

# Problèmes et exercices

## EXERCICE 1 CÂBLER UN PETIT RÉSEAU LOCAL À LA MAISON

### Énoncé

Comme vous possédez plusieurs ordinateurs à la maison (3 PC et 2 portables), vous souhaitez les mettre en réseau de la manière la plus simple possible.

- a** Énumérez les problèmes que vous devez résoudre pour mener à bien votre installation.
- b** Pour éviter de tirer trop de câbles dans la maison, vous décidez de relier les machines par des liaisons sans fil. Quelles sont les conséquences sur votre installation ?

### Solution

- a** Il faut tout d'abord disposer des matériels et des logiciels appropriés. Pour cela, vous devez choisir le réseau local que vous voulez créer (Ethernet ou anneau à jeton), et la topologie physique que vous allez utiliser. Vous optez pour des cartes Ethernet, afin de créer un réseau local plus simple et moins coûteux à installer. Vous devez ensuite décider comment raccorder vos ordinateurs : topologie physique en bus ou en étoile ?

La topologie en bus est la solution la plus économique si vos ordinateurs sont situés dans la même pièce. La topologie en étoile, désormais la plus populaire, impose l'achat d'un concentrateur (hub) dont le prix dépend du nombre de ports disponibles. Cette dernière solution vous permettra de faire évoluer plus aisément votre installation (mais aurez-vous plus d'une dizaine de machines à la maison ?).

Vous décidez donc de raccorder vos machines en bus. Les étapes de votre installation sont : achat et assemblage des différents matériels, installation des logiciels, configuration des adresses IP.

Au terme de la première étape, vous devez posséder les matériels suivants :

- un câble dit « Ethernet fin » ;
- autant de prises BNC en T que vous raccordez d'ordinateurs sur le câble ;
- des prises BNC femelles pour raccorder les prises précédentes sur le câble ;
- des bouchons de terminaison aux extrémités du câble ;
- des cartes réseau (ou cartes Ethernet), une par ordinateur à connecter. Pour les portables, vous choisissez plutôt des cartes équipées de deux connecteurs (un connecteur BNC et un connecteur RJ45), pour pouvoir utiliser la même carte si vous changez de réseau physique. Vous pouvez vous contenter de cartes avec un connecteur BNC pour les autres machines.

Vous devez également disposer, sur chaque machine connectée, des logiciels de communication :

- un pilote (*driver*) pour chaque carte réseau, en général fourni par le constructeur de la carte ;
- une pile TCP/IP par ordinateur, le plus souvent fournie avec le système d'exploitation de votre machine ;
- un navigateur par ordinateur.

Il vous reste à tout assembler pour achever la deuxième étape ! Pour la troisième étape, les systèmes d'exploitation modernes possèdent souvent des fonctions de type *Plug and Play* (littéralement : branchez et jouez) ; les pilotes et autres logiciels sont alors très faciles à installer. Reste la dernière étape : l'affectation des adresses IP à toutes les machines. Cette étape sera vue au chapitre 6 qui traite du protocole IP.

- b** La conséquence immédiate de ce choix est que toute votre belle installation est à jeter ! Si vous souhaitez installer le réseau sans fil le plus simple qui soit, vous équipez tous les ordinateurs avec une carte Wi-Fi au lieu de la carte réseau précédente. Toutes les applications (partage de l'imprimante, jeux en réseau...) qui utilisent la pile TCP/IP seront utilisables sur vos machines. Cette architecture est une architecture *ad hoc*, décrite dans le standard 802.11.

## EXERCICE 2 DIFFÉRENCES ENTRE 802.3 ET 802.5

---

- Énoncé**
- a** Pourquoi la trame IEEE 802.3 (Ethernet) ne contient-elle pas de fanion de fin comme une trame type HDLC ?
- b** Pourquoi la trame IEEE 802.5 (Token Ring) ne contient-elle pas un long préambule comme la trame IEEE 802.3 ?

- Solution**
- a** La trame Ethernet 802.3 ne contient pas de fanion de fin car elle est suivie d'un silence obligatoire (intervalle intertrame), et sa longueur est codée dans le champ longueur. Dans le cas où le champ longueur est remplacé par un champ *type*, il faut extraire la longueur du contenu lui-même.
- b** Avec Ethernet, n'importe quelle station peut à un moment donné prétendre prendre la parole. Pour une station qui reçoit, l'émetteur est inconnu et se situe à une distance quelconque, variable d'une transmission à la suivante : il est nécessaire de refaire la synchronisation à chaque réception de trame. Avec Token Ring, une station reçoit toujours les données de son prédécesseur sur l'anneau. La synchronisation est donc beaucoup plus simple à acquérir.

## EXERCICE 3 BOUCHON DE TERMINAISON

---

- Énoncé** Que se passe-t-il dans un réseau local en bus s'il n'y a pas de bouchon de terminaison ?

- Solution** Aucune transmission n'est possible. Le bouchon a un rôle électrique, il doit avoir une impédance bien adaptée de telle sorte que les signaux ne soient pas réfléchis en arrivant aux extrémités du câble. La réflexion est une source de bruit qui perturbe toutes les transmissions.

## EXERCICE 4 PÉRIODE DE VULNÉRABILITÉ

---

- Énoncé** Soit un réseau Ethernet en bus de 8 stations. La distance moyenne entre stations est de 15 m. La vitesse de propagation est de 250 m/ $\mu$ s. Quelle est la durée de la période de vulnérabilité ?

- Solution** Si les stations sont réparties tous les 15 m, la distance entre les deux stations les plus éloignées l'une de l'autre est de  $15 \times 7 = 105$  m. La période de vulnérabilité correspond au temps de propagation aller et retour entre les deux stations les plus éloignées soit :

$$2 \times 105 / 250 = 0,84 \mu\text{s}.$$

**Remarque**

Sur un bus aussi court, la probabilité qu'il y ait une collision est très faible : il faudrait que deux (ou plusieurs) équipements aient écouté et pris la décision d'émettre dans le même intervalle de 0,84  $\mu$ s. D'où l'intérêt d'utiliser des bus plutôt courts.

**EXERCICE 5 LONGUEUR ÉQUIVALENTE D'UN BIT**

**Énoncé** Dans un réseau local dont le débit binaire est de 5 Mbit/s et la longueur de 1 km, les signaux se propagent à la vitesse de 250 m/ $\mu$ s. À quelle longueur de câble correspond un bit transmis ? Cela a-t-il une influence sur le choix de la taille des messages ?

**Solution** Si le débit est de 5 Mbit/s, un bit dure  $1/(5 \times 10^6) = 0,2 \mu$ s, soit avec la vitesse de propagation de 250 m/ $\mu$ s, une longueur équivalente à 50 m de câble. Dans le réseau local dont la longueur est 1 km, soit 1 000 m, cela suppose qu'il y ait, à un instant donné,  $1\ 000/50 = 20$  bits. Cette longueur est donc très petite : le message est à la fois en cours de transmission et en cours de réception.

**Remarque**

Dans un réseau local dont le débit n'est pas très élevé, il est inutile de prévoir des protocoles complexes avec anticipation : à un instant donné, il n'y a qu'un (et un seul) message en cours d'émission.

**EXERCICE 6 ADRESSE MAC**

**Énoncé** Une entreprise dispose d'un réseau Ethernet. Un nouvel employé dans l'entreprise est doté d'un ordinateur ayant une carte Ethernet d'adresse universelle 3E:98:4A:51:49:76 en hexadécimal. À quel niveau cette adresse est-elle gérée ? Est-il nécessaire de vérifier qu'aucun autre ordinateur ne dispose de la même adresse dans le réseau local ?

**Solution** L'adresse MAC est l'adresse physique de la carte Ethernet. C'est le numéro de série de cette carte, défini par le constructeur de la carte. Les constructeurs ont des préfixes uniques au monde (3 octets) et numérotent ensuite leurs cartes sur les 3 octets suivants : deux cartes ne peuvent jamais avoir le même numéro de série. Il est donc impossible qu'un autre ordinateur possède la même adresse.

**Remarque**

Pour simplifier le travail des administrateurs responsables du parc de machines, il est possible de flasher la PROM qui contient l'adresse MAC. Bien que cette technique viole la règle d'unicité des adresses MAC au sein d'un réseau donné, elle évite la mise à jour les tables de correspondance entre adresses MAC et adresses IP en cas de remplacement d'une carte réseau défectueuse, par exemple.

## EXERCICE 7 DÉBIT UTILE THÉORIQUE

### Énoncé

On rappelle que le débit nominal d'un réseau Ethernet est de 10 Mbit/s et que les trames contiennent un préambule de 8 octets, deux champs d'adresse de 6 octets chacun, un champ longueur de 2 octets, des données dont la longueur est obligatoirement comprise entre 46 et 1 500 octets et un bloc de contrôle d'erreur de 4 octets. Par ailleurs, un intervalle de silence entre trames est obligatoire : sa durée est de 9,6  $\mu$ s.

- a** Déterminez le débit utile maximal sur un réseau Ethernet. Que pensez-vous du résultat obtenu ? Pourquoi ne peut-on pas l'atteindre ?
- b** Quel est le degré du polynôme générateur utilisé pour le contrôle d'erreur ?

### Solution

- a** Le débit utile maximal est obtenu de manière théorique si une station unique émet en permanence (en respectant l'espace intertrame) des trames de longueur maximale. On obtient alors :  
Longueur totale équivalente d'une trame en octets = 8 (préambule) + 6 (adresse destinataire) + 6 (adresse émetteur) + 2 (longueur ou type) + 1 500 (contenu utile) + 4 (bloc de contrôle d'erreurs) + 12 (correspondant au silence intertrame) = 1 528 octets.

Le débit utile vaut =  $10 \times (1\,500 / 1\,528) = 9,82$  Mbit/s soit un rendement de 98,2 %.

Cela est bien évidemment un calcul théorique : il est impossible d'atteindre un tel rendement dans la pratique, dès que plusieurs équipements tentent d'émettre. Il y aura des silences et des collisions qui entraîneront d'éventuels silences et/ou collisions supplémentaires.

- b** Le bloc de contrôle d'erreur a une longueur de 4 octets soit 32 bits. Donc le polynôme générateur utilisé est de degré 32.

### Remarque

En pratique, on considère qu'un rendement de 50 à 60 % est une valeur limite. Si le trafic devait être plus important, les performances s'effondreraient. Cet exercice montre l'intérêt des ponts et des commutateurs pour segmenter les réseaux locaux.

## EXERCICE 8 DÉBIT UTILE RÉEL

### Énoncé

Un réseau local en bus de type 802.3 a un débit de 10 Mbit/s et mesure 800 m. La vitesse de propagation des signaux est de 200 m/ $\mu$ s. Les trames MAC contiennent 256 bits en tout. L'intervalle de temps qui suit immédiatement une transmission de données est réservé à l'émission de l'accusé de réception de 32 bits.

- a** Quel est le nombre de bits en transit sur le bus à un instant déterminé ?
- b** Quel est le débit utile réel du réseau, en supposant qu'il y ait 48 bits de service (champs MAC et LLC) dans chaque trame ?

### Solution

- a** Si le débit est de 10 Mbit/s, un bit dure  $1 / (10 \times 10^6) = 0,1$   $\mu$ s soit, avec la vitesse de propagation de 200 m/ $\mu$ s, un temps correspondant au parcours dans 20 m de câble. Dans le réseau local dont la longueur est 800 m, cela suppose qu'il y ait, à un instant donné,  $800 / 20 = 40$  bits.

- b** Le temps total pour transmettre une trame et son accusé de réception est de  $(256 + 32) / (10 \times 10^6) + 2 \times 800 / (200 \times 10^6) = 28,8 + 8 = 36,8$   $\mu$ s.

Dans ce calcul, nous comptabilisons le temps de transmission d'une trame de 256 bits, plus son accusé de réception (soit 32 bits), plus un temps de propagation aller et retour en prenant les équipements à distance maximale. Les informations utiles dans la trame sont de  $256 - 48 = 208$  bits. Il faut donc  $36,8 \mu\text{s}$  pour transmettre 208 bits utiles. Le débit utile est de  $208/36,8 = 5,65$  Mbit/s.

## EXERCICE 9 TAILLE MINIMALE DES TRAMES ETHERNET

### Énoncé

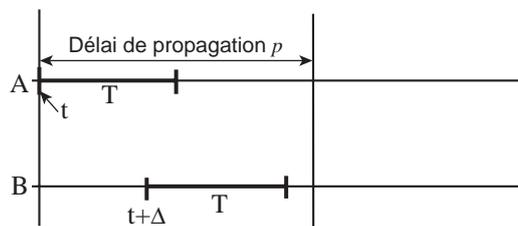
On considère un réseau local en bus utilisant le mécanisme CSMA/CD. On appelle  $A$  et  $B$  les deux équipements les plus éloignés. On note :

- $p$ , le temps de propagation entre les stations  $A$  et  $B$ ,  $T$  le temps de transmission d'une trame (toutes les trames émises sont supposées avoir la même longueur). Par hypothèse  $T < p$ .
- $\Delta$ , le temps séparant les débuts d'émission des stations  $A$  et  $B$ . Par hypothèse, on prend également  $\Delta < p$ .

La station  $A$  émet une trame à l'instant initial  $t$  et la station  $B$  à  $t + \Delta$ , comme le montre la figure 5.18.

Figure 5.1

Décalage de propagation et temps de transmission d'une trame.



- Les deux stations peuvent-elles détecter la collision ?
- En déduire la taille  $M$ , exprimée en octets, du message de longueur minimale pour que toutes les stations puissent détecter une collision.
- Pourquoi le standard 802.3 impose-t-il un nombre maximal de répéteurs à traverser entre deux stations d'un même réseau d'entreprise utilisant des réseaux Ethernet ?

### Solution

- Pour que toutes les stations détectent la collision, il faut qu'on ait  $T = p + \Delta$ , qu'on peut borner supérieurement par  $T = 2p$ . Dans ce cas, aucune station ne détecte la collision.
- Puisque  $T = M/8\Delta$ , on trouve  $M = 16p\Delta$ , en remplaçant  $T$  par sa valeur dans l'expression ci-dessus.
- Les répéteurs introduisent un délai supplémentaire, ils interviennent donc dans la valeur de  $p$ .

### Remarque

On comprend pourquoi la norme 802.3 impose une taille minimale pour les messages émis par les équipements d'un réseau local de type CSMA/CD. Les récepteurs font ensuite le tri entre les « résidus de collision » trop courts et les « vraies » trames d'une longueur suffisante.

## EXERCICE 10 SIMULATION DE TRAFIC SUR ETHERNET

### Énoncé

Soit un réseau local en bus utilisant un protocole de type CSMA/CD et comptant 4 stations notées  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ . Le temps est découpé en intervalles notés  $ST$  (*Slot-Time*), de durée égale à  $51,2 \mu\text{s}$ .

On supposera que toutes les trames sont de longueur fixe et que la durée d'émission d'une trame quelconque est de  $6 ST$ . À l'instant  $t = 0$ , la station  $A$  commence à transmettre une trame. À  $t = 2 ST$ , les stations  $B$  et  $C$  décident chacune de transmettre une trame et à  $t = 5 ST$ , la station  $D$  décide de transmettre une trame. On suppose que lors d'une collision, les deux machines impliquées interrompent leur communication et attendent un délai aléatoire avant de réémettre. La valeur de ce délai (exprimé en nombre entier de  $ST$ ) est déterminée par l'algorithme suivant : après la première collision, une machine attend un temps aléatoire, égal soit à  $0$  soit à  $1 ST$  ; après la deuxième collision, elle attend un temps aléatoire uniformément réparti entre  $0$  et  $3 ST$  ; après  $i$  collisions, elle attend un temps aléatoire uniformément réparti entre  $0$  et  $2^i - 1 ST$  (si  $i$  est inférieur ou égal à  $10$ ) et entre  $0$  et  $1\ 023 ST$  si  $i$  est compris entre  $11$  et  $16$ . Au-delà de  $16$  collisions, elle abandonne la transmission.

On néglige le délai intertrame (on suppose donc qu'une trame peut être émise par une machine dès que celle-ci détecte le support libre). On néglige également le temps de propagation sur le support.

- a** Remplissez un diagramme des temps, gradué en  $ST$ , décrivant le déroulement des différentes transmissions de trames, en adoptant la convention suivante :

A	<i>slot occupé par A</i>
X	<i>slot occupé par une collision</i>
□	<i>slot vide</i>

et en supposant que les valeurs aléatoires générées par les machines  $B$ ,  $C$  et  $D$  soient les suivantes :

	B	C	D
après 1 collision	0	1	1
après 2 collisions	2	1	1
après 3 collisions	4	5	1

- b** Calculez, sur la période allant de  $t = 0$  à la fin de la transmission de la dernière trame, le taux d'utilisation du canal pour la transmission effective des 4 trames.

**Solution a** Le chronogramme est le suivant :

ST	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	A	A	A	A	A	A	X	B	B	B	B	B	B	X		X		D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C

*Commentaire :* À la date 0, A démarre, le support est libre et sa trame dure 6 ST donc de 0 à 5 ST. À  $t = 2$  ST, B et C veulent transmettre mais le support est occupé : elles attendent. À  $t = 5$  ST, D veut transmettre, le support est occupé, donc elle attend.

À  $t = 6$  ST, le support devient libre, toutes les stations en attente (B, C et D) tentent leur chance : il y a collision. B, C et D suspendent leur transmission et démarrent une attente aléatoire. Celle-ci sera nulle pour B et de 1 ST pour les deux autres. À  $t = 7$  ST, B tente sa chance une nouvelle fois. Le support est libre, sa trame dure 6 ST, elle va de 7 à 12 ST.

À  $t = 8$  ST, C et D veulent faire une nouvelle tentative. Le support étant occupé, elles attendent.

À  $t = 13$  ST, le support devient libre. Toutes les stations en attente (C et D) tentent leur chance : il y a une nouvelle collision. C et D suspendent leur transmission et démarrent une deuxième attente aléatoire, valant 1 ST pour chacune, conformément au tableau précédent.

À  $t = 14$  ST, il y a un silence, car les deux stations C et D attendent la fin du délai aléatoire et à  $t = 15$  ST, elles tentent leur chance, une nouvelle fois ensemble ! Il y a à nouveau collision. Cette fois, le délai aléatoire est heureusement différent pour les deux stations qui vont donc réussir à transmettre : pour D à  $t = 17$  ST et pour C à  $t = 23$  ST puisque à sa troisième tentative (à  $t = 16 + 5 = 21$  ST), le support est occupé par D.

**b** Le taux d'utilisation du canal est de 24/29 soit de 82 %.

## EXERCICE 11 RISQUE DE COLLISIONS ET DÉLAI MOYEN D'ATTENTE

**Énoncé** On suppose que l'algorithme de calcul du délai aléatoire après collision est celui de l'exercice précédent.

- a** Deux équipements A et B sur un réseau local Ethernet entrent en collision. Pour A, il s'agit d'une première collision, alors que pour B, il s'agit de la seconde. Quelle est la probabilité qu'il y ait une nouvelle collision entre A et B à leur prochaine tentative ?
- b** Même question avec une première collision pour A et la cinquième pour B.
- c** Calculez le temps moyen  $T_n$  d'attente cumulé pour l'accès au support d'un équipement qui a subi  $n$  collisions successives pour une trame donnée.

**Solution a** A n'a subi qu'une collision, donc le délai aléatoire qu'il a tiré au sort est 0 ou 1 fois l'intervalle ST. B en a subi deux successives, donc le délai qu'il a pu tirer au sort est uniformément réparti entre 0 ST, 1 ST, 2 ST et 3 ST.

Soit  $p$  la probabilité d'une nouvelle collision. Pour qu'un tel événement se produise, il faut que les deux équipements aient tiré au sort simultanément 0 ou simultanément 1. Notons  $NA$  (respectivement  $NB$ ) la durée du délai pour A (respectivement B). Nous obtenons :

$$p = \text{Proba} [NA = 0] * \text{Proba} [NB = 0] + \text{Proba} [NA = 1] * \text{Proba} [NB = 1]$$

$$p = 1/2 * 1/4 + 1/2 * 1/4 = 1/4 = 0,25.$$

- b** Si  $B$  a déjà subi 5 collisions, le délai qu'il va tirer est réparti entre 0 ST et 31 ST.

$$p = \text{Proba}[NA = 0] * \text{Proba}[NB = 0] + \text{Proba}[NA = 1] * \text{Proba}[NB = 1]$$

$$p = 1/2 * 1/32 + 1/2 * 1/32 = 1/32.$$

- c** Le nombre de collisions déjà subies par un équipement permet de déterminer la taille de l'intervalle dans lequel il tire au sort son délai d'attente. Le temps moyen d'attente avant retransmission pour un essai donné est en effet égal à la moitié de l'intervalle de tirage, puisqu'il s'agit d'une loi uniforme. Le temps moyen cumulé pour  $n$  tentatives est donc la somme de chaque temps moyen, pour  $n$  allant de 1 à 16.

Soit ST la durée du Slot-Time.

Si  $n = 0$ , l'équipement n'a subi aucune collision et  $T_0 = 0$ .

Dans le cas où l'équipement a subi  $n$  collisions au total, avec  $n$  inférieur ou égal à 10, avant de réussir sa transmission, son délai d'attente se calcule comme suit :

Le délai d'attente a une valeur nulle avant la première transmission. Après la première collision, comme  $N$  vaut 0 ou 1, on a  $D_1 = (0 + 1)/2 * ST = ST/2$ . Après la deuxième collision,  $N$  vaut 0, 1, 2 ou 3, donc on a  $D_2 = (0 + 1 + 2 + 3)/4 * ST = 3 ST/2$ . Après la troisième collision,  $N$  vaut 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ou 7. On obtient :  $D_3 = (0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7)/8 * ST = 7 ST/2$  et ainsi de suite jusqu'à  $n$ . Donc :

$$T_n = D_0 + D_1 + D_2 + \dots + D_n = 0 + ST/2 + 3 ST/2 + \dots + (2^n - 1) ST/2 = (2^n - (n + 1)/2) * ST.$$

Si l'équipement a subi  $n$  collisions au total, avec  $n$  compris entre 11 et 15 (bornes incluses), le calcul est légèrement différent du précédent puisque :  $D_{10} = D_{11} = D_{12} = D_{13} = D_{14} = D_{15}$ .

On trouve alors :

$$T_n = T_{10} + (n - 10) * D_{10}.$$

## EXERCICE 12 LATENCE D'UN ANNEAU À JETON

### Énoncé

Un réseau local en anneau comprend 10 stations uniformément réparties sur l'anneau. La vitesse de propagation des signaux est de 200 m/μs. Les trames ont une longueur totale de 256 bits. Calculez le nombre de bits en transit sur l'anneau pour les configurations suivantes :

- a** Pour une longueur de 10 km et un débit binaire de 5 Mbit/s.
- b** Pour une longueur de 1 km et un débit binaire de 500 Mbit/s.
- c** Comparez les deux anneaux du point de vue du nombre de trames en transit, du débit utile et du rendement, si la station émettrice attend le retour de sa propre trame pour réinjecter un jeton sur l'anneau.

### Solution

- a** Le débit est 5 Mbit/s, donc 1 bit dure  $1/(5 * 10^6) = 0,2 \mu s$ . La vitesse de propagation étant de 200 m/μs, 1 bit équivaut à  $200 * 0,2 = 40$  m de câble. Si la longueur de l'anneau est de 10 km, la latence vaut :  $10\,000/40 = 250$  bits.
- b** Le débit est 500 Mbit/s, donc 1 bit dure  $1/(500 * 10^6) = 0,002 \mu s$ . La vitesse de propagation étant de 200 m/μs, 1 bit équivaut à  $200 * 0,002 = 0,40$  m de câble. Si la longueur de l'anneau est de 1 km, la latence est alors de  $1\,000/0,40 = 2\,500$  bits.

- c** Le nombre de trames en transit dans le cas a est presque de 1, puisque le temps de propagation sur l'anneau est de  $10\ 000/200 = 50\ \mu\text{s}$  et que le temps de transmission d'une trame vaut :  $256/(5 \times 10^6) = 51,2\ \mu\text{s}$ . Un équipement émet le 251<sup>e</sup> bit quand il reçoit le 1<sup>er</sup>. Il émet le 252<sup>e</sup> bit quand il reçoit le 2<sup>e</sup>... Pour transmettre le jeton, il doit attendre d'avoir reçu son 256<sup>e</sup> bit. Il attend donc  $50\ \mu\text{s}$ . Le débit utile est de  $(5 \times 10^6 \times 51,2) / (51,2 + 50) = 2,52\ \text{Mbit/s}$ . Le rendement vaut :  $2,52/5 = 50\ %$ .

Dans le cas b, le nombre de trames en transit est presque de 10, car le temps de propagation sur l'anneau est de  $1\ 000/200 = 5\ \mu\text{s}$  et le temps de transmission d'une trame est de  $256/(500 \times 10^6) = 0,512\ \mu\text{s}$ . Dans la latence de l'anneau (2 500 bits) il pourrait y avoir  $2\ 500/256 = 9,76$  trames. Or, pour pouvoir réinjecter le jeton, l'équipement doit attendre d'avoir reçu la fin de sa propre trame. Il attend donc  $5\ \mu\text{s}$  et le débit utile est de  $(500 \times 10^6 \times 0,512) / (0,512 + 5) = 46,4\ \text{Mbit/s}$ . Le rendement est nettement plus faible :  $46,4/500 = 9\ %$ .

### Remarque

Cette perte d'efficacité est caractéristique du mécanisme à base de jeton quand le débit augmente. Elle explique pourquoi les réseaux de type Token Ring ont moins bien évolué que les réseaux Ethernet vers les Gbit/s. Pour conserver une bonne efficacité, il aurait fallu changer le mode de gestion du jeton, donc changer les cartes réseau de toutes les machines, ce qui représente un investissement considérable. Une variante de l'anneau à jeton (FDDI, *Fiber Distributed Data Interface*) sur fibre optique, fonctionnant à 100 Mbit/s, utilise des jetons temporisés et autorise la présence de plusieurs jetons dans l'anneau.

## EXERCICE 13 SIMULATION DE TRAFIC SUR UN ANNEAU À JETON

### Énoncé

Soit un anneau à jeton constitué de 4 stations *A*, *B*, *C* et *D*. À un instant donné, *A* émet une trame avec la priorité 2. *C* veut émettre une trame avec la priorité 5 et *D* veut émettre avec la priorité 7. Sachant que chaque station s'occupe de retirer de l'anneau la trame qu'elle a émise et qu'elle doit ensuite remplacer celle-ci par un jeton libre, indiquez comment les stations opèrent pour répondre aux besoins du trafic.

### Solution

*A* possède le jeton et transmet sa trame de priorité 2 qui arrive à la station voisine *B* qui n'a pas de trafic. *B* se contente donc de la répéter vers *C*. La station *C* a une trame à émettre et celle-ci est de priorité 5. Dans la trame de *A* qu'elle reçoit de *B* et répète vers *D*, *C* positionne le champ de réservation de priorité qui était vide à la valeur 5. La station *D* a une trame à émettre de priorité 7. Dans la trame de *A* qu'elle reçoit de *C* et répète vers *A*, elle remplace le contenu du champ de réservation de priorité par la valeur 7 (et elle mémorise la valeur 5 qu'elle vient d'écraser). Lorsque *A* a fini de recevoir sa propre trame, elle envoie donc un jeton libre vers *B* avec la priorité 7, que *B* laisse passer. *C* reçoit le jeton mais celui-ci est de priorité plus élevée que celle demandée. Elle laisse donc passer le jeton à destination de *D*. Celle-ci reçoit le jeton qui correspond à la priorité réclamée. *D* prend le jeton et transmet sa trame de priorité 7 qui fait le tour de l'anneau.

Au passage de cette trame, la station *C* qui a toujours une trame en attente, laisse encore passer son tour. Lorsque *D* a fini de recevoir sa propre trame, elle envoie un jeton libre vers *A* avec la priorité 7 (cela permet à toutes les autres stations qui auraient une trame de priorité 7 d'écouler leur trafic. Le jeton libre revient à *D* puisque ici il n'y a pas d'autre trafic de priorité 7). *D* envoie enfin un jeton libre avec la priorité 5 que *C* souhaitait. *C* transmet sa

trame de priorité 5 qui fait tout le tour de l'anneau puis elle réinjecte enfin un jeton libre de même priorité (5) avant d'envoyer un jeton à la priorité précédente (2).

### Remarque

Le niveau de priorité 5 est *a priori* réservé aux stations qui ont des fonctions particulières (les ponts, par exemple). La priorité maximale 7 est utilisée pour les trames de supervision de l'anneau. En absence de demande, le jeton libre circule avec la priorité 0, donc toutes les stations peuvent émettre, même avec la priorité la plus faible. L'exercice donne un aperçu de la complexité de gestion des priorités dans un anneau à jeton.

## EXERCICE 14 ETHERNET COMMUTÉ

### Énoncé

Soit un réseau Ethernet commuté constitué de 45 équipements et d'un serveur connectés à un commutateur 100 Base T.

- a** Quelle est la topologie physique de ce réseau ? Quel est le débit du réseau et quel support de transmission est utilisé ?
- b** À l'aide de cet exemple, montrez les principales différences de fonctionnement entre un concentrateur et un commutateur.
- c** Si 5 équipements transmettent des données simultanément vers le serveur, quel débit théorique peut espérer chacun d'entre eux ?

### Solution

- a** La topologie physique est en étoile, le débit de 100 Mbit/s sur paires métalliques.
- b** Avec un concentrateur, lorsqu'un équipement émet vers un autre, tous les équipements du réseau reçoivent l'information. Le débit de 100 Mbit/s est partagé entre les utilisateurs et les transferts de données se font à l'alternat. Un concentrateur est un équipement très bon marché.  
  
Avec un commutateur, si un équipement émet vers un autre, seul le destinataire reçoit l'information. Chaque utilisateur emploie un débit de 100 Mbit/s et les transferts de données sont bidirectionnels simultanés. Un commutateur est plus onéreux mais le rapport prix/performance vaut le supplément.
- c** Si le commutateur a une capacité suffisante, chaque équipement, directement relié au commutateur, peut disposer d'un débit théorique dédié de 100 Mbit/s dans les deux sens de transmission. Puisque les 5 équipements communiquent avec le même serveur, le lien entre le serveur et le commutateur est en fait partagé entre les 5 communications : un débit maximal de 20 Mbit/s est offert à chaque dialogue.

## EXERCICE 15 GIGABIT ETHERNET

### Énoncé

Pour les transmissions de type Ethernet 1 Gbit/s, la trame doit avoir une longueur minimale de 512 octets.

- a** Quel est le temps d'émission d'une trame de longueur minimale ?
- b** Peut-on en déduire la période de vulnérabilité dans un tel réseau ?

**Solution**

- a** Le temps d'émission d'une trame de 512 octets est  $512 \times 8 / 10^9$  soit environ 4  $\mu$ s.
- b** On peut en déduire que la période de vulnérabilité est au plus égale à 4  $\mu$ s.

**Remarque**

On comprend ici pourquoi il a fallu augmenter la taille de la trame : la période de vulnérabilité aurait été trop courte.

**EXERCICE 16 RÉSEAUX LOCAUX VIRTUELS**

**Énoncé**

On considère un commutateur avec 8 ports numérotés  $P1, P2, \dots, P8$ . 6 équipements notés  $M1, M2, \dots, M6$  sont connectés à ce commutateur.  $M1$  est connecté sur le port  $P1, M2$  sur le port  $P2 \dots$

- a** L'équipement  $M1$  envoie une trame Ethernet avec l'adresse de diffusion. Qui reçoit cette trame ? Si maintenant l'équipement  $M1$  envoie une trame Ethernet à  $M3$ , qui la reçoit ?
- b** On met en place des réseaux locaux virtuels par port sur le commutateur : le VLAN  $A$  contient les équipements  $M1, M3$  et  $M5$ , le VLAN  $B$  les équipements  $M2, M4$  et  $M6$ . Donnez l'affectation des ports aux différents VLAN dans le commutateur.
- c** Que se passe-t-il pour le scénario de la question a ?
- d** On ajoute un second commutateur avec la même configuration et 6 nouveaux équipements  $M11, M12, M13, M14, M15$  et  $M16$ . Les équipements de numéro impair appartiennent au VLAN  $A$ , ceux de numéro pair au VLAN  $B$ . Proposez une solution pour relier les deux commutateurs. Donnez la nouvelle affectation des ports aux différents VLAN dans le premier commutateur.
- e** Peut-on n'utiliser qu'un seul lien entre les deux commutateurs ?

**Solution**

- a** Lorsque  $M1$  envoie une trame Ethernet avec l'adresse de diffusion, le commutateur la répète sur l'ensemble de ses ports : tous les équipements, de  $M1$  à  $M6$ , la reçoivent. Quand  $M1$  envoie ensuite une trame à  $M3$ , le commutateur la reçoit sur le port  $P1$  et la transmet sur le port  $P3$  : seul  $M3$  la reçoit.
- b** Le commutateur associe  $P1, P3$  et  $P5$  au VLAN  $A$  et  $P2, P4$  et  $P6$  au VLAN  $B$ .
- c** Le commutateur diffuse au sein du VLAN  $A$  la trame de  $M1$  arrivant par le port  $P1$ . Les équipements de numéros pairs ne la reçoivent pas : le commutateur isole les équipements des deux VLAN, le trafic de l'un ne passe pas sur l'autre. Le traitement de la trame envoyée par  $M1$  à  $M3$  est inchangé, puisque  $M1$  et  $M3$  sont à l'intérieur du même VLAN  $A$ .
- d** Le second commutateur peut avoir une table semblable à celle du premier :  $P1, P3$  et  $P5$  appartiennent au VLAN  $A$  et  $P2, P4$  et  $P6$  au VLAN  $B$ . Il reste à relier les deux commutateurs. Pour cela, on peut relier les ports 7 de chaque commutateur et affecter ce port au VLAN  $A$ . De même, on peut relier les ports 8 de chacun d'eux et l'affecter au VLAN  $B$ .  
La table devient alors :  $P1, P3, P5$  et  $P7$  au VLAN  $A$  et  $P2, P4, P6$  et  $P8$  au VLAN  $B$ .
- e** Si on met deux liens (en reliant les deux ports  $P7$  entre eux et les deux ports  $P8$  entre eux), on se retrouve avec une boucle dans le réseau et il faudra gérer l'algorithme de l'arbre couvrant. Il n'y a pas de boucle si on ne met qu'un seul lien entre les deux commutateurs (entre les ports  $P7$ , par exemple), mais les deux VLAN doivent alors partager ce lien : le

port *P7* appartient aux deux VLAN. Dans ce cas, il faut que les VLAN soient étiquetés pour que les commutateurs sachent comment traiter les trames. Il faut également que les cartes réseau des équipements supportent le standard 802.1Q qui permet l'étiquetage des VLAN.

### Remarque

Cet exercice montre l'intérêt d'utiliser le protocole 802.1Q : en permettant la création de plusieurs arbres couvrants, on peut relier les deux commutateurs par plusieurs *trunks* et donc améliorer la tolérance aux pannes du réseau.

## EXERCICE 17 INTERCONNEXION

### Énoncé

Deux entreprises *A* et *B*, installées dans le même immeuble de bureaux, sont équipées l'une d'un réseau local de type Ethernet, l'autre d'un réseau local de type Token Ring.

- a** Proposez une solution d'interconnexion pour que chaque station de l'entreprise *A* puisse dialoguer avec toutes les stations de l'entreprise *B*.
- b** À quoi pourrait-on attribuer le goulet d'étranglement et la dégradation éventuelle des débits utiles d'une station du réseau *A* ?

### Solution

- a** Les deux réseaux sont proches l'un de l'autre mais ils utilisent des couches MAC différentes. Il est donc impossible de les relier par des répéteurs. Un pont au minimum est indispensable, mais un routeur pourra tenir compte de la taille des trames différentes : en constatant qu'une trame de taille maximale de Token Ring ne peut pas entrer telle quelle dans un réseau Ethernet, il fabrique autant de trames que nécessaire pour ne pas perdre d'informations entre les deux réseaux locaux, ce qu'un simple pont ne sait pas faire. La réponse à la question suivante explique pourquoi.
- b** Si les débits sont différents (10 Mbit/s sur Ethernet et 16 Mbit/s sur Token Ring par exemple), une longue rafale de trafic dans le sens *B* vers *A* peut entraîner des pertes de trames, parce que le pont ne peut plus les mémoriser avant de les envoyer vers le réseau le plus lent. En outre, s'il y a plusieurs trames de longueur maximale (4 500 octets) de *B* vers *A*, celles-ci doivent être fragmentées dans le réseau *A* : il faut donc un équipement capable de fragmenter le champ de données trop long, puis d'encapsuler chaque fragment dans une trame au format adéquat. Seuls un routeur ou un commutateur-routeur peuvent assurer ces fonctions.

D'autre part, le service rendu par les deux couches MAC est différent. Une station du réseau *B* ne reçoit pas l'accusé de réception (champ FS de la trame) qu'elle attend. En effet, le pont qui se trouve dans le réseau *A* ne renvoie pas la trame, comme le fait une station d'un anneau à jeton. Dans le cas où le pont a rempli le champ FS de lui-même, la machine du réseau *B* croit que son destinataire a bien reçu la trame, ce qui n'est peut-être pas vrai.

Dans le cas où Ethernet est le réseau local le plus rapide, il n'y a pas de risque de trouver des champs de données trop longs mais la mémoire du pont peut être insuffisante pour éponger une rafale prolongée de trafic vers le réseau Token Ring.

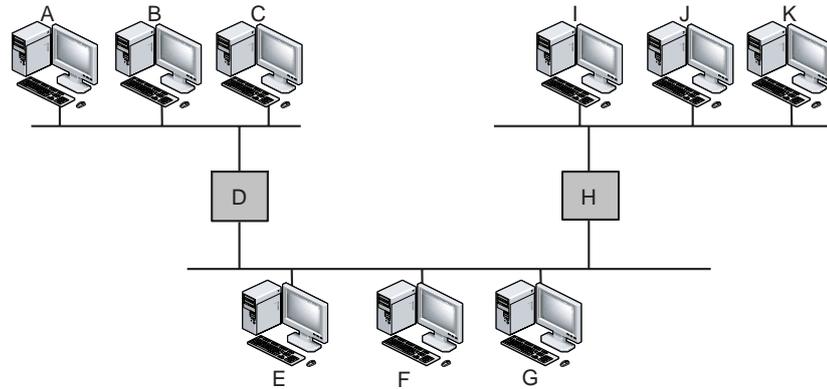
EXERCICE 18 RÔLE DES PONTS

**Énoncé**

- a** Soit le réseau suivant (voir figure 5.19) constitué de trois sous-réseaux Ethernet. Le protocole de niveau réseau utilisé est IP. Les machines *D* et *H* sont des ponts. Décrivez l'envoi de la trame de *F* à *C* (une station qui vient de se connecter au réseau). Si *K* est un analyseur de trafic, peut-il enregistrer la trame ?

Figure 5.19

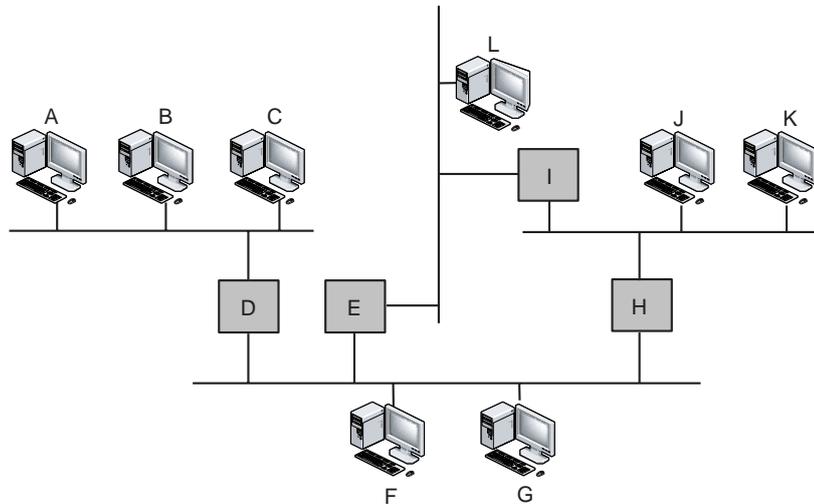
Exemple de réseau.



- b** Même question avec la trame réponse de *C* à *F*.
- c** On étend le réseau précédent (voir figure 5.20). Les équipements d'interconnexion *D*, *E*, *I* et *H* peuvent-ils être des répéteurs ? Des ponts ?

Figure 5.20

Extension du réseau précédent.



**Solution**

- a** Si *D* et *H* sont des ponts, ils reçoivent l'un et l'autre la trame émise par *F*. Les deux ponts, ne sachant pas où se trouve le destinataire, laissent passer la trame, laquelle circule sur les deux autres sous-réseaux. *C* reçoit donc la trame. *K*, qui est dans le troisième sous-réseau, la voit passer de même et peut l'enregistrer.
- b** Lorsque *C* répond à *F*, la trame diffusée parvient au pont *D* qui sait qu'il doit la laisser passer puisque *F* est accessible de l'autre côté. Par contre, le pont *H* sait que *C* et *F* sont situés

du même côté. Il filtre donc la trame qui ne transite pas sur le troisième sous-réseau : l'analyseur de protocole *K* ne voit pas la trame réponse.

- c** Si *D*, *E*, *I* et *H* sont des répéteurs, le réseau ne peut pas fonctionner car il n'a plus sa structure de bus ramifié. Si *D*, *E*, *I* et *H* sont des ponts, le réseau ne peut fonctionner que si l'un des ponts est inactif (ce qui a pour effet de « couper » la boucle). Les ponts constituent un ensemble collaboratif, ils discutent entre eux et décident celui qui sera inactif (c'est le rôle de STP, l'algorithme de l'arbre couvrant).

### Remarque

L'explication de la question a suppose que les ponts fassent de l'autoapprentissage. Si les ponts sont configurés à l'avance avec les adresses MAC des stations qui sont de chaque côté, seul le pont *D* laisse passer la trame qui va de *F* à *C* ainsi que sa réponse de *C* à *F*. L'analyseur *K* ne voit rien de ce trafic. Cet exemple montre l'intérêt des ponts pour segmenter des réseaux locaux.

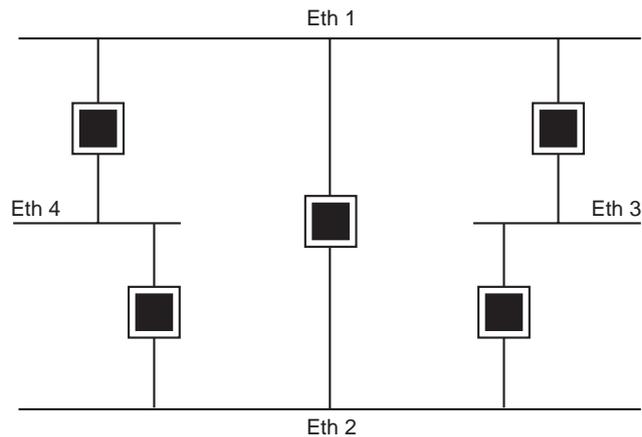
## EXERCICE 19 ALGORITHME DE L'ARBRE COUVRANT

### Énoncé

Considérons un réseau d'entreprise composé de segments Ethernet interconnectés par des commutateurs, comme le montre la figure 5.21.

Figure 5.21

Interconnexion des segments Ethernet par des commutateurs.



- a** Considérons les réseaux Eth1 et Eth2. Combien de chemins différents les données peuvent-elles emprunter pour aller d'un réseau à l'autre ?
- b** Comment sera assurée la redondance en cas de panne d'un commutateur ?
- c** Que peut-il arriver si un des commutateurs n'arrive plus à recevoir d'informations sur un port mais qu'il puisse toujours en émettre ?

Les BPDU de configuration sont constitués du triplet :  $\langle ID \text{ pont racine.coût à la racine. ID pont émetteur} \rangle$ . Un commutateur d'identifiant  $ID = 27$  reçoit sur ses différents ports les BPDU : *port 1* :  $\langle 35.2.48 \rangle$  ; *port 2* :  $\langle 15.3.17 \rangle$  ; *port 3* :  $\langle 15.3.19 \rangle$  ; *port 4* :  $\langle 15.3.22 \rangle$ .

- d** Quel est le meilleur BPDU de configuration que ce commutateur peut fabriquer ?
- e** Quelle valeur maximale faut-il donner à l'ID du commutateur pour qu'il puisse devenir racine ?
- f** Quel est le port racine ? Quels ports font partie de l'arbre couvrant ?

**Solution**

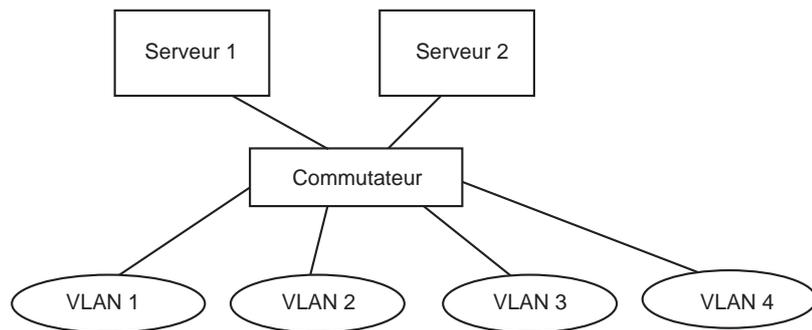
- a** Avant le transfert des données, les commutateurs exécutent l’algorithme STP pour éviter les boucles dans le réseau. Une fois que les commutateurs l’ont exécuté, il n’y a qu’un seul chemin possible pour les données entre Eth1 et Eth2.
- b** Certains commutateurs ne vont plus recevoir de BPDU de configuration et cela provoquera une nouvelle exécution de l’algorithme de l’arbre couvrant pour construire une nouvelle arborescence.
- c** Il ne va plus recevoir de BPDU de configuration sur le port en panne. Il commence donc une nouvelle exécution de l’algorithme de l’arbre couvrant de manière intempestive. Comme il ne reçoit plus les informations, il peut déclencher une tempête de diffusion (*broadcast storm*). Il faut le déconnecter !
- d** Le meilleur BPDU de configuration qu’il puisse produire est : < 15.4.27 >.
- e** Il faut que l’ID ait au maximum la valeur 14.
- f** Le port racine est le port 2. Les ports 1 et 2 font partie de l’arbre couvrant.

**EXERCICE 20 UTILISATION DE VRRP POUR ÉQUILIBRER LE ROUTAGE DANS UN RÉSEAU D’ENTREPRISE**

**Énoncé**

Une entreprise utilise deux serveurs pour les machines de son réseau constitué de quatre VLAN. Jusqu’à présent, un simple commutateur raccorde les différents VLAN aux deux serveurs, comme le montre la figure 5.22.

**Figure 5.22**  
L’architecture initiale du réseau de l’entreprise.



- a** L’accès aux serveurs devient une ressource critique. L’entreprise veut équilibrer le routage entre ses quatre VLAN, le serveur 1 étant principalement utilisé par les VLAN 1 et 2, le serveur 2 par les VLAN 3 et 4. Proposez une solution qui puisse équilibrer le routage et permette au réseau de continuer à fonctionner si l’un des équipements d’interconnexion tombait en panne.

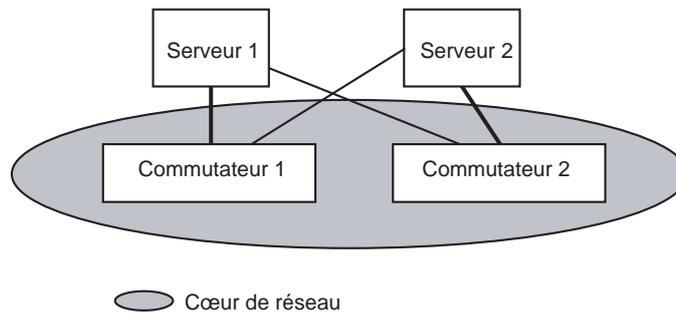


**Énoncé**

- b** Le réseau évolue car l'entreprise grandit. Elle acquiert un deuxième commutateur pour constituer un *cœur de réseau*, comme le montre la figure 5.23. L'administrateur constate alors une saturation des liens de son réseau. Pouvez-vous expliquer pourquoi ?

**Figure 5.23**

Relations entre le cœur de réseau et les serveurs de l'entreprise.



- c** Proposez une solution pour y remédier tout en préservant la redondance de l'architecture.

**Solution**

- a** Pour introduire une redondance dans l'accès aux VLAN, il faut doubler le dispositif qui assure l'acheminement dans le réseau : le plus simple est d'installer deux commutateurs-routeurs utilisant le protocole VRRP pour raccorder chaque serveur par deux liens différents (en *double attachement* : un lien est actif pendant que l'autre est désactivé). Les deux commutateurs-routeurs constituent le cœur du réseau de la figure 5.23.
- b** Avec l'adjonction du nouveau commutateur, on a créé la boucle : Serv 1 – commutateur 1 – Serv 2 – commutateur 2 – Serv 1. Cela explique pourquoi les liens sont saturés.
- c** Pour supprimer la boucle, la première des choses à faire est d'activer l'arbre couvrant (STP). Pour privilégier un chemin en fonctionnement normal sans interdire la redondance, il faut créer des chemins différents, donc utiliser des arbres couvrants multiples, en construisant un STP par VLAN selon le standard 802.1Q.

La solution précédente est à compléter car, en cas de défaillance d'un équipement, le chemin entre un VLAN donné et le serveur auquel il fait le plus souvent appel n'est pas forcément simple. On a donc intérêt à ajouter un lien entre commutateur 1 et commutateur 2 pour simplifier le trajet dans le réseau.