

Les origines de l'Internet *

Michel Volle

3 août 2004

Le livre de Katie Hafner et Matthew Lyon [5] décrit les origines de l'Internet. Il explique pourquoi l'ARPA s'est intéressée aux réseaux d'ordinateurs ; comment sont nés les protocoles de commutation de paquets et l'Ethernet ; comment l'Arpanet, d'abord réservé aux contractants de l'ARPA, est devenu l'Internet. Il explique aussi pourquoi les grandes entreprises du secteur (AT&T, IBM etc.) ont d'abord été indifférentes ou même hostiles envers les réseaux d'ordinateurs.

Dans cet article je reclasse les informations fournies par ce livre et les recoupe avec d'autres que j'ai trouvées ailleurs.

1 L'ARPA

L'ARPA (« Advanced Projects Research Agency »), qui deviendra la DARPA (« Defense Advanced Projects Research Agency ») au début des années 70, a été créée au Pentagone en 1958 pour réagir à l'avance scientifique et technique prise par les Soviétiques : le Spoutnik avait été lancé le 4 octobre 1957. D'abord consacrée à la recherche spatiale, elle fut contrainte dès la création de la NASA à l'été 1958 à se réorienter vers la recherche fondamentale et, pour cela, à s'appuyer sur des partenariats avec les universités.

En 1962, l'ARPA embauche Joseph Licklider (1915-1990) pour créer en son sein l'IPTO (« Information Processing Techniques Office ») qui animera un programme de recherche en informatique. Licklider était un psychologue devenu expert en informatique. Il lança malgré l'opposition de la profession une recherche sur le temps partagé : « La plupart des constructeurs d'ordinateurs et des directeurs de centres informatiques disaient que le temps partagé entraînait une utilisation inefficace des ressources de la machine et qu'il ne fallait donc pas l'utiliser »¹. Ses idées sur la synergie entre l'être humain et l'ordinateur² conduiront à l'Internet : « Les communautés interactives en ligne se construiront non dans

* Source : <http://www.volle.com/travaux/internet.htm> ; ©Michel Volle 2005, *GNU Free Documentation License*.

1. « Most computer manufacturers and directors of computer centres argued that time-sharing was an inefficient use of machine resources and should not be pursued. » (Robert W. Taylor, préface de In Memoriam J. C. Licklider, Digital Systems Research Center, 7 août 1990).

2. « Men will set the goals, formulate the hypotheses, determine the criteria, and perform the evaluations. Computing machines will do the routinizable work that must be done to prepare the way for insights and decisions in technical and scientific thinking » ; « The hope is that, in not too many years, human brains and computing machines will be coupled together very tightly, and that the resulting partnership will think as no human brain has ever thought and process data in a way not approached by the information-handling machines we know today » ; « It seems worthwhile to avoid argument with other enthusiasts for artificial intelligence by conceding dominance in the distant future of cerebration to machines alone. There will nevertheless be a fairly long interim during which the main intellectual advances will be made by men and computers working together in intimate association » ; « Instructions directed to computers specify courses ; instructions directed to human beings specify goals. Men appear to think more naturally and easily in terms of goals, than in terms of courses » (J. C. R. Licklider, [8]).

une localisation commune, mais autour de centres d'intérêt communs³ ».

En 1964, Licklider fut remplacé par Ivan Sutherland (1938-), lui-même remplacé par Robert Taylor en 1966. Taylor (1932-) restera à la tête de l'IPTO jusqu'en 1969 et jouera un rôle essentiel dans le lancement du programme de recherche sur les réseaux d'ordinateurs⁴, programme dont il confiera l'animation à Larry Roberts.

Le bureau de Taylor à l'IPTO était connecté via trois terminaux différents à des ordinateurs situés à Boston, Berkeley et Santa Monica. Chaque terminal avait sa propre procédure de log-in et ses propres commandes : l'utilité d'une rationalisation sautait aux yeux. Par ailleurs, en l'absence d'un réseau, chaque centre de recherche qui contractait avec l'ARPA devait acheter et exploiter son propre ordinateur. Il semblait souhaitable de pouvoir partager les ressources d'une même machine entre plusieurs centres. Mais comment faire, alors que chaque ordinateur utilisait un système d'exploitation et des langages adaptés à ses caractéristiques physiques particulières, et ne pouvait communiquer - et encore en mode maître-esclave ! - qu'avec ses propres équipements périphériques ? Les applications communicantes, comme la messagerie inventée en 1964, restaient limitées aux personnes qui utilisaient un même ordinateur. Il fallait adapter les ordinateurs à la communication entre égaux, avec les interruptions asynchrones qu'elle comporte ; et, avant cela, il fallait savoir comment transférer des données à travers un réseau.

2 La commutation de paquets

Le réseau télécoms était adapté à la conversation téléphonique mais non à la communication entre ordinateurs. Il offrait aux interlocuteurs un circuit bidirectionnel à 4 kHz établi en début de communication et maintenu pendant la durée de celle-ci. Les ordinateurs, qui échangent non des conversations mais des bouffées de données, n'avaient pas besoin d'un circuit permanent ; par contre ils avaient besoin que la transmission fût protégée contre les perturbations provenant de l'environnement hertzien et contre les micro-coupures, peu sensibles en téléphonie mais destructrices quand il s'agit de transmettre un flux de données.

La commutation de paquets a été inventée séparément par Paul Baran, un américain, (1926-) et Donald Davies (1924-2000), un britannique. Le réseau transmet non plus des sons, mais des bits, ce qui permet d'utiliser des répéteurs informatiques qui corrigent les défauts de transmission. Le message est découpé en paquets de taille uniforme contenant l'information nécessaire à leur routage. Enfin, en raison du caractère discontinu du flux de données, un même ressource de transmission peut être utilisée pour plusieurs communications simultanées.

Baran avait étudié la vulnérabilité du réseau à une attaque nucléaire, question cruciale pour les militaires dans la période de guerre froide des années 60. Il avait découvert que l'on pouvait obtenir une robustesse élevée avec un réseau maillé comportant une redondance relativement faible (il faut relier chaque nœud au réseau par trois ou quatre liens au lieu d'un seul, et équiper chaque nœud d'une table de routage adaptative).

Les travaux de Baran sont à l'origine de la légende selon laquelle l'Internet aurait été conçu pour répondre à des besoins militaires : parmi tous les chercheurs qui ont contribué à la mise au point de l'Internet, il semble cependant être le seul à avoir eu cette préoccupation.

AT&T était hostile aux idées de Baran. Il faut se rappeler qu'à cette époque (début des années 60) les commutateurs du réseau téléphonique étaient électromécaniques, la

3. « On-line interactive communities [...] will be communities not of common location, but of common interest » (J. C. R. Licklider [9]).

4. Cette valse des responsables ne doit pas faire illusion : si les personnes passaient peu de temps à l'IPTO, elles restaient présentes et influentes dans le domaine de recherche.

commutation électronique ne devant intervenir que dans les années 70 ; le circuit établi entre deux interlocuteurs avait donc une continuité et une réalité physiques en quelque sorte palpables. Les ordinateurs relevaient d'un autre univers technique que celui des télécoms.

« Ils se comportaient comme s'ils savaient tout, et que ceux qui n'appartenaient pas au Bell System ne savaient rien », dira Baran⁵. « Quelqu'un d'extérieur ne pouvait pas comprendre la complexité de leur système. Et voilà qu'un idiot s'amène : il ne comprend visiblement pas comment le système fonctionne et il prétend que les choses sont simples ! » Cette phrase illustre les obstacles que rencontrera la mise en réseau des ordinateurs. Les grands du secteur, qu'il s'agisse d'AT&T ou d'IBM, s'opposeront à une innovation qu'ils ne croient pas réalisable ou dans laquelle ils voient une menace. La commutation de paquets rencontrera la même hostilité que le temps partagé.

3 Le premier réseau d'ordinateurs

Mais comment faire communiquer des ordinateurs (hosts) différents, alors que chacun a ses propres caractéristiques physiques, son propre système d'exploitation etc. ? Une expérience avait été réalisée en 1965 par le psychologue Tom Marrill qui, sous l'influence de Licklider, avait proposé à l'ARPA de faire communiquer *via* une liaison full-duplex à quatre fils deux ordinateurs de type différent situés l'un à Lincoln, l'autre à Santa Monica.

A cette occasion Marrill mit au point une procédure qui permet de grouper les caractères dans un message, de les envoyer sur la ligne, de vérifier si le message est arrivé, enfin de le retransmettre s'il n'y a pas eu d'accusé de réception. Pour désigner cette procédure, il retint le mot « protocole ». Mais comment faire communiquer non pas deux ordinateurs, mais un réseau de plusieurs ordinateurs ? S'il fallait définir un protocole pour chaque couple d'ordinateurs, on serait confronté à une complexité quadratique.

Wes Clark proposa de concevoir un petit ordinateur spécialisé, l'IMP (« Interface Message Processor »), qui seul serait mis en réseau et serait interfacé avec chaque ordinateur : le problème était ainsi ramené à la complexité linéaire.

Le réseau des IMP fut baptisé « sous-réseau » (subnetwork) pour le distinguer du réseau des ordinateurs eux-mêmes. Restaient à régler les problèmes propres au sous-réseau : éviter qu'un même paquet ne soit renvoyé sans fin d'un IMP à l'autre, éviter que des paquets ne soient perdus en raison du débordement d'une mémoire (buffer) etc.

Larry Roberts, ayant découvert les travaux de Davies et Baran à une réunion de l'ACM à la fin de 1967, introduisit la commutation de paquets dans l'appel d'offres qu'il lança pour l'IMP en juillet 1968.

Le sous-réseau devait transférer les bits de façon fiable d'un IMP à l'autre ; le temps de transit moyen à travers le sous-réseau ne devait pas dépasser la seconde et il devait pouvoir fonctionner de façon autonome, indépendamment des ordinateurs qu'il reliait. Roberts consulta 140 entreprises. IBM et Control Data répondirent qu'il était impossible de construire un tel réseau car il coûterait trop cher. Finalement BBN (Bolt Beranek and Newman), petite entreprise de Cambridge, sera retenue le 8 septembre 1968.

BBN reçut la commande au début de 1969. Sa solution s'appuyait sur le mini-ordinateur DDP-516 d'Honeywell (450 kg, la taille d'un réfrigérateur). Chaque site équipé d'un IMP devra produire lui-même, selon les spécifications fournies par BBN, l'interface entre l'IMP

5. « Their attitude was that they knew everything and nobody outside the Bell System knew anything. And somebody from the outside couldn't possibly understand or appreciate the complexity of the system. So here some idiot comes along and talks about something being very simple, who obviously does not understand how the system works » ([5] p. 62)

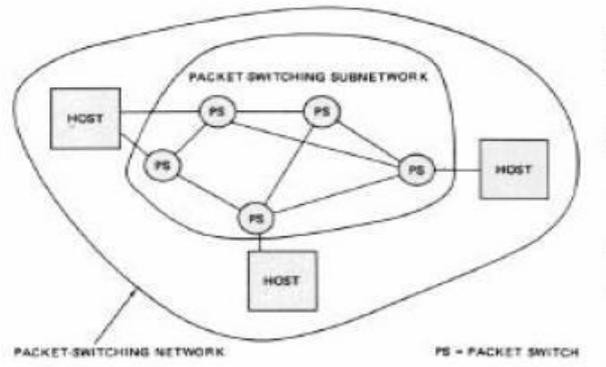


FIG. 1 – Réseau et sous-réseau; source : V. G. Cerf and R. E. Kahn, [4]

et son ou ses ordinateurs (on pouvait raccorder jusqu'à quatre ordinateurs à un même IMP). La mission des IMP étant seulement d'assurer le transport fiable des bits, les ordinateurs devront régler deux à deux leurs problèmes de log-in, transfert de fichiers et traitement de texte.

Pour configurer l'IMP, BBN préféra le logiciel : une solution matérielle, concrétisée par le câblage, aurait rendu plus rapide l'exécution des tâches simples mais elle aurait été plus difficile à modifier par la suite.

Le premier IMP est installé à l'UCLA le 30 août 1969 pour raccorder un Sigma 7 ; le deuxième IMP est installé au SRI le 1er octobre pour raccorder un SDS 940. L'IMP n° 3 est installé à l'UCSB le 1er novembre, le n° 4 à l'université d'Utah en décembre. Un « Network Measurement Center » est mis en place à l'UCLA, sous la direction de Leonard Kleinrock, spécialiste de la modélisation et de la simulation des réseaux qui avait ainsi l'occasion de tester ses théories en vraie grandeur.

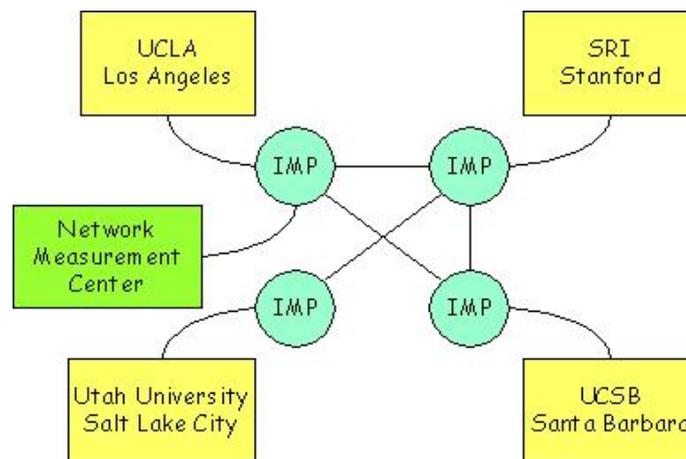


FIG. 2 – Le premier réseau d'ordinateurs à la fin de 1969

On remarque que l'université de l'Utah n'est accessible qu'en passant par le SRI, dont l'IMP joue donc le rôle d'un routeur. Les budgets de l'ARPA en 1970 furent comprimés en raison de la guerre du Vietnam, mais les crédits accordés à la recherche en informatique ne furent pas rationnés. En mars 1970, le premier circuit trans-continentale est installé vers BBN qui sera le 5ème nœud du réseau. Cela permettra à BBN d'assurer depuis Cambridge la supervision du réseau (télémaintenance, télédistribution des mises à jour par réplique)

et dissémination). Des indicateurs de qualité étant produits automatiquement par les IMP, BBN pourra détecter les pannes du réseau d'AT&T avant les agents d'AT&T eux-mêmes, ce que ceux-ci auront un peu de mal à accepter. A l'été 70, le réseau s'étend au MIT, à RAND, SDC et Harvard. Par la suite le réseau s'enrichit d'un nœud par mois. BBN utilisera à partir de 1971 pour les IMP un Honeywell 316, machine plus légère que le 516 et à partir de laquelle est mis au point un TIP (« Terminal IMP ») qui permet de connecter des terminaux au réseau (un TIP peut servir jusqu'à 63 terminaux). En 1971, le réseau relie 19 ordinateurs et 3 TIP. Pour le désigner, l'expression Arpanet, ou Net tout court, apparaît en août 1972.

4 Problèmes de mise en place

Comme toute nouveauté technique, la mise en place des réseaux d'ordinateurs a rencontré des difficultés imprévues. Le premier IMP livré par Honeywell ne fonctionnait pas et les ingénieurs de BBN ont dû le recâbler à la main. Par la suite, Honeywell s'est de façon persistante refusé à obéir aux spécifications. Le matériel souffrait de pannes aléatoires, d'interruptions asynchrones difficiles à corriger. Pour l'ARPA, 3 % de temps de panne était inacceptable, alors que 97 % du temps en fonctionnement normal semblait à Honeywell une performance élevée.

Hafner et Lyon notent par ailleurs l'incapacité des « gros » à admettre l'apport de l'innovation, à sortir de l'ornière de leurs habitudes. IBM, nous l'avons vu, a d'abord refusé l'idée de faire communiquer des ordinateurs, et AT&T a refusé d'utiliser le réseau télécoms pour transporter des données. En 1971, AT&T refusera de prendre la responsabilité de l'exploitation du réseau. En 1979, la Poste imaginera, pour répondre à la concurrence de la messagerie électronique, un service conforme à la tradition du télégraphe : les messages arrivaient aux bureaux de poste et étaient livrés à domicile par des coursiers. Cette offre n'eut bien sûr aucun succès. En 1983, IBM, DEC et HP préféreront le modèle en couches de l'OSI au protocole TCP/IP. BBN elle-même, entreprise pourtant récente, fut incapable de capitaliser l'avancée acquise avec l'IMP : le directeur du marketing refusa de la lancer sur le marché des routeurs, ce marché qui fera la fortune de Cisco.

L'ineptie des « gros » est relevée avec délectation par Hafner et Lyon, comme l'avaient fait Carroll [3] à propos d'IBM ou Hiltzik [7] à propos de Xerox. Mais n'est-il pas naturel qu'une grosse entreprise n'ait pas la même capacité de manœuvre qu'une structure légère, et que la procédure de préparation des décisions y soit plus lourde ?

Lorsqu'il s'agit d'imaginer une architecture nouvelle, le cerveau d'un seul individu est plus efficace (et, par nature, plus cohérent) que le comité de direction d'une grande entreprise. Mais seule la grande entreprise sera capable de produire effectivement cette architecture si celle-ci est coûteuse.

Le fait est que si les « gros » refusent d'abord l'innovation, ils finissent par « s'y mettre » (avec retard, certes). Alors seulement les conséquences de l'innovation peuvent se déployer : ainsi le micro-ordinateur, né en 1973, n'a vraiment percé qu'après le lancement du PC par IBM en 1981. Au lieu de s'étonner de la lourdeur des gros, mieux vaudrait examiner comment ils sont amenés à « s'y mettre », comment ils passent du scepticisme à l'adhésion, comment les équipes qui soutenaient la doctrine hérétique finissent par se faire entendre, comment les stratèges parviennent à surmonter leurs préjugés et leurs habitudes. Mais cela demanderait l'analyse fine de processus qui laissent peu de traces dans les archives comme dans la mémoire des acteurs.

5 Protocoles et paradigmes

Le fonctionnement des réseaux nous semble tout naturel : nous ne percevons pas l'effort intellectuel qui a été nécessaire pour mettre au point les protocoles de communication. A chaque étape, cet effort a été le fait de quelques pionniers qui ont dû lutter pour faire passer une innovation surprenante ; une fois adoptée, celle-ci s'est imposée comme une norme. Souvent elle a résisté aux innovations suivantes, faites par d'autres pionniers. A chaque protocole correspond une certaine vision de ce que doit être le réseau, un certain « paradigme ».

5.1 Premier paradigme : la téléphonie

Le réseau téléphonique était dans les années 1960 entièrement électromécanique, et non pas électronique. Il n'utilisait pas l'ordinateur. Sa conception se fondait sur une évidence en quelque sorte palpable : le circuit qui transporte les ondes électromagnétiques porteuses du signal vocal établit une continuité physique entre les deux téléphones *via* les lignes d'abonné de la boucle locale, les contacts établis dans les commutateurs de rattachement et de transit, et un intervalle de largeur de bande sur le multiplex du réseau de transport.

Le rôle des commutateurs est alors d'établir la communication lors de l'appel, de la maintenir pendant la conversation, puis de libérer les circuits lorsque celle-ci est terminée. Les règles de qualité, d'ingénierie et de dimensionnement de ce réseau étaient définies en fonction du signal vocal et de la matrice de trafic de la téléphonie. Elles délimitaient un univers technique spécifique, d'ailleurs d'une grande complexité, et dont le fonctionnement supposait la formation et la coopération de plusieurs spécialités.

5.2 Deuxième paradigme : la commutation de paquets

La commutation de paquets relève d'un univers technique complètement différent. Le transport des données sur les lignes téléphoniques demande une modulation spécifique qui sera faite par les modems⁶, et non plus par les téléphones. Il faut que la qualité des lignes soit suffisante pour transporter des données. Les commutateurs doivent « pédaler » pour lire l'adresse sur chaque paquet, consulter la table de routage, orienter le paquet vers le circuit de sortie convenable. Le circuit transporte d'un commutateur à l'autre non plus une seule conversation, mais des paquets ayant des destinations différentes. La statistique du trafic n'est plus la même et il faut des files d'attente (buffers) pour stocker les paquets en attente de retransmission.

Les commutateurs électromécaniques étaient incapables de réaliser ces fonctions : il fallait les remplacer par des ordinateurs spécialisés. Les règles de qualité, d'ingénierie et de dimensionnement devaient donc être redéfinies, et de nouvelles spécialités professionnelles devenaient nécessaires à l'exploitation du réseau.

5.2.1 Circuit virtuel et datagramme

En outre, deux techniques entrèrent en concurrence dans l'univers de la commutation de paquets : le « circuit virtuel » et le « datagramme ». Quand la communication emprunte un circuit virtuel, le premier paquet laisse une trace dans la mémoire des commutateurs

6. Les premiers modems avaient été mis au point à la fin des années 50 pour le système de défense aérienne des Etats-Unis. Le premier modem commercialisé apparaît en 1962 : c'est le Bell 103 d'AT&T, qui permet de transmettre 300 bit/s.

qu'il traverse et réserve une capacité de transmission, de telle sorte que les paquets suivants puissent emprunter le même itinéraire : les paquets arriveront ainsi à l'ordinateur destinataire dans l'ordre où ils ont été émis.

Quand on envoie des datagrammes, chaque paquet parcourt un itinéraire qui lui est propre, indépendamment des autres paquets ; les délais de transmission étant différents, il se peut que les paquets n'arrivent pas dans l'ordre d'émission : le protocole devra donc permettre de les reclasser à l'arrivée.

Les opérateurs télécoms favorisèrent le circuit virtuel car la continuité qu'il établit à travers le réseau répond à leur culture professionnelle. Le datagramme, qui suppose entre le réseau et les ordinateurs un partage du travail plus favorable à ces derniers, était par contre bien vu par les informaticiens⁷.

Le protocole X25 a utilisé le circuit virtuel alors que TCP/IP utilisait le datagramme. Pendant longtemps les opérateurs télécoms se méfieront de TCP/IP, qu'ils jugeaient peu fiable : cela explique en partie leurs réticences devant l'Internet.

5.3 Troisième paradigme : le réseau local

Si les univers de la commutation de paquets et de la téléphonie sont distincts, ils ont en commun la commutation. Celle-ci disparaît dans l'univers des réseaux locaux (ou LAN, « Local Area Network »), encore plus déroutant pour les gens des télécoms. Sur un réseau Ethernet, en effet, il n'y a pas de commutateur⁸. Chaque ordinateur est connecté à un « bus » qui lui transmet toutes les trames émises par les autres ordinateurs. Il lit l'étiquette et trie, pour en lire le contenu, celles qui lui sont destinées.

Alors que le réseau commuté met en relation les ordinateurs deux à deux en leur réservant un canal de transmission, le réseau local est donc comme une pièce dans laquelle s'entrecroiseraient plusieurs conversations. Le protocole précise les règles de prise de parole et d'interruption en cas de collision. Il en a existé plusieurs versions (Ethernet, Token Ring etc.) : à chacune correspondent une statistique de trafic et une performance spécifiques.

Pour raccorder deux réseaux locaux, on installe entre eux un pont (bridge) qui trie les trames destinées à l'autre réseau pour les lui faire passer. Si l'on raccorde plusieurs réseaux, il faut un routeur capable d'orienter la trame vers le réseau destinataire. On retrouve donc dans les routeurs une fonction de commutation, mais qui s'opère entre réseaux et non communication par communication.

Ainsi peuvent se définir des architectures à plusieurs niveaux, la communication entre plusieurs réseaux locaux étant réalisée par un « backbone » à haut débit.

5.4 Validation statistique d'un protocole

A chacun des types de réseau correspond une statistique de trafic particulière et une définition spécifique de l'encombrement. Sur le réseau téléphonique, l'encombrement se traduit par l'impossibilité d'établir la communication : l'utilisateur reçoit un signal lui indiquant que les circuits sont occupés et qu'il doit rappeler plus tard. Par contre, sauf accident, une communication en cours n'est jamais interrompue.

7. Les protocoles pouvaient comporter d'autres fonctions : découpage des paquets en trames pour la transmission, et recombinaison des paquets dans chaque commutateur avant réexpédition ; vérification de l'intégrité du paquet à chaque étape, avec réexpédition éventuelle ; etc.

8. Du moins en principe. Les réseaux Ethernet à haut débit peuvent comporter des « switches » qui accroissent leur efficacité

Avec la commutation de paquets, l'encombrement se traduit par un débordement des mémoires (buffers) qui, dans les routeurs, stockent les paquets en attente de routage. Il faudra que le routeur, ou l'ordinateur destinataire, envoie un message à l'émetteur pour lui demander d'expédier de nouveau le paquet perdu.

Sur le réseau local, l'encombrement se traduit par de nombreuses collisions entre trames ; si la fréquence des collisions dépasse un certain seuil, le réseau ne peut plus rien transmettre : il est saturé.

Pour chaque type de réseau le dimensionnement doit, lors de la phase de construction, rechercher le compromis raisonnable entre coût et risque d'encombrement. Lors de la phase d'exploitation, chaque type de protocole comporte une réponse à l'encombrement : traitement des « tickets d'échec » et filtrage de certains appels dans le cas du réseau téléphonique ; délai de réémission dans le cas de la commutation de paquets et du réseau local. Lors de la conception d'un nouveau protocole, des études statistiques et des simulations sont nécessaires pour vérifier s'il est utilisable et définir ses paramètres. Pour procéder aux ultimes réglages il faut l'expérimenter sur un réseau pilote, puis en vraie grandeur.

Tant que ces études et réglages n'ont pas été faits, tant que le coût des composants n'a pas été évalué, rien ne garantit que le protocole puisse fonctionner dans des conditions économiques acceptables. C'est pourquoi tout protocole nouveau rencontre, de la part des exploitants, un scepticisme qui ne peut céder que devant la démonstration et surtout devant l'expérimentation. Aucun protocole ne pourra donc naître s'il n'est pas soutenu par une équipe de pionniers qui, par l'intuition autant que par le raisonnement, se sont construit une anticipation favorable de ses performances.

5.5 L'enchaînement des protocoles

La même communication devra souvent enchaîner plusieurs protocoles différents. C'est le cas par exemple d'un ordinateur raccordé à un réseau local et qui consulte un serveur Web : il faut enchaîner Ethernet et TCP/IP. Cela nécessite une passerelle (gateway) capable non seulement de lire l'étiquette de la trame pour la faire sortir du réseau local, mais aussi de reconstruire le message pour l'émettre vers l'Internet selon le protocole TCP/IP et inversement dans l'autre sens. Sur le WAN de l'entreprise (Wide Area Network), qui relie les établissements aux serveurs informatiques centraux, une cascade de protocoles s'enchaîne à travers des passerelles qui « pédalent » activement lors de chaque communication : Ethernet sur le réseaux local ; IP sur le réseau de raccordement ; X25 ou Frame Relay⁹ sur le backbone intermédiaire ; ATM¹⁰ sur la boucle du backbone central.

6 TCP/IP et Ethernet

Le mot « protocole » avait été créé par Tom Marrill en 1965. La conception des réseaux d'ordinateurs demandera la mise au point de plusieurs protocoles nouveaux. BBN, l'entreprise qui avait été chargée de la construction des IMP, mit au point un protocole de supervision (« remote control ») comportant des outils de diagnostic et de débogage à distance, ainsi que le protocole de routage dynamique qui permettra aux paquets de contourner les nœuds et les liens saturés.

9. Frame Relay (voir www.guill.net/index.php?protect=relax&unskip=penalty&M\hskip+0.09em+plus0.07667em?cat=5&arc=3) est une version allégée de X25 : en simplifiant le protocole et en supprimant des contrôles redondants, elle fait gagner un ordre de grandeur en vitesse de commutation.

10. Le protocole ATM (« Asynchronous Transfer Mode », 1989), conçu par Jean-Pierre Coudreuse pour les réseaux numériques multiservices, est utilisé aujourd'hui dans les backbones à haut débit

Dès l'été de 1968, un groupe d'étudiants des quatre premiers sites prévus commença à se réunir pour préparer la mise en réseau des ordinateurs. Steve Crocker, de l'UCLA, fut volontaire pour rédiger les comptes rendus. Il publia le 7 avril 1969 une « Request for Comments » (RFC). Cette formule modeste sera conservée par la suite : lorsque les utilisateurs du réseau s'organiseront en un « Network Working Group » (NWG), les RFC resteront le support privilégié de la documentation et de la mise en forme des protocoles¹¹

Le NWG décida de définir des protocoles qui traiteraient chacun un problème limité et qui seraient articulés entre eux : c'était le début du « modèle en couches », qui sera une innovation majeure en modélisation. Le NWG définit ainsi à la fin de 1969 le protocole Telnet, qui concernait les mécanismes de base de la communication entre deux ordinateurs (connexion et choix des caractères). A l'été 1971, après beaucoup de discussions et de RFC, sortit le « Network Control Protocol » (NCP), protocole de communication sur un réseau d'ordinateurs.

Mais le NCP, qui ne concernait que l'Arpanet, ne permettait pas de faire communiquer entre eux des réseaux différents. Or des projets de réseaux émergeaient en Grande-Bretagne et en France, animés respectivement par Donald Davies et Louis Pouzin. Comment construire un « réseau de réseaux » ? Par ailleurs les réseaux qui utilisaient le satellite, la radio ou, comme l'Arpanet, des lignes téléphoniques, devaient obéir chacun à des contraintes différentes. Il en résultait des choix différents en ce qui concerne la taille maximale des paquets et la vitesse de transmission, ainsi que des niveaux de fiabilité différents.

6.1 TCP/IP

Il fallait donc définir le protocole qui permettrait de faire communiquer des ordinateurs connectés à des réseaux différents. Vint Cerf et Bob Kahn publièrent en mai 1974 un article où ils proposaient de découper les messages en « datagrammes » transmis indépendamment, chacun selon son propre itinéraire, la responsabilité du reclassement des datagrammes dans le bon ordre incombant à l'ordinateur destinataire (Cerf et Kahn, [4]. Dans le même article ils avaient introduit la notion de passerelle (« gateway ») : une passerelle ne lirait que l'enveloppe du datagramme, seul l'ordinateur destinataire lirait son contenu ; de plus, la passerelle apparaîtrait pour chaque réseau comme un ordinateur connecté à ce réseau, assurant si nécessaire la transformation du format du datagramme. Cerf et Kahn appelèrent ce protocole « Transmission-Control Protocol », ou TCP. Voici un graphique qui transcrit un de leurs schémas :

Au début de 1978, il parut nécessaire de séparer de TCP la partie consacrée au routage des datagrammes, que l'on nommerait IP (« Internet Protocol »). Désormais TCP ne traiterait que ce que font les ordinateurs émetteur et récepteur (découpage du message en datagrammes, mise en ordre des datagrammes à la réception et reconstitution du message, détection des erreurs, réexpédition des datagrammes perdus).

La séparation des deux protocoles permet de construire des passerelles rapides et relativement peu coûteuses, consacrées exclusivement au routage des datagrammes selon le protocole IP. En 1978, TCP devint officiellement TCP/IP. Arpanet abandonnera NCP pour adopter TCP/IP le 1er janvier 1983.

Mais en 1988 l'ISO (« International Standard Organization ») publia le modèle OSI (« Open Systems Interconnection »), longuement attendu par les constructeurs informatiques et les opérateurs télécoms et qui avait leur préférence. Une bataille s'engagea. Les

11. La première RFC est « Host Software », par Steve Crocker, UCLA, 7 avril 1969. La collection complète des RFC se trouve à l'adresse www.faqs.org/rfcs/.

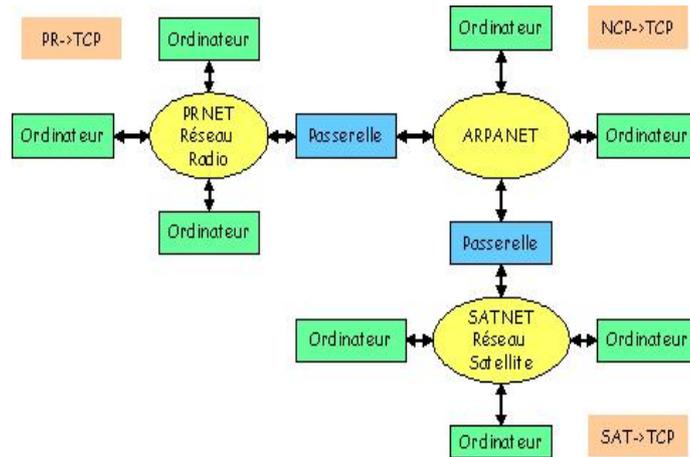


FIG. 3 – *Le réseau selon le protocole TCP*

partisans du modèle OSI considéraient TCP/IP comme un bricolage d’universitaires peu conscients des contraintes de l’économie et de l’industrie. Les partisans de TCP/IP considéraient le modèle OSI comme un produit bureaucratique élaboré à coup de compromis par un comité.

Mais TCP/IP fonctionnait et, s’étant forgé dans la pratique, avait incorporé une riche expérience alors que le modèle OSI n’existait que sur le papier. Un facteur décisif pour le succès de TCP/IP fut son adoption par Sun, entreprise créée en 1982 pour commercialiser des stations de travail Unix. Les stations Sun étaient équipées d’une version d’Unix qui incluait gratuitement TCP/IP, ce qui réduisait le coût de leur mise en réseau. Ethernet fut un autre facteur de succès.

6.2 Ethernet

Bob Metcalfe avait, lorsqu’il était étudiant à Harvard, préparé une thèse sur la commutation de paquets en s’appuyant sur l’exemple de l’Arpanet. Harvard avait jugé ce travail trop peu théorique. Metcalfe fut néanmoins embauché par le PARC de Xerox. En 1972, il découvrit le papier écrit par Abramson ([1]) pour décrire le réseau Alohanet mis en place à Hawaï grâce à un financement de l’ARPA.

Le protocole Aloha était fondé sur une idée originale : au lieu d’être routés d’un ordinateur à l’autre, les paquets étaient émis par radio ; chaque ordinateur recevant tous les paquets, il lui incombait de trier ceux qui lui étaient destinés. Cela permettait de faire communiquer des ordinateurs situés sur des îles différentes de l’archipel d’Hawaï.

Metcalfe se fit envoyer à Hawaï par Xerox pour étudier le fonctionnement d’Aloha. Il en améliora la modélisation mathématique, fondée sur le calcul des probabilités. Cela lui permit d’introduire dans sa thèse assez de théorie pour qu’elle soit acceptée par Harvard.

Le PARC avait mis au point l’Alto, machine qui préfigurait l’ergonomie des futurs ordinateurs personnels, et souhaitait mettre des Altos en réseau. Ce travail fut confié à Metcalfe.

Équiper chaque Alto d’un IMP aurait été d’un coût prohibitif. Metcalfe mit au point une version améliorée d’Aloha : en faisant passer le signal par un câble et non par l’espace hertzien, il accroîtrait le débit du réseau ; en introduisant la détection des collisions, il améliorerait le rendement du protocole. Le premier réseau Ethernet fut ainsi mis en place en 1973 au PARC.

Ses spécifications ne seront rendues publiques que le 30 septembre 1980 et la norme IEEE 802.3 ne sortira qu'en 1983. Les réseaux locaux (ou LAN pour Local Area Network) se répandront dans les entreprises en 1989 avec le lancement d'Ethernet 10BaseT, qui permet de faire transporter le signal par une paire torsadée semblable à celle du réseau téléphonique d'un établissement.

6.3 Complémentarité entre Ethernet et TCP/IP

Dès lors les réseaux d'ordinateurs vont s'appuyer à la fois sur TCP/IP et sur Ethernet. Ethernet sert à la communication entre les ordinateurs connectés à un même réseau local ; TCP/IP assure la communication à distance.

Ethernet est analogue à une conversation dans une salle où chacun prend la parole quand il a quelque chose à dire, s'interrompant en cas de collision avec un autre intervenant ; TCP/IP est (en plus rapide) semblable à l'envoi d'un texte, via la poste, par morceaux successifs qu'il faut classer à l'arrivée. Physiquement, le support de l'Ethernet peut être divers : paire de fils torsadée, câble coaxial, fibre optique, espace hertzien des réseaux WiFi ou câblage électrique de l'immeuble. L'Internet, lui, est composé d'un ensemble de routeurs et de liaisons louées aux opérateurs télécoms. Un réseau Ethernet est relié à l'Internet par une passerelle et une liaison louée. Ainsi, sous réserve des droits d'accès, n'importe quel ordinateur d'un établissement peut communiquer avec un autre ordinateur d'un autre établissement, la communication empruntant des passerelles entre les réseaux Ethernet et TCP/IP.

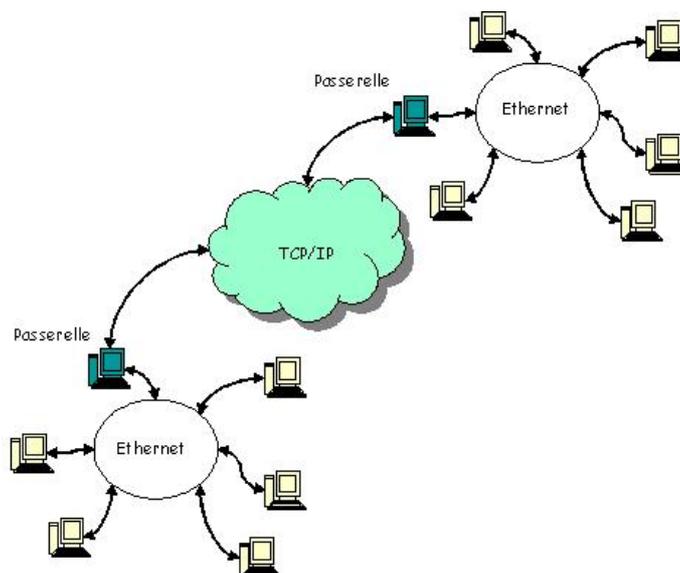


FIG. 4 – *Ethernet et TCP/IP*

L'utilisateur individuel passe, lui, par le modem et la ligne téléphonique pour se relier à un fournisseur d'accès (IAP, Internet Access Provider), lui-même relié au réseau TCP/IP par une liaison louée.

Pour des raisons de sécurité certaines entreprises cloisonnent physiquement leur réseau : elles utilisent des réseaux privés virtuels fortement protégés (RPV, ou VPN pour *Virtual Private Network*) selon des architectures conçues par les opérateurs télécoms. Sur ces réseaux peuvent entrer en jeu d'autres protocoles que TCP/IP (X25, Frame Relay, ATM etc.) Ces entreprises définissent aussi un *Intranet* fournissant à l'intérieur de l'entreprise

des services analogues à ceux que l'on trouve sur l'Internet (messagerie, documentation électronique, moteur de recherche etc.) Alors le schéma se diversifie et s'enrichit, mais l'articulation entre le protocole du réseau local et celui (ou ceux) du réseau de transport reste la règle.

7 Les premières applications

Les applications qu'il était prévu de mettre en oeuvre sur l'Arpanet étaient le login à distance et le transfert de fichier, mais le cours des événements apportera des surprises.

Le tout premier essai, après l'installation du deuxième IMP en octobre 1969, consista à simuler (mais à distance) la connexion à l'ordinateur d'un terminal « bête », c'est-à-dire dépourvu de mémoire et de processeur. Le login à distance fut formalisé en décembre 1969 par le protocole Telnet qui permettait d'établir la connexion et déterminait le jeu de caractères à utiliser. Mais pour échanger des fichiers entre ordinateurs, qu'il s'agisse de programmes ou de données, il fallait disposer d'un protocole de transfert de fichiers (FTP pour File Transfer Protocol) : seul un tel protocole permettrait à deux machines de coopérer d'égal à égal au lieu que l'une soit comme un terminal de l'autre. La mise au point de ce protocole fut difficile en raison des différences entre machines et FTP ne sera disponible qu'en juillet 1972.

À l'automne de 1971, et en l'attente de FTP, l'Arpanet ressemblait à une autoroute sans automobiles : le réseau, utilisé à 2 % de sa capacité, n'était au fond qu'un banc d'essai pour des expérimentateurs qui, afin de tester sa robustesse, le poussaient dans ses retranchements en générant un trafic artificiel.

En mars 1972, l'ARPA devient la DARPA, *Defense Advanced Research Projects Agency*, le changement de dénomination ayant pour but de souligner son appartenance à l'armée (la DARPA redeviendra l'ARPA en 1993, puis de nouveau la DARPA en 1996).

En octobre 1972 enfin, lors de la première ICCC (*International Conference on Computer Communication*), la DARPA put mettre en scène une démonstration via un TIP connecté par deux liens à 50 kbit/s. Grâce à Telnet et TCP, plus de quarante terminaux installés à l'hôtel Hilton de Washington purent ce jour-là se connecter à 29 ordinateurs disséminés sur le territoire américain et utiliser diverses applications. Les professionnels découvrirent alors que la commutation de paquets fonctionnait et que les ordinateurs pouvaient ainsi communiquer pour échanger des données, programmes et résultats. De grandes bases de données pouvaient être mises à disposition à distance.

La perspective d'un marché nouveau éveilla l'appétit. Même si seuls les sites qui avaient un contrat avec la DARPA pouvaient communiquer sur l'Arpanet, la diversité des personnes qui travaillaient dans les universités élargissait le cercle des utilisateurs bien au delà de la communauté des spécialistes de l'informatique. Une revue mensuelle, *Arpanet News*, leur procura à partir de 1973 la liste de ce que chaque site avait à offrir.

L'Arpanet fournissait le service pour lequel il avait été conçu, même si son manque d'ergonomie le réservait aux personnes qui s'y connaissaient assez en informatique. Cependant la majorité du trafic fut bientôt absorbée par un service que personne n'avait prévu : la messagerie.

7.1 La messagerie

Dès les années 60, les opérateurs d'un ordinateur en temps partagé avaient utilisé sur leur mainframe un service de messagerie comme Mailbox. Mais la messagerie change de

nature selon qu'elle est utilisée autour du même ordinateur, et dans le même immeuble, par des personnes qui n'auraient que quelques mètres à parcourir pour se parler, ou qu'elle est utilisée par des personnes séparées par des centaines ou milliers de kilomètres. Alors que la messagerie sur mainframe avait été un jouet amusant on découvrit que l'Arpanet, en effaçant la distance géographique, en faisait un outil des plus utiles.

Il fallait d'abord disposer d'un logiciel de messagerie. Le premier fut mis au point par Ray Tomlinson, qui eut en 1972 l'idée d'articuler le programme de messagerie d'un ordinateur en temps partagé avec un protocole de transfert de fichiers de telle sorte que l'on puisse échanger des messages entre divers ordinateurs. Cette possibilité, jugée intéressante par les rédacteurs du protocole FTP, y fut insérée dès août 1972.

Mais utiliser l'Arpanet pour transmettre des messages personnels semblait quelque peu illicite : le réseau n'avait pas été fait pour cela. Par ailleurs il n'était pas facile d'envoyer un message sur l'Arpanet en 1972. Il faudra du temps pour surmonter les difficultés techniques et la messagerie ne sera d'un usage commode que vers 1980.

Son caractère licite sera peu à peu reconnu, mais les questions de savoir-vivre qu'elle pose susciteront des discussions passionnées : il existe en effet plusieurs conceptions du savoir-vivre, toujours implicites.

Tomlinson est resté célèbre pour une des décisions qu'il prit en écrivant son programme. Il fallait, pour séparer dans l'adresse d'un message le nom de l'utilisateur de celui de la machine sur laquelle il travaillait, un caractère qui ne puisse jamais apparaître dans un nom propre. Tomlinson remarqua sur son clavier le symbole `,` caractère typographique rare, et il décida de le retenir. L'arobase est devenu le symbole de la messagerie électronique (non sans controverse : cette convention gênera les utilisateurs de Multics, système d'exploitation où le symbole `,` signifie « supprimer la ligne »).

Stephen Lukasik, directeur de la DARPA de 1971 à 1975, fut l'un des plus actifs parmi les promoteurs de la messagerie électronique. Bien vite ses collaborateurs comprirent que la messagerie était le vecteur le plus efficace pour communiquer avec lui et obtenir sa décision sur leurs projets. On rencontre ainsi un phénomène qui se répétera souvent : pour que l'utilisation de la messagerie se répande dans une entreprise, il faut que son patron lui-même l'utilise activement.

Dès 1973, la messagerie représentait les trois quarts du trafic de l'Arpanet. Cependant s'il était facile d'envoyer un message il n'était pas commode de l'écrire, de le lire, moins encore de lui répondre. Les outils de traitement de texte étaient rudimentaires. A la réception, les messages s'affichaient à la queue-leu-leu sur l'écran sans que rien ne les sépare : il fallait les parcourir tous et comme il n'existait pas encore d'instruction « Answer », il fallait pour répondre à un message composer un nouveau message.

Plusieurs programmeurs entreprirent de combler ces lacunes. Les programmes de gestion de messages se multiplièrent. Il en résulta pour les opérateurs une telle complexité que bientôt le besoin d'une normalisation - qui fixerait le plan d'adressage, le codage des dates et les autres conventions nécessaires - devint évident.

Mais quand on veut normaliser la messagerie on touche à des valeurs enfouies dans les consciences et cela déclenche des conflits. La définition de l'en-tête (*header*) occasionna une bataille de plus de dix ans entre ceux qui préféraient un en-tête sobre et ceux qui voulaient le truffier d'informations techniques¹². La plupart de ces conflits furent arbitrés au sein d'un groupe de travail ad hoc, le MsgGroup, actif de 1975 à 1985. Les listes de

12. Certains voulaient introduire dans l'en-tête non seulement le nom de l'expéditeur et la date d'envoi, mais aussi le nombre de caractères, des mots clés, le niveau de sécurité, l'identité de la machine etc. Une partie de ces informations se trouve, aujourd'hui, dans l'en-tête caché de nos messages (pour les lire avec Outlook, il faut choisir « Options » dans le menu « Affichage » du message).

diffusion ont été inventées pour faciliter le fonctionnement du MsgGroup.

John Vittal introduisit en 1975 dans son programme MSG l'instruction « réponse » (*Answer*) ainsi que des outils permettant de gérer le flux des messages reçus. MSG fera beaucoup pour la commodité et la popularité de la messagerie.

On ne savait pas encore que la messagerie était un amplificateur d'agressivité¹³. Les engueulades (*flaming*) devinrent fréquentes au sein du MsgGroup, par exemple entre ceux qui travaillaient à la normalisation des en-têtes, ou encore entre ceux qui étaient pour ou contre les outils qui permettent à chaque instant de savoir qui est en ligne. Par ailleurs, il arrivait que des lecteurs s'offusquent de messages conçus comme des plaisanteries. Kevin MacKenzie, soucieux de retrouver l'expressivité qui pondère le langage oral, proposa en avril 1979 de compléter la ponctuation par le symbole : -)

En 1981 le protocole de transfert de messages (MTP) inclus dans FTP ne suffisait plus. John Postel mit au point SMTP (Simple Message Transfer Protocol) qui traite l'envoi des messages et leur transfert du serveur de l'expéditeur au serveur du destinataire. La première version de POP (Post Office Protocol), qui permet au destinataire de retirer ses messages sur le serveur après s'être identifié, fut publiée en 1984.

Dans le courant des années 80, le MsgGroup devint de moins en moins productif et finalement il disparut : il avait fait son travail. La messagerie existait telle que nous la connaissons aujourd'hui, avec toutes ses possibilités et aussi avec les problèmes de savoir-vivre qu'elle pose et qui ne sont d'ailleurs pas encore maîtrisés (voir par exemple Amy Harmon [6]).

Cette innovation inquiéta l'US Postal Service. Certes le volume des messages restait très inférieur à celui du courrier papier mais son taux de croissance était impressionnant et, dès 1976, la messagerie commençait à être utilisée en dehors du cercle des chercheurs. Une étude d'Arthur D. Little disait qu'elle absorberait en quelques années 30 % du courrier urgent.

En 1979, le Postal Service tenta de la concurrencer en offrant un service hybride inspiré du télégraphe : les messages transiteraient d'un bureau de poste à l'autre pendant la nuit, seraient imprimés, puis livrés à domicile par porteur le lendemain matin. Ce projet coûteux et bizarre, mais significatif de la viscosité qui inhibe l'imagination des grosses institutions, fut bientôt abandonné.

7.2 Les jeux

Certains des ingénieurs qui coopéraient à la conception de l'Arpanet s'étaient, dans leur temps libre, passionnés pour les jeux de société « Donjon & Dragon », mondes imaginaires où chacun joue un rôle de son invention.

L'un d'entre eux, Will Crowther, travaillait à BBN. C'était par ailleurs un amateur de spéléologie. Pour amuser ses enfants, il modélisa en 1976 un réseau de souterrains et y situa une version simplifiée de Donjon & Dragon qu'il baptisa « Adventure ». Crowther abandonna bientôt ce brouillon écrit en quelques week-ends mais une copie fut retrouvée par Don Woods sur un ordinateur de Stanford. Woods, après avoir retrouvé Crowther au PARC par une recherche sur la messagerie, obtint le code source et l'autorisation de le modifier. Il perfectionna le jeu et le mit à disposition sur l'ordinateur du laboratoire d'intelligence artificielle de Stanford, selon la plus pure tradition du logiciel libre. Les copies d'Adventure se multiplièrent sur l'Arpanet, de nombreux joueurs s'y consacrèrent avec passion. Découvrir que l'on pouvait non seulement travailler, mais jouer avec un

13. « The speed of e-mail promoted flaming » (Hafner et Lyon [5] p. 216).

ordinateur suscita de nombreuses vocations de programmeur. L'Arpanet contribua ainsi à la naissance de l'industrie du jeu sur ordinateur, et même du jeu en réseau.

8 Vers l'Internet

8.1 « The Internetting Project »

Pour construire l'Arpanet, la solution évidente avait consisté à louer des lignes téléphoniques à AT&T. Mais l'ARPA chercha à diversifier les modes de transmission. En 1969, Bob Taylor avait accordé un budget à l'Alohanet, le réseau créé par Norm Abramson à l'université d'Hawaï, et qui utilisait la transmission hertzienne. Une version radio de l'Arpanet fut déployée après 1972.

Si l'on voulait utiliser la radio pour transmettre des paquets de données entre des sites éloignés, en particulier des sites mobiles comme les bateaux ou les chars de combat, la meilleure solution serait de passer par les satellites de communication. Il en résulta la mise au point du réseau Satnet. Une concurrence à rebondissements s'engagea alors entre satellite et câble dans le domaine des communications intercontinentales : d'abord victorieux, le satellite dut reculer lorsque les lignes en cuivre furent remplacées par la fibre optique qui offrait un débit et une fiabilité élevés pour un coût d'exploitation faible, puis il regagna du terrain en augmentant son débit, pour le reperdre ensuite etc.

Chaque réseau de transport - lignes téléphoniques, radio, satellite - doit obéir à des contraintes physiques qui lui sont propres. Il en résultait des spécifications différentes de la taille des paquets, des délais de retransmission en cas d'échec etc. Il fallait qu'une communication pût emprunter ces divers réseaux sans que les ordinateurs qui voulaient communiquer n'aient à se soucier de ces complications.

En 1973, l'ARPA créa à cette fin un *Internetting Project*. La diversification des réseaux n'était pas seulement technique, mais aussi géographique. En France, Louis Pouzin avait créé Cyclades pour relier les universités. Donald Davies avait lancé un réseau de commutation de paquets en Grande-Bretagne. Un *International Network Working Group* (INWG) fut donc créé en 1972 pour organiser l'interconnexion des divers réseaux à travers le projet *Concatenated Network*, ou Catenet.

Il fallait remplacer le Network Control Protocol (NCP) de l'Arpanet par un protocole qui permettrait de communiquer à travers plusieurs réseaux différents. L'article de Vint Cerf et Bob Kahn de mai 1974 [4] définit le Transmission Control Protocol (TCP, qui deviendra ensuite TCP/IP). Chaque réseau pourrait être exploité indépendamment, selon son propre protocole et par ses propres opérateurs ; des passerelles (gateways) prendraient en charge la communication entre réseaux différents et garantiraient la continuité de la communication d'un bout à l'autre.

L'astuce était de faire assurer la fiabilité de la communication par les ordinateurs émetteur et destinataire, le rôle du réseau étant seulement de transporter les datagrammes.

8.2 Bouleversements institutionnels

A la fin des années 60, la guerre du Vietnam avait suscité entre l'armée américaine et la société civile des tensions qui se manifestaient vivement dans les universités. On soupçonnait l'armée d'utiliser l'Arpanet pour collecter des informations et fichier les opposants, ou encore pour des recherches sur l'utilisation stratégique de l'arme nucléaire. Par ailleurs l'exploitation du réseau se compliquait en raison de sa croissance. L'armée se désengagea

donc progressivement de l'Arpanet, le laissant évoluer vers l'Internet selon un processus qui comportera quelques épisodes paradoxaux.

Il fallait trouver un sous-traitant pour assurer l'exploitation quotidienne du réseau mais, avant de lâcher la main, l'armée voulut s'assurer qu'elle ne perdait pas tout contrôle sur une structure qui pourrait avoir un intérêt stratégique. La responsabilité du réseau quitta donc la DARPA en 1975 pour passer à la DCA, « Defense Communications Agency », organisme purement militaire et qui, de surcroît, partageait le scepticisme d'AT&T envers la commutation de paquets. Une bureaucratie de généraux et de colonels s'installa, prescrivant en détail et par écrit ce qu'il fallait faire et comment le faire.

Il était naturel de passer à BBN le contrat relatif à l'exploitation du réseau mais BBN était entrée en conflit avec la DARPA en refusant de communiquer le code source de l'IMP. Cela gênait beaucoup ceux qui devaient corriger les dysfonctionnements du réseau. Ce code ayant été financé par le budget fédéral, la revendication de BBN parut excessive. La DARPA menaça de couper tous les contrats de BBN. BBN accepta enfin de fournir pour une rémunération symbolique le code source à qui en voudrait ; la DCA lui confia alors l'exploitation opérationnelle du réseau.

En 1975, les spécifications techniques de TCP/IP sont disponibles ; Vint Cerf arrive à la DARPA en 1976 pour prendre la responsabilité de l'interconnexion des réseaux Arpanet, Satnet et radio, projet nommé « ARPA Internet ». En octobre 1977 cette interconnexion fonctionnait.

8.3 Naissance de l'Internet

La NSF (National Science Foundation), créée en 1950 pour promouvoir le progrès scientifique en finançant la recherche fondamentale et la formation, avait dès 1974 compris l'intérêt d'un réseau pour l'accomplissement de sa mission. Mais pour disposer d'un site Arpanet une université devait avoir un contrat avec la DARPA, sur des projets de recherche financés par la Défense.

Un site Arpanet coûtait plus de 100 000 \$ par an notamment à cause du coût des liaisons louées. En 1979, 120 *Computer Science Departments* étaient en place dans les universités américaines mais celles-ci n'exploitaient que 15 des 61 sites Arpanet. L'université risquait de se scinder en deux, une cloison se créant entre celles qui étaient connectés et celles qui ne l'étaient pas. Larry Landweber, de l'université du Wisconsin, proposa de créer un réseau ouvert à la recherche, l'université et l'industrie en louant des liens à Telenet, filiale de BBN qui exploitait un réseau de commutation de paquets plus lent que l'Arpanet mais moins coûteux.

En 1980, la NSF accepta de financer pour cinq ans un *Computer Science Research Network* (CSNET). En 1986, pratiquement tous les départements d'informatique des universités et beaucoup de centres de recherche privés étaient connectés au CSNET et le coût de son exploitation était équilibré par les redevances de ses utilisateurs.

A l'exemple du CSNET, d'autres réseaux se mirent en place dans les années 80 :

- BITNET (« Because It's Time Network ») entre les systèmes IBM,
- UUCP (« Unix-to-Unix Copy Program ») aux Bell Labs,
- SPAN (« Space Plasma Analysis Network ») à la NASA,
- ainsi que divers réseaux universitaires en Europe et au Canada.

Ces réseaux communiquaient en utilisant TCP/IP. On utilisa alors le terme « Internet » pour désigner l'interconnexion mondiale des réseaux TCP/IP. L'industrie des routeurs prit

son essor.

En 1985, la NSF accepta de construire entre cinq ordinateurs répartis sur le territoire américain le backbone NSFNET, réseau à haut débit auquel les réseaux régionaux des universités pourraient se connecter (il est économiquement efficace d'organiser un réseau en plusieurs niveaux, le niveau fédérateur fournissant le débit le plus élevé : un backbone permettait donc de diminuer le coût du réseau). Sa disponibilité suscita la création de plusieurs réseaux régionaux : NYSERNET à New York, CERFnet en Californie etc. La NSF finançait les premières années d'exploitation d'un réseau universitaire, après quoi chaque université devrait payer 20 000 à 50 000 \$ par an pour une connexion à haut débit. Il fallait identifier les ordinateurs connectés à l'Internet.

Le *Domain Name System* (DNS), défini en novembre 1983, proposa une structure hiérarchique. Sous la pression de la DARPA ce système fut adopté par l'ensemble des acteurs en janvier 1986, les sept domaines de haut niveau étant edu, com, gov, mil, net, org et int. En 1989, l'Internet démarre au plan économique¹⁴. TCP/IP s'impose dans le monde entier. L'Internet n'est plus une constellation d'ordinateurs centrée sur l'Arpanet, mais un ensemble de réseaux connectés à l'épine dorsale du NSFNET, vingt-cinq fois plus rapide que l'Arpanet et beaucoup plus commode.

L'Arpanet n'était plus désormais que l'un des réseaux Internet de la DARPA. Il ne restait qu'à débrancher l'un après l'autre les IMP pour faire basculer chacun des ordinateurs connectés à l'Arpanet vers un des réseaux régionaux de l'Internet. A la fin de 1989 c'était chose faite, non sans quelque nostalgie.

En 1991 naissait le Web (voir Tim Berners-Lee [2]). En 1993 apparaissait Mosaic, le premier navigateur. L'Internet était ainsi doté des facilités ergonomiques qui avaient fait défaut à l'Arpanet.

En 1995, l'administration américaine interrompt le financement du backbone de l'Internet : l'Internet devenait une affaire purement commerciale, rémunérée par le paiement des utilisateurs aux IAP (Internet Access Providers) qui eux même paient leur raccordement, ce qui finance de proche en proche une architecture à base de liaisons louées, routeurs et backbones.

L'évaluation économique prouve alors que l'Internet est viable grâce à la simplicité de l'architecture que permet le protocole TCP/IP et à la baisse tendancielle du coût des équipements électroniques¹⁵. Cette baisse facilite par ailleurs l'accès à l'Internet d'une population d'utilisateurs qui s'élargira, bien au delà du cercle des spécialistes de l'informatique, universitaires et chercheurs, pour inclure potentiellement l'ensemble de la population et lui fournir des services multimédia.

De même qu'un cintre sert à construire une voûte qui, une fois posée, tiendra toute seule, l'Arpanet a servi à construire un être nouveau, techniquement efficace et économiquement viable. Les projets de Licklider, utopiques au début des années 60, étaient devenus réalisables. Les institutions, sceptiques dans un premier temps, se rallieront l'une après l'autre à ce nouveau média - mais elles devront s'y adapter.

Références

- [1] Norman ABRAMSON. The aloha system—another alternative for computer communications. In *AFIPS Conference Proceedings*, volume 37. AFIPS, 1970.

14. « We started looking at the network statistics and realized we had a rocket on our hands » (Vint Cerf, cité dans Katie Hafner et Matthew Lyon, [5] p. 254).

15. Christophe Talière et Michel Volle [10]

- [2] Tim BERNERS-LEE. *Weaving the Web*. Harper Business.
L'histoire du Web par celui qui l'a créé en 1991.
- [3] Paul CARROLL. *Big Blues, The Unmaking of IBM*. Crown.
Une histoire détaillée de la chute de la maison IBM dans les années 90... mais IBM s'est redressée par la suite, ce qui infirme quelque peu l'analyse.
- [4] V. G. CERF and R. E. KAHN. A protocol for packet network intercommunication. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, mai 1974.
La note technique qui est à l'origine du protocole TCP/IP.
- [5] Katie HAFNER et Matthew LYON. *Where Wizards Stay Up Late*. Touchstone, 1998.
Ce livre décrit les origines de l'Internet. Il sacrifie au style journalistique qui, pour soutenir l'attention, abonde en anecdotes et brise le cours de l'exposé. Sa lecture est cependant éclairante car il s'appuie sur une enquête et une documentation sérieuses.
- [6] Amy HARMON. Internet gives teenage bullies weapons to wound from afar. *The New York Times*, 26 août 2004.
- [7] Michael HILTZIK. *Dealers of Lightning - Xerox PARC and the Dawn of the Computer Age*. Harper Business, 1999.
Histoire vivante d'un centre de recherche où furent mises au point, dans les années 70, plusieurs innovations essentielles.
- [8] J. C. R. LICKLIDER. Man computer symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, mars 1960.
Un texte prophétique, dont nous n'avons pas encore épuisé la profondeur.
- [9] J. C. R. LICKLIDER. The computer as a communication device. *Science and Technology*, avril 1968.
- [10] Christophe TALIÈRE et Michel VOLLE. Modélisation technico-économique du réseau internet. Technical report, Eutelis, mars 1996.
Cette étude est disponible (www.volle.com/travaux/coutinternet.htm).