

Vers une ingénierie de réseaux respectueuse de l'environnement

Eric Rondeau, Francis Lepage

Centre de Recherche en Automatique de Nancy,
UMR 7039 – Nancy-Université, CNRS
Campus Sciences, BP70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France.
eric.rondeau@cran.uhp-nancy.fr, francis.lepage@cran.uhp-nancy.fr

Résumé— Les secteurs de l'ICT (Information and Communications Technologies) représentent actuellement 2% de l'empreinte totale carbone. Et le rapport SMART 2020 prévoit, d'ici 2020, le doublement de l'émission de carbone générée par l'ICT : c'est-à-dire 1,43 GtCO₂/an dont 25% liée aux Réseaux et Télécoms. Parallèlement, les questions environnementales ne sont pas uniquement centrées sur l'émission de CO₂, mais aussi sur d'autres facteurs comme la propagation des ondes radio des antennes GSM ou WIFI dont la nuisance sur la santé est encore mal évaluée, mais aussi sur la gestion des déchets des équipements de communication en fin de cycle de vie. L'objectif de cet article est de repositionner la problématique environnementale encore souvent très confuse dans le contexte de l'ingénierie des réseaux.

Mots-clés— Environnement durable, Green ICT, Réseaux, Télécoms.

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les entreprises et les pouvoirs politiques axent leur communication autour de l'écologie pour lutter notamment contre le réchauffement climatique. Tous nouveaux produits lancés sur le marché, ou toutes décisions politiques sont de plus en plus justifiées en montrant leurs vertus environnementales. Il faut alors réduire l'émission de carbone, limiter les ondes radio, diminuer les déchets et l'utilisation de composants toxiques, mais aussi se prévaloir d'une certaine éthique dans le management de l'entreprise et le choix de ses sous-traitants. Dans une approche informelle (marketing, ...), on peut se contenter de valoriser une action positive sur l'environnement indépendamment des autres facteurs, contrairement à une approche scientifique qui doit analyser suivant une métrique bien définie une partie ou l'ensemble des objectifs liés à l'environnement durable.

Ce papier s'intéresse à l'impact des réseaux et télécoms sur l'environnement. En effet, le rapport SMART 2020 [1] souligne que les infrastructures de communication représenteront en 2020, 25% du taux d'émission carbone généré par les secteurs de l'ICT (Information and Communications Technologies) qui regroupe notamment ordinateurs, imprimantes, moniteurs, datacenters, réseaux, ... Ce rapport indique aussi (de façon contradictoire) que les communications numériques doivent être utilisées plus intensivement pour pouvoir mieux surveiller et contrôler la consommation énergétique des grands pollueurs que sont l'industrie, l'habitat, les transports.

L'objectif de cet article est de dégager, d'une part, des grandes orientations à prospecter pour rendre les réseaux plus « verts » (section 4) et de proposer d'autre part un formalisme pour pouvoir analyser les infrastructures de communication relativement à un problème environnemental multi objectifs (section 5). Mais tout d'abord, nous allons commencer par introduire les concepts anglophones de Green ICT (section 2) puis de Green Networking (section 3).

II. GREEN ICT

A. Introduction

Dans la plupart des pays, le mot « pollution » [2] qualifie la contamination d'un milieu par un agent polluant au-delà d'une norme, seuil, loi ou hypothèse qui occasionne une instabilité, un désordre, et qui fait du mal ou génère de l'inconfort à l'écosystème (systèmes physiques ou organismes vivants). La pollution peut prendre la forme de substances chimiques, de l'énergie comme la chaleur, la lumière, le bruit. La pollution dans le domaine des communications peut être structurée selon ces trois axes principaux : la dissipation d'énergie, la radiation électromagnétique et les déchets. Mais, d'autres facteurs peuvent s'y ajouter comme les critères éthiques et esthétiques (paraboles sur les toits, câbles aériens, ...). Dans cet article, seuls les axes principaux sont considérés.

B. Energie

L'augmentation irrémédiable des coûts de l'énergie et la nécessité de réduire l'émission de CO₂ pour protéger l'environnement sont aujourd'hui les moteurs économiques et écologiques pour faire émerger une meilleure prise en compte de la consommation énergétique dans tous les secteurs des réseaux et télécoms. Le rapport SMART 2020 [1] intitulé « Enabling the low carbon economy in the information age » et écrit par le « Climate Group » sur l'initiative du GeSI (Global eSustainability Initiative) dresse à la fois un bilan sur l'empreinte carbone induit par l'informatique et les réseaux et son évolution d'ici 2020. De façon chiffrée, le constat est de 0,83 Gt pour 2007 de rejet de CO₂ uniquement pour l'ICT, représentant 2% de l'émission carbone globale de l'activité humaine. L'estimation pour 2020 est de 1,43 Gt de rejet de CO₂. Un certain nombre de recommandations sont alors énumérées pour réduire l'émission de CO₂ comme le remplacement des disques durs « mobiles » par de la mémoire flash (50% d'économie), l'utilisation d'écran LCD,

L'intensification des techniques de virtualisation dans les *datacenters* pour optimiser le nombre de serveurs,... De façon anecdotique, les chercheurs de l'Université de Havard ont évalué qu'une recherche internet sur un ordinateur de bureau génère globalement 7 grammes de carbone. L'autre volet du rapport SMART 2020 est une analyse sur l'apport de l'ICT pour réduire la consommation énergétique des principaux pollueurs. Les pollueurs identifiés sont l'industrie, la logistique, l'habitation, et une intention particulière doit être portée sur le transport de l'énergie. Cette réduction doit passer par cinq actions principales : la **standardisation (1)** de l'information, un meilleur **monitoring (2)**, une maîtrise des **coûts (3)** tant sur la consommation que sur la production de l'énergie. Mais, il faut aussi **repenser (4)** d'autres alternatives plus sociétales pour réduire la consommation d'énergie. L'organisation du travail peut par exemple s'appuyer sur des phases de télétravail de façon à limiter l'usage de véhicules. Finalement, il faut **transformer (5)** les process et les systèmes de gestion d'énergie en développant des approches plus intégrées (systémiques) et plus intelligentes (concept d'intelligence embarquée,...). La mise en place de ces cinq actions nécessite alors une utilisation plus importante de ressources informatiques et de communication qui devront donc s'appuyer sur de nouvelles normes. D'ailleurs, W. C. Adams (Président de l'IEEE) recensait en juillet 2009 huit normes IEEE en cours d'élaboration associant l'ICT à la problématique environnementale [3-10].

C. Radiation Electromagnétique

Il n'existe pas actuellement de résultats tranchés sur les effets des champs électromagnétiques non- ionisants sur la santé. Cependant des premiers travaux montrent par exemple que des champs électromagnétiques faibles à des fréquences comprises entre 0.1-10Mhz ont une incidence sur le comportement des animaux, particulièrement sur l'orientation des oiseaux migrateurs [22]. Aussi par précaution, un certain nombre de recommandations a été publié sur la manière d'utiliser un téléphone portable [21].

D. Déchets

Les équipements réseaux produisent des déchets à chaque fois que les infrastructures réseaux évoluent. La meilleure approche est donc de limiter leurs créations. Des pratiques consistant à ne pas changer par exemple les chargeurs à chaque fois que l'on achète un nouveau téléphone portable sont à généraliser. Les constructeurs d'équipements réseaux s'engagent aussi de plus en plus dans le recyclage de leurs produits, mais aussi dans l'éco-emballage.

II. GREEN NETWORKING

A. Introduction

Rendre les réseaux plus écologiques est avant tout un nouvel enjeu commercial. L'étude menée par [11] montre clairement les équipementiers réseaux qui sont en retard dans leur volonté de produire des nœuds de communication plus verts. Le constat est que suivant le constructeur, il peut y avoir un

rapport de six sur la consommation d'énergie pour un nœud réseau de même capacité. Cette différence de consommation peut alors être un argument décisif lors de l'élaboration d'une baie de réseau constituée de plusieurs dizaines de commutateurs en regard des nouvelles taxes carbone. Les principales actions à entreprendre pour rendre plus vert les équipements réseau sont de réduire les substances toxiques utilisées dans les réseaux (problème de recyclage), d'améliorer le rendement énergétique des processeurs implantés dans les nœuds de communication, d'utiliser des alimentations et des systèmes de refroidissement plus performants, et de développer de nouveaux protocoles de communication permettant de mesurer et optimiser la consommation d'énergie du réseau. D'autres aspects peuvent être considérés dans le cycle vie du produit comme l'éco emballage, la durée de vie des produits qui actuellement sont le plus souvent considérés comme jetables (comme les téléphones portables) et des critères esthétiques. L'objectif de cette section est de présenter les premiers travaux de recherche, mais surtout les efforts des équipementiers pour rendre les réseaux plus écologiques. Pour améliorer la lisibilité de cet article, nous distinguons les réseaux filaires des réseaux sans-fil.

A. Réseaux filaires

La réduction de la consommation d'énergie passe déjà par une sélection de composants électroniques peu énergivores lors de la conception des commutateurs, des routeurs, des pare-feux,... C'est la démarche entreprise par la société 3Com qui travaille en étroite collaboration avec la compagnie de semi conducteurs Tiler. L'étude [11] montre que les produits 3Com sont actuellement les moins consommateurs d'énergie. Une autre approche consiste à adapter les configurations des lignes de transmission en fonction de leurs états. La société D-Link propose des commutateurs verts qui sont capables de réduire la consommation d'une ligne en mode Idle, mais aussi d'adapter la puissance à délivrer à une ligne en fonction de sa longueur. De nouveaux logiciels comme EnergyWise de CISCO proposent quant à eux de mettre en sommeil les équipements informatiques et réseaux dans les plages de non activité de l'entreprise. Ces aspects de mise en sommeil des équipements réseaux en fonction du taux d'utilisation des lignes sont d'ailleurs en cours de normalisation [5] et devrait aboutir à la définition de nouveaux protocoles de communication dans le monde d'Ethernet. A noter, que la politique habituelle dans le domaine des réseaux du toujours plus de bande passante risque d'être remise en cause, si le point vue énergétique devient primordial. En effet [12], montre que le passage d'une ligne de 100Mb/s à 1Gb/s induit une augmentation de la consommation de 4 Watts. Dans ce contexte, il va devenir important de repenser le câblage en fonction de l'usage lorsqu'une entreprise rassemble des milliers de points de connexion. Toujours dans [12], une proposition d'implanter des *proxys* dans les cartes réseaux est défendue. L'idée de ce *proxy* est de filtrer les échanges protocolaires intra-réseaux qui ne nécessitent pas de réveiller l'ordinateur, contrairement aux échanges de niveau application. [13] approfondit les mécanismes de sommeil dans les commutateurs et les routeurs (OSPF, IBGP) pour réduire la consommation d'énergie des infrastructures de réseaux.

Pour évaluer et optimiser la consommation d'énergie d'un équipement réseau, il est nécessaire d'en avoir un modèle. Dans [14], un modèle de consommation de commutateurs est donné et met en exergue que cette consommation est principalement liée au nombre de lignes, à la bande passante, et aux trafics à transmettre. Au niveau routage, [15] propose de prendre en compte le prix de vente des opérateurs d'énergie dans la fonction d'optimisation pour accéder aux datacenters. Si l'algorithme définit actuellement ne permet que de réduire la facture énergétique de la transaction et non pas sa consommation, l'auteur de cet article projette que le protocole de routage puisse choisir le *Datacenter* en fonction de son taux d'utilisation ou encore de la température de la localité pour optimiser l'utilisation des systèmes à air conditionné.

B. Réseaux sans fil

Le taux de transferts de données dans les réseaux suit la loi de Moore en augmentant d'un facteur dix tous les cinq ans. Le prix payé par cette évolution est le doublement de la consommation d'énergie par l'infrastructure de réseaux cellulaires tous les quatre-cinq ans. En 2007, cela représentait 60 TWh (milliards kWh). En moyenne, un Européen émet 4-5000kg de CO₂/an dont environ 0,8% généré son téléphone portable (25-30kg). Dans les pays en voie de développement, les opérateurs dépensent plus de la moitié de leur OPEX (Operational Expenditure) uniquement en fuel pour faire fonctionner les générateurs diesel des stations de base. Les stations autonomes prolifèrent dans ces pays, plus de 30% par an, avec l'augmentation rapide du nombre de téléphones portables et elles sont alimentées par des groupes électrogènes. Et l'acheminement du fuel se fait en plus par camions ! Elles sont concentrés principalement en Afrique, en Asie du sud (en incluant l'Inde), en Amérique latine et aux Caraïbes. Aussi, les opérateurs se penchent peu à peu vers l'utilisation d'énergie produite par des éoliennes, et des panneaux solaires pour alimenter les stations de base. Les études prévoient qu'en 2014 plus de 230000 stations de base cellulaire (dans les pays en voie de développement) seront alimentées par des énergies renouvelables [23].

D'autres pistes doivent permettre d'améliorer les systèmes de communication sans-fil, comme la radio cognitive et les antennes intelligentes. La radio-cognitive est un paradigme dans lequel un réseau ou un nœud sans-fil change ses paramètres d'émission ou de réception pour communiquer plus efficacement, en évitant les interférences entre les utilisateurs avec ou sans licence. Ce mécanisme est décrit dans la norme IEEE 802.22 [24]. Les antennes intelligentes reposent sur une technologie qui utilise le multiplexage spatial et le codage spatial pour éliminer les interférences [25].

En juin 2009, l'Alliance Zigbee a annoncé pour la fin 2009 un nouveau standard : ZigBee Green Power Feature où les produits ZigBee seront capables de s'autoalimenter en puisant l'énergie disponible dans leur milieu. Le but est d'éliminer les câbles et les batteries indispensables actuellement pour apporter de l'énergie aux systèmes sans-fil.

De plus en plus de recherches concernent le déploiement des réseaux cellulaires en prenant en compte les contraintes d'émission d'ondes radio. L'une des solutions est d'utiliser des stations de base et des téléphones portables avec des puissances de transmission plus faibles. Cependant, cette approche tend, pour une qualité de service équivalente, à multiplier le nombre de stations de base générant donc plus d'émission de CO₂, et enlaidissant l'environnement, sans pour autant rassurer les citoyens sur leur moindre nocivité. Basée sur cette approche, [26] propose une réduction de la pollution électromagnétique dans les systèmes de communication mobile en optimisant l'emplacement des stations de base radio. Dans le même esprit, la société Greenair Wireless [27] délaisse la conception classique d'un réseau cellulaire en ajoutant des stations capables uniquement de recevoir les émissions des téléphones portables. Le but est de minimiser la puissance d'émission de ceux-ci.

Le recyclage des téléphones portables pour réduire les déchets est une contribution à l'amélioration de l'environnement : un portable contient des métaux précieux (or, argent), des métaux ordinaires intéressants à récupérer et à réutiliser. Mais, il contient aussi des substances chimiques (cadmium, lithium) dont le retraitement est indispensable. Le recyclage peut aussi être un simple reconditionnement de l'appareil qui sera revendu à moindre prix, notamment dans les pays en voie de développement. Actuellement, la Commission Européenne souhaite imposer une norme sur les chargeurs de batteries pour éviter son remplacement à chaque achat d'un nouvel appareil téléphonique [28].

III. DISCUSSION

A. Introduction

Le but de cette section est d'énumérer les grands principes à respecter pour entreprendre des actions permettant de rendre plus écologique les infrastructures de communication.

B. Approche systémique

Lorsqu'une entreprise souhaite développer une approche durable, elle doit s'assurer que ses actions individuelles pour réduire son empreinte carbone n'aient pas des effets indésirables dans d'autres secteurs de l'économie. Le bilan carbone ne doit pas être parcellaire mais global. Lorsque le rapport SMART 2020 préconise l'utilisation d'outils favorisant le télétravail pour réduire les déplacements des employés de leur domicile vers leur lieu de travail, cela impacte un surcoût de consommation d'énergie pour mettre en place des infrastructures de communication efficace, et une surconsommation des systèmes de chauffage ou d'air conditionné dans le domicile de chaque employé. Dans ce cas, l'entreprise consomme moins, mais les ménages se retrouvent avec des factures d'énergie plus importantes. Les méthodologies pour concevoir des systèmes durables doivent donc être globales en considérant notamment l'ensemble du cycle de vie des produits.

C. Objectifs normalisés

La première étape avant d'adopter une démarche environnementale est d'avoir une vue très précise des objectifs à atteindre. La difficulté liée à l'étude des systèmes durables est que ces objectifs peuvent être différents, voire contradictoires. Si le débat se place sur la santé, concevoir un téléphone portable c'est se pencher sur la limitation du champ des ondes radio, de sa consommation d'énergie et enfin de son recyclage pour réduire les déchets. Mais d'un point de vue médical, l'amélioration des soins passe par une infrastructure GSM toujours opérationnelle pour traiter les appels d'urgence. Maintenant, si on se place sur des objectifs liés à la protection de la nature, pour un climatologue, l'objectif est d'endiguer le réchauffement de la terre en réduisant l'émission de carbone, pour un chercheur étudiant les flux migratoires des oiseaux, l'objectif est de réduire les émissions radios qui désorientent les migrateurs. Les objectifs peuvent être encore de type esthétique (il faut éviter l'installation de paraboles), éthique... Comme tous systèmes à étudier, mais encore plus dans le cadre de l'environnement, il est donc essentiel d'identifier clairement les objectifs visés, et comment les atteindre.

D. Identification des sources d'énergie.

L'énergie consommée par les infrastructures de communication n'est pas directement liée avec le taux d'émission de carbone. En effet, cela dépend du système produisant l'énergie : centrales (hydraulique, nucléaire, pétrole, charbon), parcs éoliens, capteurs solaires, etc... L'installation des infrastructures télécoms, des datacenters, des usines de fabrication de composants électroniques pourraient alors être guidée selon la façon de produire de l'énergie. De même, le transport de l'information pourrait être aiguillé en fonction aussi de ce critère.

E. Métriques unifiées

Comme le soulignait un participant du workshop [16] sur la dissipation de l'énergie dans les téléphones mobiles « should we measure CO2 emissions per subscription, per customer, per square mile, per cell site, per transceiver, per volume of data traffic, or 101 other options? ». Le problème d'optimisation prenant en considération l'environnement doit donc commencer par une définition consensuelle de chaque métrique, et une pondération de cette métrique suivant les axes de pollution qu'il faudra être capable d'agrèger avec des critères informels (esthétisme,...). C'était le but annoncé de la nouvelle conférence [17] qui s'est tenue en mai 2009. Le tableau 1 donne un exemple d'une métrique selon deux attributs qui pourrait être utilisée de façon commune.

Axe de pollution	Attribut 1	Attribut 2
Energie	Puissance (W)	CO2 quantité/an
Radiation électromagnétique	Champ EM (V/m)	Fréquence (Hz)
Déchets	Quantité/ équipement (Kg)	Quantité de métaux polluants (Kg)

Tableau 1. Métrique par axe de pollution

F. Modèles de pollution

Si les recherches sur la modélisation des ondes radio sont déjà très présentes notamment pour évaluer leurs interactions ou pour optimiser le déploiement des antennes, les travaux portant sur l'évaluation de la consommation d'énergie des équipements réseaux ne font que débuter. Cependant, [14][18][19] proposent des premières expressions analytiques de consommation de commutateurs en s'appuyant sur des expérimentations. C'est un axe de recherche qui doit s'intensifier en utilisant notamment des plans d'expériences pour identifier les paramètres influençant de façon significative la consommation d'énergie. Ces modèles pourraient en particulier être intégrés dans des outils de simulation de réseaux qui en sont actuellement dépourvus. Dans [14][18][19], les paramètres pris en compte ne sont pas exhaustifs pour généraliser les résultats. En effet, les informations sur la température, les configurations des équipements, c'est-à-dire les protocoles actifs ou non dans le commutateur (STP, VLAN,...), mais aussi des informations sur le trafic traversant le commutateur ne sont pas précisées.

G. Méthodes d'organisation d'infrastructures réseaux

Les entreprises dans les réseaux et télécoms mettent sur le marché de nouveaux nœuds de communication plus vertueux pour l'environnement. Cependant, ils ne proposent pas de guides ou de méthodes pour optimiser leurs réglages. De nouvelles méthodologies et pratiques en ingénierie de réseaux doivent aussi être définies pour tenir compte des critères de pollution. Une offre de service en communication doit intégrer dans ses nouveaux contrats SLA (SLA : Service Level Agreement) non plus uniquement des critères de QoS (Quality of Service), c'est-à-dire en termes de délais, giges, pertes,... ou encore sur des critères subjectifs de QoE (Quality of Experience), c'est-à-dire de perception humaine du niveau du service offert par le réseau, mais aussi sur des critères durables de QiS (Quality in Sustainability [17]). C'est une problématique de recherche nouvelle et encore peu investiguée.

H. Nouveaux protocoles

Pour intégrer des fonctions de consommation d'énergie, il faut définir de nouveaux protocoles de communication pour surveiller et agir, par exemple, sur la mise en sommeil à distance d'équipements informatiques et réseaux [13][20] ou encore pour optimiser le routage d'information selon des coûts énergétiques [15]. Une nouvelle aire fonctionnelle dédiée à l'environnement pourrait aussi s'ajouter aux cinq aires déjà normalisées dans les MIB (Management Information Base) du modèle OSI (Open Systems Interconnection). Finalement, une démarche de standardisation globale basée sur les principes définies par la norme MMS (Manufacturing Message Specifications) pourrait être adoptée pour contrôler et surveiller les applications identifiées par le rapport SMART 2020 comme les plus polluantes (industrie, logistique, bâtiment,...).

IV. PROPOSITION D'UNE METHODE D'INGENIERIE RESEAUX

A. Introduction

Le but de cette section est de définir une fonction objectif représentant les différents critères durables, puis de présenter une démarche d'ingénierie réseaux respectueuse de l'environnement reposant sur l'approche fonctionnelle systémique QFD (Quality Function Deployment) connue aussi sous le nom de la maison de la qualité.

B. Fonction objectif durable

Il est important de définir une fonction permettant de représenter globalement l'effort réalisé pour l'environnement lors de la conception d'une infrastructure réseaux et Télécoms. Cet effort peut être évalué en sommant les inverses des niveaux pollutions. Chaque membre de cette expression est pondéré pour indiquer les axes durables privilégiés dans chaque étude. En effet, une architecture réseaux ne reposant que sur du filaire n'a pas à considérer les aspects radio. Cette fonction appelée FEW (Friendly with Environment Weight) s'exprime ainsi :

$$FEW = We/Energie + Wemr/EMR + Wd/Dechet \quad (1)$$

We : Pondération sur l'énergie ; Wemr : Pondération sur les ondes radio ; Wd : Pondération sur les déchets.

L'une des perspectives de recherche est alors d'homogénéiser entre eux les différentes pollutions. Une des solutions pour normaliser les pollutions pourrait consister à coder numériquement cette pollution par des phases d'expertise en convertissant la dissipation énergétique, l'émission d'ondes radio et la quantité de déchets par des valeurs comprises entre 1 et 10. Ici, la valeur 1 signifie une solution polluante contrairement à la valeur 10 qui indique un faible impact environnemental. Ensuite, il faut pouvoir représenter l'infrastructure réseaux en fonction de sa performance, son coût et sa prise en compte environnementale. La représentation sous forme d'un radar semble bien adaptée. Ce radar donne une vue synthétique pour évaluer le système de communication. La figure 1 donne un exemple fictif d'une évaluation pour un réseau filaire et un réseau sans fil. FEW permet d'évaluer l'infrastructure du réseau, mais ne fournit pas d'indications sur les actions à entreprendre pour rendre plus écologique le réseau. Le paragraphe suivant montre comment la méthode QFD peut identifier les paramètres essentiels à configurer relativement aux poids de la fonction objectif FEW.

C. Approche d'Ingénierie réseaux durable

La méthode QFD [29] repose sur la définition d'attentes primaires et secondaires (le Quoi) et sur une énumération de solutions à envisager (le Comment) pour satisfaire les attentes. La mise en place d'architectures de communication repose sur quatre attentes primaires : (1) une qualité sur la perception du réseau par le client (QoE), (2) une qualité de

service offert par le réseau (QoS), (3) une qualité environnementale (QiS), et (4) le coût de l'infrastructure réseaux. Chacune de ces attentes primaires est détaillée en attentes secondaires. La QoE doit satisfaire les clients pour des applications audio, vidéo et données tout en considérant des attentes en termes d'ergonomie et d'esthétisme. La QoS se décline en paramètres de délai, de gigue, de perte de données, mais est aussi conditionnée par des facteurs de mobilité, de sécurité,... La QiS peut, quant à elle, s'étudier selon le rejet carbone, les ondes radios, la quantité de déchets, mais aussi sur des aspects éthique et esthétique. Les coûts financiers sont bien évidemment impactés par les actions identifiées précédemment, avec comme postulat qu'une solution durable peut augmenter le prix de l'installation mais aussi permettre une marge plus confortable car le client raisonnera sur son amortissement par rapport à sa consommation d'énergie ou tout simplement parce qu'il est sensible aux discours sur l'écologie. Il faut distinguer alors deux coûts : le coût de l'installation et le coût d'exploitation.

Ensuite, il s'agit de définir les spécifications techniques en réseaux et télécoms pour répondre à chaque attente. Par rapport au sujet de cet article, c'est-à-dire par rapport à une attente environnementale, les solutions pour élaborer une architecture de communication durable sont de choisir des équipements à faible consommation d'énergie et utilisant le moins de composants toxiques, de réduire le nombre d'équipements réseaux, de réduire la longueur des câbles, de limiter l'emploi de lignes à hauts débits, de limiter le trafic, d'optimiser le routage et la répartition du trafic, d'optimiser la puissance et la couverture des émetteurs radio, de planifier l'utilisation des ressources informatiques pour optimiser leur mise en sommeil, de sélectionner des climatiseurs peu énergivores, de repenser les locaux techniques accueillant les baies de brassage pour diminuer les factures de climatisation,... D'autres aspects, plus généraux à une démarche durable sont de vérifier l'éthique de la sous-traitance et des fournisseurs, de réaliser des audits sur le management interne de l'entreprise. La prise en compte du critère esthétique doit amener à systématiquement vérifier si le site ou le bâtiment dans lequel le réseau est installé n'est pas classé. Et, une grille d'évaluation orientée sur l'esthétisme doit être proposée aux personnes concernées (utilisateurs, voisinage,...). Une vue partielle de la maison de la qualité est donnée dans la figure 2.

En reprenant la démarche QFD, l'ingénierie réseaux passe ensuite par : (1) une pondération des attentes en fonction du client qui correspond aux poids de la fonction objectif FEW, (2) un examen des relations entre chaque attente et solutions techniques. Pour cela des valeurs numériques sont placées à chaque intersection entre attentes et solutions. Ensuite pour chaque solution, on réalise la somme des valeurs numériques pondérées par les poids des attentes qui permettent d'identifier les solutions techniques sur lesquelles il faut se concentrer. Les points hauts en dessous de la maison de la figure 2 montrent les solutions à privilégier. Finalement (3), une étude des interactions ou corrélations entre les solutions techniques est effectuée et permet de repérer les solutions complémentaires, ou contradictoires. Ces interactions sont placées sur le toit de la maison de la figure 2 sous la forme ici

de + (complémentaire) ou de - (contradictoire). Ainsi, la réduction de la puissance d'émission radio d'une antenne peut avoir une incidence négative sur le fait de minimiser le nombre d'antennes à installer. Par contre, la réduction du nombre d'équipements est une action qui va dans le même sens que d'adapter les locaux techniques pour réduire les coûts de climatisation.

V. CONCLUSION

Cet article présente les nouveaux paramètres à considérer pour rendre durable les infrastructures réseaux et télécoms. Cette contrainte environnementale devrait avoir pour conséquence d'améliorer et assainir les pratiques d'ingénierie réseaux qui reposent encore souvent sur une course aux débits et non pas à une utilisation rationnelle des équipements de communication. Une démarche QFD permet de considérer globalement la problématique d'ingénierie réseaux dans un contexte écologique et d'identifier les solutions techniques à privilégier. La suite de ce travail est d'affiner le modèle QFD et d'étudier les relations entre les attentes et les solutions techniques. Il s'agit aussi d'approfondir les solutions techniques en étudiant leurs interactions mais aussi en réalisant par exemple des modèles de consommation d'énergie de commutateurs, de routeurs, de bornes d'accès sans-fil,...

REFERENCES

[1] http://www.theclimategroup.org/assets/resources/publications/Smart2020Report_lo_res.pdf, Smart report: Enabling the low carbon economy in the information age.
 [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Pollution>
 [3] IEEE 1609 Wireless Access in Vehicular Environments
 [4] IEEE P1888: Ubiquitous Green Community Control Protocol
 [5] IEEE P802.3az: Energy Efficient Ethernet
 [6] IEEE 1680 series EPEAT® (Electronic Product Environmental Assessment Tool)
 [7] IEEE SCC 40 Standards Study Group on Climate Change and Greenhouse Gas Management
 [8] IEEE 1621 Interface requirements for power control of electronic products
 [9] IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
 [10] IEEE P1595, Standard for Quantifying Greenhouse Gas Emission Credits from Small Hydro; Wind Power; Baseline Projects; and Grid
 [11] Fodale V., Scherer S., Green Networking Equipment: Who Leads and Who Lags. ©2008 In-Stat All Rights Reserved, <http://www.in-stat.com>, Février 2008.
 [12] Gunaratne C., Christensen K. et Nordman B. Managing energy consumption costs in desktop PCs and LAN switches with proxying, split TCP connections, and scaling of link speed. *International Journal of Network Management*, vol 15, pp. 297-310, 2005.
 [13] Gupta M., Singh S. Greening of the Internet. *Proceedings of ACM Sigcomm*, Karlsruhe, Germany, Août 2003.

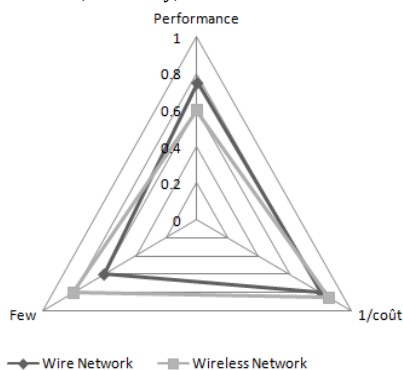
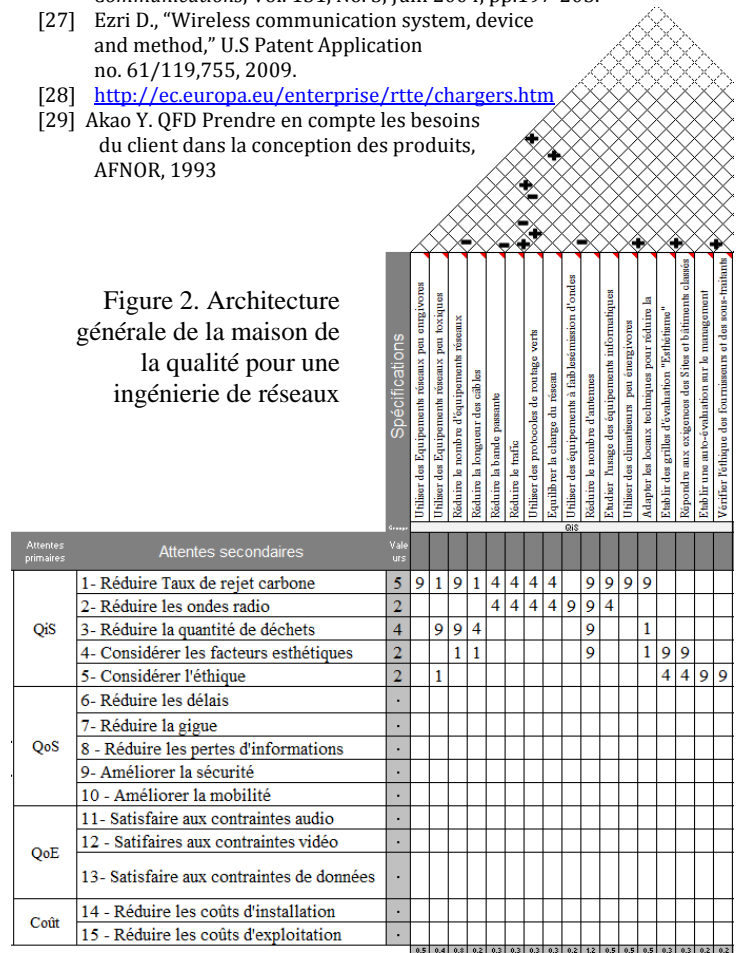


Figure 1. Evaluation d'une infrastructure réseaux durable

[14] Mahadevan P., Sharma P., Banerjee S. et Ranganathan P. A Power Benchmarking Framework for Network. IFIP International Conference on Networking, Mai 2009.
 [15] Knigh W. Energy-aware Internet routing, Technology review, August 2009. <http://www.technologyreview.com/>
 [16] Session Disruptive analysis, Conference on Next Generation Networks and Basestations, Bath, UK, 22-25 Avril 2008.
 [17] Quality in Sustainability conference, 24-26 Mai 2009, Minneapolis Convention Center.
 [18] Mahadevan P., Sharma P., Banerjee S., Ranganathan P. "Energy aware network Operations" IEEE Global Internet Symposium, Avril 2009.
 [19] Ananthanarayanan G., Katz R. H., Greening the Switch, Hotpower 2008, Workshop on Power aware computing and systems, San Diego CA, décembre 2008.
 [20] M. Bennett, K. Christensen, B. Nordman, Improving the Energy Efficiency of Ethernet : Adaptive Link Rate Proposal, Ethernet Alliance report, www.ethernetalliance.org, Juillet 2006.
 [21] Herberman R., Tumors and cell phone use: what the science says, Website, Sept. 2008, <http://domesticpolicy.oversight.house.gov/documents/20080925142803.pdf>.
 [22] T. Ritz, P. Thalau, J. B. Phillips, R. Wiltschko & W. Wiltschko, Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass, *Nature*, Vol. 429, Mai 2004 pp 177-180
 [23] Noguee A, Green Base Stations: Renewable Energy Becomes a Reality in Cellular Infrastructure", In-Stat report, Septembre 2009
 [24] Stevenson C., Chouinard G., Lei Z., Hu W., Shellhammer S. & W. Caldwell W. IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Networks (WRANS) Standard = IEEE Communications Magazine. 47. US: IEEE. pp. 130-138, 2009.
 [25] Cui S., Goldsmith A.J., and Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO in Sensor Networks. IEEE J. Select. Areas of Commun, Août 2004.
 [26] Cerri G., De Leo R., Micheli D., Russo P., Base station network planning including environmental impact control, *IEE Proc. Communications*, Vol. 151, No. 3, Juin 2004, pp.197-203.
 [27] Ezri D., "Wireless communication system, device and method," U.S Patent Application no. 61/119,755, 2009.
 [28] <http://ec.europa.eu/enterprise/rtte/chargers.htm>
 [29] Akao Y. QFD Prendre en compte les besoins du client dans la conception des produits, AFNOR, 1993

Figure 2. Architecture générale de la maison de la qualité pour une ingénierie de réseaux



Solutions à privilégier

