



HAL
open science

Ethernet : des îles au bureau, puis dans l'atelier

Thierry Divoux, Eric Rondeau, Jean-Philippe Georges

► **To cite this version:**

Thierry Divoux, Eric Rondeau, Jean-Philippe Georges. Ethernet : des îles au bureau, puis dans l'atelier. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2008, 1, pp.95-101. hal-00347469

HAL Id: hal-00347469

<https://hal.science/hal-00347469>

Submitted on 16 Dec 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ethernet : des îles au bureau, puis dans l'atelier

Thierry DIVOUX, Eric RONDEAU, Jean-Philippe GEORGES

Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN - UMR 7039)
Nancy Université, CNRS, BP239, 54506 Vandoeuvre

En matière de réseaux locaux, Ethernet est sans nul doute le standard de communication le plus utilisé. Voici l'histoire et les principales évolutions qui l'ont conduit à supporter les échanges de données à tous les niveaux de l'entreprise.

1. Histoire

« Aloha ! » En 1969, c'est avec cette exclamation exotique que Norman Abramson est accueilli à Hawaï. Ce Professeur de la prestigieuse université de Stanford, passionné de surf tombe sous les charmes de l'archipel, et réussit l'année suivante à intégrer l'université d'Hawaï. Il travaille sur un projet de coordination des réservations hôtelières sur les différentes îles. Il appelle « Aloha » le réseau radio qu'il met en place. L'originalité réside dans la simplicité du mécanisme de partage de la fréquence unique utilisée par les abonnés au réseau : le protocole d'accès au médium se réduit en effet à :

- Vous voulez émettre ? Alors, émettez !
- Si vous entrez en collision avec une autre transmission, alors essayez « plus tard »...

On supposait une collision si aucun acquittement n'était reçu au bout d'un « certain » temps.

Abramson publie ses travaux qui retiennent l'attention de Robert Metcalfe, jeune ingénieur du Xerox PARC (Palo Alto Research Center). Cet ancien étudiant d'Harvard venait d'être embauché par Xerox, bien qu'il n'ait pu soutenir sa thèse sur la commutation de paquets jugée insuffisamment théorique. Le PARC est à l'époque richement doté de serveurs, imprimantes, et de nombreuses machines Alto (une des premières stations de travail personnelles développée par Xerox) dont l'interconnexion en réseau est confiée à Metcalfe. Il procède alors à une modélisation mathématique d'Aloha dont il identifie et quantifie les faiblesses. Il propose deux améliorations majeures au protocole d'origine :

- écouter avant de parler (vérifier que le médium n'est pas déjà occupé avant de transmettre) : méthode CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) ;
- un algorithme de calcul de la date de retransmission (plus formel que « plus tard ») : algorithme du BEB (Binary Exponential Backoff).

Ces travaux lui permettent alors d'obtenir son Doctorat d'Harvard ... En 1973, il parle pour la première fois d'Ethernet, faisant référence à l'« éther », ce milieu qui fût supposé le vecteur de la propagation des ondes jusqu'à la fin du XIXème siècle. Avec ce nom, il veut montrer que son réseau permet d'interconnecter non seulement des Altos, mais n'importe quelle machine respectant le protocole.

1976 est une année de promotion d'Ethernet dans la communauté scientifique (articles en revue, conférences). En juin, à la National Computer Conference, il présente le croquis devenu célèbre (fig 1)

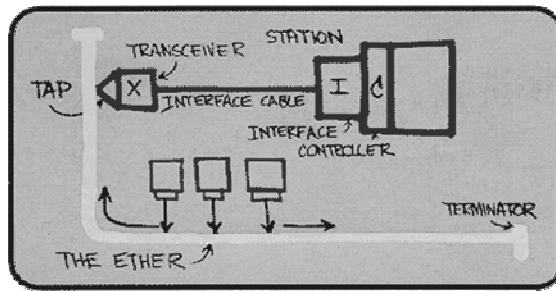


Figure 1. Ethernet croqué par Bob Metcalfe en 1976

Il convainc ensuite Xerox de faire d'Ethernet un standard. Il faut pour cela que d'autres constructeurs adoptent le protocole. C'est chose faite en 1980 avec DEC et Intel. En septembre, le *DIX Ethernet Standard* est publié (DEC, Intel, Xerox). L'IEEE le reconnaît à son tour sous la référence 802.3, puis c'est la consécration comme norme mondiale par l'ISO (International Standard Organization) sous le code IS 8802.3.

2. Principes

Ethernet est une spécification des couches 1 et 2 du modèle OSI (*Open Systems Interconnection*). En fait, c'est une spécification d'un profil du protocole CSMA/CD. Mais c'est aussi bien plus. En effet, CSMA/CD ne définit pas l'algorithme de résolution d'une collision alors qu'Ethernet définit l'algorithme BEB ainsi que la longueur des données, le medium physique (bus), ...

Ethernet implémente une version *1-persistent* de CSMA/CD puisqu'une station prête à émettre des données les transmet dès que le canal est libre avec une probabilité de 1. La procédure d'émission suit les étapes ci-dessous :

- écoute de la voie de transmission (détection de porteuse) ;
- si elle est occupée : attente de libération du canal ;
- si elle est libre : attente pour la neutralisation électrique du médium (trou inter trame ou Inter Frame Gap (IFG) = 9,6 μ s dans le protocole natif) puis émission. Pendant toute la transmission de la trame, la station vérifie qu'elle n'entre pas en collision. Ceci arrive si au moins deux stations émettent simultanément (synchronisées par exemple par la libération de la voie de transmission d'une autre station). Comme les stations ne détectent pas nécessairement la collision en même temps, elles transmettent encore quelques octets pour garantir la détection par toutes (séquence dite de « bourrage »). Ensuite, pour se désynchroniser, les stations impliquées dans la collision tirent un temps d'attente aléatoire (backoff) dans un intervalle qui croît exponentiellement avec le nombre de tentatives de retransmission (limité à 16). Celle qui a tiré le temps le plus court reprend la première la procédure d'émission : écoute puis transmission si le canal est libre...

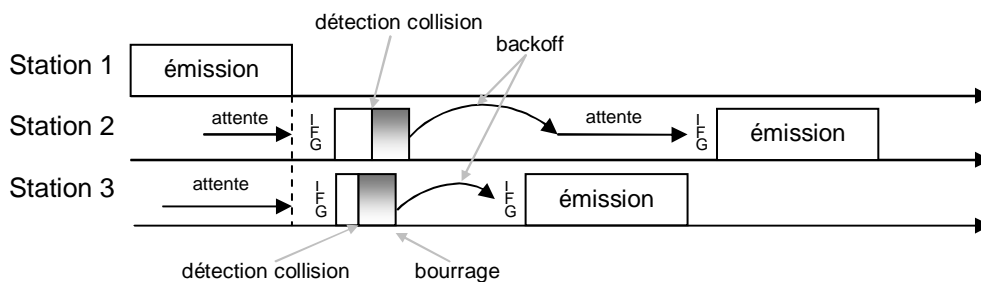


Figure 2. Résolution d'une collision

3. Evolutions

3.1 Introduction

Outre sa simplicité et son faible coût, c'est également l'évolutivité d'Ethernet qui en a fait le succès que l'on connaît aujourd'hui. Si la méthode d'accès CSMA/CD est restée inchangée, il y a eu de nombreuses évolutions en termes de débit, de support de transmission et de topologie. Ces évolutions (figure 3) vont permettre notamment d'ancrer Ethernet dans les mondes industriel (usines, ...) ou technique (avion, tunnel, ...) [1], [2]. Ainsi, l'« Ethernet industriel » est aujourd'hui une réalité. On le trouve dans les chaînes de montage de Jaguar, dans l'industrie pharmaceutique, agroalimentaire, ... mais aussi dans le nouvel Airbus A380 !

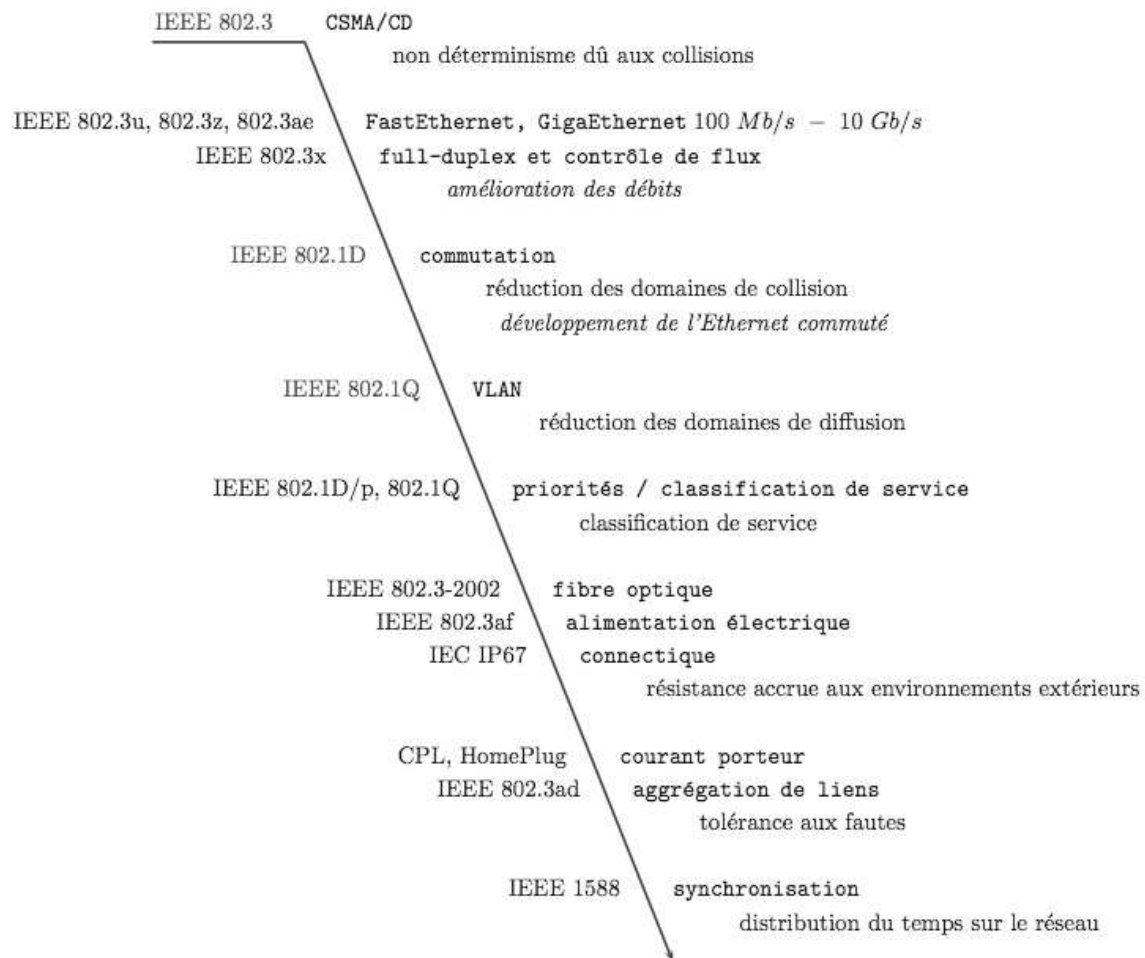


Figure 3. Evolutions d'Ethernet : vers une utilisation pour le temps-réel

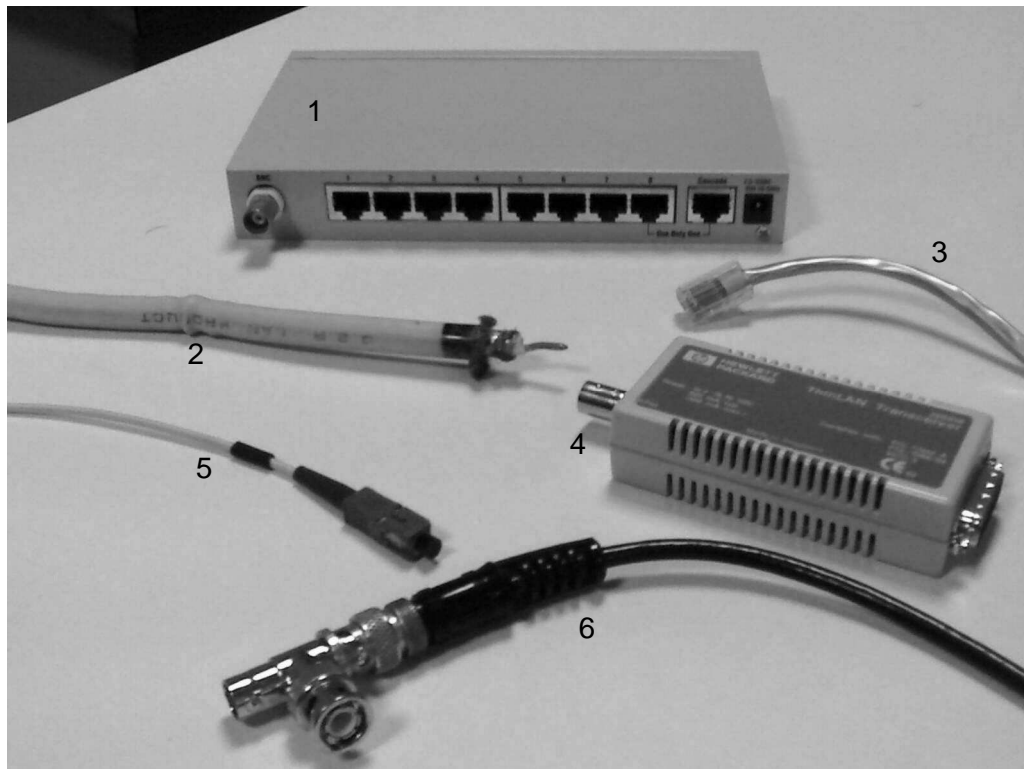
3.2 Support de transmission :

Le *DIX Ethernet Standard* est plus connu sous la forme « 10 BAS 5 » qui signifie :

- un débit de 10 Mégabits par seconde,
- une transmission en bande de base (codage Manchester différentiel),
- une portée de 5 hectomètres sans répéteur.

Le « câble jaune », support d'origine qui apparaît sur le croquis de 1976, est un coaxial « épais » (Thick) possédant sept blindages, extrêmement rigide, et donc peu facile d'installation. Un *transceiver* permet de rejoindre la station de manière plus aisée. Un coaxial plus souple, « fin », est rapidement normalisé, connu comme « Thin Ethernet » ou 10 BAS 2, car sa portée est réduite à 200 mètres. Finalement, dans un souci d'économie et pour la banalisation des supports de transmission des bâtiments pré câblés, la paire téléphonique

(UTP : Unshielded Twisted Pair) est aujourd'hui essentiellement utilisée, et on parle de 10 BAS T. A noter qu'on peut employer un support optique (10 BAS F), surtout pour des liaisons bipoint car le té optique, très cher, introduit d'importantes atténuations. La fibre optique est cependant très intéressante dans des environnements fortement « bruités » et est donc privilégiée pour des implémentations dans des sites de production ou les systèmes embarqués. De manière plus anecdotique, on peut également citer la transmission sur courant porteur (CPL : Courant Porteur en Ligne ou Computer Power Line) qui consiste à émettre sur le réseau électrique. Cette technologie est particulièrement intéressante pour les applications domotiques.



- | | |
|---|--|
| 1 : un hub 8 ports RJ45 + 1 port BNC | 4 : un transceiver BNC/AUI |
| 2 : le câble « jaune » Ethernet natif | 5 : une fibre optique |
| 3 : un câble 4 paires téléphoniques et la prise | 6 : le câble « Thin » Ethernet et un té BNC RJ45 |

Figure 4. Quelques supports de transmission et éléments d'interconnexion

3.3. Débits

Les progrès de l'électronique ont bien sûr permis de dépasser rapidement les débits originaux. FastEthernet spécifié en 1995 (IEEE 802.3u), pousse à 100 Mbps. GigaEthernet depuis 1998 (IEEE 802.3z) permet d'atteindre 1000 Mbps. Le « Térabit Ethernet » est actuellement en phase de recherche. Le débit est sûrement l'un des critères majeurs qui a conduit les industriels à considérer Ethernet comme support de transmission dans des applications temps-réel. En effet, les réseaux de terrain classique proposent le plus souvent des débits modestes autour du Mbps.

Malgré ces débits importants, comme le montre la figure 5, si la plupart des délais d'acheminement des trames reste très faible, le caractère aléatoire du mécanisme d'accès

au medium fait que certaines peuvent être considérablement retardées. Le débit ne peut donc être le seul facteur d'adoption d'Ethernet en milieu temporellement contraint.

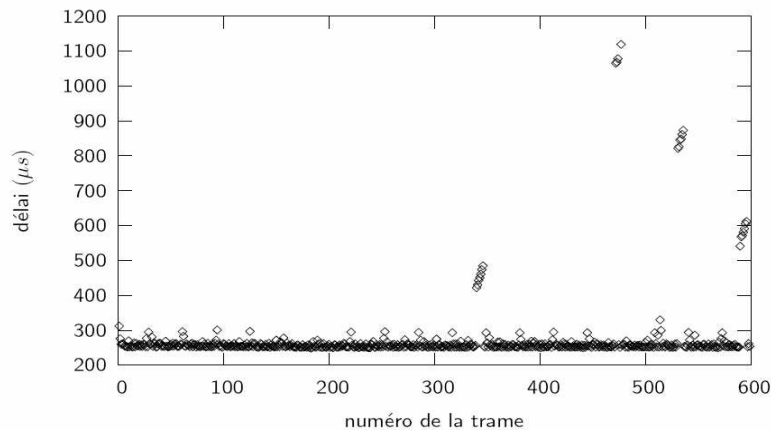


Figure 5. Dispersion des délais d'acheminement des trames transmises sur Ethernet

3.4 Topologie

La méthode d'accès, très efficace lorsque le réseau est peu chargé, s'avère catastrophique (écroulement du réseau) lorsque le nombre de collisions augmente. On évalue à 40% de charge le seuil à ne pas dépasser. Ce qui arriva quand le nombre d'abonnés au réseau augmenta et que les services offerts les conduisirent à l'utiliser de plus en plus. La première idée fut de segmenter le bus en utilisant un « pont filtrant ». Le principe est simple : sur analyse des adresses, le pont laisse passer les trames lorsqu'émetteur et récepteur sont de part et d'autre du pont. Il bloque les trames s'ils sont du même côté, rendant donc possible dans ce cas deux transmissions simultanées sur chaque segment.

Parallèlement, on commença à construire des bâtiments pré câblés. Afin de garantir l'évolutivité de l'usage des prises (pour y brancher un téléphone ou une machine informatique), on passa sur paire téléphonique, mais on opta aussi pour une topologie en étoile autorisant un « rebrassage » aisé des deux réseaux. L'introduction de multi répéteurs ou *hubs* émulant le fonctionnement du bus fut une étape importante de l'évolution d'Ethernet. Le « mariage » du hub et du pont donnera très vite naissance au commutateur ou *switch*, équipement central de toute architecture Ethernet moderne.

Les commutateurs sont structurés relativement aux mécanismes de mémorisation, aux processus décisionnels de commutation et à l'architecture de commutation.

Les mécanismes de mémorisation s'appuient sur l'un des trois types de retransmission suivants :

- *Store & forward* : dans ce mode, le commutateur doit attendre la réception complète de la trame avant d'effectuer la commutation ;
- *Cut-through* : la commutation est activée dès la réception de l'adresse de destination, soit à la réception du 14^{ème} octet ;
- *Fragment-free* : ici, le commutateur attend le 64^{ème}, c'est-à-dire la réception complète d'une trame de longueur minimale.

L'avantage du mode *store & forward* est que le commutateur ne retransmet les trames qu'après avoir vérifié qu'elles ne sont pas erronées (détection d'erreurs par calcul de clé de contrôle). Néanmoins, ce mode ajoute un retard de traitement d'autant plus important que la trame est longue. Le mode *cut-through* réduit ce délai à sa valeur minimale (indépendante de la longueur de la trame). Sous l'hypothèse d'un faible taux d'apparition d'erreurs, le mode *cut-through* est donc préférable.

La mise en attente dans les buffers dépend aussi de leur emplacement qui peut se faire à l'entrée des ports, à la sortie ou encore entre les deux (mémoire partagée). Les deux dernières évitent les problèmes de blocage en tête de ligne propres à une mémorisation à l'entrée du commutateur. A noter aussi que la mémoire partagée offre plus de bande passante que dans un schéma de mémorisation par port. Finalement, la décision de commutation peut se faire de manière centralisée ou décentralisée et le transfert entre les ports d'entrées et de sorties repose sur des architectures bus, matricielles ou à mémoire partagée.

Ces différents mécanismes introduisent des retards dans l'acheminement des messages. C'est la notion de temps de latence inhérent au commutateur. Cela signifie que si le réseau est peu chargé, ce qui est souvent le cas dans des environnements industriels véhiculant des petits paquets de manière périodique, un réseau sur hub est plus performant en terme de délai qu'un réseau commuté. De plus, la diffusion d'une trame à plusieurs destinataires (multicast) souvent exploitée dans les applications de contrôle/commande est intrinsèque au bus et est « moins naturelle » dans l'Ethernet commuté. Cependant, les hubs ne supportent pas la plupart des évolutions récentes autour d'Ethernet.

Les topologies autour de l'Ethernet commuté ont associé dans un premier temps des hubs et des commutateurs. Les hubs permettaient de raccorder les ordinateurs et les commutateurs jouaient le rôle de ponts entre les hubs. Puis, les commutateurs ont vu leurs prix baisser, et ont remplacé progressivement tous les hubs. On parle alors d'architectures micro-segmentées. L'implémentation systématique de liens full-duplex (IEEE 802.3x) sur des architectures micro-segmentées conduit à une topologie dite full-segmentée. La conséquence de la full-segmentation est d'éliminer complètement l'apparition de collisions. La nature du problème est transformée en gestion de la congestion des buffers des commutateurs. L'intérêt est que sur une telle architecture, des théories comme celle du « calcul réseau » ou *network calculus* peuvent s'appliquer : elles permettent d'estimer dans le pire des cas des délais d'acheminement des trames bornés, rendant ainsi déterministe un réseau basé sur un protocole qui ne l'est pas. Le calcul de majorants des délais est indispensable pour une utilisation de l'Ethernet commuté dans le monde industriel ou technique [3].

3.5 Topologie logique

Le réseau Ethernet ne gérant que les niveaux 1 et 2 du modèle OSI, il n'est pas capable de gérer l'acheminement des messages s'il existe plusieurs chemins entre une source et un destinataire. Il faut donc que la topologie du réseau soit de type arbre pour qu'il n'y ait qu'une route possible pour aller d'un point à un autre. Il se peut que lors des opérations de câblage du réseau, des boucles soient réalisées entre les équipements de communication, soit par erreur, soit pour créer des redondances de liens de façon à améliorer la sûreté de fonctionnement du système de communication (figure 6). Ces boucles sont détectées par le protocole de Spanning-Tree (IEEE 802.1D) implémenté dans les commutateurs : il va chercher dans un premier temps à trouver un arbre (topologie logique) en favorisant par exemple le maintien des lignes de plus haut débit. Puis dans un deuxième temps, il va inhiber les liens redondants. Le protocole de Spanning-Tree scrute en permanence l'état du réseau pour reconstruire un nouvel arbre en cas d'une rupture de liens. Cependant, le temps de recherche pour redéfinir la topologie de secours est d'environ 30 secondes. Ce type de protocole ne peut donc pas être utilisé pour des applications à fortes contraintes temporelles. D'autres solutions sont donc proposées comme RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol : IEEE 802.1w) ou Moxa Turbo Ring. Ils permettent de recouvrir plus rapidement la connectivité du réseau en cas de défaillance d'un lien. Les temps de reconfiguration donnés par Moxa, pour Turbo Ring sont inférieurs à 300 µs.

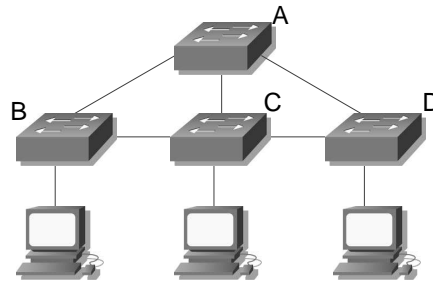


Figure 6. Architecture micro segmentée et redondée

3.6 Réseaux virtuels

Les réseaux virtuels (VLAN : Virtual LAN, IEEE 802.1q) permettent de réduire l'espace de diffusion d'un *broadcast* (diffusion à toutes les stations) qui ne sera donc adressé qu'aux ports associés au VLAN concerné. A noter que le protocole de Spanning-Tree peut être associé à un réseau virtuel. Il est possible d'avoir ainsi plusieurs topologies logiques relatives à chaque VLAN et qui cohabitent simultanément. Des règles de sécurité (ACL : Access Control List) peuvent aussi être affectées spécifiquement à un réseau virtuel (VACL).

Les réseaux virtuels sont aujourd'hui mis en œuvre dans les commutateurs pour gérer les droits d'une machine à communiquer avec une autre. L'idée est de découper le réseau en plusieurs réseaux virtuels. Ainsi un ordinateur associé à un réseau virtuel ne peut échanger des messages qu'avec des ordinateurs appartenant à ce même réseau virtuel. Une entreprise peut alors définir sur un même réseau physique, des réseaux virtuels par service, par type d'application, de protocoles, de réseaux (sans-fil, filaire),... La configuration la plus simple est d'associer chaque port d'un commutateur à un numéro de VLAN. L'ordinateur connecté à ce port appartient alors automatiquement à ce VLAN. Le commutateur gère localement ses réseaux virtuels et marque les trames avec le numéro de VLAN de la source lorsque la trame sort du commutateur.

3.7 Classification de Service

Tout d'abord, il ne faut pas confondre le concept de Qualité de Service (QoS) avec la Classification de Service (CdS). La CdS ne cherche pas comme la QoS à satisfaire des besoins prédéfinis par l'application, mais plutôt à privilégier le traitement de certaines trames par rapport à d'autres sans garantir un niveau de service. Pour ce faire, la norme IEEE 802.1p spécifie huit classes de services. Pour identifier les classes, les trames sont marquées avec un numéro de priorité allant de 0 à 7. Le commutateur Ethernet associe à chaque port de sortie des buffers par niveau de priorité. La retransmission des trames sera fonction d'une politique d'ordonnancement. En général, on retrouve deux types de politique dans les commutateurs : la *Strict Priority* (SP), et le *Weighted Round Robin* (WRR). Dans SP, tant qu'il y a des messages de hautes priorités en attente dans les buffers de sortie, ils seront traités même si des messages de plus basses priorités attendent depuis longtemps dans les buffers de sortie. La politique de priorité stricte peut donc entraîner des problèmes de « famine ». Quant à WRR, les trames dans chaque file sont traitées tour à tour. Le nombre de trames à traiter durant un tour dépend des poids associés à chaque buffer. Cet ordonnancement est plus « équitable » car il assure un service minimal aux trames de basse priorité.

La Classification de Service est un aspect important à considérer pour des applications de contrôle/commande. Par ce biais, il est possible d'offrir plus de bande passante pour du trafic temps réel que pour du trafic de moindre importance (téléchargement, ...) [4].

3.8 Synchronisation d'horloges

Dans les applications distribuées temps-réel, l'existence d'une référence temporelle est primordiale. Le protocole PTP (Precision Time Protocol) spécifié dans le standard IEEE 1588 permet de synchroniser avec une grande précision (de l'ordre de la μ s) les horloges de chaque nœud du réseau. Une fois les horloges synchronisées, il suffit d'estampiller chaque message avec sa date d'envoi. Une simple différence entre la date de réception et la date d'envoi portée par le message permet de connaître le délai d'acheminement d'une trame à travers le réseau. L'annexe D du standard 1588 présente une implémentation de PTP pour Ethernet. Le protocole PTP est utile pour fournir en temps réel aux applications de contrôle/commande, les informations sur les retards du réseau. Celles-ci pourront alors s'adapter dynamiquement aux variations des performances du réseau.

4. Synthèse

L'utilisation d'Ethernet au niveau terrain n'est pas nouvelle en soi. Ainsi, dans les années 80, EDF a conduit des études sur son utilisation pour le contrôle/commande. Certains réseaux industriels s'appuyaient déjà sur les couches d'Ethernet il y a trente ans. De plus en plus de constructeurs développent et proposent actuellement des solutions Ethernet dites industrielles. On peut citer Rockwell avec EtherNet/IP, Siemens avec Profinet ou encore Schneider avec Modbus TCP/IP. La liste des produits est disponible sur le site électronique de l' « Industrial Ethernet Book » [5].

De plus, des organisations comme l'IAONA (Industrial Automation Networking Alliance) ou l'IEA (Industrial Ethernet Association) font la promotion d'Ethernet comme le nouveau standard de communication en environnement industriel. C'est ainsi que l'IEC 61158 qui constitue la référence des standards des réseaux de terrain intègre désormais ces réseaux basés sur Ethernet comme HSE (High Speed Ethernet) de Fieldbus Foundation (figure 7).

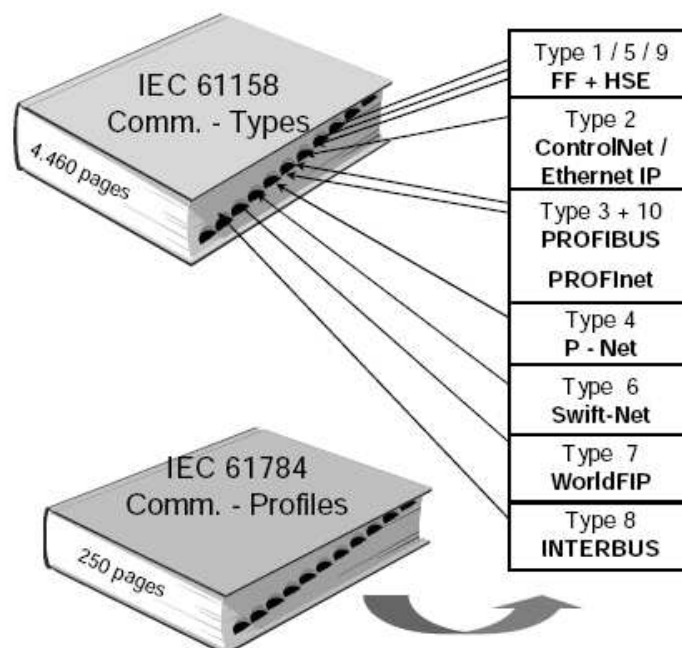


Figure 7. La standardisation des réseaux de terrain

5. Conclusion

L'utilisation d'Ethernet en milieu industriel a été motivée par sa pérennité, son ouverture aux protocoles de l'Internet, son protocole non propriétaire,...

Son défaut majeur est le protocole CSMA/CD qui est non déterministe et donc non adapté pour un déploiement dans des environnements à fortes contraintes temporelles. La première idée a été de dire que le non-déterminisme d'Ethernet pouvait être compensé par ses débits importants. Mais cela ne permet pas de garantir formellement que le réseau pourra toujours offrir suffisamment de bande passante aux applications temps-réel [6]. Aussi, chaque constructeur a développé ses propres solutions au dessus d'Ethernet de façon à protéger le trafic temps-réel pour lui garantir des propriétés temporelles. Cependant, ces solutions tendent à aboutir à des réseaux Ethernet « propriétaires » non interopérables et limitent ainsi les avantages sur l'universalité d'une organisation « tout Ethernet » dans l'entreprise. On risque alors de retomber dans l'errance et le chaos de la standardisation des réseaux de terrain [7].

Une autre approche plus satisfaisante est de mettre en place la Classification de Service, standardisée sur Ethernet, sur des architectures commutées full-segmentées pour contrôler les trafics temps-réel. La théorie du calcul réseau permet d'estimer des retards bornés maximalemt en regard des politiques d'ordonnancement choisies.

Enfin, de même que dans les milieux bureautiques Ethernet a été prolongé par son équivalent sans fil Wifi (avec un autre protocole d'accès CSMA/CA qui évite les collisions au lieu de les résoudre), on assiste de plus à l'expression de besoins sans fil par les industriels qui souhaitent s'affranchir des problèmes de câblage, augmenter la mobilité de leurs équipements, ... Les problématiques de sécurité, déterminisme, etc, ... qui ont été traitées pour Ethernet commencent donc à l'être maintenant dans le domaine des réseaux sans fil.

6. Les auteurs

Thierry Divoux a 45 ans. Il est Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy. Au sein du CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy), il est responsable du Groupe Thématique « Systèmes de Production Ambiants » qui rassemble une cinquantaine d'enseignants chercheurs et de doctorants. Il travaille sur la conception et l'évaluation de performances de systèmes de communication contraints par les besoins des applications industrielles ou techniques. Après avoir longuement étudié Ethernet, il se concentre aujourd'hui sur l'utilisation de réseaux sans fil pour ces mêmes applications.

Eric Rondeau a 44 ans. Il est Professeur à l'Université Henri Poincaré de Nancy. Au sein du Groupe Thématique SYMPA, il dirige l'équipe « Systèmes Contrôlés en Réseaux ». Il vient de clore un projet européen qu'il animait sur la sûreté de fonctionnement de ces systèmes distribués via des réseaux, avec trois autres universités et trois industriels. Il s'intéresse plus particulièrement à la co-conception de systèmes contrôlés en réseaux qui consiste à prendre en compte simultanément les contraintes applicatives et de communication.

Jean-Philippe Georges a 28 ans. Il est Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré de Nancy. En 2005, il a soutenu une thèse préparée au CRAN sur l'évaluation des délais de bout en bout par calcul réseau dans les architectures Ethernet commutées. Il s'intéresse à la modélisation et à l'optimisation des architectures de communication des systèmes distribués dans le cadre de la commande et du diagnostic des systèmes contrôlés en réseaux.

6. Références

[1] JP Georges, T. Divoux, E. Rondeau *Majorants des délais de transmission*, Collection IC2 Hermès, Systèmes contrôlés en réseau, Hermès Lavoisier, sous la direction de JP Richard et T. Divoux, pages 189-226, ISBN 978-7462-1513-9, février 2007.

(2) Alves, M.; Tovar, E. & Vasques, F. *Ethernet goes real-time: a survey on research and technological developments* Rapport Technique du Groupe de recherche IPP-HURRAY, Polytechnic Institute of Porto (ISEP-IPP), 2000

(3) Georges, J.P. *Systèmes contrôlés en réseau: évaluation de performances d'architectures Ethernet commutées* Thèse de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, 2005

(4) I. Diouri, J.-P. Georges, E. Rondeau, *Adaptation of scheduling policy parameters to control networked systems*. NECST 2007 3rd workshop on Networked Control Systems : Tolerant to faults, IFAC, Nancy, France, 20-21 juin 2007.

(5) Industrial Ethernet Book : <http://ethernet.industrial-networking.com>

(6) Decotignie, J. *Ethernet-based real-time and industrial communications* Proceedings of the IEEE, 2005, vol. 93

(7) Felser, M. & Sauter, T. *The fieldbus war: history or short break between battles?* Factory Communication Systems, 2002. 4th IEEE International Workshop on, 2002, 73-80