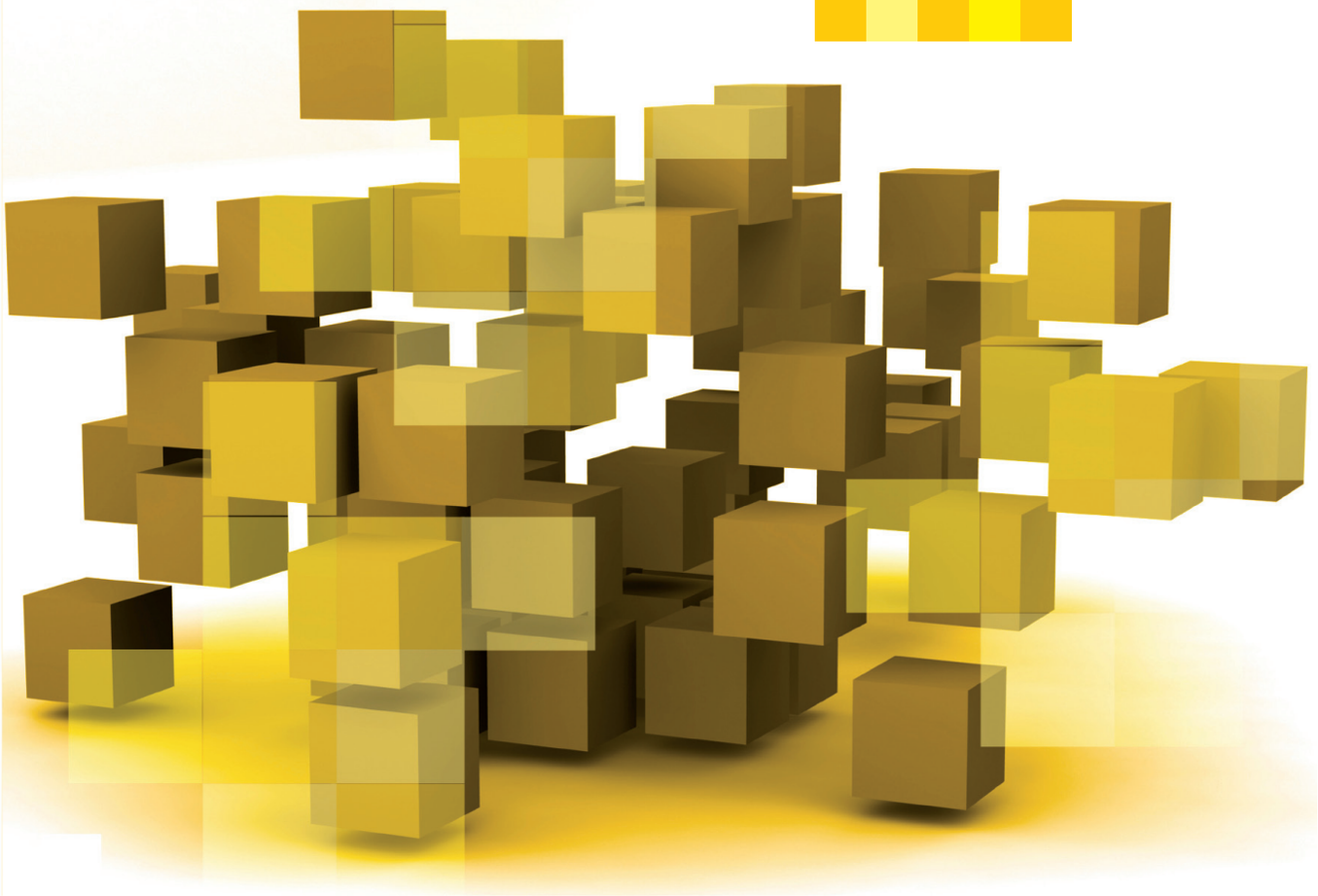
L'internet des objets,
objets de l'Internet

Les cahiers de veille **de la Fondation Télécom**



FONDATION
TELECOM

Édito

Avril 2011

Après avoir étudié le *où sommes-nous* à travers la géolocalisation, et le *qui sommes-nous* à travers nos identités numériques, ce troisième Cahier de veille est consacré à la place grandissante que prennent les objets dans notre environnement numérique.

Bruno Thedrez, Jean-Marie Bonnin, Sylvaine Tuncer et Laurent Gille, enseignants-chercheurs de l'Institut Télécom, ont associé leurs compétences en informatique, en sociologie et en économie pour nous livrer leur analyse d'un monde en rupture qui se profile, celui d'un internet des objets qui va au-delà du *machine to machine*, au-delà des réseaux de capteurs, au-delà de la simple dimension technologique ou d'étiquetage des objets, et qui replace l'humain au centre. Un internet des objets porté par une vision transformatrice, qui change la relation des objets entre eux et avec les humains, et qui étend nos outils, nos sens et notre conscience à travers ces réseaux d'objets, comme l'internet lui-même a étendu notre cognition.

L'internet des objets viendra de la résolution de plusieurs défis : celui de la démocratisation, assurée par une production en masse de ces objets, respectueuse de l'environnement et peu chère ; celui de l'acceptabilité, de la confiance, et d'une ouverture des données maîtrisée ; celui de la gestion de l'hétérogénéité qui implique que tous les objets doivent pouvoir communiquer entre eux et être atteignables sans passerelle ; celui du passage à l'échelle enfin, car nous nous attendons à des dizaines de milliers d'objets communicants par être humain.

Ce cahier de veille permettra, nous l'espérons, aux enseignants-chercheurs et aux partenaires de la Fondation Télécom de relever ces défis pour imaginer des services et des usages qui rendront naturels et évidents le prolongement numérique de nos artefacts.

Francis Jutand

Directeur Scientifique de l'Institut Télécom
Directeur de la Fondation Télécom

Sommaire

P03 Les systèmes cognitifs distribués : un monde en rupture
- P03 L'internet des objets dans la ville 2.0
- P05 Un paradigme neuf à l'épreuve
- P06 D'un point de vue économique
- P06 Deux verrous à lever : acceptabilité et protection de la vie privée
- P08 Un enjeu : remettre l'individu au centre

P09 Technologies de l'Internet des Objets
- P09 Des réseaux de capteurs aux objets communicants génériques
- P10 *La consommation des objets communicants*
- P10 Une rupture possible grâce à la convergence entre performance et consommation réduite
- P12 Technologies de communication et réseaux
- P12 Modèles de communication
- P12 Différents types d'objets concernés
- P14 Adressage et identification
- P15 Les standards et les normes
- P15 Low Power WPAN : IEEE 802.15.4
- P16 *Implémentation de la sécurité au niveau des objets*
- P16 Wi-Fi basse consommation
- P17 Courants porteurs en ligne
- P18 Les travaux de l'IETF
- P18 Les ressorts économiques

P20 Perspectives stratégiques
- P20 Les défis techniques
- P20 Performance des objets
- P21 Énergie
- P23 Flexibilité
- P24 L'ubiquitaire à bon escient
- P24 Computation, complexité des activités et innovation vernaculaire
- P25 De nouveaux modèles d'affaires
- P25 De l'ouverture des données
- P26 Vers de nouvelles monnaies
- P26 De la régulation

P27 Contributeurs & Glossaire

Les systèmes cognitifs distribués : un monde en rupture

Dans notre quête d'établissement de relations avec autrui, nous cherchons sans cesse à dépasser les limites physiques de notre environnement. L'accélération et la diversification des innovations technologiques accroissent une forme de ***consommation communicationnelle***, caractérisée par la multitude des liens, leur fréquence et leur diversité. Dans cette course, les objets sont devenus des ***points de passage obligés*** de ces réseaux, des ***médiations essentielles*** à nos expériences quotidiennes, au point de brouiller les frontières entre humains et non humains.

Nous avons créé un monde où l'interaction avec les objets devient la règle : interactions avec l'architecture, avec l'univers urbain, domestique, professionnel, avec les robots et objets banals. On entre en conversation avec cet univers sans en être totalement usagers, mais simples participants ou intervenants. Ainsi, on ne demande plus à un immeuble quel est-il, ou de quoi est-il fait, mais que peut-il faire pour moi ?

Et l'hybridation avec le monde virtuel ajoute une dimension à cette évolution. Nos objets peuvent devenir numériques, du fait de leur doublure virtuelle ou de leur création virtuelle : on affiche une montre sur son bras via un picoprojecteur, ou sur sa main un clavier téléphonique. L'internet des objets n'est alors pas uniquement une nouvelle forme d'usage ou d'asservissement des objets, mais ***une reconfiguration complète de ce que peuvent être un objet et un sujet***.

Illustrons ceci par deux exemples tirés du (proche) quotidien.

L'internet des objets dans la ville 2.0

L'évolution et la diversité des habitats urbains et péri-urbains conduisent à une individualisation des déplacements qui rend inefficace les transports publics traditionnellement centralisateurs. Il faut donc repenser l'organisation des systèmes de transport en favorisant l'intermodalité pour supporter la personnalisation des trajets. Il est également indispensable de fluidifier les déplacements en répartissant au mieux les usagers sur les différentes lignes et dans les différents moyens de transports, ce qui peut être planifié à des échelles de temps variées.

Malheureusement, les délais et l'incertitude des correspondances impactant très fortement les temps de trajet, ils limitent l'adoption par les usagers de l'intermodalité dans les transports. Un placement astucieux de capteurs, couplés à des remontées des utilisateurs eux-mêmes, permettra au sein d'un écosystème *flexible* d'objets communicants de lever ces obstacles :

- en analysant les flux, véhicule et piéton, pour évaluer les temps de trajet sur route et dans les stations (métro, bus), le délai d'arrivée à la station… avec une ouverture sur la planification ;
- en proposant des services innovants autour d'un covoiturage s'intégrant complètement dans l'offre de transport en commun. Lorsqu'un usager souhaite aller à un endroit, le système lui propose de sortir à telle station de métro / bus / train pour trouver presque immédiatement un automobiliste allant à proximité de sa destination. Dans ce modèle, l'automobiliste ne connaît pas à l'avance les usagers. La voiture peut également servir de liaison opportuniste entre deux stations de transport en commun ;
- en offrant des systèmes de transport à la demande.

Un certain nombre de facteurs technologiques permettent aujourd'hui d'envisager le développement d'outils génériques favorisant ces nouveaux comportements de déplacement :

- capacité de communication généralisées (objets communicants), entre les producteurs d'information (capteurs, terminaux, serveurs) et les consommateurs (actionneurs, terminaux mobiles, panneaux d'information) ;

“L’auto-organisation constitue un axe de rupture essentiel, et porte sans doute l’avancée la plus spécifique de l’internet des objets.”

- bases de données géolocalisées libres d’accès et disponibles pour divers usages ;
- outils de planifications court, moyen et long terme ;
- capteurs et actionneurs répartis dans la ville pour détecter la présence, optimiser la circulation…

Le second exemple représente un défi technique plus complexe, et mène à un paradigme radicalement nouveau : la mise en réseau auto-organisée d’objets capables de s’influencer de façon combinée permet de distribuer le traitement de l’information, de mener à des actions / décisions conjointes mais non centralisées, créant une forme d’***intelligence ambiante*** dont la particularité est de n’avoir été conçue ni à l’avance, ni selon un schéma prédictif.

L’impact et les ruptures apportés par un tel scénario d’objets indépendants mais fonctionnant de façon coordonnée en réseau peut être illustré de façon frappante dans le cas de la sécurité d’un bâtiment.

Des systèmes auto-évolutifs…

Le retrait ou l’ajout de nouveaux objets communicants (capteurs ou transducteurs) doit pouvoir se faire sans intervention, les objets gérant leurs interconnexions dans le cadre de règles prédéfinies. Dans le cas de la sécurité d’un bâtiment, le premier impact est la capacité d’auto-réparation dans les situations de crise où l’intégrité des infrastructures n’est plus garantie (incendie, explosion). Alors même qu’une partie du réseau est détruite, un système de partage d’informations et de mesures en temps réel pourra être maintenu fonctionnel sans intervention, pour autant que la flexibilité inhérente aux objets reste bien exploitée. Grâce à l’intelligence embarquée, le rôle des nœuds du réseau sera également suffisamment adaptable pour reporter des fonctions centralisées endommagées sur les parties restées fonctionnelles.

Ainsi, un ensemble d’objets communicants spécifique d’une aile de bâtiment isolée par un incendie, ou un même couloir, devra être à même de prendre des fonctions centrales prédéfinies, et déclencher des actions spécifiques : décision d’arrêt des ascenseurs selon les informations reçues et la présence de personnes, déclenchement d’alarme…

…apprenants et fusionnant des données…

Les techniques mathématiques d’apprentissage, comme l’étude de la topologie des graphes par exemple, permettent, en comparant l’ensemble des mesures sur une période de temps suffisante, de produire des catégories pertinentes et de classer les données de façon automatique. La détection des anomalies en est renforcée, et le traitement des données est spécialisé autour de classes pertinentes. Le système peut ainsi, sur la base de ses capteurs, apprendre à différencier les personnes familières au bâtiment de personnes étrangères, et adapter sa surveillance en fonction de la classe des personnes détectées. Il peut également repérer des fonctionnements ou des activités inhabituelles et proposer des actions adaptées selon la nature des dangers repérés.

De ce point de vue, le ***couplage avec les techniques de fusion de données*** sera un facteur essentiel de performance. La mesure simultanée de plusieurs paramètres et la détection d’anomalies corrélées (augmentation de pression d’un fluide, échauffement, vibrations…) permettra par exemple d’anticiper des pannes et de déclencher dès en amont des actions correctrices. Le développement actuel des techniques de fusion de données permet d’envisager des systèmes de capteurs communicants hétérogènes, capables de détecter un centre de collection de données et de lui fournir les données mesurées, afin de permettre une analyse temps réel du bâtiment. Couplé à l’apprentissage, la fusion de données doit permettre de prévenir les crises de façon très efficace. À terme, un système de surveillance analysant une situation de cris, de mouvements rapides et d’agitation, devra différencier, par les techniques de fusion et d’apprentissage, un ensemble d’enfants jouant, d’un groupe d’adultes réagissant à un danger.

…interconnectés pour fouiller des données

Le centre de collection, connecté aux systèmes de surveillance d’autres bâtiments ou à de vastes banques de données, pourra dé-

clencher, dès qu'un seuil d'anomalie aura été relevé par fusion de données, une ***recherche par fouille de données*** afin de détecter des situations antérieures similaires et analyser les traitements associés. La fouille de données permettra par ailleurs au système de surveillance de rechercher, dès l'apparition d'un nouvel artefact détecté par ses capteurs (caméras, microphones…), des ***concordances dans des bases de données externes***. On peut ainsi, dans le cas de la sécurité contre les intrusions, rechercher sur la base de silhouettes, de visages ou de voix (et plus particulièrement sur la fusion de cet ensemble de données) l'identité d'un nouvel arrivant et décider du niveau de surveillance à lui attribuer. L'immersion dans l'internet des objets, autorisant le partage de données entre systèmes répartis, représente donc, pour l'ensemble capteurs, fusion et fouille de données un ***saut qualitatif de première importance***.

Un paradigme neuf à l'épreuve

Comme on le voit, ***la création de réseaux d'objets communicants auto-évolutifs***, dédiés à une tâche spécifique de façon coordonnée et autonome, ***remet en cause ici la place centrale de l'individu*** dans la conception du système, la prise de décision et le déclenchement des actions.

Dans notre deuxième exemple, l'apport des objets communicants est de deux types :

- la réactivité en cas de crise (auto-réparation) ;
- le maintien de tâches de fond pour améliorer le système (apprentissage, fusion, fouille) et adapter sa réaction aux imprévus ;

On peut dès à présent imaginer une évolution progressive, depuis un système d'objets assistant l'être humain dans le contrôle de la sécurité, vers un système totalement autonome de décision. Dans ce dernier cas (le plus futuriste), il est à noter que le réseau d'objets se sera progressivement configuré, sur la base d'une architecture initiale, pour atteindre des performances théoriquement supérieures à celle de l'individu en raison des masses importantes d'information traitées.

Mais si la place centrale de l'individu est parfois remise en cause, tous les cas d'usage ne le permettent pas, et certaines peurs ont pu dans le passé empêcher le déploiement de services innovants de l'internet des objets qui semblaient prometteurs sur le papier.

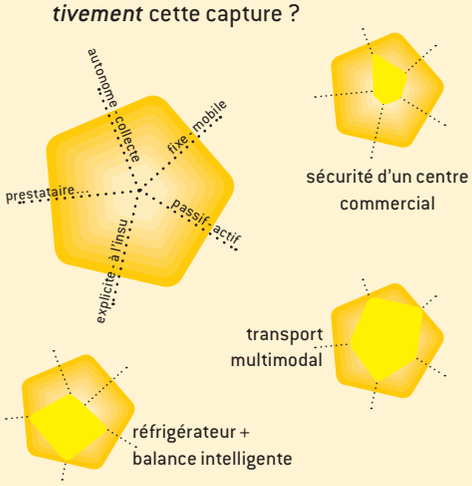
Quelques caractéristiques d'un système d'objets communicants

La grande variété d'organisation en réseau des systèmes d'objets communicants les positionne, selon leur degré de sophistication, entre deux scénarios extrêmes :

- un réseau d'objets ***fixes***, alimentés, réunis autour d'un point de traitement unique qui organise la ***collecte*** et la distribution des informations, et qui interface avec le monde extérieur ;
- un réseau d'objets ***mobiles***, indépendants, gérant de façon entièrement ***autonome*** leurs décisions (dont celle de la connexion), avec pour contrainte de réaliser un objectif collectif partagé.

D'autres dimensions doivent également être prises en compte :

- les données captées le sont-elles localement puis directement présentées à l'usager, ou sont-elles remontées à des ***prestataires*** qui effectuent un traitement préalable ?
- les données captées le sont-elles ***à l'insu*** des usagers ou ont-ils souhaité ***explicitement*** cette capture ?
- l'usager est-il ***passif*** ou déclenche-t-il ***activement*** cette capture ?



Deux verrous à lever : acceptabilité et protection de la vie privée

La méfiance envers l'***ubiquitaire***, monde dans lequel les ordinateurs sont omniprésents, a pour cause principale la collecte de données à caractère personnel, de natures variées et opérées par des agents jusqu'aux plus miniaturisés ou apparemment triviaux. Le respect de la vie privée est assuré *a minima* par le cadre légal et la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés en France, mais qui ne suffit pas à instaurer un climat de confiance propice. Non seulement l'utilisateur de ce type d'objets doit être informé de la production de données, mais il faut surtout lui ***assurer le contrôle de leur diffusion***, alors même que les capacités communicantes sont la raison d'être même de ces objets. C'est le paradoxe du *pharmakôn* : dans l'excès, le remède se transforme en poison.

Ce potentiel technologique inédit invite à dépasser le cadre légal existant. Car l'objet technologique reste une « boîte noire » qui garde le secret de ses processus, et la permanence du réseau sous-jacent, l'étalement et la rapidité des connexions enclenchent des effets de contagion incontrôlables et potentiellement dévastateurs. Alors que la difficulté d'accès aux données constituait un rempart naturel contre l'intrusion, l'usager peut aujourd'hui emporter un mouchard à son propre insu. Qu'il s'agisse de l'exposition de son intimité ou des sollicitations intempestives du marketing, la gêne est considérable, et les intérêts de l'industriel rentrent en contradiction flagrante avec les exigences du client. Seules la discussion et la recherche du consensus peuvent alors rétablir un lien de confiance.

Question de gouvernance plus que de politique, au sens où pour fixer un usage au cas par cas, une base commune doit être établie qui influence directement la conception. Il en est ainsi du « droit au silence » des puces ***RFID*** : un vendeur peut s'engager à ne pas suivre le porteur d'un objet doté d'une puce, encore faut-il que le concepteur ait prévu le moyen de la désactiver.

En somme, la règlementation quant à la constitution de bases de données reste inchangée, mais ***l'ubiquitaire invite à multiplier les preuves de bonne foi***. Il s'agit de laisser à l'utilisateur les pleins pouvoirs pour contrôler la collecte, le stockage et la diffusion des données qui le concernent.

D'un point de vue économique

L'internet des objets se caractérise par ***la diffusion massive d'objets disposant, produisant ou captant des informations, et capables de les transmettre à distance, soit par des technologies de type RFID, soit par des technologies de transmission à plus fort rayon d'action.***

L'objet communicant produit, capte ou restitue une information, éventuellement la traite, et la communique à un système plus global. Un exemple illustratif et simple est fourni par les objets de la vie courante : un pèse-personne (connecté au réfrigérateur intelligent), un tensiomètre (www.withings.com), une chaussure (www.apple.com/fr/ipod/nike/run.html), permettent de capter des mesures biométriques, de façon régulière, communiquées ensuite à un terminal intelligent (smartphone, tablette, PC), par connexion filaire, par bluetooth, par Wi-Fi… de façon à ce que l'usager, par le biais d'une application idoine, puisse surveiller son poids ou sa tension de façon historique, bénéficier de conseils (par exemple dailyburn.com), intégrer ces données dans son dossier médical, etc. Cela suppose que ces objets détiennent un identifiant numérique et une adresse sur le réseau qui les connectent au monde extérieur : les enjeux liés à ces normes ne sont évidemment pas minces, ni l'évolution architecturale des réseaux qui auront à les mettre en relation.

Si on poursuit cette illustration, on peut imaginer un environnement personnel dans lequel les paramètres de sa santé et de son bien-être seront mesurés (poids, tension, effort physique, mais aussi température, mesures biologiques, labopuces, aliments consommés, temps de sommeil, analyses génétiques…) qui peuvent donner lieu à une multitude d'applications personnelles, par intégration, confrontation de ces données au sein de systèmes experts, présentation, diagnostics, conseils, mais également à des applications collectives par transmission et agrégation de ces données.

L'objet peut aussi tout simplement être ***porteur passif*** de métadonnées le concernant, utilisables par des ***systèmes intelligents*** : ainsi, chaque vêtement pourrait porter, sous des formes qui peuvent être multiples, ses caractéristiques (nature du tissu, des teintures…) qui permettront à une machine à laver sachant les « lire » d'ajuster ses programmes de lavage.

Un cas d'école exemplaire : le réfrigérateur intelligent.

L'échec commercial du *réfrigérateur intelligent,* alors que les premiers pronostics avaient été plutôt enthousiastes, est un cas d'école pour les nombreux chercheurs qui se sont intéressés à ces usages. La problématique de la vie privée y apparaît déclinée sous ses principaux aspects. Elle l'est dès la collecte : je suis un régime, je souhaite pouvoir effacer l'information « Plus de glace au chocolat » sans quoi mes proches auront connaissance de mon écart. Au mieux l'enregistrement des événements peut-il être désactivé, et le passage de « Glace » à « Plus de glace » ne sera pas remarqué. Dans tous les cas, je souhaite pouvoir effacer facilement cette donnée si je n'ai pu éviter qu'elle soit enregistrée. Enfin, dès lors que ces informations franchissent le seuil du foyer, chacun sent bien que les habitudes de consommation alimentaire intéressent, à juste titre, les industriels. Dans les systèmes de gestion de la relation client, on souhaite tirer partie du traitement des informations transmises par les puces RFID, ce qui ne va pas forcément à l'encontre du droit du consommateur, à condition que ce dernier conserve la maîtrise globale des données : savoir comment y avoir accès, pouvoir les modifier, voire les effacer, et de surcroît, maîtriser leur diffusion. La frontière entre public et privé doit aujourd'hui être discutée et exige une clarté sans précédent, afin de lever le soupçon sur les intentions des différentes parties.

Par ailleurs, alors même que le réfrigérateur, par son inscription dans notre quotidien, semble un terrain d'étude idéal des usages domestiques, les chercheurs se sont heurtés à une irréductible variabilité individuelle. Les protocoles de recherche conventionnels, tels que la modélisation et la simulation, passent en effet à côté de la dimension affective propre à l'espace et aux pratiques privés. On établit la notion d'***aisance d'utilisation perçue*** (*Perceived Ease of Use*, PeoU) à partir de critères assez généraux, mais rien de statistiquement fiable ne laisse établir des recommandations : l'approche quantitative atteint ses limites. Seuls les programmes de recherche se donnant les moyens de comprendre l'expérience des acteurs, au sens anthropologique fort, observant la mise en mot et l'incorporation des activités, permettent de poursuivre une telle démarche.

Les systèmes de traitement de bagages des aéroports traitent ainsi automatiquement des milliers d'objets quotidiens grâce aux ***tags*** d'origine-destination présents sur les bagages.

Le potentiel de l'internet des objets réside dans ces configurations complexes. Les objets, ***propriété d'un agent ou de plusieurs agents économiques***, participent à une fonction économique spécifique, que ce soit un service offert à un « consommateur » ou un service intervenant dans un processus de production. Dans l'exemple de l'univers d'objets concourant à la sécurité d'un immeuble, le propriétaire de l'immeuble est vraisemblablement propriétaire de ces composantes matérielles captant et communiquant des informations, qu'un prestataire va utiliser pour assurer un service de sécurité doté de fonctionnalités diversifiées (incendie, inondation, intrusion…).

D'autres exemples viennent à l'esprit. Des capteurs de vitesse, ou des puces de localisation, situés sur des véhicules, peuvent, en transmettant ces informations à un centre agrégeant des données en provenance d'une grande quantité de véhicules, renseigner sur la congestion des artères d'une ville. Un robot d'assistance, présent au domicile d'une personne dépendante, peut informer un service d'assistance de l'urgence et de la nature d'interventions auprès de cette personne. Des puces placées sur des marchandises peuvent permettre de tracer la provenance de ces marchandises, de suivre leur acheminement et leur livraison. On peut multiplier ces exemples dans lesquelles ***un ou plusieurs objets, par les informations élémentaires qu'ils transmettent, permettent d'assurer la prestation d'un service, dont l'élaboration dépendra de l'intelligence mise, soit au niveau des objets communicants, soit au niveau de systèmes traitant de façon plus centralisée ces informations***.

L'***autonomie*** de ces systèmes complexes forme un défi et un enjeu majeur. Soit le service rendu sera dédié à une personne physique, dont l'action découlera de ce service qui assemblera, synthétisera des informations afin d'apporter un conseil personnalisé en vue d'une décision ou action, soit le système s'alimentera auprès de ses composantes et gérera de façon autonome des décisions relatives aux fonctions pour lesquelles il aura été programmé, dont le

…/…

Un enjeu : remettre l'individu au centre

Pour éviter ces écueils pénalisants, la mise à l'épreuve par l'expérimentation reste un outil précieux. En témoigne le rejet du réfrigérateur proposant des plats en fonction des aliments contenus : incapable de substituer un ingrédient manquant par un succédané, de trop nombreuses recettes, pourtant à sa portée, sont évincées. À défaut d'une simple expérimentation, l'erreur de conception peut passer inaperçue, si grossière qu'elle apparaisse à l'usage. *Combien d'autres innovations ratent ainsi leur chance, faute d'un regard nouveau ?*

L'internet des objets peine à dépasser un certain seuil de diffusion, et ce en dépit de l'enthousiasme et des efforts des concepteurs. Or, sur ce point, l'imagination est peut-être responsable en ceci que nous l'avons trop exercée dans la limite des seuls objets, au détriment des agencements relationnels dans lesquels ils s'inscrivent.

Comment subvenir judicieusement à notre soif de connexions ? Quelles sont les conditions propices à la symbiose ? Là où l'écologue permet au biologiste, et à partir de ses connaissances, de comprendre comment une plante coopère avec son écosystème, les sciences humaines peuvent proposer à l'ingénieur de situer l'ubiquitaire parmi l'hétérogénéité de nos relations. La pénétration de l'internet des objets est en effet au moins autant une question sociale et humaine que technique.

Compléments de lecture et références

Privacy in pervasive environments: next generation labeling protocols, Mark S. Ackerman, Pers Ubiquitous Computing, 2004

Machine To Machine. Enjeux et perspectives, Livre Blanc de la Fédération Internet Nouvelle Génération, 2007

User Acceptance of the Intelligent Fridge: Empirical Results from a Simulation, Matthias Rothensee, The Internet of Things, Lecture Notes on Computer Science, 2008, Volume 4952/2008

L'Internet des objets : quels enjeux pour les européens, Maison des Sciences de l'Homme, Benghozi P.J., Bureau S. et Massit-Follea F., 2009

Repenser l'internet des objets, Kaplan D., Internet Actu, 2009

Il n'y aura pas d'habitat intelligent sans désir, consentement et maîtrise de la part des habitants, Amandine Brugière, Internet Actu, 2010

Vieillissement et nouvelles technologies : un rendez-vous manqué, Amandine Brugière et Carole-Anne Rivière, extrait de *Bien vieillir grâce au numérique*, FYP éditions, 2010

Livre blanc des réseaux de systèmes communicants et de l'internet des objets, Association Instituts Carnot, janvier 2011

service sera donc offert à un système. Il pourra s'agir d'un système dont les fonctions principales concerneront la gestion d'un environnement matériel ou la gestion relationnelle d'une communauté.

Différentes acceptions de l'internet des objets existent donc dans la presse et la littérature. Cette déclinaison de l'internet des objets prend des acceptions différentes que l'on peut ordonner de façon sans doute caricaturale sur les deux dimensions précitées : une dimension sur l'autonomie décisionnelle des systèmes, orientés vers le conseil ou vers le maintien autonome d'une sorte d'équilibre homéostatique, et une dimension relative aux fonctions implémentées, soit « matérielles » ou soit « relationnelles ».

Nous sommes au tout début de cette expansion de l'internet des objets. *L'exploration des usages se fait parallèlement à une réflexion sur les modèles économiques qui pourraient supporter ce développement.*

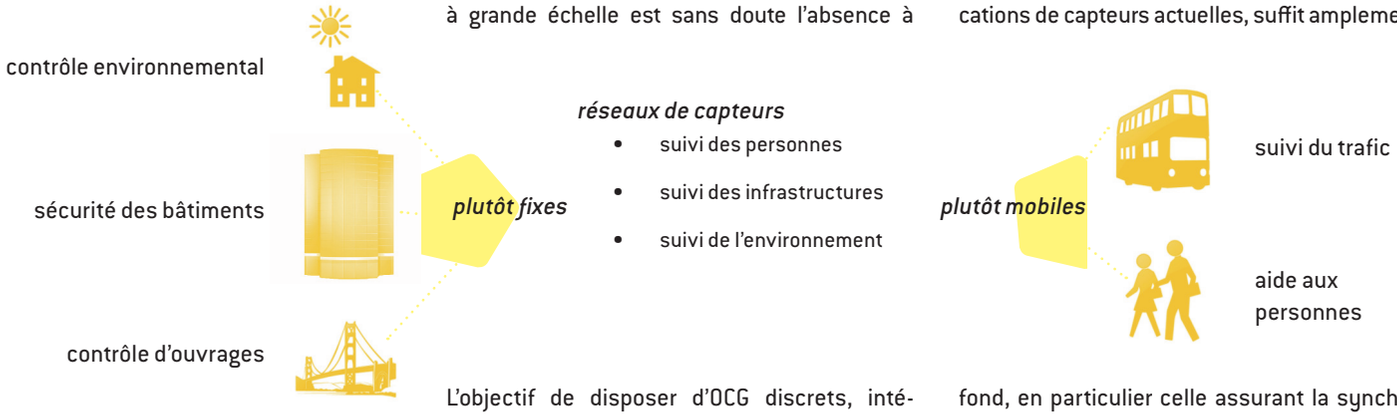
		Champ fonctionnel	
		matériel	relationnel
Autonomie décisionnelle	limitée	AmI (Intelligence ambiante)	Interactive-X
	importante	M2M (Machine to machine)	U-Society (Société ubiquitaire)

Technologies de l'Internet des Objets

Des réseaux de capteurs aux objets communicants génériques

Les réseaux de capteurs forment la première instanciation opérationnelle du concept d'objets communicants distribués en réseaux autonomes. Leur utilité est multiple, et leur déploiement a déjà débuté depuis quelques années. Bien qu'encore balbutiantes, les applications ne manquent pas, tant pour le suivi automatisé des personnes, notamment les plus dépendantes, que celui des infrastructures ou de l'environnement. Leur usage pour la logistique des entreprises constitue de même un enjeu de taille, la puce RFID pouvant s'accompagner de systèmes communicants plus actifs et performants, renseignant en direct l'entreprise sur l'évolution de ses stocks, mais également de ses infrastructures, de ses appareillages et de certains de ses coûts opérationnels, sa consommation énergétique par exemple.

Le principal frein à leur mise sur le marché à grande échelle est sans doute l'absence à ce jour d'un modèle de déploiement unique, chaque application devant créer sa propre implémentation spécifique à ses besoins. Un certain nombre d'***objets communicants génériques*** (OCG), embarquant des capacités de calcul et de communication, et pouvant recevoir un capteur spécifique, commencent cependant à apparaître de façon plus volontaire. Depuis l'apparition des premiers OCG par ATMEL en 1998, fonctionnant sur la bande 900 Mhz et transmettant à un débit de 10 kbps, une série d'objets plus évolués sont devenus commercialement disponibles, émettant aujourd'hui préférentiellement sur la bande 2.4 Ghz, avec des débits de l'ordre du Mbit/s. Les contraintes de consommation constituent les principaux facteurs de limitation des performances. Pour cette raison, les fréquences d'horloge restent inférieures à 100 Mhz pour une mémoire embarquée totale de quelques Mo, ce qui, pour la plupart des applications de capteurs actuelles, suffit amplement.



L'objectif de disposer d'OCG discrets, intégrables à l'envie à l'intérieur de tout système embarqué sans contraintes mécaniques n'est cependant pas encore atteinte. La plupart des OCG occupent un espace compris entre 10 cm^3 et 30 cm^3, l'intégration de l'ensemble des fonctions nécessaires ne pouvant être aisément réalisée sur une puce unique. Il en résulte une carte électronique compacte, mais formée de plusieurs éléments hétérogènes.

La consommation typique dépend du mode de fonctionnement. En émission ou en réception, les OCG consomment de l'ordre de 10 mA à 50 mA selon le taux de transmission. Le mode éteint (*sleep*) permet en revanche de réduire la consommation à quelques dizaines de nanoampères. Dans la pratique, des tâches de fond, en particulier celle assurant la synchronisation avec les autres nœuds, doivent être assurées, correspondant à un mode de veille (*idle*) possédant une consommation typique de l'ordre de 100 µW.

Les OCG soumis à une contrainte de faible consommation, lorsqu'ils fonctionnent par exemple sur piles, sont donc en général utilisé en mode actif pendant de brefs instants pour émettre une quantité d'information limitée. À un trafic moyen de 1 kbit/s correspond généralement un taux de transmission de 100 kbit/s, associé à un taux d'activité de 1 % afin de limiter la consommation. Dans ces conditions, la durée de vie de l'objet sur une pile lithium de 1 cm^3 est d'environ 9 mois.

La consommation des objets communicants

Pour un certain nombre d'objets communicants, reliés nativement à des sources d'énergie non limitées (le réseau électrique par exemple), le besoin de réduction en consommation électrique est essentiellement lié aux prises de conscience récentes associées à la notion de développement durable. Le bon réglage de la consommation obéit dans ce cas à des règles de compromis entre performances et consommation, règles qui sont très dépendantes des contextes utilisateurs.

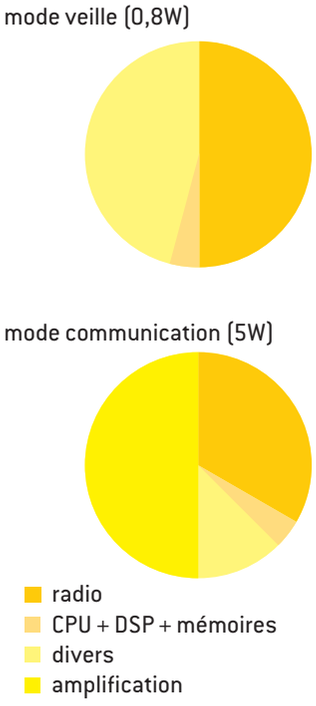
Consommation radio

La consommation des émetteurs-récepteurs est un souci constant des concepteurs depuis de nombreuses années, motivé par la nécessité impérieuse d'augmenter l'autonomie en veille ou pendant la communication. Les problèmes à résoudre sont de nature différente selon qu'il s'agit de l'émission ou de la réception.

En *émission*, l'énergie minimale par bit transmis est déterminée par le bilan de liaison, mettant en jeu les pertes de propagation et le bruit thermique. Pour un taux d'erreur donné, elle est proportionnelle au débit de la communication. Un exemple simple permet de fixer les idées : pour une puissance émise de 1 mW à 100 kb/s (soit 10 nJ/bit) en modulation incohérente OOK sur une porteuse à 2.4 GHz, la portée d'espace libre avec un récepteur parfait et un taux d'erreur de 10^{-3} est environ 3 km. Un facteur de bruit de 10 dB du récepteur ramène ce chiffre à 1 km et une perte de propagation supplémentaire de 30 dB due à des obstructions, à 30 m.

La consommation réelle sera supérieure à 1 mW en raison du rendement inférieur à 1 de l'amplificateur et de la consommation intrinsèque des divers blocs fonctionnels. On peut réduire la consommation grâce à une émission discontinue (faible rapport cyclique) ou en réduisant la consommation intrinsèque de l'architecture. Il faut aussi noter que l'énergie par bit tend à être plus élevée à bas qu'à haut débit à cause des courants de fuite et autres imperfections. La norme 802.15.4a adaptée au bas débit utilise des formes d'onde impulsionnelles ultra large bande, autorisant des architectures simples et des énergies de l'ordre du nJ/bit, environ cent fois moins que la norme Zigbee.

En *réception*, le coût énergétique peut être important et s'approcher ou dépasser la consom-



Répartition des consommations pour un mobile bas de gamme

Une rupture possible grâce à la convergence entre performance et consommation réduite

Il est instructif de comparer les objets communicants actuels, peu consommateurs mais de performance réduite à la famille opposée des téléphones portables, autres objets communicants d'importance. Bien que ces objets soient soumis à des contraintes similaires, le marché a orienté l'optimisation des téléphones intelligents vers la performance davantage que vers la faible consommation. Les débits sont augmentés, et les capacités de traitement interne sont nettement supérieures puisqu'elles peuvent atteindre des valeurs très élevées, de l'ordre de 100 Gflop/s.

La partie radio et amplification des téléphones bas de gamme est de loin la plus consommatrice. Lors d'un appel, elle représente environ 80 % de la consommation.

Pour des appareils haut de gamme, la consommation est portée pour une part importante par les charges de calcul et d'affichage. À noter que si les applications sont fortement consommatrices en puissance consommée, elles le sont généralement peu en nombre d'opérations par seconde. Le coût en puissance est en effet essentiellement associé à l'utilisation d'une électronique programmable (un microprocesseur). *A contrario*, la partie radio, très consommatrice d'opérations systématiques, est relativement peu consommatrice du fait d'une électronique dédiée (ASIC).

Le marché s'oriente donc aujourd'hui sur deux types d'objets antinomiques : des objets peu performants, consommant peu et porteurs d'un registre limité d'applications systématiques, et des objets aux capacités de traitement nettement plus évoluées, programmables mais nécessitant un opérateur pour leur recharge. Il fait peu de doute que la première famille va évoluer vers des objets de plus en plus performants, en même temps que se développeront des applications porteuses nouvelles auxquelles les performances devront s'adapter.

C'est cette nouvelle famille qui sera porteuse des ruptures promises par l'internet des objets.

mation de l'émetteur si on vise la performance (modulations cohérentes à fort indice de modulation, égaliseurs / décodeurs haut débit, faible facteur de bruit…). Ce sera le cas des terminaux radio des nouvelles normes de communication cellulaires haut débit (WiMAX, LTE, LTE-A). À bas débit, des architectures bas-coût / basse consommation peuvent descendre à moins de 0.1 nJ/bit en acceptant des performances nettement en-deçà des limites théoriques.

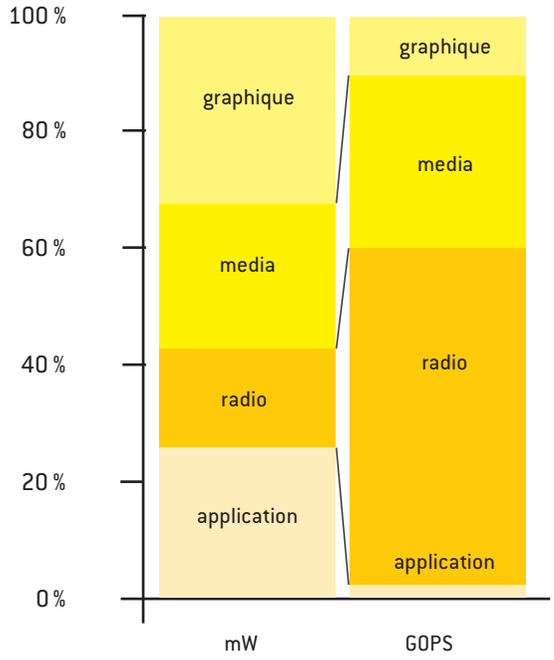
Sur la décennie à venir, l'amélioration des architectures et la réduction de taille des transistors permettront de réduire la consommation significativement et d'approcher les limites théoriques en émission, sachant que les courants de fuite pourront contribuer de façon non négligeable au bilan énergétique. La technologie silicium CMOS continuera à dominer pour les besoins courants, et avec des coûts de production réduits.

Consommation et codage

Du point de vue des « communications », les protocoles existants aujourd'hui ont été développés dans le but de limiter la consommation en puissance, et ont été conçus pour résister aux situations de communication critiques (bruit, interférence…). Ces protocoles ne sont pas optimaux dans des environnements évolutifs pour lesquels la consommation par bit envoyé (au lieu de bit/s) sera critique.

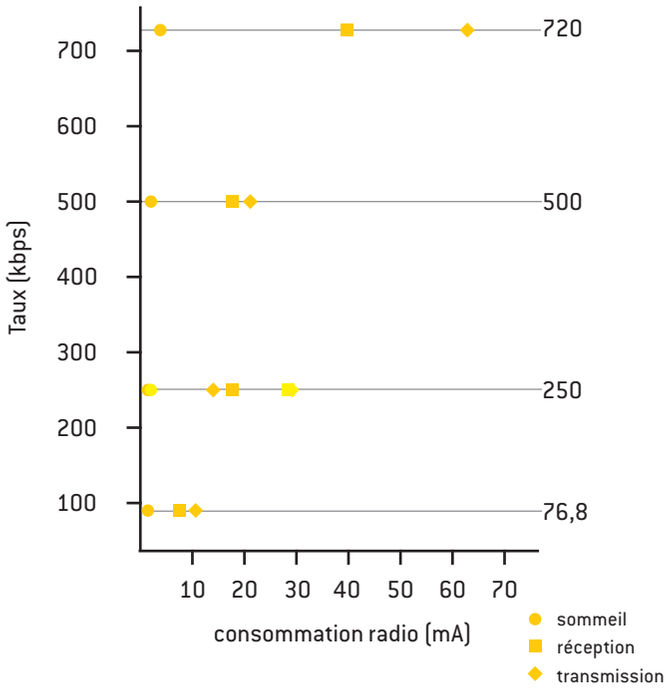
Les spécificités à prendre en compte au niveau de la couche physique des réseaux d'objets communicants sont nombreuses. Elles sont toutes pilotées par les ressources énergétiques limitées des objets :

- transmission ***bursty*** et asynchronisme : les nœuds du réseau ne sont pas synchronisés car cela exigerait un trafic trop important ;
- paquets de tailles très variables ;
- absence de *backhaul* : les bits de contrôle et les bits de données partagent le même milieu ;
- réseau de type ad hoc ;
- réseau aléatoire : les nœuds peuvent éventuellement se déplacer, voire apparaître ou disparaître ;
- présence d'interférences massives car le milieu radio est un canal très diffusif.



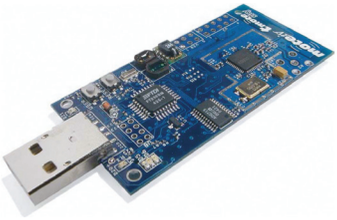
Répartition des charges de travail pour un mobile haut de gamme

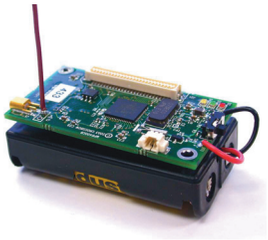
source : C.H. Van Berkel



Consommation radio *vs.* Taux de réception et d'émission

Technologies de communication et réseaux





Diversité des formes d'objets communicants

Les objets communicants sont composés de 4 sous-ensembles fonctionnels :

- un micro-contrôleur ou un CPU central qui implémente la logique applicative et la pile de communications ;
- les capteurs et actionneurs qui sont en interaction avec l'environnement ;
- un circuit d'alimentation qui s'appuie sur une batterie ou sur un générateur local (oscillation, photo-voltaïque…) ;
- une ou plusieurs interfaces de communication.

Les moyens de communications s'appuient naturellement sur des technologies de communication sans fil optimisées pour consommer le moins d'énergie possible et conçues pour être produites à très bas coût.

Il existe des ***moyens de communications de proche à proche*** dédiés à des usages précis comme l'échange d'un identifiant dans le cas des RFID ou la vérification d'une identité pour les ***NFC***, et des ***moyens de communications plus généralistes*** sur lesquels peuvent s'appuyer un très grand nombre d'applications potentielles (Wi-Fi, ZigBee, HomePlug, BlueTooth, LTE…). Par ailleurs, en l'absence de standard, de nombreux domaines d'activité ont défini leurs propres mécanismes propriétaires (souvent des variantes de technologies existantes) mais il y a une tendance à revenir à des technologies de communication plus communes du fait du coût important que représentent la gestion et la maintenance de ces réseaux propriétaires qui, malgré tout, doivent être capables de communiquer avec les autres réseaux.

En revanche, il n'est pas possible d'utiliser telles quelles les technologies de communication sans fil qui ne sont pas adaptées aux contraintes imposées par certaines classes d'objets communicants, notamment en ce qui concerne la consommation énergétique. De fait, il existe des variantes faible consommation de technologies de communication très répandues comme le Wi-Fi. Les protocoles de routage doivent eux-aussi intégrer les nouvelles contraintes pour fonctionner sur des réseaux bas-débit dont les liens et les nœuds sont volatiles, du fait d'une part de la qualité des liens radio eux-mêmes, et d'autre part des mécanismes de réduction de la consommation énergétique qui supposent la mise en veille des nœuds le plus souvent possible.

Différents types d'objets concernés

Du point de vue de leur mise en réseau, plusieurs types d'objets peuvent être distingués : les objets autonomes qui fonctionnent sur batterie ou qui puisent leur énergie dans leur environnement, et les objets alimentés qui sont peu contraints par l'énergie mais qui peuvent avoir une capacité de traitement réduite pour des questions de coût de production (les ampoules contrôlées à distance par exemple). Par ailleurs les techniques de réduction de la consommation énergétique de la communication se traduisent le plus souvent par une réduction de la puissance consommée et donc diffusée dans l'environnement sous forme de rayonnement, ce qui permet non seulement d'augmenter le nombre d'objets sans dégrader les communications, mais aussi de réduire l'exposition aux ondes électromagnétiques des personnes.

Un certain nombre d'objets seront simplement des ordinateurs simplifiés et disposeront d'un accès Ethernet, Wi-Fi ou LTE pour communiquer dans le réseau local ou à travers l'Internet en utilisant une pile de communication TCP/IP standard. Pour ce type d'objets la mise en réseau ne pose pas de problème particulier, mais il faut prendre en compte le nombre d'objets dans l'organisation des communications. Par ailleurs, la découverte automatique des objets, leur mise en relation et leur gestion va nécessiter de revisiter les outils mis en place dans le cadre de l'Internet. On s'accorde en effet à penser que nous aurons plusieurs dizaines de milliards d'objets connectés d'ici 2020.

Par ailleurs, si les problèmes de consommation énergétique ne sont pas aujourd'hui un facteur limitant pour ces objets qui ne sont généralement pas alimentés sur batterie, l'explosion de leur nombre dans les bâtiments et dans l'environnement urbain rendra nécessaire la réduction de leur appétit énergétique.

Modèles de communication

Plusieurs modèles de communication sont généralement implantés dans les réseaux d'objets communicants. L'*unicast* consiste en l'envoi d'un message vers une destination précise dont l'identité (l'adresse) est connue : cela peut être une passerelle vers l'Internet lorsque le réseau d'objets est relié au réseau des réseaux. Ce type de communication fonctionne soit sur le modèle de l'Internet à l'aide de tables de routage installées dans les objets qui peuvent relayer du trafic (une fonction qui peut être réservée à des objets disposant de capacités étendues comme dans le cas de ZigBee), soit sur un modèle à la demande qui suppose

Réduction de la consommation énergétique au niveau réseau

Les deux principaux postes de consommation sont les circuits de mesure de l'environnement et/ou d'action qui peuvent supposer une forte consommation souvent limitée dans le temps, et l'interface de communication. Le premier dépend fortement de la mesure ou de l'action effectuée par le capteur.

L'étude de la consommation des interfaces de communication des objets communicants montrent que contrairement aux idées reçues ceux-ci consomment plus lorsqu'ils écoutent que lorsqu'ils émettent. Cela tient au fait que l'oscillateur nécessaire à la modulation du signal est le principal consommateur d'énergie du circuit, et que l'amplification très consommatrice pour les téléphones par exemple (1 W), est très faible dans le cas des protocoles basse consommation (< 1mw pour ZigBee). Pour les objets qui utilisent des technologies de transmission longue portée, il reste possible d'implanter des mécanismes de contrôle de puissance pour réduire l'énergie consommée par l'amplificateur, mais aussi de diminuer les perturbation subies par les autres objets et ainsi réduire la puissance nécessaire à leurs propres transmissions.

Pour les technologies de transmission à faible consommation, l'amplification ne représente qu'un centième de la consommation de l'objet, et la mise en veille de l'interface de communication est un moyen plus efficace pour limiter la consommation énergétique. Cela passe par l'organisation des temps de veille, de transmission et d'écoute, et la réduction de la quantité de données échangées dans le réseau.

De nombreux travaux de recherche s'attachent à réduire le temps de veille des objets en organisant les échanges pour que l'objet récepteur ne soit pas contraint d'écouter tout le temps, et les concepteurs d'équipement réduisent le temps et l'énergie nécessaires pour passer du mode veille au mode d'écoute. Ainsi un émetteur va tenter de réveiller le récepteur cible en émettant de petits messages régulièrement pendant un intervalle de temps minimum, qui correspond au temps de veille maximum entre deux réveils et à un intervalle correspondant au temps d'un réveil de surveillance. Pour ne réveiller que le ou les objets concernés, il est possible d'ajouter l'adresse dans la demande de communication. Ce mécanisme a l'avantage de fonctionner en mode asynchrone.

D'autres mécanismes s'appuyant sur une synchronisation réduisent plus encore la proportion de temps de veille des objets. C'est le cas notamment lorsque tous les objets communiquent avec le même puits (voir page suivante les différents modes d'organisation des réseaux d'objets) qui peut donc se charger de synchroniser le canal de communication. Les protocoles utilisés actuellement permettent de réduire le temps de veille à moins de 1 % du temps lorsque la quantité de données à échanger est faible.

Un autre moyen de réduire la consommation est de spécialiser les rôles. Par exemple, lorsque les objets doivent construire un graphe ou un arbre pour router le trafic, il est possible d'organiser l'ensemble des nœuds en secteurs, chacun des secteur étant contrôlé par un maître qui participera au protocole de construction et de maintenance de la topologie. Les nœuds esclaves consomment moins d'énergie car ils participent moins au routage du trafic dans le réseau et pas du tout à la gestion de la topologie. Les nœuds maîtres consomment moins d'énergie que la consommation cumulée des nœuds si chacun participait individuellement, et la topologie étant simplifiée, il est possible de la maintenir avec moins d'échanges.

De plus, le rôle de maître peut être assuré successivement lorsque certains nœuds ne sont pas naturellement conduits à l'assumer (ceux qui disposent d'une source d'énergie abondante). De nombreux mécanismes existent et doivent composer avec la taille des secteurs (qui dépend de la technologie de transmission et du fait que l'on tolère ou non que les communications entre les maîtres nécessitent des sauts) et de leur stabilité, car la phase de construction des secteurs et de l'élection des maîtres est potentiellement fastidieuse.

Certains protocoles MAC permettent également de réduire le temps ou le nœud est actif (*MAC with Low Duty*).

la découverte d'une route pouvant être installée dans les nœuds intermédiaires ou ajoutée à chaque message (routage par la source). Dans le second cas, les nœuds intermédiaires n'ont pas à stocker d'information de routage qui ne les concernent pas, mais chaque message transporte la route à parcourir dans le réseau et subit une surcharge conséquente.

La diffusion sélective consiste à émettre un message vers un sous-ensemble d'objets et suppose le plus souvent la création d'un arbre de diffusion préalable. Par souci de simplicité d'implémentation, de nombreux systèmes se contentent d'utiliser l'*inondation* (envoi à tous les objets), les membres du groupe destinataire ayant à charge de se reconnaître et de traiter le paquet. L'inondation est très utilisée dans les ***réseaux spontanés*** et elle est à la base de nombreux mécanismes de découverte automatique et de configuration (notamment du routage). Dans les réseaux d'objets très étendus, le coût peut en être prohibitif et la portée en est souvent limitée par un nombre de sauts maximum. Une autre façon d'en limiter la portée est d'inonder une catégorie particulière d'objets qui ont la responsabilité d'agir au nom d'un sous-ensemble de nœuds, et éventuellement de stocker temporairement le trafic qui leur est destiné.

La ***collecte*** (*many to one*) est un modèle de communication plus spécifique aux réseaux de capteurs, mais qui peut être généralisé à tout réseau d'objets charger de collecter de l'information. Il s'agit pour un ensemble d'objets d'envoyer de l'information vers un collecteur, mais pour éviter la surcharge de celui-ci et de ses voisins, les messages sont agrégés dans le réseau et éventuellement pré-traités. Il est ainsi possible de calculer progressivement une moyenne ou de remonter une température maximum. Des traitements plus complexes peuvent être effectués en fonction de l'application.

Adressage et identification

Les objets communicants doivent disposer d'un identifiant pour se différencier les uns des autres et pour communiquer. Dès lors que l'on cherche à rendre possible la communication vers un objet particulier, l'utilisation des identifiants comme des adresses est aisé et permet de fonctionner dans de petits réseaux. Malheureusement cet espace d'adressage à plat entraîne des échanges importants dans le réseau pour construire des tables de routage qui doivent contenir chaque identité, et il ne permet pas l'interconnexion avec l'Internet autrement que par une passerelle. ***L'adresse, contrairement à l'identifiant***, comprend des éléments permettant de localiser l'objet dans la topologie du réseau et plus généralement de l'Internet lorsqu'il s'agit d'une adresse globale. La structuration hiérarchique de l'espace d'adressage permet de réduire très fortement la taille des tables, mais suppose une gestion adaptée des objets mobiles qui doivent changer d'adresse au gré de leurs déplacements dans le réseau.

Pour favoriser le développement de nouveaux usages, il est important que les applications puissent accéder directement aux objets pour construire des services avancés qui ne supposent pas le déploiement de passerelles spécifiques. Pour cela, ***il est indispensable que les objets disposent d'un adressage compatible avec l'Internet***. La gestion du plan d'adressage IP va jouer un rôle important dans ce contexte pour la résistance au facteur d'échelle, surtout en présence de réseaux denses. Dans les propositions actuelles les nœuds les plus proches du puits (ou passerelle) peuvent soit garder une liste de l'ensemble des capteurs pour lesquels ils ont une route, soit utiliser un adressage hiérarchique IPv6 qui permet de réduire le nombre de ces entrées mais implique une affectation plus intelligente des adresses au niveau des capteurs.

> *“De nouvelles formes d'adressage apparaissent dans les travaux de recherche pour intégrer la position géographique dans l'adresse de destination des paquets, ce qui permet d'atteindre tous les objets d'un système se trouvant dans une zone géographique donnée. Par exemple, un véhicule cherche à atteindre tous les véhicules qui sont à moins de 200m derrière lui pour prévenir qu'il freine.”*

secteurs d'activité	bâtiments, énergie, industrie, transports, grand public, santé, réseaux & télécoms	sûr
réseaux d'accès	GSM, 3G, LTE, Wi-Fi,	Wi
lieux concernés	maison, bureau, immeuble, hôpital, aéroport, campus, stade, entrepôt, usine…	véh évé
organisation	autour d'un puits ou auto-organisés auto-évolutifs, apprenants, fusionnant	de
technologies et standards	*filaire :* CPL, X10, HomePlug…	*sar* Wi-

Des standards aux usages de l'internet des objets

On distingue communément plusieurs organisations de réseau d'objets communicants :

① les ***réseaux organisés autour d'un puits*** qui est chargé de collecter les informations remontées par les capteurs. Les capteurs peuvent être en vue directe du puits ou organisés sous la forme d'un arbre de collecte enraciné sur le puits. Dans le premier cas, les capteurs éloignés doivent dépenser plus d'énergie pour communiquer directement avec le puits. Tant que l'occupation du canal reste faible, ce qui permet de simplifier le contrôle d'accès au canal, et l'étendue du réseau restreinte, cette méthode est la plus simple à mettre en œuvre. Dans le second cas, il faut construire et maintenir l'arbre de collecte, ce qui occasionne un trafic de contrôle, mais les objets peuvent communiquer de proche en proche à faible puissance, ce qui permet de limiter leur consommation et les interférences. Il est par ailleurs possible de traiter les données au fur et à mesure de leur progression dans l'arbre pour réduire la quantité de données atteignant le puits et donc la charge réseau sur les liens proches de la racine.

② les ***réseaux auto-organisés*** connectés ou non à un réseau plus généraliste (Internet). Chaque objet est potentiellement capable de communiquer avec tous les autres et la logique

Les standards et les normes

rts, ns	sûreté et sécurité publique, commerce de détail, électronique
-Fi,	WiMAX, xDSL, Satellite…
ital, pôt,	véhicule, rues, champs, maritime, intervention d'urgence, événementiels…
t	des données, interconnectés pour fouiller des données…
	sans fil : RFID, NFC, Bluetooth, Zigbee, WirelessHART, ISA 100a, Wi-Fi basse consommation...

La plupart des développements autour des objets communicants se sont faits autour d'architectures de communication propriétaires et plus généralement de piles de communication optimisées (ne respectant pas la séparation des couches protocolaires) pour ce type d'usage à très basse consommation. Il existe ainsi une norme plus ancienne, ***X10***, assez largement déployé dans les installations de domotique pour transporter des commandes. Elle permet de contrôler des ampoules et plus généralement tout appareil branché sur le secteur, mais n'est pas adaptée pour le transport de données.

Il était en effet communément admis que la pile TCP/IP conçue pour des ordinateurs fixes était bien trop complexe pour être implantée dans des objets. Il y avait de fait une dichotomie et une incompatibilité entre les objets plus complexes (smartphone, télécommande, mini-serveur…) implémentant des piles TCP/IP pleinement opérationnelles et les objets fonctionnant avec des protocoles propriétaires qui nécessitent une passerelle pour communiquer avec le reste du monde.

Les travaux récents autour de la pile de communication TCP/IP adaptée aux environnements embarqués (TinyOS, Contiki…) ont cependant montré qu'il était possible d'implémenter des piles complètes en quelques kilo-octets. De fait, de nombreux travaux se réorientent vers ces piles adaptées aux objets communicants, et l'IETF travaille à adapter le protocole IP et les mécanismes de routage aux réseaux et aux technologies de transmission utilisées par les objets.

Low Power WPAN : IEEE 802.15.4

Le IEEE 802.15.4 a été défini par l'IEEE dans le groupe de travail 802.15 (PAN). Il vise les faibles bandes passantes (< 250kbps) et les faibles puissances (< 1mW). Les équipements ont une portée de quelques dizaines de mètres et peuvent opérer sur batterie pendant plusieurs années en fonction des applications. Le IEEE 802.15.4 est utilisé comme couche de transmission (niveau 1 et 2 de l'architecture OSI) par de nombreux standards propriétaires (*i.e.* non IP) : WirelessHART, ISA 100a, ZigBee…

Du fait de la faible qualité potentielle des liens et des débits visés, le IEEE 802.15.4 utilise des trames de petite taille (127 octets) qui peuvent être acquittées de proche en proche et de bout en bout. Les standards l'utilisant doivent donc implanter des mécanismes de fragmentation et de réassemblage.

Le IEEE 802.15.4 implémente différentes topologies de réseau : l'étoile où tous les nœuds voient le nœud central, le réseau auto-organisé, et le réseau de secteurs (*clusters*). Dans ce dernier, seuls les maîtres de secteur participent au routage. Ces topologies sont peu utilisées par les standards utilisant le IEEE 802.15.4 qui préfèrent définir leur propres topologies au-dessus du niveau liaison.

Deux types de nœuds sont définis, les nœuds pleinement fonctionnels (***FFN***) qui peuvent être en charge de sous-réseaux (les ***PAN***) et les nœuds disposant de fonctionnalités réduites (***RFD***) qui ne peuvent communiquer qu'avec les premiers. Des mécanismes de réduction de la consommation permettent d'éteindre et d'allumer la partie transmission et de réguler la

s

applicative peut être ou non distribuée dans le réseau. Les objets peuvent être de nature hétérogène jusque et y compris dans les fonctionnalités des couches de communication. Ces réseaux peuvent combiner des nœuds alimentés sur batterie avec des nœuds ayant moins de contrainte énergétique et / ou de traitement. Les protocoles de routage chargés de calculer les routes pour permettre aux nœuds de communiquer doivent s'accommoder des liens bas débit et d'une grande instabilité du réseau. Ils doivent aussi réduire très fortement la quantité de donnée stockés dans les nœuds. Un très grand nombre de travaux se sont attachés à définir des protocoles de routage pour les réseaux ad-hoc pour lesquelles les contraintes évoquées sont aussi importantes, et plusieurs types de solutions ont émergé. Toutefois, les réseaux d'objets concernent potentiellement un très grand nombre de nœuds qui peuvent être extrêmement simplifiés (peu à même d'exécuter l'***algorithme de Dijkstra*** sur un grand nombre de nœuds). Les récents travaux du groupe de travail ROLL de l'IETF ont montré qu'il était nécessaire de définir un nouveau mécanisme plus spécifiquement conçu pour réduire la consommation énergétique et les échanges. Il est en particulier nécessaire que la disparition d'un nœud ou d'un lien ne nécessite pas la réorganisation globale du réseau.

puissance d'émission indépendamment pour chaque paquet émis. Un module IEEE 802.15.4 consomme très peu en mode veille et un peu moins de 60mW en écoute ou en émission. L'énergie nécessaire à l'émission peut être réduite de moitié en réduisant la portée.

Le format de trame est extrêmement modulaire et peut être adaptée à de nombreux usages. L'adresse peut être de 16 bits ou de 64 bits, les adresses courtes étant réservées pour un usage à l'intérieur d'un sous-réseau. Dans ce cas les nœuds ajoutent l'identifiant du ***PAN*** pour communiquer à l'extérieur du sous-réseau, ce qui revient à implémenter une hiérarchie d'adressage à deux niveaux.

Le IEEE 802.15.4 peut fonctionner dans plusieurs bandes de fréquences sans licence avec des débits différents :

- canal 0 : 868-868.8 MHz (EU), 20 kbps
- canaux 1-10 : 902-928MHz (USA), 40 kbps
- canaux 11-26 : 2,4-2,4835 GHz, 250 kpbs

Les canaux 11 à 24 étant en concurrence avec les canaux du Wi-Fi et d'autres technologies pouvant entrer également en conflit avec le IEEE 802.15.4, il implémente un mécanisme de mesure du signal radio qui permet de dire si le canal est occupé au niveau de la couche physique (sans démoduler le signal). Le mécanisme utilisé pour transmettre les trames est proche de celui utilisé dans le Wi-Fi (CSMW/CA) : avant de tenter de transmettre sur un canal, un module IEEE 802.15.4 le teste pour vérifier qu'il n'est pas utilisé, et un code de détection d'erreur est utilisé pour vérifier que la trame est bien reçue avant de l'acquitter.

Wi-Fi basse consommation

A priori, le Wi-Fi est plus adapté aux hauts débits qu'aux objets communicants fonctionnant sur batterie. Mais le IEEE 802.11 a pour lui une très grande popularité et un très grand nombre de hot-spots installés ; cela a entraîné

Implémentation de la sécurité au niveau des objets

Dans le cas où les applications requièrent la communication de données confidentielles, les objets se doivent d'être dotés de ***fonctions cryptographiques***. L'ajout de ces fonctionnalités n'est pas chose aisée dans l'implémentation des objets communicants car des contraintes fortes apparaissent :

- minimisation du calcul et de l'énergie engendrés par ces calculs supplémentaires ;
- protection des secrets cryptographiques face aux attaques physiques.

Compromis coût / vitesse / sécurité

L'étude de l'implémentation électronique doit doser l'effort consacré à la cryptographie pour ne pas nuire au coût et à la vitesse des calculs. Les communications effectuées grâce à une infrastructure à clé publique fondée sur la cryptographie asymétrique et où il y a lieu d'échanger les clés publiques s'avèrent extrêmement coûteuses et lentes, à moins d'augmenter significativement les ressources de calcul. Il est plus simple d'utiliser un protocole sans établissement de clés, et reposant sur la cryptographie symétrique seule. En revanche les attaques visant à retrouver la clé unique sont facilitées. Une contrainte de flexibilité peut aussi être nécessaire dans le cas où l'objet est auto-adaptatif. À cela, il faut ajouter des mécanismes d'identification pour greffer des protocoles permettant de vérifier l'intégrité de l'objet. L'optimalité de l'implémentation dépend ainsi des priorités données entre le niveau de confiance attendu, conditionnant le choix des protocoles, et les critères physico-économiques de l'objet comme la vitesse de calcul et la consommation.

Protection face aux attaques physiques

Les objets communicants peuvent être la cible de nombreuses attaques qui visent à retrouver les clés secrètes qui identifient l'objet. Les attaques par « canaux cachés » parviennent à déduire les clés à partir de mesures physiques : rayonnement électromagnétique, consommation. Les secrets peuvent également être déduits de dysfonctionnement imposés à l'objet : injection de fautes, déni de service, ou simplement baisse de la tension d'alimentation. De façon à se prémunir contre ces attaques, les objets doivent être protégés par des contre-mesures au niveau de l'implémentation des algorithmes. Un des défis est d'utiliser des contre-mesures disposant d'un haut niveau de résilience. La ***résilience*** est une propriété telle que l'attaque sur un objet attaqué ne remet pas en cause le fonctionnement des autres objets ni ne permet une exploitation par l'attaquant. Par exemple, un protocole de communication peut être construit sur une fonction majorité permettant de mettre en quarantaine un objet susceptible d'être attaqué. De même l'implémentation des fonctions cryptographiques peut avoir des structures redondantes pour inhiber le calcul lors de fautes injectées pendant une attaque.

Protection au niveau réseau

Pour assurer toute ou partie des propriétés de sécurité classiques que sont ***l'authentification, la confidentialité, l'intégrité et la disponibilité***, les systèmes utilisant des objets communicants doivent composer avec le fait qu'ils sont par nature distribués et composés de très nombreux objets ne disposant pas d'interface

une diminution des coûts de production des puces, ce qui en fait une technologie attirante pour les objets. Aussi des efforts ont été faits pour réduire la consommation énergétique, et de nouvelles puces Wi-Fi basse consommation atteignent des performances satisfaisantes en optimisant la dépense énergétique en mode veille, ce qui permet de fonctionner plusieurs années sur de simples piles AA.

Un mode de veille basse consommation qui désactive une grande partie des circuits est ajouté pour permettre de redémarrer très rapidement. Par ailleurs, les circuits sont optimisés pour consommer moins de la moitié de l'énergie en émission ou en écoute. Mais l'optimisation la plus importante concerne le mode veille qui consomme 10 fois moins d'énergie que le Wi-Fi standard. Un mode de veille profonde qui ne laisse actif que le module de réveil divise encore par 10 la consommation. Grâce à ces outils, il est tout à fait possible à présent de concevoir des objets communicants avec des interfaces Wi-Fi.

Courants porteurs en ligne

Les objets communicants ne sont pas condamnés à utiliser des technologies sans fil, les réseaux filaires permettant souvent de mieux garantir la disponibilité du réseau. Plusieurs standards tirent ainsi avantage des réseaux électriques déjà disponibles pour transporter des données. HomePlug atteint ainsi des débits de l'ordre de 15 Mbps (et jusqu'à 300 Mbps pour les modems courant porteur les plus récents). Bien que, par définition, les équipements CPL aient accès à une énergie abondante, il est nécessaire de réduire leur consommation énergétique pour éviter la dissipation de chaleur dans les objets connectés, car leur très grand nombre potentiel peut représenter une dépense énergétique cumulée non négligeable. De fait, les composants CPL récents ont des performances comparables au Wi-Fi basse consommation.

Confrontée aux aspects de régulation nationale, cette technologie n'a pas toujours pu être déployée selon un plan de grande envergure.

de configuration. Par ailleurs, pour ce qui est des objets mobiles, ils doivent conserver le moyen de découvrir leur environnement et de s'y intégrer automatiquement. Le respect de la vie privée est une autre dimension à prendre en compte, qui passe par l'anonymisation des données et/ou la confidentialité. Si cette dernière n'est pas garantie, l'anonymisation doit être assurée dès l'envoi des données.

Il convient aussi de rappeler qu'il est illusoire de vouloir maintenir un haut niveau de confidentialité et d'intégrité en gardant secret les mécanismes et algorithmes utilisés. Il arrive en effet toujours un moment où le secret est dévoilé par des personnes ayant eu à le connaître, ou simplement par rétro-ingénierie. Les seules choses qui peuvent être considérées comme secrètes sont les clés de chiffrement. Toutefois, il faut disposer d'un mécanisme qui permette de les changer.

Les systèmes de cryptographie à clé privée qui sont généralement utilisés pour assurer l'authentification des parties supposent des calculs compliqués qui sont hors de portée des objets les plus simples. La confidentialité et l'intégrité s'appuient donc sur des mécanismes standards de cryptographie à clés partagées qui supposent de pouvoir déployer des clés sur l'ensemble des objets participant à un système, voire à une application. La sécurité peut être assurée de proche en proche en s'appuyant sur les technologies de communication (par exemple le IEEE 802.15.4), de bout en bout au niveau de chaque paquet avec IPSec, ou au niveau des flux avec le protocole TLS largement utilisé dans l'Internet. Les clés partagées nécessaires à ces systèmes peuvent être installées dans les objets lors de leur fabrication, de leur déploiement, ou en phase opérationnelle.

C'est le cas du modèle du caneton ressuscitant (*resurrecting duckling*), proposé en 1999 par Stagano pour des objets communicants ne disposant pas d'interface de communication complexe (telle qu'un serveur Web intégré). Lorsqu'un caneton brise sa coquille, il mémorise la silhouette de sa mère et la suit ensuite quoi qu'il arrive. En réalité, il mémorise sans discernement la première forme qu'il rencontre, qu'il s'agisse d'une cane ou d'autre chose. Sur ce même principe, un objet au moment de sa « naissance » va mémoriser une clé qui lui est présentée. Il faudra ensuite « tuer » l'objet pour qu'il accepte de mémoriser une nouvelle clé, la procédure pouvant être logicielle en utilisant la clé précédente, ou nécessiter la manipulation physique de l'objet.

Notons ici que des fabricants d'objets communicants commencent à intégrer des composants dédiés au calculs cryptographiques (AES ou DES) pour alléger les traitements faits au niveau du processeur central lors du chiffrement des communications de proche en proche. Ces composants peuvent être mis à contribution directement par les couches hautes.

Suivant la criticité des applications, les systèmes s'appuyant sur des objets peuvent faire l'objet d'attaques par déni de service qui ont pour objectif de rendre le système inopérant. Les protocoles de communication peuvent être attaqués à différents niveaux. Par exemple, il est possible de brouiller le signal ou de priver un objet de sommeil en lui envoyant des données inutiles. Cela a pour effet de réduire fortement la durée de vie du système. Une des solutions proposées pour se protéger de ce type d'attaque est d'utiliser un système à saut de fréquences dont la suite de fréquences n'est partagée que par les objets légitimes à participer au système.

Les travaux de l'IETF

Jusqu'à récemment, l'IETF n'avait pas prêté attention au développement des objets communicants, alors même que de nombreux standards propriétaires étaient développés par plusieurs alliances d'industriels, chaque communauté d'usage développant son propre standard. Deux groupes ont été créés en 2007, l'un pour optimiser IPv6 sur des réseaux d'objets communicants utilisant IEEE 802.15.4 comme technologie de communication, l'autre groupe cherchant à définir un protocole de routage pour les réseaux de capteurs. À n'en pas douter, d'autres groupes de travail seront créés dans les prochaines années pour répondre aux besoins identifiés par la communauté travaillant sur les objets communicants.

6LowPAN

Le groupe de travail 6LowPAN est en charge d'optimiser le fonctionnement d'IPv6 au dessus d'un réseau IEEE 802.15.4. Il est en effet nécessaire d'adapter le fonctionnement du protocole à l'intérieur d'un nuage IEEE 802.15.4. Le principe est de reporter la charge d'adaptation (compression d'en-tête, fragmentation, adressage…) à la frontière du réseau, tout en conservant un fonctionnement sans état des passerelles.

Il définit notamment un mécanisme de démarrage et d'auto-configuration avec différentes variantes en fonction du niveau de sécurité requis. Il réduit l'*overhead* d'IPv6 en compressant les en-têtes IPv6 à une moyenne de quelques octets par paquet IP, et gère la fragmentation et le réassemblage dû à la faible taille des trames IEEE 802.15.4.

RPL (Routing Over Low power and Lossy networks)

Le groupe de travail ROLL de l'IETF définit un protocole de routage adapté aux contraintes spécifiques des réseaux de capteurs caractérisés par une forte densité de capteur / routeur, une capacité de traitement, une mémoire et une énergie limités. Il est fondé sur un protocole à vecteurs de distance permettant de construire un graphe dirigé vers un puits, autorisant plusieurs routes alternatives utilisables en cas de panne d'un routeur. Une gestion fine des temporisateurs de retransmission permet de limiter le trafic quand la topologie du réseau est stable. Le but des protocoles développés par l'IETF est de permettre l'interrogation de capteurs depuis les machines situées sur le réseau Internet traditionnel.

Les ressorts économiques

Les objets vont devoir de plus en plus au minimum être étiquetés ou « taggés » passivement, porteurs de métadonnées utilisables par des systèmes numériques, ou dotés de capacités interactionnelles (capture, traitement, restitution de données), au-delà de leur usage propre. Ceci a évidemment un coût.

L'étiquetage des produits est aujourd'hui réglementé. L'identification univoque des objets est normalisée (code ***EAN*** géré par GS1). Dans l'évolution nécessaire de ces normes et réglementations s'inscrira pour partie les potentialités de l'internet des objets et la répartition des coûts associés à cette identification et étiquetage. L'introduction de la radio-identification, de la géolocalisation, voire de la capture de paramètres jugés essentiels (température par exemple) vont devenir des enjeux importants entre les fabricants de ces objets et les systèmes cherchant à utiliser ces informations. L'ouverture de ces données, dès lors qu'elles échappent à une normalisation, leur codage éventuel, vont ouvrir ou restreindre la capacité de traitement offerts par ces objets à leurs fabricants, qui seront alors les seuls à pouvoir développer des services en aval de leur usage, ou à d'autres intervenants.

Gageons que nous aurons là un nouveau champ important de la régulation de la concurrence, du fait des intégrations verticales biens-services que ces potentialités vont générer : en d'autres termes, ***faudra-t-il acheter la machine à laver labellisée par nos fournisseurs de vêtements ou faudra-t-il acheter les vêtements labellisés par notre fournisseur de machine à laver, ou le système vêtements-lavage sera-t-il ouvert ?*** Problématique tout à fait semblable à celle ouverte aujourd'hui autour de l'intégration des produits d'Apple avec iTunes.

Une des dimensions les moins explorées de ces questions est celle de l'intégration des données d'usage aux objets, en quelque sorte de leur histoire propre : quels lavages a subi tel vêtement, qui a vu telle vidéo, lu tel article de presse, etc. La métadonnée associée à un objet sera rarement « morte », mais au contraire potentiellement extrêmement vivante.

L'offre d'un service recourant aux données captées, détenues ou produites par des objets en grand nombre soulève donc de multiples difficultés pour établir des modèles économiques soutenables. Plus le service est bâti sur un grand nombre de ces objets, dont on peut alors faire raisonnablement l'hypothèse qu'ils sont la propriété de multiples agents, plus ou moins utilisateurs de ces services, plus le modèle économique subit des coûts de transaction et des contraintes réglementaires et industrielles fortes.

Bon nombre de ces systèmes vont ainsi reposer pour tout ou partie sur des sources d'information (et donc vraisemblablement de capteurs) détenues par des entités publiques. Les modalités d'accès à ces sources (techniques, financières, commerciales…) seront vraisemblablement centrales des équilibres économiques pouvant être atteints.

Si les sources sont détenues par des entités privées (personnes morales ou physiques), il faudra probablement que l'accès à ces sources soit pérenne, c'est-à-dire qu'un prestataire ayant bâti un service sur un type de sources ne se voit pas privé du jour au lendemain de cet accès. En d'autres termes, certaines sources pourraient être considérées comme des ***ressources essentielles***, permettant de développer en aval des marchés de service, et dont l'accès devra peut-être être régulé : accès obligatoire, sauf conditions mettant en péril la source, accès non discriminatoire, accès équitable (à un prix orienté vers les coûts).

Il pourrait exister un ***problème d'amorçage*** lié à des externalités de réseau. La qualité des services fournis reposera en grande partie sur l'extension de la collecte d'informations. Au démarrage, ces systèmes fournissent donc une piètre information et la propension à s'y raccorder est en conséquence faible. Pour initialiser l'effet réseau associé à la diffusion des usages, il faut amorcer le processus en abaissant, voire annulant la contribution, soit de connexion, soit d'usage à ces systèmes, jusqu'à ce que le niveau de qualité permette de redresser les tarifs.

Une contradiction va vraisemblablement surgir entre cette nécessaire « ouverture » des sources et la non moins nécessaire « protection » des données personnelles, puisque cette mise à disposition d'informations captées individuellement risque de fait de dévoiler des informations personnelles. L'internet des objets est craint par beaucoup comme l'irruption possible d'une société de surveillance, voire d'aliénation, qui porterait d'ailleurs son échec probable. L'***arbitrage*** qui en résultera orientera la constitution de ces systèmes, en recourant massivement à la capture privée, si elle est libérale, ou au contraire, en s'orientant plus vers la capture publique, si celle-ci est plus favorable.

> *« Les initiatives d'ouverture des données par certaines métropoles comme Rennes contribuent à amorcer la création de services innovants exploitant les données provenant de capteurs. »*

Quelle chaîne de valeur pour quelle architecture industrielle ?

On peut s'interroger sur l'architecture industrielle la mieux à même de tirer le meilleur parti de l'internet des objets. Le premier modèle qui s'impose est un ***modèle clos*** dans lequel le prestataire contrôle tout son dispositif, des capteurs et des systèmes middleware aux environnements de service proposés aux marchés : les consommateurs ne participent guère à la collecte. Le modèle opposé est celui où la collecte des informations, voire l'usage des services, est le fait d'une population éclatée qui fournit et consomme de l'information auprès d'un prestataire qui rassemble, traite, exploite et délivre des données à partir d'une capture qui lui est largement extérieure.

Entre les deux, réside une architecture dans laquelle des acteurs intermédiaires collectent, rassemblent et assurent un premier formatage des informations, éventuellement anonymisées pour garantir la confidentialité des informations, et délivrent ces informations à un second niveau de prestataires délivrant des services évolués. D'un côté des processeurs de données brutes (*raw data*), de l'autre des prestataires de services.

Cette architecture médiée pourrait faciliter le déploiement de l'internet des objets en sortant les capteurs des silos qui caractérisent le modèle clos dans lequel la valorisation des capteurs, non partagée, sera plus difficile.

Perspectives stratégiques

De nombreuses définitions de l'internet des objets existent dans la littérature, et nous avons montré dans ce cahier que cette diversité vient notamment de l'angle choisi pour le décrire. Un point de vue trop techno-centré va en privilégier une certaine vision, qui sera sans doute rejetée ou du moins mal acceptée par les utilisateurs.

Mais avant tout, l'internet des objets est cet immense défi des ***objets de l'internet***, plongés par milliards dans une conversation entre eux et avec les humains, supposés devenir aussi naturels et utiles que tous les objets que nous avons créés jusqu'ici, produits à des coûts raisonnables et avec une empreinte écologique optimale, et manipulés par des personnes qui ne sont pas forcément à l'aise avec le numérique.

Quels sont les **défis techniques à relever**, les **questions sociales à résoudre**, et les **modèles économiques à inventer**, c'est ce que nous mettons en perspective à présent.

Les défis techniques

Reprenons les défis de la ville intelligente présentés en première partie. Parmi les multiples verrous identifiables, nous pouvons citer :

- le ***support de l'hétérogénéité*** : en termes de besoins, de moyens de communiquer, de capacités de calcul ;
- le ***développement d'une base de données*** (données anonymisées ou non) ***géolocalisée***, liée aux questions de vie privée et de qualité de l'information ;
- le problème de ***passage à l'échelle*** : s'il est nécessaire de prendre en compte les besoins et préférences spécifiques de chaque usager, il ne faut pas que le réseau ait à maintenir et à prendre en compte cette information dans des serveurs centralisés. Le problème revient alors à distribuer l'intelligence (*i.e.* le mécanisme de décision), peut-être jusque dans les terminaux des utilisateurs ;
- l'***efficience énergétique*** et la ***disponibilité des équipements***. En utilisant par exemple des capteurs à très forte longévité définis dans d'autres projets, mais aussi en utilisant des moyens de communication ubiquitaires à courte portée et intégrant un contrôle de puissance performant (*i.e.* à l'intérieur des véhicules).

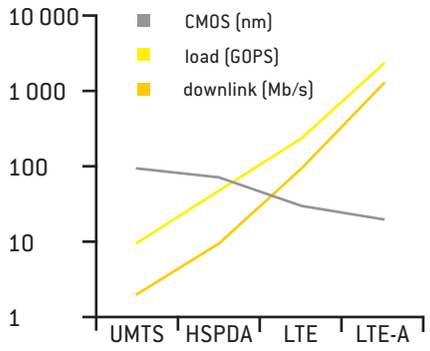
Toutes ces questions sont liées les unes aux autres, et on peut les aborder à travers les enjeux de la recherche de performance, de la gestion de l'énergie et du niveau de flexibilité à atteindre.

Performance des objets

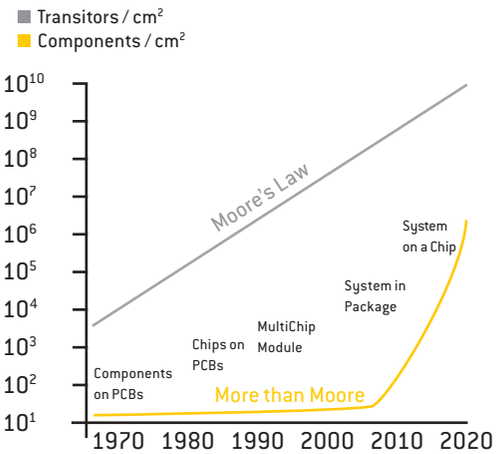
> *On le sait, le conflit entre intérêt individuel et fonctionnement collectif n'a pas de solutions immédiates… Il reste un problème difficile pour la gestion de la radio opportuniste entre objets qui tendent à optimiser leur ressource propre, et le centre gestionnaire qui favorise le réseau dans la recherche des compromis.*

Alors que dans les réseaux de capteurs actuels les besoins en calcul embarqué restent limités, il est attendu des futurs objets communicants des performances algorithmiques et de réseau bien supérieures. L'objet aura pour tâche de s'intégrer de façon autonome à un environnement quelconque, *a priori* hétérogène, et devra pour cela disposer de fonctions « opportunistes » qui lui permettront de s'adapter de façon performante aux objets voisins. De façon à tirer profit des échanges d'information avec l'ensemble des systèmes connectés, des fonctions d'apprentissage et de reconfiguration devront être nativement intégrées à l'objet. La demande de calcul embarqué sera donc sans cesse croissante. Pour donner quelques ordres de grandeur, les besoins au niveau d'un futur terminal dédié aux technologies LTE-A sont généralement estimés à environ 2 TOP/s.

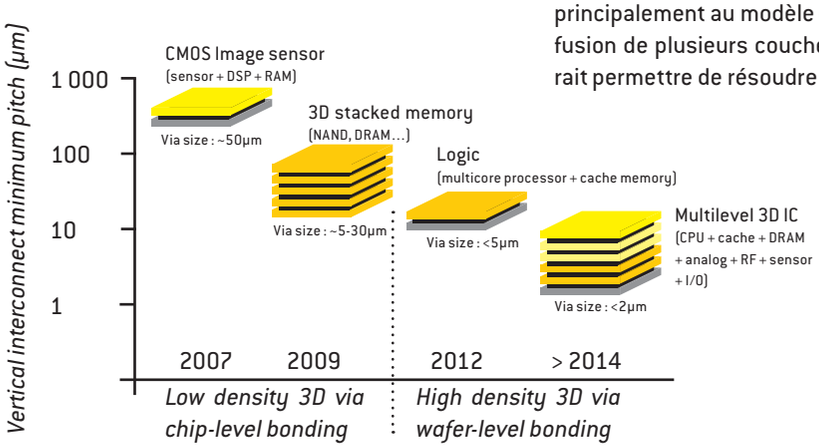
De telles performances ne trouveront réponse que par des technologies CMOS de plus en plus fines. En effet, la croissance du calcul embarqué est tout d'abord lié à la ***loi de Moore*** et à la formidable densité d'intégration des transistors. La loi de Moore ne devrait atteindre ses limites, selon Intel (www.intel.com/technology/mooreslaw/) que vers 2020. La réduction de taille des transistors permet, à surface identique (et donc à énergie consommée potentiellement égale), d'augmenter les capacités de calcul.



Performances comparées de technologies mobiles actuelles et à venir



« More Moore » consiste à travailler sur le facteur d'échelle, tandis que « More than Moore » intègre des technologies différentes, analogiques et numériques.



Néanmoins, la révolution récente la plus prometteuse touche l'intégration des fonctions hétérogènes : sous le nom de « More than Moore », l'objectif recherché n'est plus l'intégration massive via une densité surfacique de transistors accrue, mais l'intégration dans une puce unique de technologies différentes menant à une intégration en volume de toutes les fonctions analogiques et numériques.

Alors que l'intégration de fonctions purement numériques peut être obtenue sur galette silicium par une technologie de fonderie unique (CMOS typiquement), certaines fonctions, telles que les fonctions radio micro-ondes, les fonctions optoélectroniques, les capteurs et transducteurs (en général des ***MEMS***) ne peuvent être fondues de façon simultanée à travers une technologie générique : les substrats sont différents (GaAS, InP...), ou les étapes de fabrication sont incompatibles.

Plusieurs techniques d'intégration de technologies hétérogènes connaissent aujourd'hui des succès rapides : le report de puces (ou de ***wafer***) fondues séparément par collage moléculaire (le collage se fait au niveau cristallin) ou par l'alignement de motifs adaptés, généralement formés de plots de soudure micrométriques. Les figures ci-contre fournissent l'évolution attendue dans les prochaines années pour ces technologies. D'une façon concrète, on peut imaginer l'intégration de fonctions analogiques, numériques, et micro-ondes sur une même puce communicante embarquant un ou plusieurs capteurs MEMS. Par rapport à l'état de l'art actuel, cela peut apparaître comme une double révolution, qui devrait intervenir dans les dix prochaines années : ***celle du coût***, moteur actuel du développement de ces technologies, mais aussi ***celle du volume embarqué*** : les systèmes actuels, de l'ordre de 10 cm^3, seraient remplacés par une puce voisine de 50 mm^3, si l'on suit les ambitions de projets européens en cours de dépôt. Une telle compacité augmenterait de façon considérable l'attractivité des objets communicants et permettra leur déploiement à très grande échelle.

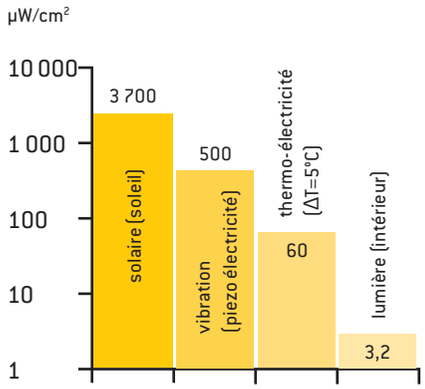
Énergie

La recherche dans ce domaine n'est pas encore aboutie, et l'on peut imaginer dans les années à venir des progrès selon plusieurs voies porteuses :

- la gestion distribuée, notamment en terme de *Radio Resource Management* qui inclut le contrôle de puissance, l'allocation de ressource et le contrôle d'admission ;
- la minimisation des en-têtes, qui sont dûes principalement au modèle en couches : la fusion de plusieurs couches en une pourrait permettre de résoudre ce problème ;
- les codes espace-temps asynchrones pour les communications coopératives sans référence temporelle ;
- de façon générale, l'utilisation des codes espace-temps car l'utilisation de codes correcteurs d'erreurs longs sera impossible à mettre en œuvre ;
- enfin, l'utilisation d'un ensemble de techniques nouvelles pour combattre l'interférence dans ces réseaux. Le *Physical Network Coding* est une des voies envisagées à l'Institut Télécom.

Une nouvelle architecture optimisée des systèmes électroniques

Si les évolutions technologiques des transistors devraient permettre de réduire la consommation à niveau de calcul constant, de nouvelles approches architecturales devraient apporter de nouvelles voies de réductions notables. L'ensemble des algorithmes associés



Quelques techniques de récolte d'énergie

aux différentes fonctions des objets peuvent être exécutés par un processeur numérique embarqué, éventuellement multicœur. Cependant, cette partie « logicielle » induit deux coûts importants : celui de la surface totale intégrée (un processeur étant coûteux en nombre de transistors et en mémoire) et celle de l'empreinte énergétique. Cette deuxième contrainte est particulièrement sensible pour les capteurs autonomes. L'empreinte énergétique de la partie programmable varie entre 10 fois (DSP) et 100 fois (microprocesseur) celle d'une puce spécialisée (ASIC), pour laquelle le coût d'une opération logique est d'environ 1 pJ. Une part importante de l'intelligence doit donc être reportée vers la couche matérielle (ASIC, fonctions spécialisée…).

L'optimisation de l'architecture de calcul se fera donc en s'appuyant sur une intégration renforcée de fonctions algorithmiques reconfigurables, offrant plusieurs options technologiques prédéfinies (choix du canal, paramétrisation des performances…), favorisant une flexibilité à faible consommation lorsque la programmation par logiciel est peu pertinente. Les évolutions actuelles amènent aujourd'hui à pousser la reconfiguration entre autres sur les fonctions analogiques qui sauront s'adapter aux différents environnements radio et modifier leurs paramètres internes (convertisseur, filtres…) pour réduire le traitement logiciel après numérisation. Des convertisseurs analogique-numérique avec des taux de conversion et des précisions de numérisation reconfigurables sont ainsi en développement à l'Institut Télécom de façon à réagir à des changements de norme du canal, et réduire la charge de calcul amont du processeur par une numérisation adaptée.

Autre évolution architecturale : l'objet communicant devra intégrer dans son électronique un module de gestion d'énergie qui sera une des innovations des prochaines années pour les circuits intégrés. Ce module devra pouvoir mesurer la consommation et adapter celle-ci aux différents contextes. Il devra optimiser son fonctionnement interne (usage des mémoires, des DSP, et des microprocesseurs, paramétrisation de l'objet) et sans doute être à même de gérer plusieurs sources d'énergie (batterie, cellules photo-sensibles…). Il devra interagir avec le réseau de façon à adapter son comportement à ce dernier, et éventuellement, réagir aux requêtes de reconfiguration du réseau dans une approche « holistique » de la consommation d'énergie incorporant l'ensemble des objets. L'innovation se fera dans une co-conception globale *hardware* et *operating system* dont l'état de l'art devrait progresser de façon sensible dans les années à venir.

La récolte d'énergie

De façon à allonger la durée d'autonomie énergétique, les stratégies de moisson et de prédation d'énergie seront une des grandes nouveautés qui faciliteront l'implémentation des objets communicants.

Plusieurs types de « récolte » sont possibles. À partir d'une source émettant aux seuils légaux d'émission à 900 MHz (normes américaines) il a été possible, dans des expériences de faisabilité qu'on peut juger réalistes, de recueillir 1 mJ d'énergie à 15 mètres de distance. Cela permet à un objet de consommer jusqu'à 10 mW pendant 10 ms, ce qui offre de réelles perspectives d'utilisation concrètes dans le cas de réseaux de capteurs par exemple.

D'autres sources d'énergie ont été explorées. La figure ci-contre donne les meilleurs résultats rapportés aujourd'hui dans la littérature pour différentes sources de moisson. Notons que les conditions de « moisson » sont très dépendantes des environnements. Il apparaît néanmoins clairement que des solutions techniques existent et pour des objets aux environnements suffisamment prédictibles, des capteurs d'énergie appropriés pourront être développés afin de recharger des batteries où des supercapacités.

Pour les objets portés par le corps humain, différentes modalités de capture d'énergie ont été analysées : mouvement du pied pendant la marche (production 5W), des doigts (2 mW), pression sanguine (0.4W) et respiration (0.4W). Ceci permet d'envisager des réseaux de capteurs embarqués sur le corps humain, par exemple pour monitorer des paramètres physiologiques.

Radio-opportuniste : un choix de norme collectif ou individuel ?

Alors que le nombre d'objets communicants ira croissant, le flux du trafic de données pourrait rencontrer des problèmes de congestion et d'interférences de plus en plus importants. Afin de résoudre ces difficultés, les scientifiques ont proposé le principe de radio-opportuniste : distribuer l'ensemble des données communiquées sur une bande spectrale très large, en sélectionnant, en tout lieu et à chaque instant, pour une communication donnée, la fréquence la moins occupée. À supposer que les problèmes juridiques associés à cette façon de réguler le trafic de données soient résolus – il s'agit de rassembler des bandes « propriétaires » et d'en modifier les règles d'accès – la mise en œuvre de la radio-opportuniste soulève des questions techniques non triviales portant entre autres sur le management du spectre : comment et à quel niveau s'établit la sélection de la bande ?

L'objet individuel, s'il est muni des fonctions appropriées, peut chercher, après avoir sondé son environnement électromagnétique, à se caler sur une bande spectrale inoccupée qui optimise ses performances. Il exploite au mieux la bande spectrale grâce à une mesure locale qui est la plus précise dont il peut disposer. Cependant, que se passe-t-il si l'objet est situé dans une cave ? Le voici sondant un environnement spécifique, protégé d'émetteurs lointains émettant en « *broadcast* », comme la télévision ou la radio. Ignorant de l'existence de ces émetteurs, il sera tenté d'émettre sur leur bande qu'il juge inoccupée, au plus grand dam de tous les téléspectateurs ou auditeurs situés à l'étage, qui verront leur émission brouillée par cet importun.

Pour éviter de tels désagréments, un gestionnaire de réseau doit donc s'introduire dans le choix des bandes si l'on veut éviter des décisions locales inadéquates. Grâce à sa connaissance globale du réseau, il est à même de produire des optimisations collectivement appropriées. Mais dans ce cas, saura-t-il optimiser l'ordre local, en tenant compte de la performance de chaque objet, leur limitation spectrale, leur consommation énergétique ?

Flexibilité

Parmi les défis majeurs auxquels devra faire face le monde des objets communicants, celui de l'hétérogénéité des systèmes et des normes ne dispose pas encore de solution établie. Au niveau des objets, cela signifie des capacités d'auto-configuration leur permettant de s'adapter dynamiquement à l'environnement tout en optimisant les ressources physiques disponibles.

Les objets communicants devront être suffisamment flexibles et reconfigurables pour adapter leurs caractéristiques (bande, fréquence, couverture, puissance, type de modulation, codage…). Dans la pratique, l'architecture matérielle devra être capable de fonctionner simultanément sur plusieurs sous-bandes, s'adapter facilement aux nouveaux standards, avoir une capacité de reconfiguration sophistiquée jusqu'au niveau analogique. Les fonctions embarquées devront permettre à l'objet de gérer l'utilisation de ses ressources, notamment sa capacité de calcul, sa consommation d'énergie et la réduction de la pollution électromagnétique.

Le besoin de flexibilité se heurte aujourd'hui au coût énergétique important des fonctions programmables. Un des enjeux à venir pour les architectures matérielles sera le développement de fonctions bas niveau paramétrées mais non programmées. Ceci nécessitera une rupture par rapport aux architectures qui s'orientent vers les fonctions programmables sur processeur multicœurs, valables pour des objets alimentés et refroidis (ventilateur). Il s'agira au contraire de favoriser et développer des fonctions analogiques paramétrées peu consommatrices, et les fonctions numériques préintégrées sur ASIC.

Les objets communicants exploiteront les approches ***radio logicielle*** (*Software Defined Radio*) et ***radio cognitive***, et ajusteront leurs paramètres de fonctionnement et leurs protocoles en fonction de leur environnement. Pour y parvenir, les objets devront embarquer des fonctions de sondage afin de détecter les conditions de fonctionnement, observer les bandes disponibles, et allouer de façon optimale les paramètres de transmission et de réception. Le sondage de l'environnement en général et du spectre en particulier se réalisera dans une approche conjointe entre l'objet et l'infrastructure de réseau, ce dernier disposant lui aussi d'une capacité cognitive fondée sur la globalité des informations reçues. En terme d'***enjeu technique non résolu à l'heure actuelle***, la technique de détection devra gagner en rapidité et rester faiblement consommatrice en énergie et en ressource calculatoire avant de pouvoir être implémentée opérationnellement. Les efforts de recherche ont commencé à se concentrer sur ces aspects et devraient aboutir à des solutions implémentables en grande production, avec des performances suffisantes pour leur généralisation d'ici la fin de la décennie.

Arbitrer entre service rendu et inconvénients

Il arrive que les objets communicants n'éveillent pas le moindre soupçon, surtout lorsque le service rendu est de taille. L'adhésion au téléphone portable est sur ce point remarquable : les nombreuses sources de traçabilité qu'il induit passent inaperçues à côté de ce qu'il apporte à la vie quotidienne. À l'échelle d'un prestataire, des entreprises telles qu'Aéroport de Paris (pour la gestion de la flotte de taxis) ou Konica Minolta (pour l'entretien de ses machines à distance) ont fait des puces RFID les agents distribués d'un logiciel de gestion. Là encore, l'organisation en fut tellement fluidifiée que la nature du système n'a nullement été mise en cause.

À l'inverse, le Pass Navigo de la RATP a rencontré des résistances parce qu'il était perçu comme ne rendant aucun service que la carte Orange ne rendait pas, tout en permettant de géolocaliser l'usager. Le même système implanté par Cofiroute pour le paiement sur autoroute prouve en revanche que ce n'est pas une fatalité : la suppression de l'attente au péage et les tarifs préférentiels équilibrent largement le rapport coûts-bénéfices.

Toutes fonctions confondues, les études sont unanimes pour préconiser la flexibilité : conférer aux objets ou systèmes les ressorts pour s'adapter à la fluidité de nos environnements et aux évolutions à moyen terme de nos modes de vie leur évitera des déconvenues. Un système d'*Enterprise Ressource Planning* doit

pouvoir évoluer au rythme des procédures, sans qu'il soit nécessaire de remplacer toutes les composantes. Un calcul utilitariste, dominant en matière d'équipement technologique avec l'idée typique d'amortissement, aura vite évincé un objet aux modalités d'usage trop spécifiques. Le critère d'utilité perçue (***Perceived Usefulness***, PU) affirme en tous points sa préséance dans la décision d'achat : l'appariement entre l'objet et le quotidien, dans les représentations et les pratiques.

L'ubiquitaire à bon escient

Nous nous posions plus haut la question des conditions propices à la symbiose entre l'humain et ses objets ? Les sciences humaines peuvent aider l'ingénieur à situer l'ubiquitaire parmi l'hétérogénéité de nos relations.

Si l'on veut considérer autrement l'internet des objets, et à l'aune des expériences passées comme celle du réfrigérateur intelligent, nous proposons de coupler deux démarches complémentaires et indispensables. D'une part comprendre les réticences récurrentes qui se sont fait jour et imaginer des voies de contournement, d'autre part transposer le raisonnement qui a rendu possibles quelques succès notoires.

À quels moments de nos vies l'appui technologique peut-il se prêter ? Quelles caractéristiques, qualités esthétiques ou d'usage pourraient faire de l'ubiquitaire une évidence au quotidien ? De l'objet technique au logiciel, la question se pose quant aux mécanismes réels d'appropriation et de développement des usages.

Computation, complexité des activités et innovation vernaculaire

Comment le concepteur peut-il glisser un produit dans des activités déjà là, et qui plus est, nous l'avons vu, si personnelles et personnalisées ? L'opportunité de procéder à un audit est rare, un intégrateur est alors appelé à répondre à une demande d'optimisation, la plupart du temps relative à des débordements ou à une volonté de reprendre le contrôle. Ces projets de grande ampleur pointent une typologie de fonctions : fluidifier, optimiser, coordonner, bref ce que la computation fait dans des dimensions qui dépassent le cerveau humain. Or, ce qui se passe dans le cadre domestique est parfois très complexe : préparer à manger, étendre et repasser le linge, ranger les courses, s'écouter et se parler, nourrir le chat, préparer les devoirs ou le travail, chercher une information sur l'ordinateur, y entrer des données depuis les factures papier… Tout en veillant à éviter toute ingérence de notre intimité, il est nécessaire de prendre au sérieux le degré de complexité si l'on veut proposer des services de computation adaptés.

Comme l'huile dans les rouages, l'ubiquitaire doit pouvoir désengorger les lieux et moments d'étranglement. Au concepteur de déceler les marges, et l'***innovation vernaculaire*** que l'on sait inhérente à l'appropriation d'un dispositif fera sa part du travail. Les multiples recompositions entre individus, pratiques et agencements, contribuent à démultiplier continuellement le potentiel industriel.

Enfin, un apport essentiel des sciences humaines, une fois qu'elles ont accordé aux machines un statut d'actant à part entière (comme le font les champs de l'interaction Homme-Machine, du *Computer Supported Cooperative Work*, les *Workplace Studies*…), repose dans l'idée que l'activité est bien plus souvent distribuée que prise en charge par un seul actant. La fluidité avec laquelle une tâche est menée à bien ou une orientation soutenue dépend en grande partie des appuis trouvés ou créés – souvent les deux – dans l'environnement. Aussi les concepteurs d'objets peuvent-ils proposer de tels appuis, tout en laissant à l'acteur la préemption dans la négociation de la répartition des rôles, moments et conditions.

Il s'agit de relever un ***défi créatif*** au sens très large de la technique, pas seulement technologique. Proposer des machines dont les fonctionnalités correspondent aux tâches rébarbatives effectuées par les humains,

c'est déjà répondre à une demande implicite. À l'exemple du paiement par carte bancaire imaginé par Stanley Kubrick pour « *2001, L'Odyssée de l'Espace* » et matérialisé par American Express pour le tournage, imaginer le quotidien de demain permet de créer la demande.

Les conséquences sont tout autres en ce qui concerne la responsabilité de l'acteur qui ne peut éthiquement pas s'en remettre entièrement à la machine. Il doit disposer d'une marge de manœuvre suffisante pour désigner lui-même la part qu'il souhaite déléguer, tout en bénéficiant d'un appui cognitif. La technologie doit rester au service de l'homme, et à aucun moment la maîtrise des événements ne doit reposer davantage du côté de la technologie.

Pour le concepteur, les procédés eux-mêmes doivent garder une part de lisibilité, et pas seulement le produit fini. Des interfaces ne dépend pas seulement la facilité d'usage du dispositif : elles renseignent aussi sur son état, et la fidélité de cette traduction rend possible le sentiment de maîtrise.

Nous accèderons à une confiance générale dans l'internet des objets à l'échelle collective seulement, avec la ***diffusion progressive de conventions partagées***. Ce qui passe par une coopération renforcée entre sciences de l'ingénieur et sciences humaines et sociales : en se sensibilisant d'abord aux enjeux évoqués, pour créer les espaces de discussion où les innovations pertinentes verront le jour, où pourront enfin s'élaborer les règles et pratiques partagées. À l'instar des forums hybrides proposés par les sciences humaines suite aux innombrables controverses de la fin du vingtième siècle, l'outil Internet offre une formidable occasion de création collective et émancipatrice.

De nouveaux modèles d'affaires

« Si les enjeux techniques tournent autour de l'autonomie de ces objets et de leur capacité à s'auto-organiser, les enjeux économiques sont quant à eux ceux de la localisation de la valeur apportée à l'usager dans les différentes composantes de ces systèmes, la captation de cette valeur, et la détermination de la propriété et des droits d'usage des informations circulantes. »

Il existe déjà des sites explorant la nécessaire créativité qui va accompagner l'irruption de cette intelligence ambiante (sen.se par exemple). L'exploration des usages, la définition des interfaces et des fonctionnalités, nécessitera vraisemblablement des dispositifs originaux d'expérimentation, pilotes, *living labs*…, qui permettront de valider des systèmes dans lequel l'homme ne sera peut-être qu'un « objet » banalisé (dont le comportement sera capté) et non un usager au sens usuel. Il faudra alors peut-être élargir la notion d'usage pour parler par exemple d'intervention (ou d'immixtion) et d'intervenant. Tout comme ces interventions, il est vraisemblable que les modèles d'affaires et les chaînes de valeur qui vont les accueillir vont évoluer, tester leurs potentialités et leurs limites avant éventuellement de se stabiliser. Voici trois ressorts économiques sur lesquels ces modèles d'affaires pourraient se développer.

De l'ouverture des données

Plus largement, l'introduction de ce que Julian Bleecker a nommé en 2006 des ***blogjets*** ou la prolifération de ce que Bruce Sterling nomme dès 2005 des ***spimes*** pose la question de l'équipement des «objets» en potentialités communicantes, tels des pigeons porteurs de capteurs de saisie de données environnementales. Qui va équiper, qui va payer, qui va utiliser, qui va réguler ce nouvel univers de la production de données ? En ce sens, le mouvement d'*open data*, qui concerne avant tout pour le moment les objets détenus par des collectivités ou la puissance publique, devrait rapidement s'intéresser également à ces objets porteurs ou générateurs de données.

Sur un plan socio-politique et réglementaire, les développements permis par l'internet des objets vont fournir de nouvelles illustrations des ambivalences et des dilemmes de l'économie numérique : capacité nouvelle à offrir des services aux collectivités, communautés et personnes, mais aussi capacité nouvelle à capter, stocker et archiver des données personnelles, et donc à surveiller (et réprimer éventuellement) des comportements individuels et collectifs. Les objets étaient silencieux, ils deviennent bavards ; il faudra sans doute pouvoir exiger qu'ils restent silencieux et oublieux. Et sur le plan économique, leur capacité à capter de la valeur dans des systèmes fermés, ou au contraire, l'ouverture de systèmes aux possibilités innovantes importantes forment la contrepartie de leur « animation ». La jurisprudence sur les ressources essentielles devrait s'en trouver rajeunie.

Vers de nouvelles monnaies

Revenons aux interrogations économiques plus terre à terre. L'internet des objets sera vraisemblablement un système à *feed-back* : les usagers des données et des systèmes contribueront, par leurs usages, à l'amélioration de la valeur des données et des systèmes. L'utilisateur de Wikipedia, qui détecte une erreur dans un article et propose de la corriger, produit un tel retour. Le conducteur d'une voiture équipée d'un capteur de vitesse et d'une puce de géolocalisation, bénéficiera d'un système de guidage tenant compte des conditions de circulation, mais également alimentera un tel système en informations précieuses. La circulation et la mobilité d'une foule de capteurs disponibles sur des objets courants (véhicules, équipements personnels, vêtements…) pourront, indépendamment de l'usage propre de leurs détenteurs, fournir de nombreuses informations utiles à des systèmes dès lors qu'ils seront intégrables dans ces systèmes. Dans un tel processus, la valeur devient un solde entre la valeur consommée et la valeur fournie. L'usager pourra dès lors, si ce solde est pris en compte, payer un service, y accéder de façon gratuite, voire être rémunéré pour alimenter un service.

On peut dès lors entrevoir que de tels systèmes pourraient engendrer des unités de mesure qui leur soient propres, qui permettent d'apprécier les consommations et les contributions aux systèmes. Certaines de ces mesures devraient logiquement devenir des unités de compte, et donc, *de facto*, des monnaies virtuelles, de diffusion restreinte pour la plupart, mais des systèmes de systèmes pourraient donner naissance à quelques constellations monétaires. Là réside une autre interrogation vertigineuse de l'internet des objets.

De la régulation

« La Commission européenne a annoncé le 6 avril 2011 la signature d'un accord avec l'industrie pour protéger la vie privée des consommateurs lors de l'usage des puces RFID et notamment « s'assurer que les problèmes de protection des données soient réglés avant que les produits RFID soient mis sur le marché ». »

L'ampleur des questions soulevées par l'internet des objets doit conduire à aborder la question de la régulation de ce nouvel environnement de façon proactive. En matière de propriété des données, de normalisation de ces données, d'identification des objets, de contrôle de leur bavardage, d'ouverture ou de clôture des systèmes, et donc d'intégration industrielle, de pérennité des accès aux données, de mécanismes de protection des innovations de service, de gestion des unités de compte de ces services etc., il y a sujet à une réflexion approfondie quant à l'intervention publique et à la régulation de ces systèmes. Gageons que rapidement l'ensemble du système productif, comme producteur d'objets ou comme fournisseur de services à partir de ces objets (notamment cette redéfinition du service comme économie de la fonctionnalité), sera fondamentalement impacté par cette animation des objets qu'il s'agit donc de favoriser et d'encadrer.

Les services rendus par les environnements dont nous avons parlé dans ce cahier visent à simplifier la vie quotidienne, à la sécuriser, à la rendre moins stressante : ôter des soucis serait le maître mot de cette évolution servicielle, décharger les utilisateurs de tâches secondaires ou fastidieuses ; être reconnu en entrant dans un appartement permettrait, selon les défenseurs de l'intelligence ambiante, de configurer l'espace selon ses habitudes. La contrepartie de cette assistance automatique est probablement une perte de contrôle, voire de pouvoir, sur de nombreux états ou situations.

Il y a toujours eu dans le monde des usages des consommateurs souhaitant être déchargés de tâches jugées trop complexes ou inintéressantes et d'autres cherchant au contraire à contrôler certaines fonctions, de façon à pouvoir les ajuster et les corriger : ainsi, les photographes amateurs se répartissent-ils entre ceux qui souhaitent un appareil opérant automatiquement le plus de réglages possibles et ceux qui à l'opposé, recherchent un appareil sur lequel toutes les fonctions sont débrayables et ajustables. Il en sera probablement de même dans l'univers liant bits et atomes de demain.

Contributeurs

Ce cahier de veille a été rédigé par quatre auteurs principaux.

Bruno Thedrez, **directeur d'étude,** est responsable du département Communications et Électronique de Télécom ParisTech. Le département conduit de nombreuses recherches dans les domaines des systèmes embarqués et de l'électronique des objets communicants dont il couvre l'ensemble des problématiques, incluant les aspects analogiques, numériques, antennes ou micro-ondes. Les travaux du département dans le domaine des communications sont réputés et ont été inclus dans les standards du WiMAX et du DVB-T2.
Bruno Thedrez s'est appuyé pour les aspects communications sur Alain Sibille, professeur ; pour les aspects sécurité, sur Jean-Luc Danger, directeur d'étude ; pour les aspects codage, sur Jean-Claude Belfiore, professeur ; pour les aspects reconfigurabilité, sur Van Tam Nguyen, maître de conférences.

Jean-Marie Bonnin, **professeur,** est responsable du département Réseaux, Sécurité et Multimédia de Télécom Bretagne. Ce département s'intéresse à la mise en réseau des objets communicants, pour les réseaux fixes en environnement domestique notamment, ou pour les réseaux mobiles avec les transports intelligents. Il est très impliqué dans les travaux de standardisation à l'IETF autour d'IPv6 et de son adaptation aux objets communicants avec Laurent Toutain, autour de la gestion de la mobilité avec Nicolas Montavont, autour de l'adaptation des protocoles de transport, avec David Ros, tous trois **maîtres de conférences**. Il développe également, autour de Xavier Lagrange, **professeur**, une expertise dans les mécanismes d'accès au canal à basse consommation et les protocoles de communication pour les réseaux de capteurs.

Laurent Gille, **directeur d'étude,** enseigne l'économie à Télécom ParisTech, au Département deSciences économiques et sociales (SES). Il est diplômé de l'École Nationale de la Statistique et de l'Administration Economique (ENSAE ParisTech), et également docteur en Sciences de gestion.
Ses travaux concernent principalement l'économie et la régulation des réseaux de télécommunications, spécialement dans les pays en développement, et les modèles d'affaires innovants de l'économie numérique.

Sylvaine Tuncer, **doctorante en Sociologie** à Télécom ParisTech sous la direction de Christian Licoppe, effectue une thèse qui croise les enjeux de la communication au travail et le rôle des outils de communication dans ces environnements. L'équipe de sociologie à Télécom ParisTech, reconnue en ce qui concerne les usages, développe depuis quelques années des recherches innovantes sur les effets des artefacts communicationnels.

D'autres équipes de l'Institut Télécom mènent des recherches sur des sujets liés aux technologies des objets communicants. Citons par exemple les travaux de Télécom Bretagne liés à l'implémentation de codes numériques, ceux de Télécom Sud Paris combinant localisation par RFID et gestion de la mobilité, ou ceux d'Eurecom, filiale de l'Institut, sur la radio logicielle. Noter également l'ouvrage édité par Hakima Chaoui, maître de conférences à Télécom Sud Paris : *The Internet of Things, Connecting Objects to the web*, ISTE Ltd et John Wiley & Sons, Inc, 2010.

Des documents complémentaires sont accessibles sur l'espace partenaire du site de la Fondation.

Illustrations pp3-4 en provenance de popartmachine.com, p12 en provenance de wsnblog.com.

Glossaire

Aisance d'utilisation perçue : *impression qu'une personne aura qu'un système est plus ou moins facile à utiliser*
Algorithme de Dijkstra : *en théorie des graphes, algorithme qui sert à résoudre le problème du plus court chemin*
Blogjets : *néologisme pour désigner des « objets qui bloguent »*
EAN : *(European Article Numbering) code-barres utilisé par le commerce et l'industrie conformément aux spécifications du GS1*
FFN : *(Full Function Node) nœud pleinement fonctionnel*
Innovation vernaculaire : *innovation apportée par les utilisateurs eux-mêmes*
Loi de Moore : *conjecture observant que le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium double tous les deux ans*
LTE : *(Long Term Evolution) standard de téléphonie mobile préparant la « 4G »*
LTE-A : *LTE Advanced, définition de la 4G*
M2M : *(Machine to Machine) communication entre machines sans intervention humaine*
MEMS : *(Microelectromechanical systems) microsystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques en vue de réaliser une fonction de capteur et/ou d'actionneur avec au moins une structure présentant des dimensions micrométriques*
NFC : *(Near Field Communication) sous-ensemble des RFID pour des distances de contact de moins de 10 centimètres*
PAN : *(Personal Area Network) réseau d'équipements personnels*
Radio cognitive : *comprend des protocoles qui optimisent l'usage du spectre des radiofréquences par les appareils de communication sans fil tout en réduisant au minimum le brouillage avec les autres appareils*
Radio logicielle : *(Software Defined Radio, SRD) intègre des fonctions comme le filtrage, le codage et la modulation dans un système logiciel modifiable indépendamment de la plate-forme matérielle*
Réseaux ad-hoc : *réseaux sans fil capables de s'organiser sans infrastructure définie préalablement*
Réseaux spontanés : *réseaux sans fil qui se constituent spontanément dès que plusieurs de leurs membres se trouvent à portée radio les uns des autres*
RFD : *(Reduced Fonction Device) nœud disposant de fonctionnalités réduites*
RFID : *(Radio Frequency Identification) technologie permettant de mémoriser et récupérer des données à distance*
Spime : *néologisme désignant un objet encore aujourd'hui théorique et qui peut être tracé dans l'espace et le temps tout au long de sa vie*
Tags : *code-barres ou puce RFID étiquettant un objet*
Ubiquitaire : *environnement dans lequel les ordinateurs et réseaux sont enfouis, intégrés et omniprésents dans le monde réel*
Utilité perçue : *critère estimé par une personne face à un système pouvant lui améliorer ses performances*
Wafer : *tranche ou une galette de semi-conducteur*
X10 : *protocole de communication propriétaire, initialement par courants porteurs, entre des émetteurs et des récepteurs dans un contexte domotique*

Les cahiers de veille **de la Fondation Télécom**

Les cahiers de veille de la Fondation Télécom sont le résultat d'études menées conjointement par des enseignants-chercheurs de l'Institut Télécom et des experts industriels. Chaque cahier, qui traite d'un sujet spécifique, est confié à des chercheurs de l'Institut qui réunissent autour d'eux des experts reconnus. Tout à la fois complet et concis, le cahier de veille propose un état de l'art technologique et une analyse tant du marché que des aspects économiques et juridiques, en mettant l'accent sur les points les plus cruciaux. Il se conclut sur des perspectives qui sont autant de pistes possibles de travail commun entre les partenaires de la Fondation Télécom et les équipes de l'Institut Télécom.

Avec le soutien de :
Alcatel-Lucent, BNP Paribas, Orange, SFR, partenaires fondateurs de la Fondation

Et de Accenture et Astrium Services

Fondation Télécom
46, rue Barrault - 75634 Paris CEDEX 13 - France
Tél.: + 33 (0) 1 45 81 77 77
Fax: + 33 (0) 1 45 81 74 42
info@fondation-telecom.org
www.fondation-telecom.org

FONDATION TELECOM

Nerleys - 06 62 12 15 25 - RCS 499438505