

Mini-projet de réseaux : 6LowPAN Working Group

Binôme étudiant :
Olivier CATRY
Alexandre GALERNE

Tuteur enseignant :
Benoit PARREIN

Nantes, le 11 mars 2011

Table des matières

1	Rapport de projet	2
1.1	Pourquoi 6LowPAN?	2
1.1.1	L'environnement de naissance du 6LowPAN Working Group	2
	La standardisation d'Internet	2
	Vers l'Internet des objets	3
	IPv6	3
	Les réseaux Lowpan / IEE 802.15.4	4
1.1.2	Enjeux du 6LowPAN Working Group	4
	Problèmes liés au déploiement d'IPv6 avec un LowPAN	4
	Remplacer Zigbee par un protocole ouvert	5
1.2	Travaux du 6LowPAN Working Group	5
1.2.1	Historique du 6LowPan Working Group	5
1.2.2	Illustration du processus de standardisation avec le 6Low- PAN Working Group	6
1.2.3	Présentation détaillée de la RFC 4944 6LowPAN	7
	MTU et compression d'en-têtes	8
	Edge Router	9
	QoS, mobilité et routage	9
1.3	Perspectives	10
1.3.1	Les horizons dégagés par le 6LowPAN Working Group	10
1.3.2	Vers un projet de réseaux utilisant un ou des protocole(s) 6LowPan	10
1.4	Conclusion	11
	Bibliographie	12

Introduction

Vous trouverez dans ce document un développement qui vise à exposer les enjeux, travaux et perspectives soulevés par le 6LowPAN Working Group. Ce groupe de travail fait partie de l'IETF (Internet Engineering Task Force) et officie pour la standardisation d'Internet.

Dans un premier temps nous articulerons notre développement sur l'environnement qui a vu naître et se développer le 6LowPAN Working Group. Ce premier balisage permettra de mieux envisager les enjeux auxquels s'attache le 6LowPAN Working Group qui vous seront présentés à la suite. Une fois ces enjeux exposés, nous mettrons en évidence les travaux effectués par le groupe de travail de l'IETF. Cette partie sera l'occasion d'illustrer le processus de standardisation. Pour élargir notre propos nous finirons par évoquer les perspectives dégagées par le 6LowPAN Working Group.

Chapitre 1

Rapport de projet

1.1 Pourquoi 6LowPAN ?

Pour mieux comprendre l'intérêt et les enjeux du travail fourni par le 6LowPAN Working Group, nous vous proposons tout d'abord de nous intéresser à ce qui entoure, justifie et motive ce groupe de travail.

1.1.1 L'environnement de naissance du 6LowPAN Working Group

Le 6LowPAN Working Group est né de différentes attentes, de l'évolution d'Internet et de la convergence de plusieurs technologies. Avant toute chose, ce groupe de travail s'inscrit dans une volonté de standardisation d'Internet.

La standardisation d'Internet

Dans tous les domaines et pour chaque technologie, le processus de normalisation et de standardisation est un puissant facteur de diffusion. De ce point de vue, Internet est une technologie particulière : sa standardisation a permis une diffusion planétaire mais cette expansion phénoménale nécessite de nouveaux standards à mesure que des protocoles et/ou des besoins nouveaux se développent.

Ce cercle vertueux est entretenu par différents acteurs regroupés sous la bannière de l'Internet Society (ISOC) créée en 1992. Parmi ces acteurs on retrouve l'IETF dont les groupes de travail se chargent de rédiger des Request for comments (RFC). Ce sont des documents officiels qui décrivent les aspects techniques d'Internet. Pour résumer peu de RFC sont des standards, mais tous les standards d'Internet publiés par l'IETF sont des RFC. La rédaction d'une RFC est illustrée plus loin dans ce rapport.

L'IETF, bien qu'acteur majeur, n'opère pas seul. L'Internet Architecture Board (IAB) se charge d'étudier les orientations à long terme d'Internet. Ces orientations définissent les activités de l'IETF. Dans le cas du 6LowPAN Working Group, c'est l'évolution d'Internet vers "l'Internet des objets" qui oriente la normalisation.

Vers l'Internet des objets

Le paradigme de l'Internet des objets réconcilie le virtuel et le réel. En reliant de très nombreux capteurs et objets-interfaces (capables de communiquer sur un réseau) à Internet on ouvre des possibilités très grandes :

- Signaler une personne en détresse
- Optimiser les processus de production et la chaîne logistique (possibilité de vendre avant de produire)
- Surveiller et piloter les consommations d'électricité et la production d'énergie
- Réguler le trafic routier
- ...

Bien sur ce nouvel Internet implique la multiplication de capteurs, puces, etc qui correspondent à autant d'identifiants. Aucun objet ne peut appartenir et communiquer dans un réseau sans identifiant. A l'heure actuelle on identifie une entité sur un réseau à l'aide d'une adresse IP. Or ces adresses IP sont définies selon le protocole IPv4 et leur nombre est limité. La plupart d'entre elles sont déjà utilisées. Il faut donc un nouveau protocole IP (ou un nouvel identifiant) pour passer à l'Internet des objets. De plus, les objets seront très nombreux, leur coût devra donc être très limité. Nous approfondissons ces derniers points dans la suite.

IPv6

Le protocole IPv6 est l'évolution du protocole IPv4 pour les réseaux à commutation de paquets. Si l'IETF a défini IPv6 comme le successeur d'IPv4 dans la RFC 2460 en 1998, IPv4 reste le protocole dominant.

Contrairement à son prédécesseur qui proposait des adresses de 32 bits, IPv6 propose des adresses sur 128 bits. Ainsi l'espace d'adressage est bien plus important et il permet d'envisager l'Internet des objets. De plus, IPv6 permet une auto-configuration : il ne sera pas nécessaire de configurer à la main tous les capteurs et objets qui constitueront l'Internet des objets. Dernier avantage, IPv6 va permettre aux objets de communiquer très facilement avec le reste d'Internet. Mais si de nombreux problèmes sont réglés, la taille minimale des paquets envoyés sur IPv6 engendre un nouveau. Pour le comprendre nous devons nous intéresser aux réseaux LowPAN.

Les réseaux Lowpan / IEE 802.15.4

Un réseau LowPAN c'est un réseau de machines communiquant sans fil, à faible distance et par radio à l'aide du protocole 802.15.4 qui définit les couches PHY et MAC. Ces équipements sont dits "légers" : peu de puissance et de ressources pour un coût faible. Cette dernière caractéristique les rend indispensables à l'Internet des objets qui aura besoin d'un très grand nombre d'objets communiquant sans fil. Le coût est donc un facteur primordial : il est certain que l'Internet des objets se bâtira sur des LowPAN.

Malheureusement les spécifications techniques du protocole de communication radio 802.15.4 ne permettent pas nativement d'utiliser IPv6. C'est ce problème qui est soulevé par la taille des paquets IPv6. C'est en partie pour cela qu'est né le 6LowPAN Working Group.

1.1.2 Enjeux du 6LowPAN Working Group

Problèmes liés au déploiement d'IPv6 avec un LowPAN

Nous avons évoqué le problème de la taille des paquets IPv6. En effet ceux-ci font 1280 octets tandis que le protocole 802.15.4 utilise des paquets de petite taille (127 octets) qui ne peuvent pas encapsuler les paquets IPv6. Ce facteur s'aggrave encore puisque le protocole 802.15.4 définit des en-têtes obligatoires (pour le chiffrement notamment) qui ne laissent parfois que 81 octets de libres pour IPv6. Il faut donc développer un mécanisme de fragmentation et de réassemblage.

Mais, comme l'en-tête IPv6 fait au minimum 40 octets, que l'en-tête TCP atteint 20 octets, il ne resterait que 21 octets pour les données... Il est donc impératif de spécifier un mécanisme de compression des en-têtes.

De plus, les LowPAN ont des capacités de réseau faibles : le protocole de routage devra donc être économique au niveau de l'utilisation de la bande passante.

IPv6 introduit d'autres notions dans le protocole IP : le Loose Source Routing, la mobilité et la définition de la qualité de service. Le premier point est un moyen permettant à un hôte de spécifier explicitement le chemin que va emprunter son paquet. Il y a donc un problème au niveau de la sécurité : il est possible de former une boucle et de saturer rapidement un 6LowPAN...

En ce qui concerne la qualité de service et la mobilité (deux des grands objectifs d'IPv6), les critères sont évidents pour un réseau de type LAN (vitesse, couverture, taux d'erreur, différenciation des services...) mais qu'en est-il pour les LowPAN ?

Les problèmes à résoudre sont donc nombreux. Mais le 6LowPAN Working Group ne va pas permettre uniquement de passer outre les obstacles techniques. Il y a aussi un sens idéologique derrière ce groupe de travail.

Remplacer Zigbee par un protocole ouvert

A propos de l'utilisation d'IPv6 avec le protocole 802.15.4, il existe déjà un protocole "similaire" à IPv6 (c'est à dire de couche supérieure à celle de 802.15.4) : le protocole Zigbee. Or ce protocole qui permet de faire communiquer un LowPAN avec un WPAN est un protocole propriétaire. Il est donc nécessaire qu'il existe un protocole ouvert tel que le protocole IP qui puisse ouvrir à tous l'Internet des objets.

Lorsque les travaux du 6LowPAN Working Group auront avancé, nous pourrions alors voir le développement de l'Internet des objets. Maintenant que nous avons vu la portée et les enjeux des travaux du 6LowPAN Working Group, nous pouvons nous intéresser à ces derniers plus en détail.

1.2 Travaux du 6LowPAN Working Group

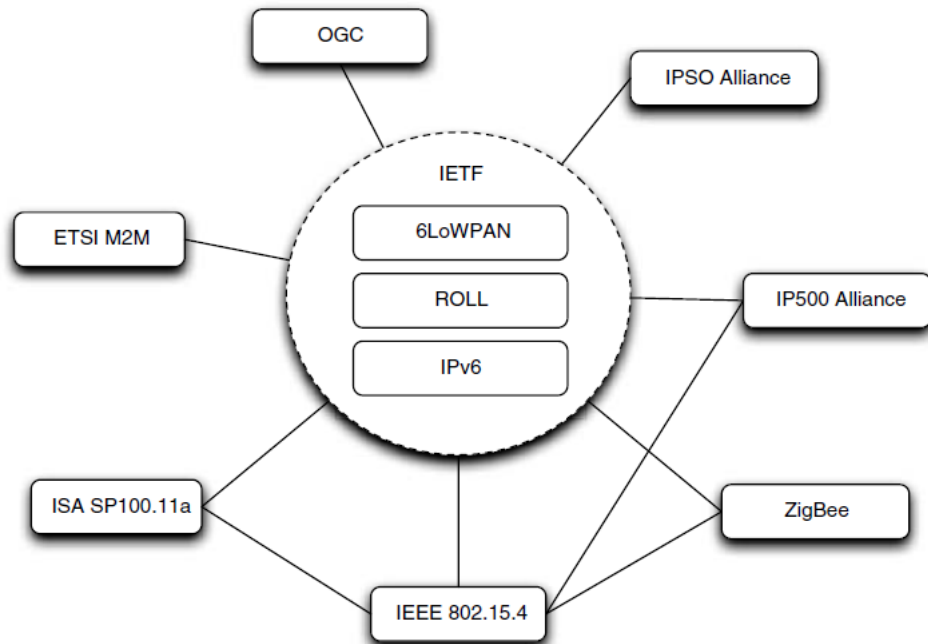
1.2.1 Historique du 6LowPAN Working Group

On a vu que 6LoWPAN était un panel de standards (RFC) définis par l'IETF. Le 6LowPAN Working Group a démarré officiellement en 2005. C'est d'ailleurs la sortie du standard 802.15.4 en 2003 qui fut le plus grand catalyseur vers la standardisation 6LowPAN (illustrant le cercle vertueux dont nous parlions au début de ce document).

Les premières spécifications du 6LowPAN Working Group sortirent en 2007 avec la RFC 4919. Cette RFC d'information spécifiait les buts et les requis de la standardisation 6LowPAN. La même année suivit la RFC 4944 spécifiant le format de transmission et les fonctionnalités (compression d'en-têtes, routage...). Ensuite le 6LowPAN Working Group s'est efforcé d'améliorer la compression des en-têtes, la découverte des voisins et le routage. En 2008 un nouveau groupe de travail de l'IETF est créé : le Routing over Low-power and Lossy Networks (ROLL). Ce groupe travail spécifiquement sur le routage dans un LowPAN (mais n'est pas restreint aux 6LowPAN).

Toujours en 2008, l'Internet Security Alliance (ISA) a commencé la standardisation d'un système industriel automatisé appelée SP100.11a ou ISA100 et qui est basée sur les travaux du 6LowPAN. De même l'Open Geospatial Consortium (OGC), l'European Telecommunication Standards Institute(ETSI) et l'IP500 Alliance travaillent en collaboration avec le 6LowPAN Working Group.

Le schéma suivant illustre les relations entre 6LowPAN et d'autres standards ou organisations :



Illustrons maintenant la mécanique de travail suivie par les groupes de travail au sein de l'IETF.

1.2.2 Illustration du processus de standardisation avec le 6LowPAN Working Group

Nous avons déjà abordé le processus de standardisation d'Internet à travers l'IETF. On sait que les groupes de travail rédigent des RFC et que certains de ces RFC deviennent des standards.

En fait, ces RFC standardisent les résultats des délibérations de communautés à propos de déclarations de principe ou à propos de la meilleure façon d'effectuer certaines opérations. Pour être validé, les standards évoluent à travers un ensemble de niveaux de maturité (le circuit des standards "standards track") :

- Standard proposé - Proposed Standard
- Standard préliminaire - Draft Standard
- Standard - Standard

Il peut exister d'autres spécifications, hors-circuit, qui ne sont pas destinées à devenir des standards ou qui ne sont pas prêtes pour rentrer sur le circuit. On parle de spécifications expérimentales ou informationnelles.

Un RFC de type standard forme une spécification examinée et approuvée pour être adoptée comme Best Current Practice (BCP). Le processus de validation des BCP est similaire à celui des standards proposés. Le BCP est soumis à l'IESG pour examen et le processus de validation existant s'applique, y compris un dernier appel sur la liste de diffusion Announce de l'IETF. Par contre, une fois le document approuvé par l'IESG, le processus se termine et le document est publié. Le document final est présumé avoir l'approbation technique de l'IETF.

Prenons l'exemple du RFC 4944 publié par le 6LowPAN Working Group. Ce RFC spécifie le format de transmission et la compression d'en-têtes, le routage et la découverte des voisins. A l'heure actuelle ce RFC possède le statut "Proposed Standard". Cela signifie donc que ce RFC n'est pas encore un standard. Il doit être validé comme standard préliminaire puis comme standard pour pouvoir être ajouté à la série des standards (STD) et faire l'objet d'une BCP.

Néanmoins l'IETF précise qu'un "standard proposé ne devrait pas avoir de lacunes techniques connues par rapport aux exigences placées sur lui. Toutefois, l'IESG peut renoncer à cette condition pour permettre à une spécification d'avancer au stade de standard proposé lorsque celle-ci est considérée comme utile et nécessaire (et opportune), même avec des lacunes techniques connues.

Les développeurs devraient traiter les standards proposés comme des spécifications immatures. Il est souhaitable de les mettre en œuvre afin d'acquérir de l'expérience et de valider, tester et clarifier la spécification. Par contre, puisque le contenu des standards proposés peut changer si des problèmes sont découverts ou de meilleures solutions identifiées, il n'est pas recommandé de déployer des mises en œuvre fondées sur de tels standards dans un environnement sensible aux perturbations."

Puisque l'IETF précise qu'il est souhaitable de mettre en œuvre les standards proposés, intéressons nous plus en détail aux avancées du 6LowPAN Working Group.

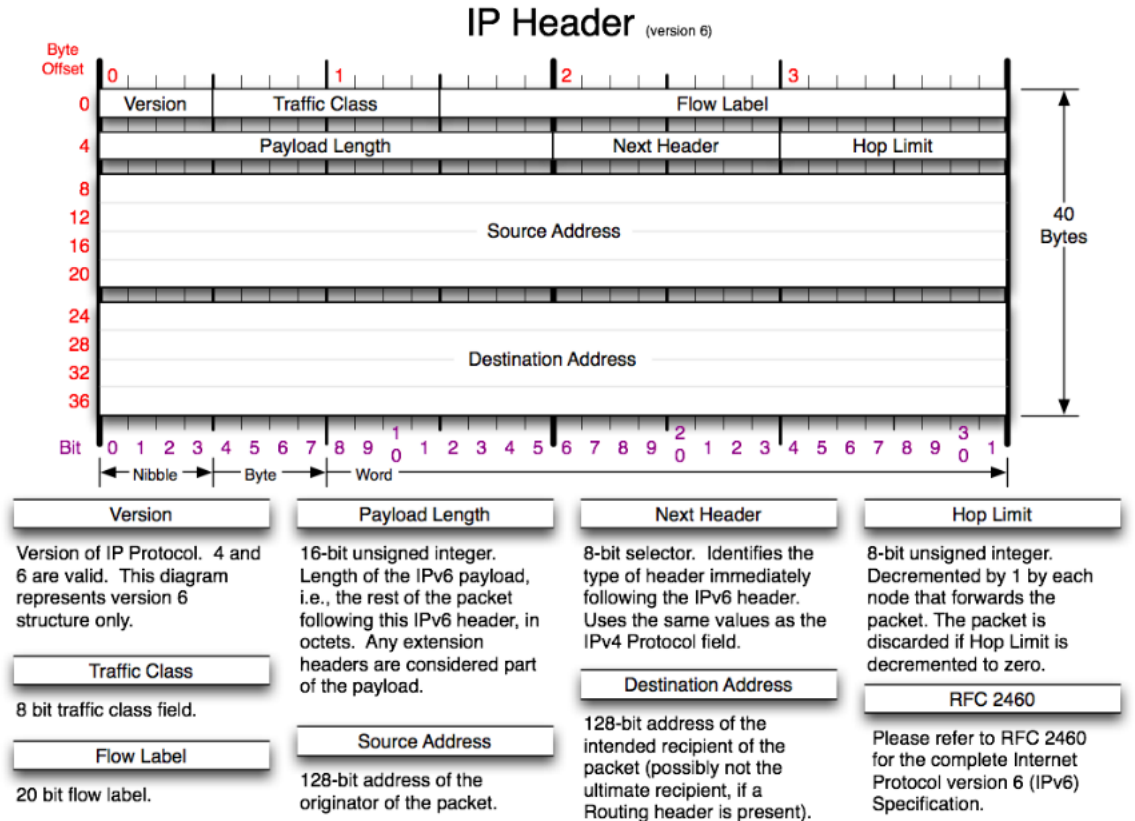
1.2.3 Présentation détaillée de la RFC 4944 6LowPAN

La RFC 4944 présente des réponses aux problèmes évoqués plus tôt par le déploiement d'IPv6 dans un 6LowPAN. Bien sur ces solutions ne sont pas toujours "parfaites". Il s'agit parfois de faire des compromis pour minimiser les désavantages.

MTU et compression d'en-têtes

On a vu que l'encapsulation des paquets IPv6 dans les paquets 802.15.4 pouvait ne laisser que 20 octets de libres aux données. Le premier travail du 6LowPAN Working Group fut donc de compresser les trames IPv6.

Voici un aperçu d'en-tête IPv6 non compressé :



Le 6LowPAN Working Group a donc du définir une structure plus compacte capable de représenter efficacement l'en-tête ci-dessus :

- Puisque la version d'IP est forcément IPv6 il est inutile de la signaler
- Inférer les adresses IP grâce aux adresses MAC permet de ne pas les indiquer dans len-tête réseau
- Idem pour la taille du paquet

- Pour le moment aucune QoS n'est définie pour un LowPAN, il n'y a donc pas de champs Traffic class ou Flow label
- Le champ Next Header peut prendre seulement 4 valeurs :
 - Pas d'en-tête
 - ICMP
 - UDP
 - TCP

De cette manière, la structure de 40 octets initiale est réduite à 2 octets. La RFC propose aussi de réduire l'en-tête UDP de 8 à 4 octets. Finalement on a donc un en-tête de 48 octets compressé en 6 octets.

Edge Router

Le 6LowPAN Working Group propose l'idée suivante : un réseau 6LowPAN ne doit pas être un réseau de transit de données mais plutôt un élément "final". Il n'y a alors qu'un seul point d'accès au réseau qui est le coordinateur principal du réseau 802.15.4 et que l'on nomme Edge Router puisqu'il fait le pont entre les réseaux 6LowPAN et standard.

Cette idée permet de résoudre facilement certains problèmes tels que la fragmentation, le coût de l'en-tête IPv6 et le routage "Loose Source". En effet la fragmentation taion peut être évitée en refusant l'entrée du réseau aux paquets de tailles trop conséquentes. Le coût de l'en-tête est réduit grâce à la compression vue précédemment et l'Edge Router se chargera de reconstruire les paquets sortant du réseau 6LowPAN avec les vraies informations. La solution pour le routage "Loose Source" reste cependant radicale : de tels paquets ne seront pas traités.

L'effort de normalisation s'arrête ici et il reste les problèmes de qualité de service et de routage.

QoS, mobilité et routage

Pour ces problèmes, le 6LowPAN Working Group n'a pas encore de solution mais il propose des réponses partielles.

La qualité de service est redéfinie pour tenir compte non plus des critères habituels mais de l'autonomie de la batterie des éléments et de l'harmonisation des consommations.

La mobilité est redéfinie en mobilité "statique" : une mobilité faite d'éléments statiques qui ne sont mobiles que par leurs réveils et endormissements successifs.

Le routage est donc très important puisqu'il va permettre d'augmenter QoS et mobilité en prenant en compte l'autonomie des éléments du réseau. Pour les réseaux de capteurs le 6LowPAN Working Group stipule deux types de routage possibles :

- Avec les adresses de niveau liaison
- Avec les adresses de niveau réseau

Dans le premier cas seul le coordinateur du réseau sera vu comme un élément IPv6 tandis que dans l'autre cas tous les éléments du réseau le seront. Il faudra donc choisir entre le routage niveau liaison, avec sa vitesse d'échange de paquets dans le 6LowPAN mais l'impossibilité d'adresser un élément terminal, ou avec le routage réseau aux avantages et inconvénients inverses.

Maintenant que nous avons abordé les points soulevés par le 6LowPAN Working Group, nous pouvons présenter les perspectives ouvertes par ce groupe de travail.

1.3 Perspectives

1.3.1 Les horizons dégagés par le 6LowPAN Working Group

Les enjeux du 6LowPAN Working Group sont de permettre une avancée vers l'Internet des objets. A l'heure actuelle il est encore difficile de mettre en place l'Internet des objets avec le standard proposé par le 6LowPAN. La mobilité "statique" redéfinie est un frein au déploiement des objets ailleurs que dans l'industrie par exemple.

Mais le travail du 6LowPAN Working Group est primordial pour bénéficier à terme de possibilités ouvertes et balisées afin de développer le lien entre le réel et le virtuel. Ce développement n'est pas uniquement la réalisation de fantasmes de science-fiction. Il permettra à coup sur de développer une économie mieux régulée, des techniques de pilotage automatique (et écologique...), des techniques de détection d'arrêts vasculaires... Les possibilités sont aussi grandes que les attentes.

1.3.2 Vers un projet de réseaux utilisant un ou des protocole(s) 6LowPan

Pour qu'un jour le 6LowPAN Working Group puisse proposer un standard permettant d'intégrer totalement les 6LowPAN à Internet, il faut que des projets soient menés sur les solutions proposées à l'heure actuelle par ce groupe de travail. Nous désirons donc proposer un sujet de projet qui pourra être mené par des étudiants de l'école.

Bien souvent les projets en réseaux se font à l'aide de simulateurs tels que QualNet. Malheureusement d'après nos recherches il n'existe pas encore de simulateur permettant de modéliser un 6LowPAN.

Le développement d'une librairie pour que QualNet puisse simuler un 6LowPAN pourrait être un projet intéressant qui permettrait par la suite d'effectuer des simulations au cours d'autres projets.

Nous avons aussi pensé à la réalisation d'un service de messagerie entre deux ordinateurs de la salle C07 qui communiqueraient à l'aide de micro-contrôleurs radio utilisant le protocole 802.15.4. Ce projet nécessite l'achat de micro-contrôleurs radio mais il convient mieux au format du mini-projet de réseaux.

1.4 Conclusion

Au cours de ce projet nous avons pu découvrir les possibilités offertes par l'Internet des objets. Les enjeux importants de cette évolution d'Internet nécessitent le développement de standards pour intégrer les LowPAN dans le "réseau Internet".

Le 6LowPAN Working Group se charge de proposer un standard pour déployer IPv6 au sein des LowPAN et ainsi permettre leur intégration à Internet. L'étude nous a permis d'illustrer la standardisation d'Internet et d'exposer les solutions proposées par le groupe de travail de l'IETF.

Il nous a ensuite semblé intéressant de proposer des pistes pour que d'autres projets soient effectués à l'école sur le sujet des réseaux 6LowPAN. Ce sujet nous paraît très intéressant puisque ses enjeux sont importants et nécessitent une réflexion pour mettre en place un réseau efficace compte tenu des faibles capacités des éléments qui y sont présents.

Pour finir nous tenons à remercier Benoit Parrein de nous avoir proposé ce sujet de mini-projet. Nous avons découvert une évolution possible d'Internet et les mécanismes entrepris pour arriver à développer l'Internet des objets.

Bibliographie

Zach SHELBY Carsten BORMANN. 6LowPAN The Wireless Embedded Internet. WILEY, 2009.

Premier livre publié sur les 6LowPAN, il donne une image complète de l'avancée des travaux dans le domaine et donne des exemples de déploiement. Il n'existe pas encore de traduction française.

Stéphane BORTZMEYER. RFC 4919 : IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs) : Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals. <http://www.bortzmeyer.org/4919.pdf>.

Ce document décrit les réseaux 6LoWPAN : les enjeux, les contraintes (taille de l'en-tête trop grosse par rapport à la taille du paquet pour l'IPv6, capacité du réseau faible ...), les types de machines pour l'implémentation, les problèmes à résoudre, les buts à atteindre (comme l'auto-configuration), et les ajustements à étudier.

IETF. IPv6 over Low power WPAN. <http://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/charter/>.

Deux groupes de travail ont réalisé une étude sur le 6lowpan. Leur but est de rédiger des documents portant sur l'interopérabilité, la sécurité et l'implémentation d'un réseau 6LowPAN. Plusieurs pôles à étudier : l'optimisation, la compression, l'architecture, le routage, les jeux d'essai et les tests de sécurité.

IETF. RFC 2460 - IPv6. <http://tools.ietf.org/html/rfc2460>. 1998.

Ce document technique décrit l'IPv6 ou "IPNG" (next generation). Sont présentés : le format d'en-tête, les extensions d'en-tête, les options d'en-tête, le "hop by hop" (vérifiée par chaque noeud du réseau), l'en-tête de routage, les contraintes sur la taille des paquets, le "flow labels" utilisé pour le QOS, les classes de priorité et la gestion du paquet IPv6 par les couches supérieures.

IETF. RFC 2464 - IPv6 over Ethernet. <http://tools.ietf.org/html/rfc2464>. 1998.

Ce document technique décrit le format des frames ipv6 et la configuration du routage des paquets ipv6. Sont présentés : le format des frames, l'auto-configuration sans état, le mapping d'adresse unicast et multicast et une note sur la sécurité.

IETF. RFC 4294 - IPv6 Node Requirements. <http://tools.ietf.org/html/rfc4294>. 2006.

Ce document technique décrit les nœuds IPv6. Sont présentés à propos de l'ipv6 : la transmission des paquets sur les réseaux Ethernet, le point par point, les réseaux ATM, et sur la couche IP : un rappel sur l'ipv6, le routage par découverte des voisins, la taille des paquets et leur MTU, l'ICMP, l'adressage, l'écoute multicast et la gestion des DNS.

IETF. RFC 4944 - IPv6 over IEEE 802.15.4. <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>. 2007.

Ce document technique décrit le format pour la transmission ipv6. Sont présentés : les modes d'adresse, le MTU, la couche LoWPAN, le format de frame au niveau des en-têtes, auto-configuration sans état, le mapping unicast et multicast et la compression de l'en-tête (ipv6 et UDP).

Jon TITUS. 6LoWPAN Goes Where ZigBee Can't. <http://www.ecnmag.com/Articles/2009/03/6LoWPAN-Goes-Where-ZigBee-Can-t/>. 2009.

Jon Titus, l'éditeur technique de ECN présente le problème des protocoles physique et réseau qui n'utilisent pas l'IP. Le 6LoWPAN est une alternative car il utilise l'Ipv6 et fonctionne sur des réseaux filaires ou sans fil. Il a fait une implémentation du 6LoWPAN sur un réseau qui gérait des paquets de 127 octets, sur lequel l'IPv6 n'aurait pas été judicieux avec ses en-têtes de 40 octets. La compression est sans état, et permet une multitude de point d'entrée et de sortie. Selon Geoff Mulligan, directeur de l'IPSO, le 6LoWPAN a aussi l'avantage d'utiliser moins de RAM que le Zigbee. Le 6LoWPAN est open-source et fait encore l'objet de recherches. La communication est directe et on contourne ainsi de nombreux problèmes de sécurité. le 6LoWPAN pourrait à l'avenir remplacer l'IPv6, explique Mulligan, qui explique comment obtenir du soutien de la part des responsables du 6LoWPAN pour l'implémenter dans un projet informatique.

SENSINODE. <http://www.sensinode.com/EN/6lowpan.html>

La section 6LoWPAN de ce site offre un soutien à l'installation et l'utilisation du 6LoWPAN. Tutoriels vidéo, documents d'aide, manuels, cours et livres sont proposés. Une liste de liens vers d'autres sources sur ce sujet permettent d'étendre la bibliographie et notre recherche.

Unité Réseaux du CNRS. Séminaire IPv6. <http://www.urec.cnrs.fr/IMG/pdf/cours.ipv6.pdf>. 1999.

Ce cours présente l'IPv6 en s'étendant sur son format d'en-tête, le pourquoi de sa création, le routage, la QoS ... Ce document est à recouper avec le manuel IPv6, qui présente le même contenu de façons plus précise, mais ce document est plus pédagogique.