

Les protocoles de l'Internet au service de l'interopérabilité de l'Internet des objets

Par **Marianne LAURENT**

Directrice marketing au sein de la start-up Acklio

Alexander PELOV

Président et cofondateur d'Acklio

Et **Laurent TOUTAIN**

Professeur associé au département Systèmes réseaux, Cybersécurité et Droit du numérique de l'IMT-Atlantique

L'Internet des objets (IoT) est un des piliers des transformations numériques, énergétiques et industrielles du XXI^e siècle. Il définit un monde multi-connecté, multipliant nos sources d'information pour piloter nos processus par la donnée. Le I de IoT sous-entend que l'Internet des objets serait une extension de l'Internet à de nouveaux objets communicants entre eux et avec le réseau. Pourtant, la déferlante attendue de milliards d'objets repose sur des ruptures majeures avec le modèle de l'Internet classique, impliquant des compromis qui soulèvent des défis d'interopérabilité et de pérennité des solutions.

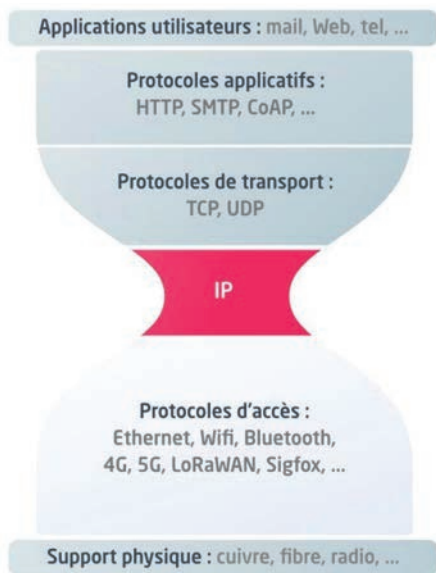
IP : protocole d'interopérabilité universel

Internet connaît une croissance exponentielle depuis la connexion des deux premiers ordinateurs en 1969. Ce succès à l'échelle planétaire repose sur deux grands principes architecturaux. D'abord, le principe de reconfiguration automatique permet au réseau de croître à l'infini, en adaptant sa topologie à chaque entrée ou sortie d'un équipement dans le réseau. Ensuite, le principe de bout en bout reporte un maximum de fonctionnalités vers les extrémités du réseau pour maintenir son cœur le plus simple et efficace possible.

Le principe de bout en bout repose sur IP (pour Internet Protocol). Souvent confondu avec le nom du réseau, Internet est le nom du protocole qui y assure l'adressage et le routage. Il est utilisé par toutes les applications (navigation *web*, *email*, *streaming*, etc.) et est déployé dans tous les nœuds d'Internet. Les routeurs IP font transiter les paquets, sans se soucier des technologies réseaux sous-jacentes. IP interconnecte les réseaux en toute transparence. Ainsi, l'infrastructure du réseau IP n'est rien d'autre qu'un véhicule pour le transport des données d'un bout à l'autre de la planète, fournissant des interfaces simples pour des applications « intelligentes » !

Internet est souvent représenté par une pile de protocoles en forme de sablier : le goulot d'étranglement illustre la simplicité fonctionnelle d'IP et son rôle de pivot entre les protocoles de haut niveau dédiés aux applications et les protocoles de bas niveau relatifs aux réseaux d'accès. Autrement dit, il masque les différences entre les technologies d'accès, et présente une interface de service unifiée aux applications, supprimant toute corrélation entre le support physique et son utilisation.

En mutualisant une même infrastructure à de multiples services, on réduit les coûts tout en enrichissant l'offre. C'est par exemple le cas du courrier, du téléphone ou de la télévision. Traditionnellement liés à leur réseau de distribution, sur Internet ils sont proposés dans des modèles gratuits pour un niveau de service souvent meilleur (haute définition, contenus à la



Source : D. R.

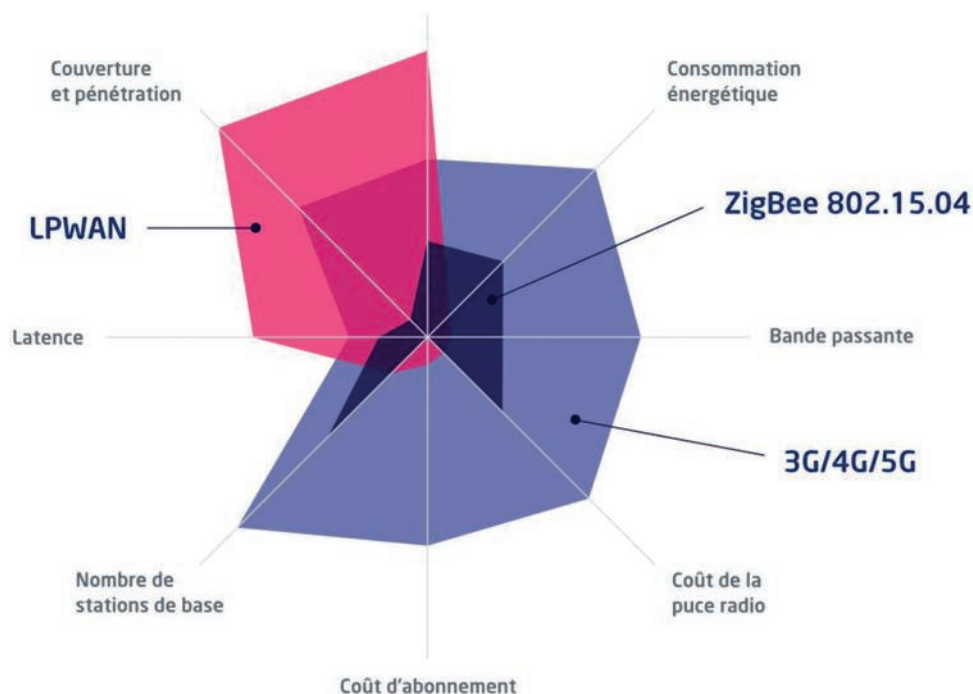
demande, archivage, multi-utilisateurs, etc.). Qui plus est, tous les développeurs maîtrisent IP et les technologies inhérentes au développement Internet. Quant à l'utilisateur final, peu importe comment Internet fonctionne, ses services lui sont désormais disponibles en mobilité, quels que soient le périphérique, la technologie d'accès ou la région du globe.

Émergence d'un IoT en rupture avec le modèle de l'Internet

LPWAN : les nouvelles connectivités réseaux IoT

L'IoT permet de capturer de l'information sur nos environnements pour optimiser nos processus, économiser des ressources ou augmenter la productivité. On peut contrôler une chaîne logistique à l'aide de capteurs et actuateurs, faire dialoguer des voitures pour éviter les collisions ou

améliorer les circuits de collecte des bennes de recyclage en connaissant leur taux de remplissage. Ces cas d'usages nécessitent des solutions de capture et de transmission de données à bas coût, et économes en énergie. Pour y répondre, des technologies émergent depuis une dizaine d'années : une nouvelle génération d'objets communicants, et des réseaux à longue portée et basse consommation (dits "LPWAN" pour Low-Power Wide-Area Networks).



Source : <https://www.techplayon.com/low-power-wide-area-networks-lpwan/>, adaptée pour Acklio

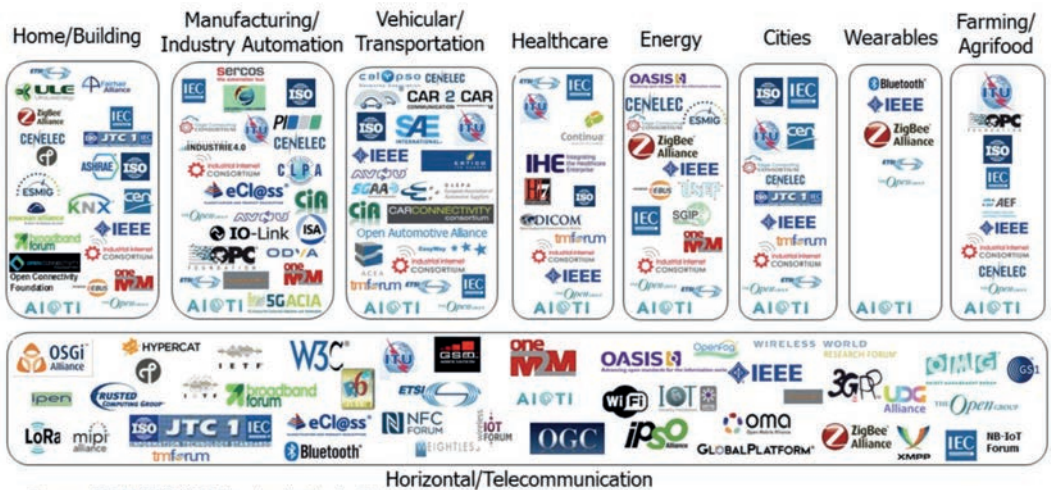
Ces derniers assurent des portées de plusieurs kilomètres et une très faible consommation énergétique aux terminaux pour des durées de vie atteignant jusqu'à dix ans sur une pile bouton. Les réseaux LPWAN complètent ainsi le paysage des connectivités IoT réunissant déjà les protocoles sans-fil courte portée (Bluetooth, Zigbee), les réseaux locaux sans-fil hérités (Wi-Fi) ou les technologies cellulaires (GSM, UMTS, LTE). Né avec l'émergence de technologies dans le spectre de fréquences libres telles que Sigfox et LoRaWAN®, l'espace LPWAN s'étoffe rapidement sur bandes de fréquences licenciées (NB-IoT et LTE-M) grâce au soutien des opérateurs de réseau mobile. Dernièrement, de nouvelles solutions satellites portées par des constellations en orbite basse offrent des couvertures mondiales.

Rupture technologique et fragmentation du marché

Mais ces avantages ont un prix. IP a été pensé pour des réseaux sans contrainte de débit, supportant des fonctionnalités non accessibles aux LPWAN du fait de leur bande passante limitée et du mécanisme de mise en veille profonde des terminaux. IP impose au réseau d'accès de prendre en charge des paquets d'au moins 1 280 octets (RFC 8376), bien au-delà des capacités LPWAN (notamment 12 octets pour Sigfox et maximum 256 pour LoRaWAN). Pour finir, IPv6 ajoute au moins 40 octets d'entêtes aux messages, soit parfois plusieurs trames LPWAN.

Ainsi, les réseaux LPWAN se sont développés en marge du monde IP, impliquant des arrangements avec le modèle du sablier. En l'absence d'IP, les services des couches réseaux et transport sont pris en charge au niveau applicatif, ou à défaut par la couche liaison. Ainsi, cette dernière est optimisée et spécifique à chaque technologie radio tandis que l'application est le plus souvent liée directement au format de trame. Il en résulte des déploiements conçus, sécurisés et exploités en silos. Sans IP, pas d'interopérabilité possible entre technologies LPWAN – ni entre elles, ni avec l'Internet. La migration d'une connectivité à une autre implique de reconstruire l'ensemble de la chaîne. Pour un projet IoT, les industriels doivent d'abord choisir la technologie d'accès, puis ajuster le choix des capteurs, des plateformes et enfin assurer l'intégration à l'architecture existante. Choisir une connectivité, c'est donc prendre un risque sur l'obsolescence, la pérennité de l'investissement, et l'utilisation simple et sécurisée des données.

Face à cette complexité, le marché de l'IoT tend à se « verticaliser » autour de solutions préconfigurées de bout en bout. Le nombre de plateformes explose (600 plateformes répertoriées



Source: AIOTI WG3 (IoT Standardisation) – Release 2.9

Paysage des organismes de normalisation et alliances IoT (Source : AIOTI 2019)

en 2019⁽¹⁾) soutenant indirectement des écosystèmes cloisonnés par un choix limité de protocoles, de formats de données et souvent des interfaces (API) propriétaires. En parallèle, le panorama AIOTI 2019⁽²⁾ met en évidence la nécessité de simplifier le paysage normatif IoT, foisonnant d'activités de normalisation liées aux verticales métiers et aux connectivités.

Gestion de la convergence dans les couches hautes

Face à la fragmentation du marché et à l'absence de support des couches IP dans l'IoT, l'interopérabilité est communément abordée au niveau applicatif.

Pour faire le pont entre environnements hétérogènes et raccorder des déploiements IoT à des déploiements hérités du monde IP, il est commun d'utiliser des passerelles de traduction protocolaires. Solutions logicielles ou matérielles, celles-ci peuvent parfois raccorder plus d'une dizaine de protocoles. Néanmoins, ces équipements ne sont pas transparents : ils doivent être interfacés avec l'ensemble des éléments du réseau pour re-router les messages. Chaque trame est réinterprétée au niveau de la passerelle, ce qui nuit aux performances du réseau, rend difficile le passage à l'échelle et ouvre de potentielles failles de sécurité en cassant le chiffrement de bout en bout.

Une autre solution est d'utiliser des plateformes horizontales multi-technos, qui offrent l'intégralité des fonctions nécessaires à la mise au point et à l'opération d'un service. Ces plateformes peuvent être génériques ou spécialisées, propriétaires ou standardisées. Les fournisseurs de *cloud* tels que Microsoft Azure et AWS sont des exemples pour des plateformes génériques et propriétaires. Des plateformes génériques et standardisées, telles que l'Open Connectivity Foundation (OCF)⁽³⁾ et oneM2M⁽⁴⁾, sont accompagnées par des implémentations *open-source*, parfois intégrées à des solutions propriétaires. Les plateformes spécialisées et standardisées sont liées aux cas d'usages (notamment DLMS⁽⁵⁾ pour les compteurs électriques, KNX pour les bâtiments connectés), ou à des fonctions spécifiques telles que LightweightM2M⁽⁶⁾ pour la gestion des modules cellulaires.

Mais si la plupart de ces plateformes s'appuient sur IP, l'échange d'information est structuré et sécurisé en fonction de chacune. Par exemple, MQTT est un protocole basé sur TCP/IP, massivement utilisé par les fournisseurs de *cloud*. Cependant, deux objets conçus pour deux *clouds* distincts ne pourront ni communiquer librement, ni changer leur *cloud* d'origine, quand bien même les deux utiliseraient MQTT/TCP/IP. D'autres approches d'interopérabilité sémantique tentent d'apporter une réponse générique comme le Web of Things du W3C⁽⁷⁾, ou plus pragmatique comme le Semantic Definition Format de OneDM⁽⁸⁾ et l'IETF⁽⁹⁾, soutenu par Zigbee, OMA SpecWorks et OCF.

D'une part, l'existence de systèmes historiques et, d'autre part, la diversité des exigences liées aux cas d'usages IoT font qu'aujourd'hui, il n'existe ni *framework* ni standard universel capable de couvrir l'ensemble. Il faut donc avoir une approche pragmatique, dans laquelle on cherche à avoir une interopérabilité sur un domaine plus restreint et assurer au maximum l'interopérabilité avec les domaines adjacents.

(1) IoT Analytics (2019), "IoT platform companies landscape 2019/2020: 620 IoT platforms globally", <https://iot-analytics.com/iot-platform-companies-landscape-2020/>

(2) "IoT LSP standard framework concepts release 2.9 AIOTI WG03 – IoT standardisation", October 2019, <https://aioti.eu/wp-content/uploads/2019/10/AIOTI-WG3-SDOs-Alliance-Landscape-IoT-LSP-standrad-framework-R2.9-Published.pdf>

(3) <https://openconnectivity.org/>

(4) <https://www.onem2m.org/>

(5) <https://www.dlms.com/>

(6) https://technical.openmobilealliance.org/Overviews/lightweightm2m_overview.html

(7) World Wide Web Consortium, <https://www.w3.org/WoT/>

(8) <https://onedm.org/>

(9) <https://datatracker.ietf.org/wg/asdf/about/>

La couche IP désormais disponible aux LPWAN pour unifier les solutions IoT

On comprend donc que, quand bien même ces solutions applicatives répondent à des problématiques de convergence à petite échelle, un réseau qui fait l'économie d'IP perd de sa valeur. Silotage des solutions, coûts inhérents aux développements sur mesure et à leur évolution, dépendance aux fournisseurs et spécialisation des compétences forment un faisceau de freins pour le décollage tant attendu de l'IoT. Mais le marché gagne aujourd'hui en maturité. Des acteurs clés, ayant jusqu'ici construit leurs solutions sur des technologies propriétaires, convergent à présent sur des solutions construites au-dessus d'IP.

C'est le cas d'Amazon, Apple et Google, qui, en partenariat avec la Connectivity Standards Alliance (CSA), ont lancé l'initiative "Connected Home over IP" fin 2019 pour aligner le développement de leurs solutions domotiques sur un socle applicatif commun basé sur IP. Cette alliance nommée Matter réunit déjà près de 200 membres⁽¹⁰⁾. Une initiative similaire est portée par BACnet, KNX, OCF, Thread et CSA dans le bâtiment connecté. Ensemble, ils préconisent l'adoption d'une infrastructure IP sécurisée et multistandard comme épine dorsale du pilotage et de l'automatisation des bâtiments. IP-BLiS entend ainsi garantir aux gestionnaires de bâtiments une connectivité plus rapide et moins coûteuse, une meilleure intégration entre applications et un large choix de connectivités⁽¹¹⁾. Tout porte à croire que cette tendance va s'accélérer et s'étendre rapidement à d'autres verticales métiers. D'ailleurs, des recherches sur la théorie des jeux ont montré que les systèmes en couche convergent invariablement vers un modèle en sablier (Akhshabi et Dovrolis, 2011).

Et pour les LPWAN ? La problématique se résume dans cette équation : appliquer les principes qui ont fait le succès de l'Internet tout en s'adaptant aux contraintes de consommation énergétique, de temps de calcul et d'échange de données. L'Internet Engineering Task Force (IETF), instance de standardisation qui définit les architectures et protocoles de l'Internet, dédie depuis 2016 un groupe de travail à la mise en œuvre d'IPv6 sur les LPWAN. Cet effort se concrétise aujourd'hui dans une suite de standards dédiés. SCHC (prononcé « chic ») pour Static Context Header Compression (RFC 8724) est un mécanisme de compression et de fragmentation qui évite la synchronisation entre les éléments d'un réseau LPWAN – opération coûteuse en bande passante. Étant donné la nature hautement prévisible des flux de données en IoT, on peut décrire, partager et stocker à l'avance le contexte de communication. On allège ainsi la quantité de données transmises, tout en rendant possible l'utilisation d'IPv6 et de nombreux protocoles associés.

L'IETF apporte ainsi le principe de bout en bout aux réseaux LPWAN, en offrant une couche d'adaptation entre IPv6 et la connectivité sous-jacente. SCHC transforme un objet LPWAN en un objet IP, adressable facilement depuis n'importe quelle application Internet. En permettant d'utiliser IP de bout en bout, depuis le *cloud* jusqu'au terminal, SCHC permet une intégration sans couture avec le reste des solutions réseaux et applicatives des clients.

Pour l'IoT, c'est une nouvelle rupture qui libère les LPWAN des compromis jusqu'alors réalisés sur l'interopérabilité. Il devient possible de tirer le meilleur parti des LPWAN pour construire des solutions sur un portefeuille de connectivités variées : SCHC prend en charge l'adaptation à la couche réseau sous-jacente. Les LPWAN supportant désormais IP, on peut en bénéficier pour remplacer ou compléter des environnements hérités du monde IP. L'implémentation SCHC d'Acklio permet par exemple de déployer des compteurs électriques ou de densifier des réseaux d'automates industriels Modbus sur LoRaWAN, mais aussi d'utiliser les LPWAN comme connectivité de secours pour des routeurs IP classiques.

(10) <https://buildwithmatter.com/>

(11) <https://www.ipblis.org>

L'utilisation d'IP supprime ainsi le besoin de passerelles sur mesure pour traduire le trafic réseau d'une technologie à une autre. SCHC élimine les risques de verrouillage des fournisseurs et permet des investissements à l'épreuve du temps. Il répond spécifiquement aux besoins de l'écosystème IoT, et accélère le marché de l'IoT.

Perspectives

Internet est un ensemble de technologies qui ont permis de construire le plus grand réseau au monde et dont on ne connaît pas encore les limites. Sa simplicité fonctionnelle garantit une interopérabilité universelle des réseaux IP, leur assure une haute performance et permet d'innover au niveau applicatif pour porter un nombre croissant de services. Ces technologies répondent aussi de manière très pragmatique à des enjeux économiques et très opérationnels de délai d'accès au marché, de pérennité des solutions et de rentabilité des investissements. Mais surtout, IP est un standard ouvert, mature et omniprésent. Supporté par la plupart des systèmes d'exploitation (sinon tous), il offre une interopérabilité native avec les systèmes d'information et les infrastructures de réseau préexistantes. Simple, efficace et évolutif, IP est désormais prêt à connecter les prochains milliards d'objets communicants !

Bibliographie

AIOTI (2019), "IoT LSP standard framework concepts release 2.9 AIOTI WG03 – IoT standardisation", <https://aioti.eu/wp-content/uploads/2019/10/AIOTI-WG3-SDOs-Alliance-Landscape-IoT-LSP-standrad-framework-R2.9-Published.pdf>

AKHSHABI S. & DOVROLIS C. (2011), "The evolution of layered protocol stacks leads to an hourglass-shaped architecture", *Actes du colloque SIGCOMM'11*.

RFC 8376, <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc8376/>

RFC 8724, <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8724>

TOUTAIN L. (2018), « Une gouvernance pour l'Internet des Objets ? », *Enjeux numériques*, n°4, décembre, pp. 37-41.

TOUTAIN L., GIROD-GENET M. & SINGH K. (2021), « Programmer l'Internet des objets », MOOC de l'IMT Atlantique sur France Université Numérique : <https://www.fun-mooc.fr/en/cours/programmer-linternet-des-objets/>

WANG W. G., TOLK A. & WANG W. P. (2009), "The levels of conceptual interoperability model: Applying systems engineering principles to M&S", Spring Simulation Multiconference (SpringSim'09) *Proceedings*, San Diego, CA, USA.