et d'une seule passerelle, l'utilisation du protocole LoRaWAN n'apporte que très peu d'avantage au prix d'une complexité accrue.

Afin de pouvoir concentrer le travail sur le développement du capteur, de la passerelle et de l'application mobile, il semble judicieux de ne pas se lancer dans la mise en place longue et coûteuse que représente l'utilisation du LoRaWAN. Néanmoins, dans une optique d'évolution du projet, le développement durant le travail de Bachelor sera pensé de façon à faciliter l'éventuelle modification ultérieure du système afin de pouvoir utiliser le protocole LoRaWAN.

## 6 Description du capteur

Les informations relatives aux sportifs sont acquises par le biais du capteur. Il sera composé d'un assemblage de différents éléments déjà existants dans le commerce. On veillera à minimiser au maximum son poids ainsi que sa taille pour éviter de gêner le sportif durant sa course. Une fois assemblé, il sera placé dans une boîte étanche qui disposera d'un bracelet élastique ce qui permettra à l'athlète de le porter facilement. Enfin il doit également disposer de sa propre source d'énergie sous la forme d'une batterie, celle-ci doit lui conférer une autonomie assez grande pour pouvoir fonctionner durant l'entièreté d'une course.

Trois types de données différentes seront récupérées, la position GPS du coureur (longitude/latitude), son rythme cardiaque en battement par minute ainsi que la cadence de ses pas en pas par minute. Régulièrement le capteur va effectuer les acquisitions, puis il va traiter les données et créer un paquet de données. Une fois que le paquet est prêt à être transmis, le capteur utilise son module de transmission LoRa pour les envoyer à la passerelle. Quand ce processus est terminé, le capteur se met en attente jusqu'au début du cycle suivant et recommence le processus. Ce processus est illustré par la figure 6.1.

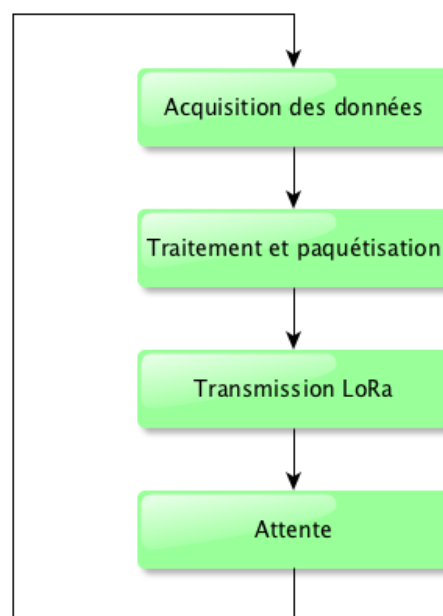


FIGURE 6.1 – Processus du capteur

Le microcontrôleur est la partie centrale du capteur, c'est lui qui exécute le programme d'acquisition des différents paramètres décrit ci-dessus, qui fait le traitement des données pour ensuite les envoyer en utilisant la transmission LoRa. Le cœur du capteur



sera donc un module disposant d'un microcontrôleur ainsi que tout ce qui lui ai nécessaire pour fonctionner (oscillateur, mémoire, interfaces. . . ).

Viendront se coupler au microcontrôleur les quatre modules suivants :

- Un module GPS permettant le positionnement du coureur
- Un module permettant la mesure du rythme cardiaque
- Un module accéléromètre qui donnera la possibilité de déterminer la cadence du coureur
- Un module radio LoRa avec antenne qui se chargera de la communication avec la passerelle

Le microcontrôleur devra communiquer avec chacun de ses modules d'une manière ou d'une autre afin de pouvoir récupérer les informations et les transmettre. Les modules n'ont pas les mêmes contraintes, il est donc impératif de sélectionner un environnement dans lequel chacun d'eux aura à disposition le canal de communication approprié que ce soit une interface série, un I/O ou un bus SPI par exemple.

Les prochaines sections de ce chapitre décrivent chaque module ainsi que leurs interfaces.

## 6.1 Position GPS

Un module GPS est responsable de déterminer la position du coureur. Le système GPS se base sur une constellation d'au moins 24 satellites qui sont en orbite moyenne (Altitude de 20'200 km) autour de la Terre. Afin qu'un utilisateur puisse déterminer sa position sur le globe, il est nécessaire qu'il ait la vue sur au moins 4 satellites. A une fréquence très précise, donné par des horloges atomiques, les données de position orbitales ainsi que de temps sont envoyées en direction de la planète, grâce à ses informations le receveur est en mesure de connaître la distance de chacun des satellites en vue et donc de calculer sa position géographique ainsi que de déterminer le temps actuel, c'est ce que l'on appelle le GPS « lock » ou « fix ». [government())]

Cette tâche compliquée est entièrement à la charge du module GPS lui-même, il dispose d'une antenne qui lui permet de recevoir les données envoyées par les satellites, de les analyser et de calculer les informations requises pour les mettre à disposition du microcontrôleur. La grande majorité des modules GPS transmettent les informations en utilisant une interface série UART sur lequel des messages de type NMEA 0183 sont envoyé vers le récepteur. Ce protocole définit le format de plusieurs messages qui contiennent diverses informations de position, de statuts et de temps. [Association(2018)]

Dans le cadre du projet de Bachelor l'information principale qui sera exploité sera la longitude et latitude du capteur qui permettra de déterminer la position du coureur. D'autres informations intéressantes pourront éventuellement être utilisées comme le temps ou l'altitude.

Le composant peut être directement placé sous l'antenne ou alors il existe également des solutions avec antenne branché par un câble comme montré sur la figure 6.2.

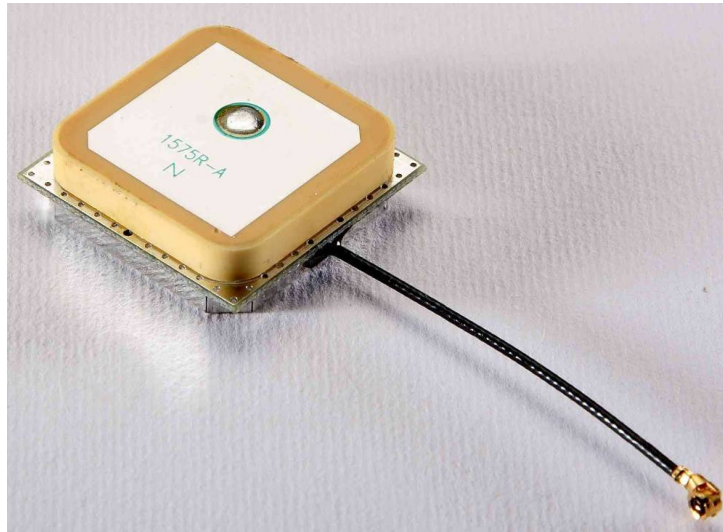


FIGURE 6.2 – Antenne GPS - © SODAQ

## 6.2 Rythme cardiaque

Il existe deux moyens principaux de déterminer le rythme cardiaque d'une personne. La première solution consiste à utiliser une ou plusieurs électrodes qui détecteront directement les signaux électriques émis par le cœur, c'est le principe utilisé par les électrocardiogrammes. L'autre solution est basée sur l'utilisation de LEDs placées contre la peau et qui vont émettre de la lumière à une fréquence régulière, la lumière réfléchiée par réfraction et qui dépend de la dilatation des vaisseaux sanguins est ensuite détectée par le capteur et permet de déterminer le rythme cardiaque de l'utilisateur. Cette deuxième technique est très utilisée dans les montres GPS utilisés pour le sport car elle a l'avantage de pouvoir être directement intégrée dans le boîtier et ne nécessite que peu de moyen pour être mis en place.

Pour le capteur de ce projet, les deux solutions existent sur le marché, cependant la solution de l'électrocardiogramme semble plus appropriée et pratique car elle permet d'utiliser un cardiofréquencemètre sans fil du commerce et évite ainsi au porteur du capteur de devoir s'accommoder des fils qui sont nécessaires pour le fonctionnement de la solution à base de LED.

Dans les deux cas, l'utilisation par le microcontrôleur est semblable, la sonde sera connectée sur une entrée digitale et elle émettra une impulsion à chaque fois qu'un battement sera détecté. Il suffit donc de compter le nombre d'impulsion et de mesurer le temps pendant lesquels elles ont eu lieu pour pouvoir déterminer la fréquence cardiaque en BPM (Battement par minute).

La formule 6.1 permet de calculer le rythme cardiaque  $rc$  en battement par minutes (BPM).

$$rc = \frac{60 * n}{t} \quad (6.1)$$

Avec  $n$  le nombre de battement accumulé pendant un temps  $t$  en secondes.

Les battements du cœur peuvent être détecté grâce à une sangle pectorale munie d'un cardiofréquencemètre. Adafruit propose ce genre de dispositif, il émet une impulsion chaque fois qu'un battement est détecté, un petit module connecté sur une ligne d'entrée du microcontrôleur permet ensuite au logiciel de les compter. Ce type de dispositif est illustré sur la figure 6.3. Du fait de la gêne occasionnée par une électrode cette solution sera privilégiée.



FIGURE 6.3 – Sangle pectorale - © Garmin

## 6.3 Cadence de pas

Le nombre de pas effectué pendant un certain temps, c'est-à-dire la cadence, est une information intéressante pour les coureurs. Tout un tas de facteur peuvent l'influencer, comme le poids, la taille ou la longueur des jambes. Les coureurs amateurs se trouvent en général dans la tranche de 160 à 170 pas par minute alors que des coureurs d'élites à 180 ou même 200 pas par minute lorsqu'ils sont au maximum de leur vitesse. La cadence permet de juger de la bonne posture d'un coureur, plus les pas seront courts et plus la cadence sera élevée.

De manière générale, en course à pied la préférence est portée sur les petits pas, d'une part car c'est uniquement lorsque le coureur touche le sol qu'il peut donner une

impulsion vers l'avant, ce qui lui permet d'aller plus vite, et d'autre part car le fait de faire des grands pas augmente le risque de blessure, le pied a tendance à taper plus fort sur le sol. Une cadence plus élevée permet d'améliorer la position où le pied touche le sol, idéalement cela devrait être directement en dessous du centre de gravité ou lieu de plus en avant.

Afin de déterminer la cadence de pas, un module accéléromètre est utilisé. Ce type de composant permet de mesurer l'accélération linéaire soit en  $\text{m s}^{-2}$  ou en  $g$  sur un ou plusieurs axes, en général les axes X, Y et Z. Plusieurs interfaces de communication existent pour ce type de composant, analogique ou les niveaux sont transmis à travers des valeurs de voltage, digitale avec un bus I2C ou SPI ou alors grâce à une modulation de largeur d'impulsion (PWM). Pour ce projet une communication digitale de type I2C ou SPI sera privilégiée afin de simplifier la récupération des données de l'accéléromètre.

Beaucoup d'application qui utilise ce composant existe, il permet par exemple de détecter l'orientation d'un téléphone portable (paysage ou portrait) ou de savoir si un objet est en mouvement. C'est également l'élément central des podomètres, qui permettent de compter le nombre de pas effectué, gadget qui est très à la mode en ce moment. C'est justement cette application qui sera utilisée dans le cadre du projet, il faudra compter le nombre de pas effectué par le coureur en un certain temps pour déterminer sa cadence.

Afin de détecter quand la personne fera un pas, il est nécessaire de pouvoir détecter un pic d'accélération dans une ou plusieurs directions. Il faudra déterminer un pallier au-dessus duquel on considérera que l'intensité de l'accélération est suffisamment élevée pour la considérer comme un pas. Pour se faire il faudra que le programme lise les informations des différents axes de l'accéléromètre régulièrement et qu'il les analyse, ceci lui permettra de garder un compte du nombre de pas. Il faudra également mesurer le temps durant lequel les pas ont été comptés pour pouvoir calculer la cadence à un certain moment.

Au lieu que le programme fasse lui-même les acquisitions, certains accéléromètres peuvent être configuré pour déclencher une interruption lorsqu'un certain seuil est dépassé, cette méthode dépend entièrement du composant utilisé cependant dans la mesure du possible elle sera privilégiée car elle facilite le traitement de cette activité et évite une surcharge des opérations requises par le logiciel.

De manière similaire au rythme cardiaque, la cadence de pas  $cp$  en pas par minute pourra être calculée avec la formule 6.2.

$$cp = \frac{60 * n}{t} \quad (6.2)$$

Avec  $n$  le nombre de pas accumulé pendant un temps  $t$  en secondes.

## 6.4 Radio LoRa

La partie radio LoRa, c'est-à-dire la transformation des données en ondes radio est à la charge d'un composant spécifique. Il existe deux principaux types de composant, le premier intègre uniquement la couche physique LoRa, le deuxième en plus de cette couche propose également la couche protocolaire LoRaWAN. Comme expliqué dans ce document, dans le cadre du projet seule la couche radio LoRa sera employée, les composants intégrant la couche LoRaWAN offre toujours la possibilité d'utiliser uniquement la couche radio, il sera donc possible d'utiliser l'un ou l'autre de ses types de composant pour le projet.

La majorité des modules radio LoRa existant sur le marché proposent en règle générale uniquement la gestion de la couche physique, cette partie étant la propriété de la société Semtech, les composants embarqués sont toujours les mêmes, soit le composant SX1272 ou le SX1276. Ils communiquent les deux avec le microcontrôleur au moyen d'un bus SPI.

## 6.5 Matériel

Ce chapitre décrit une série de composants qui pourront être utilisé dans l'assemblage final du capteur. La sélection des composants exacts utilisés pour le travail de Bachelor se fera au début de la phase de réalisation.

Il est possible que certains de ses modules soit directement intégré au module microcontrôleur, il existe sur le marché des solutions qui en plus du microcontrôleur dispose également du module radio LoRa ou d'un GPS par exemple. Ce genre de configuration permet un gain de place et de temps car les composants sont montés sur un seul et même PCB.

### Adafruit Feather

La société Adafruit a développée toute une suite de produits différents dont les Feather et les Featherwing. L'objectif des Feather est de proposer des cartes électroniques légères, de petite taille, pouvant être alimenté par batterie et proposant tout un panel de configuration et périphérique différents. Les Featherwing quant à elle sont des cartes d'extension qui viennent se ficher par-dessus un Feather et qui permette d'ajouter les fonctions additionnelles désirées.

Dans cette gamme il existe plusieurs modules pouvant être utilisé pour le projet, le plus approprié est le Feather M0 with RFM95 LoRa Radio, le module intègre directement un microcontrôleur ainsi qu'un module radio LoRa couche physique. Il est également possible d'y brancher une batterie lithium-ion.

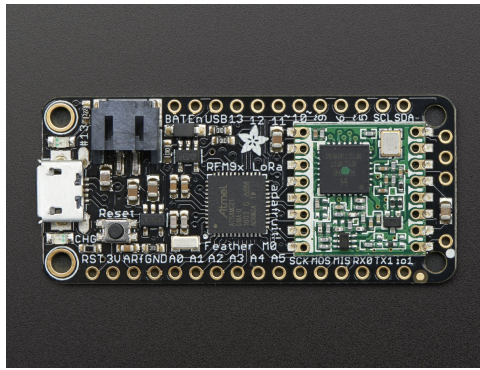


FIGURE 6.4 – Feather M0 with RFM95 LoRa Radio - © Adafruit

Les caractéristiques du microcontrôleur sont résumées dans la table 6.1.

TABLE 6.1 – Caractéristiques de la carte Adafruit Feather M0

Dimensions	51mm x 23mm x 8mm
Microcontrôleur	ATSAMD21G18 – ARM Cortex M0
Oscillateur	48 Mhz
Flash	256 kB
RAM	32 kB
LoRa	Semtech SX1272
Prix	34.50 CHF

Pour la gestion du GPS, on pourra s'appuyer sur le Adafruit Ultimate GPS Featherwing illustré par la figure 6.5, qui propose un module pouvant se fixer sur le module de base avec un composant de gestion de la position. Une connexion série UART sera utilisée pour récupérer les messages NMEA et ainsi pouvoir en extraire la position du module.

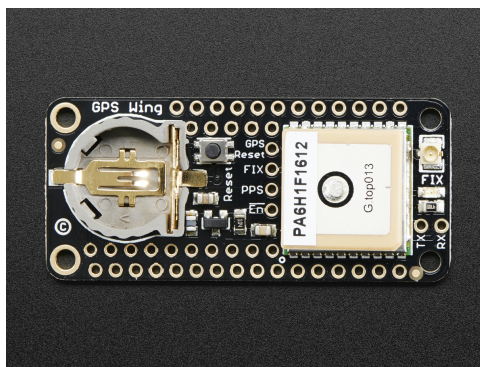


FIGURE 6.5 – Adafruit Ultimate GPS Featherwing - © Adafruit

Afin de pouvoir compléter le système en utilisant les composants Adafruit, il faudra encore rajouter un accéléromètre ainsi qu'une sonde pour le rythme cardiaque.

Enfin, en ce qui concerne la partie logiciel, quelques systèmes d'exploitation temps réel existe pour ce type de processeur ARM. Pour ce développement l'utilisation de

Zephyr sera privilégiée, il propose toutes les fonctionnalités standard que l'on pourrait attendre de ce type de système d'exploitation et sa communauté est très active.

## SODAQ One

La société Néerlandaise SODAQ propose un module nommé SODAQ One qui contient un microcontrôleur, le même que sur la solution Adafruit, un module LoRa, un accéléromètre ainsi qu'un module GPS sur le même PCB. Cette solution a l'avantage de contenir directement pratiquement tous les modules nécessaires au projet, reste la sonde de rythme cardiaque à intégrer.

Il est possible d'alimenter le SODAQ One avec une batterie lithium-ion, un petit panneau solaire est également proposé. Autre avantage de taille de cette carte est le fait qu'elle embarque le module LoRa de Microchip RN2483 qui propose la gestion de la couche physique LoRa ainsi que de la couche protocolaire LoRaWAN. Une interface série de type UART en utilisé pour envoyer des commandes à la puce de gestion du LoRa, elle permet aussi l'utilisation de la couche radio uniquement ou alors en consort avec la couche protocolaire. La figure 6.6 montre l'allure du module SODAQ One.



FIGURE 6.6 – SODAQ One v3 - © SODAQ

Les caractéristiques du microcontrôleur sont résumées dans la table 6.2.

TABLE 6.2 – Caractéristiques de la carte SODAQ One v3

Dimensions	45mm x 25mm
Microcontrôleur	ATSAMD21G18 – ARM Cortex M0
Oscillateur	48 Mhz
Flash	256 kB
RAM	32 kB
LoRa	Microchip RN2483
GPS	uBlox EVA 8M
Accéléromètre	STMicroelectronics LSM303AGR
Prix	114 CHF

C'est cette solution qui requiert le moins de travail de modification ou d'ajout pour pouvoir couvrir tous les aspects requis par le projet. Sa petite taille la rend également idéale pour l'utilisation pour ce travail de Bachelor.

Puisque le microcontrôleur utilisé par ce capteur est le même que la solution Adafruit, en termes de logiciel le même système d'exploitation temps réel sera utilisé, c'est-à-dire Zephyr.

## Multiconnect mDot

La société Multitech propose plusieurs modules de taille et de spécifications différentes, l'un d'eux est le mDot, un module de petite taille qui incorpore un microcontrôleur ainsi qu'un module radio LoRa. Il n'embarque pas d'autre module utile au projet cependant son avantage réside dans le fait qu'il donne la possibilité d'utiliser le système d'exploitation temps réel mBed qui offre toutes les fonctionnalités généralement proposées pour la gestion du temps réel comme la création de tâches, de sémaphores ou d'évènements. Cet environnement de développement est également composé d'une couche LoRaWAN logiciel permettant l'envoi de donnée à une passerelle.

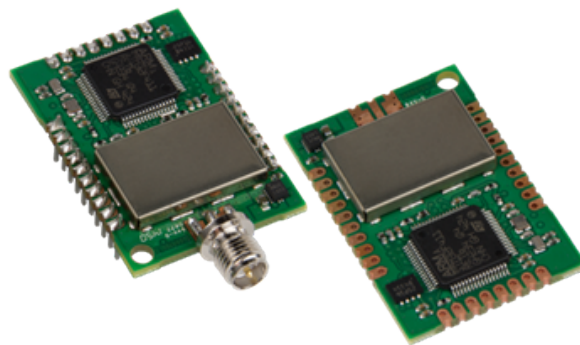


FIGURE 6.7 – Multitech mDot - © Multitech

Les caractéristiques du microcontrôleur sont résumées dans la table 6.3.

TABLE 6.3 – Caractéristiques de la carte Multitech mDot

Dimensions	37.3mm x 25.5mm
Microcontrôleur	STM32F411RET – ARM Cortex M4
Oscillateur	96 Mhz
Flash	512 kB
RAM	128 kB
LoRa	Semtech SX1272
Prix	53 CHF

L'avantage principal de cette solution est que le module vient accompagner par une suite logicielle complète et bien documenté permettant le développement d'une application temps réel. Par contre il nécessite la mise en place d'une carte supplémentaire



TABLE 6.4 – A floating table.

Module	Prix	Microcontrôleur	Fréquence	Flash	RAM
Adafruit Feather M0	10 g	STM32F411RET	0	0	0
SODAQ One	1 kg	STM32F411RET	0	0	0
Multiconnect mDot	53 CHF	STM32F411RET	0	0	0

TABLE 6.5 – A floating table.

Module	Prix	Flash	RAM	LoRa	LoRaWAN	GPS	Accéléromètre	Rythme Cardiaque
Adafruit Feather M0	10 g	cheese	0	0	0	0	0	0
SODAQ One	1 kg	mice	0	0	0	0	0	0
Multiconnect mDot	10 kg	cats	0	0	0	0	0	0

afin de pouvoir y placer tous les autres composants nécessaires, c'est-à-dire le module GPS, l'accéléromètre et la sonde de rythme cardiaque, ce qui rajoute une quantité de travail non négligeable ainsi que des risques accrus de rencontrer des problèmes.

## Comparatif des différents modules

Cette section vise à comparer les modules entre eux pour pouvoir évaluer les avantages et inconvénients de chacun d'entre eux, ce qui facilitera la sélection du module qui sera utilisé durant le travail de Bachelor.

La table suivante résume les caractéristiques de chacun des modules présentés dans cette section.

## Bibliographie

- [Adelantado et al.(2017)] Adelantado, Vilajosana, Tuset-Peiro, Martinez, Melià-Seguí, and Watteyne] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melià-Seguí, and Thomas Watteyne. Understanding the limits of lorawan. 55, 06 2017.
- [Association(2018)] National Marine Electronics Association. Standards nmea (2000, 0183), 05 2018. URL [https://www.nmea.org/content/nmea\\_standards/nmea\\_0183\\_v\\_410.asp](https://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_0183_v_410.asp).
- [Committee(2017)] LoRa Alliance Technical Committee. Lorawan™ 1.1 specification. Specification, LoRa Alliance, Inc, 10 2017.
- [government()] U.S. government. Gps overview.
- [IAFF(2018)] IAFF. All time top lists, 05 2018. URL <https://www.iaaf.org/records/all-time-toplists/sprints/100-metres/outdoor/men/senior>.
- [Semtech(2015)] Semtech. Lora modulation basics. Application Note AN1200.22, Semtech, 05 2015.