

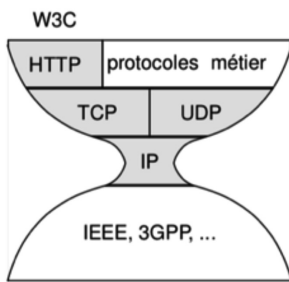
Une gouvernance pour l'Internet des Objets ?

Par Laurent TOUTAIN
IMT Atlantique

L'Internet est devenu le vecteur dominant de communication de l'information, incluant au fil des ans aussi bien le transport des données que la téléphonie ou la télévision. Comment va-t-il intégrer les communications avec les objets ?

Cette position hégémonique s'explique par un système ouvert permettant à différents acteurs d'évoluer autour d'un référentiel commun. Le modèle architectural simple, décrit d'une manière provocatrice par un sablier⁽¹⁾, est la simple interprétation du modèle à sept couches à la base des communications numériques. Chaque couche implémente un protocole. En les assemblant, un service de communication mondial est construit, adapté aux informations qui doivent être véhiculées.

Les protocoles de l'Internet



L'Internet, *stricto sensu*, se place au centre du modèle. Il se situe entre les protocoles chargés du transport des données sur type de connectivités (filaire, radio...) et les applications utilisant ces protocoles. Les concepteurs de l'Internet insistent sur le fait que le protocole qui joue ce rôle central (IP : Internet Protocol) a une interaction limitée avec aussi bien les couches basses qu'avec les protocoles de niveau supérieur. Le protocole IP s'adapte simplement à tout moyen de communication. IP propose ainsi une abstraction des moyens de communication aux couches applicatives, rendant l'accès au réseau et l'adressage universels. Les travaux sur la théorie de jeux⁽²⁾ montrent que tout système en couches évolue vers un protocole central unique tout en permettant une grande diversité d'éléments à la base et au sommet du système.

Un protocole simple contribue à l'efficacité. Le traitement dans les routeurs, ces équipements chargés d'aiguiller l'information dans le réseau, doit être le plus rapide possible pour traiter un maximum d'informations par seconde. De plus, IP ne spécialise pas le réseau pour un service ou un autre, il ne fait qu'aiguiller l'information vers la bonne destination. D'autres protocoles, en périphérie du réseau comme TCP, sont chargés de vérifier que les données sont correctement reçues ou, au contraire pour la téléphonie, d'autoriser des pertes de données.

Un protocole simple contribue à l'efficacité. Le traitement dans les routeurs, ces équipements chargés d'aiguiller l'information dans le réseau, doit être le plus rapide possible pour traiter un maximum d'informations par seconde. De plus, IP ne spécialise pas le réseau pour un service ou un autre, il ne fait qu'aiguiller l'information vers la bonne destination. D'autres protocoles, en périphérie du réseau comme TCP, sont chargés de vérifier que les données sont correctement reçues ou, au contraire pour la téléphonie, d'autoriser des pertes de données.

Pour le grand public, l'Internet désigne surtout la totalité de cet assemblage protocolaire et est souvent confondu avec l'application qui a démocratisé son usage : le Web. Il formalise les interactions entre un client et un serveur. Le serveur gère des éléments d'informations appelés ressources et désignés de manière unique par des URI (*Uniform Resource Identifier*). Le protocole HTTP formalise les interactions entre les clients et les serveurs par le biais de primitives simples : par exemple GET pour obtenir une information sur le serveur, ou PUT pour écrire des données dans une ressource gérée par un serveur. En ne gardant aucun état dans le serveur, et en faisant

(1) DEERING S. (2010), "Watching the Waist of the Protocol Hourglass", IETF 51, London, <https://www.iab.org/wp-content/IAB-uploads/2010/11/hourglass-london-ietf.pdf>

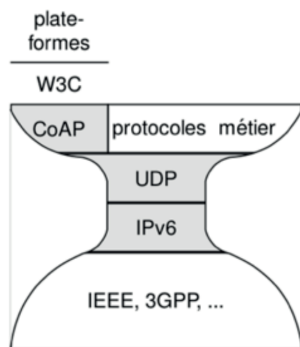
(2) AKHSHABI S. & DOVROLIS C. (2011), *The Evolution of Layered Protocol Stacks Leads to an Hourglass-Shaped Architecture*, Actes du colloque SIGCOMM'11.

que chaque requête est traitée indépendamment de la précédente, il est possible de construire des systèmes qui résistent à de très fortes charges de trafic. L'universalité de ces principes a conduit à les généraliser à d'autres opérations que la navigation sur le Web. Ce principe est ainsi généralisé à l'échange d'informations entre programmes. La représentation des données échangées qui peuvent contenir des URI doit être spécifiée. Pour le Web, HTML est largement utilisé et XML a été défini pour les échanges de données. Mais comme parfois le formalisme d'XML est trop lourd, on utilise JSON qui est un format plus léger, proche des structures de données des langages de programmation modernes (JavaScript, Python, Go...).

On le voit, l'Internet a réussi à fédérer un très grand nombre d'acteurs autour de protocoles communs. Le réseau se compose d'un ensemble assez important de protocoles qui ne traite qu'un sous-ensemble du système complet. Les couches basses sont normalisées par l'IEEE ⁽³⁾ deux grandes familles de protocoles : les protocoles filaires avec Ethernet et les protocoles sans fil avec le Wi-Fi. Le 3GPP ⁽⁴⁾ opère au même niveau et définit les protocoles pour la téléphonie cellulaire (4G). L'IETF ⁽⁵⁾ standardise les protocoles de l'Internet avec IP qui rend uniforme la représentation des protocoles inférieurs et introduit un adressage logique mondial des équipements connectés au réseau. Au-dessus d'IP, des protocoles comme TCP ou UDP fiabilisent ou non l'envoi des données et les protocoles applicatifs comme HTTP. Le W3C ⁽⁶⁾ définit la représentation des données et les liens entre les données. Chacun de ces organismes de standardisation définit également des protocoles auxiliaires pour attribuer des identifiants, chiffrer les communications...

Si l'approche en couches des protocoles offre beaucoup de souplesse et a permis dans le passé une évolution du réseau Internet aussi bien au niveau des types applications que de sa pénétration ou de sa montée en débit, l'arrivée de l'Internet des Objets n'est pas aussi simple que son nom le laisserait penser.

Adaptation à l'Internet des Objets



Les objets se caractérisent par une capacité de traitement limitée et par une consommation énergétique réduite pour préserver l'autonomie imposée par une alimentation sur batterie. Or les activités les plus consommatrices pour un équipement sont l'émission et la réception de données. Pour maximiser l'autonomie des équipements, il faut revoir l'intégralité des protocoles, en les calquant sur les architectures existantes pour en assurer la compatibilité.

La communication étant majoritairement sans fil, les instances de normalisation comme l'IEEE pour les réseaux locaux ou le 3GPP pour les réseaux cellulaires proposent des évolutions des normes ou de nouveaux protocoles. Ainsi, le protocole Wi-Fi, par une écoute continue du réseau, ne permet pas de répondre à des contraintes énergétiques drastiques. La première adaptation du protocole a été la norme IEEE 802.15.4. En réduisant la taille des données transportées, le débit de transmission à 250 kbit/s et en modifiant les protocoles du Wi-Fi pour limiter les phases d'écoute et de transmission, il a porté une première vague d'objets communicants. Il est la base du protocole ZigBee. Google l'utilise également pour son architecture Thread. Une adaptation de ce protocole aux réseaux de distribution d'électricité permet au compteur intelligent Linky de communiquer ⁽⁷⁾.

(3) <http://standards.ieee.org/innovate/iot/stds.html>

(4) <http://www.3gpp.org>

(5) <http://www.ietf.org>

(6) <http://www.w3.org>

(7) « Compteur Linky – Fantômes et réalités : l'autopsie », Doc TB, *Canard PC*, janvier 2018, <https://www.cpchardware.com/linky-fantomes-et-realites/3/>

Bluetooth a aussi évolué vers une plus faible consommation avec le standard BLE (*Bluetooth Low Energy*). Très présent sur les téléphones portables, il permet de communiquer avec des équipements visant principalement les marchés de la santé, de la forme et de la localisation en intérieur *via* des balises. En Europe, l'organisme de standardisation des télécoms ETSI a fait évoluer la norme DECT, utilisée par les téléphones sans fil, avec un mode économe en énergie appelé *DECT Ultra Low Energy*. Plus récemment, le Wi-Fi connaît une évolution similaire pour l'Internet des Objets avec l'amendement HaLow utilisable aux États-Unis sur la bande de fréquence sans licence des 900 Mhz.

La portée limitée des transmissions, due aux contraintes de faible consommation, implique deux modes de fonctionnement, soit en étoile autour d'un élément central, comme BLE avec un téléphone portable, soit en réseau maillé où les différents nœuds peuvent servir de relais pour atteindre une destination. Or la construction d'un maillage est une opération qui peut être coûteuse en énergie et qui va de toute façon demander à chaque nœud du réseau de partager son énergie pour relayer les messages des autres.

Pour simplifier les infrastructures, une nouvelle catégorie de réseau est apparue, dédiée à l'Internet des Objets : les LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Comme leur nom l'indique, ces réseaux couvrent une large étendue (de l'ordre de 2 km en ville et 15 km sans obstacle) pour une faible consommation d'énergie. En contrepartie, le trafic est très limité et s'en tient à une centaine de messages par jour.

Pionnier de cette technologie, Sigfox définit son propre protocole de transmission et a déployé son réseau dans un grand nombre de pays. Il a été suivi par la LoRa Alliance qui a une approche commerciale différente. Contrairement à Sigfox, les spécifications du protocole sont ouvertes pour permettre à un grand nombre d'acteurs d'intervenir sur la chaîne de valeur. En France, deux opérateurs proposent une couverture nationale. Ces deux technologies opèrent dans la bande non licenciée des 868 MHz. Pour permettre un accès équitable, le régulateur impose qu'un émetteur n'émette pas plus de 1 % du temps. Si pour un objet ce n'est pas une contrainte, cela le devient pour les stations de l'infrastructure qui doivent limiter les transmissions vers les objets. Ces réseaux sont surtout destinés à la collecte d'informations.

Arrivé plus tardivement sur le marché, le 3GPP, avec l'évolution des protocoles de 4G et en ligne de mire la 5G, propose également un mode économe en énergie qui s'apparente aux technologies LPWAN. En bénéficiant de l'infrastructure et des fréquences des opérateurs, les limitations imposées sur les fréquences non licenciées tombent. Les communications vers les objets sont facilitées et le réseau peut coordonner leur instant d'émission, autorisant de nouveaux usages comme les communications avec les véhicules ou les robots.

À partir des années 2020, les réseaux LPWAN vont connecter la majorité des objets. En revanche, le revenu d'un opérateur pour un objet sera faible (1 € par an).

Au niveau des protocoles composant cet Internet, le défi porte sur la réduction de son empreinte mémoire dans les objets. Le protocole IPv6, encore peu répandu dans l'Internet actuel, est privilégié en raison de sa grande capacité d'adressage. 6LoWPAN est une couche d'adaptation qui permet de réduire la taille des en-têtes IPv6 (d'un facteur 2 à 10). Il permet aux nœuds intermédiaires de relayer le trafic venant d'autres capteurs. La compression ne nécessite pas de contexte. 6LoWPAN introduit également un mécanisme de fragmentation sommaire pour transporter les paquets IPv6 sur des liaisons limitant la taille des données transmises.

6LoWPAN a été adapté à d'autres environnements qui sont des évolutions directes de IEEE 802.15.4. En France, les compteurs Linky utilisent cette compression pour véhiculer les informations entre le compteur et un concentrateur situé en amont du réseau de distribution électrique.

Pour le Linky, seules les couches IPv6 et UDP ont été prises de l'écosystème de l'Internet. Les données transportées utilisent les représentations métier définies par les électriciens (DLMS/CoSEM).

Pour les réseaux LPWAN, la taille des données véhiculées impose un mode de compression spécifique basé sur des contextes statiques (SCHC, *Static Context Header Compression*). Il profite des caractéristiques de ces réseaux (absence de routage, format de trafic connu) et réduit l'impact des en-têtes protocolaires à quelques bits.

Pour poursuivre dans l'intégration des objets dans l'Internet, le protocole CoAP (*Constraint Application Protocol*) se substitue à HTTP. Il en reprend le mécanisme de nommage, d'utilisation des ressources et les primitives de manipulation entre un client et un serveur. Il est à noter que dans cette architecture, le serveur étant celui qui possède la ressource, il s'agit du capteur qui est capable de délivrer la mesure ou l'actionneur qui effectue une action. Sa capacité de traitement et son alimentation en énergie sont souvent très limitées.

La grande force de CoAP est d'être entièrement compatible avec HTTP et il est possible d'aller d'un protocole à l'autre au travers de passerelles génériques, c'est-à-dire non liées à un usage particulier. Cela permet d'ancrer les objets dans un écosystème dominant construit autour des principes REST.

La sécurité, en particulier le chiffrement des données, suit aussi les mêmes chemins que l'Internet traditionnel. Il existe un chiffrement au-dessus d'UDP qui, à l'équivalent HTTPS, crypte les échanges. CoAP dispose de ses propres mécanismes de protection qui permettent de chiffrer les échanges de bout en bout (même en cas de traduction en HTTP), simplifiant les mises en œuvre.

Plateformes

Le modèle REST, représenté par HTTP ou CoAP ne suffit pas à gérer un parc d'objets. En particulier, il faut pouvoir :

- construire dynamiquement un annuaire des objets présents dans un système ainsi que leurs capacités ;
- ajouter des contrôles d'accès autorisant ou non l'accès à ses ressources ;
- avoir une représentation universelle des données pour assurer l'interopérabilité et la pérennité de l'exploitation de la donnée ;
- définir les liens entre les différentes informations collectées pour avoir la représentation d'un système.

C'est le rôle des plateformes. Chacun des grands acteurs du *cloud* a défini son interface pour récupérer les informations des objets, et les traiter. oneM2M⁽⁸⁾ regroupe les principaux organismes de standardisation mondiaux pour définir une interface commune et une représentation standardisée de l'information dans le but d'offrir une interopérabilité et de briser les silos. oneM2M se base sur la notion de ressources, certaines servent à gérer le réseau, d'autres contiennent les informations fournies par ou à destination des objets. Elle est au-dessus de l'Internet qui n'est vu que comme un moyen de transporter l'information d'un point à un autre. oneM2M vise les secteurs de la santé, de l'industrie et de la domotique. D'autres organismes comme OCF (*Open Connectivity Foundation*⁽⁹⁾), proposé principalement pour gérer des équipements domestiques, ou LwM2M (*lightweight M2M*⁽¹⁰⁾) pour les équipements des réseaux d'opérateur, s'appuient sur les protocoles de l'IETF et ceux du W3C pour la représentation des données.

(8) <http://www.onem2m.org/>

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

(10) <https://www.omaspecworks.org/what-is-oma-specworks/iot/lightweight-m2m-lwm2m/>

Perspectives

Contrairement à l'Internet, il n'existe pas de gouvernance autour d'un modèle global de l'Internet des Objets. Chacun des acteurs avance en adaptant sa technologie au caractère contraint des objets. Les briques de base sont maintenant disponibles, mais leur intégration prendra encore du temps.

La consolidation des solutions se fait par le marché autour de solutions propriétaires ou standardisées. Mais il est à noter que l'interopérabilité est un élément déterminant pour l'adoption des technologies. En son absence, le marché est freiné et seules les applications qui offrent un retour sur investissement rapide sont privilégiées. Un des défis consiste à briser soit les silos technologiques, liés à des développements spécifiques dus à l'absence de solutions génériques au moment de leur conception, soit les silos informationnels en adoptant des représentations de l'information normalisées *via* des ontologies. Ces silos sont un frein à l'exploitation massive des données avec des techniques issues de l'intelligence artificielle.

L'interopérabilité garantit également la pérennité des déploiements car les systèmes seront déployés pendant des dizaines d'années et suivront les évolutions des systèmes d'information.