

**h e g**

Haute école de gestion  
Genève

# **Comment rendre intelligent l'arrosage de son jardin en utilisant un réseau étendu à faible puissance ?**

**Travail de Bachelor réalisé en vue de l'obtention du Bachelor HES**

par :

**Julie Isabelle MENU**

Conseiller au travail de Bachelor :

**André SEYDOUX, Maître d'enseignement HES**

**Genève, le 19 avril 2024**

**Haute École de Gestion de Genève (HEG-GE)**

**Filière Informatique de Gestion**

## Déclaration

Ce travail de Bachelor est réalisé dans le cadre de l'examen final de la Haute école de gestion de Genève, en vue de l'obtention du titre Bachelor of Science HES-SO en informatique de gestion.

L'étudiant a envoyé ce document par email à l'adresse remise par son conseiller au travail de Bachelor pour analyse par le logiciel de détection de plagiat URKUND, selon la procédure détaillée à l'URL suivante : <https://www.orkund.com>.

L'étudiant accepte, le cas échéant, la clause de confidentialité. L'utilisation des conclusions et recommandations formulées dans le travail de Bachelor, sans préjuger de leur valeur, n'engage ni la responsabilité de l'auteur, ni celle du conseiller au travail de Bachelor, du juré et de la HEG.

« J'atteste avoir réalisé seul< e > le présent travail, sans avoir utilisé des sources autres que celles citées dans la bibliographie. »

Fait à Genève, le 19 avril 2024

Julie Isabelle Menu

## Remerciements

Je remercie mon directeur du travail de Bachelor, Monsieur André Seydoux, pour m'avoir accompagnée et soutenue lors de la réalisation de ce travail ainsi que pour son enseignement. Je souhaite également remercier ma famille, mes amis et Flávio de leur implication et soutien pendant toute la durée de ce travail.

## Résumé

Ce travail présente le développement d'un système d'arrosage intelligent de son jardin en utilisant un réseau étendu à faible puissance, à coût réduit et optimisé pour une consommation énergétique minimale. Le but étant de permettre une gestion efficace de l'eau, réduisant ainsi l'impact environnemental de l'irrigation d'un particulier.

Le système comprend un capteur mesurant le taux d'humidité du sol et des données météorologiques pour ajuster automatiquement l'arrosage en fonction des besoins communiquant avec le protocole LoRaWAN. Grâce à l'utilisation de cette technologie, la solution proposée assure une communication fiable, sécurisée et résistante aux interférences tout en conservant la durée de vie de la batterie du dispositif.

Le prototype réalisé, détermine s'il est nécessaire d'irriguer son jardin en fonction de plusieurs critères et commande l'ouverture de vannes motorisées afin de laisser l'eau s'écouler jusqu'à ce que le niveau d'humidité du sol soit optimal.

# Table des matières

Déclaration.....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Liste des tableaux .....	vi
Liste des figures.....	vi
<b>1. Introduction.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Analyse de l'existant .....</b>	<b>9</b>
2.1 Raréfaction de l'eau douce.....	9
2.2 Amélioration technologique de l'irrigation.....	13
2.3 Vent en poupe de l'Internet of Things.....	13
2.4 Solutions LPWAN existantes .....	16
<b>3. Concepts et technologies utilisées.....</b>	<b>23</b>
3.1 LoRa.....	23
3.2 LoRaWAN .....	24
3.2.1 Structure d'un paquet LoRaWAN .....	27
3.2.2 Classes de services MAC .....	30
3.2.3 Passerelle .....	33
3.2.4 Serveur Back-end .....	34
3.2.4.1 Serveur réseau .....	34
3.2.4.2 Serveur d'applications .....	35
3.2.4.3 Serveur de jointure .....	35
3.2.5 Types de réseau LoRaWAN.....	35
3.2.6 Authentification et sécurité .....	38
3.2.7 Qualité de service .....	41
3.2.8 Activation d'un dispositif dans le réseau .....	41
3.2.8.1 Over The Air Activation.....	41
3.2.8.2 Activation By Personnalisation .....	43
3.3 The Things Network.....	43
3.3.1 Justification du choix .....	43
3.3.2 Fonctionnement .....	45
<b>4. Prototype « Smlrrig » .....</b>	<b>47</b>
4.1 Fonction de service et de contraintes .....	47
4.1.1 Critères d'appréciation .....	47
4.1.2 Critères de conceptions globales .....	48
4.2 Architecture du système .....	49
4.3 Étapes de réalisation .....	50
4.3.1 Préparation du serveur réseau LoRaWAN sur The Things Network.....	50
4.3.2 Préparation de la passerelle LoRa .....	50

4.3.2.1	Montage hardware.....	50
4.3.2.2	Montage software .....	51
4.3.2.2.1	Configuration de base du Raspberry .....	51
4.3.2.2.2	Configuration de la passerelle.....	52
4.3.3	Communication du serveur réseau avec la passerelle LoRa .....	52
4.3.4	Mise en place du capteur d'humidité et de température & communication avec le réseau .....	57
4.3.5	Récupération des données du serveur réseau .....	59
4.3.6	Préparation de la base de données.....	60
4.3.7	Communication de l'API météo avec la passerelle LoRa.....	63
4.3.8	Algorithmes de prise de décision d'arrosage .....	65
4.3.8.1	Algorithme de programmation de l'heure de prise de décision .....	65
4.3.8.2	Algorithme de prise de décision d'arrosage .....	65
4.3.9	Mise en place des vannes .....	68
4.3.9.1	Montage Hardware .....	68
4.3.9.2	Montage software .....	70
4.3.10	Préparation de l'Interface web pour l'utilisateur .....	70
4.3.11	Communication de l'interface web avec la passerelle LoRa .....	71
4.3.12	Sécurité du système.....	72
<b>4.4</b>	<b>Améliorations et évolutivités.....</b>	<b>75</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>77</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>79</b>
	<b>Annexe 1 : Liste du matériel et outils nécessaires .....</b>	<b>86</b>
	<b>Annexe 2 : Clé USB.....</b>	<b>88</b>

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Différences techniques des LPWAN .....	18
Tableau 2 : Comparaison de facteurs IoT de Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT .....	20
Tableau 3 : Différences entre les indices du facteur d'étalement .....	24
Tableau 4 : Définitions des champs d'un paquet LoRaWAN .....	28
Tableau 5 : Data Rate fréquence EU868 .....	29
Tableau 6 : SNR minimum requis .....	30
Tableau 7 : Types de réseaux LoRaWAN .....	38
Tableau 8 : Comparatifs de fournisseurs de serveurs réseau LoRaWAN .....	43
Tableau 9 : Critères d'appréciation du projet .....	47
Tableau 10 : Liste des tables de la base de données « SmlrrigDB » .....	61
Tableau 11 : Champs météorologiques .....	63

## Liste des figures

Figure 1 : Distribution d'eau douce sur la planète .....	9
Figure 2 : Cartographie du niveau de stress hydrique .....	11
Figure 3 : Risques mondiaux classés par gravité à long terme (10 ans) .....	12
Figure 4 : Graphique de l'utilisation IoT mondiale .....	14
Figure 5 : Étapes clés de l'IoT .....	16
Figure 6 : LPWAN vs Cellulaire .....	17
Figure 7 : Radar comparatif des facteurs des différents LPWAN .....	20
Figure 8 : Exemple architecture Wyld .....	22
Figure 9 : Tableau comparatif Swisscom .....	22
Figure 10 : Couches du protocole LoRaWAN .....	25
Figure 11 : Structure d'un réseau LoRaWAN .....	26
Figure 12 : Schéma downlink & uplink .....	27
Figure 13 : Structure d'un message de données LoRaWAN .....	28
Figure 14 : Exemple d'un paquet uplink .....	29
Figure 15 : Classe All .....	31
Figure 16 : Classe Beacon .....	32
Figure 17 : Classe Continuous .....	33
Figure 18 : Schéma serveur Back-end LoRaWAN .....	34
Figure 19 : Réseau LoRaWAN d'opérateurs publics .....	36
Figure 20 : Réseau LoRaWAN privé .....	37
Figure 21 : Réseau LoRaWAN hybride .....	37
Figure 22 : Schéma de cryptage .....	39
Figure 23 : Répartition Clés AES .....	40
Figure 24 : Configuration initiale & finale OTAA .....	42
Figure 25 : Schéma d'un environnement The Things Network .....	46
Figure 26 : Architecture du système Smlrrig .....	49
Figure 27 : Concentrateur LoRa .....	50
Figure 28 : PiStack .....	51
Figure 29 : web UI de la passerelle .....	52
Figure 30 : Création clé API CUPS .....	53
Figure 31 : Configuration de LoRa Basics™ Station dans la passerelle .....	54
Figure 32 : Création passerelle .....	55
Figure 33 : Menu de gestion de la passerelle depuis TTN .....	56
Figure 34 : Extérieur du LSE01 .....	57
Figure 35 : Intérieur du LSE01 .....	58
Figure 36 : Exemple d'un payload reçu .....	58

Figure 37 : Position dans le sol de la sonde .....	59
Figure 38 : Intégration API dans TTN .....	60
Figure 39: Diagramme ER SmlrrigDB.....	62
Figure 40 : Exemple de de données de l'API météo en json.....	64
Figure 41 : Diagramme UML algorithme de décision d'arrosage .....	67
Figure 42 : PiRelay V2 HAT .....	68
Figure 43 : Exemple de vanne à bille motorisé .....	68
Figure 44 : Schéma connexion Relay & vanne .....	69
Figure 45 : Pi4J .....	70
Figure 46 : Schéma communication interface web .....	71
Figure 47 : Diagramme de séquence sur l'authentification .....	73
Figure 48 : Diagramme de séquence interaction dans l'Interface web .....	74

# 1. Introduction

Dans un contexte où les ressources en eau deviennent de plus en plus précieuses et où la gestion durable de ces ressources est cruciale, le développement de technologies intelligentes pour optimiser leur utilisation est devenu impératif.

Ce travail de Bachelor présente le développement d'un système intelligent d'arrosage qui utilise des données météorologiques, des mesures locales de l'humidité et de la température du sol transmis par ondes radio pour optimiser l'arrosage des jardins. Le but de ce projet est de créer un prototype qui permettra d'améliorer le rendement des arrosages en réduisant la consommation d'eau, tout en maintenant son jardin en bonne santé.

Ce système cible les jardins de particuliers pour tester la fiabilité d'un réseau étendu à faible puissance ainsi que l'utilisation de matériaux aux coûts accessibles. Ce travail vise à trouver l'équilibre entre flexibilité, efficacité, maintenance et coûts réduits.

La problématique est la suivante :

*Comment rendre l'arrosage de son jardin intelligent avec un réseau étendu à faible puissance ?*

La suite de ce document s'évertuera à répondre à cette problématique et évaluer le potentiel d'un déploiement du système à plus grande échelle dans le domaine de l'agriculture.

En préambule, ce travail abordera la disponibilité actuelle de l'eau dans le monde et des conséquences de sa rareté. Deuxièmement, les concepts techniques généraux de l'Internet Of Things et des réseaux étendus à faible puissance seront parcourus. Plusieurs réseaux seront comparés afin de choisir le plus adapté pour ce projet. Troisièmement, le fonctionnement de la technologie de communication choisie pour le prototype sera développé. Finalement, le prototype dans son ensemble ainsi que les étapes de sa conception seront présentés avec une analyse finale de sa pertinence.

## 2. Analyse de l'existant

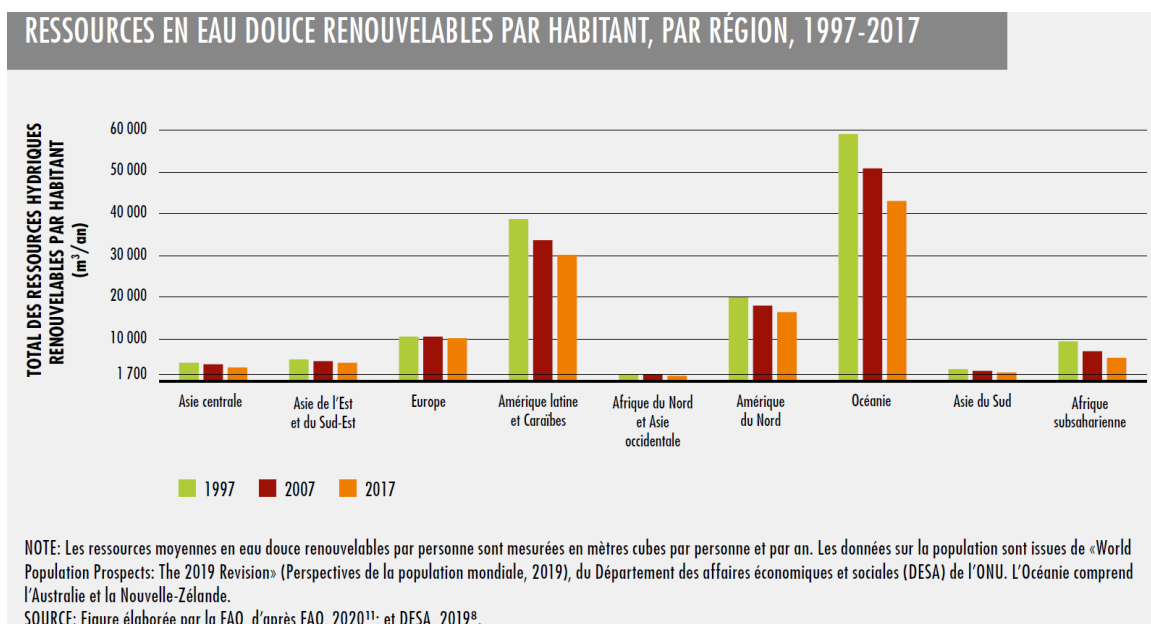
Ce chapitre décrit la situation actuelle concernant les trois éléments constituant la pertinence et l'existence du projet. Il va permettre d'introduire l'objectif de ce travail.

### 2.1 Raréfaction de l'eau douce

C'est un fait, l'eau est une ressource naturelle unique, essentielle à la survie de l'espèce humaine. Actuellement, 1,2 sur 8 milliards de personnes font face à une rareté extrême de cet « or bleu » (FAO 2020, p. xviii).

La terre est composée de 70 % d'eau, dont 2,5 % d'eau douce. Bien que ce pourcentage semble faible, la quantité d'eau douce suffit pour subvenir aux besoins vitaux pour l'ensemble de la population mondiale. Toutefois, l'inégalité des distributions de cette ressource sur le globe crée des différences majeures de consommation. Certains pays doivent se restreindre tandis que d'autres ont un accès quasi illimité à cette ressource (Heuzebroc 2018).

Figure 1 : Distribution d'eau douce sur la planète



(FAO 2020, p. 8)

Ce graphique démontre l'inégalité de la répartition de l'eau douce sur la planète. En 2017, l'Océanie avoisinait les 43 000 m<sup>3</sup> cubes de volume hydrique annuel par personne alors qu'en Afrique du Nord et Asie occidentale, ils n'avaient pas atteint les 1 000 m<sup>3</sup>. Il est également observable que depuis 1997, le volume d'eau diminue dans chaque

région. Selon Falkenmark<sup>1</sup>, lorsqu'un pays se situe en dessous des 1 000 m<sup>3</sup>, l'eau devient une rareté chronique et en dessous des 500 m<sup>3</sup>, une rareté extrême (FAO 2020, pp. 8-9).

En 2018, la ville de Cap Afrique du Sud a approché du jour zéro sans eau où aucune goutte d'eau potable n'aurait été accessible depuis le robinet. Elle a réussi à retarder l'échéance avec des restrictions de consommation en limitant à 50 litres d'eau par personne et par jour (Stefan 2021). Sachant que le minimum vital pour une personne étant de 20 litres d'eau par jour, 50 litres permettent de vivre raisonnablement, mais avec obligation de faire des calculs et des choix dans l'utilisation de l'eau.

À titre de comparaison, en Suisse, la consommation d'eau est supérieure à 250 litres par jour et par personne (Macé 2017). Le cas de figure du Cap n'est pas isolé et de fait, cela a atteint un pays comme le Brésil qui détient 12 % des réserves d'eau douce de la planète (Stefan 2021).

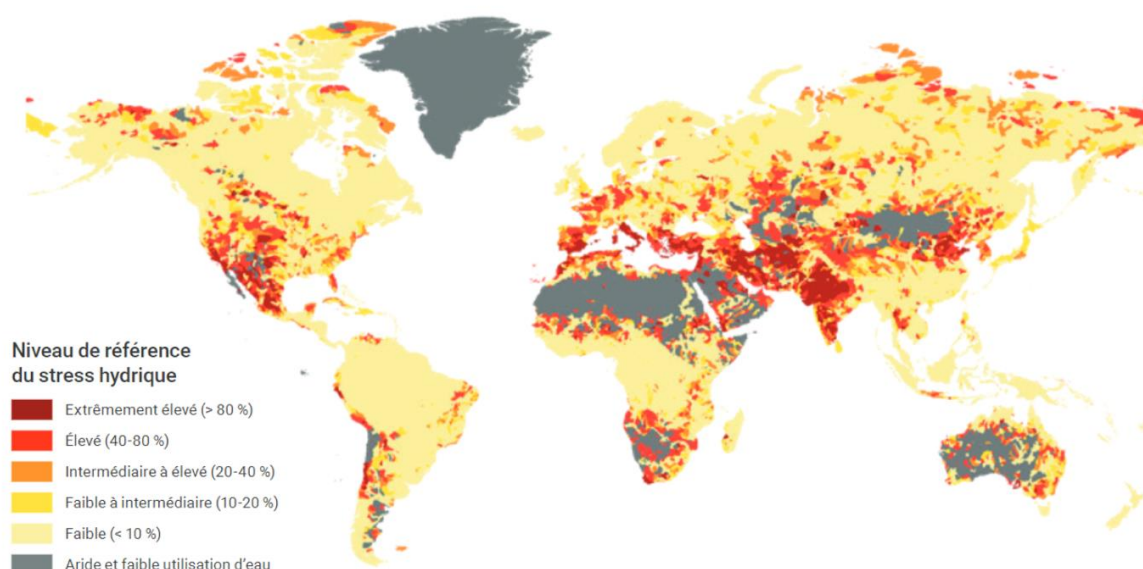
Ces deux pays sont des exemples de ce qui se produit sur la planète : une crise mondiale de l'eau. À présent, entre 2 et 3 milliards d'individus souffrent de pénurie d'eau au moins 1 mois par an (UNESCO 2023a).

La figure se trouvant à la page suivante, répertorie le niveau de stress hydrique des régions dans chaque pays en 2019. Pour le calculer, un rapport est effectué entre l'eau renouvelable disponible en surface et souterraine, et la somme de toutes les extractions de l'eau (ménage, industrie, irrigation, élevage). Nous pouvons observer que l'Inde, un des pays les plus peuplés au monde, présente un niveau extrêmement élevé de stress hydrique. Le Pakistan et la Chine sont également fortement atteints.

---

<sup>1</sup> Hydrologue suédoise connue pour son expertise sur l'utilisation durable des ressources en eau

Figure 2 : Cartographie du niveau de stress hydrique



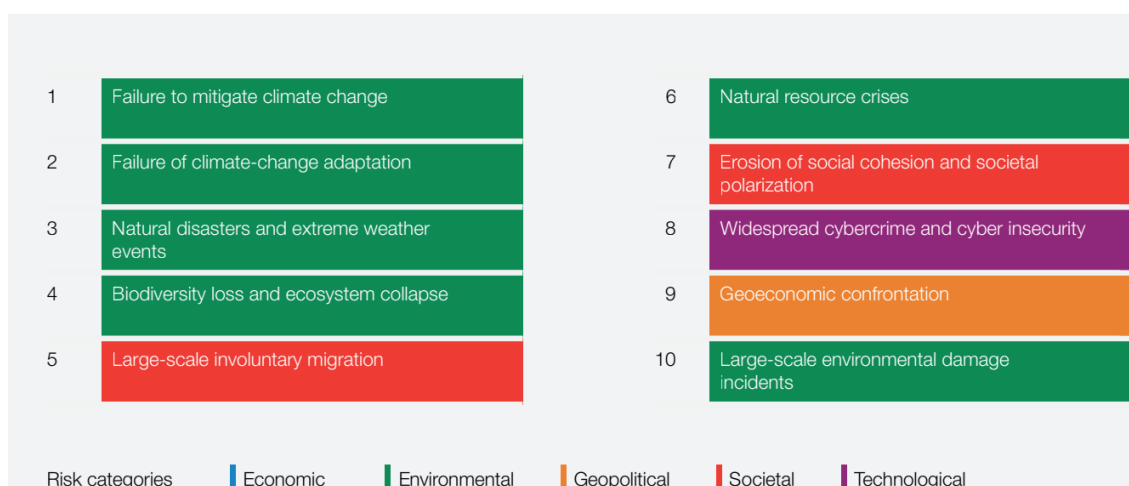
(UNESCO 2023b, p. 15)

De plus, la demande d'eau continue de croître de 1 % par an en raison de l'accroissement de la population, la surconsommation et l'expansion économique (Stefan 2021).

Conformément aux prédictions de l'ONU, sur les 9,7 milliards d'individus qui fouleront cette terre en 2050 (FAO 2020, p. 7), 5 milliards d'êtres humains pourraient souffrir du manque d'eau (Stefan 2021). Ce qui représente environ 3,8 milliards de personnes supplémentaires par rapport à aujourd'hui. Cette augmentation entraînera une concurrence en nécessité hydrique entre le domaine agricole et les zones urbaines. Les aliments devront être produits en suffisance pour nourrir les habitants tout en assouvissant leurs besoins d'eau. Une augmentation de 80 % de la demande en eau en ville est attendue en 2050. Malgré la marge d'erreur possible déclarée par l'ONU, ces chiffres sont alarmants (UNESCO 2023b, p. 41).

Selon le World Economic Forum, la raréfaction des ressources naturelles est un risque très important pour ces 2 à 10 prochaines années. Ceci pourrait engendrer des bouleversements politiques, une violence accrue et de fortes migrations (WEF 2023).

Figure 3 : Risques mondiaux classés par gravité à long terme (10 ans)



(WEF 2023, p. 29)

Leur définition du risque n° 6 est la suivante : « Graves pénuries de produits et de ressources naturelles à l'échelle mondiale en raison de la surexploitation humaine et/ou de la mauvaise gestion des ressources naturelles essentielles. [Ceci] comprend notamment les produits chimiques, les aliments, les minéraux et l'eau. » (WEF 2023, p. 75).

La Suisse, considérée comme « le château d'eau d'Europe », est riche en eau douce grâce aux nombreux glaciers, lacs et aux conditions météorologiques. Elle est la source de 5 % de l'eau douce européenne (Jorio 2019). Elle permet d'alimenter quatre bassins majeurs de l'Europe (le Rhône, le Rhin, l'Inn et le Pô), ce qui fait que plus de 150 millions d'êtres humains dépendent des sources suisses (Guibert 2023).

Bien qu'actuellement l'eau y soit en suffisance pour l'entièreté de la population, des diminutions sont observées avec les changements climatiques. Il est pertinent de réfléchir dès lors à des solutions pour l'économiser (Revaz 2022).

De plus, la Confédération suisse a déclaré dans un rapport sur la sécurité de l'approvisionnement en eau que les données de consommation hydrique du territoire sont incomplètes, principalement dans le domaine de l'agriculture. Ceci rend difficile la prédiction des besoins suisses (Conseil fédéral 2022, p. 3).

L'exploitation agricole mondiale utilise 70 % des ressources d'eau douce. Cette donnée justifie tous les axes d'amélioration, que ce soit dans la manière de consommer, dans le choix de plantes peu gourmandes en eau ou dans le système d'irrigation.

En effet, les dispositifs d'arrosages actuels perdent 30 à 60 % d'eau avec l'évaporation (Mokrani 2009). L'irrigation se complexifie entre les différentes techniques possibles et les conditions environnementales diverses telles que la température, la pluvialité, la pente du terrain, le sol, etc.

C'est pourquoi des améliorations seraient pertinentes afin d'obtenir un équilibre entre une production suffisante et une quantité d'eau minimum nécessaire.

Dans l'intention de récolter des données et des résultats plus précis, certaines recherches se tournent vers l'utilisation de différents capteurs et algorithmes tels que les logiciels CROPWAT 8 et AQUACROP 4 qui aident à l'évaluation de l'efficacité de l'eau en fonction du sol, des cultures et du climat (Kambou et al. 2013).

Dans ce travail nous allons nous concentrer sur la partie des capteurs et sur la création d'un algorithme visant à améliorer l'équilibre entre l'eau utilisée et l'eau consommée par une plante.

## **2.2 Amélioration technologique de l'irrigation**

Comme vu précédemment, les systèmes d'irrigation peuvent être améliorés grâce à de nouvelles technologies et algorithmes. C'est pourquoi, dans le cadre de ce travail, nous allons créer un prototype qui permettra d'augmenter l'efficacité du rendement d'un arrosage et étudier la pertinence des technologies utilisées. Pour ce faire, la technologie Internet of Things (IoT) sera utilisée, ainsi qu'un réseau de communication à basse consommation. Ce dernier permet d'avoir une portée plus grande pour couvrir de larges zones. Ces deux technologies seront développées dans les points ci-après.

## **2.3 Vent en poupe de l'Internet of Things**

Tout d'abord, qu'est-ce que l'Internet of Things ? La définition de l'entreprise Oracle est la suivante :

« L'Internet of Things ( IoT ) décrit le réseau de terminaux physiques, les "objets", qui intègrent des capteurs, des logiciels et d'autres technologies en vue de se connecter à d'autres terminaux et systèmes sur Internet et d'échanger des données avec eux. Ces terminaux peuvent aussi bien être de simples appareils domestiques que des outils industriels d'une grande complexité. ».

(Oracle [sans date])

En d'autres termes, l'objectif est d'intégrer des systèmes informatiques sur divers objets afin de leur attribuer une identité numérique et d'établir une communication sans fil pour transmettre et recevoir des données. Ce système permet une intervention humaine réduite.

« Le monde physique rencontre le monde digital, et ils coopèrent. »

(Oracle [sans date])

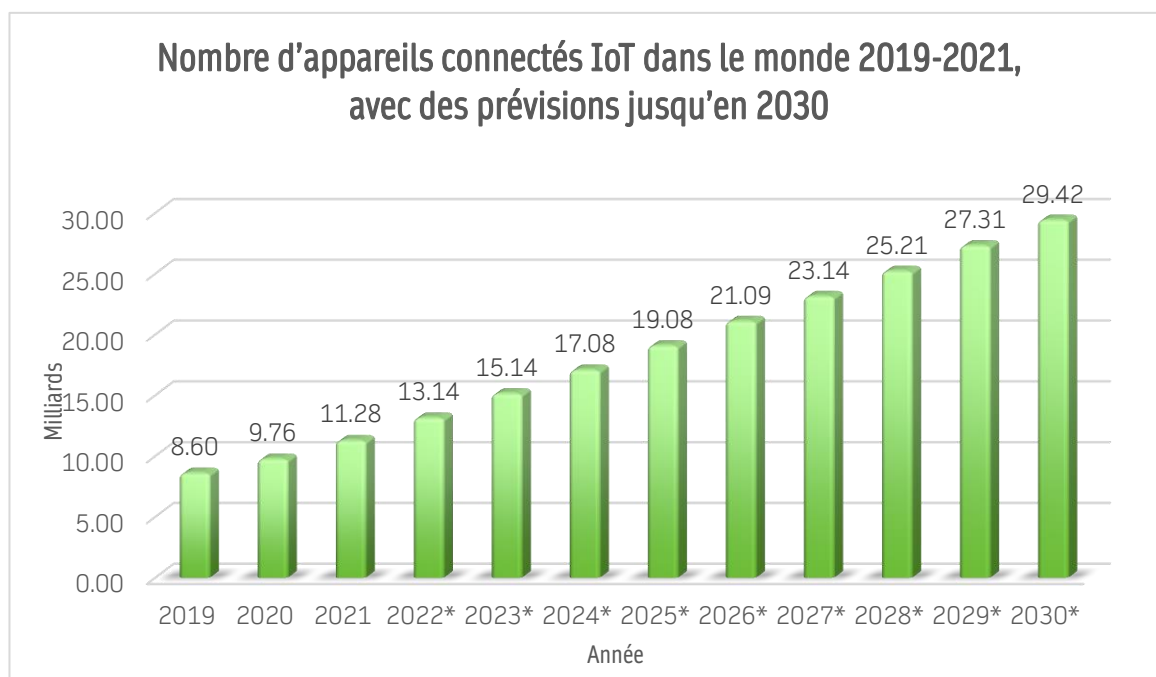
Ce concept de communication entre machines et identité numérique a été insufflé en 1999 par Kevin Ashton, un pionnier de la technologie anglaise. Selon Kevin Ashton, les humains ont certaines limites physiques pour le partage de données, ce qui restreint « les choses » récoltées.

« Le problème, c'est que les gens ont une attention, une précision et un temps limité, et ne sont donc pas pleinement capables de saisir la totalité des données échangées dans le monde physique. »

(Traduit de : Ashton 2009)

Kevin Ashton a mis le doigt sur un filon d'or, car depuis le nombre de dispositifs actifs recensés ne fait qu'augmenter.

Figure 4 : Graphique de l'utilisation IoT mondiale



(Adapté de : Sujay Vailshery 2023)

Ce graphique ci-dessus recense les dispositifs connectés de 2019 à 2021, et prédit leur nombre jusqu'en 2030. En 2021, 11,28 milliards d'appareils actifs transmettaient ou réceptionnaient des données dans le monde. Le nombre ne fait qu'augmenter d'année en année, ce qui dénote bien d'une utilisation accrue de cette technologie.

Cette augmentation est due aux innombrables avantages, mais également aux prix des capteurs qui ont chuté de 70 % depuis 2004, les rendant plus accessibles (SAP [sans date]).

Le domaine de l'IoT se décompose en deux parties : l'IoT du grand public et l'IoT d'entreprise.

L'IoT dit du grand public, comprend principalement la domotique, soit le fait d'automatiser sa maison et de la rendre intelligente pour faciliter sa gestion. Toutefois, ceci n'est pas l'unique motif de ces progrès, car ceux-ci permettent également d'économiser de l'énergie. Le groupe suisse ABB s'applique à développer une intelligence qui permettra d'économiser de l'énergie entre 40 % et 60 %. Par exemple, les lumières s'allumeront uniquement en cas de nécessité, les appareils inutilisés s'éteindront d'eux-mêmes, un capteur de température déterminera le niveau d'ouverture des stores et l'intensité de chauffage des pièces selon leur fréquentation (SwissLife 2021).

L'IoT d'entreprise comprend les domaines de l'industrie, de la logistique, de la santé, de l'automobile et de celui de l'agriculture. Avec l'IoT dans la sphère industrielle, nous parlons d'industrie 4.0. Cette technologie, par exemple, permet une maintenance proactive des outils avec des capteurs indiquant le moment où la production ne pourra plus être réalisée correctement. Dans le secteur de la logistique, des lecteurs RFID<sup>2</sup> sont utilisés pour tracer chaque entrée et sortie de marchandises. En ce qui concerne l'agriculture, divers outils permettent aux agriculteurs d'avoir des informations plus précises sur la qualité et l'état de leur terrain et ainsi adapter les différentes tâches (RedHat 2019).

Selon une étude, l'IoT représenterait d'ici 2025 21 milliards d'objets connectés, dont 13,8 milliards dans le secteur industriel (Chavanne 2018). Ce chiffre est toutefois ralenti par le point faible de cette technologie : la sécurité (Infologo 2018).

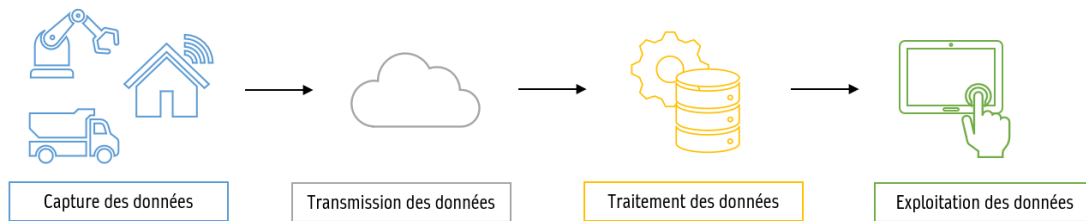
En effet, tout élément connecté est un point d'entrée pour des infiltrations malveillantes dans le réseau. En une année, la quantité d'attaques concernant des engins IoT est passée de 813 millions en 2018 à 2,9 milliards en 2019 (Jovanovic 2023). La difficulté étant que de nombreux fournisseurs IoT ne développent pas d'appareils avec un système de protection intégré, faute de normes de sécurité.

---

<sup>2</sup> Acronyme de Radio Frequency Identification désignant une étiquette transmettant des informations par signal radio

Les mises à jour de sécurité des équipements sont un vrai défi pour les entreprises. Il n'est en effet, pas aisé de mettre à jour des milliers d'objets connectés pendant toute leur durée de vie. (Infologo 2018).

Figure 5 : Étapes clés de l'IoT



(Adapté de : SAP [sans date])

Comme illustré ci-dessus, il y a 4 étapes clés dans l'utilisation de l'IoT. Dans ce travail, nous allons nous intéresser de près à la partie « Transmission des données ».

Jusqu'à présent, nous avons évoqué les différents types de capteurs en fonction des besoins, mais le choix du type de connexion sans fil pour transmettre les données est également important. Par exemple, il y a le Wi-Fi, Bluetooth, les technologies cellulaires et les réseaux étendus à basse consommation (Low Power Wide Area Network ou LPWAN).

Le choix de technologie dépend de 4 critères de sélection (Georges 2023) :

- La portée du signal
- Le débit de transmission de données
- La consommation en énergie
- Le coût de déploiement

Bien qu'elle n'apparaisse pas dans la source, la sécurité des communications est un 5<sup>e</sup> critère de sélection. Pour conclure, l'IoT a permis, permet et permettra bien des progrès dans tous les domaines.

## 2.4 Solutions LPWAN existantes

Durant ce chapitre nous allons définir ce qu'est un LPWAN, effectuer une comparaison avec d'autres technologies et comparer les différents LPWAN entre eux, afin de décider quel système de transmission de données est le plus pertinent à utiliser pour ce projet.

Comme évoquée très brièvement dans la section IoT, les Low Power Wide Area Network ou LPWAN est un type de connexion possible pour l'IoT.

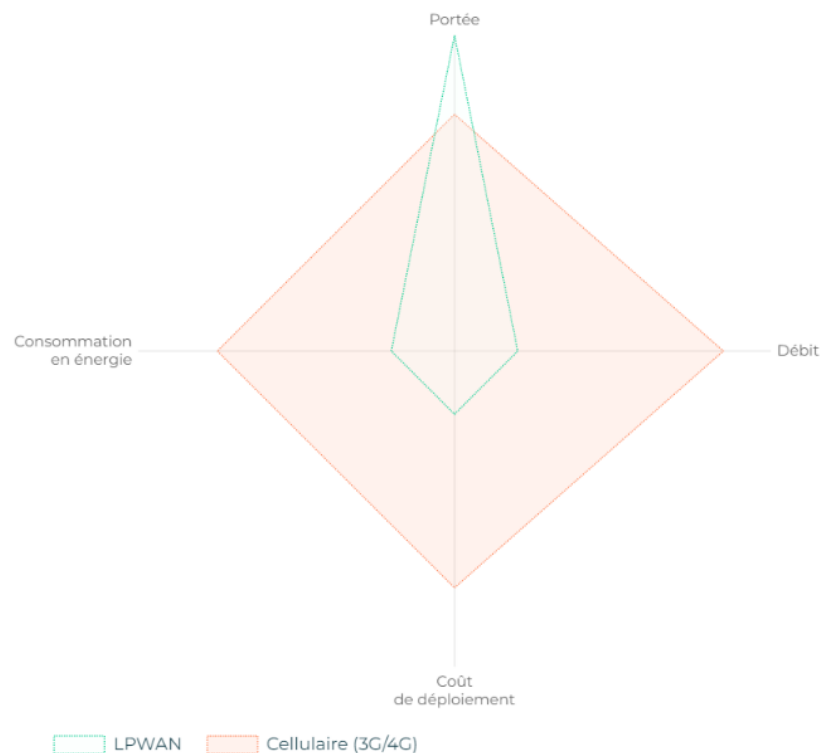
« Un réseau étendu à basse consommation (LPWAN) est un type de réseau de communication sans fil conçu pour connecter des dispositifs nécessitant la transmission de petites quantités de données sur de longues distances. »

(IoT Industriel Blog [sans date])

En décortiquant le nom, nous obtenons « Low Power » pour une basse consommation d'énergie et « Wide Area » pour une longue portée. Cette technologie est adaptée pour des appareils et des applications nécessitant une faible quantité de données à transmettre sur une très longue distance et avec l'avantage d'ingérer peu d'énergie. Elle est idéale pour les communications machine-à-machine (M2M). De plus, le coût de déploiement est plus modeste que les autres réseaux sans fil. Cette technologie est possible en diminuant le débit des données, ce qui permet d'augmenter la portée du signal (Georges 2023).

Les réseaux étendus à basse consommation sont souvent employés pour les villes intelligentes et pour l'agriculture, car ils permettent de couvrir de grandes distances. Ils sont également utilisés dans le domaine industriel et celui de la santé (IoT Industriel Blog [sans date]). La ville de Calgary au Canada est très avancée dans le Smart City, et recourt à une communication LPWAN pour récolter les informations des capteurs dispersés dans la localité. Ceci est un bon exemple des avantages et prouesse d'un LPWAN (Gloaguen 2018).

Figure 6 : LPWAN vs Cellulaire



(Georges 2023)

Afin de mettre en parallèle les technologies de communication, l'image ci-dessus montre les différences entre les réseaux cellulaires et un réseau LPWAN. Nous pouvons observer que la portée est plus longue, mais que le coût, le débit et la consommation sont moindres. Comme autre comparaison, la couverture d'une antenne Wi-Fi est d'environ 250 mètres en extérieur (Orange 2023) alors qu'une antenne d'un LPWAN peut couvrir entre 10 et 15 km en zone rurale (Georges 2023).

Il existe 4 principales technologies LPWAN (Georges 2023) :

- Sigfox
- LoRaWAN
- NB-IoT
- LTE-M

Elles se divisent en deux groupes, les LPWAN non cellulaires (Sigfox, LoRaWAN) et les LPWAN cellulaires (NB-IoT, LTE-M). Le choix du LPWAN dépend des besoins pour le réseau souhaité. Par exemple, pour une grande autonomie des dispositifs, il faudra utiliser un LPWAN non cellulaire. Alors que s'il est nécessaire d'avoir une transmission en temps réel des données, un LPWAN cellulaire serait idéal.

À titre de comparaisons et d'informations, le tableau ci-dessous démontre les différences techniques entre Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT et plus globalement celles entre les LPWAN cellulaires et non cellulaires.

Tableau 1 : Différences techniques des LPWAN

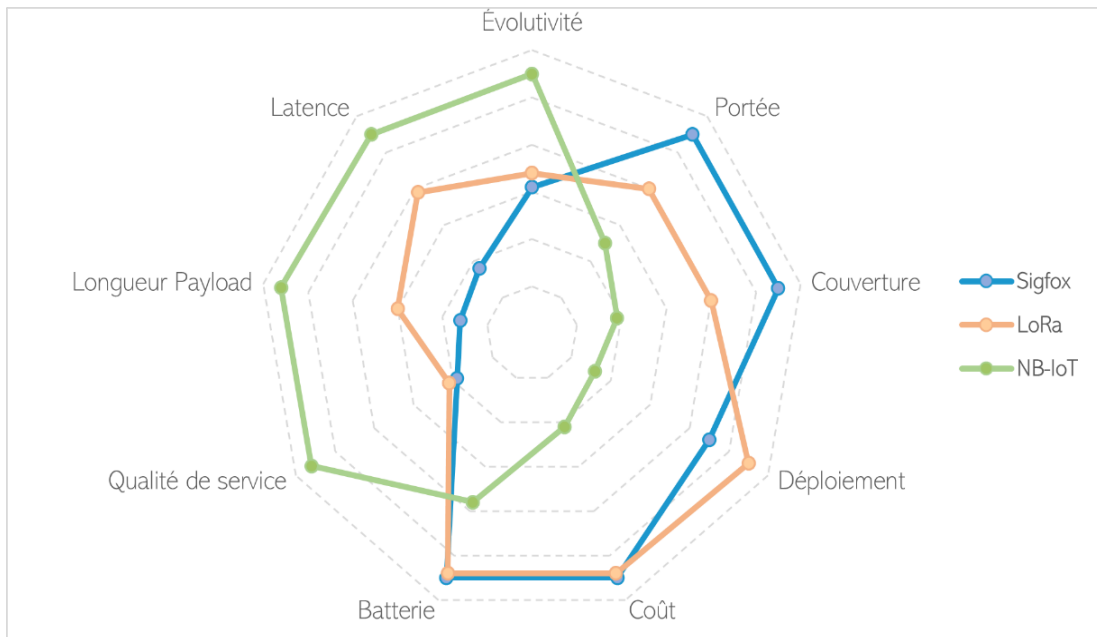
Caractéristiques	LPWAN non cellulaire		LPWAN cellulaire
	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation radio	BPSK	CSS	QPSK
Fréquence	Bandes libres d'accès (ISM)		Bandes de fréquences LTE avec licence
Largeur de bande	0,1 kHz	125 kHz et 250 kHz	200 kHz
Débit de données maximum	100 bit/s	50 kbit/s	200 kbit/s
Bidirectionnel	Limité	Oui	Oui

Nombre de messages journaliers	Limité	Illimité	
Longueur maximale du payload	12 octets	243 octets	1 600 octets
Portée	10 km (urbain), 40 km (rural)	5 km (urbain), 20 km (rural)	1 km (urbain), 10 km (rural)
Résistance aux interférences	Très élevé		Basse
Authentification et chiffrement	Non pris en charge	Oui (AES 128 bits)	Oui (LTE encryption)
Débit de données adaptatif	Non	Oui (facteur d'étalement)	Non
Transmission	Plusieurs stations de base		Une seule station de base
Réseau privé possible	Non	Oui	Non
Quantité de périphériques finaux connectés	50 000		100 000

(Mekki et al. 2019, p. 3)

Outre les différences techniques, il y a plusieurs autres facteurs décisifs dans le choix d'un LPWAN :

Figure 7 : Radar comparatif des facteurs des différents LPWAN



(Adapté de : Mekki et al. 2019, p. 5)

Tableau 2 : Comparaison de facteurs IoT de Sigfox, LoRaWAN et NB-IoT

Facteur IoT	Analyses
Qualité de service (QoS)	NB-IoT assure la meilleure qualité de service des trois LPWAN
Autonomie de la batterie & latence	LoRaWAN et Sigfox ont des dispositifs avec une durée de vie plus longue (pouvant aller jusqu'à 10 ans). Cependant ils ont une latence plus grande que NB-IoT.
Évolutivité & longueur du payload	NB-IoT a de meilleures perspectives d'évolution, car il est possible de connecter le double de périphériques finaux par rapport à Sigfox et LoRaWAN. De plus, NB-IoT peut transmettre davantage d'informations avec 1 600 octets de payload, une nette différence avec maximum 12 octets pour Sigfox et 22 octets pour LoRaWAN.

Couverture et portée du réseau	Sigfox offre la portée et la couverture la plus grande, ce LPWAN permet de couvrir une ville (10 à 40 km) avec une seule station de base.
Déploiement	LoRaWAN est le réseau le plus déployé des trois. Il offre davantage de flexibilité et il est le plus accessible.
Coût	Sigfox et LoRaWAN sont plus rentables que NB-IoT. Une station de base NB-IoT coûte au minimum 15 000 euros, 4 000 euros pour Sigfox et 1 000 euros pour LoRaWAN. Les capteurs sont moins chers également.

(Mekki et al. 2019, pp. 5-6)

Dans le cadre de ce projet, les facteurs importants sont la durée de vie des batteries, la résistance aux interférences, l'accessibilité du déploiement, le coût et la portée réseau. Le choix se porte donc sur un LPWAN non cellulaire, et sur LoRaWAN. Bien que la portée soit plus étendue pour Sigfox, LoRaWAN est le réseau le plus adapté au projet en raison de sa flexibilité de déploiement et son coût plus faible.

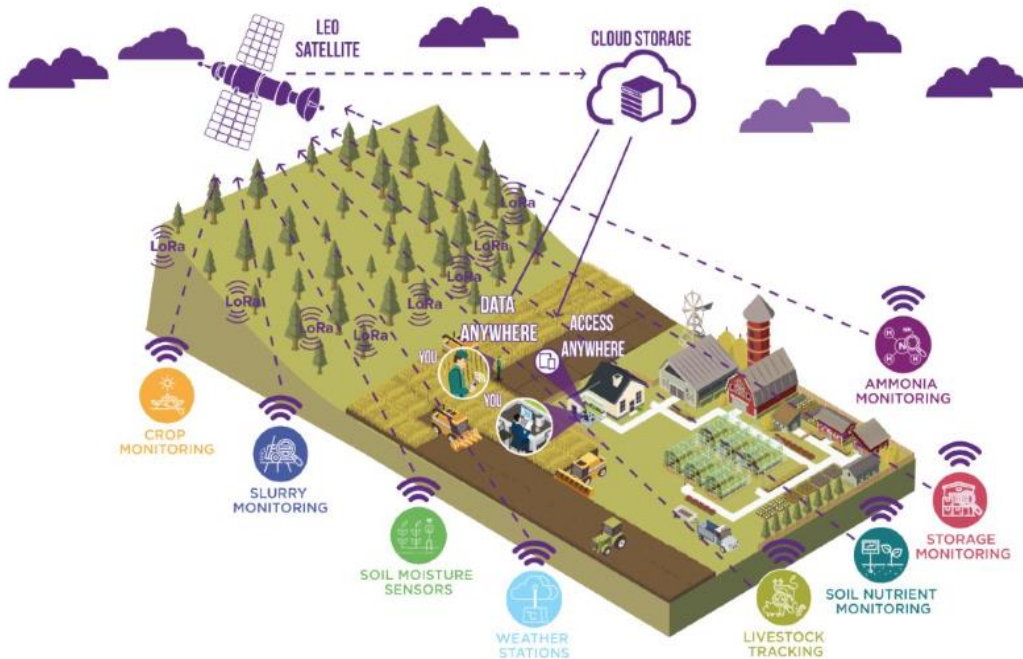
Actuellement, il existe plusieurs projets et entreprises proposant une infrastructure pour l'agriculture intelligente avec LoRaWAN, tel que Milesight qui fournit un kit de démarrage pour surveillance agricole. Ce kit contient par exemple un capteur de température et d'humidité, un capteur de lumière et une passerelle LoRaWAN<sup>3</sup> avec un abonnement à leur Cloud (Milesight IoT [sans date]). Wyld Networks vend également ces mêmes produits, ainsi que l'architecture et les tests vérifiant le bon fonctionnement du système.

---

<sup>3</sup> Cf. chapitre 3.2

Ci-dessous, un exemple d'une architecture possible à mettre en place avec l'entreprise Wyld.

Figure 8 : Exemple architecture Wyld



(Wyld Network [sans date])

En Suisse, il est envisageable d'avoir accès à une couverture réseau LoRaWAN avec l'opérateur Swisscom, moyennant au minimum 1 CHF par appareil et par mois. Grâce à ceci, il est possible d'obtenir une connectivité IoT stable dans les zones rurales et même à l'étranger et une surveillance du réseau 24 h sur 24 h (Swisscom [sans date]).

Swisscom propose des tarifs différents en fonction des besoins de l'utilisateur avec une variation de 10 centimes par appareil entre chaque catégorie Basic, Plus et Advanced.

Figure 9 : Tableau comparatif Swisscom

Étendue des fonctions

Fonction	Basic	Plus	Advanced
Couverture réseau nationale	⊙	⊙	⊙
Prise en charge des appareils de classe A, B, C	⊙	⊙	⊙
Accès au portail web LPN	⊙	⊙	⊙
Point d'accès API	⊙	⊙	⊙
Itinérance LoRaWAN	-	⊙	⊙
Connexion cloud IoT Flow	-	⊙	⊙
Géolocalisation	-	-	⊙
Multicast	-	-	⊙

(Swisscom [sans date])

### 3. Concepts et technologies utilisées

Ce chapitre a pour objectif d'expliquer le fonctionnement de LoRa et LoRaWAN : deux concepts utilisés pour transmettre des données dans ce projet.

#### 3.1 LoRa

LoRa est la dénomination d'une modulation radio créée par Cycleo en 2010 et rachetée par Semtech en 2012 (Slats 2020). Ce nom est une abréviation de « long range » qui signifie longue portée. Par la suite, Semtech a continué d'améliorer cette technologie et en 2015, la LoRa Alliance<sup>4</sup> a été créée ainsi que le protocole réseau LoRaWAN (Slats 2020). L'objectif de cette alliance est le suivant :

*« Soutenir et promouvoir l'adoption mondiale de la norme LoRaWAN en garantissant l'interopérabilité de tous les produits et technologies LoRaWAN. »*

(Slats 2020)

L'entreprise Semtech s'applique à simplifier le processus de développement IoT et accélérer son expansion sans restriction d'accès entre les différents produits LoRaWAN. Actuellement, plus de 100 millions de dispositifs dans le monde emploient LoRaWAN (Slats 2020).

LoRa est la couche physique du protocole LoRaWAN selon le modèle OSI<sup>5</sup>, une norme de communication réseau entre un émetteur et un récepteur (Proofpoint [sans date]).

*« Couche physique : les paquets sont ici convertis en impulsions électriques, radio ou optiques et transmis sous forme de bits (la plus petite quantité d'information utilisable) par l'intermédiaire de lignes, d'ondes radio ou de câbles. »*

(Cloudflare [sans date])

LoRa permet l'utilisation de plages de fréquences disponibles sans licence appelée bandes industrielles, scientifique et médicale (ISM). Ces radiofréquences sont définies en fonction du pays d'utilisation. En Europe, c'est principalement la bande 868 MHz qui est employée. Cependant, les bandes ISM étant libres d'accès, elles sont perturbées par de nombreux protocoles, ce qui crée un bruit sur la fréquence et une diminution de la qualité du signal (Team Kereval 2021).

LoRa utilise la modulation Chirp Spread Spectrum (CSS) afin de résister aux perturbations et réduire les effets du bruit. Cette modulation a été créée en 1940 pour

---

<sup>4</sup> Pour en savoir plus : <https://lora-alliance.org/>

<sup>5</sup> Abréviation de la norme de communication Open Systems Interconnection

les applications de radar maritimes, mais est employée aujourd’hui pour sa résistance aux interférences et à l’effet Doppler<sup>6</sup>, sa longue portée et sa basse consommation (Team Kereval 2021).

LoRa permet une souplesse de gestion des ressources radio et une optimisation de la consommation énergétique en adaptant le débit de transmission de données. Ceci en modifiant la largeur de bande (Bandwidth, BW) et grâce à la détermination d’un facteur d’étalement (Spreading Factor, SF) qui peut varier entre les valeurs 7 et 12. Plus l’indice est élevé, plus la portée du signal est longue. L’augmentation de l’indice a comme contrepartie une baisse de puissance du débit et une diminution de la durée de vie des batteries des dispositifs (Orange [sans date]).

Tableau 3 : Différences entre les indices du facteur d’étalement

Octets transmis	Facteur d’étalement	Temps de transmission	Temps de transmission pour 1 octet
242	7	399 ms	1,65 ms
51	12	2 793 ms	54,76 ms

(Orange [sans date])

Comme nous pouvons l’observer, avec un facteur d’étalement de 12, pour  $\frac{1}{4}$  des octets transmis, nous obtenons sept fois le temps de transmission d’un signal comparé à un facteur d’étalement de 7 pour la totalité des octets. Nous pouvons également voir qu’un facteur d’étalement de 12 est approximativement 33 fois plus lent qu’un de 7.

Il est possible d’employer LoRa sans le protocole LoRaWAN avec une communication peer-to-peer<sup>7</sup> entre les machines, toutefois il est nécessaire de gérer la sécurité des transmissions et la qualité de service qu’assure le protocole LoRaWAN (Team Kereval 2021). Ce cas de figure ne sera pas utilisé dans ce travail.

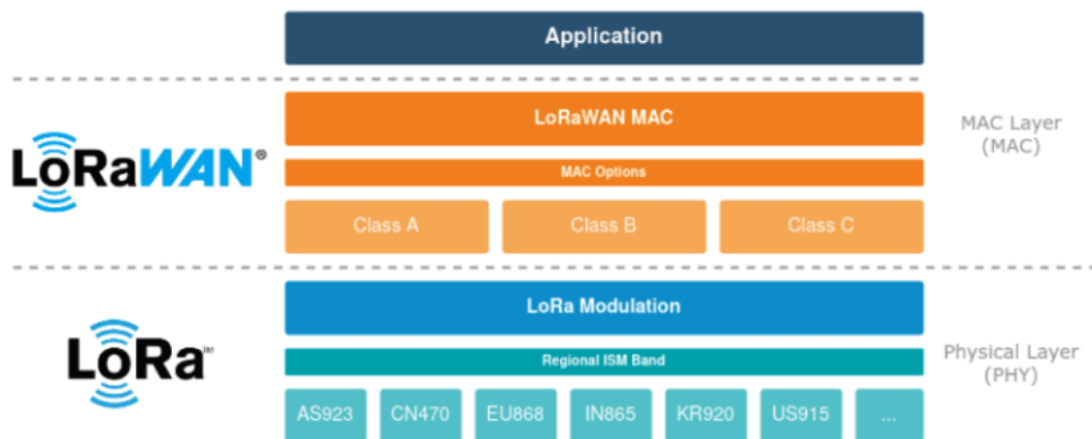
## 3.2 LoRaWAN

LoRaWAN est un protocole développé par LoRa Alliance®, qui définit des normes d’utilisation de LoRa. Ce protocole est la couche MAC (Media Access Control) qui constitue en partie la couche liaison de données du modèle OSI (Team Kereval 2021).

<sup>6</sup> Phénomènes physiques de décalage d’une fréquence lorsque la distance entre l’émetteur et le récepteur varie

<sup>7</sup> Système d’échange réseau où chaque élément est à la fois le client et le serveur.

Figure 10 : Couches du protocole LoRaWAN



(Pous 2021)

Comme le montre la figure ci-dessus, LoRaWAN est la couche supérieure d'une modulation LoRa.

LoRaWAN est utilisé comme protocole de routage pour les communications d'un appareil LoRa et un serveur d'applications. Ceci en assurant une garantie de sécurité et d'acheminement (Team Kereval 2021). Pour ce faire, il définit un format de trame spécifique à intégrer avec un paquet LoRa pour être compris par le serveur réseau, ce qui permet d'avoir une intégration facilitée avec plusieurs dispositifs LoRa venant de fabricants différents. De plus, il se charge de sécuriser de bout en bout la communication. En cas d'intrusion, les données ne peuvent être lues, seuls les dispositifs autorisés peuvent communiquer et une trame ne peut pas être modifiée entre l'émetteur et le récepteur (Montagny 2022).

Comme vu au chapitre précédent, plusieurs facteurs d'étalements peuvent être choisis en fonction du besoin de puissance d'émission pour obtenir le meilleur équilibre entre portée du signal et consommation d'énergie. Il est possible de configurer manuellement le facteur d'étalement, toutefois c'est déconseillé, car son optimisation est influencée par les conditions météorologiques. C'est pourquoi LoRaWAN utilise l'algorithme Adaptive Data Rate (ADR) qui calcule la meilleure combinaison en fonction des paquets perdus, de certains paramètres radio<sup>8</sup> et communique aux dispositifs quels sont le facteur d'étalement et la puissance d'émission à employer (Montagny 2022, p. 66).

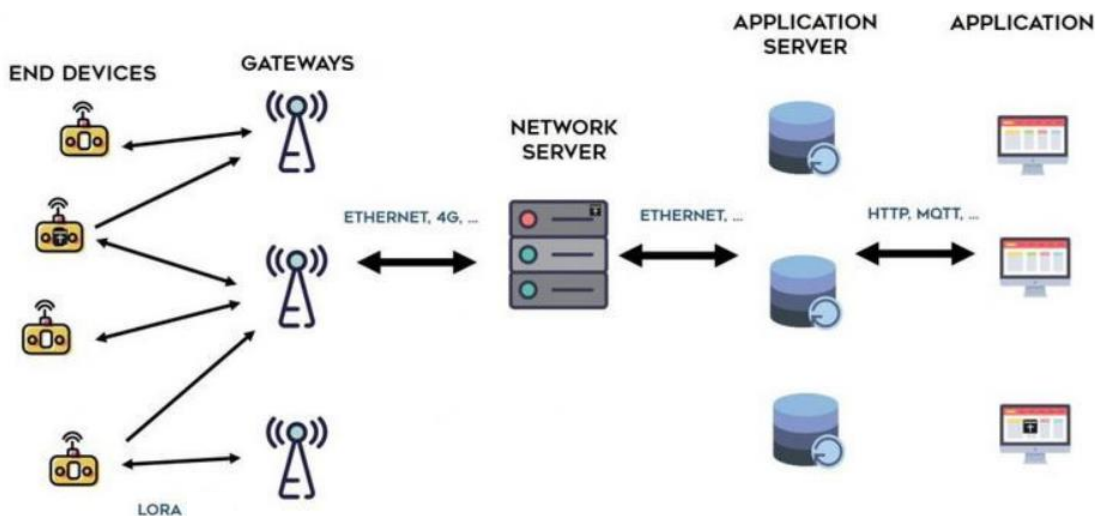
---

<sup>8</sup> Ces paramètres ne seront pas détaillés dans ce travail, car l'explication d'une transmission radio ne fait pas partie du champ d'application du projet

L'architecture du protocole LoRaWAN comprend quatre éléments (Rush 2021):

- Appareil LoRa (End Nodes, capteur, dispositif, device)  
Éléments sources du réseau généralement équipés de capteurs transmettant périodiquement des données à une passerelle grâce à leur émetteur LoRa.
- Passerelle (Gateway, concentrator)  
Transporteur de paquets entre les dispositifs et le réseau grâce à une transmission Internet.
- Serveur réseau (Network server)  
Gestionnaire des communications qui vérifie leur authenticité et les expédie vers le serveur d'applications adéquat.
- Serveur d'applications (Application server)  
Interpréteur des données et visualisation de celles-ci en décryptant les messages.

Figure 11 : Structure d'un réseau LoRaWAN



(Pecoraro 2017)

La représentation ci-dessus illustre la structure d'un réseau LoRaWAN. Comme toute antenne omnidirectionnelle, les transmetteurs LoRa envoient des paquets dans toutes les directions. Les passerelles ou la station de base LoRaWAN dotées d'antenne LoRa vont recevoir les paquets provenant d'un ou plusieurs émetteurs. Chaque passerelle est connectée au serveur réseau, ce qui leur permet de transférer les paquets par 4G, Wi-Fi ou autre, au serveur réseau. Après avoir vérifié l'authenticité des paquets et éliminé les doublons, le serveur réseau les transmet au serveur d'applications pour qu'il décrypte les messages et les interprètes (Pecoraro 2017).

Avec le protocole LoRaWAN, il existe 4 types d'adresses (Pecoraro 2017) :

- DevEUI : Identifiant unique du dispositif au format EUI-64<sup>9</sup>
- AppEUI/JoinEUI : Identifiant unique du serveur de jointure au format EUI-64
- GatewayEUI : Identifiant unique de la passerelle au format EUI-64
- DevAddr : Adresse du dispositif dans le réseau sur 32 bits

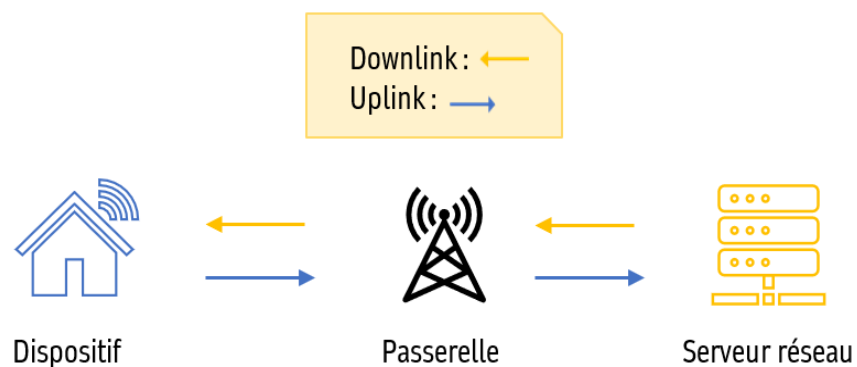
Voici un exemple d'identifiant au format EUI-64 : 00 04 A3 0B 00 1E 9D 38. Quant au DevAddr d'un dispositif, il ressemble à ceci : 26 0B AF D1.

### 3.2.1 Structure d'un paquet LoRaWAN

Il existe deux types de paquets avec le protocole LoRaWAN (Team Kereval 2021) :

- Messages d'appairage  
Les messages d'appairage (JoinRequest & JoinAccept) se font lors d'un ajout d'un nouveau dispositif au réseau.
- Messages de données  
Un message de données peut être de type liaison montante (uplink) ou liaison descendante (downlink) en fonction de sa destination dans le réseau. Un message envoyé à un serveur est montant et un message à destination d'un appareil est descendant comme le démontre la figure ci-dessous.

Figure 12 : Schéma downlink & uplink

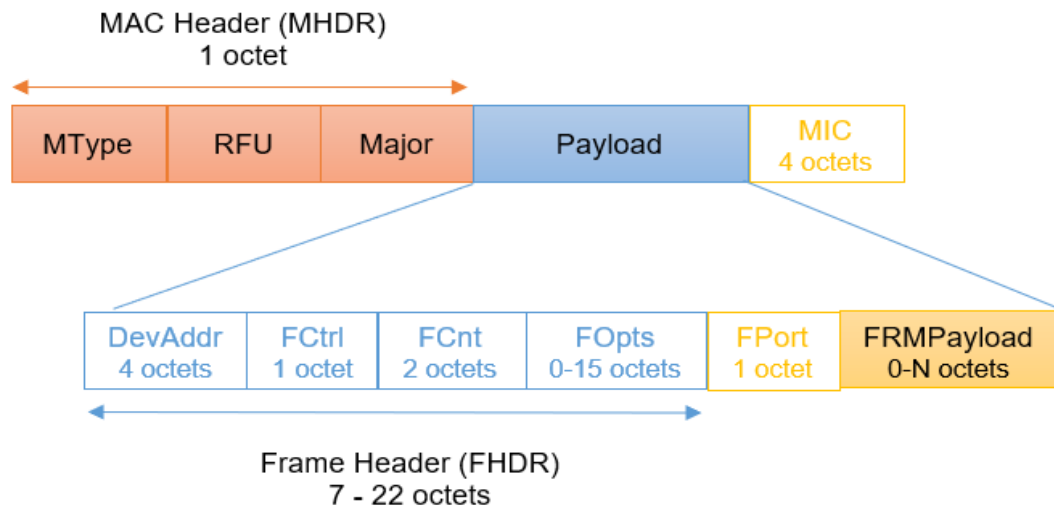


Réalisation personnelle

---

<sup>9</sup> EUI-64 est une adresse IPv6 unique basée sur l'adresse MAC de la carte réseau utilisée (So 2023).

Figure 13 : Structure d'un message de données LoRaWAN



(Adapté de : Team Kereval 2021)

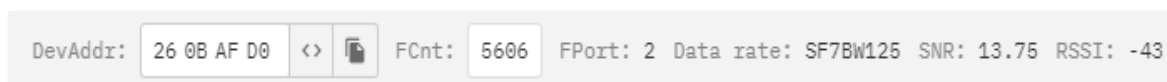
Comme l'illustre la figure ci-dessus, un paquet est composé d'un Header de 1 octet suivi d'un payload pouvant aller de 7 à 22 octets. La dernière partie de 4 octets est un chiffre d'intégrité prouvant l'authenticité du message. La définition des champs est effectuée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Définitions des champs d'un paquet LoRaWAN

Champs	Définitions
MType	Type du message (Uplink / Downlink)
RFU	Champ réservé pour un usage futur
Major	Version du protocole utilisé
DevAddr	Adresse du dispositif
FCtrl	Spécifie divers paramètres de contrôle de trame et la présence de champs optionnels
FCnt	Compteur de trames pour garantir la sécurité et l'intégrité des données du réseau en suivant l'ordre des trames.
FOpts	Permet de passer des commandes MAC
FPort	Port de destination
FRMPayload	Données cryptées
MIC	Contrôle d'intégrité

(Augustin et al. 2016)

Figure 14 : Exemple d'un paquet uplink



(The Things Network 2024a)

La figure ci-dessus est un exemple de paquet LoRaWAN. Comme nous pouvons l'observer sur la gauche, il y a l'adresse du dispositif (DevAddr) et le compteur de trames qui est à 5 606. Le paquet indique également le port de destination.

Dans cet exemple, le facteur d'étalement était de 7 et la largeur de bande de 125 kHz. En se basant sur les débits de données normalisés avec la fréquence EU868, ce paquet avait un débit de données DR 5 comme l'illustre le tableau ci-dessous.

Tableau 5 : Data Rate fréquence EU868

Débit de données	Facteur d'étalement	Largeur de bande
DR 0	SF12	125 kHz
DR 1	SF11	125 kHz
DR 2	SF10	125 kHz
DR 3	SF9	125 kHz
DR 4	SF8	125 kHz
DR 5	SF7	125 kHz
DR 6	SF7	250 kHz

(Montagny 2022, p. 66)

Les deux derniers éléments du paquet « SNR » et « RSSI » concerne la qualité du signal radio (The Things Network 2024b) :

- Le RSSI (Received Signal Strength Indication) est un chiffre en négatif mesuré en décibel par milliwatt<sup>10</sup> (dBm). Il correspond à la puissance du signal reçu sur la passerelle, plus il est proche de zéro, plus le signal est fort. Sa représentation est la suivante :  $RSSI \text{ (dBm)} = P_{\text{signal\_reçu}} \text{ (dBm)}$
- Le SNR (Signal over Noise Ratio) est la soustraction entre le RSSI et la puissance du bruit. Lorsque la différence est positive, cela signifie que la puissance du signal (RSSI) est supérieure au bruit et donc le signal peut être démodulé. Plus le RSSI est supérieur au bruit, plus la qualité de la

<sup>10</sup> Unité de mesure utilisé pour déterminer le nombre de décibel par rapport à 1 milliwatt, 0 dBm est égal à 1 mW (AccessAgility [sans date]).

communication sera élevée. La formule du SNR est la suivante :  $SNR (dB) = P_{\text{signal\_reçu}} (dBm) - P_{\text{bruit}} (dBm)$

LoRa est une technologie capable de démoduler des signaux qui ont une puissance inférieure au bruit de fond. Toutefois, il y a un SNR minimum requis qui diffère en fonction du facteur d'étalement comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6 : SNR minimum requis

Facteur d'étalement	LoRa Demodulator SNR
SF6	-5 dB
SF7	-7,5 dB
SF8	-10 dB
SF9	-12,5 dB
SF10	-15 dB
SF11	-17,5 dB
SF12	-20 dB

(The Things Network 2024b)

En prenant l'exemple du paquet de la figure n°14, le SNR était de 13,75 à un SF7. Le RSSI était à -43 dBm ce qui signifie que la puissance du bruit de fond se situait à -56,75. En consultant le tableau ci-dessus, nous observons que le SNR avait une puissance supérieure au minimum requis, mais également au bruit, car il est positif.

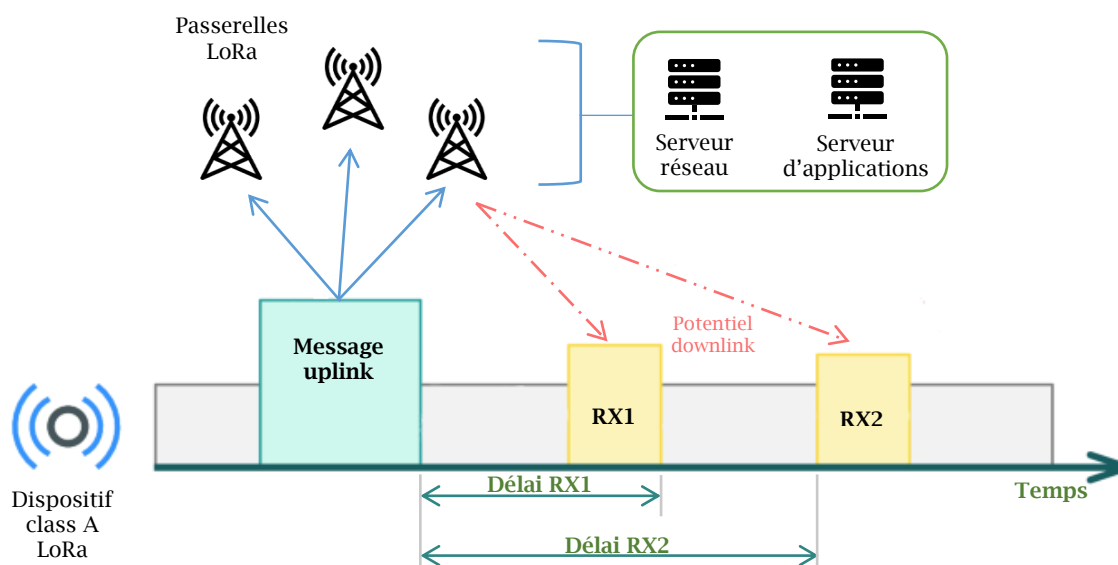
### 3.2.2 Classes de services MAC

Le protocole LoRaWAN fournit trois classes de services MAC :

- Classe A (All)
- Classe B (Beacon)
- Classe C (Continuous)

La classe A « All » doit être implémentée dans chaque dispositif, c'est le mode de fonctionnement de base. Ce service est un « low power mode », en d'autres termes il est peu coûteux en énergie, car la fenêtre d'écoute du réseau par le dispositif est très courte. Lorsque le périphérique envoie un message uplink, il a deux petites fenêtres d'écoute du réseau pour recevoir un message downlink, c'est une communication bidirectionnelle (Pecoraro 2017).

Figure 15 : Classe All



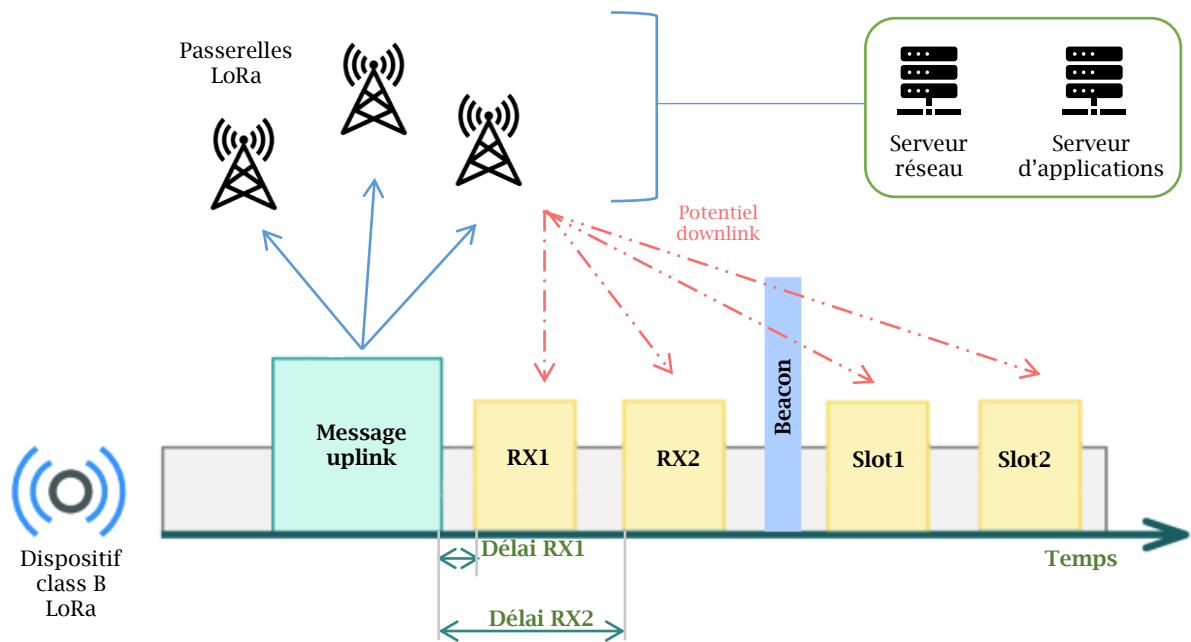
(Adapté de : Vishnevskiy et al. 2019, p. 19)

Ce schéma ci-dessus illustre le fonctionnement de la classe A de service MAC. Le dispositif transmet le message uplink aux passerelles qui, à leur tour, transmettent le message au serveur réseau. Il y a deux fenêtres d'écoute de messages downlink avec un délai entre elles. Si toutefois le serveur n'a pas pu communiquer son message downlink, il sera programmé directement après le prochain message uplink (The Things Network 2024c).

Quant à la classe B « Beacon », elle se base sur la classe A en ajoutant des fenêtres d'écoutes du réseau programmées. La planification entre le dispositif et la passerelle se fait à l'aide d'un beacon (The Things Network 2024c). Un beacon est une balise de synchronisation de 128 seconds envoyés de la passerelle permettant de synchroniser une période de réception entre les deux éléments. Elle synchronise l'horloge interne des dispositifs avec celui du réseau, permettant au serveur réseau de savoir quand transmettre des messages downlink (Joffe 2021).

Cette classe consomme davantage d'énergie que la classe A, mais a pour avantage d'avoir une plus faible latence pour les liaisons descendantes et ainsi d'améliorer la réactivité (The Things Network 2024c).

Figure 16 : Classe Beacon



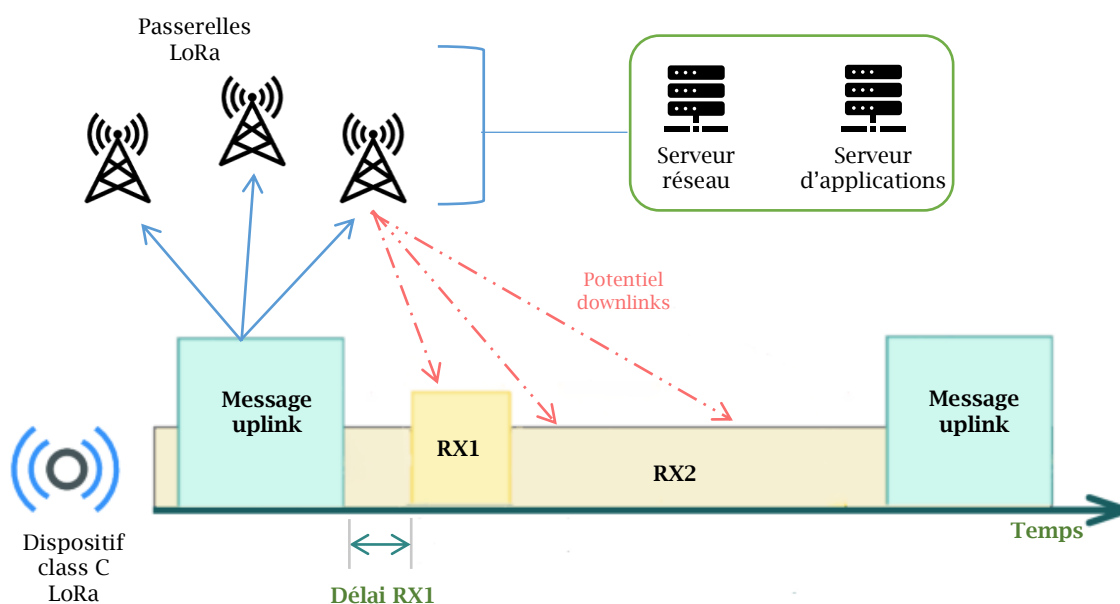
(Adapté de : Montagny 2022)

Sur ce schéma ci-dessus, les passerelles transmettent une balise de synchronisation aux dispositifs. Avec cette balise, une programmation d'un certain nombre de fenêtres d'écoute et leur fréquence jusqu'au prochain message uplink est déterminée. Soit deux slots sont définis dans ce cas-ci.

Et pour terminer, la classe C est en écoute continue du réseau ce qui peut être intéressant dans certains cas notamment avec les dispositifs qui n'ont pas de contraintes d'énergie et un besoin de réactivité maximal (par exemple, un système d'alarme).

Toutefois, avec cette classe de service MAC, le concept de Low Power Mode est écarté. Elle est adaptée pour des appareils qui n'ont pas un système d'alimentation par batterie. À la différence de la classe A, celle-ci permet de garder ouvertes les fenêtres d'écoute tant qu'il n'y a pas eu de message de liaisons montantes et ainsi garantir une très faible latence (The Things Network 2024c).

Figure 17 : Classe Continuous



(Adapté de : Montagny 2022)

Comme la classe A, la classe C a deux fenêtres de réception, RX1 et RX2. La différence réside dans la durée d'ouverture de la fenêtre RX2, elle s'ouvre brièvement pendant le délai d'ouverture de la fenêtre RX1 et quand celle-ci se ferme, elle reste ouverte en continu en attendant la prochaine communication de liaison montante. Tant qu'il y a une liaison descendante en cours, la prochaine liaison montante ne peut pas se faire (The Things Network 2024c).

Dans le cadre de ce projet, les appareils seront de classes A, car ils nécessitent d'avoir une durée de vie de la batterie maximisée par une basse consommation d'énergie et ils n'ont pas besoin d'avoir une faible latence de réception des messages downlinks, car ceux-ci seront peu nombreux.

### 3.2.3 Passerelle

Une passerelle permet de relever les données des capteurs disposés dans son périmètre d'écoute et de les transmettre au serveur. Elle va également transférer les messages de liaisons descendantes au dispositif adéquat. Il est nécessaire d'enregistrer la passerelle dans les paramètres du serveur pour qu'il reconnaisse celle-ci. La connexion entre la passerelle et le serveur peut se faire de plusieurs manières : liaisons cellulaires, WiFi, fibre optique, Ethernet, etc.

Il existe deux types de passerelles : celles pour l'intérieur et celles pour l'extérieur. La variété réside dans la portée de l'antenne qui est plus sensible en extérieur, afin de couvrir de vastes distances telles que des champs cultivés par exemple. De plus, les passerelles extérieures seront dans des boîtiers adaptés et résistants à tous types de

variations météorologiques (The Things Network 2024d). Dans ce projet, la passerelle sera pour l'intérieur, car elle ne possède pas de boîtier adapté pour l'extérieur.

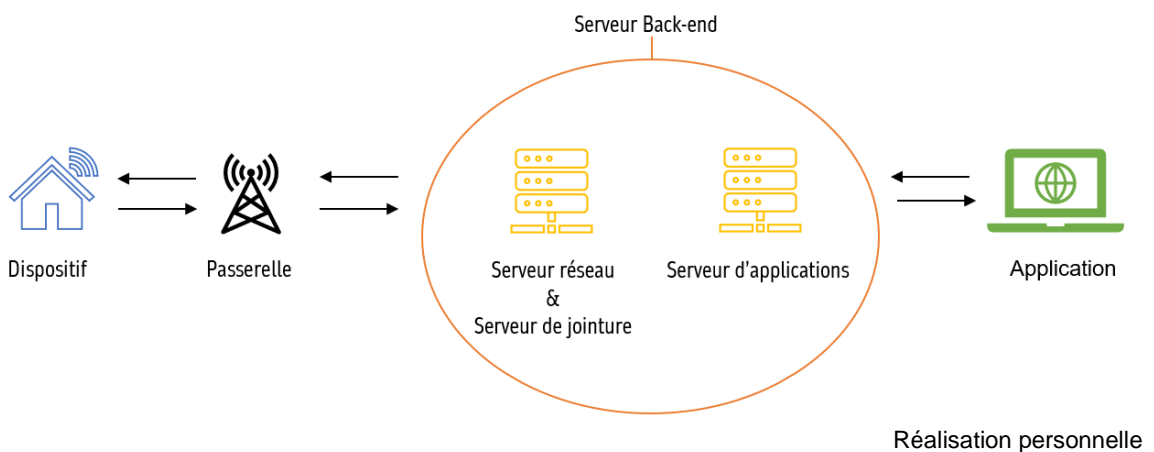
### 3.2.4 Serveur Back-end

Un serveur Back-end LoRaWAN est composé de trois éléments (The Things Network 2024d) :

- Serveur réseau – Network Server
- Serveur de jointure – Join Server
- Serveur d'applications – Application Server

Le serveur Back-end est le centre d'un réseau LoRaWAN et permet la communication entre un dispositif et un utilisateur souhaitant accéder à ses informations, comme illustré dans le schéma ci-dessous.

Figure 18 : Schéma serveur Back-end LoRaWAN



#### 3.2.4.1 Serveur réseau

Le serveur réseau, ou Network Server, a pour rôle de connaître et de gérer l'ensemble du réseau, y compris les dispositifs et les passerelles (The Things Network 2024d). De plus il est chargé de gérer l'authentification<sup>11</sup> des dispositifs afin de déterminer s'ils sont autorisés à communiquer avec le serveur d'application avec un système de clé de session. Grâce à cette clé, la communication interceptée par le serveur réseau peut être authentifiée et lorsque c'est le cas, transmise au serveur d'application et dans le cas contraire la communication est coupée (Montagny 2022).

<sup>11</sup> Cf. chapitre 3.2.6.

Ci-dessous, la liste des attributions techniques (The Things Network 2024d) :

- Connexion sécurisée pour transmettre des paquets entre les dispositifs et le serveur d'application
- Vérification de l'intégrité des paquets et l'identité de l'émetteur avec son adresse
- Acheminement des payload au serveur d'application
- Détermination de la passerelle adéquate pour transporter les messages de liaison descendante
- Suppression des doublons des liaisons montantes
- Envoi des commandes ADR permettant d'optimiser le débit de données des dispositifs
- Transfert des messages Join-Request et Join-Accept au serveur de jointure et aux dispositifs

#### **3.2.4.2 Serveur d'applications**

Le serveur d'application reçoit et traite les données contenues dans le payload d'un paquet. Il s'occupe d'envoyer les liaisons descentes concernant la couche d'application et les envois aux dispositifs qui sont connectés au serveur réseau. Dans un réseau LoRaWAN, il est permis de posséder plusieurs serveurs d'application (The Things Network 2024d).

Le serveur d'application a une autre fonction très importante : le chiffrement des données dans tout le réseau. Une fois le message reçu, il le déchiffre et le traite. Le serveur d'application possède une clé de session qui doit être présente dans les dispositifs pour crypter et déchiffrer les messages (Montagny 2022).

#### **3.2.4.3 Serveur de jointure**

Le serveur de jointure est en réalité un logiciel tournant sur le serveur réseau (Montagny 2022). Il améliore la sécurité de l'activation d'un nouveau dispositif. En effet, lorsque d'un dispositif rejoint le réseau, il envoie une demande de jointure (Join-Request) relayée par le serveur réseau. Ensuite le serveur de jointure traite la requête et crée de nouvelles clés de session qui seront transmises aux serveurs réseau et d'application respectivement (The Things Network 2024d).

#### **3.2.5 Types de réseau LoRaWAN**

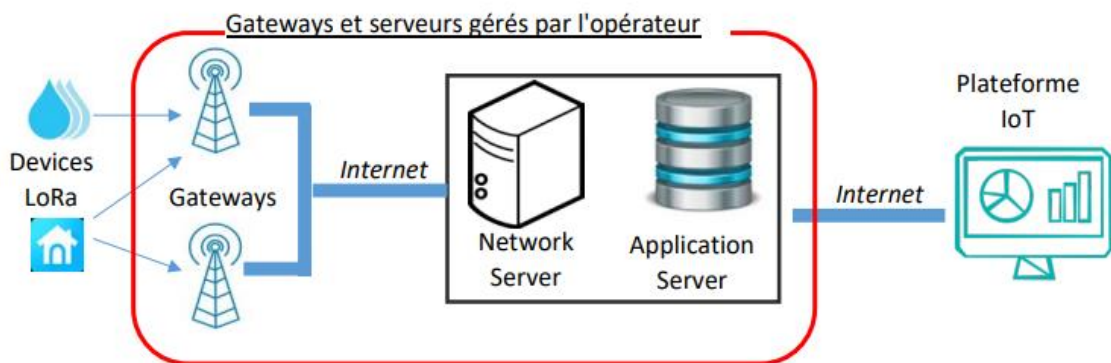
Dans les schémas de ce chapitre, le serveur de jointure n'est pas représenté clairement, mais il est compris avec le serveur réseau.

Avec le protocole LoRaWAN, il est possible d'avoir trois types de réseaux différents (Montagny 2022, p. 74) :

- Réseau d'opérateurs public
- Réseau privé
- Réseau hybride

Le réseau d'opérateurs publics, consiste à louer les services d'un opérateur qui va gérer le réseau dans son ensemble, comme l'illustre la figure ci-dessous. L'utilisateur doit souscrire un abonnement, acquérir des capteurs LoRa (devices), les connecter au réseau et gérer la partie application IoT avec les données collectées. L'opérateur propose une couverture nationale, ainsi que la maintenance et la sécurité nécessaire pour mener à bien le réseau (Montagny 2022, 74). En Suisse, Swisscom propose ce service.

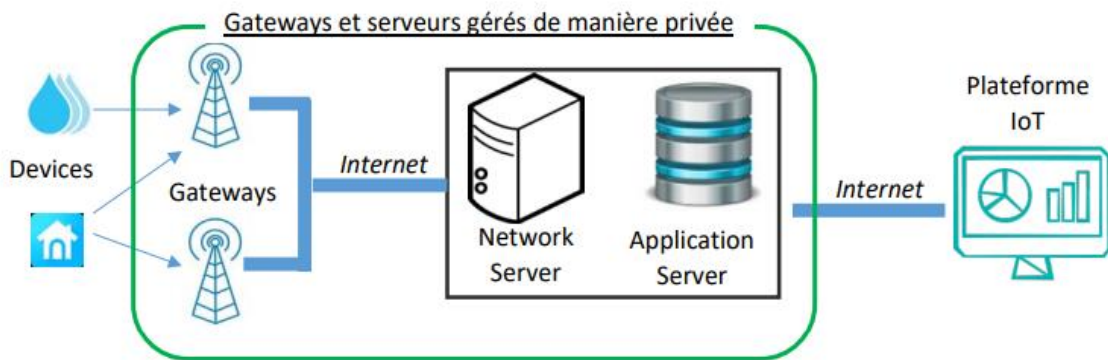
Figure 19 : Réseau LoRaWAN d'opérateurs publics



(Montagny 2022, p.74)

Quant au réseau privé, l'utilisateur est le concepteur et le gestionnaire de l'entièreté du réseau comme le montre l'image à la page suivante. Il doit acquérir en plus une ou des passerelles et avoir son infrastructure de serveurs. Créer un serveur LoRaWAN de bout en bout n'est pas donné à tous, c'est pourquoi il existe des logiciels payants à installer sur son serveur et ainsi bénéficier du service. Ce système nommé « licence sur site » ou « on premise » est proposé par plusieurs entreprises telles que Kerlink, ResIoT, The Think Industries, etc. Il faut néanmoins assurer la sécurité et la maintenance de son serveur (Montagny 2021, p. 75-76).

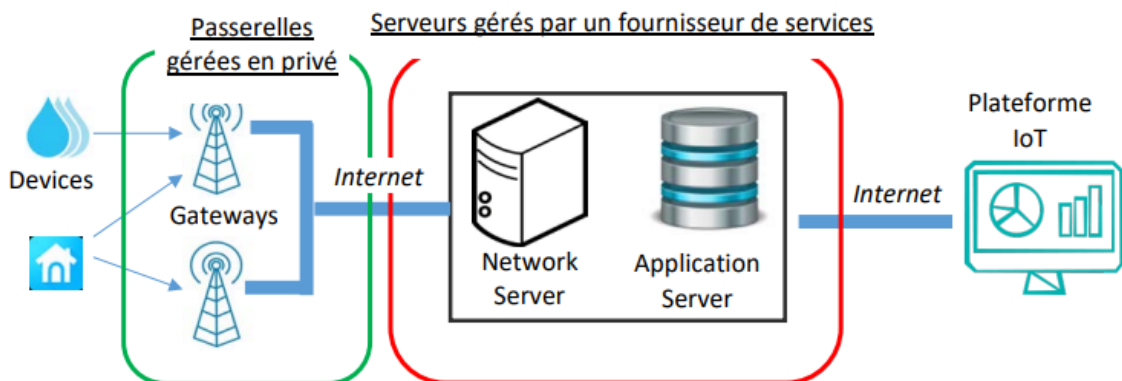
Figure 20 : Réseau LoRaWAN privé



(Montagny 2022, p.76)

Finalement, le réseau hybride est un mélange des deux autres types. Sur la figure ci-dessous, nous observons que les passerelles sont gérées par l'utilisateur et que l'infrastructure de serveurs est fournie par un opérateur. Pour externaliser la gestion des serveurs, il est possible d'utiliser certains services open source gratuits tels que The Thing Network ou Chirpstack, mais limité à un certain nombre de dispositifs ou de passerelles (Montagny 2022, p.77).

Figure 21 : Réseau LoRaWAN hybride



(Montagny 2022, p.77)

En définitive, chaque type est pertinent selon les envies et besoins de l'utilisateur, et présente des avantages et inconvénients. Dans les trois types, l'utilisateur doit s'occuper de l'activation des capteurs et de leur maintenance.

Le tableau ci-dessous compare les trois types de réseaux :

Tableau 7 : Types de réseaux LoRaWAN

	Réseau privé	Réseau public	Réseau hybride	
			Serveur payant	Serveur gratuit
Coût de l'abonnement	Pas d'abonnement	Abonnement payant	Abonnement payant	Abonnement gratuit
Coûts d'infrastructure	Passerelles + infrastructure des serveurs	Compris dans l'abonnement	Passerelles	Passerelles
Compétences requises	Compétence d'installation, gestion et de maintenance des passerelles serveurs et de l'application IoT	Compétence de gestion de l'application IoT	Compétences d'installation et gestion des passerelles et de l'application IoT	Compétences d'installation et gestion des passerelles et de l'application IoT
Couverture	Modelable en fonction des besoins	Dépend de l'opérateur	Modelable en fonction des besoins	Modelable en fonction des besoins
Uplink/downlink	Limité par la capacité d'émission	Dépend de l'offre	Dépend de l'offre	Limité

(Adapté de Montagny 2022, p.77)

Pour ce projet, le plus pertinent est la forme hybride. En effet, le réseau privé demanderait un temps important dédié à l'élaboration, la sécurisation et la gestion des serveurs, ce qui ne laisserait pas assez de temps à consacrer à la problématique principale. Quant au réseau public, cela laisserait peu de liberté de tester des technologies diverses, et moins de flexibilité pour choisir ce qui est le plus adapté. La version hybride permet d'avoir une liberté d'action, tout en ne gérant pas l'installation de l'infrastructure des serveurs. Un fournisseur de serveur avec abonnement gratuit suffit amplement pour couvrir le projet.

### 3.2.6 Authentification et sécurité

Le protocole LoRaWAN définit trois clés AES<sup>12</sup> (Pecoraro 2017) :

- Clé de session réseau (Network Session Key)
- Clé de session applicative (Application Session Key)
- Clé applicative ou clé racine (Application Key)

<sup>12</sup> AES : Advanced Encryption Standard, soit une norme de chiffrement avancé de 128 bit.

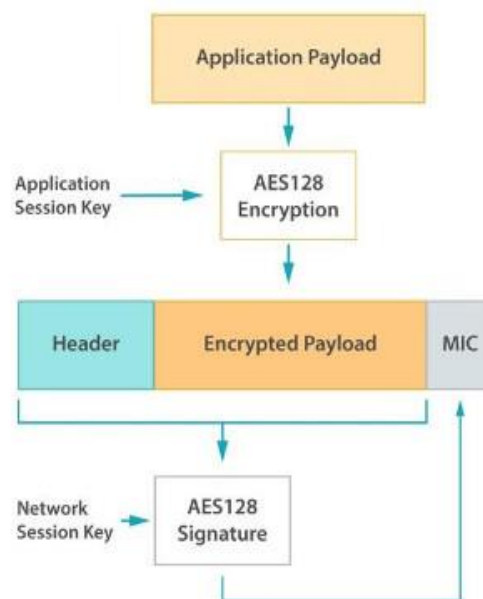
## Network Session Key (NwkSKey)

Une clé de session réseau permet l'intégrité des échanges entre un dispositif et le serveur réseau. Ceci grâce au Message Integrity Code (MIC) calculé à partir de la clé et en chiffrant la partie Header et le payload du paquet. Le MIC permet d'éviter les falsifications intentionnelles d'un paquet, à l'instar d'une somme de contrôle (The Things Network 2024e). Le MIC permet uniquement au serveur réseau de filtrer les paquets en étant sûr qu'ils proviennent des bons dispositifs avant de transmettre les données au serveur d'application (Team Kereval 2021).

## Application Session Key (AppSKey)

Une clé de session applicative est liée à un dispositif pour crypter et décrypter le payload d'un paquet. Le payload est alors crypté du dispositif jusqu'au serveur d'application. Ce qui signifie que même si le message est intercepté pendant l'envoi, ceci garantit une confidentialité, car il faut la clé pour le lire. Le serveur réseau n'a pas connaissance de cette clé (The Things Network 2024e).

Figure 22 : Schéma de cryptage



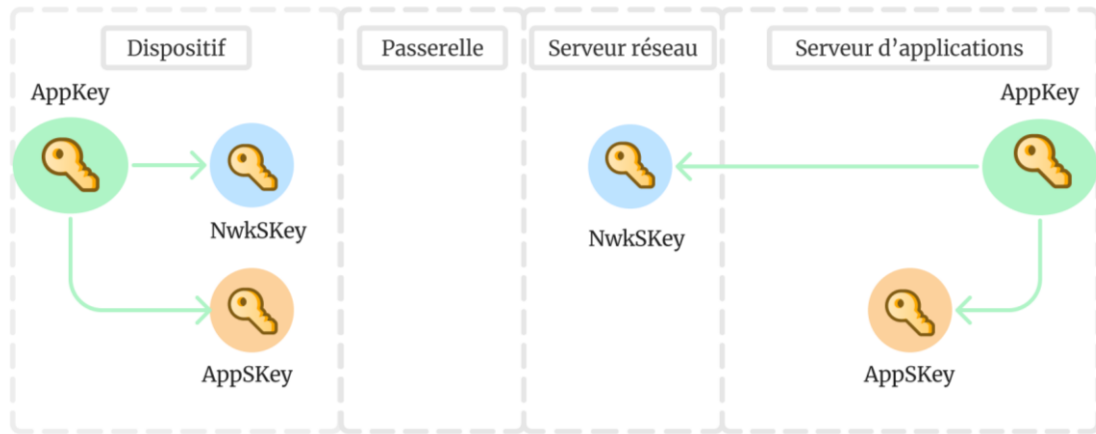
(Pecoraro 2017)

## Application Key (AppKey)

Une clé applicative ou clé racine est créée par le constructeur permettant de sécuriser la communication au moment de jointure entre le réseau et le dispositif. La clé applicative est utilisée pour générer la clé de session réseau (Network Session Key) et la clé de session d'application (Application Session Key).

Cette clé est seulement connue du dispositif et du serveur d'application, ce qui fait que l'opérateur réseau ne peut pas consulter les données (The Things Network 2024e).

Figure 23 : Répartition Clés AES



(Adapté de : Pecoraro 2017)

Comme illustré sur l'image ci-dessus, les deux clés de session sont générées lorsque que le dispositif rejoint le réseau à partir de la clé applicative (AppKey). La clé de session (NwkSKey) sera partagée au reste du réseau tandis que la clé de session applicative (AppSKey) est privée, et ce durant toute la durée de la session (The Things Network 2024e).

Étant un protocole radio, tout le monde peut intercepter les messages en écoutant la fréquence. Bien que ces messages soient encryptés, pas lisibles ni modifiables, il reste des problèmes de sécurité. En effet, une fois interceptés, ils peuvent être retransmis par l'attaquant en usurpant l'identité du dispositif (The Things Network 2024e)

C'est pourquoi LoRaWAN contre les attaques par rejeu (replay attack) à l'aide d'un compteur d'images (Frame Counter). Ce compteur est incrémenté à chaque transmission dans le réseau. Si la valeur du compteur est inférieure à celle prévue, les dispositifs et les passerelles rejettent les paquets (Pecoraro 2017).

Il y a deux types différents de compteur<sup>13</sup>, le compteur de liaison montante (FCntUp) et celui de liaison descendante (FCntDown). Ces valeurs se trouvent dans le compteur de trames (FCnt) du paquet LoRaWAN, en fonction du type de message. Par exemple, lorsqu'un dispositif est allumé, ses compteurs sont définis à 0, et quand l'appareil envoie un message de liaison montante, le FCntUp se voit incrémenté de 1. S'il reçoit un

<sup>13</sup> Cf. chapitre 3.2.1.

message de liaison descendante, le FCntDown est également incrémenté de 1. Ainsi, le compteur inscrit dans le champ FCnt dépend de la direction du paquet dans le réseau et permet d'éviter qu'un attaquant transmette un paquet précédent avec un compteur inférieur (The Things Network 2024e).

### **3.2.7 Qualité de service**

Pour assurer le plus possible une qualité de service, le protocole LoRaWAN permet à un paquet montant ou descendant de demander un accusé de réception. Si la réception est confirmée, le paquet suivant devra avoir un champ ACK à 1 dans le champ FCtrl. Si elle n'est pas confirmée, le paquet peut être retransmis à l'identique pour une liaison montante (le champ FCntUp ne sera alors pas incrémenté). Cependant, cela n'est pas possible avec un paquet descendant (Team Kereval 2021).

### **3.2.8 Activation d'un dispositif dans le réseau**

Il y a deux types d'établissement d'une session pour un dispositif : le système Over The Air Activation (OTAA) et Activation By Personnalisation (ABP) (The Things Network 2024f). Ces deux types seront expliqués dans les chapitres suivants.

#### **3.2.8.1 Over The Air Activation**

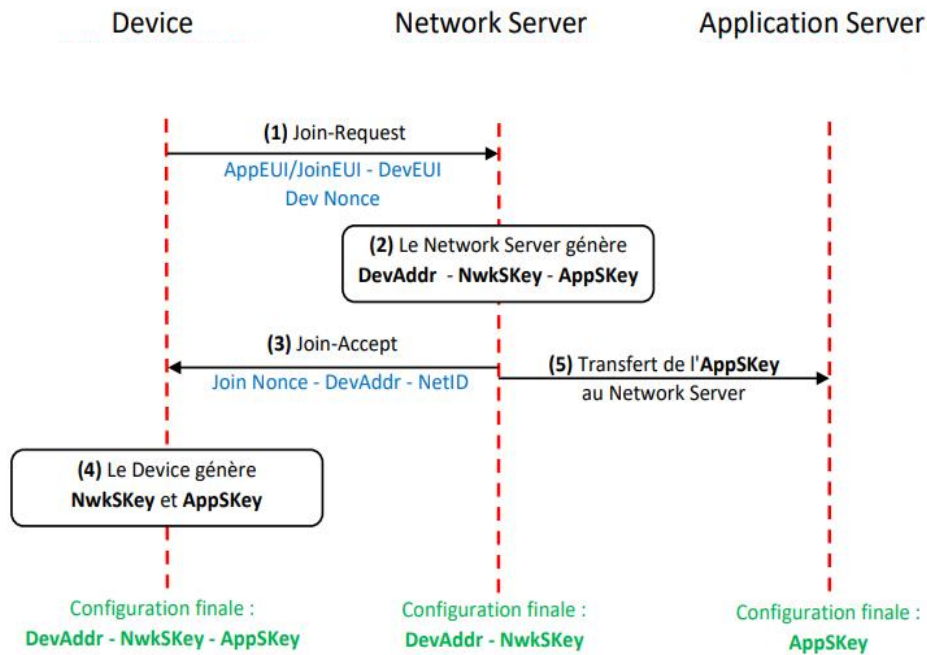
Cette section détaille le système Over The Air Activation (OTAA) correspondant aux versions LoRaWAN 1.0.x, car le projet utilise la version LoRaWAN 1.0.3. Les versions 1.0.x étant moins avancées que celles 1.1.x, le serveur de jointure n'apparaît pas dans la procédure de jointure, cela se fait directement depuis le serveur réseau.

Le système de jointure OTAA est plus sécurisé que le système Activation By Personnalisation (ABP). En effet, lors d'un appairage OTAA, les clés de sessions ne sont pas stockées manuellement, mais calculées à partir d'autres éléments développés dans ce sous-chapitre. Avant de débiter la procédure de jointure, le dispositif et le serveur devront connaître l'identifiant du dispositif (DevEUI), l'identifiant du serveur de jointure (AppEUI), et la clé d'activation (AppKey). L'AppKey n'est jamais transmise sur le réseau, elle doit être inscrite dans le dispositif et dans le serveur d'applications. L'AppEUI et le DevEUI sont envoyés sur le réseau (The Things Network 2024f).

Cette session a deux étapes d'échange dans le réseau (The Things Network 2024f) :

- Demande de jointure (JoinRequest) du dispositif au serveur réseau
- Acceptation de jointure (JoinAccept) du serveur réseau au dispositif

Figure 24 : Configuration initiale & finale OTAA



(Montagny 2022, p. 53)

La procédure de jointure présentée dans la figure ci-dessus, se fait comme suit (The Things Network 2024f) :

**Étape 1 :** Le dispositif (Device) envoie un message de demande de jointure (Join-Request) non crypté au serveur réseau. Ce message contient les champs suivants : l'identifiant du serveur de jointure (AppEUI), l'identifiant du dispositif (DevEUI) et un compteur (DevNonce). DevNonce est un compteur incrémenté à chaque demande de jointure pour assurer un suivi et contrer les attaques par rejeux. Si le DevNonce du message a déjà été utilisé, alors le serveur réseau rejette la demande de jointure. Pour plus de sécurité, un code d'intégrité de message (MIC) est calculé sur l'ensemble des champs à l'aide de l'AppKey.

**Étape 2 :** Le serveur réseau génère les clés de sessions<sup>14</sup>.

**Étape 3 :** Le serveur réseau envoie un message d'acceptation de jointure (Join-Accept) contenant l'identifiant du réseau (NetID), l'adresse du dispositif (DevAddr) et un identifiant (JoinNonce/AppNonce) pour que le dispositif dérive les clés de sessions. Un code d'intégrité de message (MIC) est également calculé sur tous les champs à l'aide de l'AppKey. Le message d'acceptation est chiffré avec l'AppKey.

<sup>14</sup> Cf. chapitre 3.2.6.

**Étape 4** : Le serveur conserve la clé de session réseau (NwkSKey) et transmet la clé de session applicative (AppSKey) au serveur d'applications.

**Étape 5** : Le dispositif décrypte le message et dérive de l'AppKey et de l'AppNonce la clé de session réseau (NwkSKey) et la clé de session applicative (AppSKey). Le dispositif est dorénavant actif sur le réseau.

### 3.2.8.2 Activation By Personnalisation

Le système ABB est bien plus simple, il suffit d'entrer de manière statique l'adresse du dispositif (DevAddr), la clé de session réseau (Network Session Key) et la clé de session applicative (Application Session Key) dans le dispositif ainsi que dans le serveur réseau et le serveur d'applications. Une fois cela réalisé, l'appareil peut rejoindre le réseau (Montagny 2022, p. 49).

L'inconvénient de cette méthode est que, d'une part, les clés ne changent pas, cela augmente les risques de vol par force brute. D'autre part, cela complique un changement de réseau où toutes les adresses devront être ressaisies, avec le risque que l'ancien fournisseur s'il n'a pas supprimé les anciennes clés et adresses puisse continuer d'écouter le réseau (Montagny 2022, p. 55).

## 3.3 The Things Network

Ce chapitre justifie le choix du fournisseur de serveur réseau et détaille son fonctionnement.

### 3.3.1 Justification du choix

Pour mettre en place un réseau hybride LoRaWAN, il faut choisir un fournisseur de serveur réseau et d'application sécurisé, gratuit et proposant les services nécessaires. Actuellement il existe plusieurs options, dont trois plus connus : LORIENT, The Things Network et Chirpstack.

Selon les informations des sites officiels de LORIENT, Chirpstack, et The Things Network, voici un tableau comparatif résumé des trois fournisseurs :

Tableau 8 : Comparatifs de fournisseurs de serveurs réseau LoRaWAN

	<b>ChirpStack</b>	<b>The Things Network</b>	<b>LORIENT</b>
Licence	Open source	Open source	Propriétaire
Hébergement	Cloud ou autohébergement	Cloud ou autohébergement	Cloud ou autohébergement

Flexibilité	Haute, avec personnalisation et contrôle complets	Haute, mais avec une approche plus guidée de la conception du réseau et des options	Haute, avec personnalisation d'options possible
Support de classe	Classes A, B, C supportées	Principalement Classe A, avec support potentiel des Classes B et C	Information introuvable
API et transmission de données	gRPC et REST, avec support MQTT pour transmission des données	API simplifiée et MQTT pour transmission des données	REST API, MQTT
Communauté et support	Forum de la communauté, support commercial disponible	Large communauté, forum actif, événements et conférences	Support professionnel, forums moins actifs
Configuration et mise en place	Demande des connaissances pour l'hébergement des serveurs	Interface utilisateur intuitive et guidée	Interface utilisateur intuitive, options avancées disponibles
Utilisation	Convient mieux pour les utilisateurs avancés cherchant le contrôle	Convient pour tous, particulièrement accueillant pour les débutants grâce à la conception guidée	Convient pour des déploiements professionnels et à grande échelle

(ChirpStack [sans date]; The Things Network 2024g; LORIIOT [sans date])

Les éléments colorés en vert sont ceux qui ont démarqué The Things Network par rapport aux deux autres fournisseurs. En effet, ce projet est un prototype et une nouvelle

technologie destinée à des utilisateurs lambda. Plus le système est facilement compréhensible et guidé mieux ce sera. LORIoT par exemple est plus axé pour les développements professionnels à grande échelle, et peut être vu comme un fournisseur intéressant pour un déploiement professionnel futur de ce prototype.

De plus, le dispositif utilisé dans ce projet a déjà des configurations de bases pour interagir avec The Things Network, ainsi qu'un guide pour établir la connexion.

### 3.3.2 Fonctionnement

Nous allons à présent expliquer le fonctionnement de ce fournisseur, ce qui constitue une partie essentielle du prototype.

The Things Network (TTN) est un service proposé par The Things Industries, assurant la partie serveur d'un réseau LoRaWAN.

*« Nous sommes un écosystème mondial collaboratif de l'Internet des objets qui crée des réseaux, des appareils et des solutions en utilisant LoRaWAN®. »*

(Traduit de l'anglais de : The Things Network 2024g)

The Things Network est un service communautaire qui met à disposition un ensemble d'outils et un réseau mondial ouvert pour construire son réseau sécurisé IoT à faible coût avec une capacité d'évolution du réseau. Ce service utilise The Things Stack, un serveur réseau LoRaWAN développé par The Things Industries. Ce serveur réseau gère les passerelles, applications et dispositifs connectés au serveur (The Things Network 2024g).

Avec The Things Stack, il existe deux protocoles pour gérer ses passerelles (The Things Industries 2024) :

- The Semtech UDP Packet Forwarder
- The LoRa Basics™ Station

Semtech UDP Packet Forwarder est le transmetteur de paquets original développé par Semtech. Il emploie le protocole UDP pour connecter les passerelles aux serveurs. Toutefois, le site officiel de The Things Stack met en garde l'utilisation de ce système. Bien que plus facile à mettre en place, il présente des inconvénients en sécurité et de capacité à monter en charge. Il peut être vulnérable aux attaques et rencontre des difficultés pour gérer un grand nombre de passerelles. Le site recommande d'utiliser LoRa Basics™ Station (The Things Industries 2024) et c'est ce protocole qui sera utilisé dans ce travail. Le LoRa Basics™ Station protocole gère de manière centralisée la connexion des passerelles au serveur réseau (The Things Stack).

Il comporte plusieurs avantages tels que (The Things Industries 2024) :

- Gestion centralisée des configurations et mises à jour des passerelles
- Authentification pour sécuriser les échanges entre les passerelles et le serveur réseau
- Gestion centralisée des canaux de communications
- Indépendance de la synchronisation du temps de tous les dispositifs

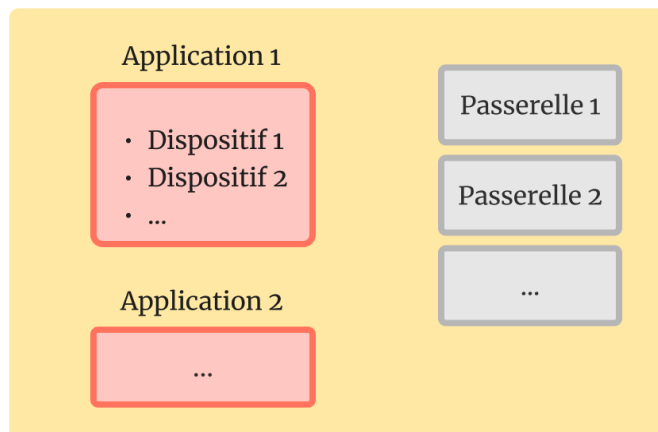
Pour assurer ce service, The Things Stack emploie deux sous-protocoles, le serveur réseau LoRaWAN (LNS) et le serveur de configuration et de mise à jour (CUPS) :

- Le serveur réseau LoRaWAN (LNS) connecte les passerelles à The Things Stack, il est essentiel pour garantir le transfert de données
- Le serveur de configuration et de mise à jour (CUPS) permet au serveur réseau de paramétrer et de mettre à jour le LNS sur des passerelles à distance. Il n'est pas obligatoire de l'utiliser, mais il est recommandé de le faire pour simplifier la gestion des passerelles.

L'architecture de The Things Network possède deux parties distinctes comme sur le schéma ci-contre. D'un côté, il y a la possibilité d'enregistrer des passerelles sur la plateforme et de l'autre, de créer des applications qui contiennent des dispositifs. Les passerelles ne sont pas liées aux applications et vice versa.

Figure 25 : Schéma d'un environnement The Things Network

Environnement The Things Network d'un utilisateur



(Adapté de : The Things Network 2024a)

De plus, The Things Network facilite l'intégration de protocole de messagerie, tel que Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Webhooks et Hypertext Transfer Protocol (HTTP) au réseau LoRaWAN pour récupérer les données du serveur et les traiter.

## 4. Prototype « Smlrrig »

Ce projet porte sur l'élaboration d'un prototype permettant d'atteindre les objectifs définis et d'employer les différentes technologies développées dans le chapitre précédent. Ce prototype est un système d'arrosage intelligent permettant d'irriguer les jardins privatifs de manière pertinente et efficace, avec un coût de déploiement accessible. Il a pour nom « Smlrrig » qui est la concaténation de « Smart » et « Irrigation » ceci dans le but de donner une identification générale pour chaque composant et faciliter la communication sur ce projet.

La justification des différents choix sur les technologies nécessaires à la conception du projet est abordée dans ce chapitre également.

### 4.1 Fonction de service et de contraintes

Dans ce sous-chapitre, les fonctions et les contraintes du prototype développé seront définies.

Ce projet comporte une solution avec plusieurs fonctionnalités :

- Arrosage automatisé en fonction de différents critères, tels que la météo, l'hygrométrie et la température
- Commande de lancement/d'arrêt du système à distance
- Consultation possible des données
- Transmission d'alertes prévenant de l'état du système
- Rapports sur la prise d'initiative d'arroser
- Système sécurisé contre les intrusions ou interception d'informations
- Système de fermeture de l'accès à l'eau en cas d'arrêt du système forcé

#### 4.1.1 Critères d'appréciation

Le tableau ci-dessous regroupe les critères de pertinences du projet ainsi que leur importance.

Tableau 9 : Critères d'appréciation du projet

Critères d'appréciation	Descriptions	Niveaux
Arrosage justifié	La prise d'initiative d'arroser était nécessaire	Très haut
Respect des besoins des plantes	Les plantes reçoivent la quantité d'eau nécessaire	Très haut
Technologies fiables	Les technologies utilisées devront être fiables et fonctionnelles	Très haut

Consultations des données collectées accessibles	Les données récoltées devront être accessibles et claires	Très haut
Interaction du système avec son utilisateur pertinent	Le système devra transmettre des alertes sur son état ainsi que des informations pertinentes et personnalisées	Haut

## 4.1.2 Critères de conceptions globales

### Contraintes techniques

L'IoT utilise des technologies de pointe, variées et complexes. Le système doit pouvoir être intégré dans son ensemble pour faciliter le déploiement. De plus, les différents composants doivent être compatibles entre eux. L'évolution du système doit pouvoir se faire facilement, au fur et à mesure des besoins et la technologie de communication doit avoir une longue portée, notamment pour une utilisation agricole future.

### Contraintes environnementales

Les appareils doivent être résistants aux conditions météorologiques, parfois très dures. Ils peuvent être soumis à des vents forts, des intempéries ou une forte exposition aux UV. La technologie de communication entre les appareils doit être stable et adaptée pour une utilisation en extérieur. De plus, les appareils doivent être alimentés par batterie car ils sont installés en extérieur.

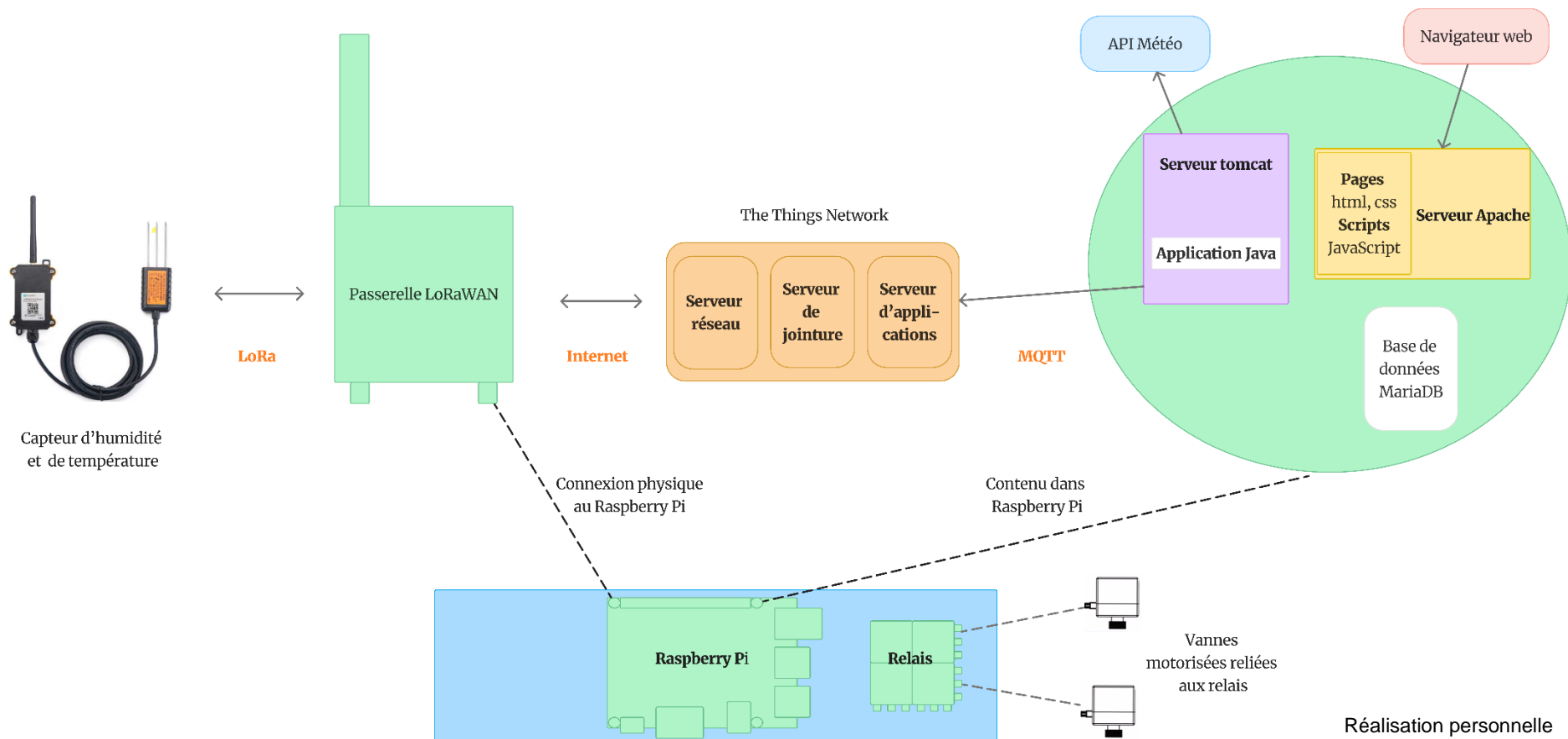
### Contraintes de coûts

Étant donné que les appareils doivent être résistants et fiables, cela peut représenter un investissement plus important dans un premier temps, mais qui sera compensé par un gain de productivité et/ou d'économie d'énergie. Pour les particuliers, le coût total doit rester accessible, mais sans négliger la fiabilité du système, le cas échéant, l'amélioration de la productivité ne sera pas optimale.

## 4.2 Architecture du système

Voici l'architecture du prototype vu dans son ensemble. Les étapes de conception et le contenu de chaque partie seront détaillés dans le prochain chapitre.

Figure 26 : Architecture du système Smlrigg



## 4.3 Étapes de réalisation

### 4.3.1 Préparation du serveur réseau LoRaWAN sur The Things Network

Pour cette étape de réalisation, nous avons besoin d'utiliser la plateforme The Things Network dans la section « Serveur réseau & d'applications LoRaWAN » de l'Annexe 1.

En premier lieu, il faut créer un compte sur The Things Network en sélectionnant la version gratuite « Community Edition », et suivre les étapes demandées.

En second lieu, nous avons besoin de créer une application ainsi que son identifiant unique qui contiendra les futures informations du capteur.

### 4.3.2 Préparation de la passerelle LoRa

Pour réaliser cette étape, les éléments du bloc « Passerelle LoRaWAN » de l'Annexe 1 sont nécessaires. La préparation de la passerelle LoRaWAN débute par un montage hardware afin de connecter les différents composants et ensuite de mettre en place la partie software pour qu'ils interagissent entre eux.

#### 4.3.2.1 Montage hardware

La passerelle LoRaWAN se compose d'un Raspberry Pi 3B+ auquel vient s'ajouter une carte de conversion pour fixer le concentrateur LoRaWAN ainsi qu'une antenne LoRa.

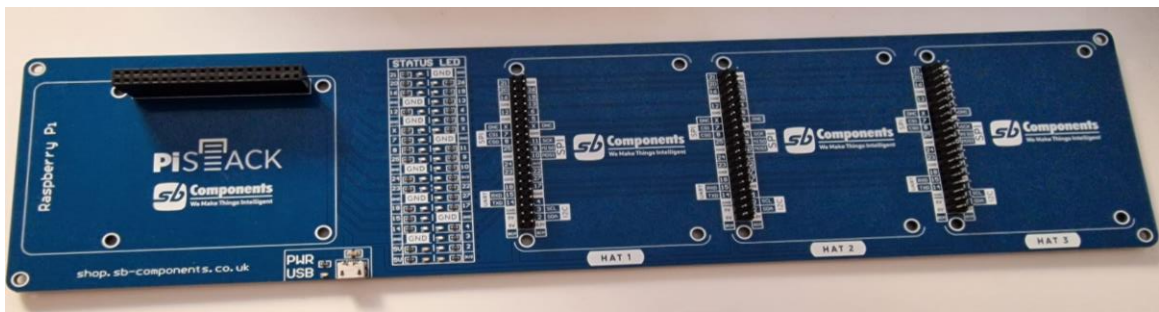
Figure 27 : Concentrateur LoRa



(Photo personnelle)

Le concentrateur LoRa (1) vient se fixer sur la carte de conversion (2), et l'antenne se branche sur le concentrateur (3) comme sur l'image ci-dessus.

Figure 28 : PiStack



(Photo personnelle)

Le Raspberry Pi et le concentrateur viennent ensuite s'ajouter à une carte (Stack Hat) comme sur la figure ci-dessous, qui permet de connecter des modules au Raspberry Pi avec une connexion GPIO tout en ayant un accès et une manipulation accessible.

#### 4.3.2.2 Montage software

##### 4.3.2.2.1 Configuration de base du Raspberry

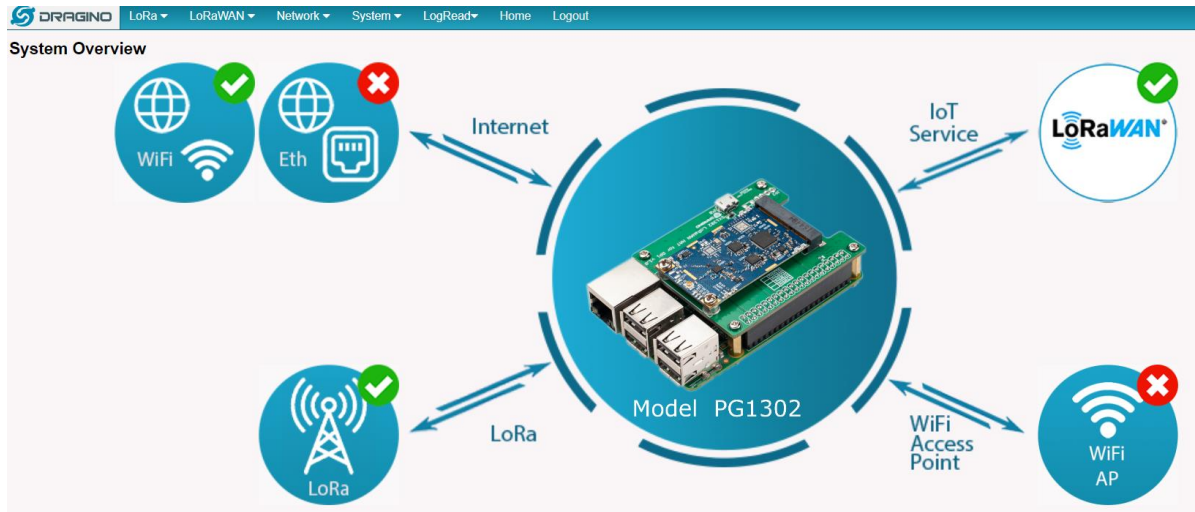
Tout d'abord, comme pour l'utilisation de n'importe quel Raspberry Pi, il est nécessaire de « flasher » une microcarte SD, autrement dit, d'y installer un système d'exploitation. Pour ce projet, nous allons flasher directement avec une image fournie par Dragino, le concepteur du concentrateur LoRa. Les étapes de réalisation de la passerelle suivent un guide de l'entreprise pour déployer le concentrateur (Xiaoye 2024). Une fois le fichier *img* récupéré avec le lien dans le guide de Dragino, nous pouvons flasher la carte à l'aide d'un logiciel de type Raspberry Pi Imager ou bien Win32DiskImager.

Lorsque le Raspberry Pi a démarré, nous pouvons réaliser les configurations de base : la configuration Wi-Fi, Ethernet, l'heure, les mises à jour, le compte utilisateur, et l'activation SSH et VNC pour l'accès à distance. Pour simplifier les futures opérations, l'adresse IP est configurée en statique.

#### 4.3.2.2 Configuration de la passerelle

Maintenant que les configurations de base ont été effectuées, cette étape consiste à configurer les paramètres LoRa. Dragino fournit un accès à une Interface web (voir figure ci-dessous) en saisissant l'adresse IP dans un navigateur web et les éléments de connexion.

Figure 29 : web UI de la passerelle



(Capture du web UI de la passerelle)

Nous pouvons observer différents onglets. Dans LoRa, nous pouvons consulter les paramètres actuels comme la fréquence, ou les données GPS, par exemple. Par défaut la fréquence pour l'Europe est déjà configurée. Ce que nous devons configurer ce sont les paramètres LoRaWAN, mais cela nécessite d'abord certaines actions du côté du serveur réseau.

#### 4.3.3 Communication du serveur réseau avec la passerelle LoRa

Dans cette étape, il s'agit de créer le lien entre notre passerelle LoRa et le serveur réseau sur The Things Network. Pour cela, nous devons enregistrer une nouvelle passerelle sur The Things Network en inscrivant l'identifiant unique de notre passerelle (Gateway EUI) et un identifiant unique pour le serveur.

Pour récupérer les données de la passerelle enregistrée sur le serveur réseau, il est nécessaire de créer une LoRa Basics™ Station<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Cf. chapitre 3.3.2.

Pour ce faire, il faut créer deux clés API pour la passerelle dans la console The Things Network : le serveur de configuration et mise à jour (CUPS) et le serveur réseau LoRaWAN (LNS).

Figure 30 : Création clé API CUPS

Gateways > Smlrrig\_Gateway > API keys > Add

### Add API key

Name  
CUPS

Expiry date  
jj.mm.aaaa

Rights\*

Grant all current and future rights

Grant individual rights

Select all

- Delete gateway
- View gateway information
- Link as Gateway to a Gateway Server for traffic exchange, i.e. write uplink and read downlink
- View gateway location
- Retrieve secrets associated with a gateway
- View and edit gateway API keys
- Edit basic gateway settings
- View and edit gateway collaborators
- View gateway status
- Write downlink gateway traffic
- Read gateway traffic
- Store secrets for a gateway

Create API key

(The Things Network 2024a)

La capture ci-dessus montre le paramétrage de la clé CUPS. Ces options ont été choisies, car elles constituent le rôle de cette clé API. Afin de mettre à jour la connexion LNS sur la passerelle, la clé CUPS doit avoir le droit de (The Things Industries 2024) :

- Voir les informations de la passerelle (View gateway information)
- Récupérer les secrets associés à la passerelle (Retrieve secrets associated with a gateway)
- Modifier les paramètres de bases de la passerelle (Edit basic gateway settings)

Ces droits permettront au serveur CUPS de configurer le serveur LNS sur la passerelle à distance. Seuls les droits cités doivent être cochés lors de la création de la clé comme sur la figure n°30. Lorsque la clé est générée, elle doit être stockée dans un lieu sûr (The Things Industries 2024).

La clé LNS se configure également sur dans la console The Things Network en sélectionnant un seul droit (The Things Industries 2024) :

- Lien pour échange de trafic, c'est-à-dire écrire une liaison montante et descendante (Link as Gateway to a Gateway Server for traffic exchange, i.e write uplink and read downlink)

La clé LNS doit être saisie dans les paramètres généraux de la passerelle dans la console de gestion The Things Network. La configuration côté serveur réseau est terminée, nous pouvons passer du côté de la passerelle.

Pour connecter la passerelle au serveur réseau, il est nécessaire de configurer les paramètres LoRaWAN dans le web UI de la passerelle.

Figure 31 : Configuration de LoRa Basics™ Station dans la passerelle

The screenshot shows the configuration page for a LoRaWAN Basic Station. The 'General Settings' section includes an 'Email' field with the value 'dragino-63920a@dragino.com' and a 'Gateway ID' field with the value 'a84' followed by a redacted area. A 'Restore ?' button with a 'Restore\_Configuration' label is located to the right of the Gateway ID field. The 'Primary LoRaWAN Server' section includes a 'Service Provider' dropdown menu set to 'The Things Network -- Basic Station', a 'Server URI' field with the value 'https://eu1.cloud.thethings.network:443', a 'Sever CUPS' field with the value 'NN' followed by a redacted area, and a 'CUPS trust' field with the value 'cups.trust'. A 'DEFAULT\_CERTIFICATE' button is located to the right of the CUPS trust field. At the bottom of the page are 'Save&Apply' and 'Cancel' buttons.

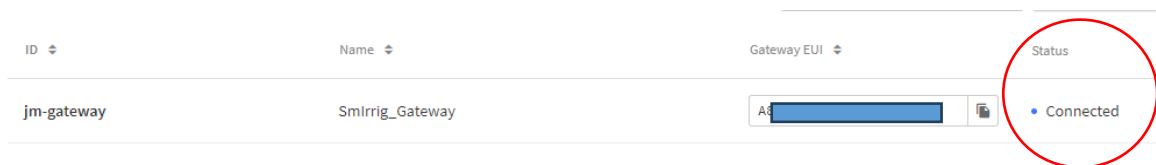
Capture du web UI de la passerelle

Sur la figure ci-dessus, nous avons la configuration nécessaire pour déployer une LoRa Basics™ Station. Il est important de modifier l'identifiant de la passerelle (Gateway ID) encadré en rouge sur la figure. L'identifiant de la passerelle se trouve dans les fichiers du Raspberry PI (*/etc/lora/local\_conf.json*).

Pour que le serveur de configuration et mise à jour (CUPS) puisse configurer le serveur réseau LoRaWAN (LNS), la clé API CUPS créée précédemment et un certificat d'une autorité de certification (CUPS trust) doivent être saisis. Après la sauvegarde et l'application de ces informations, la connexion est établie entre la passerelle et le serveur réseau.

La connexion peut être vérifiée en consultant la console de gestion de The Things Network. La passerelle apparaît avec le statut « Connected ».

Figure 32 : Création passerelle




ID ↕	Name ↕	Gateway EUI ↕	Status
jm-gateway	Smlrrig_Gateway	As [redacted]	• Connected

(The Things Network 2024a)

En sélectionnant la passerelle, nous arrivons sur un menu, présenté dans la figure à la page suivante, contenant les données relayées en temps réel, la localisation, les potentiels collaborateurs, les clés API et les paramètres généraux. Le nombre de liaisons montantes et descendantes est visible (encadré en rouge) ainsi que la fréquence utilisée.

Figure 33 : Menu de gestion de la passerelle depuis TTN

Smlrrig\_Gateway > Gateways

**Smlrrig\_Gateway**  
ID: jm-gateway

↑ 467 ↓ 14 • Last activity 50 seconds ago ⓘ

1 Collaborator 2 API keys

### General information

Gateway ID	jm-gateway
Gateway EUI	A8 [redacted]
Gateway description	None
Created at	Jul 4, 2022 14:30:04
Last updated at	Apr 15, 2024 11:31:11
Gateway Server address	eu1.cloud.thethings.network

### LoRaWAN information

Frequency plan	EU_863_870_TTN
Global configuration	<a href="#">Download global_conf.json</a>


### Live data

See all activity →

↑ 19:16:29	Receive uplink message	DevAddr: 26 0B AF D0	<>	FCnt: 4581	FPo:
↑ 19:15:29	Receive uplink message	DevAddr: 26 0B AF D0	<>	FCnt: 4580	FPo:
↑ 19:14:29	Receive uplink message	DevAddr: 26 0B AF D0	<>	FCnt: 4579	FPo:
↑ 19:13:29	Receive uplink message	DevAddr: 26 0B AF D0	<>	FCnt: 4578	FPo:

### Location

Change location settings →



(The Things Network 2024a)

#### 4.3.4 Mise en place du capteur d'humidité et de température & communication avec le réseau

Pour la préparation de cette étape, nous avons besoin des éléments de la section « Capteur LoRa » de l'Annexe 1.

Ce projet a besoin d'un capteur d'humidité et de température qui communique avec LoRa. Le capteur utilisé se nomme « LSE01 » et a été principalement choisi, car il est conçu par la même entreprise que le concentrateur LoRa permettant de constituer une passerelle, ce qui assure une compatibilité entre les deux composants.

Ce capteur transmet plusieurs éléments (Jinggeng 2024) :

- La puissance de la batterie en Volt
- Le taux d'humidité dans le sol en pourcentage
- La température du sol en degrés Celsius
- La conductivité du sol en uS/cm

Ce qui nous intéresse dans ce prototype c'est le taux d'humidité dans le sol. Grâce à cela nous allons pouvoir déterminer si la terre a besoin d'être irriguée.

L'image ci-contre présente l'extérieur du capteur. Il possède un boîtier étanche (n° 1 de la figure) permettant une utilisation extérieure en protégeant des intempéries. À une extrémité du boîtier il y a une antenne LoRa (n° 2 de la figure), et à l'autre, un cordon relié à des tiges métalliques (n° 3 de la figure) utilisant la méthode « Frequency Domain Reflectometry » (FDR) pour calculer les valeurs transmises. L'explication de la méthode FDR ne sera pas abordée dans ce travail, car c'est en dehors du domaine d'étude.

Figure 34 : Extérieur du LSE01



(Jinggeng 2024)

Le LSE01 est de classe A<sup>16</sup> version 1.0.3 du protocole LoRaWAN et utilise l'appairage OTAA pour rejoindre le réseau (Jinggeng 2024). Le capteur est constitué d'une batterie non rechargeable Li-SOCI2 à 8 500 mAh avec un faible taux de décharge dans le but de tenir 8 à 10 ans. Après cette durée écoulée, la batterie peut être remplacée.

Figure 35 : Intérieur du LSE01



Photo personnelle

À l'intérieur du boîtier comme le montre la figure n° 35, nous pouvons voir le raccordement (entouré en rouge) de la carte avec la batterie qui se situe en dessous. Pour mettre l'appareil sous tension, il est nécessaire de positionner le *jumper* jaune (entouré en rose) comme sur la figure. Lorsqu'il est activé, une LED clignote, et ce, à chaque fois que des données sont transmises ou reçues.

Pour lire les données du capteur relayé par notre passerelle, il faut appairier le dispositif au réseau, et ainsi inscrire la clé applicative (AppKey) et les identifiants dans l'application « The Things Network ». Pour ce faire il faut suivre les étapes du manuel utilisateur de Dragino (Jinggeng 2024). L'AppKey se trouve à l'intérieur du capteur, il faut communiquer directement avec l'appareil au moyen de commandes spécifiques<sup>17</sup> pour les obtenir. Le Dev EUI est directement inscrit sur le boîtier.

Figure 36 : Exemple d'un payload reçu

```
Payload: { Bat: 3.269, ConductSoil: 96, TempC: "0.00", TempSoil: "22.14", WaterSoil: "31.62" }
```

(The Things Network 2024a)

<sup>16</sup> Cf. chapitre 3.2.2.

<sup>17</sup> Commandes AT

Une fois que le capteur a rejoint le réseau, nous pouvons recevoir et lire les données comme sur l'image ci-dessus. La puissance de la batterie à 3,269 volts nous confirme qu'elle est opérationnelle, en effet si la valeur est inférieure à 2,7 volts, il faut songer à la remplacer (Xiaoling 2024). Dans cet exemple, la température du sol se situe à 22,14 °C, avec 31,62 % d'humidité et une conductivité du sol de 96 uS/cm. La valeur « TempC » est un champ de réserve à ignorer (Jinggeng 2024).

Pour la conception et l'utilisation du prototype, l'intervalle de temps de transmission des données est de 1 minute afin d'observer rapidement les changements lors de l'arrosage. Cette valeur peut être modifiée à l'aide de commande AT à la valeur souhaitée.

Le capteur est prêt à être planté dans la terre pour transmettre les informations. Pour une mesure à long terme, il est conseillé de placer la sonde à l'horizontale environ à 20 centimètres de la surface comme la figure ci-contre (Jinggeng 2024).

Figure 37 : Position dans le sol de la sonde



(Jinggeng 2024)

#### 4.3.5 Récupération des données du serveur réseau

La console The Things Network permet de paramétrer le réseau et de surveiller son activité, cependant cela n'est pas suffisant pour ce travail, nous avons besoin d'exécuter des actions en fonction des activités du réseau. C'est pourquoi nous allons utiliser un programme Java Jakarta EE, exécuté par un serveur d'applications Tomcat installé sur le Raspberry Pi pour recevoir les données, les interpréter et effectuer des actions.

Comme abordé au chapitre 3.3 The Things Network facilite la récupération des données avec des API.

Pour ce travail nous allons utiliser le protocole Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) qui se base sur le principe de publication et d'abonnement de sujet. Il a été choisi en raison de son fonctionnement adapté à l'IoT, car il nécessite peu de ressources et a une grande capacité d'évolution pouvant connecter de nombreux appareils (Amazon web Services [sans date]). C'est pourquoi The Things Network propose une intégration guidée de clients MQTT et possède son propre serveur MQTT. Il suffit de choisir parmi les clients proposés sur l'image ci-dessous, de lire les informations de mise en place et d'installer les outils nécessaires.

Figure 38 : Intégration API dans TTN

## Integrations with MQTT Clients

This section contains detailed guides for integrating with popular MQTT clients.

**ECLIPSE MOSQUITTO**  
Eclipse Mosquitto is a project which provides an open source MQTT broker, a C and C++ library for MQTT client implementations and the popular command line MQTT clients.  
[Read](#)

**ECLIPSE PAHO**  
Eclipse Paho is an umbrella project on a mission to provide high quality implementations of tools and libraries for M2M communications.  
[Read](#)

**HIVEMQ**  
HiveMQ is an MQTT broker and a client based messaging platform which uses MQTT protocol for fast, reliable and efficient bi-directional data transfer to and from IoT devices.  
[Read](#)

**MQTTBOX**  
MQTTBox is a cross platform application that makes it simple to create MQTT clients, virtual device networks, and load test MQTT devices and brokers.  
[Read](#)

← MQTT Server      Eclipse Mosquitto →

(The Things Industries 2024)

Pour ce prototype, nous utilisons le client MQTT HiveMQ pour faire le pont entre le serveur réseau et notre application Java en raison de son entière compatibilité avec Java. Au démarrage du serveur Tomcat, le programme Java crée un client MQTT pour s'abonner aux messages du dispositif, publié par le serveur MQTT appartenant à The Things Network.

Un point important également, est d'assurer une redondance de cet abonnement, car tout le reste du projet en dépend. Une reconnexion automatique au client MQTT est programmée en cas de coupure Internet. Dès la fin de la coupure, le programme Java se reconnecte au client et reçoit à nouveau les données du capteur.

Une fois récupérées, les données sont enregistrées dans une base de données.

### 4.3.6 Préparation de la base de données

Pour réaliser cette partie, nous avons besoin du Raspberry Pi. Pour faciliter la manipulation d'une base de données, c'est le système MariaDB que nous utiliserons pour héberger nos données. En effet, c'est un des services les plus employés avec un Raspberry Pi en raison de sa performance et son langage SQL très connu (Fromaget 2020). Une fois installé sur le Raspberry Pi, il faut définir une table et créer un nouvel utilisateur qui aura tous les droits dessus.

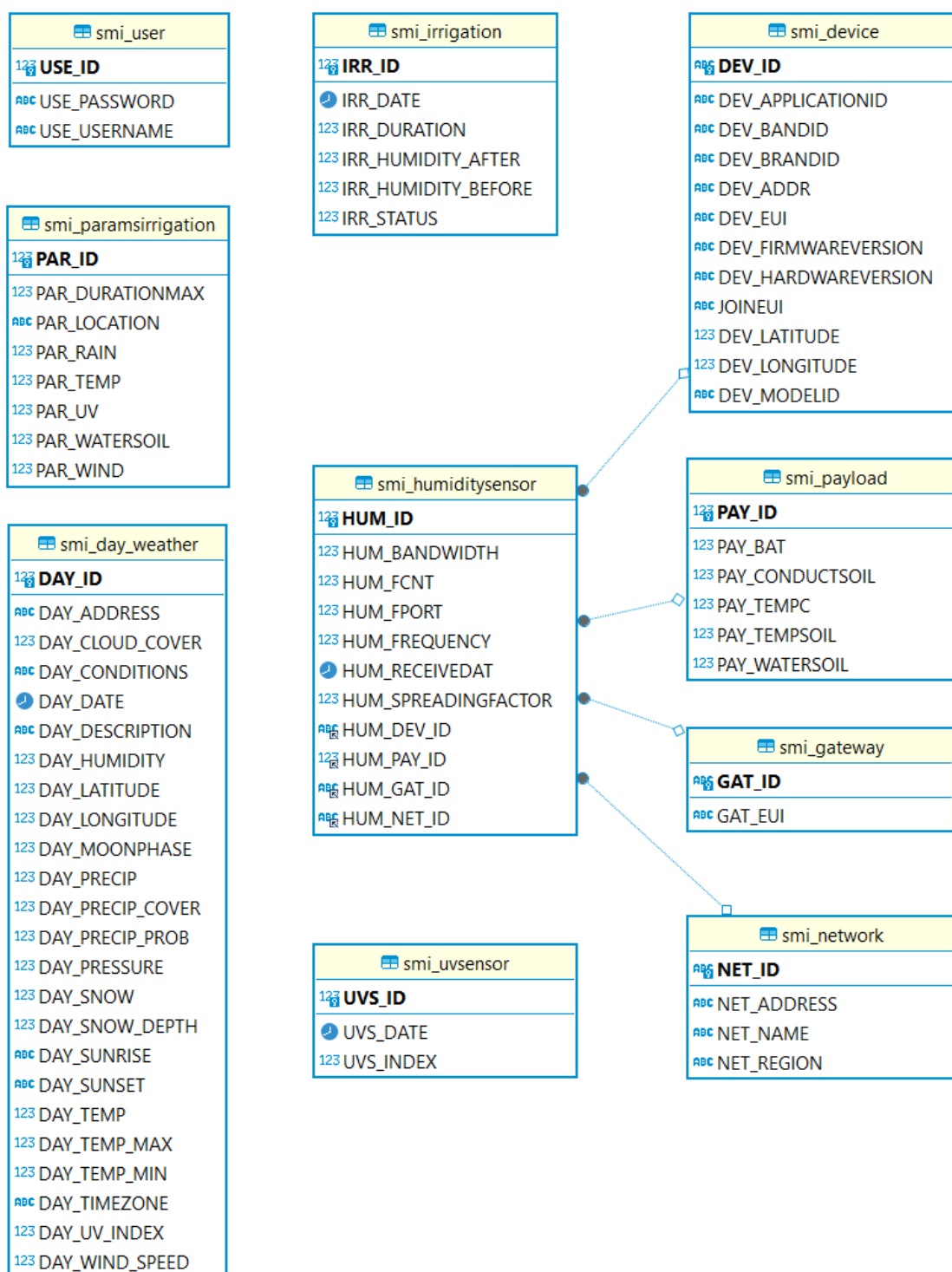
Pour ce projet il est nécessaire d'avoir 10 tables :

Tableau 10 : Liste des tables de la base de données « SmlrrigDB »

Nom	Rôle
smi_user	Table contenant les noms d'utilisateurs et les mots de passe hachés
smi_paramsirrigation	Table contenant les valeurs qui définissent les règles d'irrigation utilisées dans l'algorithme de prise de décisions
smi_irrigation	Table contenant les traces de prises de décision pour l'irrigation
smi_day_weather	Table contenant les données météorologiques
smi_device	Table contenant les informations réseau & logiciels du capteur
smi_payload	Table contenant les informations reçues du capteur
smi_network	Table contenant les informations du réseau
smi_gateway	Table contenant l'identifiant de la passerelle
smi_humiditysensor	Table contenant tous les éléments d'un paquet LoRa transmis
smi_uvsensor	Table contenant les informations du capteur UV

(Informations provenant de la base de données SmlrrigDB)

Figure 39: Diagramme ER SmlIrrigDB



(Diagramme provenant de la base de données SmlIrrigDB)

Le diagramme entités-relations (ER) ci-dessus représente les 10 tables créées et vues précédemment, avec leur champ et leur type (si ce sont des nombres, des dates ou des chaînes de caractères) et leurs relations avec d'autres tables.

### 4.3.7 Communication de l'API météo avec la passerelle LoRa

Pour cette étape, nous avons besoin de l'élément à la section « API météo » de l'Annexe 1.

Tout d'abord, nous devons créer un compte sur: Visual Crossing, et choisir le plan tarifaire souhaité. Pour ce projet, la version Free (gratuite) suffit amplement, la limite étant de 1 000 requêtes par jour. Cette API météo a été choisie, car elle propose les informations météorologiques nécessaires gratuitement pour une utilisation intuitive.

Lorsque le compte est créé, le site propose l'utilisation d'un «Query Builder» qui est une aide pour construire l'URL nécessaire à appeler pour obtenir les informations météorologiques souhaitées ainsi que leur format. Il est nécessaire de saisir une latitude et une longitude ou un nom de lieu, et de sélectionner les informations qui nous intéressent. Le lieu est stocké dans la table « smi\_paramsirrigation » dans le champ « PAR\_LOCATION » pour qu'il soit possible à l'utilisateur de le paramétrer. Le lien sera utilisé à l'aide d'une requête HTTP au serveur de Visual Crossing pour récupérer les données.

Autre point important, les informations météorologiques récupérables sont nombreuses, et bien qu'intéressantes, elles ne sont pas toutes pertinentes pour ce prototype. Seules les informations soulignées dans le tableau ci-après seront utilisées. Les autres sont conservées pour de potentielles améliorations futures.

Tableau 11 : Champs météorologiques

Nom du champ	Description	Unité de mesure
tempmax	Température maximale atteinte prévue.	°C
tempmin	Température minimale atteinte prévue.	°C
<u>temp</u>	Température moyenne calculée.	°C
humidity	Humidité moyenne présente dans l'air.	%
<u>precip</u>	Quantité de précipitation prévue.	mm
precipprob	Probabilité de précipitation.	%
precipcover	Pourcentage de temps dans une période donnée où les précipitations tombent.	%
snow	Quantité de neige prévue.	cm

<u>snowdepth</u>	Profondeur moyenne de la neige sur le sol.	cm
<u>windspeed</u>	Vitesse moyenne du vent.	kph
<u>pressure</u>	Pression atmosphérique au niveau de la mer.	mb
<u>cloudcover</u>	Couverture nuageuse moyenne.	%
<u>uvindex</u>	Indice UV maximal atteint prévu.	–
<u>sunrise</u>	Heure du lever du soleil.	–
<u>sunset</u>	Heure du coucher du soleil.	–
<u>moonphase</u>	Phase de la lune exprimée en valeur décimale, où 0 représente la nouvelle lune et 0,5 la pleine lune.	–
<u>conditions</u>	Description par mot clés conditions météorologiques (ex. pluie, orage).	–
<u>descriptions</u>	Description textuelle plus détaillée que le champ « conditions ».	–

(Visual Crossing 2023)

Dans la figure ci-dessous, voici un exemple des données météorologiques avec des valeurs reçues.

Figure 40 : Exemple de de données de l'API météo en json

```

{"WeatherData": {
  "queryCost": 1,
  "latitude": 46.1752,
  "longitude": 6.07307,
  "resolvedAddress": "Bernex, GE, Suisse",
  "timezone": "Europe/Zurich",
  "days": [{
    "Day": {"datetime": "2024-04-15", "tempmax": 21.8, "tempmin": 10.9,
      "temp": 18.0, "humidity": 49.6, "precip": 2.7, "precipprob": 100.0,
      "precipcover": 37.5, "snow": 0.0, "snowdepth": 0.0, "windgust": 44.6,
      "windspeed": 24.5, "winddir": 230.5, "pressure": 1016.0,
      "cloudcover": 62.5, "solarradiation": 99.9, "solarenergy": 8.8,
      "uvindex": 7.0, "sunrise": "06:48:37", "sunset": "20:23:37",
      "moonphase": 0.25, "conditions": "Rain, Partially cloudy",
      "description": "Partly cloudy throughout the day with rain
        clearing later."
    }}
  ]
}

```

(Issu du programme Java)

### **4.3.8 Algorithmes de prise de décision d'arrosage**

Ce chapitre présente les algorithmes qui constituent une programmation automatique et intelligente d'arrosages.

#### **4.3.8.1 Algorithme de programmation de l'heure de prise de décision**

Cet algorithme permet de définir l'heure à laquelle la décision d'arroser sera prise, afin d'améliorer l'efficacité de l'irrigation dans le sol. Pour ce faire il y a trois paramètres à prendre en compte :

- La température moyenne du jour
- L'indice UV moyen du jour
- Les heures de lever et coucher de soleil du jour

D'ordinaire, il est conseillé d'arroser son jardin le matin pour éviter que les plantes gèlent en cas d'arrosage le soir ou la nuit. Toutefois, durant les fortes chaleurs, il est recommandé d'arroser une fois le soleil couché, lorsque que la terre a refroidi. Ceci dans le but d'éviter une importante évaporation d'eau (CmonJardinier 2018).

Les deux premiers paramètres permettent d'identifier les périodes estivales à forte chaleur, lorsque l'indice UV moyen et la température moyenne sont élevés.

Si la température moyenne prévue est au-dessous d'un seuil défini dans la table « smi\_paramsirrigation » dans le champ « PAR\_TEMP » et l'indice UV moyen est en dessous d'un seuil défini dans la table « smi\_paramsirrigation » dans le champ « PAR\_UV », la prise de décision peut être programmée à l'heure du lever de soleil. Dans le cas contraire, elle sera programmée deux heures après le coucher de soleil, car cela signifiera que nous sommes dans une période de fortes chaleurs.

Tous les jours à 5 heures du matin, le système exécute cet algorithme pour déterminer l'heure de la prise de décision.

#### **4.3.8.2 Algorithme de prise de décision d'arrosage**

L'algorithme prend en compte plusieurs informations pour décider d'arroser ou non. Il est nécessaire que tous les critères soient respectés pour que l'irrigation se déclenche. Un diagramme d'activité UML se trouve à la page suivante pour illustrer le fonctionnement de l'algorithme.

Les trois critères suivants doivent être pris en considération :

- L'humidité du sol prélevé
- La quantité de précipitation annoncée
- La vitesse de vent maximum prévu

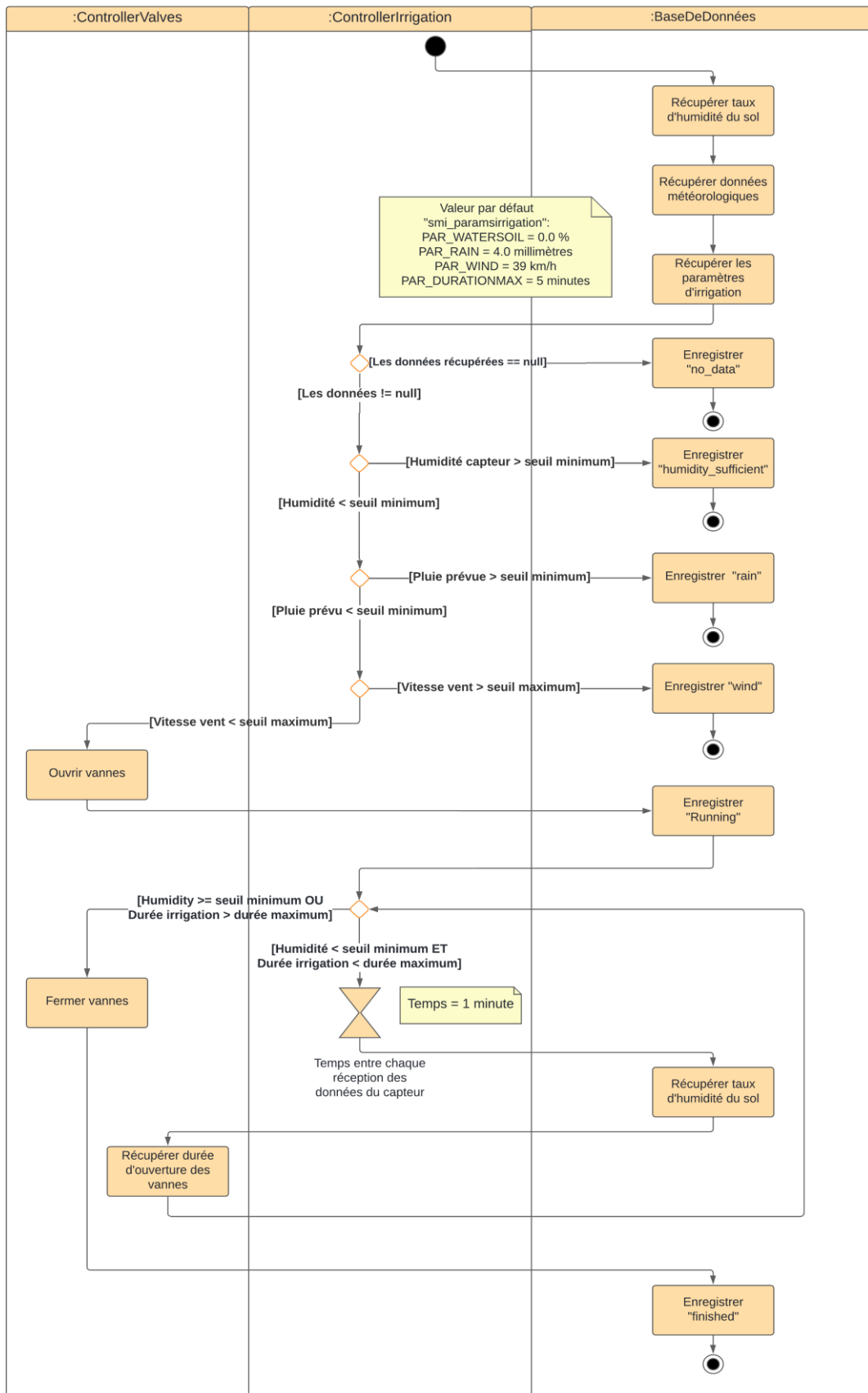
Le premier critère est le taux d'humidité du sol, il nous indique s'il y a suffisamment d'eau pour faire vivre les plantes, sachant que 0 % correspond à une terre sans eau. Il faut donc définir un seuil d'humidité minimum souhaité qui maintient les plantes en vie. Ce seuil est enregistré dans la table « smi\_paramsirrigation », c'est le champ « PAR\_WATERSOIL ». Si l'humidité du sol transmise par le capteur est inférieure à l'humidité minimum définie, le premier critère est rempli.

Le second critère annonce la quantité des précipitations pour la journée. Si la quantité annoncée est suffisante pour nourrir le jardin, il n'est pas nécessaire d'arroser. Par exemple, le gazon a besoin de 4 millimètres d'eau par jour, il faut donc que les précipitations annoncées soient égales ou supérieures à 4 millimètres pour avoir suffisamment d'eau (C. 2021). Le minimum de millimètre d'eau nécessaire pour nourrir les plantes du jardin doit être enregistré dans la table « smi\_paramsirrigation » dans le champ « PAR\_RAIN ». Si la quantité de pluie annoncée est inférieure au minimum de précipitation défini, le second critère est rempli.

Le troisième et dernier critère concerne la quantité de vents annoncés pour la journée et dépend de la vitesse moyenne prévue du vent. La nécessité de connaître ce facteur dans le contexte de l'arrosage est moins évidente. Si l'air est venteux, par exemple avec une vitesse de 39 km/h selon l'échelle de Beaufort (Confédération suisse 2023), les plantes vont réagir en augmentant leur taux de transpiration d'eau (Odele 2020). C'est pourquoi il est déconseillé d'irriguer dans cette situation, car l'eau utilisée peut s'évaporer. Le seuil de la vitesse du vent maximum tolérée doit être enregistré dans la table « smi\_paramsirrigation » dans le champ « PAR\_WIND ». Si la quantité de vent annoncée est inférieure au maximum défini dans la table, le troisième critère est également rempli.

Si les trois critères sont remplis, le système ouvre les vannes et lance un chronomètre. Tant que le taux d'humidité prélevé est inférieur au seuil minimum défini et que la valeur du chronomètre est inférieure à la durée maximum enregistrée dans la table « smi\_paramsirrigation » dans le champ « PAR\_DURATIONMAX », les vannes restent ouvertes. Lorsqu'une des deux conditions de sortie est atteinte, les vannes se ferment et les valeurs d'irrigation sont enregistrées dans la table « smi\_irrigation ».

Figure 41 : Diagramme UML algorithme de décision d'arrosage



Réalisation personnelle

## 4.3.9 Mise en place des vannes

### 4.3.9.1 Montage Hardware

Pour ce montage, nous avons besoin des éléments de la section « Vannes » de l'Annexe 1.

Figure 42 : PiRelay V2 HAT



(The Pi Hut [sans date])

Le PiRelay V2 HAT représenté dans la figure n° 42 contient quatre relais qui peuvent fournir jusqu'à 30 volts et 10 ampères chacun. Pour ce projet, seulement deux relais sont nécessaires pour les deux vannes motorisées. Une fois connectés au PiStack avec la connexion GPIO, nous devons mettre les jumpers (objet jaune sur l'image) sur l'emplacement des deux relais choisis pour que le Raspberry Pi les contrôle.

Ensuite, nous pouvons connecter nos vannes aux relais. Sur la figure ci-contre, nous pouvons observer que les vannes à bille motorisées possèdent trois fils :

- Le fil jaune : l'alimentation
- Le fil bleu : l'ouverture
- Le fil brun : la fermeture

En premier lieu, nous allons ajouter un système de relais à notre PiStack<sup>18</sup>.

En effet, le Raspberry Pi ne peut pas recevoir plus de 5 volts, ce qui est insuffisant pour contrôler des appareils plus gourmands en puissance. C'est pour corriger ceci que le relai est très utile ; il permet de donner l'impulsion électrique nécessaire aux appareils reliés pour les contrôler.

Figure 43 : Exemple de vanne à bille motorisé

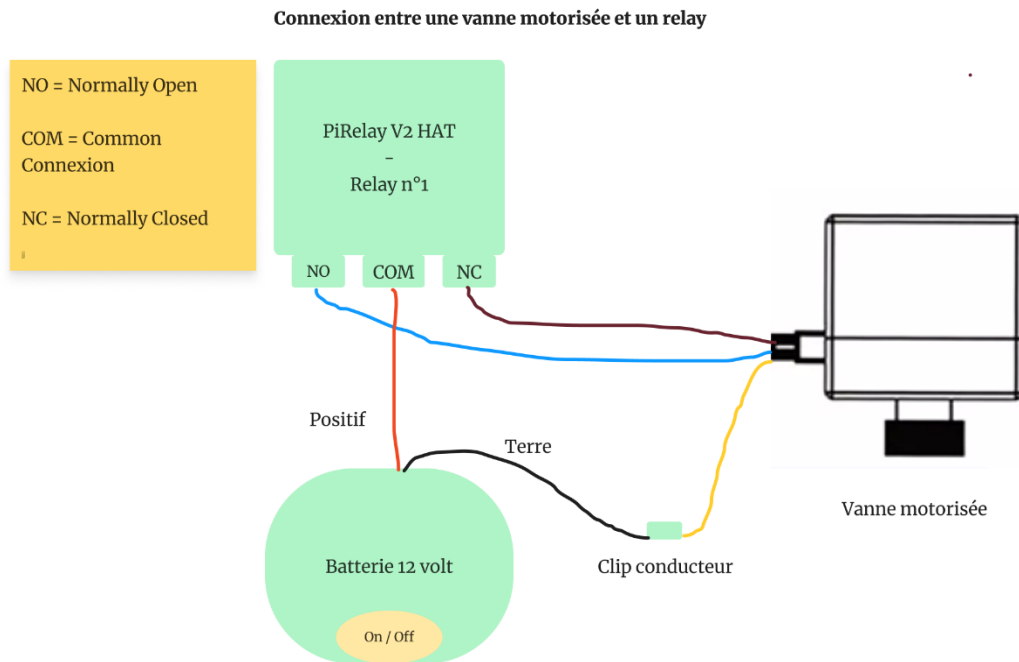


(CDiscount [sans date])

<sup>18</sup> Cf. chapitre 4.3.2.

Elles ont besoin d'une alimentation qui fournit la puissance nécessaire, soit 12 volts. Lorsque les vannes sont alimentées, la bille qui bloque la sortie de l'eau s'ouvre pour laisser l'eau s'évacuer.

Figure 44 : Schéma connexion Relay & vanne



Réalisation personnelle

Comme nous pouvons observer sur l'image ci-dessus, il y a trois éléments : une vanne à bille motorisée reliée à une batterie 12 volts, activée par le relais n° 1 du PiRelay V2 HAT. La batterie est un boîtier contenant 8 piles de 1,5 volt pour obtenir les 12 volts nécessaires à la vanne motorisée.

Le fil bleu de la vanne est connecté au Normally Open (NO) et le fil brun au Normally Closed (NC). Pour le fil jaune, nous devons le connecter au fil Terre de la batterie à l'aide d'un clip connecteur pour que cela ne bouge pas. Le fil rouge positif de la batterie est relié au Common Connexion (COM) du relais. Finalement, le bouton de la batterie doit être sur « On » pour qu'elle fournisse l'énergie. Cette configuration permet au Raspberry Pi d'activer le relais pour ouvrir directement la vanne, et lorsque le relais est désactivé, la vanne se referme. L'avantage principal de cette disposition est qu'en cas de panne de courant, la vanne ouverte se fermera automatiquement. Cela évitera un gaspillage conséquent d'eau.

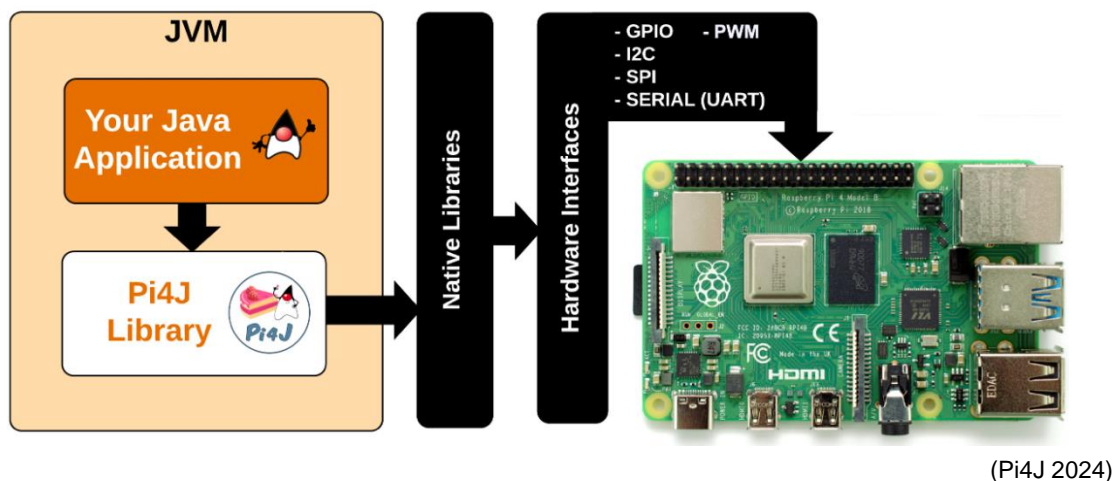
Le même montage est effectué avec la deuxième vanne sur un autre relais.

#### 4.3.9.2 Montage software

Pour la partie software, nous avons quelques étapes supplémentaires pour faire fonctionner les vannes. La première étape consiste à activer un protocole de communication série du nom « I2C » sur le Raspberry Pi nécessaire à la communication avec le PiRelay V2 HAT dans l'outil de configuration.

Pour la seconde étape, nous avons besoin de la librairie Pi4J qui possède une API orientée objet. Comme l'illustre l'image ci-dessous, elle permet de faire un pont entre l'application Java et les interfaces physiques du Raspberry Pi (Pi4J 2024). Nous pouvons ainsi créer des objets « relay » en indiquant le numéro de la broche GPIO correspondante sur la Raspberry Pi, et l'activer et désactiver facilement.

Figure 45 : Pi4J



#### 4.3.10 Préparation de l'Interface web pour l'utilisateur

Pour constituer l'Interface web, nous avons besoin de créer des pages HTML riches avec JavaScript.

Le site contient quatre pages :

- Page « Accueil »
- Page « État du système »
- Page « Données »
- Page « Rapport »

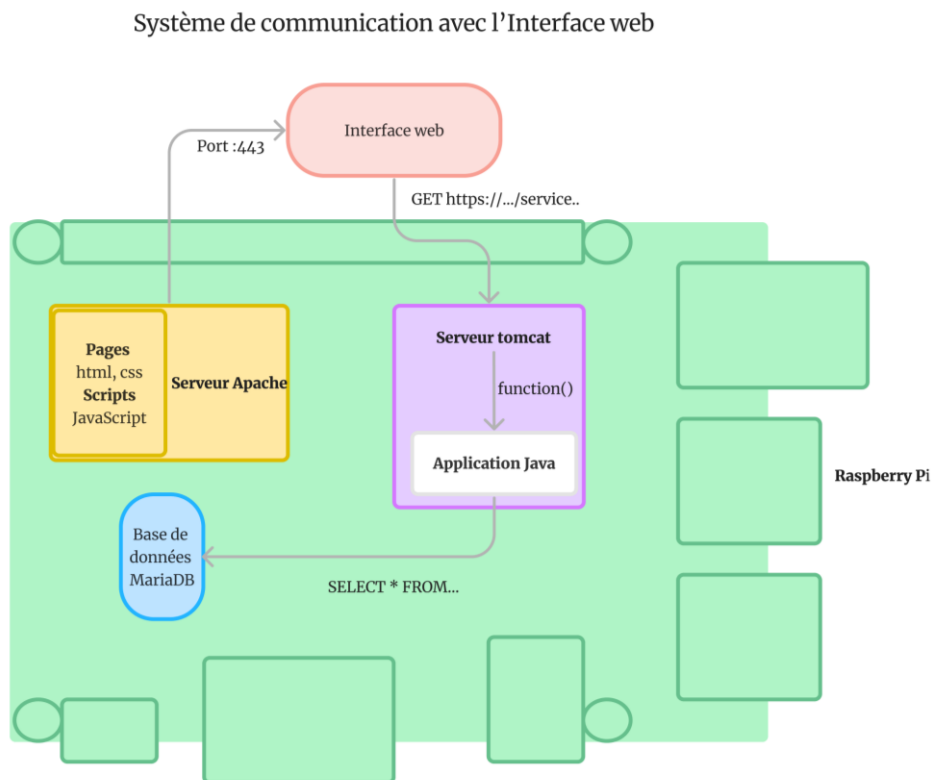
La page « Accueil » contient une très brève explication, elle a principalement le rôle de « porte d'entrée » du site web. La page « État du système » est probablement la page la plus importante de l'Interface web. En effet, elle indique l'état du système, s'il est fonctionnel et quand la prochaine prise de décision d'arroser a lieu.

Elle contient également deux boutons permettant de gérer manuellement l'arrosage : un pour le lancer et l'autre pour l'arrêter. L'utilisateur peut ainsi garder un contrôle manuel sur le programme à tout instant.

Pour la page « Données » et « Rapport », ce sont des affichages graphiques des données stockées dans la base de données. La page « Rapport » contient les données sur la prise de décision d'irriguer, ainsi qu'un graphique représentant les relevés d'humidité du capteur afin d'observer les variations en cas d'arrosage ou de pluie par exemple.

#### 4.3.11 Communication de l'interface web avec la passerelle LoRa

Figure 46 : Schéma communication interface web



Réalisation personnelle

Sur la figure ci-dessus, nous avons le schéma des interactions entre les composants pour que la communication entre l'Interface web et les données fonctionne.

Le serveur HTTP Apache est installé sur le Raspberry Pi et contient les pages et les scripts créés précédemment.

En activant le port 443 qui permet d'utiliser le protocole Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) avec un certificat autosigné, il est dorénavant possible d'accéder au site web depuis le navigateur. Comme le prototype Smlrrig n'est pas en production, l'accès se fait uniquement en local avec l'adresse IP du Raspberry Pi dans le navigateur : **https://192.168.1.201:443**. Le port doit être indiqué, car le web UI pour paramétrer la passerelle est également en local.

L'Interface web a besoin d'accéder aux informations qui sont dans la base de données. Pour illustrer ceci, nous allons prendre un cas d'exemple. Lorsque l'utilisateur accède à la page « Rapport », il peut lire les données d'irrigation pour le jour souhaité. Au moment où il accède à la page, celle-ci effectue une requête HTTPS au serveur Tomcat. Dans cette situation, c'est une requête GET qui est réalisée : **https://192.168.1.201:8443/SmlrrigApp-1.0-SNAPSHOT/api/dataService/irrigation**

Ce lien représente l'adresse IP de la machine hébergeant le serveur Tomcat, le port sécurisé 8443 pour le protocole HTTPS et le nom de l'application (SmlrrigApp-1.0-SNAPSHOT). Le reste de l'URL est le chemin pour accéder au service d'irrigation accessible à travers une API REST. L'application Java cherche les données demandées et les retourne sous format json à l'Interface web qui affiche le résultat.

#### **4.3.12 Sécurité du système**

Un des aspects les plus importants du projet est de sécuriser le système des intrusions ou de l'écoute des informations transmises. Pour diminuer les risques, plusieurs dispositions sont mises en place en plus des sécurités du protocole LoRaWAN abordé au chapitre 3.2.6.

##### Protection du Raspberry Pi et de la base de données

Le pare-feu « ufw » est mis en place sur le Raspberry Pi, et seules les informations entrantes des ports écoutés autorisés sont reçues. L'accès au Raspberry PI est protégé par un nom d'utilisateur ainsi qu'un mot de passe. La base de données sur le Raspberry Pi possède une protection supplémentaire, car il est nécessaire de saisir un nom d'utilisateur et un mot de passe pour y accéder. Seule une autre adresse IP peut accéder à la base de données à distance et cette machine est également protégée par un mot de passe.

##### Protection contre l'écoute des communications

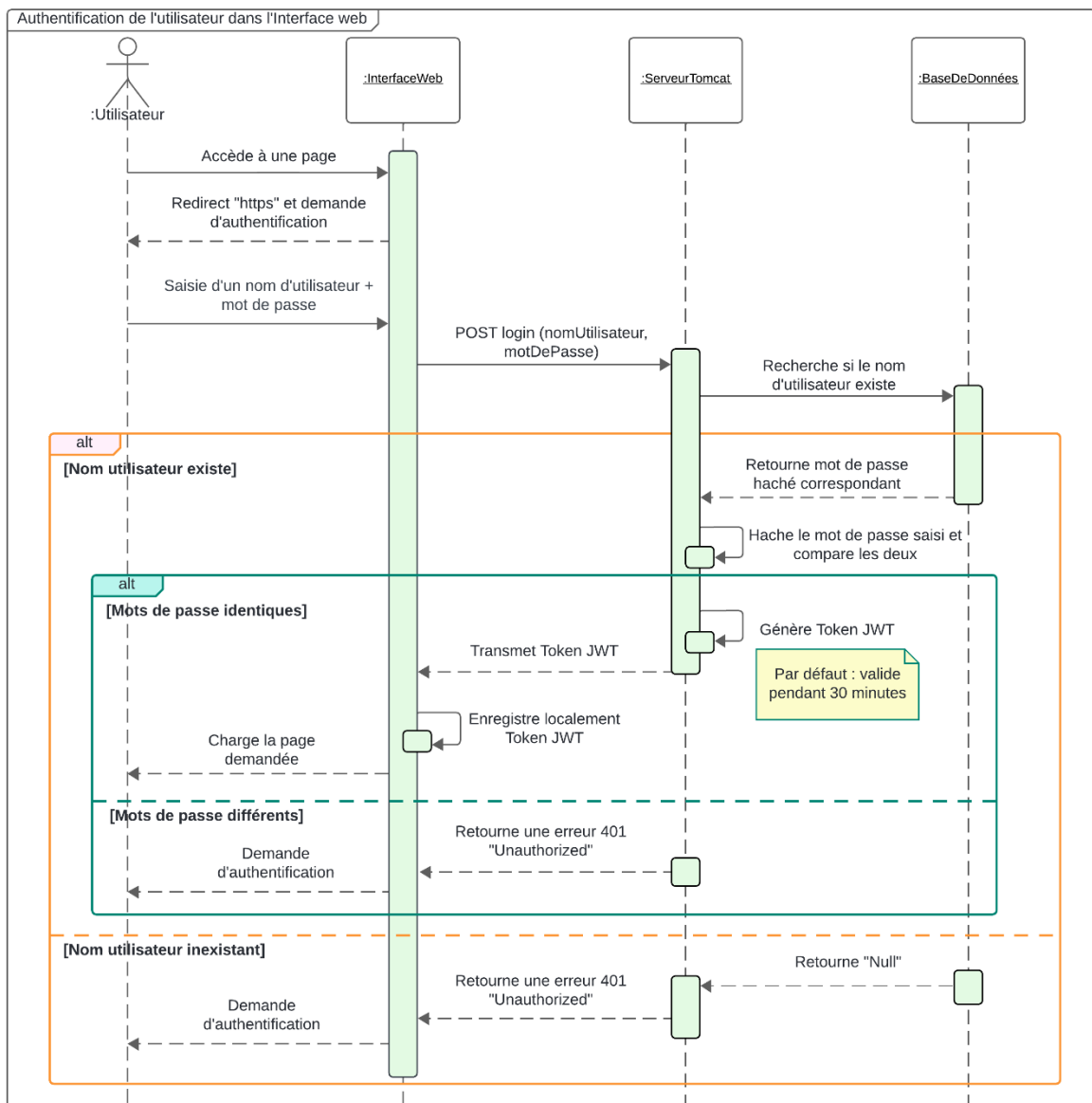
Pour le serveur Apache et pour le serveur Tomcat, le protocole HTTPS est employé à la place du protocole HTTP.

Le protocole HTTPS transmet, entre un navigateur et un serveur, des communications chiffrées grâce à son protocole de transfert Transport Layer Security (TLS) (IONOS 2020).

### Protection contre l'accès aux services du serveur Tomcat

Bien que les communications soient chiffrées, cela n'empêche pas quelqu'un d'accéder aux services du serveur Tomcat depuis le navigateur tant qu'il est sur le réseau local. Il nécessite donc de gérer une authentification pour protéger ces services.

Figure 47 : Diagramme de séquence sur l'authentification



Réalisation personnelle

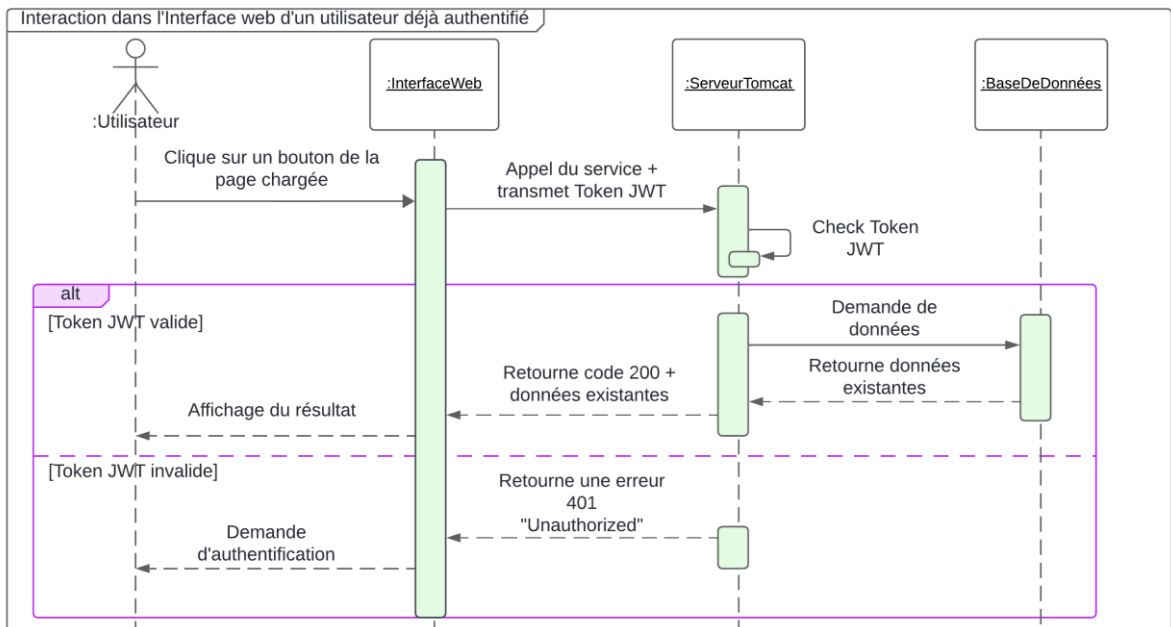
En observant les étapes du diagramme ci-dessus, l'utilisateur doit d'abord entrer un nom d'utilisateur et un mot de passe pour être autorisé à appeler les services du serveur.

Les informations sont transmises aux serveurs qui vérifient si le nom d'utilisateur saisi est connu de la base de données. Il y a deux suites alternatives :

Si c'est le cas (encadré alternatif orange 1<sup>ère</sup> partie), la base de données envoie le mot de passe haché correspondant au nom d'utilisateur stocké au serveur. Celui-ci hache le mot de passe saisi par l'utilisateur et compare les deux mots de passe. S'ils correspondent (encadré alternatif bleu 1<sup>ère</sup> partie), le serveur crée et transmet un jeton d'accès JSON web Token (JWT) à l'Interface web valide pendant 30 minutes. Celle-ci stocke localement le jeton et peut ainsi afficher les pages protégées et donner accès aux services demandés. Si les mots de passe sont différents (encadré alternatif bleu 2<sup>e</sup> partie) et dans le cas où le nom de l'utilisateur est inexistant (encadré alternatif orange 2<sup>e</sup> partie), le serveur envoie une erreur à l'Interface web et celle-ci renouvelle sa demande d'authentification à l'utilisateur.

Quand l'Interface web effectue une requête au serveur, elle transmet également le jeton (Token) pour permettre l'accès à ce service, et en cas de délais de vie dépassés, l'accès sera refusé. Le serveur renverra une erreur et l'Interface web invitera l'utilisateur à se reconnecter comme nous pouvons observer dans le diagramme ci-dessous.

Figure 48 : Diagramme de séquence interaction dans l'Interface web



Réalisation personnelle

## Mesures de contrôle de la fermeture des vannes en cas de problème

Un point important de ce travail est d'éviter qu'un problème survienne et empêche la fermeture des vannes. Comme vu précédemment au point 4.3.8 l'arrosage a une durée maximum programmable pour sécuriser le système en cas de soucis avec les données. Comme l'algorithme se base sur les transmissions du capteur et l'accès à la base de données, il est nécessaire d'avoir une protection qui est indépendante de ces deux éléments.

En cas de coupure Wi-Fi, ou du serveur The Things Network, la connexion MQTT se reconnecte automatiquement dès que les deux sont à nouveau opérationnels. Ce qui limite le temps sans données du capteur.

De plus, lorsque le serveur Tomcat est arrêté manuellement, il désactive le système d'irrigation, si celui-ci est en marche. Si le serveur s'interrompt brutalement, les vannes peuvent rester ouvertes, c'est pourquoi dès qu'il redémarre le programme analyse le statut des vannes et les referme si elles sont ouvertes.

Finalement en cas de panne d'électricité, le Raspberry Pi ne sera plus alimenté ainsi que son relais ce qui aura pour effet de couper l'énergie indiquant aux vannes de s'ouvrir et fermera celle-ci.

## **4.4 Améliorations et évolutivités**

Le prototype « Smlrrig » propose déjà plusieurs aspects intéressants pour l'entretien de son jardin. Il pourrait encore gagner en efficacité et en intérêt avec certaines améliorations et évolutions.

En termes de fonctionnalités, voici quelques idées d'évolutions :

- Gestion des besoins d'eau par types de plante
- Gestion de la température et de l'exposition au soleil par types de plante
- Alertes en cas de forte chaleur et d'indices UV pour mieux protéger les plantes
- Alertes sur l'état de la batterie du capteur d'humidité
- Alertes en cas d'interruption d'émission du capteur
- Transmission d'informations sur la journée du lendemain

En ce qui concerne les améliorations du système existant, voici quelques idées :

- Gestion des paramètres d'irrigation depuis l'Interface web
- Automatisation de l'activation du serveur Tomcat lors de l'allumage du Raspberry PI
- Redondance de la passerelle en la dupliquant

- Redondance de la carte micro SD du Raspberry Pi prête à remplacer celle utilisée en cas de soucis, en sauvegardant l'image.
- Nouvelles batteries pour les vannes indiquant leur état, afin de savoir quand elles ne fonctionneront plus
- Installer le module LoRa de la passerelle et automatiser son activation
- Rallongement des fils entre la passerelle et les vannes
- Amélioration de l'algorithme en tenant compte d'autres paramètres et en utilisant de l'intelligence artificielle
- Améliorer la sécurité des connexions MQTT en utilisant le cryptage TLS/SSL
- Sauvegarder les données de la base de données
- Utilisation de certificats provenant d'autorités de certifications
- Déploiement sur Internet avec nom de domaine

## 5. Conclusion

Ce travail de Bachelor a permis la création d'un prototype fonctionnel d'un système d'arrosage intelligent, Smlrrig, qui non seulement programme des arrosages automatiques, mais gère également différentes solutions pour parer à des problèmes potentiels, tel qu'une coupure de courant ou d'Internet durant une irrigation en cours. Le système démontre une capacité à déclencher un arrosage uniquement en cas de besoin, tout en gardant des traces de ses actions pour l'utilisateur. Conformément aux objectifs initiaux du projet, le prototype remplit ses fonctions.

Ajouté à cela, ce travail explique comment rendre intelligent l'arrosage de son jardin avec un réseau étendu à faible puissance. Se basant sur le concept d'Internet Of Things, il utilise LoRaWAN pour communiquer les données entre un capteur et une passerelle pour ensuite les réceptionner sur un serveur et les traiter.

Ce projet cible les particuliers souhaitant irriguer automatiquement et de manière optimale leur jardin, tout en gardant un contrôle sur le système d'ouverture et fermeture des vannes en cas de nécessité, et connaître le niveau d'humidité du sol à intervalle régulier.

Afin d'être accessible et pour faciliter son utilisation, le système devrait être intégré dans un boîtier ne nécessitant pas d'autre manipulation que la mise sous tension de l'appareil. L'utilisateur n'aurait alors uniquement qu'à disposer les capteurs dans son jardin et à fixer la ou les vannes sur ses robinets extérieurs.

Toutefois, pour que le projet atteigne son plein potentiel, il sera nécessaire d'appliquer les améliorations et évolutions évoquées dans le chapitre précédent. En effet, cela ajouterait une réelle plus-value au système et permettrait un déploiement de l'arrosage intelligent dans le secteur agricole, notamment dans des serres ou des champs. L'impact sur la réduction de la consommation de l'eau serait ainsi beaucoup plus significatif. Pour envisager cette possibilité, il serait judicieux de tester le système avec plus de dispositifs et de passerelles pour observer sa capacité à gérer un plus grand volume de données et la connexion d'un plus grand nombre d'appareils. Des tests approfondis sur le terrain seront nécessaires pour valider son implantation parmi les systèmes existants. Avant d'envisager cette évolution, le système Smlrrig devra également être testé pour un usage en jardin, car la résistance sur le long terme des différents composants du prototype demeure inconnue à ce jour.

En définitive, le modèle en l'état actuel peut répondre aux besoins d'un particulier souhaitant irriguer automatiquement son jardin, pour autant que ce dernier possède

certaines connaissances techniques, comme configurer le Wi-Fi du Raspberry Pi, saisir les paramètres d'irrigation directement dans la base de données et lancer le serveur Tomcat. Dans ce cas, l'utilisateur peut dès lors rendre intelligent l'arrosage de son jardin et réduire sa consommation d'eau, grâce au prototype développé dans le cadre de ce travail.

## Bibliographie

ACCESSAGILITY, [sans date]. dBm (decibel to milliwatt). *AccessAgility* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://support.accessagility.com/hc/wifi-glossary-dbm> [consulté le 1 avril 2024].

AMAZON WEB SERVICES, [sans date]. Qu'est-ce que le protocole MQTT ? *Amazon Web Services* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://aws.amazon.com/fr/what-is/mqtt/> [consulté le 15 avril 2024].

ASHTON, Kevin, 2009. That « Internet of Things » Thing. *RFID journal* [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.itrco.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf> [consulté le 21 juin 2022].

AUGUSTIN, Aloÿs et al., 2016. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*. Vol. 16, no 9, p. 1466. DOI 10.3390/s16091466.

C., 2021. L'arrosage de la pelouse. *gerbeaud* [en ligne]. 16 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/arrosage-de-la-pelouse,2284.html> [consulté le 13 avril 2024].

CHAVANNE, Yannick, 2018. Le marché des objets connectés va croître de 35% par an jusqu'en 2025. *ICTjournal* [en ligne]. 22 novembre 2018. Disponible à l'adresse : <https://www.ictjournal.ch/etudes/2018-11-22/le-marche-des-objets-connectes-va-croitre-de-35-par-an-jusqu'en-2025> [consulté le 14 juin 2022].

CHIRPSTACK, [sans date]. ChirpStack open-source LoRaWAN Network Server. *ChirpStack* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.chirpstack.io/> [consulté le 15 avril 2024].

CLOUDFLARE, [sans date]. Qu'est-ce que la couche réseau ? *Cloudflare* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.cloudflare.com/fr-fr/learning/network-layer/what-is-the-network-layer/> [consulté le 23 novembre 2023].

CMONJARDINIER, 2018. Comment bien arroser le jardin ? *Cmonjardinier* [en ligne]. 1 juillet 2018. Disponible à l'adresse : <https://www.cmonjardinier.com/comment-bien-arroser-jardin/> [consulté le 13 avril 2024].

CONFÉDÉRATION SUISSE, 2023. *Tablette de la force des vents moyens selon l'échelle de Beaufort* [en ligne]. Disponible à l'adresse : [https://www.meteosuisse.admin.ch/dam/jcr:3cf0284f-7014-4f3d-98c8-ba479ddd946/Beaufort\\_Tablette\\_FR.pdf](https://www.meteosuisse.admin.ch/dam/jcr:3cf0284f-7014-4f3d-98c8-ba479ddd946/Beaufort_Tablette_FR.pdf) [consulté le 13 avril 2024].

CONSEIL FÉDÉRAL, 2022. *Rapport de base sur la sécurité de l'approvisionnement en eau et sur la gestion de l'eau* [en ligne]. Berne : Confédération Suisse. Disponible à

l'adresse : <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/71509.pdf>  
[consulté le 15 juin 2022].

FAO, 2020. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2020 : Relever le défi de l'eau dans l'agriculture* [en ligne]. Rome : FAO. Disponible à l'adresse : <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb1447fr> [consulté le 14 juin 2022].

FROMAGET, Patrick, 2020. How to Install MariaDB on Raspberry Pi? (MySQL Server). *RaspberryTips* [en ligne]. 25 janvier 2020. Disponible à l'adresse : <https://raspberrytips.com/install-mariadb-raspberry-pi/> [consulté le 13 avril 2024].

GEORGES, 2023. Introduction aux réseaux LPWAN : Sigfox, Lora, Nb-IoT et LTE-M. *Matooma* [en ligne]. 28 septembre 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.matooma.com/fr/s-informer/actualites-iot-m2m/reseaux-lpwa-sommes> [consulté le 29 septembre 2023].

GLOAGUEN, Laurent, 2018. Ville intelligente et LoRaWAN, l'exemple de Calgary. *Spiria* [en ligne]. 1 novembre 2018. Disponible à l'adresse : <https://www.spiria.com/fr/blogue/iot-m2m-systemes-embarques/ville-intelligente-et-lorawan-lexemple-de-calgary/> [consulté le 29 juin 2022].

GUIBERT, Christelle, 2023. Les glaciers suisses sont « le château d'eau de l'Europe », mais jusqu'à quand ? *Edition du soir Ouest-France.fr* [en ligne]. 24 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.ouest-france.fr/leditiondusoir/2023-03-24/les-glaciers-suisses-sont-le-chateau-d-eau-de-l-europe-mais-jusqu-a-quand-65730767-3702-44d7-b2a0-d3c1157e0cba> [consulté le 19 septembre 2023].

HEUZEBROC, Juliette, 2018. Environnement : l'eau se raréfie dans plusieurs régions du monde. *National Geographic* [en ligne]. 19 février 2018. Disponible à l'adresse : <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/environnement-leau-se-rarefie-dans-plusieurs-regions-du-monde> [consulté le 15 juin 2022].

INFOLOGO, 2018. Réseaux WiFi et IoT : Les enjeux d'une bonne sécurisation. *Infologo* [en ligne]. 28 juin 2018. Disponible à l'adresse : <https://infologo.ch/wifi/reseaux-wifi-iot-enjeux-bonne-securisation/> [consulté le 25 juin 2022].

IONOS, 2020. HTTPS : ce que cela signifie et pourquoi c'est important. *IONOS Digital Guide* [en ligne]. 20 juillet 2020. Disponible à l'adresse : <https://www.ionos.fr/digitalguide/hebergement/aspects-techniques/le-https-cest-quoi/> [consulté le 4 avril 2024].

IOT INDUSTRIEL BLOG, [sans date]. LPWAN : C'est quoi exactement ? *IoT Industriel Blog* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://iotindustriel.com/glossaire-iiot/lpwan-cest-quoi-exactement/> [consulté le 25 septembre 2023].

JINGGENG, Bei, 2024. LSE01-LoRaWAN Soil Moisture & EC Sensor User Manual. *Dragino* [en ligne]. 30 mars 2024. Disponible à l'adresse : <http://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20LoRaWAN%20End%20Nodes/LSE01-LoRaWAN%20Soil%20Moisture%20%26%20EC%20Sensor%20User%20Manual/> [consulté le 15 avril 2024].

JOFFE, Scott, 2021. Qu'est-ce que LoRaWAN? *MOKOLoRa* [en ligne]. 9 août 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.mokolora.com/fr/what-is-lorawan/> [consulté le 5 juillet 2022].

JORIO, Luigi, 2019. Le château d'eau de l'Europe se met-il à vaciller? *SWI swissinfo.ch* [en ligne]. 7 mai 2019. Disponible à l'adresse : [https://www.swissinfo.ch/fre/societe/ressources-en-eau\\_le-ch%C3%A2teau-d-eau-de-l-europe-se-met-il-%C3%A0-vaciller-/44936834](https://www.swissinfo.ch/fre/societe/ressources-en-eau_le-ch%C3%A2teau-d-eau-de-l-europe-se-met-il-%C3%A0-vaciller-/44936834) [consulté le 15 juin 2022].

JOVANOVIC, Bojan, 2023. Internet of Things statistics for 2023 - Taking Things Apart. *DataProt* [en ligne]. 5 mai 2023. Disponible à l'adresse : <https://dataprot.net/statistics/iot-statistics/> [consulté le 25 septembre 2023].

KAMBOU, Donkora et al., 2013. Concepts d'efficience et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique). *BASE* [en ligne]. Vol. 18 (2014), no 1. Disponible à l'adresse : <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=10862> [consulté le 15 juin 2022].

LORIOT, [sans date]. LORIOT - Hybrid Network Management System for Massive IoT. *LORIOT* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.loriot.io/> [consulté le 15 avril 2024].

MACÉ, Marillys, 2017. La consommation d'eau domestique est-elle la même à travers le monde? *Centre d'information sur l'eau* [en ligne]. 8 février 2017. Disponible à l'adresse : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/la-consommation-deau-domestique-est-elle-la-meme-a-travers-le-monde/> [consulté le 15 juin 2022].

MEKKI, Kais et al., 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*. Vol. 5, no 1, pp. 1-7. DOI 10.1016/j.icte.2017.12.005.

MILESIGHT IOT, [sans date]. Smart Agriculture Kit Remote Monitoring and Control. *Milesight* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.milesight-iot.com:443/lorawan-agricultural-monitoring-starter-kit/> [consulté le 17 octobre 2023].

MOKRANI, Arnaud, 2009. L'eau et les activités agricoles. *Planet-Vie* [en ligne]. 1 octobre 2009. Disponible à l'adresse : <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/l-eau-et-les-activites-agricoles> [consulté le 15 juin 2022].

MONTAGNY, Sylvain, 2022. *Tout ce que vous devez savoir sur le LoRaWAN en 40 mins* [en ligne]. Université Savoie Mont Blanc : Youtube, 3 juin 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=i0ONEdkOm28> [consulté le 10 juin 2022].

MONTAGNY, Sylvain, 2022. *LoRa - LoRaWAN et l'Internet des Objets* [en ligne]. Chambéry : Université Savoie Mont Blanc. Disponible à l'adresse : <https://www.univ-smb.fr/lorawan/wp-content/uploads/2022/01/Livre-LoRa-LoRaWAN-et-lInternet-des-Objets.pdf> [consulté le 3 juillet 2022].

ODLE, Teresa, 2020. How Does Wind Affect Transpiration | Plant Addicts. *Plant Addicts* [en ligne]. 10 2020. Disponible à l'adresse : <https://plantaddicts.com/how-does-wind-affect-transpiration/> [consulté le 13 avril 2024].

ORACLE, [sans date]. Qu'est-ce que l'Internet of Things (IoT) ? *Oracle* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.oracle.com/ch-fr/internet-of-things/what-is-iot/> [consulté le 25 juin 2022].

ORANGE, [sans date]. Spreading Factor (SF) ? *Orange IoT Journey* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : [https://iotjourney.orange.com/fr-FR/support/faq/spreading-factor-\(sf\)](https://iotjourney.orange.com/fr-FR/support/faq/spreading-factor-(sf)) [consulté le 10 juin 2022].

ORANGE, 2023. 5 choses que vous ignorez à propos du WiFi. *Orange* [en ligne]. 12 février 2023. Disponible à l'adresse : <https://pro.orange.fr/lemag/5-choses-que-vous-ignorez-a-propos-du-wifi-CNT000000JCIFq.html> [consulté le 17 octobre 2023].

PECORARO, Arnaud, 2017. Introduction à LoRa. *Linux Embedded* [en ligne]. 15 décembre 2017. Disponible à l'adresse : <https://www.linuxembedded.fr/2017/12/introduction-a-lora> [consulté le 2 juillet 2022].

PI4J, 2024. Welcome to Pi4J. *Pi4J* [en ligne]. 21 mars 2024. Disponible à l'adresse : <https://pi4j.com/> [consulté le 3 avril 2024].

PROOFPOINT, [sans date]. Qu'est-ce que le modèle OSI : Détail du fonctionnement et des 7 couches. *Proofpoint* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.proofpoint.com/fr/threat-reference/osi-model> [consulté le 23 novembre 2023].

REDHAT, 2019. L'IoT (Internet des objets), qu'est-ce que c'est ? *RedHat* [en ligne]. 8 janvier 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.redhat.com/fr/topics/internet-of-things/what-is-iot> [consulté le 21 juin 2022].

REVAZ, Philippe, 2022. Il faudra limiter les demandes en eau à l'avenir en Suisse. *RTS Info* [en ligne]. 6 juillet 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.rts.ch/info/suisse/13226199-il-faudra-limiter-les-demandes-en-eau-a-lavenir-en-suisse.html> [consulté le 20 juillet 2022].

RUSH, Chris, 2021. Qu'est-ce que la technologie LoRa & LoRaWAN ? *KnowHow* [en ligne]. 10 août 2021. Disponible à l'adresse : <https://knowhow.distrelec.com/fr/telecommunication/quest-ce-que-la-technologie-lora-lorawan/> [consulté le 3 juillet 2022].

SAP, [sans date]. Qu'est-ce que l'IoT et comment fonctionne-t-il ? *SAP* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://www.sap.com/suisse/products/artificial-intelligence/what-is-iot.html> [consulté le 25 septembre 2023].

SLATS, Laurens, 2020. A Brief History of LoRa: Three Inventors Share Their Story. *Semtech* [en ligne]. 8 janvier 2020. Disponible à l'adresse : <https://blog.semtech.com/a-brief-history-of-lora-three-inventors-share-their-personal-story-at-the-things-conference> [consulté le 2 juillet 2022].

SO, Damien, 2023. Méthode EUI64 pour expansion d'adresse. *FORMIP* [en ligne]. 25 octobre 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.formip.com/pages/blog/methode-eui64> [consulté le 1 avril 2024].

STEFAN, Elisa, 2021. Jour zéro. *Qatium* [en ligne]. 15 janvier 2021. Disponible à l'adresse : <https://qatium.com/fr/blog/jour-zero/> [consulté le 14 juin 2022].

SUJAY VAILSHERY, Lionel, 2023. Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2023, with forecasts from 2022 to 2030. *Statista* [en ligne]. 27 juillet 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> [consulté le 25 septembre 2023].

SWISSCOM, [sans date]. *IoT Low Power Network Connectivity LoRaWAN* [en ligne]. Swisscom. Disponible à l'adresse : <https://documents.swisscom.com/product/filestore/lib/90b6351e-efcb-4bd3-9e6e-28d20fbe18ac/b2b-webform-iot-lpn-fr.pdf?idxme=pex-search> [consulté le 30 juin 2022].

SWISSLIFE, 2021. Les maisons intelligentes ont le vent en poupe en Suisse. *SwissLife* [en ligne]. 29 avril 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.swisslife.ch/fr/particuliers/blog/immo/les-maisons-intelligentes-ont-le-vent-en-poupe-en-suisse.html> [consulté le 14 juin 2022].

TEAM KEREVAL, 2021. LoRaWAN : Partie 1, en bref. *Kereval* [en ligne]. 28 juin 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.kereval.com/lorawan-partie-1-en-bref/> [consulté le 10 juin 2022].

THE THINGS INDUSTRIES, 2024. LoRa Basics™ Station. *The Things Stack* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsindustries.com/docs/gateways/concepts/lora-basics-station/> [consulté le 19 avril 2024].

THE THINGS NETWORK, 2024a. Management platform for The Things Network. *The Things Network Console* [en ligne]. 15 avril 2024a. Disponible à l'adresse : <https://eu1.cloud.thethings.network/console> [consulté le 15 avril 2024].

THE THINGS NETWORK, 2024b. RSSI and SNR. *The Things Network* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/> [consulté le 30 juin 2022].

THE THINGS NETWORK, 2024c. Device Classes. *The Things Network* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/> [consulté le 3 juillet 2022].

THE THINGS NETWORK, 2024d. LoRaWAN Architecture. *The Things Network* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/> [consulté le 3 juillet 2022].

THE THINGS NETWORK, 2024e. Security. *The Things Network* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/security/> [consulté le 3 juillet 2022].

THE THINGS NETWORK, 2024f. End Device Activation. *The Things Network* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/end-device-activation/> [consulté le 16 avril 2024].

THE THINGS NETWORK, 2024g. The Things Network. *The Things Network* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.thethingsnetwork.org/> [consulté le 15 avril 2024].

UNESCO, 2023a. Risque imminent d'une crise mondiale de l'eau (UNESCO/ONU-Eau) | UNESCO. *UNESCO* [en ligne]. 23 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.unesco.org/fr/articles/risque-imminent-dune-crise-mondiale-de-leau-unesco/onu-eau> [consulté le 27 avril 2023].

UNESCO, 2023b. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2023 : Partenariats et coopération pour l'eau* [en ligne]. Paris : UNESCO. ISBN 978-92-3-200283-9. Disponible à l'adresse : [https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef\\_0000384658&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach\\_import\\_b212202d-a8a3-4f67-8103-b8ac2488e7d1%3F\\_%3D384658fre.pdf&updateUrl=updateUrl4539&ark=/ark:/48223/pf0000384658/PDF/384658fre.pdf.multi&fullScreen=true&locale=fr#WWDR%202023%20FR%20report%20v01.indd%3A.460245%3A5259](https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef_0000384658&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_b212202d-a8a3-4f67-8103-b8ac2488e7d1%3F_%3D384658fre.pdf&updateUrl=updateUrl4539&ark=/ark:/48223/pf0000384658/PDF/384658fre.pdf.multi&fullScreen=true&locale=fr#WWDR%202023%20FR%20report%20v01.indd%3A.460245%3A5259) [consulté le 27 avril 2023].

VISHNEVSKIY, Vladimir M. et al., 2019. *Distributed Computer and Communication Networks* [en ligne]. Moscow : Springer International Publishing. DCCN 2019 LNCS 11965. On the Performance of LoRaWAN in Smart City. Disponible à l'adresse :

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36614-8\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36614-8_2) [consulté le 3 juillet 2022].

VISUAL CROSSING, 2023. Weather Data Documentation – Visual Crossing Weather. *Visual Crossing* [en ligne]. 23 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.visualcrossing.com/resources/documentation/weather-data/weather-data-documentation/> [consulté le 1 avril 2024].

WEF, 2023. *The Global Risks Report 2023 18th Edition* [en ligne]. Genève : World Economic Forum. ISBN-13 : 978-2-940631-36-0. Disponible à l'adresse : [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2023.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf) [consulté le 23 juin 2023].

WYID NETWORK, [sans date]. Wyld Design : Wireless Software and Hardware. *Wyld Networks* [en ligne]. [sans date]. Disponible à l'adresse : <https://wyldnetworks.com/wyld-design> [consulté le 30 juin 2022].

XIAOLING, 2024. FAQ for Batteries. *Dragino* [en ligne]. 10 janvier 2024. Disponible à l'adresse : <http://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/How%20to%20calculate%20the%20battery%20life%20of%20Dragino%20sensors%3F/> [consulté le 15 avril 2024].

XIAOYE, 2024. PG1302 -- LoRaWAN Concentrator User Manual. *Dragino* [en ligne]. 11 avril 2024. Disponible à l'adresse : <http://wiki.dragino.com/xwiki/bin/view/Main/User%20Manual%20for%20All%20Gateway%20models/PG1302/#H5.2.2.A0Selecttheappropriatedeviceversiontodownload> [consulté le 15 avril 2024].

## Annexe 1 : Liste du matériel et outils nécessaires

Rôles	Eléments	Modèles	Société de fabrication	Quantité	Coûts hors taxes en CHF <sup>19</sup>
Capteur LoRa	LoRaWAN soil moisture and EC sensor	DRA LSE 01	Dragino	1	122,68 CHF
	Batterie de rechange	ES-261 520 3.6V 8 500 mAh	Dragino	1	28,91 CHF
	USB Adaptateur vers UART pour connexion TTL	-	Allnet	1	15,90 CHF
	Câbles de démarrage	30 câbles	PLAY-ZONE	1	15,90 CHF
Passerelle LoRaWAN	Raspberry PI	3B+ 2017	Raspberry	1	37,90 CHF
	Carte micro-SD 16 GB	Micro SDHC 16 GB	Kingston	1	3,95 CHF
	Concentrateur LoRa pour Raspberry PI avec antenne et GPS	PG1302	Dragino	1	76,43 CHF

<sup>19</sup> Certains montants peuvent varier en raison du cours et des fluctuations des prix du marché.

	Carte convertisseur pour Raspberry	-	Dragino	1	29,02 CHF
	Stack Hat pour Raspberry Pi	PiStack	SB Components	1	12 CHF
	Carte relais pour Raspberry Pi	PiRelay V2	SB Components	1	18 CHF
Vannes	Vannes à billes motorisée	$\frac{3}{4}$ 12 VDC	Acarps Group Store	2	21,48 CHF
	Batteries 12 volts	-	-	2	10.- CHF
	Clip connecteur	30 pièces	-	1	4,60 CHF
Serveur réseau & d'applications LoRaWAN	The Things Network	The Think Stack Community Edition	The Things Industries	1	Utilisation du service gratuit
API météo	Visual Crossing Weather API	Metered	Visual Crossing	1	Gratuit < 1 000 appel par jour
<b>Total</b>					<b>392,20 CHF</b>

## **Annexe 2 : Clé USB**

Une clé USB a été rendu avec ce document contenant :

- Le programme Java « SmlrrigApp »
- Les pages HTML et les scripts JavaScript de l'Interface web
- Les configurations des serveurs Apache et Tomcat du Raspberry PI dans un fichier texte