

Etat de l'art des réseaux LPWA

Table des matières

1.	Introduction.....	4
1.1	Internet des objets versus objets connectés.....	4
1.2	Architecture M2M & IoT.....	5
2	Principales caractéristiques des réseaux LPWA.....	6
2.1	Caractéristiques des réseaux LPWA.....	6
2.2	Très faible consommation.....	7
2.2.1	Topologie.....	8
2.2.2	Temps de cycle.....	8
2.2.3	Accès à la ressource.....	9
2.2.4	Faible coût.....	9
3	Les technologies propriétaires.....	10
3.1	SIGFOX.....	10
3.2	LoRa.....	11
3.3	INGENU.....	11
3.4	TELENSA.....	12
3.5	QOWISIO.....	12
3.6	Tableau comparatif des technologies propriétaires.....	13
4	Les standards.....	13
4.1	IEEE.....	14
4.1.1	IEEE 802.15.4k (Low Energy Critical Infrastructure Monitoring Networks LECIM).....	14
4.1.2	IEEE 802.15.4g (Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Unity Networks);.....	15
4.1.3	IEEE 802.11 ah (Wireless Local Area Networks).....	15
4.2	ETSI.....	15
4.3	3GPP.....	16
4.3.1	eMTC (Enhanced MTC).....	16
4.3.2	EC-GSM.....	16
4.3.3	NB-IoT.....	16
4.3.4	Tableau comparatif standards 3GPP.....	17
4.4	IETF.....	17
4.5	LoRa Alliance.....	18
4.6	Weightless-SIG.....	19

4.6.1	Weightless-W	19
4.6.2	Weightless-N.....	19
4.6.3	Weightless-P.....	19
4.6.4	Tableau récapitulatif.....	19
4.7	DASH7 Alliance	20
4.8	Wize	20
5	Déploiement : enjeux et critères de choix.....	20
5.1	Lieu.....	21
5.2	Saturation réseau et interférences.....	21
5.3	Adaptabilité.....	21
5.4	Débit de données	21
5.5	Couverture réseau et géolocalisation	22
5.6	Interopérabilité et standardisation.....	22
5.7	Sécurité	22
5.8	Maturité	23
5.9	Acteurs	23
6	Facteurs économiques	24
7	Conclusion.....	24

1. Introduction

Les réseaux de communication cellulaires, filaires ou satellitaires permettant d'échanger des données entre des objets portables sont largement répandus. Les plus connus d'entre eux sont utilisés pour la téléphonie mobile. Ces réseaux sont administrés par des opérateurs agréés, proposant différentes formules d'abonnement, pouvant être associées à un équipement loué ou acheté.

Ces réseaux traditionnels se caractérisent par un débit de données élevé, des protocoles de communication complexes, et par voie de conséquence une consommation d'énergie importante nécessitant une recharge fréquente des batteries des objets mis en réseau.

Les nouvelles applications basées sur des objets connectés se contentent, dans la majorité des cas, d'un débit de données faible avec des échanges peu fréquents car un des principaux challenges consiste à faire durer les batteries le plus longtemps possible pour réduire les coûts de maintenance ou de remplacement. De plus, si ces objets sont déployés en nombre, il ne faut pas avoir à supporter le coût d'un abonnement par objet connecté trop important.

Pour répondre aux besoins spécifiques des objets connectés, (souvent appelés internet des objets ou IoT), des alternatives de type LPWA (Low Power Wide Area) ont vu le jour.

Les réseaux LPWA sont optimisés pour fournir une couverture large avec une consommation d'énergie minimale. Généralement basés sur l'utilisation de fréquences libres, les dispositifs IoT ont des faibles débits de données, des batteries à longue durée de vie, et peuvent travailler de manière autonome pendant des longues périodes. Néanmoins, des technologies LPWA basées sur l'utilisation de bandes de fréquences sous licence telles que NB-IoT (LTE Cat-M1 en Amérique du Nord) commencent également à voir le jour.

Déjà répandus dans des applications IoT telles que les compteurs intelligents, le contrôle d'éclairage et la gestion des parkings, les réseaux LPWA vont apporter une contribution significative aux écosystèmes M2M (Machine to Machine) et IoT. Selon Gartner (janvier 2017) le nombre d'objets connectés passera de 8,4 milliards en 2017 à 20,4 milliards en 2020, dont 3,2 milliards dans des applications industrielles.

Cet état de l'art a pour objet de présenter l'écosystème des réseaux LPWA, les principales technologies, les moteurs et les freins du marché, les opportunités de déploiement, l'environnement de régulation et de standardisation, les profils et les stratégies de quelques acteurs clés de l'écosystème.

1.1 Internet des objets versus objets connectés

Avant d'aller plus loin dans notre analyse des réseaux LPWA, il peut être utile de bien préciser ce qu'on entend par " objets connectés ". Objets connectés et internet des objets (IoT) sont intimement liés.

L'internet des objets peut faire référence à :

- une extension de l'internet "classique" à des objets (physiques ou virtuels).
- une technologie permettant d'échanger des données entre des humains, des ordinateurs et des objets.
- une version connectée d'objets existants, permettant d'envisager des fonctionnalités nouvelles et des nouveaux services.

Selon cette dernière définition, l'internet des objets est bien plus qu'une technologie, c'est une formidable opportunité de transformer les objets classiques que nous connaissons pour développer de nouveaux usages et donc de nouveaux revenus. L'internet des objets se base donc naturellement sur la capacité des objets à être connectés, quelle que soit la technologie utilisée.

Prenons l'exemple d'une lampe, dont la fonction première est d'éclairer. Si cette lampe est connectée, il devient possible de lui ajouter des fonctionnalités nouvelles, telles que : variation de l'intensité, variation de la couleur, création d'une ambiance, simulation de présence etc... le tout pouvant être contrôlé via un protocole internet (à partir d'un PC, d'une tablette ou d'un smartphone).

1.2 Architecture M2M & IoT

Les notions de connexion entre machines M2M ou entre objets IoT (Internet of Things) font référence à plusieurs type de réseaux.

Un réseau local ou LAN (Local Area Network) permet généralement de connecter plusieurs équipements entre eux (ordinateurs, imprimantes, caméras de surveillance...) à l'intérieur d'une maison, d'un bâtiment ou d'une usine. Une passerelle (gateway node) permet de relier ce réseau local à un réseau plus large ou WAN (Wide Area Network) à travers une connexion filaire ou sans fil (wireless).

Des objets mobiles peuvent communiquer directement vers ce réseau étendu de type WAN sans passer par les passerelles précédentes. Ils sont ensuite intégrés à un système de management global pour assurer des services (exemple : suivi de containers).

Ces différents niveaux de réseaux sont illustrés sur la Figure 1.

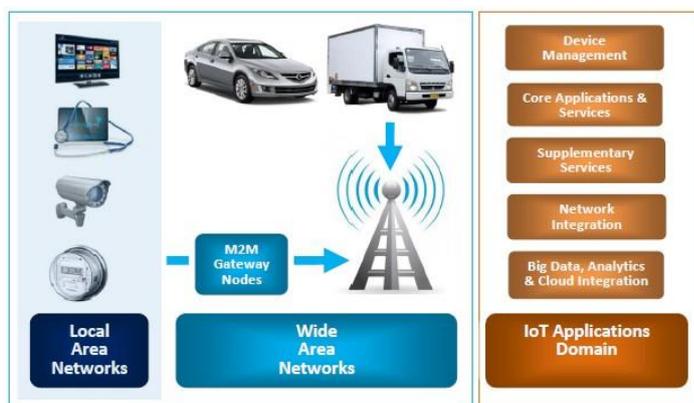


Figure 1 : Différents types de réseaux impliqués dans les applications d'objets connectés (source SNS Research)

2 Principales caractéristiques des réseaux LPWA

L'intérêt majeur des réseaux LPWA réside dans leur capacité à connecter un très grand nombre d'objets, répartis dans une zone géographique très large, et à très bas coût, contrairement à d'autres technologies qui vont privilégier d'autres paramètres comme le débit de données, la latence (temps d'attente entre une commande et sa prise en compte) et la fiabilité de la transmission.

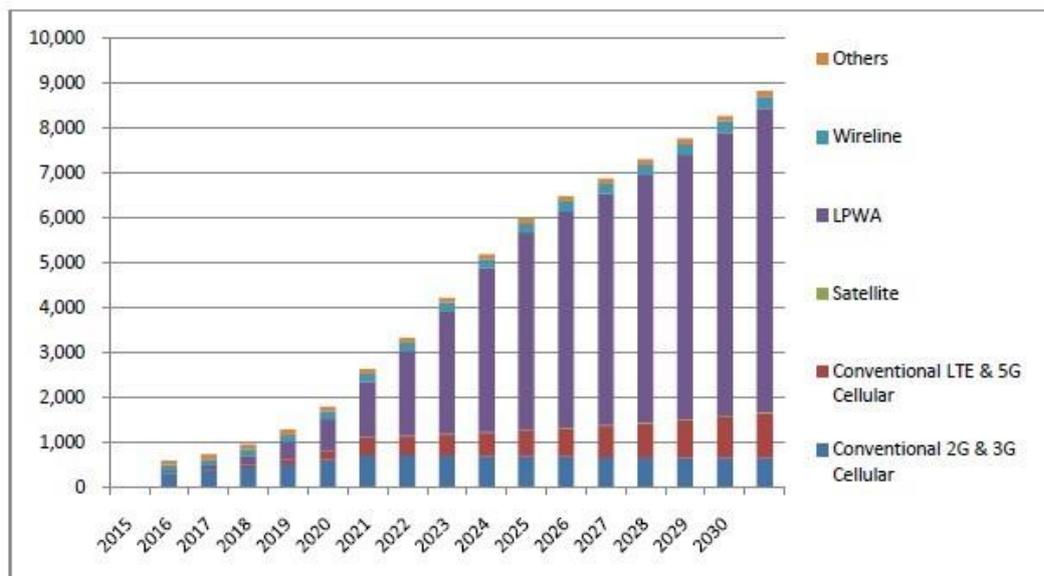


Figure 2 : Global Wide Area M2M Connections by Technology (source SNS Research)

D'après SNS Research (voir Figure 2), les réseaux LPWA pourraient représenter 45% des connexions en réseau étendu, en particulier pour les applications qui sont aujourd'hui coûteuses ou non réalisables avec les réseaux cellulaires classiques, telles que : compteurs intelligents, bâtiments intelligents, éclairage public intelligent, gestion de places de parking, agriculture, gestion des déchets...

2.1 Caractéristiques des réseaux LPWA

Les technologies LPWA se caractérisent par une zone de couverture géographique large et une bonne propagation du signal, ce qui permet d'atteindre des objets réputés difficiles d'accès ou situés en sous-sol, comme par exemple des compteurs d'eau. Comparé à des réseaux cellulaires classiques, un gain de +20 dB (facteur 100) peut être obtenu au niveau de la réception du signal, avec une portée pouvant atteindre 50 km en zone rurale, et de 1-10 km en zone urbaine. Cette performance est due à plusieurs facteurs : utilisation d'une bande de fréquences inférieure au GHz, faible débit de données, techniques de modulation appropriées.

Bande de fréquences.

La plupart des réseaux LPWA utilisent des bandes de fréquences libres, autour de 868 MHz, qui sont moins atténuées par les obstacles tels que des murs en béton, et moins encombrées que la bande située autour de 2.4 GHz, que l'on utilise dans nombre de réseaux sans fil courte portée tels que Bluetooth, wifi, ZigBee....

Sensibilité des récepteurs.

Les débits étant relativement faibles, chaque bit (ou symbole) émis aura une énergie plus importante, sans avoir à augmenter la puissance de transmission. Le rapport signal/bruit étant donc meilleur, des signaux très faibles pourront être plus facilement décodés. Cela explique pourquoi la sensibilité d'un récepteur LPWA peut être aussi basse que -130 dBm.

Techniques d'accès à la ressource radio.

Deux techniques sont utilisées, la *bande étroite* (narrowband) et l'*étalement de spectre* (spread spectrum).

Avec une modulation en *bande étroite* (moins de 25 kHz), il est possible de loger de nombreux canaux de communication à l'intérieur d'une bande de fréquences donnée. Le niveau de bruit étant directement lié à la largeur du spectre, le rapport signal/bruit augmente, ce qui facilite la démodulation au niveau du récepteur. Sigfox et Telensa utilisent des techniques à bandes très étroites de type UNB (ultra narrow band) de l'ordre de 100 Hz. De telles largeurs ont pour effet de diminuer le débit, et donc d'augmenter les temps de transmission, en contrepartie le nombre d'objets connectés peut être plus important. Chaque objet utilisera un canal différent pour communiquer. On parle alors de FDMA (Frequency Division Multiple Access). Pour augmenter le nombre d'objets connectés et sachant que la quantité d'information à transmettre est faible, chaque canal pourra être utilisé par différents objets à tour de rôle. On parle alors de TDMA (Time Division Multiple Access).

L'*étalement de spectre* est une technique de transmission dans laquelle un signal est transmis sur une largeur spectrale plus grande que s'il était transmis de manière classique, tout en restant à puissance égale. Le signal transmis peut se noyer dans un bruit ambiant et devient plus difficile à espionner. Le principe même d'étalement par codage rend le signal plus résistant aux interférences et aux attaques. Chaque signal utilisant toute la bande de fréquence disponible se superpose aux signaux provenant d'autres objets connectés. Ces signaux sont différenciés au niveau du récepteur par leur code ou séquence d'étalement différente. On parle alors de CDMA (Code Division Multiple Access)

2.2 Très faible consommation

Le déploiement à grande échelle d'applications IoT passe par la très faible consommation pour des raisons de coût et de praticité. Une recharge fréquente des batteries n'est pas du tout souhaitable, contrairement à ce que l'on observe sur les objets grand public. La durée de vie recherchée pour les batteries est de l'ordre de plusieurs années voire 10 ans.

2.2.1 Topologie

Il existe plusieurs topologies de réseaux : bus, étoile, arbre, maillés, cellulaires...

Les réseaux d'objets connectés sont généralement maillés, ou en étoile.

Dans les réseaux maillés ou mesh networks (voir Figure 3), certains objets servent de relais pour étendre la portée du réseau (exemple ZigBee). Ils sont sollicités fréquemment pour relayer les signaux d'autres objets connectés, et par conséquent consomment beaucoup d'énergie, ce qui impacte la durée de vie des batteries.

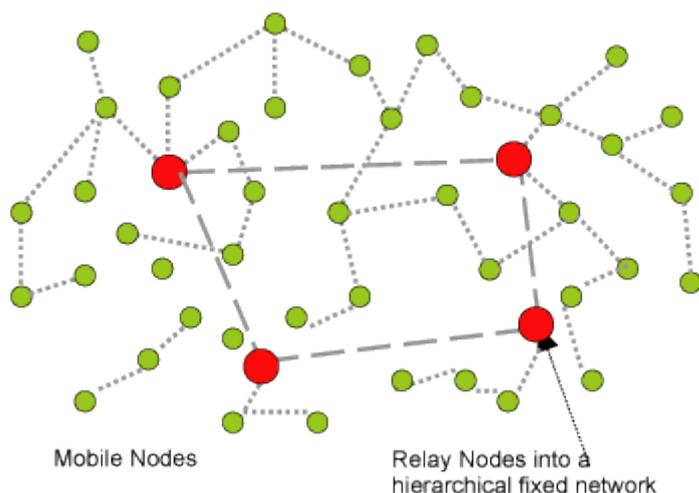


Figure 3 : Exemple de réseau maillé



Figure 4 : Exemple de réseau en étoile

Les réseaux de type LPWA sont généralement organisés en étoile (voir Figure 4). Dans cette configuration chaque objet est en lien direct avec une station de base (Gateway). L'objet ne consomme de l'énergie que pendant le temps très court nécessaire pour transmettre ou recevoir une information.

2.2.2 Temps de cycle

L'objet n'occupe la bande de fréquences et n'émet un signal que s'il transmet des données. En réception le circuit est activé momentanément, pendant certaines

périodes convenues à l'avance. Ces fenêtres de transmission réduites permettent également d'optimiser l'utilisation de la bande passante du réseau : "emprunt" de bande passante à d'autres systèmes, possibilité d'avoir plusieurs objets parlant à tour de rôle sur un même canal.

2.2.3 Accès à la ressource

Les protocoles de type MAC (medium access control) sont largement utilisés dans les réseaux cellulaires ou dans les réseaux sans fil locaux. Ils sont trop complexes (circuiterie additionnelle) et trop coûteux en énergie pour les besoins de l'IoT. Pour contourner ce problème, plusieurs technologies LPWA telles que SIGFOX et LoRaWAN ont recours au protocole ALOHA (protocole aléatoire), dont le principe (en simplifiant) est de permettre à l'objet connecté d'envoyer des données sans avoir à négocier au préalable l'autorisation de le faire. Cela permet de limiter le processus de contrôle et donc la consommation au niveau de l'objet connecté au strict minimum, en revanche cela rajoute de la complexité au niveau de la station de base. En règle générale, on cherchera à limiter le plus possible les échanges entre les objets finaux et le réseau.

2.2.4 Faible coût

Le principal intérêt des réseaux LPWA est de pouvoir connecter un grand nombre d'objets à un coût raisonnable, l'ordre de grandeur par objet étant 5 € pour le hardware et 1 € d'abonnement annuel pour la connectivité.

Le hardware.

Le marché potentiel de l'IoT étant en forte croissance avec des volumes importants, nul doute que les sociétés de semiconducteurs vont s'y intéresser et développer des circuits dédiés. Ces circuits optimisés vont contribuer à réduire le coût et l'encombrement de la circuiterie tout en augmentant la performance.

On peut citer l'exemple de l'Imec, le célèbre institut belge de recherche en microélectronique et nanotechnologies, qui, en coopération avec le centre de recherche néerlandais Holst, a présenté un circuit SoC (system on chip, voir Figure 5) radio multistandard dédié à la connectivité longue portée au sein de réseaux de capteurs. Ce circuit fonctionne dans les bandes de fréquence situées entre 780 MHz et 930 MHz, et supporte de multiples protocoles (IEEE 802.15.4g/k, Wireless M-Bus, KNX-RF, LoRa, Sigfox et le standard cellulaire NB-IoT).

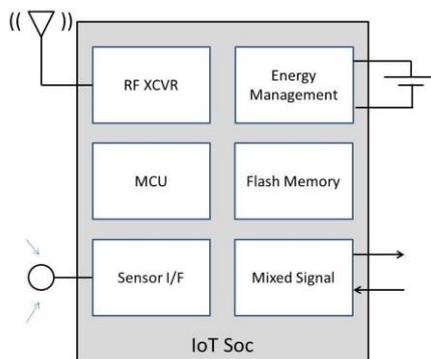


Figure 5 : Architecture SoC dédié IoT

L'infrastructure réseau.

Une station de base (gateway) LPWA suffit pour couvrir des dizaines de milliers d'objets distants de plusieurs kilomètres, réduisant les coûts de manière significative pour l'opérateur. En cas de forte densité d'objets, différentes techniques sont possibles pour réduire les interférences (ajustement de la puissance transmise par exemple), par contre l'augmentation du nombre de stations de base pour servir plus d'objets n'est pas toujours facile à mettre en œuvre car un objet n'est pas strictement affecté à une station (réseau en étoile et non cellulaire). Les réseaux LPWA ne donnent pas de garantie en termes de qualité de service.

A ce jour, les technologies LPWA sont principalement déployées dans des bandes libres encore appelée bande ISM (industrial, scientific and medical), par conséquent les coûts de déploiement et d'exploitation restent faibles. Le standard NB-IoT prévoit quant à lui de partager des bandes du réseau cellulaire déjà opéré par les opérateurs de réseaux mobiles (MNOs) pour éviter d'avoir à supporter des coûts de licence trop importants. Pour s'affranchir des interférences qui pourraient résulter de cette utilisation partagée, une bande de fréquences dédiée donc soumise à licence pourrait être également proposée.

3 Les technologies propriétaires

Les principales technologies LPWA identifiées à ce jour, présentées et commentées dans cette section :

- SIGFOX
- LoRa
- INGENU
- TELENSA
- QOVISIO

Un tableau de synthèse permet ensuite de comparer leurs principales caractéristiques.

3.1 SIGFOX

SIGFOX propose une solution de connectivité LPWA propriétaire. L'infrastructure se compose de stations de base déployées par des partenaires appelés SNOs (SIGFOX Network Operators). Les stations sont reliées à un ensemble de serveurs connectés à Internet. 28 pays sont couverts à ce jour.

Les objets connectés utilisent une modulation DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) en bande très étroite UNB (100 Hz). La porteuse est 868 MHz (Europe) ou 900 MHz (USA). Les principaux avantages de la solution sont une utilisation très efficace du spectre de fréquences, des niveaux de bruits très bas et donc une meilleure sensibilité au niveau du récepteur, et une consommation très basse. En

théorie, la distance séparant un objet d'une station de base peut atteindre 10 km en zone urbaine et 50 km en zone rurale.

En contrepartie, les débits très faibles (max 100 bps) se situent au bas de l'échelle comparés à ceux des technologies concurrentes. Initialement SIGFOX ne supportait que la communication montante de l'objet vers la station de base (uplink), mais une possibilité de communication descendante (downlink) a été ajoutée ensuite. En pratique il est possible de transmettre 140 messages de 12 bytes par jour pour être conforme à la régulation. En downlink le maximum est 4 messages de 8 bytes par jour, ce qui est insuffisant pour accusé réception de chaque message uplink envoyé. Pour fiabiliser la transmission, les messages uplink sont envoyés plusieurs fois sur des canaux de fréquences différentes. Chaque objet choisit une fréquence au hasard parmi les 360 disponibles (protocole ALOHA) pour transmettre, tandis que les stations de base balayent tous les canaux en permanence.

3.2 LoRa

LoRa définit la couche physique spécifiant la technique de modulation. Les fréquences utilisées sont toutes dans la bande "sub GHz ISM", elles varient entre 433MHz et 915 MHz suivant les zones géographiques. Une technologie à étalement de spectre appelée CSS (Chirp Spread Spectrum) a été développée par Semtech; elle consiste à transformer un signal d'entrée à bande étroite et à faible débit en un signal à large spectre. Cette technologie n'est pas nouvelle, elle est utilisée depuis plusieurs décennies dans le domaine militaire et spatial. Son principal intérêt réside dans l'augmentation de la portée et la résistance aux interférences. La portée augmente avec le facteur d'étalement (SF = spreading factor), mais au détriment du débit de données (variable entre 300 bps et 37,5 Kbps), il faut donc trouver un compromis entre les deux. La démodulation d'un signal noyé dans un bruit ambiant est relativement complexe, mais fait appel à des techniques connues. On peut aussi transmettre la même information plusieurs fois avec des paramètres de codage différents pour améliorer la fiabilité. La portée typique est 2-5 km en zone urbaine et 15 km en zone rurale mais ce n'est qu'un ordre de grandeur dépendant de l'environnement.

Contrairement à SIGFOX, LoRa est un réseau ouvert. Toute entreprise peut créer son propre réseau, en installant une antenne communiquant via Internet (par câble, wifi, 3G...) avec une station de base émettant en France sur la bande 868MHz. Le réseau LoRa est en cours de déploiement en France par Orange et Bouygues (via sa filiale Objenius) en commençant par les zones les plus peuplées (couverture nationale prévue pour fin 2017). Objenius couvre également 23 états aux USA. Des discussions ont en-cours pour étendre le service au niveau européen, en particulier en Allemagne.

3.3 INGENU

La technologie propriétaire LPWA d'INGENU se situe dans la bande ISM 2,4GHz. L'usage d'une technique brevetée appelée RPMA (Random Phase Multiple Access)

constitue la principale originalité de ce réseau. Comme le CDMA (Code Division Multiple Access), le RPMA permet de loger plusieurs transmetteurs sur le même canal, en ajoutant à chaque trame un décalage aléatoire. Dans ce schéma, les émetteurs parlent à tour de rôle, ce qui réduit le risque d'interférence entre canaux. Les stations de base décodent ensuite les trames émises dans les différents intervalles de temps. Le RPMA est utilisé uniquement en uplink, les stations de base utilisent le CDMA en downlink. Cette approche permet de travailler avec des signaux très faibles, la sensibilité du récepteur atteint -142 dBm.

INGENU cherche à standardiser la spécification de la couche physique sous la référence IEEE.802.15.4k.

3.4 TELENSA

TELENSA a développé une solution complète de gestion d'éclairage public urbain. Les lampadaires sont commandés à distance à partir de stations de base (voir Figure 6).

La technologie propriétaire utilisée est de type UNB, la porteuse est dans la bande ISM sub GHz. La couverture peut atteindre plusieurs kilomètres selon TELENSA, et 50 villes sont déjà équipées. Bien que théoriquement transposable à d'autres applications, cette technologie ne semble aujourd'hui utilisée que par TELENSA et pour ses besoins propres.

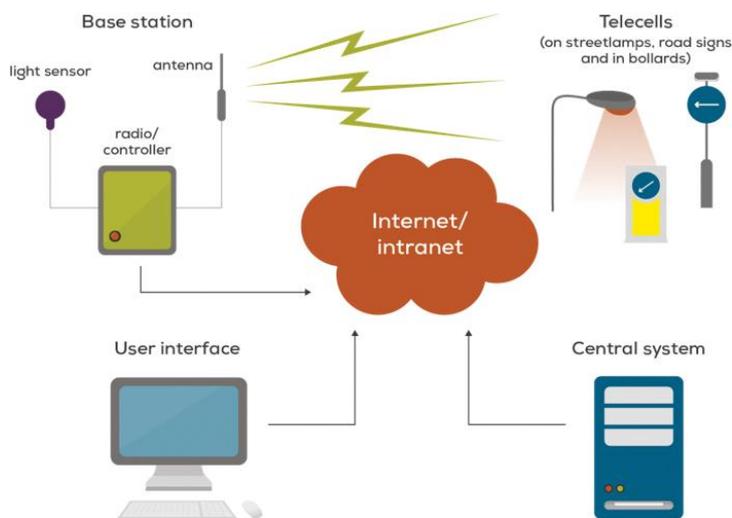


Figure 6 : Architecture TELENSA

La communication est bidirectionnelle, avec des débits de données du même ordre de grandeur que SIGFOX. TELENSA cherche à normaliser sa solution auprès de l'ETSI.

3.5 QOWISIO

Qowisio est un opérateur de réseau bas débit. Son réseau propriétaire bi-mode UNB/LoRa est déployé pour l'instant uniquement en France, en zones urbaines et sur les axes autoroutiers. Principales caractéristiques : bande de fréquence 868MHz,

portée 50 km en milieu rural, et 3 km en milieu urbain. Les données sont transmises uniquement dans le sens uplink, avec des débits compris entre 12 et 2400 bits/s, il n'est donc pas possible de paramétrer les objets communicants. Qowisio propose une gamme de tags directement utilisables et paramétrés suivant différents usages, ce qui simplifie la mise en œuvre de la solution. Le prix des tags inclut les coûts de communication.

3.6 Tableau comparatif des technologies propriétaires

Technologie	SIGFOX	LoRa(WAN)	INGENU	TELENSA	QOWISIO
Fréquence	Sub GHz ISM Eu = 868 MHz US = 902 MHz	Sub GHz ISM Eu = 433/868 MHz US = 915 MHz Asie = 430 MHz	ISM 2.4 GHz	Sub GHz ISM Eu = 868 MHz US = 915 MHz Asie = 430 MHz	Sub GHz ISM Eu = 868 MHz
Modulation UL	UNB - DBPSK	CSS	RPMA	UNB - FSK	UNB propriétaire
Modulation DL	UNB - GFSK	CSS	CDMA	UNB - FSK	Pas de DL
Débit UL	100 bps	0.3-37.5 kbps	78 kbps	62.5 bps	12 à 2400 bps
Débit DL	600 bps	0.3-37.5 kbps	19.5 kbps	500 bps	Pas de DL
Portée urbain	10 km	5 km	15 km	1 km	3 km
Portée rural	50 km	15 km			50 km
Topologie	étoile	étoile d'étoiles	Etoile/arbre	étoile	étoile
Taille message UL	12 octets	Max 250 octets suivant SF	6 octets à 10 Koctets	?	16 octets
Taille message DL	8 octets	Max 250 octets suivant SF	6 octets à 10 Koctets	?	Pas de DL
Authentification et cryptage	non	AES 128 bits	AES 256 bits	?	Oui

4 Les standards

Les solutions techniques proposées par les différents acteurs listés au paragraphe précédents ne sont pas compatibles. Les utilisateurs potentiels se trouvent confrontés à un dilemme :

- faire un choix purement technique. Parmi les solutions actuellement disponibles, laquelle correspond le mieux à mon besoin ?
- faire un pari sur le succès commercial de telle ou telle solution (coût, couverture réseau, part de marché, pérennité de l'entreprise...).

Le choix final est comme toujours technico économique, mais dans le cas des réseaux LWPA les paramètres sont nombreux, et l'équation particulièrement difficile à résoudre.

L'interopérabilité est un facteur clé pour l'adoption de ces réseaux, et pour leur utilisation à grande échelle. Plusieurs organismes s'y intéressent et déploient des efforts en vue de proposer un jeu de spécifications techniques standard. Les initiatives étant multiples, elles aboutiront probablement à plusieurs standards. Il est difficile de savoir aujourd'hui lesquels auront le plus de chances de s'imposer à moyen/long terme.

IEEE	802.15.4k - 802.15.4g 802.11 Long Range Low Power (LRLP)
ETSI	Low Throughput Networks (LTN)
3GPP	Enhanced MTC (eMTC) - Extended Coverage GSM (EC-GSM) NarrowBand IoT (NB-IoT)
IETF	6LPWAN / LP-WAN
Weightless SIG	Weightless – W/N/P
LoRa Alliance	LoRaWAN
DASH7 Alliance	DASH7
WIZE Alliance	WIZE

Figure 7 : Standards LPWA

La Figure 7 indique dans les cadres jaunes les standards de type LPWA en cours de discussion, ainsi que les organismes de normalisation ou alliances auxquels ils sont rattachés.

4.1 IEEE

L'IEEE prend pour point de départ deux standards 802.15.4 (réseaux bas débit sans fil) et 802.11 (wifi), et adapte les spécifications existantes aux exigences des réseaux IoT (puissance réduite, grande portée, réseau en étoile...).

4.1.1 IEEE 802.15.4k (Low Energy Critical Infrastructure Monitoring Networks LECIM).

Cette proposition de standard est dérivée du standard 802.15.4, qui est un protocole de communication dédié aux réseaux sans fil, tels que ZigBee et 6LoWPAN.

Le 802.15.4k permet d'augmenter la portée et la densité des nœuds. Pour atteindre cet objectif, des modulations de type DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) et FSK sont proposées pour la couche physique, en utilisant des canaux discrets ayant une bande passante comprise entre 100KHz et 1MHz. La porteuse se trouve dans les bandes ISM à 2,4GHz ou sub GHz. Les protocoles anti collision de type CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) PCA (Priority Channel Access) ou ALOHA sont utilisés. La topologie du réseau est en étoile.

Les couches physiques et MAC d'INGENU (voir plus haut) sont conformes à ce standard.

4.1.2 IEEE 802.15.4g (Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Unity Networks);

L'application visée est le compteur intelligent (smart metering). Elle se caractérise par un grand nombre d'objets connectés fixes, répartis à l'échelle d'une ville ou d'une région.

On retrouve plusieurs points communs avec l'IEEE 802.15.4k : mêmes fréquences, protocole CSMA/CA. Les différences portent sur la modulation, qui peut-être FSK, OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ou QPSK (Quaternary Phase Shift Keying).

4.1.3 IEEE 802.11 ah (Wireless Local Area Networks).

La norme wifi a fait l'objet de différentes évolutions et variantes depuis son démarrage en juin 1997 (a, b, g, n, ac, ad). En balayant rapidement ces versions successives, et en simplifiant un peu, on constate une tendance à l'augmentation du débit (de 1,2 Mbits/s à l'origine à 6,75 Gbits/s pour la version ad), et une portée à peu près constante de l'ordre de 20 à 30 m. La variante "ah" se caractérise une diminution importante du débit par rapport à la version "ac" tout en restant relativement élevé (quelques Mbits/s), une augmentation sensible de la portée (100 m environ), et une consommation plus faible que les réseaux WLAN classiques. Malgré ces efforts d'adaptation, ce standard n'atteint pas les niveaux de performance (consommation, portée, sensibilité...) de la plupart des réseaux décrits dans ce document, ce qui devrait limiter son usage à des cas particuliers.

4.2 ETSI

L'ETSI voudrait proposer un standard LWPA pour un échange bidirectionnel de données à bas débit. Le standard LTN (Low Throughput Network) est défini par 3 groupes travaillant sur les cas d'usages, l'architecture fonctionnelle, les protocoles et interfaces. Le standard n'impose pas le type de modulation, qui peut être à bande très étroite (SIGFOX, TELENZA...), ou orthogonale à étalement de spectre (OSSS-LoRa) dans la bande sub GHz ISM.

Les spécifications LTN concerneraient les interfaces de communication de l'ensemble de la chaîne "objet final/station de base/serveurs réseaux" ainsi que le cryptage des données et les procédures d'authentification.

Plusieurs fournisseurs de technologies LPWA participent aux groupes de travail de l'ETSI.

4.3 3GPP

Le 3GPP "3rd Generation Partnership Project" regroupe 7 organismes de standardisation dont l'ETSI. Le projet est actif dans le domaine des communications cellulaires incluant la partie radio, le réseau de transport et les services.

L'approche du 3GPP consiste à faire évoluer les standards existants pour les rendre compatibles avec les exigences de l'IoT (coût réduit, protocole simplifié, portée augmentée, faible consommation...) et non à créer des nouveaux réseaux et infrastructures.

4.3.1 eMTC (Enhanced MTC)

L'objectif est de faire évoluer la norme LTE (Long Term Evolution) vers une version MTC (Machine Type Communication) en dégradant les performances pour réduire les coûts et la consommation. Le 3GPP est ainsi passé par différentes versions : LTE catégorie 1, puis LTE catégorie 0 et enfin LTE catégorie M1. Voir tableau comparatif au § 4.3.4.

La bande passante est réduite de 20 MHz à 1,4 MHz, tandis que le débit passe de 10 Mbps à 1 Mbps pour la version M1 (ou eMTC). Pour diminuer la consommation, des modes de veille et de réception intermittente ont été ajoutés.

4.3.2 EC-GSM

Ce standard EC-GSM (Extended Coverage GSM) vise comme son nom l'indique à étendre la couverture du réseau GSM. En utilisant la bande sub GHz pour une meilleure pénétration à l'intérieur des locaux, un gain de +20dB est anticipé au niveau de la sensibilité du récepteur. L'EC-GSM met également en œuvre des techniques de retransmission et de traitement du signal pour améliorer la couverture et la performance du GPRS actuel. Les modulations proposées sont de type GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) ou 8-PSK pour un débit de données pouvant atteindre 240 Kbps. Ce standard a été publié en 2016.

4.3.3 NB-IoT

La technologie NB-IoT fait partie de la version 13 émise par le 3GPP en juin 2016. Elle satisfait les critères nécessaires à la connexion d'objets en masse, déjà évoqués dans ce document : longue portée, faible coût, faible énergie, faible volume de données à transmettre, forte capacité d'intégration.

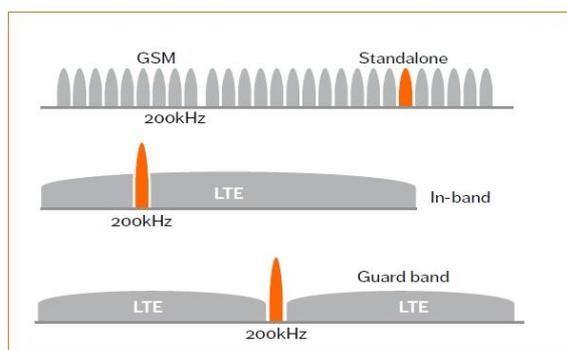


Figure 7 : Options de positionnement (source Ericsson Technology Review)

Le NB-IoT s'insère dans les bandes de fréquences (900 et 1800 MHz) déjà opérées par les opérateurs GSM dans une infrastructure réseau existante. La transmission des données s'effectue dans une bande de largeur 200 KHz pouvant soit occuper la place d'un canal GSM (mode standalone), soit s'insérer de manière dynamique à l'intérieur d'une porteuse LTE (mode in-band), soit dans la bande de garde entre 2 porteuses (mode guard band) : voir Figure 7.

La modulation en uplink est FDMA (Frequency Division Multiple Access) et OFDMA (Orthogonal FDMA) en downlink. Les débits maximum sont respectivement de 20kbps et 250kps en uplink et downlink.

Le fait d'utiliser des réseaux et bandes de fréquences sous licence existants est une sécurité comparé à d'autres approches utilisant des bandes libres, dont l'existence pourrait être remise en cause à l'avenir. Le coût unitaire des objets équipés de cette technologie serait inférieur à 5€, la portée serait multipliée par 7 par rapport à un équivalent GSM, avec une durée de vie de l'ordre de 10 ans pour les batteries et une capacité maximale de 40 objets par foyer.

Le déploiement du standard NB-IoT est étroitement lié à la progression de la technologie 5G, prévue de démarrer en 2020, mais des tests sont possibles dès maintenant. Au niveau mondial, 24 opérateurs se sont engagés à déployer le NB-IoT.

4.3.4 Tableau comparatif standards 3GPP

	LTE Rel-8 Cat-1	LTE Rel-12 Cat-0	LTE Rel-13 Cat-M1	NB-IoT Rel-13	EC-GSM-IoT Rel-13
DL peak rate	10 Mbps	1 Mbps	1 Mbps	~0.2 Mbps	~0.5 Mbps
UL peak rate	5 Mbps	1 Mbps	1 Mbps	~0.2 Mbps	~0.5 Mbps
Duplex mode	Full	Half or full	Half or full	Half	Half
UE bandwidth	20 MHz	20 MHz	1.4 MHz	0.18 MHz	0.2 MHz
Maximum transmit power	23 dBm	23 dBm	20 or 23 dBm	23 dBm	23 or 33 dBm
Relative modem complexity	100%	50%	20-25%	10%	Not evaluated
Note: peak data rates refer to full duplex operation for Cat-0 and Cat-M1					

4.4 IETF

L'IETF (Internet Engineering Task Force) s'est donné pour objectif de standardiser la connectivité IP de bout en bout pour les objets et applications à très bas débit. Les technologies LPWA émergentes utilisent des formats de données, des couches physiques et des protocoles de type MAC différents et sont de ce fait incompatibles. Le standard IEEE 802.15.4 ne répond pas à la question pour plusieurs raisons déjà évoquées : débits relativement élevés, formats de données trop longs, portée

réduite. Le groupe de travail formé par l'IETF en avril 2016 s'est donné pour principaux objectifs de réduire la taille des en-têtes, de travailler sur des mécanismes d'assemblage / désassemblage des paquets IPv6, d'alléger les protocoles, et d'améliorer la sécurité, la confidentialité et l'intégrité des données transmises.

4.5 LoRa Alliance

La couche physique LoRa décrite au §3.2 est une technologie propriétaire. Le protocole de communication et l'architecture du système ont été définis par l'Alliance LoRa sous le terme LoRaWAN. Le réseau étant configuré en étoile, le même message peut être reçu par plusieurs stations de base. En exploitant le TDOA (Time Difference of Arrival), il est possible de localiser la position de l'émetteur, à condition de se trouver dans une zone très bien couverte. Les données peuvent être cryptées (algorithme AES symétrique avec clé de 128 bits). Le protocole de contrôle d'accès (MAC) est de type ALOHA. La Figure 8 représente schématiquement l'architecture du réseau LoRa.

Trois classes de dispositifs connectés ont été définies en fonction des besoins applicatifs, avec des conséquences sur l'autonomie de la batterie :

Class A : le "end device" passe en mode écoute en réception (downlink) pendant une courte période suivant une transmission (uplink). Cela optimise la durée de vie de la batterie.

Class B : les messages de contrôle sont envoyés à certaines périodes convenues à l'avance, par conséquent les objets sont plus souvent "actualisés" dans ce mode qu'en Class A.

Class C : l'objet peut émettre et recevoir des messages en permanence et réagir dans un délai très court, en contrepartie il consomme de l'énergie en permanence.

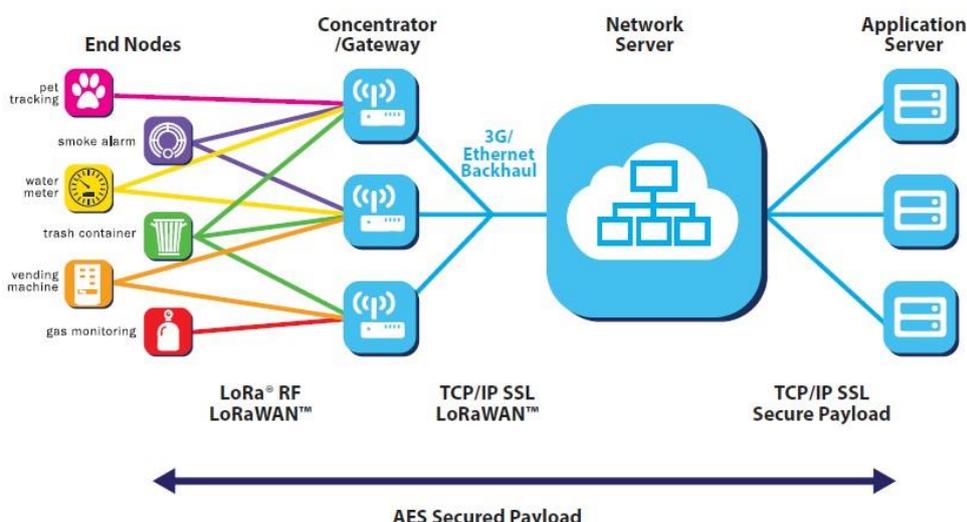


Figure 8 : Architecture du réseau LoRa

4.6 Weightless-SIG

Le Weightless Special Interest Group propose 3 standards LPWA ouverts, proposant chacun des fonctionnalités et des performances différentes, avec la possibilité de travailler dans des bandes de fréquences libres ou opérées.

4.6.1 Weightless-W

Ce standard utilise des bandes de fréquences TV libres. Plusieurs modulations sont possibles de type 16-QAM (quadrature amplitude modulation) et DBPSK (differential BPSK). La transmission se fait en bande étroite pour économiser l'énergie. L'inconvénient de cette approche est la disponibilité des fréquences, variable d'une région à l'autre, et pas forcément garantie.

4.6.2 Weightless-N

Le weightless-N est un standard à bande étroite travaillant dans les bandes sub GHz avec une modulation DPSK. La communication est uniquement possible dans le sens objet connecté → station de base, afin d'économiser l'énergie et de réduire les coûts de manière significative, par contre cela limite les cas d'usage.

4.6.3 Weightless-P

Pour cette variante weightless-P, la fréquence est sub GHz ISM la modulation en bande étroite (12,5 kHz) GMSK ou QPSK signal avec un débit de données compris entre 200 bps et et 100 kbps.

Les 3 standards offrent la possibilité d'authentifier les données en réalisant un cryptage à clé symétrique.

4.6.4 Tableau récapitulatif

	Weightless-W	Weightless-N	Weightless-P
Fréquence	TV libre (470-790MHz)	Sub GHz EU=868MHz US=915MHz	Sub GHz ISM
Débit données	1 kbps-10 Mbps	30 kbps-100 kbps	200 bps-100 kps
Modulation	16-QAM / DPSK	DPSK (uplink uniquement)	GMSK / QPSK
MAC	TDMA/FDMA	Slotted ALOHA	TDMA/FDMA
Cryptage	AES 128	AES 128	AES 128/256
Topologie	Etoile	Etoile	Etoile
Portée	5km+	5km+	2km+
Durée batterie	3-5 ans	10 ans	3-8 ans
Coût du terminal	Bas-moyen	Très bas	Bas
Coût du réseau	Moyen	Très bas	Moyen

4.7 DASH7 Alliance

L'association à but non lucratif DASH7 Alliance propose une extension du standard ISO 18000-7, spécifiant la communication de tags RFID à 433 MHz. Le standard DASH7 fonctionne dans la bande sub GHz ISM à 433 MHz, la modulation en bande étroite est de type GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) avec un débit de 200 kbps.

Le protocole MAC impose aux objets de vérifier périodiquement la présence d'une transmission downlink, ce qui augmente la consommation. Il est également possible d'établir des communications entre objets, et de crypter les données. La portée est limitée à 1000 m environ, ce qui limite son usage à l'intérieur d'un bâtiment ou d'un site industriel.

4.8 Wize

La Wize Alliance a été créée en mars 2017. Son objectif est de promouvoir une technologie utilisée depuis 10 ans pour la télé-relève des compteurs d'eau en local. Les nouveaux compteurs d'eau Gazpar, dont le déploiement à grande échelle commencera en France en mai 2017, en seront également équipés. Ses principaux atouts sont une longue durée de vie pour les batteries (20 ans), une bonne pénétration dans les bâtiments et en sous-sol. Les débits de données sont faibles mais suffisants pour les applications de comptage, de gestion des bâtiments (smart city) ou de l'éclairage public, avec une possibilité de chiffrement. Le système utilise une fréquence VHF de 169 MHz, de ce fait l'antenne d'émission occupe une taille assez importante au niveau de l'équipement.

5 Déploiement : enjeux et critères de choix

Le choix de la technologie la plus adaptée pour satisfaire un besoin donné ne peut pas se baser uniquement sur une comparaison des paramètres techniques énumérés jusqu'ici tels que le type de modulation, la portée, la sensibilité du récepteur, les débits UL et DL, le bilan énergétique, etc... puis sur la recherche du meilleur compromis.

La prise en compte des contraintes applicatives va naturellement favoriser certaines technologies, et en condamner d'autres.

Voici, pour chacune des technologies possibles, les critères importants à évaluer selon nous avant de prévoir un déploiement : lieu, saturation réseau et interférences, adaptabilité, débit de données, couverture réseau et géolocalisation, interopérabilité et standardisation, sécurité, maturité. Nous allons les développer un par un.

5.1 Lieu

Le lieu physique est le premier élément à caractériser pour le choix d'une technologie LPWA. Exemples de possibilités pouvant conduire à des solutions très différentes : objets situés dans un lieu unique, objets répartis sur plusieurs sites et devant être interconnectés, objets à l'air libre, enterrés ou semi enterrés (compteurs d'eau), environnement urbain, rural ou isolé (éloignement des antennes relais).

5.2 Saturation réseau et interférences

On prévoit que dans un avenir proche, des millions d'objets connectés se trouveront dans une zone géographique relativement limitée (quelques km²). Dans certaines applications, la capacité du réseau à allouer suffisamment de ressources (canaux, fréquences, time slots...) pour recevoir simultanément des informations émanant d'un très grand nombre d'objets peut être un facteur critique. Les objets peuvent transmettre à intervalles réguliers et programmés à l'avance, et/ou répondre quand on les interroge. Dans les différents réseaux étudiés précédemment, les liaisons downlink, quand elles existent, ont bien souvent des capacités limitées par rapport aux liaisons uplink, ce qui peut conduire à une saturation en cas de forte demande. En présence d'un fort trafic, toutes les technologies peuvent être perturbées, soit par des émissions utilisant les mêmes bandes étroites (fréquences libres) soit par des canaux adjacents "voix + vidéo" à large bande (réseau cellulaire de téléphonie mobile).

Les promoteurs des nouveaux réseaux LPWA ne communiquent pas ou peu sur ces limitations. Par ailleurs les faibles quantités d'objets déployées à ce jour ne permettent pas d'avoir un retour d'expérience.

5.3 Adaptabilité

Afin d'obtenir le meilleur compromis entre le débit des données, la fréquence des transmissions, la consommation d'énergie et la capacité du réseau, tout en assurant une liaison radio de bonne qualité, il peut être intéressant de pouvoir paramétrer les caractéristiques du réseau LPWA via la liaison descendante (downlink), afin de trouver rapidement la configuration optimale par itération.

5.4 Débit de données

Comme leur nom l'indique, les technologies LPWA sont conçues pour couvrir une zone large (wide area) tout ayant une faible consommation d'énergie (low power). Certaines technologies (exemple SIGFOX) ont opté pour un débit de données fortement réduit et des transmissions en bande étroite. L'impact de ces choix est très positif en termes de couverture réseau et de consommation, en revanche le débit limité ne convient pas à certains cas d'usage. Le réseau idéal devrait proposer plusieurs types de modulation commutables au niveau du hardware, et offrir la

possibilité de choisir le meilleur compromis "débit-portée-consommation" en fonction du besoin.

5.5 Couverture réseau et géolocalisation

Parmi les domaines d'applications des technologies LPWA, la logistique (containers, flottes de véhicules, colis...) et le suivi de production (outillages, maintenance, kanban...) sont souvent cités. Ces applications requièrent presque toujours un besoin de géolocalisation des objets, aussi bien à l'intérieur d'un bâtiment (indoor) qu'à l'extérieur (outdoor). Jusqu'à présent, pour suivre un objet en temps réel avec une bonne précision en outdoor, il faut l'équiper d'un système GPS complexe donc coûteux, relativement encombrant, potentiellement fragile, et gourmand en énergie. Aujourd'hui, les réseaux LPWA peuvent permettre une localisation à la fois indoor et outdoor. La précision dépend bien sûr du nombre de stations de base.

5.6 Interopérabilité et standardisation

Les porteurs des technologies propriétaires actuellement disponibles telles que LoRa ou SIGFOX sont aujourd'hui engagés dans une véritable course à la part de marché. Les points forts de chaque solution (couverture réseau, disponibilité, coût, support technique, outils d'aide au développement...) sont développés par le marketing pour séduire les nouveaux clients, les paramètres techniques ne faisant la différence qu'en cas de contrainte forte, par exemple : accès au réseau en zone isolée, consommation très faible, objet enterré.

L'interopérabilité entre les différentes alternatives n'est pas vraiment une préoccupation à ce jour, les acteurs en présence cherchant au contraire à distancer leurs concurrents afin d'établir un standard "de fait".

Parmi les technologies classées dans la catégorie "standards", le réseau NB-IoT semble le plus prometteur, car il est complètement intégré dans les fonctionnalités de la technologie 5G. Le NB-IoT sera déployé partout et en même temps que le réseau mobile 5G, dont l'adoption par les principaux opérateurs mondiaux est acquise. Grâce aux accords de roaming qui existeront certainement entre les différents opérateurs 5G, une interopérabilité régionale (d'un pays à l'autre) sera également assurée. Les deux principales inconnues sont : la date de disponibilité (à partir de 2020), et le rythme de déploiement qui devrait se faire prioritairement en zone urbaine pour maximiser le retour sur investissement des opérateurs.

5.7 Sécurité

Pour assurer la sécurité d'un réseau, il est nécessaire de mettre en place des mécanismes d'authentification, de cryptage, et de garantie de confidentialité des données échangées. Ces mécanismes impliquent des échanges bidirectionnels réguliers entre les objets connectés et les stations de base pour prendre en compte les demandes de transmission de données et les valider, être capable de

crypter/décrypter les données, de faire des mises à jour régulières... Parmi les technologies que nous avons décrites, certaines ne prévoient pas la possibilité de crypter les données (exemple SIGFOX). D'autres prévoient bien une possibilité de cryptage, mais en utilisant des protocoles simplifiés pour ne pas impacter le volume et le débit des données à transmettre, et pour économiser l'énergie. De plus ils utilisent en général des protocoles de cryptage symétriques impliquant un partage des clés secrètes et donc vulnérable au plan de la sécurité, par opposition au cryptage asymétrique utilisant deux clés, une publique et une secrète.

Dans tous les cas, il convient de traiter la question de la sécurité des échanges de données dans son ensemble à partir des attaques possibles, et de choisir le réseau LPWAN ensuite en fonction de ces contraintes.

5.8 Maturité

Les technologies propriétaires décrites à la section 3 peuvent être considérées comme matures techniquement, même si les réseaux sont encore en cours de déploiement. A l'inverse les technologies "standard" (section 4), bien que prometteuses, ne sont pas largement répandues à ce jour.

5.9 Acteurs

Comme expliqué dans ce document, les applications IoT sont diverses et les technologies disponibles nombreuses.

Globalement, trois briques de base sont nécessaires pour réaliser un réseau IoT complet :

- les devices (hardware) affectés directement aux objets connectés.
- le réseau permettant d'interconnecter les objets entre eux.
- les plateformes logicielles, chargées de contrôler l'ensemble du système et de traiter les données.

Certains acteurs sont capables de fournir une solution globale, incluant la partie réseau et la partie plateforme, et de réaliser l'interface avec des devices qu'ils auront choisis auprès d'un fournisseur partenaire. D'autres seront experts dans une seule des briques listées ci-dessus, dans ce cas l'utilisateur final devra bien connaître l'état de l'art pour choisir les bons fournisseurs en fonction de ses contraintes techniques et économiques.

Pour ce qui concerne le device, on peut entrer un peu plus dans le détail en séparant les parties "chipset" (circuit microélectronique) et "stack" (protocole de communication embarqué dans le device). Certains prestataires proposent des modules complets (ensemble chipset et stack) offrant des fonctionnalités diverses, et capables d'interfacer avec des capteurs externes, ce qui facilite l'intégration de la partie hardware dans le réseau.

Le CNRFID/Connectwave dispose d'un réseau d'adhérents et de partenaires compétents sur l'ensemble de la chaîne d'intégration et d'une expertise dans le domaine de l'IoT.

Nous sommes à votre disposition pour étudier votre besoin et vous conseiller.

6 Facteurs économiques

Dans le modèle économique classique de la téléphonie cellulaire, les opérateurs cherchent à augmenter l'ARPU (Average Revenue Per User) en proposant à leurs abonnés, grâce aux évolutions de la technologie, des volumes de consommation voix et données de plus en plus importants, et des services supplémentaires pour se différencier de la concurrence.

En comparaison, le revenu généré par un objet connecté à un réseau LPWA (temps de connexion court, bas débit) sera faible. Certaines applications rassemblent un nombre significatif d'objets connectés dans un même lieu (exemple bacs utilisés pour approvisionner un atelier de production suivant la méthode kanban) ce qui contribuera à augmenter les revenus, mais on reste à des niveaux de rentabilité relativement faibles. Pour augmenter leur valeur ajoutée, les opérateurs de réseaux LPWA vont mettre à la disposition de leurs clients, en plus des kits de développement hardware, des plateformes software de type SaaS leur permettant de déployer leur application dans un délai court, et avec un effort de R&D réduit.

7 Conclusion

Le présent document s'est donné pour objet de dresser un panorama, le plus complet possible mais certainement non exhaustif, des différentes techniques permettant de mettre en œuvre des objets connectés autour d'un réseau LPWA, dont les principales caractéristiques sont une basse consommation et une transmission à longue distance.

Nous nous sommes efforcés, sans être trop techniques, de lister les principaux avantages et inconvénients des solutions actuellement disponibles ou émergentes. Au-delà de la capacité de ces solutions à répondre techniquement au besoin en théorie, des éléments importants doivent être pris en compte tels que la disponibilité, le coût, la facilité de mise en œuvre, mais aussi l'existence d'un réseau de partenaires ayant adhéré au concept (exemple LoRaWAN) et donc susceptible de stimuler l'innovation, et de dynamiser l'offre en faisant jouer la concurrence.

L'émergence d'un standard n'est pas en vue à court terme. Parmi les standards possibles, le NB-IoT a des chances de susciter l'adhésion car il concentre une bonne partie des qualités recherchées pour réaliser un bon réseau LPWA tout en étant flexible. Le succès (ou l'échec) d'un nouveau standard dépendra du taux de pénétration atteint par les leaders comme LoRa ou SIGFOX au moment de son lancement, et de la capacité des opérateurs l'ayant adopté à les concurrencer au plan technique et économique, tout en offrant une bonne qualité de service.