

16

Les réseaux Ethernet

Les premiers réseaux Ethernet ont été développés au tout début des années 80 par le triumvirat DEC, Intel et Xerox puis par une grande partie des constructeurs informatiques. Aujourd'hui, le monde Ethernet représente 95 p. 100 des connexions terminales dans le monde, et tous les postes de travail des entreprises sont connectés par des cartes Ethernet, à l'exception encore de quelques connexions sur le Token-Ring, le réseau local initié par IBM. La grande révolution du monde Ethernet a été de passer en mode commuté et non plus partagé, comme nous allons le voir.

Ce chapitre examine les caractéristiques des techniques partagées et commutées, ainsi que les grandes solutions proposées par les réseaux Ethernet, que ce soit sur les réseaux locaux, métropolitains ou longue distance.

Les modes partagé et commuté

Ethernet fonctionne selon deux modes très différents mais totalement compatibles, le mode partagé et le mode commuté, qui permettent tous deux de transporter des trames Ethernet. Nous avons déjà introduit ces dernières au chapitre 6 à l'occasion de la description des protocoles de niveau trame.

Le mode partagé indique que le support physique est partagé entre les terminaux munis de cartes Ethernet. Dans ce mode, deux stations qui émettraient en même temps verraient leurs signaux entrer en collision. Dans le mode commuté, les terminaux sont connectés à un commutateur, et il ne peut y avoir de collision puisque le terminal est seul sur la liaison connectée au commutateur. Le commutateur émet vers la station sur la même liaison mais en full-duplex, c'est-à-dire en parallèle mais dans l'autre sens.

La figure 16.1 illustre ces deux techniques avec cinq stations terminales.

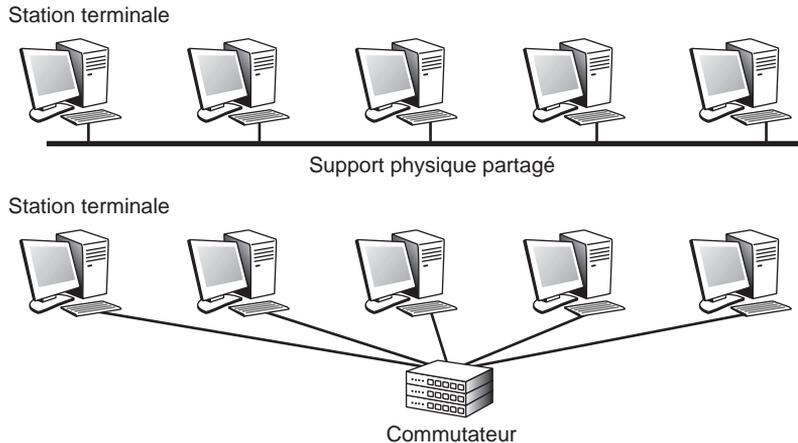


Figure 16.1

Comparaison des techniques partagée et commutées

Les principaux avantages et inconvénients des deux modes sont les suivants :

- Il n'y a pas de collision en mode commuté, mais les trames doivent être mémorisées dans les commutateurs, ce qui demande un contrôle de flux.
- Pour connecter une station en commutation, il faut deux coupleurs et un commutateur, tandis que pour connecter une station en mode partagé, un seul coupleur est suffisant. La technique partagée est donc moins chère à mettre en œuvre.
- La technique commutée autorise des liaisons sans contrainte de distance, tandis que la méthode partagée s'accompagne d'une limitation forte de la distance pour résoudre le problème du partage du support physique.

Les réseaux Ethernet partagés

Les réseaux Ethernet partagés mettent en œuvre une technique d'accès au support physique normalisée par le groupe de travail IEEE 802.3 sous le nom d'accès MAC (Medium Access Control). MAC utilise une technique générale appelée accès aléatoire.

Née de recherches effectuées au début des années 70 sur les techniques d'accès aléatoire, la norme IEEE 802.3, qui a donné ensuite naissance à la norme ISO 8802.3, décrit la technique d'accès à un réseau local Ethernet partagé. C'est la société Xerox qui en a développé la première les prototypes.

On peut caractériser les réseaux Ethernet partagés par la technique d'accès CSMA/CD, dont le débit varie de 1 à 10, 100 et 1 000 Mbit/s. Au-delà, à la vitesse de 10 000 Mbit/s, seule la solution commutée est acceptable pour des raisons de distance, comme nous le verrons.

Avant d'entrer plus avant dans les détails des différents produits Ethernet commercialisés, indiquons les différents noms empruntés par les réseaux Ethernet partagés :

- **Cheapernet.** Ethernet partagé qui utilise un câble fin (*thin cable*) mais en conservant les mêmes capacités de transmission.

- **Starlan.** Réseau partagé utilisant la technique d'accès CSMA/CD mais sur une topologie très différente et à des vitesses de 1 Mbit/s pour la première génération, 10 Mbit/s pour la deuxième et 100 Mbit/s pour la troisième.
- **Fast Ethernet.** Nom des réseaux à 100 Mbit/s.
- **Gigabit Ethernet, ou GbE.** Correspond à la capacité de 1 000 Mbit/s. Il est à noter que le 10GbE (10 000 Mbit/s), solution pour réseaux métropolitains, n'existe qu'en mode commuté.

Dans les faits, le nombre de réseaux Ethernet partagés normalisés est impressionnant. L'encadré ci-dessous en dresse la liste en utilisant la nomenclature IEEE.

Le réseaux Ethernet partagés normalisés

Le groupe de travail indique la technique utilisée : IEEE 802.3 correspond à CSMA/CD, IEEE 802.3 Fast Ethernet à une extension de CSMA/CD, IEEE 802.9 à une interface CSMA/CD à laquelle on ajoute des canaux B, IEEE 802.11 à un Ethernet par voie hertzienne, etc. Viennent ensuite la vitesse puis la modulation ou non (base = bande de base et broad = broadband) et enfin un élément complémentaire, qui, à l'origine, était la longueur d'un brin et s'est transformé en type de support physique :

- IEEE 802.3 10Base5 (câble coaxial blindé jaune) ;
- IEEE 802.3 10Base2 (Cheapernet, câble coaxial non blindé brun, Thin Ethernet) ;
- IEEE 802.3 10Broad36 (Ethernet large bande, câble coaxial CATV) ;
- IEEE 802.3 1Base5 (Starlan à 1 Mbit/s) ;
- IEEE 802.3 10BaseT, Twisted-Pair (paires de fils torsadées) ;
- IEEE 802.3 10BaseF, Fiber Optic (fibre optique) :
 - 10BaseFL, Fiber Link ;
 - 10BaseFB, Fiber Backbone ;
 - 10BaseFP, Fiber Passive ;
- IEEE 802.3 100BaseT, Twisted-Pair ou encore Fast Ethernet (100 Mbit/s en CSMA/CD) :
 - 100BaseTX ;
 - 100BaseT4 ;
 - 100BaseFX ;
- IEEE 802.3 1000BaseCX (deux paires torsadées de 150 Ω) ;
- IEEE 802.3 1000BaseLX (paire de fibre optique avec une longueur d'onde élevée) ;
- IEEE 802.3 1000BaseSX (paire de fibre optique avec une longueur d'onde courte) ;
- IEEE 802.3 1000BaseT (quatre paires de catégorie 5 UTP) ;
- IEEE 802.9 10BaseM (multimédia) ;
- IEEE 802.11 10BaseX (hertzien).

La norme IEEE 802.12 définit le réseau local 100VG AnyLAN, qui est compatible avec Ethernet. La compatibilité correspond à l'utilisation d'une même structure de trame que dans Ethernet. La technique d'accès, en revanche, n'est pas compatible avec le CSMA/CD, comme nous le verrons à la fin de ce chapitre.

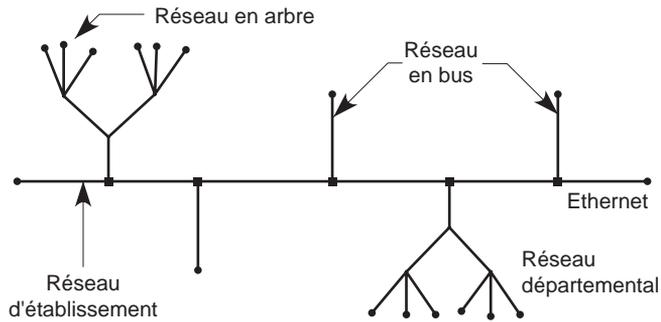
L'architecture de communication classique d'un réseau Ethernet partagé comporte comme épine dorsale un réseau Ethernet sur lequel sont connectés des réseaux locaux de

type capillaire. Cheapernet et Starlan, par exemple, sont capables d'irriguer les différents bureaux de l'entreprise à des coûts nettement inférieurs à ceux du réseau Ethernet de base, ou Ethernet jaune, lequel doit son nom à la couleur du câble coaxial utilisé.

La figure 16.2 illustre l'architecture générale d'un environnement Ethernet partagé d'entreprise.

Figure 16.2

Architecture d'un réseau Ethernet partagé d'entreprise



Les réseaux capillaires sont formés à partir du câblage partant du répartiteur d'étage. De plus en plus souvent, les nouveaux bâtiments sont précâblés selon une structure identique à celle du réseau téléphonique à partir du répartiteur d'étage.

Les caractéristiques des câblages utilisés sont les suivantes :

- **Câblage banalisé.** Un même câble peut être utilisé pour raccorder un combiné téléphonique ou un terminal informatique.
- **Câblage non banalisé.** Le câble mis en place pour les communications des postes de travail informatiques est différent de celui pour la connexion des combinés téléphoniques.

On peut réaliser divers types de réseaux capillaires à partir du système de câblage. Le choix de la qualité du câble est important en cas de contrainte de distance. Il vaut mieux limiter la distance entre le local technique et la périphérie à une cinquantaine de mètres. La recommandation américaine de l'ANSI propose une limitation à 295 pieds (environ 90 m).

La tendance actuelle consiste à mettre en place un câblage banalisé puisque l'intégration de la téléphonie et de l'informatique avec VoIP (Voice over IP) est une direction inéluctable (voir le chapitre 4).

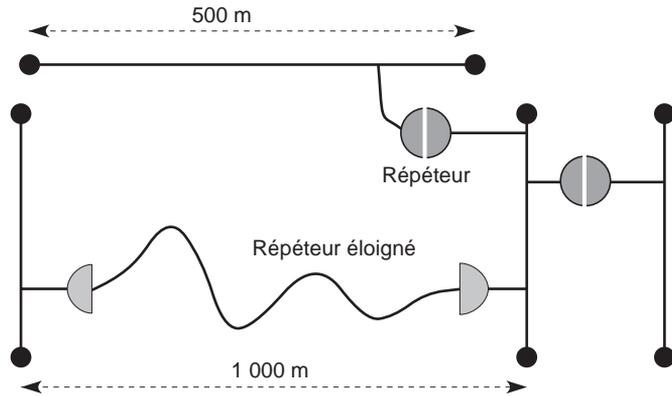
Caractéristiques des réseaux Ethernet partagés

Les caractéristiques des réseaux Ethernet partagés sont décrites dans la norme ISO 8802.3 10Base5.

La topologie d'un réseau Ethernet comprend des brins de 500 m au maximum, interconnectés les uns aux autres par des répéteurs. Ces répéteurs sont des éléments actifs qui récupèrent un signal et le retransmettent après régénération. Les raccordements des matériels informatiques peuvent s'effectuer tous les 2,5 m, ce qui permet jusqu'à 200 connexions par brin. Dans de nombreux produits, les spécifications indiquent que le signal ne doit jamais traverser plus de deux répéteurs et qu'un seul peut être éloigné. La régénération du signal s'effectue une fois franchie une ligne d'une portée de 1 000 m. La longueur maximale est de 2,5 km, correspondant à trois brins de 500 m et

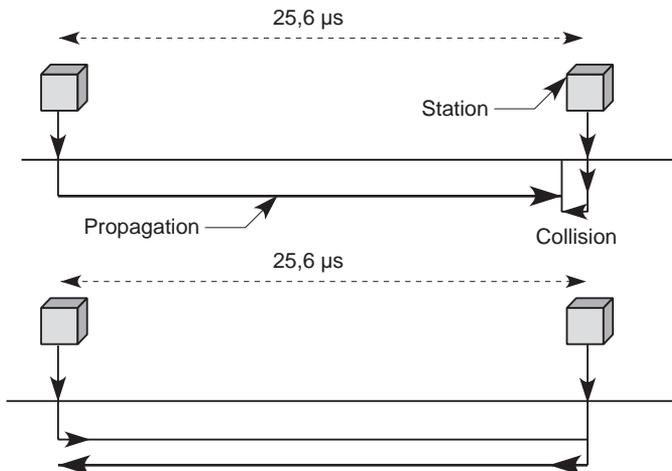
un répéteur éloigné (voir figure 16.3). Cette limitation de la distance à 2,5 km n'est cependant pas une caractéristique de la norme. Nous verrons un peu plus loin que l'on peut s'affranchir de ces contraintes de trois répéteurs et atteindre une distance totale de l'ordre de 5 km.

Figure 16.3
Topologie d'Ethernet



La seule contrainte à prendre en compte est le temps maximal qui s'écoule entre l'émission et la réception du signal dans le coupleur le plus éloigné. Ce temps ne doit pas excéder une valeur de 25,6 μ s. En effet, lors d'une collision, le temps avant réémission est un multiple de 51,2 μ s. Pour éviter une nouvelle collision entre deux trames réémises sur des tranches de temps différentes, il doit s'écouler au maximum 51,2 μ s entre le moment de l'émission et celui de l'écoute de la collision. Le temps aller est au maximum de 25,6 μ s, si la collision s'effectue juste avant l'arrivée du signal distant. Il faut également 25,6 μ s pour remonter la collision jusqu'à la station initiale (voir figure 16.4). De plus, la longueur d'une trame doit être au minimum égale au temps aller-retour de façon que l'émetteur puisse enregistrer une collision. Cette longueur minimale est de 64 octets. On retrouve bien 51,2 μ s de temps minimal de propagation en remarquant que 64 octets équivalent à 512 bits, qui, à la vitesse de 10 Mbit/s, requièrent un temps d'émission de 51,2 μ s.

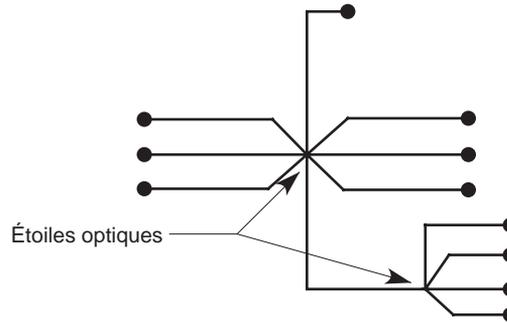
Figure 16.4
Temps maximal entre émission et réception d'une collision



Tout réseau pour lequel le temps aller-retour est inférieur à $51,2 \mu\text{s}$ est susceptible d'utiliser la norme IEEE 802.3. La vitesse de propagation sur un câble coaxial étant approximativement de $200\,000 \text{ km/s}$, la portée maximale sur un même câble est de 5 km environ. Dans la topologie de base, une grande partie du temps de propagation est perdue dans les répéteurs. Pour atteindre des distances supérieures à 4 km , certains câblages utilisent des étoiles optiques passives, qui permettent de diffuser le signal vers plusieurs brins Ethernet sans perte de temps. Dans ce cas, la déperdition d'énergie sur l'étoile optique pouvant atteindre plusieurs décibels, il n'est pas possible d'en émettre plus de deux ou trois en série. On obtient alors la topologie illustrée à la figure 16.5.

Figure 16.5

Topologie Ethernet
avec étoiles optiques



La technique d'accès au support de transmission choisie par Ethernet est l'accès aléatoire avec détection de la porteuse de type persistant. Si le module d'émission-réception détecte la présence d'autres émissions sur le câble, le coupleur Ethernet ne peut émettre de trame.

Si une collision se produit, le module d'émission-réception émet un signal pour interrompre la collision et initialiser la procédure de retransmission. L'interruption de la collision intervient après l'envoi d'une séquence binaire, appelée séquence de bourrage (*jam*), qui vérifie que la durée de la collision est suffisante pour être remarquée par toutes les stations en transmission impliquées dans la collision.

Il est nécessaire de définir plusieurs paramètres pour expliquer la procédure de reprise sur une collision. Le temps aller-retour maximal correspond au temps qui s'écoule entre les deux points les plus éloignés du réseau local, à partir de l'émission d'une trame jusqu'au retour d'un signal de collision. Cette valeur est de $51,2 \mu\text{s}$ ou de 512 temps d'émission d'un bit, ou encore 512 temps élémentaires. La séquence de bourrage dure 48 temps élémentaires. Ethernet définit encore une « tranche de temps », qui est le temps minimal avant retransmission ($51,2 \mu\text{s}$). Le temps avant retransmission dépend également du nombre n de collisions déjà effectuées. Le délai aléatoire de retransmission dans Ethernet est un multiple de la tranche de temps, suivant l'algorithme $0 < r < 2^k$, où $k = \min(n, 10)$ et n est le nombre de collisions déjà effectuées. Si, au bout de 16 essais, la trame est encore en collision, l'émetteur abandonne sa transmission. Une reprise s'effectue à partir des protocoles de niveaux supérieurs, après le temps $r \times 51,2 \mu\text{s}$.

Lorsque deux trames entrent en collision pour la première fois, elles ont une chance sur deux d'entrer de nouveau en collision : $r = 1$ ou 0 . Bien que l'algorithme de retransmission, ou de back-off, ne semble pas optimal, c'est la technique qui donne les meilleurs résultats, car il vaut mieux essayer de remplir le support de transmission plutôt que d'attendre des temps trop longs et de perdre en débit.

Un calcul simple montre que les temps de retransmission, après une dizaine de collisions successives, ne représentent que quelques millisecondes, c'est-à-dire un temps encore très court. CSMA/CD étant une technique probabiliste, il est difficile de cerner le temps qui s'écoule entre l'arrivée de la trame dans le coupleur de l'émetteur et le départ de la trame du coupleur récepteur jusqu'au destinataire. Ce temps dépend du nombre de collisions, ainsi que, indirectement, du nombre de stations, de la charge du réseau et de la distance moyenne entre deux stations. Plus le temps de propagation est important, plus le risque de collision augmente.

Tous les calculs rapportés ici se réfèrent à un réseau Ethernet à 10 Mbit/s. Si nous augmentons la vitesse du réseau en multipliant par 10 son débit (100 Mbit/s), la distance maximale entre les deux stations les plus éloignées est également divisée par 10, et ainsi de suite, de telle sorte que nous obtenons en gardant la même longueur minimale de la trame :

10 Mbit/s => 5 km

100 Mbit/s => 500 m

1 Gbit/s => 50 m

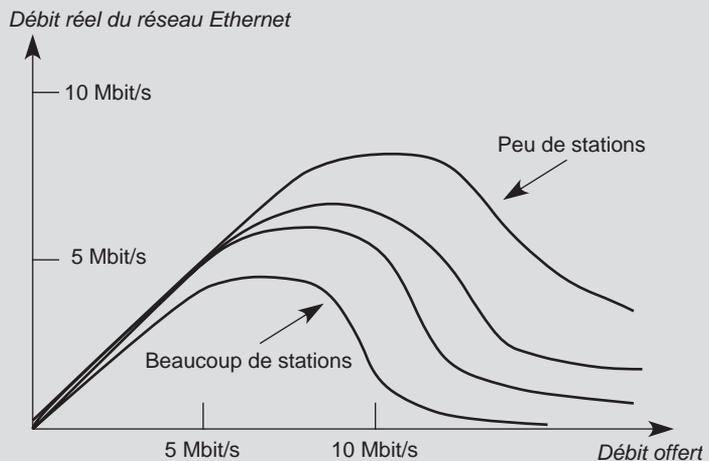
10 Gbit/s => 5 m

Ces distances s'entendent sans l'existence de répéteurs ou de hubs, qui demandent un certain temps de traversée et diminuent d'autant la distance maximale. Pour contrer ce problème, deux solutions peuvent être mises en œuvre : augmenter la taille de la trame Ethernet ou passer à la commutation. Le réseau Ethernet 1 Gbit/s utilise une trame minimale de 512 octets, qui lui permet de revenir à une distance maximale de 400 m. Le réseau à 10 Gbit/s n'utilise que la commutation.

Performance d'un réseau Ethernet 10 Mbit/s

De nombreuses courbes de performances montrent le débit réel en fonction du débit offert, c'est-à-dire le débit provenant des nouvelles trames additionné du débit provoqué par les retransmissions. La figure 16.6 illustre le débit réel en fonction du débit offert.

Figure 16.6
Performance du réseau Ethernet



Performance d'un réseau Ethernet 10 Mbit/s (suite)

On peut montrer qu'un dysfonctionnement se produit dès que le débit offert dépasse une certaine limite, en raison de collisions de plus en plus nombreuses. Pour éviter ce type de problème sur un réseau Ethernet, il faut que le débit instantané soit inférieur à 5 Mbit/s. Pour obtenir cette valeur maximale, on limite le nombre de stations à plusieurs centaines de PC ou à plusieurs dizaines de postes de travail. Ce sont les chiffres le plus souvent cités.

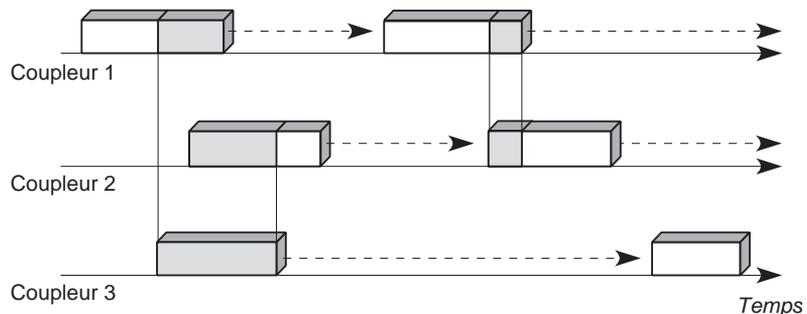
Pour résoudre les problèmes de débit, une solution consiste à réaliser un ensemble de réseaux Ethernet interconnectés par des passerelles. À la différence du répéteur, la passerelle est un organe intelligent, capable de sélectionner les trames qui doivent être émises vers les réseaux suivants. La passerelle doit gérer un adressage. Elle limite de ce fait le débit sur chaque réseau. On obtient dans ce cas des topologies sans contrainte de distance. La passerelle peut être de différents types. Il s'agit d'un pont lorsqu'on a uniquement un problème d'adresse physique à résoudre. On parle alors de pont filtrant pour filtrer les trames qui passent. Les trames destinées à une station située sur le même réseau sont stoppées, tandis que les autres trames sont réémises vers le réseau suivant.

L'accès aléatoire

L'accès aléatoire, qui consiste à émettre à un instant totalement aléatoire, s'appuie sur la méthode aloha. Cette dernière tient son nom d'une expérience effectuée sur un réseau reliant les diverses îles de l'archipel hawaïen au début des années 70. Dans cette méthode, lorsqu'un coupleur a de l'information à transmettre, il l'envoie, sans se préoccuper des autres usagers. S'il y a une collision, c'est-à-dire superposition des signaux de deux ou plusieurs utilisateurs, les signaux deviennent indéchiffrables et sont perdus. Ils sont retransmis ultérieurement, comme illustré à la figure 16.7, sur laquelle les coupleurs 1, 2 et 3 entrent en collision. Le coupleur 1 retransmet sa trame en premier parce qu'il a tiré le plus petit temporisateur. Ensuite, le coupleur 2 émet, et ses signaux entrent en collision avec le coupleur 1. Tous deux retirent un temps aléatoire de retransmission. Le coupleur 3 vient écouter alors que les coupleurs 1 et 2 sont silencieux, de telle sorte que la trame du coupleur 3 passe avec succès. La technique aloha est à l'origine de toutes les méthodes d'accès aléatoire.

Figure 16.7

Principe de fonctionnement de l'aloha pur



Outre son extrême simplicité, l'aloha a l'avantage de ne nécessiter aucune synchronisation et d'être complètement décentralisé. Son principal inconvénient réside dans la perte d'informations résultant d'une collision et dans son manque d'efficacité, puisque la transmission des trames en collision n'est pas interrompue.

Le débit d'un tel système devient très faible dès que le nombre de coupleurs augmente. On peut démontrer mathématiquement que si le nombre de stations tend vers l'infini, le débit

devient nul. À partir d'un certain moment, le système n'est plus stable. Afin de diminuer la probabilité de conflit entre les usagers, diverses améliorations de cette technique ont été proposées (*voir encadré*).

Slotted aloha, ou aloha en tranches

Une amélioration de la technique aloha a consisté à découper le temps en tranches de temps, ou slots, et à n'autoriser l'émission de trames qu'en début de tranche, le temps de transmission d'une trame demandant exactement une tranche de temps. De la sorte, il n'y a pas de collision si une seule trame transmet en début de tranche. En revanche, si plusieurs trames commencent à émettre en début de tranche, les émissions de trames se superposent tout le long du slot. Dans ce dernier cas, il y a retransmission après un temps aléatoire.

Cette méthode améliore le débit pendant la période de démarrage mais reste instable. De plus, on constate un coût supplémentaire provenant d'une complication des appareils, puisque toutes les émissions doivent être synchronisées.

CSMA, ou l'accès aléatoire avec écoute de la porteuse

La technique CSMA (Carrier Sense Multiple Access) consiste à écouter le canal avant d'émettre. Si le coupleur détecte un signal sur la ligne, il diffère son émission à une date ultérieure. Cela réduit considérablement les risques de collision, sans toutefois les supprimer complètement. Si, durant le temps de propagation entre le couple de stations les plus éloignées (période de vulnérabilité), un coupleur ne détecte pas l'émission d'une trame, il peut y avoir superposition de signaux. De ce fait, il faut réémettre ultérieurement les trames perdues.

De nombreuses variantes de cette technique ont été proposées, qui diffèrent par trois caractéristiques :

- La stratégie suivie par le coupleur après détection de l'état du canal.
- La manière dont les collisions sont détectées.
- La politique de retransmission des messages après collision.

Ses principales variantes sont les suivantes :

- **CSMA non persistant.** Le coupleur écoute le canal lorsqu'une trame est prête à être envoyée. Si le canal est libre, le coupleur émet. Dans le cas contraire, il recommence le même processus après un délai aléatoire.
- **CSMA persistant.** Un coupleur prêt à émettre écoute préalablement le canal et transmet s'il est libre. S'il détecte l'occupation de la porteuse, il continue à écouter jusqu'à ce que le canal soit libre et émet à ce moment-là. Cette technique permet de perdre moins de temps que dans le cas précédent, mais elle a l'inconvénient d'augmenter la probabilité de collision, puisque les trames qui s'accumulent pendant la période occupée sont toutes transmises en même temps.
- **CSMA p-persistant.** L'algorithme est le même que précédemment, mais, lorsque le canal devient libre, le coupleur émet avec la probabilité p . En d'autres termes, le coupleur diffère son émission avec la probabilité $1 - p$. Cet algorithme réduit la probabilité de collision. En supposant que deux terminaux souhaitent émettre, la collision est inéluctable dans le cas standard. Avec ce nouvel algorithme, il y a une probabilité $1 - p$ que chaque terminal ne transmette pas, ce qui évite la collision. En revanche, il augmente le temps avant transmission, puisqu'un terminal peut choisir de ne pas émettre, avec une probabilité $1 - p$, alors que le canal est libre.

- **CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection).** Cette technique d'accès aléatoire normalisée par le groupe de travail IEEE 802.3 est actuellement la plus utilisée. À l'écoute préalable du réseau s'ajoute l'écoute pendant la transmission. Un coupleur prêt à émettre ayant détecté le canal libre transmet et continue à écouter le canal. Le coupleur persiste à écouter, ce qui est parfois indiqué par le sigle CSMA/CD persistant. S'il se produit une collision, il interrompt dès que possible sa transmission et envoie des signaux spéciaux, appelés bits de bourrage, afin que tous les coupleurs soient prévenus de la collision. Il tente de nouveau son émission ultérieurement suivant un algorithme que nous présenterons ultérieurement.

La figure 16.8 illustre le CSMA/CD. Dans cet exemple, les coupleurs 2 et 3 tentent d'émettre pendant que le coupleur 1 émet sa propre trame. Les coupleurs 2 et 3 se mettent à l'écoute et émettent en même temps, au délai de propagation près, dès la fin de la trame Ethernet émise par le coupleur 1. Une collision s'ensuit. Comme les coupleurs 2 et 3 continuent d'écouter le support physique, ils se rendent compte de la collision, arrêtent leur transmission et tirent un temps aléatoire pour démarrer le processus de retransmission.

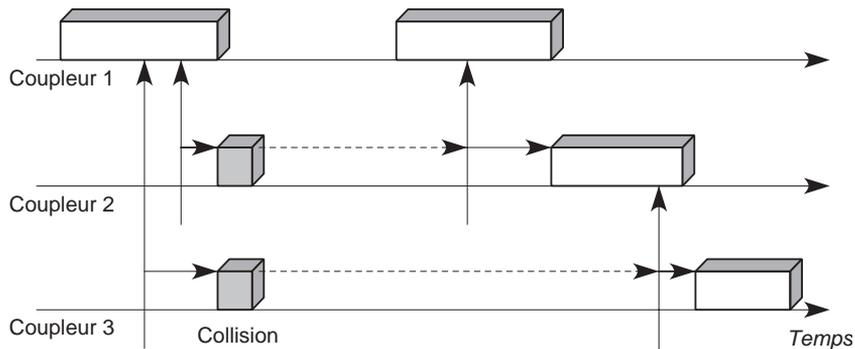


Figure 16.8

Principe de fonctionnement du CSMA/CD

Le CSMA/CD engendre un gain d'efficacité par rapport aux autres techniques d'accès aléatoire car il y a détection immédiate des collisions et interruption de la transmission en cours. Les coupleurs émetteurs reconnaissent une collision en comparant le signal émis avec celui qui passe sur la ligne. Les collisions ne sont donc plus reconnues par absence d'acquittement mais par détection d'interférences. Cette méthode de détection des conflits est relativement simple, mais elle nécessite des techniques de codage suffisamment performantes pour reconnaître facilement une superposition de signaux. On utilise généralement pour cela des techniques de codage différentiel, tel le code Manchester différentiel.

- **CSMA/CA.** Moins connu que le CSMA/CD, l'accès CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) commence à être fortement utilisée dans les réseaux Wi-Fi, c'est-à-dire les réseaux Ethernet sans fil IEEE 802.11 (voir le chapitre 22). C'est une variante du CSMA/CD, qui permet à la méthode CSMA de fonctionner lorsque la détection des collisions n'est pas possible, comme dans le hertzien. Son principe de fonctionnement consiste à résoudre la contention avant que les données soient transmises en utilisant des accusés de réception et des temporisateurs.

Les coupleurs désirant émettre testent le canal à plusieurs reprises afin de s'assurer qu'aucune activité n'est détectée. Tout message reçu doit être immédiatement acquitté par le récepteur. L'envoi de nouveaux messages n'a lieu qu'après un certain délai, de façon à garantir un transport sans perte d'information. Le non-retour d'un accusé de réception, au bout d'un intervalle de temps prédéterminé, permet de détecter s'il y a eu collision. Cette stratégie rend non seulement possible l'implémentation d'un mécanisme d'acquiescement au niveau trame mais présente l'avantage d'être simple et économique, puisqu'elle ne nécessite pas de circuit de détection de collision, contrairement au CSMA/CD.

Il existe diverses techniques de CSMA avec résolution des collisions, parmi lesquelles le CSMA/CR (Carrier Sense Multiple Access/Collision Resolution). Certaines variantes du CSMA utilisent par ailleurs des mécanismes de priorité pouvant entrer sous ce vocable, qui évitent les collisions par des niveaux de priorité distincts, associés aux différentes stations connectées au réseau.

La trame Ethernet

La trame Ethernet du standard IEEE 802.3 est illustrée à la figure 16.9. Cette structure de trame est légèrement différente de la première version Ethernet des trois partenaires Digital, Intel et Xerox. Depuis la normalisation IEEE 802.3, tous les constructeurs offrent des coupleurs traitant les deux formats de trame. Nous détaillons les nouvelles extensions de cette trame Ethernet ultérieurement dans ce chapitre.

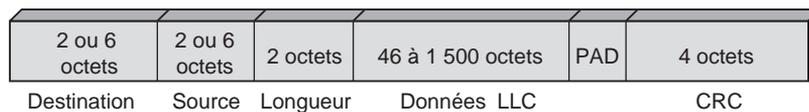


Figure 16.9

Format de la trame Ethernet

La zone Longueur indique la longueur du champ de données provenant de la couche supérieure LLC. La zone PAD permet de remplir la zone de données pour atteindre la valeur de 46 octets, longueur minimale pour que la trame totale atteigne 64 octets avec les octets de préambule et de délimitation.

La détection des erreurs est assurée par un polynôme cyclique $g(x)$ tel que $g(x) = x^{32} + x^{26} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1$. Ce polynôme donne naissance à une séquence de contrôle (CRC) sur 4 octets. L'émission de la trame est précédée d'un drapeau, ou préambule, permettant au récepteur et au répéteur de synchroniser leurs horloges et leurs divers circuits physiques. Tous les coupleurs sur le réseau enregistrent la trame au fur et à mesure de son passage. Le composant chargé de l'extraction des données — le paquet — incluses dans la trame vérifie la concordance entre l'adresse de la station et l'adresse de destination. S'il y a concordance, le paquet est transféré vers l'utilisateur après vérification de la correction de la trame, vérification effectuée par l'intermédiaire de la séquence de contrôle.

La carte coupleur Ethernet supporte un logiciel de liaison de type LLC 1, qui ne récupère pas les trames erronées (voir le chapitre 6). Cette opération incombe à un niveau de reprise supérieur, implémenté sur la machine hôte. Comme nous l'avons déjà constaté, cette démarche peut être considérée comme entrant en contradiction avec l'architecture

normalisée par l'ISO, qui spécifie que la couche 2 doit prendre en charge les reprises sur erreur de façon que ce niveau apporte au réseau un transport fiable des informations. Cependant, plusieurs raisons peuvent être avancées pour ce choix :

- La fiabilité des communications dans un environnement limité géographiquement donne de faibles taux d'erreur en comparaison de ce qui se passe sur de longues distances.
- La nécessité de donner une certaine liberté à l'utilisateur. Dans certains cas, la correction des erreurs n'est pas nécessaire et ne fait qu'alourdir le transport, comme celui de la parole numérisée.
- La lourdeur des techniques de reprise ne pourrait en aucun cas garantir un débit mais, au contraire, diviserait le débit brut au minimum par 5.

Pour satisfaire à la demande des utilisateurs, le débit des réseaux Ethernet doit augmenter de façon importante. Trois grandes catégories de solutions sont proposées :

- augmentation du débit du support partagé ;
- utilisation optimisée du support physique par une commutation ou une commutation partielle ;
- ajout de canaux synchrones.

Les trois propositions suivantes de l'IEEE correspondent à ces solutions :

- augmentation des vitesses en partage : Fast Ethernet à 100 Mbit/s, Gigabit Ethernet à 1 000 Mbit/s et 10 Gbit/s ;
- IEEE 802.12 100VG AnyLAN, en semi-commuté ;
- IEEE 802.9 10BaseM (Ethernet multimédia IsoEneT).

Les réseaux Ethernet 10 Mbit/s

Les réseaux Ethernet à 10 Mbit/s ont été les premiers à être introduits sur le marché. Ils représentent encore une proportion importante, bien que les normes à 100 Mbit/s tendent à les supplanter. Cette section examine les différents produits Ethernet partagé travaillant à la vitesse de 10 Mbit/s.

Cheapernet

Cheapernet est un réseau local Ethernet partagé utilisant un câble coaxial particulier, normalisé sous le vocable 10Base2. Le câble coaxial utilisé n'est plus le câble jaune blindé mais un câble fin de couleur brune non blindé, aussi appelé *thin cable* ou câble RG-58. Ce câble a une moindre résistance au bruit électromagnétique et induit un affaiblissement plus important du signal.

Les brins sont limités à 185 m au lieu de 500 m. Les répéteurs sont de type Ethernet et travaillent à 10 Mbit/s. La longueur totale peut atteindre 925 ou 1 540 m suivant les versions. Les contraintes sont les mêmes que pour le réseau Ethernet en ce qui concerne le temps aller-retour. En revanche, pour obtenir une qualité comparable, il faut limiter la distance sans répéteur. La longueur maximale a ici moins d'importance, car le réseau Cheapernet est un réseau capillaire permettant d'aller jusqu'à l'utilisateur final à moindre coût.

Starlan

Né d'une étude d'AT&T sur la qualité du câblage téléphonique à partir du répartiteur d'étage, le réseau Starlan répond à une tout autre nécessité que le réseau Cheapernet. Sur les réseaux capillaires de l'entreprise, des débits de 1 Mbit/s étaient acceptables dans les années 80. L'arrivée de Starlan correspondait à la volonté d'utiliser cette infrastructure capillaire, c'est-à-dire le câblage téléphonique, à partir du répartiteur d'étage (voir figure 16.10).

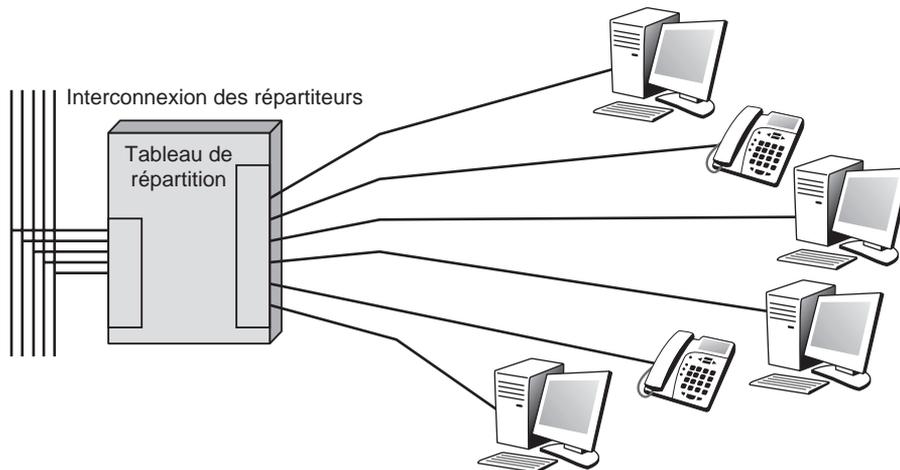


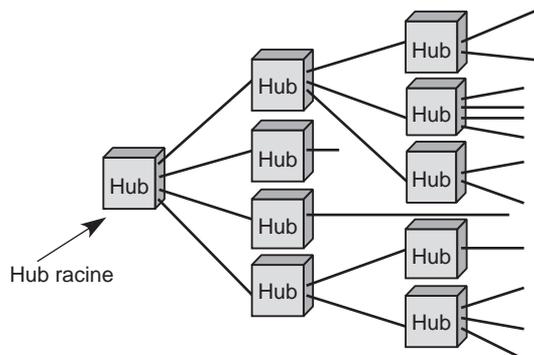
Figure 16.10

Câblage à partir du répartiteur d'étage

Comme les câbles à partir du répartiteur d'étage ne permettaient guère qu'un débit de 1 Mbit/s, on a repris la technique Ethernet en l'adaptant à un câblage en étoile à une vitesse de 1 Mbit/s. C'est toujours la méthode d'accès CSMA/CD qui est utilisée sur un réseau en étoile actif, comme celui illustré à la figure 16.11.

Figure 16.11

Architecture d'un réseau Starlan



Étant donné le grand nombre d'entreprises qui ont renouvelé leur câblage avec des paires de fils de qualité, le Starlan à 10 Mbit/s a rencontré un succès massif. Les réseaux Starlan à 10 Mbit/s portent aussi le nom d'Ethernet 10 Mbit/s sur paires de fils torsadées pour bien indiquer que le coupleur est le même que celui des réseaux Ethernet sur câble coaxial à 10 Mbit/s.

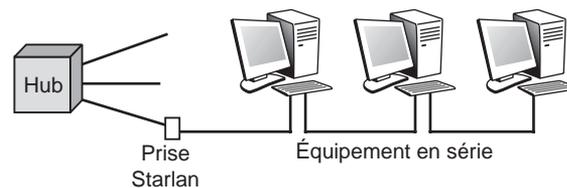
La norme Starlan IEEE 802.3 1Base5 permet de disposer d'un maximum de cinq nœuds, ou hubs, successifs à partir du nœud de base inclus. Entre deux nœuds, une distance maximale de 250 m est permise. Dans la réalité, on retrouve exactement les mêmes contraintes que dans le réseau Ethernet, c'est-à-dire un temps aller-retour maximal de 512 μ s entre les deux points les plus éloignés, puisque la vitesse est de 1 Mbit/s au lieu de 10 Mbit/s. Pour le réseau local Starlan à 10 Mbit/s, on retrouve la valeur de 51,2 μ s.

Le hub est un nœud actif capable de régénérer les signaux reçus vers l'ensemble des lignes de sortie, de telle sorte qu'il y ait diffusion. Le hub permet de raccorder les équipements terminaux situés aux extrémités des branches Starlan.

Classiquement, à chaque équipement correspond une prise de connexion Starlan. Cependant, pour ajouter un terminal supplémentaire dans un bureau, il faudrait tirer un câble depuis le répartiteur d'étage ou le sous-répartiteur le plus proche, à condition qu'existe encore une sortie possible. Une solution de rechange consiste à placer sur une même prise plusieurs machines connectées en série, comme illustré la figure 16.12.

Figure 16.12

Équipements en série connectés sur une prise Starlan unique



Le Fast Ethernet 100 Mbit/s

Fast Ethernet est la dénomination de l'extension à 100 Mbit/s du réseau Ethernet à 10 Mbit/s. C'est le groupe de travail IEEE 802.3u qui en est à l'origine. La technique d'accès est la même que dans la version Ethernet 10 Mbit/s, mais à une vitesse multipliée par 10. Les trames transportées sont identiques. Cette augmentation de vitesse peut se heurter au système de câblage et à la possibilité ou non d'y faire transiter des débits aussi importants.

C'est la raison pour laquelle trois sous-normes ont été proposées pour le 100 Mbit/s :

- IEEE 802.3 100BaseTX, qui requiert deux paires non blindées (UTP) de catégorie 5 ou deux paires blindées (STP) de type 1.
- IEEE 802.3 100BaseT4, qui requiert quatre paires non blindées (UTP) de catégories 3, 4 et 5.
- IEEE 802.3 100BaseFX, qui requiert deux fibres optiques.

La distance maximale entre les deux points les plus éloignés est fortement réduite par rapport à la version à 10 Mbit/s. La longueur minimale de la trame étant toujours de 64 octets, le temps de transmission est de 5,12 μ s. On en déduit que la distance maximale qui peut être parcourue dans ce laps de temps est de l'ordre de 1 000 m, ce qui représente pour le réseau Fast Ethernet une longueur maximale d'approximativement 500 m. Comme le temps de traversée des hubs est relativement important, la plupart des constructeurs limitent la distance maximale à 210 m pour le Fast Ethernet. Le temps entre deux trames, ou intergap, est réduit à 0,96 μ s.

Cette solution a l'avantage d'offrir une bonne compatibilité avec la version à 10 Mbit/s, qui permet de relier sur un même hub des stations à 10 Mbit/s et à 100 Mbit/s. Le coût de connexion du 100 Mbit/s est aujourd'hui le même que celui de l'Ethernet classique, dix fois moins rapide.

Les réseaux Fast Ethernet servent souvent de réseaux d'interconnexion de réseaux Ethernet 10 Mbit/s. La distance relativement limitée couverte par le Fast Ethernet ne lui permet toutefois pas d'« arroser » une entreprise un peu grande. Le Gigabit Ethernet, que nous détaillons ci-après, ne résout pas davantage ce problème dans sa version partagée. En revanche, la version commutée n'ayant plus de contrainte de distance, le Gigabit Ethernet commuté est une des solutions d'interconnexion des réseaux Fast Ethernet.

Une autre solution pour étendre la couverture du réseau Ethernet consiste à relier des Fast Ethernet par des ponts destinés à filtrer les trames à l'aide de l'adresse MAC. Ces ponts ayant les mêmes fonctionnalités que les commutateurs, on trouve aujourd'hui dans les grandes entreprises des réseaux à transfert de trames Ethernet qui utilisent des commutateurs Ethernet. Nous examinons ces nouvelles architectures ultérieurement dans ce chapitre.

Le Gigabit Ethernet (GbE)

Le Gigabit Ethernet, ou GbE, est l'avant-dernière évolution du standard Ethernet. Plusieurs améliorations ont été apportées pour cela au Fast Ethernet à 100 Mbit/s.

L'interface à nouveau modifiée s'appelle GMII (Gigabit Media Independent Interface). Elle comporte un chemin de données sur 8 bits, au lieu de 4 dans la version moins puissante. Les émetteurs-récepteurs travaillent avec une horloge cadencée à 125 MHz. Le codage adopté provient des produits Fibre Channel pour atteindre le gigabit par seconde. Un seul type de répéteur est désormais accepté dans cette nouvelle version.

Les différentes solutions normalisées sont les suivantes :

- 1000BaseCX, à deux paires torsadées de 150 Ω ;
- 1000BaseLX, à une paire de fibre optique de longueur d'onde élevée ;
- 1000BaseSX, à une paire de fibre optique de longueur d'onde courte ;
- 1000BaseT, à quatre paires de catégorie 5 UTP.

La technique d'accès au support physique, le CSMA/CD, est également modifiée. Pour être compatible avec les autres versions d'Ethernet, ce qui est un principe de base, la taille de la trame émise doit se situer entre 64 et 1 500 octets. Les 64 octets, c'est-à-dire 512 bits, correspondent à un temps d'émission de 512 ns. Ce temps de 512 ns représente la distance maximale du support pour qu'une station en émission ne se déconnecte pas avant d'avoir reçu un éventuel signal de collision. Cela représente 100 m pour un aller-retour. Si aucun hub n'est installé sur le réseau, la longueur maximale du support physique est de 50 m. Dans les faits, avec un hub de rattachement et des portions de câble jusqu'aux coupleurs, la distance maximale est ramenée à quelques mètres. Pour éviter cette distance trop courte, les normalisateurs ont augmenté artificiellement la longueur de la trame pour la porter à 512 octets. Le coupleur ajoute des octets de bourrage qui sont ensuite enlevés par le coupleur récepteur.

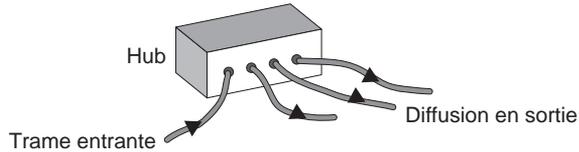
S'il s'agit d'une bonne solution pour agrandir le réseau Gigabit, le débit utile est toutefois très faible si toutes les trames à transmettre ont une longueur de 64 octets, un huitième de la bande passante étant utilisé dans ce cas.

Le Gigabit Ethernet accepte les répéteurs ou les hubs lorsqu'il y a plusieurs directions possibles. Dans ce dernier cas, un message entrant est recopié sur toutes les lignes de sortie. La figure 16.13 illustre un répéteur Gigabit correspondant à la norme

IEEE 802.3z. Les différentes solutions du Gigabit Ethernet peuvent s'interconnecter par l'intermédiaire d'un répéteur ou d'un hub.

Figure 16.13

Hub Gigabit Ethernet



Le Gigabit Ethernet fonctionne également en mode commuté, dans une configuration full-duplex. On peut, par ce moyen, interconnecter des Gigabit Ethernet entre eux ou des Fast Ethernet et des Ethernet classiques.

Des routeurs Gigabit sont également disponibles lorsqu'on remonte jusqu'à la couche réseau, par exemple la couche IP. Dans ce cas, il faut récupérer le paquet IP pour pouvoir router la trame Ethernet. La figure 16.14 illustre une interconnexion de deux réseaux commutés par un routeur Gigabit.

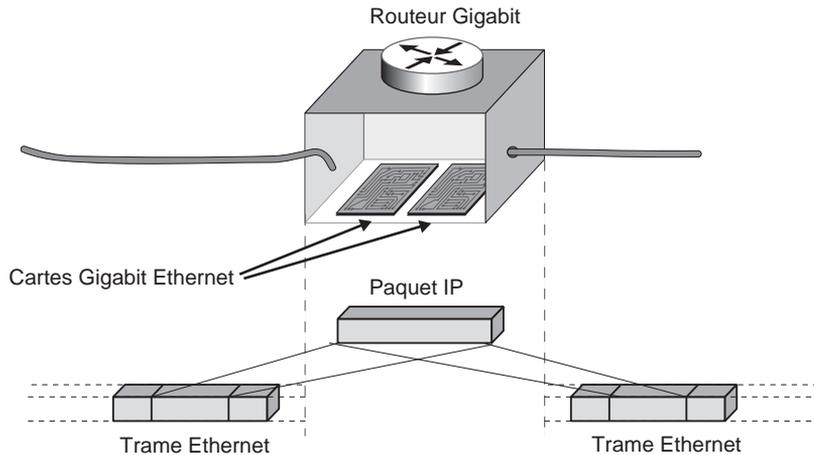


Figure 16.14

Interconnexion de deux réseaux Ethernet commutés par un routeur

La gestion du réseau Gigabit, comme celle des réseaux Ethernet plus anciens, est assurée par des techniques classiques, essentiellement SNMP (Simple Network Management Protocol). La MIB (Management Information Base) du Gigabit Ethernet est détaillée dans le standard IEEE 802.3z.

Les réseaux Ethernet commutés

Nous avons décrit en détail à la section précédente les techniques utilisées dans les réseaux Ethernet partagés, dans lesquels un même câble est partagé par plusieurs machines.

L'autre solution mise en œuvre dans les réseaux Ethernet est la commutation. Dans ce cas, le support physique n'est pas partagé, deux machines s'échangeant des trames Ethernet sur une liaison. Cette solution change totalement la donne, puisqu'il n'y a plus de collision.

La commutation Ethernet (full-duplex)

La commutation Ethernet, ou Ethernet FDSE (Full Duplex Switched Ethernet), est née au début des années 90. Avant l'arrivée de l'Ethernet commuté, les réseaux Ethernet partagés étaient découpés en sous-réseaux partagés autonomes, reliés entre eux par des ponts. De ce fait, on multipliait le trafic par le nombre de sous-réseaux.

Les ponts ne sont en fait que des commutateurs Ethernet qui mémorisent les trames et les réémettent vers d'autres réseaux Ethernet. En poursuivant cette logique à l'extrême, on peut découper le réseau jusqu'à n'avoir qu'une seule station par réseau Ethernet. On obtient alors la commutation Ethernet.

Le réseau Ethernet FDSE est un réseau particulièrement simple puisqu'il n'y a que deux stations : celle que l'on veut connecter au réseau et le commutateur de raccordement. On dispose donc d'un Ethernet par terminal relié directement au commutateur.

Dans la commutation Ethernet, chaque carte coupleur est reliée directement à un commutateur Ethernet, lequel se charge de rediriger les trames dans la bonne direction. Il faut bien parler de trame ici puisqu'un préambule permet d'en détecter le début. La commutation demande une référence qui, *a priori*, n'existe pas dans le monde Ethernet, aucun paquet de supervision n'ouvrant le circuit virtuel en posant des références. Le mot de commutateur peut donc être considéré comme inexact puisqu'il n'y a pas de référence. Cependant, il est possible de parler de commutation, si l'on considère l'adresse du destinataire comme une référence. Le circuit virtuel est alors déterminé par la suite de références égale à l'adresse du destinataire sur 6 octets. Pour réaliser cette commutation de bout en bout, chaque commutateur doit avoir la possibilité de déterminer la liaison de sortie en fonction de la référence, c'est-à-dire de la valeur de l'adresse du récepteur.

Cette technique de commutation peut présenter les difficultés suivantes :

- Gestion des adresses de tous les coupleurs raccordés au réseau. Les techniques de VLAN, que nous examinons plus loin dans ce chapitre, permettent de résoudre ce problème.
- Gestion des congestions éventuelles au sein d'un commutateur.

Du fait de la seconde difficulté, il faut mettre en place des techniques de contrôle susceptibles de prendre en charge, sur les liaisons entre commutateurs, les trames provenant simultanément de tous les coupleurs Ethernet. On retrouve là les caractéristiques des architectures des réseaux de commutation. La technique de reprise sur une collision n'est plus utile puisqu'il n'y a pas de collision dans ce cas. En revanche, la limitation de distance n'existant plus, on peut réaliser des réseaux en commutation Ethernet à la taille de la planète.

L'environnement Ethernet s'impose actuellement par sa simplicité de mise en œuvre tant que le réseau reste de taille limitée. C'est une solution réseau qui présente l'avantage de s'appuyer sur l'existant, à savoir les coupleurs et les divers réseaux Ethernet que de nombreuses entreprises ont mis en place pour créer leurs réseaux locaux.

Puisque les données produites au format IP, IPX (Internetwork Packet eXchange) ou autre sont présentes dans des trames Ethernet en vue d'être transportées dans l'environnement local, il est tentant de commuter directement cette structure sur des liaisons entre réseaux locaux. Comme tous les réseaux de l'environnement Ethernet sont compatibles, toutes les machines émettant des trames Ethernet parlent le même langage et peuvent facilement s'interconnecter. On peut donc réaliser des réseaux extrêmement complexes, avec des segments partagés sur les parties locales et des liaisons commutées sur les longues distances ou entre les commutateurs Ethernet.

L'inconvénient de la commutation de niveau trame réside dans l'adressage de niveau 2, qui correspond à l'adressage plat d'Ethernet. L'adressage plat, ou absolu, ne permet pas de connaître le lieu géographique d'un coupleur d'après sa valeur. Dès que le réseau comporte un grand nombre de postes, ce qui est le cas si l'on accepte une mobilité des terminaux, par exemple, la mise à jour des tables de routage devient quasi impossible puisqu'il n'existe pas de normalisation pour l'automatisation de cette fonction.

La limitation des performances de l'environnement Ethernet est due au partage du support physique par l'ensemble des coupleurs. Pour remédier à cet inconvénient, on peut augmenter la vitesse de base en passant au 100 Mbit/s ou au 1 Gbit/s. Une autre solution consiste à commuter les trames Ethernet. Le premier pas vers la commutation consiste, comme nous l'avons vu, à couper les réseaux Ethernet en petits tronçons et à les relier entre eux par un pont. Le rôle du pont est de filtrer les trames en ne laissant passer que celles destinées à un réseau Ethernet autre que celui d'où provient la trame. De ce fait, on limite le nombre de coupleurs qui se partagent un même réseau Ethernet. Pour que cette solution soit viable, le trafic doit être relativement local.

Dans la commutation, le réseau Ethernet est réduit à sa plus simple expression : un coupleur par réseau Ethernet. Il n'y a donc plus de collision. Suivant l'adresse, le commutateur achemine la trame vers un autre commutateur ou vers un coupleur. La capacité disponible par terminal est de 10 Mbit/s, 100 Mbit/s ou 1 Gbit/s. Toute la difficulté réside dans la complexité des réseaux à commutation de trames Ethernet, avec les problèmes d'ouverture des chemins et de contrôle de flux qu'ils posent.

Comme il existe énormément de coupleurs Ethernet à travers le monde, cette solution de l'Ethernet commuté est en plein essor. Les coupleurs Ethernet devraient se simplifier, toute la puissance de la technique d'accès n'étant plus nécessaire dans ce cas de figure.

Comme expliqué précédemment, l'un des grands avantages de cette technique est de ne plus présenter de limitation de distance, puisque nous sommes en mode commuté. Les distances entre machines connectées peuvent atteindre plusieurs milliers de kilomètres. Un autre avantage est apporté par l'augmentation du débit par terminal. La capacité en transmission peut atteindre 10, 100 Mbit/s ou 1 Gbit/s par machine. La contrepartie de ce gain en débit est le retour à un mode commuté, dans lequel il faut tracer des chemins pour la commutation, mettre en place un contrôle de flux et effectuer une gestion des adresses physiques des coupleurs. En d'autres termes, chaque commutateur doit connaître l'adresse MAC de tous les coupleurs connectés au réseau et savoir dans quelle direction envoyer les trames.

Dans les entreprises, le réseau Ethernet peut consister en une association de réseaux partagés et de réseaux commutés, tous les réseaux Ethernet étant compatibles au niveau de la trame. Si le réseau de l'entreprise est trop vaste pour permettre une gestion de toutes les adresses dans chaque commutateur, il faut diviser le réseau en domaines distincts. Deux solutions sont alors possibles.

- Utiliser le concept de réseau privé virtuel, que nous examinons en détail ultérieurement dans ce chapitre.
- Passer d'un domaine à un autre, en remontant au niveau réseau de l'architecture (couche 3 de l'architecture OSI), c'est-à-dire en récupérant l'information transportée dans la zone de données de la trame et en se servant de l'adresse de niveau réseau pour effectuer le routage. Cet élément de transfert n'est autre, bien sûr, qu'un routeur (*voir le chapitre 27 consacré aux équipements de réseau*).

Il existe deux grands types de commutation :

- La commutation par port, dans laquelle les coupleurs sont directement connectés au commutateur.
- La commutation par segment, dans laquelle ce sont des segments de réseau Ethernet partagé qui sont interconnectés.

Ces deux solutions sont illustrées à la figure 16.15. La partie supérieure de la figure montre un commutateur dont chaque port est connecté à une seule station terminale. Dans la partie inférieure de la figure, le commutateur possède deux ports, sur chacun desquels un Ethernet partagé est connecté.

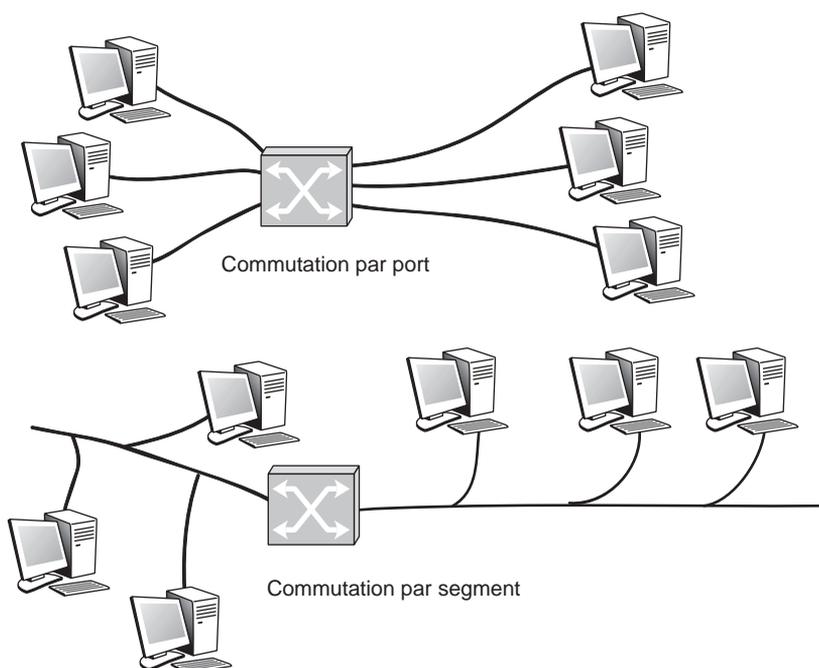


Figure 16.15

Les deux types de commutation

Le contrôle de flux

À partir du moment où une commutation est mise en place, il faut ajouter un contrôle de flux puisque les trames Ethernet peuvent s'accumuler dans les nœuds de commutation. Ce contrôle de flux est effectué par la trame Pause. C'est un contrôle de type *back-pressure*, dans lequel l'information de congestion remonte jusqu'à la source, nœud par nœud. À la différence des méthodes classiques, on envoie au nœud amont une demande d'arrêt des émissions en lui précisant le temps pendant lequel il doit rester silencieux. Cette période peut être brève si le nœud est peu congestionné ou longue si le problème est important. Le nœud amont peut lui-même estimer, suivant la longueur de la période de pause qui lui est imposée, s'il doit faire remonter un signal Pause ou non vers ses nœuds amont.

Comme nous venons de le voir, Ethernet s'étend vers le domaine des WAN privés, en utilisant les techniques de commutation. Pour les réseaux locaux partagés, la tendance est plutôt à augmenter les débits grâce au Gigabit Ethernet.

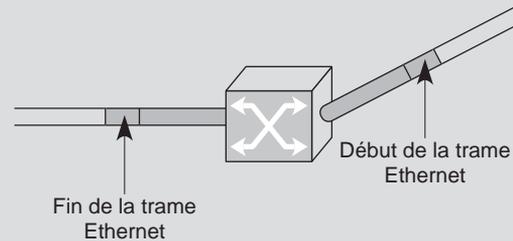
Gestion des trames dans le commutateur

On distingue deux types de gestion des trames dans le commutateur :

- Le store-and-forward, dans lequel une trame Ethernet est stockée en entier dans les mémoires du commutateur puis examinée avant d'être retransmise sur une ligne de sortie.
- Le cut-through, ou fast-forward, dans lequel la trame Ethernet peut commencer à être retransmise vers le nœud suivant dès que la zone d'adresse est connue, sans attendre la fin de la trame. Dans cette solution, il est possible qu'une même trame Ethernet soit transmise simultanément sur plusieurs liaisons : le début de la trame sur une première liaison, la suite de la trame sur une deuxième liaison et la fin de la trame sur une troisième liaison. Un exemple de cut-through est illustré à la figure 16.16.

Figure 16.16

Exemple de cut-through



Le cut-through présente l'inconvénient de ne pas permettre de contrôler la correction de la trame. Par ailleurs, la fin de la trame peut ne plus exister à la suite d'une collision.

Une technique combinant les deux solutions a été proposée sous le nom d'adaptive-error-free, dans laquelle les trames sont commutées en cut-through, la zone de contrôle d'erreur étant cependant vérifiée au vol. Cette vérification ne peut arrêter la trame, mais si plusieurs trames successives sont détectées en erreur, le commutateur repasse en mode store-and-forward.

La commutation MPLS

Une nouvelle technique de commutation est apparue avec MPLS (MultiProtocol Label-Switching). Sous cette appellation, l'IETF a normalisé une méthode générale de commutation utilisant toutes les techniques de label-switching, c'est-à-dire de commutation sur une référence.

Ethernet est une trame qui, *a priori*, ne possède pas de référence. Nous avons vu cependant que nous pouvions nous servir de l'adresse du récepteur comme d'une référence. Avec MPLS, on revient à une technique de commutation classique, avec une signalisation qui met en place le chemin ou circuit virtuel et des références qui se succèdent sur le chemin.

La norme MPLS définit pour Ethernet une nouvelle zone derrière l'adresse MAC, appelée shim-label, qui porte cette référence. Nous examinons cette solution un peu plus loin dans ce chapitre et surtout au chapitre 19, dédié à MPLS.

Les réseaux locaux virtuels

Ethernet a été longtemps synonyme de réseau local. Cette limitation géographique s'explique par la technique d'accès. Pour s'assurer que la collision a été bien perçue par la station d'émission avant qu'elle se déconnecte, la norme Ethernet exige que 64 octets au minimum soient émis, ce qui limite le temps aller-retour sur le support physique au temps de transmission de ces 512 bits. À partir du moment où l'on passe en commuta-

tion, la distance maximale n'a plus de sens. On utilise parfois le terme de WLAN (Wide LAN) pour indiquer que la distance maximale se trouve désormais dans le champ des réseaux étendus.

Pour comprendre cette technique de commutation, on peut penser à un réseau ATM dans lequel on aurait remplacé la trame ATM par une trame Ethernet. La difficulté essentielle réside dans l'adressage d'Ethernet, qui est plat et sans aucune hiérarchie.

Ethernet a dû évoluer pour atteindre les possibilités offertes par ses concurrents. La norme d'adressage a été modifiée, par exemple, passant de plat et absolu à hiérarchique. Cette révolution est aujourd'hui consacrée par la norme IEEE 802.1q, qui permet d'étendre la zone d'adressage grâce à un niveau hiérarchique supplémentaire.

Le concept de VLAN (Virtual LAN)

Les réseaux locaux virtuels ont pour rôle initial de permettre une configuration et une administration plus faciles des grands réseaux d'entreprise construits autour de nombreux ponts. Il existe plusieurs stratégies d'application pour ces réseaux virtuels.

Le VLAN introduit une notion de segmentation des grands réseaux, les utilisateurs étant regroupés suivant des critères à déterminer. Un logiciel d'administration doit être disponible pour la gestion des adresses et des commutateurs. Le VLAN peut être défini comme un domaine de broadcast, dans lequel l'adresse de diffusion atteint toutes les stations appartenant au VLAN. Les communications à l'intérieur du VLAN peuvent être sécurisées, et celles entre deux VLAN distincts contrôlées.

Plusieurs types de VLAN ont été définis suivant les regroupements des stations du système :

- Les VLAN de niveau physique ou de niveau 1, qui regroupent les stations appartenant aux mêmes réseaux physiques ou à plusieurs réseaux physiques mais reliés par une gestion commune des adresses. La figure 16.17 illustre un VLAN de niveau 1.

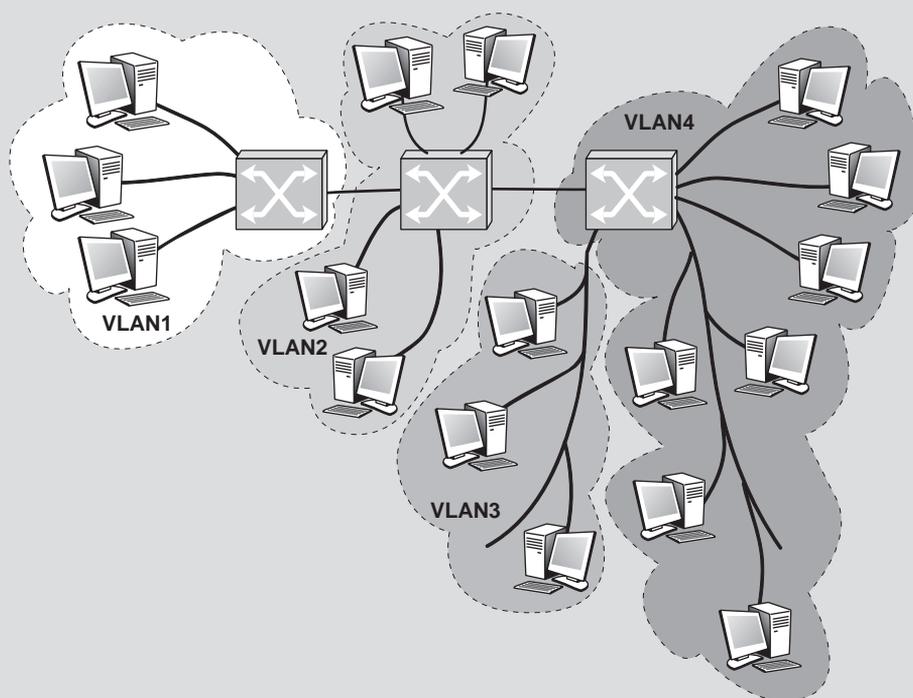


Figure 16.17

VLAN de niveau physique

Le concept de VLAN (Virtual LAN) (suite)

- Les VLAN de niveau trame, ou plus exactement les VLAN de niveau MAC, ou encore les VLAN de niveau 2, dans lesquels ce sont les adresses MAC qui regroupent les stations appartenant au même VLAN. Comme les stations peuvent se trouver dans des lieux géographiquement distants, la difficulté consiste à réaliser une diffusion automatique sur l'ensemble des stations du VLAN, une station pouvant appartenir à plusieurs VLAN simultanément. La figure 16.18 illustre un VLAN de niveau trame.

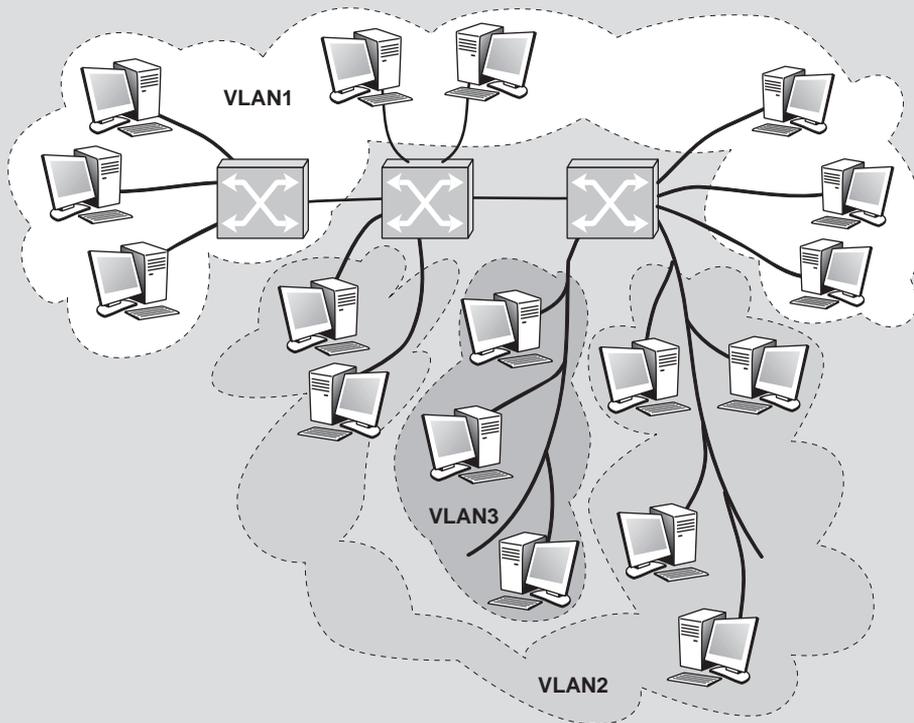


Figure 16.18

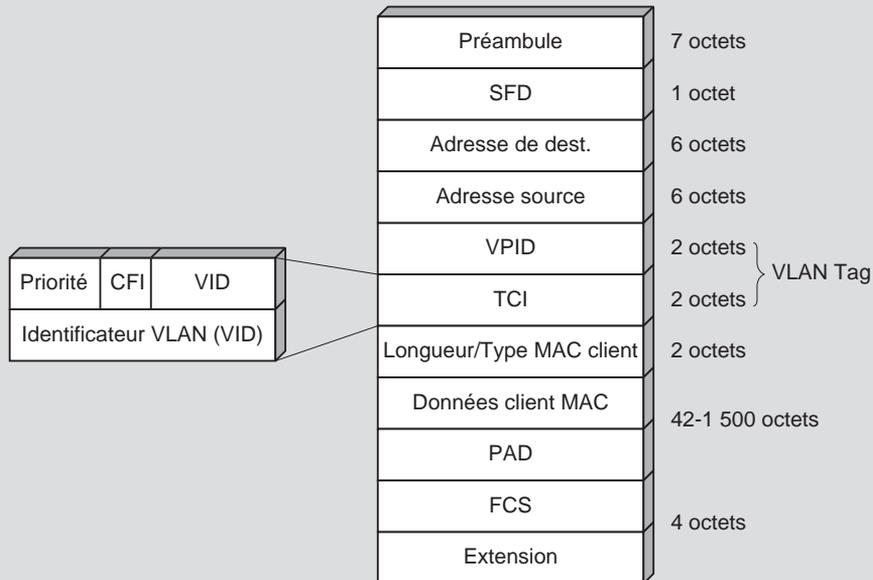
VLAN de niveau trame

- Les VLAN de niveau paquet, ou VLAN de niveau 3, correspondent à des regroupements de stations suivant leur adresse de niveau 3. Cette adresse de niveau 3 peut être une adresse IP ou une sous-adresse de l'adresse IP, que l'on appelle masque de sous-réseau IP, comme nous le verrons au chapitre 17. Il faut, dans ce cas, faire correspondre l'adresse de niveau paquet et celle de niveau trame. Les protocoles de type ARP (Address Resolution Protocol) effectuent cette correspondance d'adresse.

Lorsqu'un établissement de grande taille veut structurer son réseau, il peut créer des réseaux virtuels suivant des critères qui lui sont propres. Généralement, un critère géographique est retenu pour réaliser une communication simple entre les différents sites de l'établissement. L'adresse du VLAN est alors ajoutée dans la structure de la trame Ethernet ou de la trame d'une autre technologie, puisque la structuration en VLAN ne concerne pas uniquement les environnements Ethernet.

La norme VLAN Tagging IEEE 802.1q

Le format de la trame Ethernet VLAN, décrite dans les normes IEEE 802.3ac et IEEE 802.1q, est illustré à la figure 16.19.

**Figure 16.19**

Format de la trame Ethernet VLAN

L'identificateur VLAN (VLAN Tag) de 4 octets contient un premier champ VPID (VLAN Protocol Identifier) et un champ TCI (Tag Control Information). Le VLAN Tag est inséré entre l'adresse source et le champ Longueur/type du client MAC. La longueur de la trame Ethernet, de 1 518 octets, passe à 1 522 octets avec ce champ. Le champ VPID a la valeur 0x81-00 lorsque le champ TCI est présent.

Le champ TCI contient lui-même trois champs :

- Un champ de priorité de 3 bits permettant jusqu'à huit niveaux de priorité.
- Un champ d'un bit, le bit CFI (Canonical Format Indicator), qui n'est pas utilisé dans les réseaux IEEE 802.3 et doit être mis à 0 dans ce cas. On lui attribue la valeur 1 pour l'encapsulation de trames Token-Ring.
- Un champ VID (VLAN Identifier) de 12 bits, qui indique l'adresse du VLAN.

Le rôle du champ de priorité de 3 bits est primordial car il permet d'affecter des priorités aux différentes applications multimédias. Cette fonctionnalité est décrite dans la norme IEEE 802.1p. Huit niveaux de priorité permettent d'autoriser des services temps réel comme la parole.

Les réseaux Ethernet métró

Après avoir envahi le monde de l'entreprise, Ethernet s'attaque aux plus longues distances en commençant par le domaine métropolitain. L'Ethernet métró est né de cette extension. Cette solution est soutenue dans différents cadres mais plus particulièrement par le Forum MEF (Metro Ethernet Forum).

La figure 16.20 illustre deux réseaux Ethernet métropolitains reliés entre eux par un réseau Ethernet WAN (Wide Area Network).

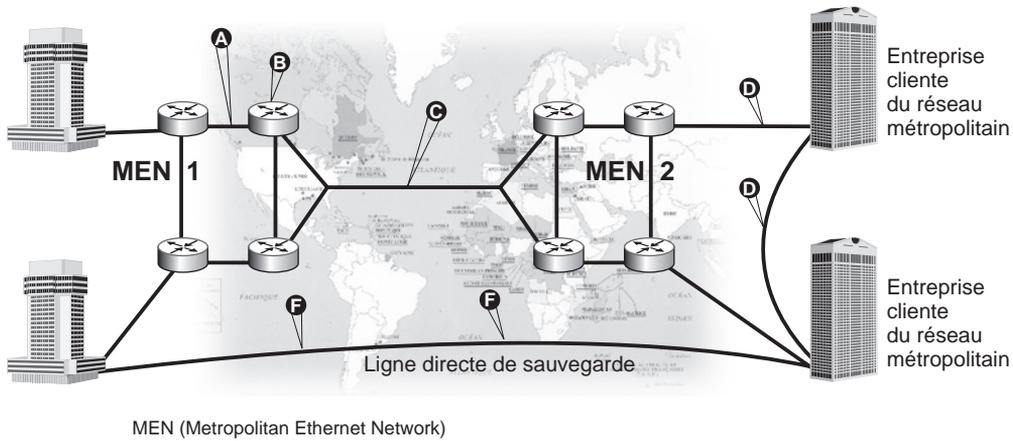


Figure 16.20

Deux réseaux Ethernet métropolitains reliés entre eux

Dans ce schéma, l'étiquette A montre une ligne de communication dans le réseau métró qui est de type point-à-point commuté utilisant un GbE ou un 10 GbE. L'étiquette B décrit un nœud du réseau métropolitain qui peut être soit un commutateur Ethernet GbE ou 10 GbE, soit un routeur IP à très haut débit. Le choix s'effectue en fonction des connexions qui doivent être gérées sur le nœud. S'il ne s'agit que d'un nœud de passage, il n'y a aucun intérêt à remonter à la couche IP. Si c'est un nœud de raccordement ou jouant un rôle de passerelle, il peut être intéressant de remonter au niveau IP. L'étiquette C désigne une ligne longue distance permettant de raccorder deux réseaux MAN entre eux. L'utilisation de l'Ethernet WAN est conseillée si les nœuds des MAN sont des commutateurs Ethernet.

L'étiquette D indique le raccordement d'une compagnie sur le réseau Ethernet métró. Ce raccordement peut s'effectuer soit par le biais d'une connexion Ethernet point-à-point de type « dernier mile » jouant le rôle de boucle locale, soit par une technologie multipoint de type IEEE 802.17, aussi appelée Ethernet RPR (Resilient Packet Ring).

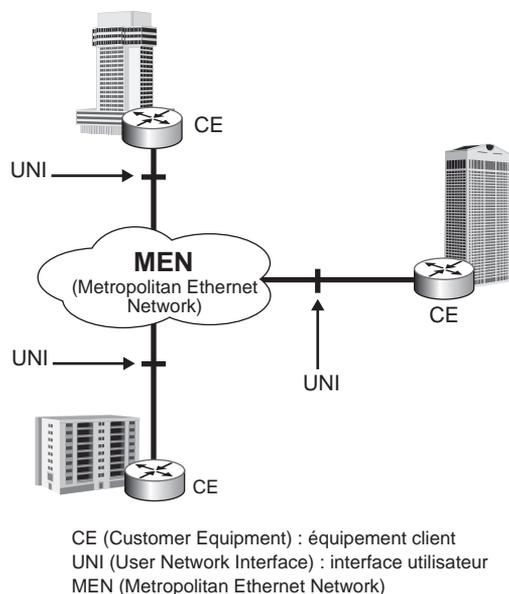
L'étiquette E indique la possibilité de mettre en place des liaisons de sécurisation du réseau permettant une reconfiguration en cas de panne du réseau cœur. Cette sécurisation peut s'effectuer en point-à-point de bout en bout, comme dans le cas de la figure 16.17, ou de nœud à nœud. L'étiquette F fait référence à toute l'ingénierie à mettre en œuvre pour réaliser les communications, les contrôler et les maintenir.

L'objectif numéro un du MEF est de proposer aux entreprises des services réseau dans un cadre métropolitain. Les services du MEF peuvent être illustrés comme à la figure 16.21.

Cette figure montre la connexion d'entreprises possédant leur propre réseau CE (Customer Edge) au travers d'une interface UNI proposant un service lié principalement au débit, au temps de transit et au taux de perte. L'objectif est de proposer entre deux ou plusieurs UNI un service de transfert. Un premier service important mis en œuvre par le MEF est l'EVC (Ethernet Virtual Connection). Une EVC peut être point-à-point ou multipoint. Elle permet de réaliser différents types de services, allant de

Figure 16.21

Architecture des services
du MEF



l'émulation d'une ligne de communication louée jusqu'à l'équivalent d'un réseau privé virtuel (voir le chapitre 32).

Le contrôle des flux est effectué d'une manière similaire à DiffServ, qui a été développé par l'IETF pour le monde IP. Trois grandes classes de clients sont définies, et les commutateurs Ethernet ou les routeurs IP doivent tenir compte de ces priorités. La qualité de service est assurée de façon statistique (voir le chapitre 28).

Ethernet sur le WAN

Ethernet sur le WAN a pour objectif de transporter des trames Ethernet sur de longues distances tout en apportant une qualité de service. Ses avantages sont un coût très bas, la possibilité de surdimensionnement du réseau, une forte granularité, une technologie bien connue et très simple et enfin une gestion simplifiée, puisque Ethernet est partout. Il est possible de monter très vite en débit avec les différents niveaux du 1 et du 10 Gbit/s et bientôt du 40 et du 160 Gbit/s. Au registre des difficultés, citons le manque de fiabilité, une perte de paquets moins contrôlée et une qualité de service plus difficile à obtenir. Cependant, plusieurs technologies se développent actuellement pour résoudre ces problèmes et offrir une voie royale à l'arrivée de l'Ethernet sur le WAN.

Deux initiatives majeures vont dans ce sens, celle du groupe de travail IEEE 802.17 RPR, dont l'objectif est d'atteindre la fiabilité de SONET/SDH, et celle du groupe de travail X.86 de l'UIT-T, qui examine la correspondance à trouver entre SONET et une technique de trame de type Ethernet.

La trame Ethernet a essentiellement été utilisée dans les réseaux locaux et avait été dimensionnée dans ce contexte. Pour les longues distances, des trames beaucoup plus grandes sont nécessaires, notamment pour réaliser la synchronisation des horloges. On parle de supertrames permettant la synchronisation et embarquant un grand nombre de trames Ethernet traditionnelles.

La pièce maîtresse du WAN Ethernet est le 10 Gigabit Ethernet, ou 10GbE. Normalisé par le groupe de travail IEEE 802.3ae, son objectif est de finaliser deux types de solutions, toutes deux en full-duplex et en commutation. La distance va de 65 m avec des fibres multimodes jusqu'à 40 km avec de la fibre optique monomode. Les deux types d'interface proposés sont LAN-PHY et WAN-PHY.

Le groupe IEEE 802.3ae a normalisé dans le LAN PHY un flux à la vitesse de 10,312 5 Gbit/s avec un codage 64B/66B. L'interface WAN-PHY utilise le même codage mais avec une compatibilité avec les interfaces SONET OC-192 et SDH STM-64.

L'architecture proposée par ce groupe de travail est illustrée à la figure 16.22.

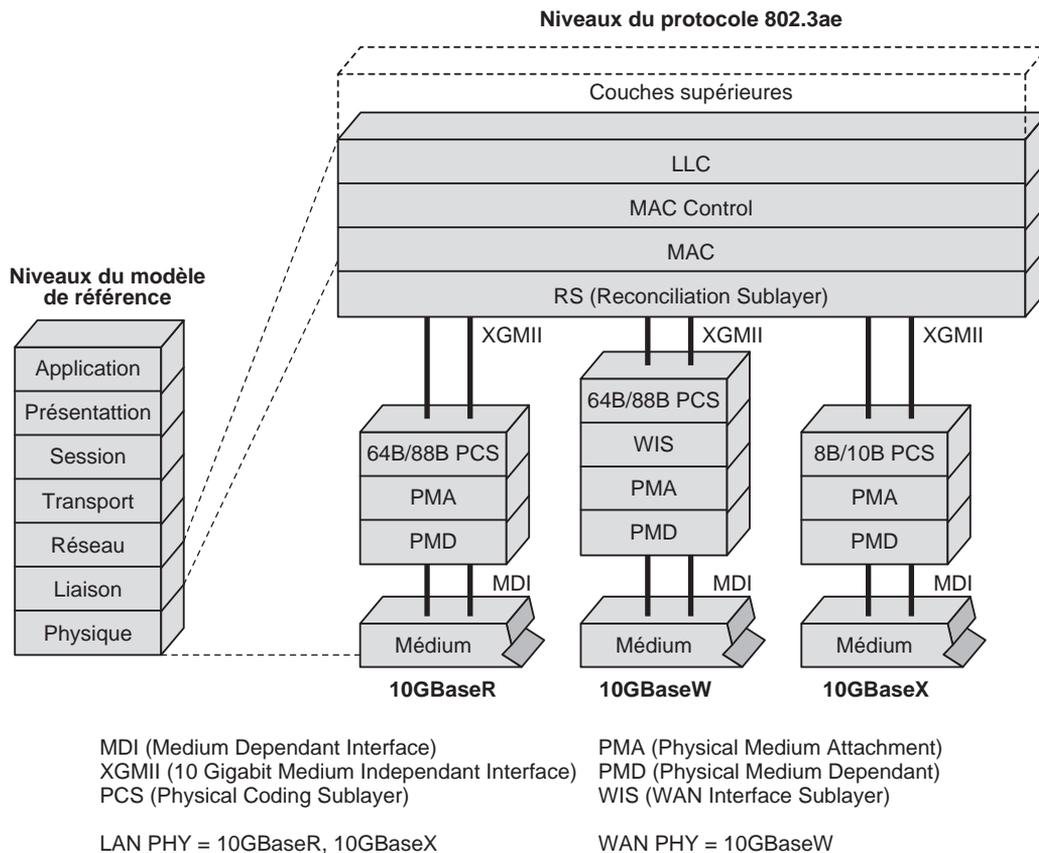


Figure 16.22

Architecture des réseaux 10GbE

Le groupe de travail de l'IEEE incorpore une interface compatible SONET mais qui reste Ethernet. Comme expliqué précédemment, cette interface implique l'existence d'un support physique 10GbE, appelé WAN PHY, qui équivaut au support SONET/SDH de type OC-192 ou STM-64. L'avantage de cette compatibilité est de permettre de reprendre tout l'environnement de gestion et de maintenance ainsi que la fiabilisation de SONET/SDH. Cette solution est défendue par la 10GEA (10 Gigabit Ethernet Alliance).

La figure 16.23 illustre une première solution de réseau WAN Ethernet dans laquelle des entreprises, connectées par des 10GbE sur un réseau cœur, utilisent des techniques de multiplexage en longueur d'onde WDM (voir le chapitre 6). L'interconnexion avec le réseau cœur s'effectue par des transpondeurs, qui peuvent être optiques ou optoélectroniques de type OTN (Optical Transport Network).

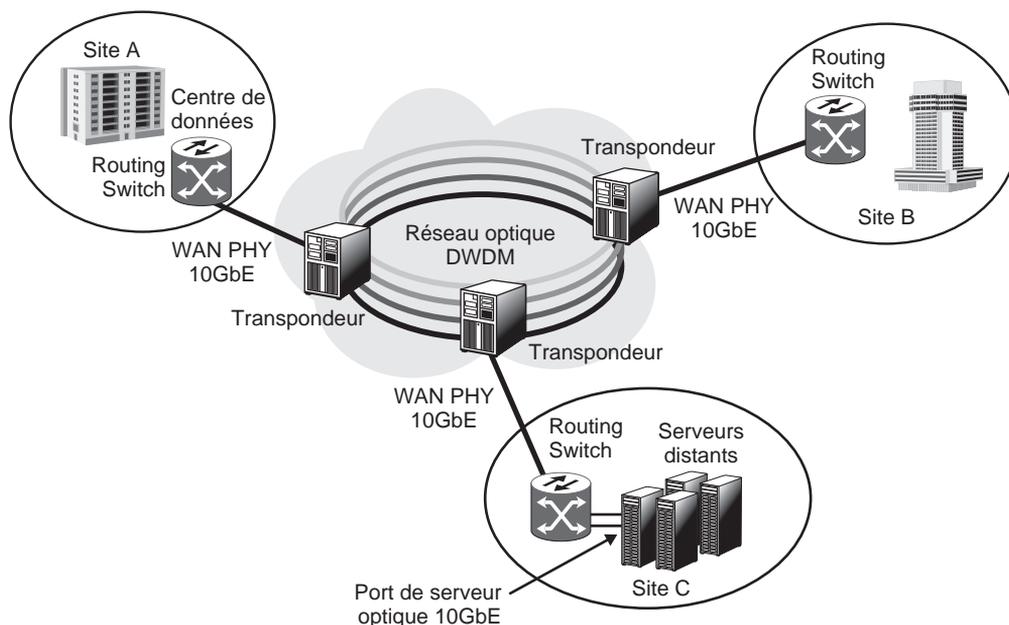


Figure 16.23

Exemple de réseau WAN Ethernet

Une autre solution consiste à relier entre eux des commutateurs Ethernet à très haut débit très éloignés. On fait appel pour cela à des liaisons Ethernet à très haut débit (1-10 Gbit/s et bientôt 40, voire 160 Gbit/s). Comme nous l'avons vu au chapitre 13, les longues distances et la haute vitesse imposent de maintenir des horloges synchrones pour permettre la récupération correcte des éléments binaires. Pour cela, les liaisons longue distance doivent choisir la solution WAN-PHY de l'IEEE 802.3ae.

Ethernet et le multimédia

Ethernet a été conçu pour les applications informatiques et non pas pour les applications multimédias. Pour se mettre à niveau et entrer dans le domaine du multimédia, l'environnement Ethernet a dû se transformer. Cette mutation concerne essentiellement l'Ethernet commuté. Pour réaliser des applications multimédias, l'IEEE a introduit une priorité de traitement des trames dans les commutateurs Ethernet. Les trames prioritaires sont placées en tête des files d'attente de telle sorte que des applications isochrones, comme la parole téléphonique, soient réalisables sur une grande distance. On choisit de préférence des trames de la plus petite taille possible : 64 octets, contenant 46 octets de données.

Dans le Gigabit Ethernet, on complète les trames de 64 octets jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur de 512 octets, cette extension autorisant une distance maximale de 400 m entre les deux stations les plus éloignées. Cette technique de bourrage n'est pas efficace

pour la parole téléphonique puisque, au plus, 46 octets sur 512 sont utilisés. Pour remplir une trame, il faut un temps de $46 \times 125 \mu\text{s}$, correspondant à 5,75 ms, ce qui est un peu moins long que le temps de remplissage d'une cellule ATM. En revanche, la trame à transporter est beaucoup moins longue en ATM (53 octets) qu'en Ethernet (64 octets, voire 512 octets dans le Gigabit Ethernet).

Si le réseau Ethernet est doté d'une technique de contrôle de flux permettant de ne pas perdre de trame en utilisant d'une façon efficace les priorités, le transport de la parole ne pose pas plus de difficulté que dans l'ATM. Il en va de même de la vidéo temps réel.

Les applications temps réel avec des contraintes temporelles sont donc réalisables sur les réseaux Ethernet.

Les développements d'Ethernet

Ethernet est à la fois une norme ancienne et une norme du futur : ancienne, par les techniques de réseau local, et du futur, grâce à la commutation et à son application aux réseaux métropolitains et étendus mais aussi à la boucle locale, aux réseaux électriques, sans fil, etc.

Ethernet dans la boucle locale

La boucle locale consiste à relier les utilisateurs au premier nœud, routeur ou commutateur, de l'opérateur chez lequel le client possède un abonnement. Les solutions à haut débit se partagent entre l'ATM pour les liaisons fixes et l'Ethernet pour les liaisons sans fil. Un des objectifs d'Ethernet dans la boucle locale est de remplacer l'ATM par des solutions Ethernet, en particulier dans les modems xDSL.

On comprend tout de suite l'intérêt de cette solution, qui offre une continuité avec la machine terminale, laquelle possède généralement une carte Ethernet. L'équipement terminal est la plupart du temps connecté par Ethernet au modem xDSL ou câble haut débit. Pourquoi changer de technologie, c'est-à-dire décapsuler le paquet IP qui a été introduit dans une trame Ethernet pour le mettre dans une trame ATM ? Les solutions les plus simples auraient été soit de mettre directement une carte ATM dans le PC, soit d'utiliser des modems Ethernet à la place de modems ATM.

Le groupe de travail EFM (Ethernet in the First Mile) a proposé pour cela la norme IEEE 802.3ah, qui comporte trois types de topologies et de supports physiques :

- point-à-point en paires torsadées à une vitesse de 10 Mbit/s sur une distance de 750 m ;
- point-à-point en fibre optique à une vitesse de 1 Gbit/s sur une distance de 10 km ;
- point-à-multipoint en fibre optique à une vitesse de 1 Gbit/s sur une distance de 10 km.

La norme précise les procédures d'administration et de maintenance pour les extrémités et la ligne elle-même. Ces procédures permettent de faire remonter les pannes et de monitorer les paramètres de la liaison.

Le VDSL (Very high bit rate DSL), équivalent des modems xDSL pour les hautes vitesses, pourrait ainsi devenir compatible avec Ethernet et offrir une continuité complète du poste de travail émetteur jusqu'au poste de travail récepteur par le biais de modems EFM.

PoE (Power over Ethernet)

Un inconvénient majeur des équipements réseau, et des équipements Ethernet en particulier, vient de la nécessité de les alimenter électriquement. En cas de coupure de courant, le réseau s'arrête et peut mettre en difficulté l'entreprise. Une solution qui s'impose de plus en plus est l'auto-alimentation des équipements réseau par l'intermédiaire du câblage lui-même.

Le groupe de travail IEEE 802.3af propose d'alimenter électriquement les équipements Ethernet par le câble Ethernet lui-même. Les équipements peuvent être aussi bien des commutateurs du réseau que des points d'accès Wi-Fi ou d'autres équipements réseau qui se branchent sur une prise Ethernet. L'avantage de cette solution est de sécuriser les alimentations électriques des serveurs raccordés au réseau électrique et donc tous les autres équipements raccordés au serveur.

Les sources électriques peuvent être de deux types : end-span, dans lequel un serveur particulier dessert l'ensemble du réseau, et mid-span, où plusieurs équipements se partagent l'alimentation des autres équipements réseau. Les fils métalliques peuvent être de catégorie 3 avec 4 fils ou 5/6 avec 8 fils, c'est-à-dire quatre paires de fils. Deux solutions sont utilisées pour transporter le 48 volts vers les équipements qui en ont besoin : soit l'alimentation utilise deux paires tandis que les deux autres paires sont dédiées aux données, soit les paires sont mixtes lorsqu'il n'y a que deux paires, l'électricité et le courant étant portés sur des fréquences différentes.

La solution PoE est illustrée à la figure 16.24, où plusieurs équipements réseau (téléphone IP, point d'accès, accès Bluetooth, webcam) sont directement alimentés au travers d'Ethernet. L'équipement UPS (Uninterruptible Power Supply) peut être ajouté pour éviter les coupures de courant.

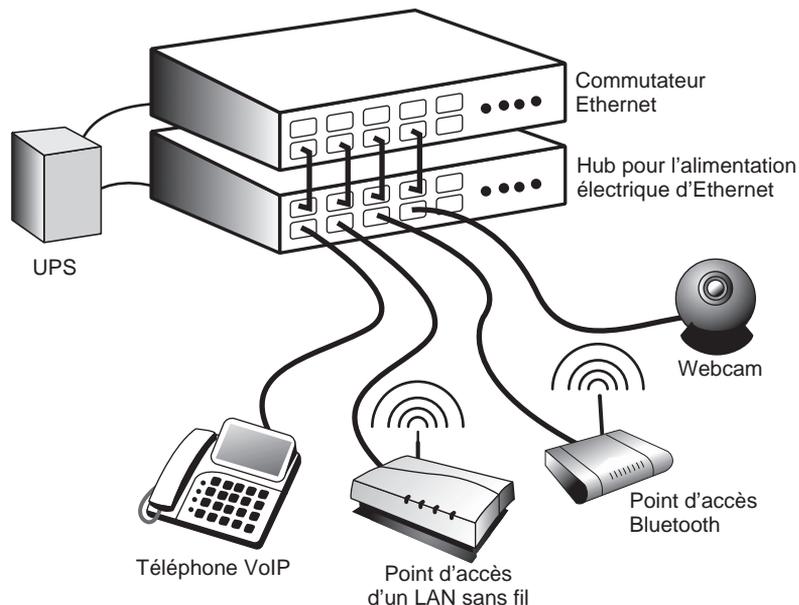


Figure 16.24

Architecture de l'alimentation électrique PoE

Une autre vision d'Ethernet est le transport des trames directement sur les câbles électriques. Cette solution se développe fortement dans le cadre de la domotique, où les particuliers peuvent connecter directement leur carte coupleur Ethernet sur leurs nombreuses prises électriques (*voir le chapitre 9*).

L'Ethernet sans fil

Ethernet est en train de prendre une place de choix dans le domaine des réseaux sans fil et de mobiles, où il devrait entrer en compétition avec les technologies UMTS au cours de l'année 2006. Cette arrivée massive s'effectue par le biais de l'IEEE, dont la trame Ethernet est le fer de lance. L'idée sous-jacente est bien sûr de pouvoir interconnecter simplement tous les réseaux, fixes et mobiles, par l'intermédiaire d'une même trame.

Le premier réseau qui a répandu cette solution provient de la normalisation IEEE 802.11, qui a donné naissance aux réseaux Wi-Fi. La compatibilité de tous ces réseaux s'effectue par l'intermédiaire des trames LLC, identiques dans tous les réseaux sans fil ayant l'Ethernet comme soubassement.

On retrouve également Ethernet dans certains réseaux de la série de normes IEEE 802.x, comme IEEE 802.15 pour les réseaux personnels et l'UWB (Ultra-Wide Band), IEEE 802.16 pour WiMax et IEEE 802.20 pour le large-bande hertzien.

Le plus répandu, et de loin, de ces réseaux est Wi-Fi, qui est examiné en détail au chapitre 21.

Les réseaux compatibles avec Ethernet

Ethernet est devenu une norme si importante que les réseaux qui mettent en œuvre d'autres techniques d'accès essaient de se rendre compatibles avec lui.

Le moyen le plus simple pour obtenir cette compatibilité est de transporter des trames Ethernet, mais dans un cadre distinct et avec une technique d'accès spécifique.

L'Ethernet isochrone (IsoEnet)

Ethernet est un réseau si fortement asynchrone qu'il est pratiquement impossible d'y transporter des applications isochrones. La norme IEEE 802.9 IVDLAN (Integrated Video and Data LAN) propose une extension d'Ethernet dans ce sens. Elle définit pour cela une interface d'accès à partir d'une station de travail vers un réseau capable de transporter simultanément des canaux asynchrones et des canaux synchrones.

IEEE 802.9 est en fait une extension de l'interface IVDLAN composée de différents canaux, dont un canal P à 10 Mbit/s et 96 canaux B à 64 Kbit/s. La capacité globale de cette interface est de 16,144 Mbit/s. Les données sont transmises sur l'interface par une trame transitant toutes les 125 μ s et portant 96 octets pour les canaux B et 1 250 bits pour l'accès à Ethernet.

Dans l'environnement Ethernet, cette norme a donné naissance à un produit appelé IsoEnet, qui signifie Ethernet isochrone. Un autre nom de la norme est IEEE 802.3 10BaseM, avec M pour multimédia, pour indiquer que les produits associés sont de type Ethernet par l'utilisation de la nomenclature 802.3 et transportent du multimédia.

La distance maximale entre deux hubs est de 100 m, et quatre paires blindées ou non blindées sont utilisées.

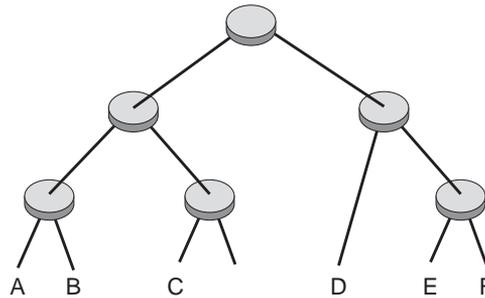
Le 100VG AnyLAN

Le comité IEEE 802.12 a développé une solution compatible à la fois avec Ethernet et avec le Token-Ring 100 Mbit/s sous le nom de 100VG AnyLAN. 100VG AnyLAN consiste en la mise en place d'un circuit entre l'émetteur et le récepteur pendant la transmission de la trame de façon qu'il n'y ait pas de collision. La topologie est en arbre, comme dans les réseaux Starlan.

Dans cette commutation, lorsqu'une trame arrive dans un nœud, elle est immédiatement retransmise vers le nœud suivant. La figure 16.25 montre qu'on peut avoir trois communications simultanées : de A vers B, de C vers D et de E vers F. Comme nous l'avons déjà indiqué, cette solution peut sembler compatible avec Ethernet ou avec un réseau local Token-Ring en raison de l'utilisation de trames Ethernet ou Token-Ring, alors que, en réalité, les coupleurs sont incompatibles avec les coupleurs Ethernet aussi bien que Token-Ring puisque la technique d'accès n'est pas la même. En d'autres termes, c'est la structure de la trame qui est compatible mais pas les matériels utilisés.

Figure 16.25

L'Ethernet commuté 100VG AnyLAN



Conclusion

Les réseaux Ethernet dominent le marché des réseaux d'entreprise depuis de nombreuses années. Ces réseaux ne font qu'accentuer leur avance, et, bientôt, pratiquement 100 p. 100 des réseaux d'entreprise seront Ethernet.

Face à un tel succès, le groupe de travail 802 de l'IEEE multiplie les offensives vers d'autres directions, comme les réseaux sans fil, pour lesquels l'Ethernet sans fil est devenu le principal standard.

Des réseaux métropolitains Ethernet sont déjà commercialisés, et leur succès ne fait aucun doute. À un peu plus long terme, les réseaux étendus devraient également passer sous le joug de la technologie Ethernet.

Références

Les techniques d'aloïa sont à l'origine d'Ethernet. Elles peuvent encore être utiles dans certains cas particuliers. Le livre d'Abramson peut être considéré comme le premier ouvrage sur les réseaux locaux :

N. ABRAMSON & KUO, eds – *The ALOHA System, Computer Communication Networks*, Prentice Hall, 1973

Très bon livre sur le Gigabit Ethernet dans le cadre des réseaux métropolitains :

P. BEDELL – *Gigabit Ethernet for Metro Area Networks*, McGraw-Hill, 2002

Un des premiers livres sur la technologie Ethernet Gigabit :

D. CUNNINGHAM, B. LANE – *Gigabit Ethernet Networking*, Que, 1999

Très bon livre d'introduction sur les réseaux métropolitains Ethernet, qui commencent à prendre une place importante sur le marché des équipements réseau :

S. HALABI – *Metro Ethernet*, Cisco Press, 2003

Bon livre pour bien comprendre les mécanismes de base d'Ethernet :

J. HARRINGTON – *Ethernet Networking Clearly Explained*, Morgan Kaufmann Publishers, 1999

Excellent livre pour bien comprendre l'enjeu de la technologie Ethernet et ses applications :

G. HELD – *Ethernet Networks: Design, Implementation, Operation*, Wiley, 2002

L'IEEE a publié les différents standards de réseaux locaux acceptés par l'ISO. C'est dans ces documents que l'on trouvera le plus de détails sur ces normes :

IEEE STANDARD 802 – “*Local Network Standards*”, IEEE Press, 1989

Le nombre des réseaux Ethernet ne fait que s'accroître, et il est parfois difficile de savoir quand passer à la version supérieure ; ce livre répond à la question du passage vers le gigabit Ethernet :

J. KADAMBI, I. CRAYFORD, M. KALKUNTE – *Gigabit Ethernet: Migrating to High-Bandwidth LANs*, Prentice Hall, 1998

Un article fondamental sur Ethernet par deux de ses concepteurs :

R. M. METCALFE, D. R. BOGGS – “*Ethernet-Distributed Packet Switching for Local Computer Networks*”, *Communications ACM*, vol. 19, 7, pp. 395-404, juillet 1976

Un livre supplémentaire sur les réseaux métropolitains utilisant la technologie Ethernet :

D. MINOLI, P. JOHNSON, E. MINOLI – *Ethernet-Based Metro Area Networks*, McGraw-Hill, 2002

Livre qui couvre bien tout l'environnement du gigabit Ethernet :

M. NORRIS – *Gigabit Ethernet Technology and Applications*, Artech House, 2002

Les technologies de commutation Ethernet sont souvent mal expliquées. Ce livre donne les éléments nécessaires pour bien comprendre la poussée d'Ethernet vers la commutation et le haut débit :

S. RILEY, R. BREYER – *Switched, Fast, and Gigabit Ethernet*, Que, 1998

Un livre sur le Gigabit Ethernet :

S. SAUNDERS – *Gigabit Ethernet*, McGraw-Hill, 1998

Un livre entièrement consacré au Gigabit Ethernet, avec quelques compléments intéressants sur les réseaux locaux virtuels et les autres générations de réseaux Ethernet :

R. SEIFERT – *Gigabit Ethernet: Technology and Applications for High-Speed LAN*, Addison Wesley, 1998

Excellent livre sur les réseaux métropolitains et les technologies à mettre en œuvre pour les réaliser.

S. SHEPARD – *Metro Area Networking*, McGraw-Hill, 2002

Un très bon livre d'explication du monde des réseaux Ethernet :

C. E. SPURGEON – *Ethernet: The Definitive Guide*, O'Reilly, 2000

Ethernet est aussi un réseau qui s'installe avec force sur le marché un peu particulier des réseaux industriels, c'est-à-dire pour la gestion de processus temps réel ; ce livre en explique les raisons :

D. J. STERLING, S. P. WISSLER, D. STERLING – *The Industrial Ethernet Networking Guide*, Delmar Publishers, 2002