

Les fréquences de l’IoT : un nouveau paradigme pour les ingénieurs radio

Par **Benoît PONSARD**
SIGFOX

L’ère des communications radio a commencé en 1895 avec les premières expérimentations de Marconi. Plus d’une centaine d’années après, le secteur des radiocommunications est dominé par les solutions cellulaires et leurs milliards de téléphones mobiles. D’abord conçus pour les communications *human-to-human* (H2H), les systèmes cellulaires ont ensuite servi les communications *human-to-machine* (H2M) puis le *machine-to-machine* (M2M). L’Internet des Objets (IoT en anglais) est apparu ensuite et a étendu le concept de connectivité à tout objet avec, bien sûr, une préférence pour la connexion par radio.

De nombreuses définitions existent pour l’IoT (Madakam 2015) ; elles sont essentiellement centrées sur la problématique du réseau qui doit acheminer les données produites par les objets connectés. Nous préférons donner ici une définition de l’IoT centrée sur les objets eux-mêmes, car ce sont eux qui apportent la plus forte contrainte dans le système global. Ainsi, « l’IoT, c’est la possibilité de connecter à Internet des objets que l’on ne considère pas, de près ou de loin, comme des ordinateurs ». Un champ de céréales, un détecteur de fumée, un compteur d’eau, un conteneur maritime entrent dans cette définition de l’Internet des Objets.

Une première conséquence de cette définition est l’absence de source native d’énergie électrique dans la quasi-totalité des objets connectés. L’ajout de piles ou de batteries est incontournable dans l’IoT et constitue une contrainte importante pour les communications radio. Les autres caractéristiques des communications de l’IoT sont les suivantes :

- messages applicatifs de taille très limitée : quelques octets suffisent pour coder une alarme de dysfonctionnement, une position GPS ou un index de comptage ;
- envois peu fréquents : les cas d’usage de l’IoT vont de moins d’un à une bonne centaine de messages par jour, mais on constate que la grande majorité émet un peu moins de dix messages sur une journée ;
- forte asymétrie des flux : la majorité des objets émettent beaucoup plus de messages applicatifs vers le réseau qu’ils n’en reçoivent du réseau ;
- forte densité d’objets connectés : les zones urbaines peuvent voir des densités de 50 k objets connectés au km², voire 1 M. Ces valeurs dépassent largement les densités que l’on observe en téléphonie cellulaire et nécessitent une grande adaptabilité en taille (en anglais : *scalability*) des solutions IoT ;
- longueur et prédictibilité de la durée des piles : pour les objets connectés, la durée de vie sur piles se compte souvent en années (voir plus de douze ans pour les compteurs d’eau) et non en jours comme pour les mobiles que l’on peut recharger dès que nécessaire. De plus, la prédictibilité et l’invariance de la durée des piles, quelles que soient les conditions radio, sont favorables à la gestion de grands parcs d’objets connectés.

Ces caractéristiques de communication sont très différentes des usages du cellulaire où, depuis presque trente ans, on recherche plus de débits par téléphone et plus de capacité par station de base. Les technologies cellulaires tentent, génération après génération, de tirer le meilleur parti des bandes de fréquences mises à leur disposition par les régulateurs, en organisant très strictement

l'usage temporel et fréquentiel du spectre par les mobiles connectés à une station de base. Cette approche, très consommatrice d'information de signalisation, ne peut pas convenir à l'IoT où l'on cherche, avant toute chose, à réduire le besoin énergétique des communications. C'est pourquoi les choix techniques de la radio IoT sont différents à la fois pour le spectre et pour les protocoles de communication.

C'est pour capturer cette nouvelle problématique que la société Machina Research (Machina, 2013) a forgé, dès 2013, la notion de *Low Power Wide Area Network* (LPWAN). Les LPWANs résolvent une apparente contradiction : des longues portées, pour couvrir de grands territoires avec un petit nombre de stations de base, tout en ayant de faibles puissances d'émission dans les objets connectés pour être compatibles avec une utilisation sur piles.

Éléments de choix pour les fréquences de l'IoT

La conception d'une solution de connectivité pour l'IoT doit répondre à trois choix : le cadre réglementaire, les longueurs d'onde optimales et la quantité de spectre nécessaire pour rendre le service attendu.

Le premier choix concerne le cadre réglementaire des fréquences utilisées. Les bandes licenciées offrent un environnement radioélectrique globalement favorable car prévisible : les interférences sont de nature connue puisque venant de systèmes à la technologie connue. L'inconvénient de ces bandes est le coût de leur licence d'exploitation qui peut mettre en péril le modèle économique de l'IoT, où les coûts unitaires de connectivité doivent être significativement plus bas que ceux des systèmes antérieurs (*i.e.* M2M).

L'autre approche consiste à utiliser les bandes à autorisation générale (bandes dites « sans licence »). Les contraintes de partage du spectre, rappelées dans le tableau ci-dessous, sont définies par le régulateur et généralement harmonisées par zone géographique. Elles sont toujours simples à mettre en œuvre et ne reposent que sur une décision locale à chaque objet qui veut émettre un message : elles ne nécessitent pas de coordination entre les objets. Le respect de ces contraintes donne un accès libre aux bandes de fréquence correspondantes mais cela crée, en revanche, un environnement d'interférence totalement imprévisible.

Zone géographique	Bande spectrale	Puissance max	Technique de partage du spectre
Europe	862-876 MHz	25 ou 500 mW	taux d'émission limité à 1% ou 10% de temps
Amériques	902-928 MHz	1W	saut de fréquence toutes les 400ms
Japon	920-923 MHz	20 ou 250mW	détection d'occupation du spectre avant émission

Contraintes de partage du spectre libre en sub-gigahertz.

Le deuxième choix concerne la longueur d'onde des fréquences pour l'IoT. Les fréquences UHF (300 MHz à 3 000 MHz) sont privilégiées avec un intérêt particulier pour la bande sub-gigahertz (800-1 000 MHz) qui présente un bon compromis entre la taille de l'antenne, les pertes de propagation et les performances des technologies radio intégrées sur silicium (*chipset radio*).

On notera que la bande sans licence à 2,4 GHz (bande du WiFi) n'est pas favorable aux systèmes LPWAN, car les pertes de propagation y sont trop importantes. Cette bande est en revanche

largement utilisée pour les évolutions de basse consommation des technologies actuelles (par exemple WiFi HaLow® et Bluetooth® Low Energy). On parle alors plutôt d'IoT de proximité.

Le troisième élément de choix concerne la quantité de spectre nécessaire au service de connectivité IoT. Alors que l'IoT de proximité peut profiter de la forte atténuation à 2,4 GHz pour faire de la réutilisation spatiale des fréquences, les réseaux LPWAN ne peuvent s'appuyer sur ce phénomène pour limiter leur besoin spectral car ils cherchent des distances de communication de plusieurs kilomètres, même en environnements urbains denses. La solution vient du profil de communication des objets connectés sur les réseaux LPWAN : des petits messages applicatifs peu fréquents, même émis par un très grand nombre d'objets connectés, se satisfont de quelques centaines de kilohertz de bande radio (ETSI, 2017).

Les systèmes actuels

Cellulaire

Avant de voir émerger le concept de connectivité généralisée à tous les objets, les technologies cellulaires ont été très tôt utilisées pour connecter des machines (approche M2M). Les premières solutions M2M ont utilisé le mode circuit, mais sans grand succès. C'est l'arrivée du GPRS au tournant des années 2000 qui a permis l'émergence de solutions vraiment M2M. Cette technologie cellulaire, simple d'emploi, utilise des canaux standards de 200 kHz de large dans les bandes licenciées 2G. Elle est largement disponible dans les réseaux de deuxième génération ou plus, mais son bilan de liaison maximum sans antenne (*i.e.* 144dB) laisse de nombreux trous de couverture, difficiles à contourner pour des machines à connecter dont le lieu d'installation n'est pas modifiable.

Le NB-IoT et le LTE-M sont les réponses récentes du 3GPP au problème des trous de couverture du M2M. Leur bilan de liaison accru améliore la couverture du service, même dans les endroits difficiles (environnement urbain dense, intérieur des bâtiments). Le LTE-M s'insère dans les plans de fréquences du LTE mais demande à l'objet de gérer une bande de 1,4 MHz pour établir ses communications, même en faible quantité. Le NB-IoT utilise des canaux dédiés de 200 kHz. Ces canaux peuvent être pris soit dans le spectre 4G (*in-band*), soit dans les bandes de garde du LTE (*guard band*), soit dans des bandes 2G (*stand alone*).

LPWAN

Pour les bandes sans licence, la connectivité radio de l'IoT est conditionnée par une contrainte forte : la limitation de la puissance émise des bandes sans licence qui, en Europe et selon la bande de fréquence, est de 25 ou 500 mW. Pour obtenir une grande distance de communication et limiter les trous de couverture radio, il faut mettre en œuvre des modulations innovantes en émission et un traitement de signal performant en réception, afin d'avoir un grand bilan de liaison malgré une faible puissance autorisée en émission.

La société Semtech a opté pour la technologie LoRa (pour *Long Range*) inventée par la société française Cycleo. Le signal émis est étalé en CSS (*Chirp Spread Spectrum*) dans un canal radio de 125 kHz. En réception, un circuit intégré spécialisé détecte le signal par corrélation, éliminant ainsi les bruits et perturbateurs aléatoires, présents dans le canal. Un réseau LPWAN CSS utilise plusieurs canaux en fonction de la densité de messages à acheminer.

Contrairement à l'étalement de spectre, la technologie 3D-UNB de Sigfox utilise une modulation par sous-porteuse aléatoire à bande ultra-étroite. Cette technique, qui peut s'apparenter à de l'OFDM « non orthogonal », concentre l'énergie émise sur un message dans une seule sous-porteuse (on parle alors de « quasi-tone ») dont la fréquence centrale est aléatoire. Côté réception, une grande dynamique et une grande linéarité permettent d'extraire chaque signal reçu par filtrage

adaptatif. Chaque quasi-tone occupant un espace spectral de quelques centaines de hertz, un très grand nombre de quasi-tones peuvent être émis simultanément et reçus avec une faible probabilité de collision dans une bande spectrale de quelques centaines de kilohertz. À titre d'exemple, le service de connectivité de toute l'Europe est assuré par le réseau Sigfox avec 2x200 kHz de bande spectrale dans les fréquences sans licence 868-870 MHz.

De plus, la technologie 3D-UNB s'appuie sur une approche totalement innovante de l'usage du spectre inventée, elle aussi, par Sigfox. Appelée "pervasive listening", cette technologie consiste à mettre le réseau des stations de base au service des objets : toutes les stations de base écoutent ensemble la même bande spectrale de 200 kHz. Ainsi, un objet voulant émettre un message n'a pas besoin de s'inscrire auprès d'une station pour que ses messages soient traités par celle-ci. Il lui suffit d'émettre sa trame de données directement (on pourrait dire sans crier gare) ; elle sera reçue par une station et, la plupart du temps, par plusieurs stations. Cette réception multiple, volontairement recherchée lors du déploiement des stations de base, apporte une diversité spatiale favorable à la qualité de service. Le "pervasive listening" est une nouvelle façon d'utiliser le spectre radio, bien adaptée aux problématiques de l'IoT évoquées plus haut. L'objet peut être très simple puisqu'il accède à la ressource radio de sa propre initiative. Toute la complexité de gestion de l'accès aléatoire et des interférences dues aux collisions est repoussée dans les stations de base et le cœur de réseau de Sigfox.



Stations de base du réseau Sigfox.
©SIGFOX

L'IoT par satellite

Les communications par satellite sont perçues comme potentiellement disponibles sur tout le globe. L'IoT par satellite suit cette même logique, en particulier pour les cas d'usage de la logistique inter- ou trans-continentale et le suivi d'objets en zones isolées. En comparaison des autres systèmes de communication par satellite, l'IoT présente une contrainte technique forte : la faible énergie disponible donc la faible puissance pour émettre des objets vers le ou les satellites. Par exemple, une puissance de 25 mW permet d'être reçu par un satellite en orbite basse (LEO : *Low Earth Orbit*), mais pas par un satellite géostationnaire. Dans l'état actuel des techniques, un service de connectivité IoT par satellite nécessitera donc une constellation de satellites LEO.

Pour les liaisons montantes (des objets vers la constellation), on a la possibilité de prendre des fréquences radio dédiées aux communications vers les satellites ou des fréquences sans licence. La réutilisation de fréquences sans licence permet d'obtenir une continuité de service du point de vue des objets, car ceux-ci émettent leurs données de la même façon, qu'ils soient en vue de stations de base terrestres, ou seulement en vue de la constellation de satellites. Pour les liaisons descendantes, les fréquences doivent réglementairement être prises dans les bandes harmonisées pour satellites. La partie du spectre UHF en dessous de 1 GHz offre, là aussi, un compromis intéressant. Le vrai point dur de l'IoT par satellite est sa capacité à gérer un grand flux de messages lors du passage des satellites au-dessus des zones denses.

Et pour l'avenir ?

Pour la très grande majorité des usages liés à l'IoT, les fréquences UHF proches du gigahertz sont intéressantes pour toutes les technologies de connectivité envisagées actuellement, qu'elles soient cellulaires, LPWAN ou satellitaires. Elles présentent l'avantage d'un bon compromis entre les pertes de propagation, la dimension des antennes et les possibilités des techniques intégrées sur silicium. Leur principale limite vient de l'absence d'harmonisation mondiale qui oblige à développer des designs radio pour chaque réglementation. Même avec un très vaste déploiement, l'IoT ne représente qu'une faible quantité de données à transporter par unité de surface. Il n'est donc pas impensable d'envisager, à terme, un spectre harmonisé mondialement pour la connectivité IoT car quelques centaines de kilohertz suffisent pour délivrer un service global. Le *challenge* le plus important sera de simplifier l'accès au spectre pour des objets qui doivent être peu complexes. C'est là un nouveau défi pour les fréquences de l'IoT.

Bibliographie

MADAKAMS., RAMASWAMY R. & TRIPATHI S. (2015), "Internet of Things (IoT): A Literature Review", *Journal of Computer and Communications*, 3, 164-173, <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>

Machina Research (2013), "Revolution, evolution or distraction? View on emerging low power wide area wireless technologies in M2M", webinar, 3rd June 2013, <https://machinaresearch.com/news/webinar-revolution-evolution-or-distraction-machina-researchs-view-on-emerging-low-power-wide-area-wireless-technologies-in-m2m>, consulted on March 2019

ETSI (2017), "System Reference document (SRdoc); Short Range Devices (SRD); Technical characteristics for Ultra Narrow Band (UNB) SRDs operating in the UHF spectrum below 1 GHz", ETSI TR 103 435 v1.1.1, February 2017.