

# Les réseaux de communication du futur\*

Occupant une place prépondérante au cœur de la Société, Internet doit aujourd'hui évoluer pour répondre à l'émergence de nouvelles composantes (Internet des réseaux, des objets, des contenus...) qui sont autant de promesses sur les plans économique et scientifique.

par François BACCELLI\*\*

WEB D'AUJOURD'HUI,  
WEBS DE DEMAIN

Internet est une infrastructure stratégique qui joue, depuis une quinzaine d'années déjà, un rôle central dans l'économie et la société qui était impossible à imaginer lors de sa conception. Les faiblesses structurelles du réseau actuel conduisent certains chercheurs à envisager une refondation. Internet devra aussi faire face aux transformations de ses diverses composantes et à l'apparition de nouvelles composantes, de nouveaux types de trafic et d'applications. Nous passons en revue l'ensemble de ces questions et formulons quelques remarques sur les enjeux scientifiques et industriels, ainsi que des recommandations sur la manière de se préparer à ces mutations.

## RETOUR SUR LE DÉVELOPPEMENT DE L'INTERNET

La technologie sous-jacente à Internet a été initialement conçue pour transférer de manière fiable des fichiers entre deux points fixes.

Elle est fondée sur deux principaux types d'algorithmes : *le routage* et *le contrôle de congestion*. Le routage IP consiste en un aiguillage autonome des paquets de l'émetteur au destinataire, en passant par un nombre minimal de routeurs. Le contrôle de congestion TCP/IP permet d'éviter les engorgements.

Les deux critères essentiels pour le choix de tout algorithme dans ce cadre sont son caractère *décentralisé* et son *extensibilité* (on parle aussi de passage à l'échelle), c'est-à-dire sa capacité à fonctionner pour des réseaux de très grande taille. Si l'Internet a pu croître si rapidement depuis sa création dans les années 70 et supplanter les réseaux d'opérateurs classiques, c'est précisément

grâce à l'extensibilité et la décentralisation des algorithmes utilisés : en particulier, l'idée de base (très simplifiée et un peu idéalisée) en est qu'en connectant deux réseaux IP contrôlés par TCP et en laissant interagir leurs tables de routage, on obtient un nouveau réseau IP contrôlé par TCP.

Cette simplicité, ainsi que l'utilisation de protocoles ouverts et neutres, ont permis la mise en place très rapide d'un réseau global permettant de transférer l'information sous toutes ses formes, presque en tout lieu, quasi instantanément et pour un coût le rendant accessible à un très grand nombre d'utilisateurs.

Ces caractéristiques ont permis à Internet de faire face à une croissance accélérée et de s'adapter à de nouvelles technologies.

Cette ubiquité et cette instantanéité ont aussi permis le développement de nouvelles structurations des données et de nouveaux services, au premier rang desquels la Toile (que le grand public confond souvent avec l'Internet) et les moteurs de recherche, qui ont révolutionné notre accès à l'information.

## L'INTERNET DU FUTUR

Pour comprendre les évolutions à venir de l'Internet, il convient d'abord de noter que cette simplicité sur

\* Cet article résume les analyses et les recommandations d'un rapport remis à la Direction générale des Entreprises, dont les auteurs sont, outre l'auteur de cet article, V. BADRINATH, F. BOURDONCLE, C. DIOT, S. FDIDA et D. KOFMAN.

\*\* Directeur de recherche à l'INRIA, membre de l'Académie des sciences.

laquelle nous avons insisté, qui est à la base de son succès, est aussi son talon d'Achille :

- la technologie et le réseau ne permettent pas d'offrir les garanties nécessaires à des applications à caractère temps-réel critique ;
- le réseau a été conçu pour des utilisateurs honnêtes et bienveillants et la sécurité n'est donc pas intégrée au modèle de communication ;
- le réseau n'a pas été conçu pour des nœuds mobiles et pour le nomadisme ;
- l'administration du réseau est presque inexistante.

Pour servir de manière durable et satisfaisante d'infrastructure universelle et critique pour les besoins et usages de l'industrie, de l'économie, de la société, Internet devra donc, dans le futur, corriger ces faiblesses structurelles. Il y a au moins trois points de vue sur la manière de s'y prendre :

- de nombreux chercheurs académiques et industriels pensent qu'il est nécessaire d'envisager une refondation d'Internet, connue sous le nom de *clean-slate design*, sur la base de nouveaux réseaux et de nouveaux protocoles plus stables, passant mieux à l'échelle et garantissant la sécurité de manière plus intrinsèque ;
- d'autres chercheurs pensent qu'une telle démarche est inutile (ou impossible) et lui préfèrent un plan d'améliorations incrémentales qui prennent en compte les évolutions en cours ; c'est peut être la seule voie possible, compte tenu de la base installée considérable ;

- une troisième catégorie de chercheurs propose de construire de nouveaux réseaux (overlays) et de nouveaux protocoles qui utiliseront Internet comme n'importe quelle infrastructure de communication préexistante.

La communauté scientifique internationale (académique et industrielle) a lancé un effort de grande ampleur sur ces questions. Chacun de ces points de vue génère des travaux de recherche fondamentale dans des domaines aussi divers que l'architecture (mobilité, sécurité, qualité de service), les technologies (optique, radio, énergie), les mathématiques (Internet est un système complexe, dynamique et autorégulé, qui est régi par des lois fondamentales, qu'il faut découvrir et valider), l'algorithmique distribuée (développement d'applications extensibles), l'économie, la sociologie des usages, et ainsi de suite.

Mais il y a d'autres forces en présence, notamment les transformations en cours des diverses composantes de l'Internet, ainsi que l'apparition de nouvelles composantes, dont Internet devra être l'intégrateur et que nous passons en revue maintenant.

#### L'Internet des cœurs de réseaux

Certains industriels proposent de construire un réseau au cœur surdimensionné, fondé sur l'optique, simple et



© Joshua Lott/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

« Le réseau n'a pas été conçu pour des nœuds mobiles et pour le nomadisme ». *Bus de ramassage scolaire équipé de la Wifi, Sonoita (Arizona, Etats-Unis), février 2010.*

rapide, qui pourra par exemple être ensuite virtualisé pour construire une multitude de réseaux virtuels optimisés pour les besoins d'une famille d'utilisateurs ou d'un type d'applications. C'est cette transformation du cœur du réseau qui a initialement lancé le débat sur l'Internet du Futur.

### L'Internet des réseaux d'accès

Les réseaux d'accès permettent aux particuliers et aux entreprises de se connecter à Internet et d'accéder aux services. Ces réseaux sont responsables, pour une grande part, du succès d'Internet. Leur évolution vers le haut débit a permis le déploiement de nouveaux services, comme par exemple le *triple play* (l'offre Internet, Téléphonie et Télévision sur DSL). Dans le futur, l'accès filaire sera aussi fondé sur le déploiement du FTTH/FTTO (super PONs, fibres plastiques) et permettra le développement de réseaux communautaires et familiaux. L'accès sans fil est lui aussi en pleine transformation. Tant du point de vue des couches physiques, où on prévoit de nouveaux interfaces radio à 100 Mbit/s, puis 1 Gbit/s, que du point de vue de l'architecture et des protocoles. L'accès radio à l'Internet demandera notamment une meilleure utilisation du spectre (radio flexible et/ou cognitive) et une auto-organisation des diverses technologies d'accès (2G, 3G/CDMA, LTE, WiFi, WiMax, Satellite, etc.).

### L'Internet des réseaux spontanés

Les réseaux spontanés sont des réseaux qui se créent et s'organisent automatiquement et de manière opportuniste, selon les technologies de transmission disponibles, les appareils à connecter et les services requis. Dans le domaine filaire, l'exemple le plus connu est la création d'une « communauté », puis la gestion automatique et autonome de cette communauté. Dans le domaine du sans fil, ces réseaux spontanés permettent à des individus de communiquer et d'échanger du contenu en l'absence d'infrastructure et de service centralisés. On utilise ces architectures pour créer des réseaux spécifiques pour le domaine de la défense et des situations de crise. Parmi les premières incarnations des réseaux de ce type, citons les réseaux mobiles ad hoc (MANETS), les réseaux tolérants aux délais (DTN) et les réseaux maillés Wi-Fi, l'Internet de proximité, tous formant de nouveaux types d'accès à l'Internet proprement dit.

### L'Internet des objets

L'Internet des objets sera le résultat de l'interconnexion du monde physique et d'Internet au moyen de capteurs

et de contrôleurs légers qui seront distribués sur une large échelle dans les véhicules, les équipements fixes, les milieux en mouvement, la grande distribution, etc. Il est probable que l'Internet du Futur incorporera des centaines de milliards de tels objets dans l'avenir à des fins d'observation, de contrôle, de développement de nouveaux services (habitat, sécurité, grande distribution, trafic routier, écologie, etc.). L'interface entre les mondes physique et numérique exige des approches nouvelles en termes d'architecture, de bases de données, de collecte de l'information, de gestion de la mobilité, de maintenance et de pérennité des données, etc. Cette interface passe par l'attribution de codes EPC (*Electronic Product Code*) et d'un service, l'ONS (*Object Naming Service*), permettant d'associer un EPC avec la localisation de l'organisation qui a attribué le code à l'objet.

### L'Internet des contenus

L'évolution d'Internet et son succès suivent l'évolution des contenus accessibles grâce au réseau. On a vu apparaître dès la fin des années 80 des applications temps réel sur Internet : jeux, vidéo, tableau blanc partagé, téléphonie. Aujourd'hui, la télévision, la vidéo à la demande et la téléphonie sont des contenus classiques sur Internet, à la fois en accès fixe et en accès mobile. L'avènement simultané de mémoires bon marché, d'ordinateurs à coût réduit et de l'accès DSL haut débit a permis à chaque utilisateur final de développer son propre serveur de contenu. De là est née la technologie dite de transmission en pair-à-pair qui remplace petit à petit le modèle classique client-serveur d'Internet. La diversification des contenus pose différents types de problèmes au réseau, en particulier en ce qui concerne le transport efficace et rapide du trafic généré et la mise à jour permanente de ces contenus.

### L'Internet des usages et services

Le service historique fourni par Internet est l'accès à des fichiers stockés sur des serveurs. Comme nous venons de l'expliquer, les contenus évoluent, ainsi que la façon de les consommer via Internet. C'est ce qu'on appelle les usages et les services. Le web des documents que nous connaissons actuellement se transforme en interface universel d'accès à tous les contenus et services d'Internet. On parle de webTV, par exemple. Nous avons assisté récemment au succès de SecondLife, FaceBook, ou LinkedIn. La conception d'*overlays* applicatifs passant à l'échelle est un des aspects clés du développement des nouveaux services. Un tel *overlay* est un intergiciel déployé sur un réseau permettant l'exécution d'une tâche commune par un très grand nombre de pairs qui peuvent être tour à tour processeurs, relais,

mémoires, etc. Grâce à de telles structures, le réseau lui-même devient à la fois calculateur universel, mémoire universelle et bibliothèque ouverte de toutes les applications ; en un mot, il devient le siège d'une nouvelle forme d'intelligence collective.

---

## L'INTERNET DU FUTUR COMME SOURCE DE CRÉATION DE VALEUR

On estime que les technologies de l'information contribuent actuellement à hauteur de 25 % à la croissance des pays industrialisés. Les évolutions décrites ci-dessus offrent des opportunités de développement économique particulièrement importantes, chacune sur une échelle de temps qui lui est propre.

L'Internet des cœurs de réseaux est un axe fort de la communauté scientifique américaine, en symbiose avec l'industrie américaine dans ces domaines (Cisco), qui voit un futur proche avec des routeurs virtualisés et programmables. L'optique est en pleine évolution et la commutation optique (commutation optique de rafales, commutation optique de flux) est proche de devenir viable tant du point de vue technique qu'économique. Parmi les points forts en France, citons tout particulièrement la position d'Alcatel-Lucent sur l'optique.

L'évolution des réseaux d'accès sans fil a connu un développement explosif. Les revenus de l'industrie des réseaux cellulaires se mesurent en centaines de milliards d'euros (environ 150 milliards de dollars aux Etats-Unis en 2008, selon A. Odlyzko). Il y a plus de 2 milliards de téléphones portables dans le monde. Le haut débit radio permettra le développement de nouveaux services cellulaires fondés sur la localisation de l'utilisateur. Le déploiement des réseaux d'accès en fibre optique est lui aussi à forts impacts industriel, économique et social. Nous disposons d'atouts importants dans ces domaines, notamment un marché intérieur dynamique, un opérateur de dimension européenne, ainsi que de compétences reconnues internationalement.

Avec l'Internet des réseaux spontanés, nous parlons probablement du plus long terme dans la mesure où les modèles économiques sont encore en cours d'exploration (on peut par exemple envisager des réseaux d'accès sans fil et sans opérateur). Ces deux évolutions permettront l'émergence de nouvelles formes de communications ; elles sont donc porteuses de mutations potentiellement profondes.

L'Internet des objets pourrait connaître un développement explosif dans un avenir proche, avec un impact immédiat sur la production et la grande distribution, avec le déploiement massif des RFID en remplacement des codes barres. Son développement est souvent cité comme un des événements les plus disruptifs sur tous les axes évoqués, notamment de par la création d'un gigantesque flux supplémentaire d'informations et

de nouveaux services de proximité qui vont faire émerger de nouveaux modèles économiques.

Dans le domaine des contenus, les enjeux économiques et scientifiques sont considérables et multiformes. De nouveaux contenus (réalité augmentée, jeux en réseau, etc.) sont à la base d'applications développées par les utilisateurs. Né comme un moyen contourné d'échanger des informations dont la diffusion gratuite était illégale, le pair-à-pair est actuellement étudié, développé et utilisé par les industriels pour la diffusion efficace et décentralisée de grandes masses de données.

Si la diversité des services pose des problèmes de cohabitation des contenus sur le réseau, c'est avant tout la création de services et d'applications nouvelles qui est un enjeu majeur de l'Internet du Futur. Bientôt, la réalité augmentée, les mondes virtuels, les jeux en ligne ou la téléprésence nous offriront une gamme encore plus variée d'applications.

Pour agir sur l'Internet et les composantes spécifiques que nous venons de passer en revue, il faut aussi influencer sur les grands organismes internationaux de standardisation et participer à sa gouvernance.

L'instance de standardisation qui a la plus grande influence dans l'évolution de l'Internet est l'IETF (*The Internet Engineering Task Force*). L'IETF développe et promeut les normes fondamentales d'Internet, les fameuses RFC telles que par exemple IP, TCP, SMTP, HTTP. D'autres organismes de standardisation jouent un rôle important, variable selon les domaines : le W3C, le 3GPP, l'ETSI, le DSL forum, et l'IEEE avec les travaux de normalisation des couches basses, en particulier des réseaux sans fil. Dans le domaine de l'Internet des objets, l'Auto ID Center, fondé au MIT, avait parmi ses objectifs celui de développer les standards dans ce domaine. En 2003, l'auto ID Center est devenu, d'une part, l'Auto ID labs (groupement de 7 laboratoires universitaires travaillant dans le domaine, dont deux européens, un à Cambridge, au Royaume-Uni et l'autre à l'ETH, en Suisse) et, d'autre part, l'EPC global.

La gouvernance de l'Internet résulte d'un effort conjoint des Etats, du secteur privé et de la société civile pour élaborer les principes, normes, règles, procédures de prise de décisions et programmes communs concernant l'évolution et l'usage d'Internet. La gestion des ressources est évidemment de première importance et débord largement le cadre de la gouvernance de l'Internet proprement dit, notamment en ce qui concerne la gestion du spectre pour l'accès radio ou l'attribution des codes par l'ONS.

---

## SUGGESTIONS ET RECOMMANDATIONS

Il y aura demain, d'un côté, les grandes puissances numériques qui auront considéré les réseaux du futur comme un espace d'action industrielle et de création technologique et scientifique, et de l'autre, les pays qui

ne seront que consommateurs de produits numériques et utilisateurs de réseaux conçus et opérés par d'autres. Des investissements très importants en recherche et développement sont donc en cours, notamment dans l'Union européenne, en Amérique du Nord et dans divers pays asiatiques.

Au vu des enjeux, il serait justifié de lancer, en France aussi, un grand programme scientifique et technologique similaire à ceux que notre pays a su mettre en œuvre dans le passé sur d'autres axes majeurs pour notre économie et notre société.

Son but serait d'insuffler l'innovation nécessaire aux grands groupes, de créer un flux de PME sur ces thèmes et d'attirer les étudiants et les enseignants et les chercheurs ayant la capacité de relever les défis identifiés.

Pour ce faire, il faut toutefois prendre en compte les spécificités de la création scientifique et de la création de valeur dans le domaine des réseaux de communication :

- **Monde académique** : nous devrions bâtir, à partir de nos forces dans ces domaines, qui sont très appréciables, au moins une structure d'enseignement et de recherche du niveau, de la visibilité et de la taille par exemple des départements EECS (*Electrical Engineering and Computer Science*) de Stanford ou de Berkeley, couvrant l'ensemble des thèmes évoqués.

- **PME** : on constate que les PME sont le point de passage obligé d'apparition de nouveaux leaders nationaux et mondiaux dans ce domaine et que les entreprises qui ont créé le plus de valeur dans ce domaine sont très souvent des anciennes PME qui sont issues du monde académique (Cisco et Google de Stanford, Facebook de Harvard). Sur la base de ces exemples, il faudrait disposer rapidement d'un « Small Business Act » français ou européen.

**Grands groupes industriels** : l'économie des réseaux s'est aussi développée et continue à le faire grâce à l'action de grands groupes industriels restant en contact direct avec la recherche académique de pointe (Alcatel-Lucent, Apple, IBM, Qualcomm). Il faut continuer à soutenir l'effort de recherche et la capacité d'innovation des grands groupes industriels en confortant le dispositif du Crédit d'Impôt Recherche et en mobilisant de manière spécifique les outils d'intervention en faveur de la recherche industrielle (soutien aux thèses en environnement industriel, laboratoires mixtes).

**Agences de financement de la recherche** : Internet est né et continue à évoluer grâce à des programmes

d'agences gouvernementales américaines (DARPA, NSF) favorisant une recherche disruptive et destinés à un tissu académique d'exception. C'est une approche très différente de celle des programmes collaboratifs pilotés par les grands groupes industriels actuellement en place à Bruxelles ou à Paris. Au vu de cela, il faudrait renforcer, dans les agences de financement, les canaux favorisant la recherche disruptive qui fera l'industrie de demain dans ces domaines. Les programmes collaboratifs tels que nous les connaissons ne sont pas non plus idéalement adaptés à l'émergence de PME très innovantes, notamment parce que la multiplication de ces programmes semble être liée à une forte régression du « gré à gré », qui est essentiel au développement des PME. D'autres Etats ont mis en place des mécanismes du type « *matching funds* » favorisant plus clairement la prise de risque par les industriels, ainsi que la pertinence et l'excellence scientifique.

**Standardisation et gouvernance** : Les contours de l'Internet du futur seront la résultante de plusieurs vecteurs de gouvernance : la standardisation, la normalisation, les forums et les blogs, les décisions des acteurs économiques et les décisions des gouvernements. Il serait essentiel de recenser, de renforcer et d'organiser la présence française dans les organismes de standardisation, tout particulièrement en agissant via l'IETF. La gouvernance d'Internet passe, elle aussi, avant tout par une meilleure domination technique et économique du domaine.

## CONCLUSION

Internet va connaître de grandes transformations. D'une part, parce que les choix technologiques initiaux sont parfois inadaptés aux besoins des applications et des utilisateurs actuels et que ces choix entravent le déploiement de certains nouveaux services et modes d'utilisation. D'autre part, parce qu'Internet va devoir s'adapter à des débits encore plus élevés, à une hétérogénéité croissante des applications, des services et des utilisations, ainsi qu'aux nouveaux réseaux d'accès qui vont faire leur apparition. Dans cette perspective, la communauté scientifique internationale (académique et industrielle) a lancé un effort de grande ampleur. Il convient de se préparer à ces transformations, qui vont faire émerger une nouvelle industrie et de nouveaux modèles économiques.