

## **Chapitre 25: Exercices et Problèmes avec solutions**

- Exercice 1:** Application de la loi de Rigault
- Exercice 2:** Estimation des ressources
- Exercice 3:** Dimensionnement des canaux TCH
- Exercice 4:** Dimensionnement des canaux SDCCH sans SMS
- Exercice 5:** Liaison sans répéteurs - cas1
- Exercice 6:** Liaison sans répéteurs - cas2
- Exercice 7:** Dimensionnement des canaux TCH et SDCCH et du nombre de cellules
- Exercice 8:** Dimensionnement d'une zone
- Exercice 9:** Dimensionnement de la charge de signalisation SS7
- Exercice 10:** Dimensionnement de la capacité d'un CPU d'un MSC
- Exercice 11:** Dimensionnement de la capacité de la liaison MSC-VMS
- Exercice 12:** Compromis spectre limité / trafic important
- Exercice 13:** Configuration d'antennes et hauteur de la BTS
- Exercice 14:** Configuration d'antennes et type de portable
- Exercice 15:** Détermination du nombre de fréquences
- Exercice 16:** Configuration d'antennes et type de portable
- Exercice 17:** Détermination du nombre de fréquences
- Exercice 18:** Choix de modèles
- Exercice 19:** Détermination du trafic
- Exercice 20:** Choix de modèles
- Exercice 21:** Détermination d'une puissance
- Exercice 22:** Détermination du nombre de cellules
- Exercice 23:** Choix de diversité
- Exercice 24:** Choix d'un modèle
- Exercice 25:** Configuration d'antennes et type de mobile
- Exercice 26:** Problèmes de temps de dispersion
- Exercice 27:** Augmentation de trafic
- Exercice 28:** Comment dimensionner le lien BSC – MSC ?
- Exercice 29:** Sélection d'un canal logique
- Exercice 30:** Sélection d'un canal logique
- Exercice 31:** Spécifier le mécanisme de mise à jour de localisation
- Exercice 32:** Spécifier le mécanisme de handover
- Exercice 33:** Communication téléphonique
- Exercice 34:** Réutilisation de fréquence
- Exercice 35:** Emetteur radio
- Exercice 36:** Station de base d'un réseau GSM
- Exercice 37:** Station de base d'un réseau GSM (suite et fin)
- Exercice 38:** Liaison sans répéteurs
- Exercice 39 :** Opérateur de GSM
- Exercice 40:** Système de radiocommunication
- Exercice 41:** Changement de cellule
- Exercice 42:** Nombre de fréquences par cellule
- Exercice 43:** Réflexion totale
- Exercice 44:** Capacité d'une station de base
- Exercice 45:** Capacité d'une station de base 2
- Exercice 46:** Puissance de réception
- Exercice 47:** Liaison sans répéteurs
- Probleme 1:** Nouvelle allocation de fréquences

**Problème 2:** Réseau GSM

**Problème 3:** Dimensionnement du trafic 1

**Problème 4:** Dimensionnement du trafic 2

**Problème 5:** Gestion du handover

**Problème 6:** Du GSM à l'UMTS

**Problème 7:** Le WiMAX

**Problème 8:** Dimensionnement des sites GSM

**Problème 9:** Dimensionnement des sites GSM 2

**Exercice 48.** *On considère un réseau à transfert de paquets*

**Exercice 49.** *On veut comparer un réseau à commutation de circuit et un réseau à, transfert de paquets*

**Exercice 50.** *On considère un réseau à transfert à de paquets composé de trois nœuds en série, A B et C. Supposons que le temps de transfert d'un nœud c'est-à-dire le temps entre le moment où le paquet est complémenté activé dans le nœud et le moment où il est dans la ligne de sortie, prêt à être émis vers le nœud suivant, soit nul*

**Exercice 51.** *Le protocole utilisant les paquets IP ou les trames ATM et Ethernet sont des réponses possibles pour la mise en place de réseau multimédias*

**Exercice 52.** *On considère une application de télévision sur Internet, c'est-à-dire la diffusion d'un canal vidéo de qualité télévision vers des utilisateurs connectés à Internet*

**Exercice 53.** *Un opérateur veut transformer son réseau téléphonique commuté (RTC) en un réseau Internet sans toucher à l'infrastructure physique*

**Exercice 54.** *On appelle bande passante d'un rapport de transmission la plage des fréquences qui peuvent être utilisées sur un câble ou par toute autre voie de communication. Par exemple, la paroi utilise les fréquences de 300 à 3400Hz, et sa bande passante est de 3100Hz. Les autres fréquences présentent trop d'affaiblissement et ne peuvent être utilisées. L'affaiblissement, exprimé en décibel (dB), est obtenu par la formule  $10\log R$  est le rapport des puissances aux deux extrémités de la communication*

**Exercice 55.** *Soit un réseau en bus bidirectionnel sur lequel sont connectées les différentes machines terminales. Dans un réseau en bus bidirectionnel, le signal est en diffusion*

**Exercice 56.** *On considère un réseau en bus bidirectionnel de 1Km de long dont le débit est de 10Mbit /s*

**Exercice 57.** *On considère un réseau en arbre dans lequel les hubs recopient les paquets dans toutes les directions à l'exception de leur ligne d'arrivée*

**Exercice 58.** *Soit un réseau en boucle sur lequel sont connectés des PC*

**Exercice 59.** *On souhaite étudier les problèmes qui pourraient survenir sur un réseau en boucle avec une technique de jeton pour réguler les accès*

**Exercice 60.** *Soit un réseau en bus bidirectionnel avec une technique de jeton pour gérer les accès. Seule la station possédant le jeton a le droit d'émettre. Chaque station possède une table qui lui indique la station suivante devant recevoir le jeton et la station dont elle doit recevoir le jeton*

**Exercice 61.** *On veut comparer différentes techniques de transfert*

**Exercice 62.** *On souhaite comparer les avantages des routeurs et des commutateurs*

**Exercice 63.** *On souhaite déterminer les caractéristiques d'un réseau de signalisation*

**Exercice 64.** *On considère un réseau à commutation de paquets*

**Exercice 65.** *On considère un réseau dans lequel les nœuds peuvent se comporter soit comme des commutateurs, soit comme des routeurs. On appelle ces nœuds des LSR (Label Switched Router)*

**Exercice 66.** *On considère un réseau TCP/IP constitué de sous réseaux ATM interconnectés entre eux par des routeurs*

**Exercice 67.** On souhaite étudier les caractéristiques d'un réseau Ethernet commuté

**Exercice 68.** On veut comparer les techniques de transfert et le niveau de l'architecture

**Exercice 69.** On considère un réseau formé de commutateurs avec des références de longueur  $n$

**Exercice 70.** Soit un réseau qui suit l'architecture de modèle de références et qui comporte un niveau physique, un niveau trame, un niveau paquet et un niveau message.

Le trame commence par la suite 0101010101010101010101010101

**Exercice 71.** On étudie un réseau ayant pour but de servir au support d'une application téléphonique non-temps réel, c'est-à-dire d'une application échangeant des messages téléphoniques qui peuvent être écoutés sans interactivité

**Exercice 72** On considère un réseau utilisant un niveau physique ayant les caractéristiques suivantes : le codage est de type Manchester, c'est-à-dire que le 0 est indiqué par un front montant (signal qui passe instantanément d'une valeur à une autre dans le sens montant) et le 1 par un front descendant auquel on ajoute un signal supplémentaire, par exemple, un signal constant sans front. Ce troisième signal s'interprète comme une violation du code puisqu'il ne suit pas le principe du code Manchester

**Exercice 73.** On considère un réseau ATM auquel on ajoute un protocole X.25.3 au niveau paquet et une classe 4 au niveau message

**Exercice 74.** On considère un réseau formé de deux sous réseaux. L'un est un réseau ATM et l'autre un réseau Ethernet comme illustré à la figure 6.8. L'environnement TCP/IP est utilisé pour transporter de l'information de A à B

**Exercice 75.** On veut étudier un réseau multimédia composé de réseaux interconnectés. Les clients utilisent des PC munis de cartes coupleurs Ethernet. L'interface utilisateur interne au PC utilise le protocole TCP/IP. Les PC sont connectés par l'intermédiaire de réseaux Ethernet. Les réseaux Ethernet sont interconnectés par trois réseaux : un réseau ATM, un réseau à commutation de circuits et un réseau utilisant l'architecture TCP/IP suivant le schéma utilisé à la figure 6-9.

**Exercice 76.** On considère le réseau à quatre nœuds dont la topologie est illustrée à la figure 7-12. Ce réseau transporte des paquets d'une extrémité à l'autre (de A à B par exemple)

**Exercice 77.** On souhaite étudier la technique de contrôle de flux dite leaky-bucket dans sa version la plus simple : un jeton arrive toutes les  $T$  unités de temps et s'il n'y a aucun paquet prêt à être transmis, le jeton est perdu

**Exercice 78.** Soit un contrôle de flux par fenêtre dont la taille est  $N$ . Chaque fois que le récepteur reçoit une trame, il renvoie un acquittement

**Exercice 79.** On veut introduire une qualité de service dans un réseau de routage par une technique utilisant des classes. Pour cela on suppose la définition de trois classes 1, 2 et 3 avec 1 de plus haute priorité et 3 de plus faible priorité. Les paquets prioritaires sont servis avant les paquets moins prioritaires.

**Exercice 80.** Considérons un réseau de signalisation

**Exercice 81.** On considère un réseau de communication qui utilise la commutation de cellules ATM avec une architecture normalisée UIT-T. Pour effectuer le transport de l'information de l'utilisateur A vers l'utilisateur B, le circuit virtuel qui est ouvert passe par deux nœuds intermédiaires C et D. le schéma général du réseau est illustré à la figure 7 -13

**Exercice 82.** On veut exploiter une liaison bidirectionnelle simultanée (full-duplex) entre un serveur et un terminal à 1200 bits/s dans les deux sens

**Exercice 83.** On souhaite analyser le comportement d'un multiplexeur temporel par caractère (qui multiplexe des caractères et non des trames ou des paquets) chargé de

gérer le trafic provenant de  $N$  terminaux asynchrones fonctionnant à 110bit/s. Un caractère émis sur une ligne de basse vitesse est composé de 7 bits de donnée, 1 bit de parité, 1 bit Start et 2 bits Stop. Le débit de la ligne haute vitesse est de 9600bit/s. De plus 5% de la capacité de la ligne haute vitesse sont réservés à la signalisation et la synchronisation

**Exercice 84.** On veut étudier l'interface RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Service) de base, qui permet de faire transiter simultanément trois canaux sur une même liaison. Cette interface commercialisée par plusieurs opérateurs permet de faire transiter deux voies téléphoniques et une voie de donnée. Les deux voies téléphoniques proposent un débit de 64kbit/s, et la voie de données un débit de 16kbit/s. L'interface étant numérique, on peut remplacer directement une communication téléphonique par un transfert de données allant à la vitesse de 64kbit/s

**Exercice 85.** La technique de transmission appelée SONET (Synchronous Optical Network) transporte de façon synchrone une trame toutes les  $125\mu s$ . Cette trame contient neuf tranches qui à leur tour contiennent trois octets de supervision et 87 octets de données

**Exercice 86.** On considère une liaison entre deux nœuds de transfert

**Exercice 87.** Soit un protocole de niveau trame permettant la communication entre deux nœuds de transfert

**Exercice 88.** Un réseau IP a pour objectif de transporter des paquets IP d'une machine terminale vers une autre. Les nœuds de transfert sont des routeurs

**Exercice 89.** On considère une liaison LAP-B d'une capacité de transmission de 2Mbit/s

**Exercice 90.** Soit une liaison entre deux équipements. Un contrôleur de communication gérant une procédure HDLC est installée sur les deux stations

**Exercice 91.** On considère le réseau Ethernet illustré à la figure 9-22

**Exercice 92.** Pour se connecter à son serveur, un client IPv4 doit passer par un premier réseau Ethernet puis par un routeur sur un réseau WAN puis de nouveau par un routeur sur une liaison PPP qui aboutit au serveur

**Exercice 93.** On considère le réseau dont la topologie est illustrée à la figure 10-24. C'est un réseau à commutation de paquets possédant quatre nœuds de transfert. Un client A veut communiquer avec un client B

**Exercice 94.** On considère le réseau d'un ISP, qui utilise des liaisons à très haut débit sur lesquelles transitent des paquets IP encapsulés dans des trames PPP

**Exercice 95.** On considère un réseau formé de deux routeurs. Sur le premier routeur se connecte le PC du client 1 et sur le second PC du client 2. Les deux PC travaillent sous le logiciel TCP/IP pour leur connexion réseau

**Exercice 96.** Soit trois réseaux interconnectés par des passerelles, comme illustré à la figure 11-9. On suppose que le réseau A est un réseau X.25 de catégorie A, que B est un réseau local de catégorie B et que C est un réseau local de catégorie C

**Exercice 97.** Soit un réseau IP intégrant une messagerie de type SMTP

**Exercice 98.** Soit un transfert de fichiers utilisé sur un réseau IP. Les routeurs du réseau sont connectés par des liaisons ATM

**Exercice 99.** On souhaite étudier un environnement intranet dans une société utilisant des bases de données Web

**Exercice 100.** On considère le réseau internet

**Exercice 101.** On considère un réseau Ethernet à 100 Mbits/s dans lequel la longueur de la trame est au moins égale à 512 octets

**Exercice 102.** On considère un réseau IP connecté à plusieurs réseaux d'opérateurs de télécommunications utilisant des techniques de communication de circuits classiques

**Exercice 103.** On considère la connexion d'un PC, appelé  $PC_A$ , à un autre PC, appelé  $PC_B$ , par l'intermédiaire d'un réseau ATM. Les deux PC travaillent sous un environnement IP

**Exercice 104.** Avec les commandes demande d'écho (Echo Request) et réponse d'écho (Echo Reply) d'ICMP, il est possible de tester un réseau IP. La commande Ping est un petit programme qui intègre ces deux commandes pour réaliser des tests facilement. La commande Ping envoie un datagramme à une adresse IP et demande au destinataire de renvoyer le datagramme

**Exercice 105.** Soit un réseau IP utilisant le protocole RSVP

**Exercice 106.** Soit une application téléphonique sur l'internet utilisant le protocole RTP/RTCP

**Exercice 107.** Soit un réseau IP proposant de la qualité de service au travers d'une technique DiffServ

**Exercice 108.** Soit un réseau composé de terminaux mobiles IP qui peuvent se déplacer dans des cellules. Un client est enregistré dans la cellule où il a pris son abonnement

**Exercice 109.** On considère un réseau X.25

**Exercice 110.** On suppose maintenant un réseau que l'on veuille interconnecter deux réseaux X.25 entre eux

**Exercice 111.** On veut interconnecter un réseau en relais de trames et un réseau X.25

**Exercice 112.** On considère l'interconnexion de deux réseaux en relais de trames

**Exercice 113.** Soit un réseau en relais de trames interconnectant deux réseaux locaux Ethernet sur lesquels sont connectés des PC sous IP. Cet exercice s'intéresse au type de passerelle à mettre en place entre le réseau Ethernet et le réseau en relais de trames

**Exercice 114.** On considère un réseau formé de deux sous réseaux. L'un est un réseau ATM et l'autre un réseau Ethernet, comme illustré à la figure 15-19. L'environnement TCP/IP est utilisé pour transporter de l'information de A à B

**Exercice 115.** On suppose que A est un PC possédant une carte couleur Ethernet au lieu de la carte coupleur ATM mais que réseau à traverser soit toujours le même réseau ATM

**Exercice 116** On considère maintenant que le réseau ATM est remplacé par un réseau Ethernet. Le réseau global est donc formé de sous réseaux Ethernet interconnectés par une passerelle. Les deux sont des Gigabits Ethernet (1Gbits/s) compatible avec la norme IEEE802.3 à mode partagé. La trame Ethernet est comprise entre 512 et 1500 octets. (En effet, dans le Gigabit Ethernet la longueur minimale de la trame est 512octets de sorte que la longueur du réseau atteint quelques centaines de mètres). La même technique CSMA/CD que dans les autres réseaux Ethernet est utilisée sur ces réseaux partagés

**Exercice 117.** On suppose maintenant que l'Ethernet sur lequel A est connecté soit un Ethernet commuté

**Exercice 118.** On considère le réseau Ethernet à 1Gbit/s. La trame Ethernet est d'une taille comprise entre 512 et 1500 octets. La longueur minimale de la trame Ethernet, qui est compatible avec la norme IEEE802.3, est plus longue dans cette version d'Ethernet que dans la version de base. La même technique CSMA/CD que dans les autres réseaux Ethernet est utilisée

**Exercice 119.** On considère un réseau Ethernet utilisant les ondes hertziennes comme support physique. On suppose que les stations puissent émettre et écouter la porteuse. Les terminaux peuvent se déplacer sur un cercle de diamètre D. Ce réseau est compatible avec le réseau Ethernet à 10Mbits/s terrestre. La vitesse de propagation des ondes hertziennes est supposée égale à 300000 Km/s

**Exercice 120.** On réalise un réseau hertzien mélangé à un réseau terrestre, comme illustré à la figure 15-21. Le réseau terrestre est un réseau station constitué de trois hubs. L'antenne est reliée au hub racine. La station antenne joue le rôle de récepteur

### **Exercice 121**

*On veut se servir de l'un de ces réseaux Ethernet à 10 Mbit/s pour transporter de la parole téléphonique. La contrainte pour obtenir une parole téléphonique de bonne qualité nécessite un temps de transport inférieur à 150 ms entre le moment où la parole sort de la bouche et l'instant de remise du son à l'oreille du destinataire. (On suppose que la parole téléphonique soit compressée et demande un débit de 8 Kbit/s)*

**Exercice 122.** *On suppose que deux clients A et B communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un réseau à commutation de cellule de type ATM*

**Exercice 123.** *On considère un réseau de communication qui utilise la commutation de cellules ATM avec une architecture normalisée UIT-T. Pour effectuer le transport de l'information de A à B, le chemin virtuel qui est ouvert passe par deux nœuds intermédiaires C et D. Le schéma général du réseau est illustré à la figure 16-14*

**Exercice 124 :** *On suppose qu'on multiplexe deux VC par l'intermédiaire d'un VP. Le contrôle de flux peut être assuré soit par deux leaky-buckets distincts, un par circuit (VP/VC) par un seul leaky-bucket sur le VP*

**Exercice 125.** *On considère le commutateur 8X8 illustré à la figure 16-15, qui est un commutateur Oméga*

**Exercice 126.** *On considère maintenant le commutateur Shuffle-Net illustré à la figure 16-16 qui est un commutateur ATM particulier permettant de transporter des trames ATM depuis n'importe quelle porte d'entrée (numérotée de 1 à 8 au centre de la figure ) vers n'importe quelle porte de sortie ( les mêmes que les entrées)*

**Exercice 127.** *On considère un réseau ATM constitué de deux commutateurs et d'un brasseur. On suppose que deux clients A et B communiquent entre eux suivant le schéma illustré à la figure 16-17. La capacité de commutation entre A et B est de 100 Mbit/s*

**Exercice 128.** *On cherche à multiplexer les différentes voies d'une station multimédia transmettant vers une machine distante. Ces voies sont les suivantes : Vidéo à 35Mbit /s de moyenne, parole à 64Kbit/s de moyenne et données à 2Mbit/s de moyenne*

**Exercice 129.** *On utilise un contrôle de flux de type espaceur (les paquets à l'entrée du réseau sont séparés un intervalle minimal T.) dans lequel on définit une valeur T égale au temps minimal écoulé entre l'entrée dans le réseau de deux cellules. Un utilisateur ne peut donc pas faire entrer dans le réseau une nouvelle cellule avant le temps T*

**Exercice 130.** *On considère un réseau formé d'une interconnexion de plusieurs réseaux ATM. Pour entrer dans un réseau ATM ou pour passer d'un réseau ATM vers un autre, il faut des LSR*

**Exercice 131.** *On considère un réseau MPLS formé de LSR interconnectés par des liaisons Ethernet commutées*

**Exercice 132.** *Soit un VPN MPLS c'est-à-dire un réseau MPLS réalisant un réseau d'opérateur permettant d'offrir des VPN (Virtual Private Network), ou réseaux privés virtuels à ses clients. Un VPN a pour objectif principal de sécuriser les communications entre deux entités distantes qui traversent une zone qui n'appartient pas aux deux entités communicantes*

**Exercice 133.** *On considère la station de base d'un réseau GSM. Cette station gère l'interface air avec les mobiles de sa cellule. L'interface air utilise une technique d'accès au canal radio de type TDMA, dans laquelle la trame de base possède 16 porteuses, c'est-à-dire 16 fréquences disponibles. La durée de la trame est de 4.615 ms, et chaque trame est divisée en 8 tranches de temps*

**Exercice 134.** *En fait, pour être plus précis par rapport à l'exercice précédent, chaque cellule ne dispose que d'un certain nombre de porteuses qui lui ont été allouées lors de la mise en place d'un plan de fréquences.*

**Exercice 135.** Pour éviter de déconnecter un utilisateur en cours de transmission, il faut que, hors d'un hand-over, une fréquence soit disponible dans la nouvelle cellule

**Exercice 136.** L'arrivée de l'UMTS va s'effectuer sur des cellules spécifiques

**Exercice 137.** Soit un réseau Wi-Fi travaillant à la vitesse de 11 Mbit/s

**Exercice 138.** Soit un réseau Wi-Fi travaillant à la vitesse de 11 Mbit/s. Les cartes d'accès ainsi que le point d'accès peuvent moduler leur puissance d'émission

**Exercice 139.** Soit un réseau Bluetooth.

**Exercice 140.** On aimerait développer un réseau Wi-Fi de future génération ayant des propriétés meilleures que celles des réseaux Wi-Fi actuels

**Exercice 141.** On veut étudier les possibilités de multiplexage des accès d'un câblo-opérateur. On suppose que le câble CATV employé possède une largeur utilisable de 500 MHz

**Exercice 142.** On considère un satellite géostationnaire

**Exercice 143.** On s'intéresse maintenant à une constellation de satellites situés à 700 km de la terre. Chaque satellite possède 100 antennes directives qui arrosent chacune une cellule de 50 km sur 50 km. On suppose que ces antennes arrivent globalement à couvrir un carré

**Problème 10.** Dipôle demi-onde à 100 MHz dans le plan horizontal

**Problème 11.** Champ électromagnétique rayonné par un doublet et résistance de rayonnement

**Problème 12.** Interférences de N sources équiphases d'amplitudes différentes

**Problème 13.** Diffraction de Fraunhofer d'une antenne parabolique

**Problème 14.** Antenne d'émission

**Problème 15.** Résistance du dipôle

**Problème 16.** Amplificateur d'antenne à 2.45 GHz

**Problème 17.** Alignement d'antennes (Antenne Yagi)

**Problème 18.** Liaison avec un satellite météo

**Problème 19.** Étude d'un récepteur

**Problème 20.** Etude d'un radar

**Problème 21.** Étude d'une liaison hertzienne à 10 GHz

**Problème 22.** Autre étude d'une liaison hertzienne à 10 GHz

**Problème 23.** Doublets alignés

**Problème 24.** Micro-robot mobile

# Exercice 1 : Application de la loi de Rigault

## Énoncé

- Quel est le nombre minimum de canaux nécessaires pour desservir une zone où la demande potentielle est estimée à 1600 Erlangs pour un taux de blocage de 1% ?
- Quel est le nombre minimum de stations de base nécessaires et leurs capacités respectives quand l'opérateur dispose de 63 fréquences pour un motif de réutilisation de 9 ?
- Quel est le nombre de canaux total ? Commentaires.

On supposera que dans chaque cellule, 1 IT est réservé au canal BCCH et 2 ITs sont réservés aux canaux SDCCH.

### **Le nombre de minimum de canaux**

- 1096
- 1420
- 1629
- 1906

### **Le nombre de minimum de stations de base et capacité**

- 9 stations et 0,5 Mbits
- 16 stations et 1,0Mbits
- 31 stations et 1,31MBits
- 63 stations et 1,55Mbits

### **Le nombre total de canaux**

- 1736
  - 2415
  - 2629
  - 3906
-

## Solution

### Le nombre de minimum de canaux

1096 canaux

1420 canaux

✓ **1629 canaux**

1906 canaux

## Explication

En appliquant la loi d'ErlangB, dont la formule est la suivante:

$$\Pr = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}}$$

; Avec A le trafic en Erlang, C le nombre de canaux et Pr la probabilité de blocage, on se heurte au problème de valeurs infinis, c'est-à-dire, les quantités tel que A C ou C! sont trop élevées pour être implémentés dans un logiciel. Une astuce, consiste à transformer la formule pour avoir des quantités plus petites à manipuler. Ainsi,

$$\Pr = \frac{1}{\left(\frac{C!}{A^C}\right) \left(\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}\right)} = \frac{1}{\sum_{k=0}^C \frac{C!}{k! A^{C-k}}} = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^C \frac{C(C-1)\dots(C-n+1)}{A^n}}$$

On obtient enfin

$$\Pr = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^C \left(\frac{C}{A}\right) \left(\frac{C-1}{A}\right) \dots \left(\frac{C-n+1}{A}\right)}$$

Un algorithme du chapitre 5 vous donne les valeurs de C, correspondant à A = 1600Erlang et  
Pr = 1%.

En entrant les valeurs de A et de la probabilité de blocage, on obtient : C=1629

## Solution

## Le nombre de minimum de station

9 stations et 0,5 Mbits

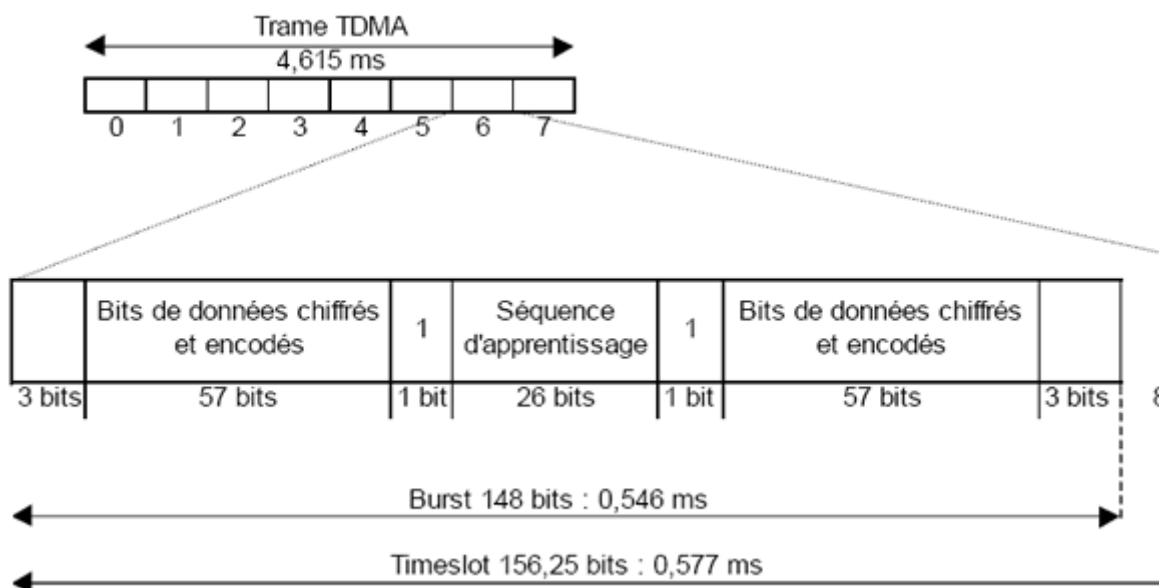
16 stations et 1,0Mbits

✓ **31 stations et 1,31MBits**

63 stations et 1,55Mbits

## Explication

La fréquence ou porteuse ou porteuse fréquentielle ou canal fréquentiel très souvent désigne la même chose. Le canal physique ou IT (Interval de Temps ou Timeslot chez les anglosaxons) désigne la même chose. Le canal de trafic (ou aussi canaux TCH) est le canal transfert des données.



## Rappel : structure de la trame TDMA

On a un motif de réutilisation de 9, alors on écrit  $N = 9$ . L'opérateur a 63 fréquences. En utilisant ces 63 fréquences dans un motif de  $N$  cellules, on a donc :

$$63/9 = 7 \text{ fréquences par cellules}$$

Chaque canal fréquentiel est divisé en 8 IT. Soit par cellule, on a  $7 \times 8 = 56$  IT. Si 1 IT est réservé pour le canal BCCH et 2 ITs pour le canal SDCCH, il reste 53 IT pour les canaux de trafic.

Le nombre total de cellules de trafic est :

$$\frac{\text{nombre total de canaux de trafic}}{\text{nombre de canaux de trafic par cellule}} = \frac{1629}{53} = 30,74$$

Soit 31 cellules en tout, et donc 31 stations de base en tout

$$C = 31 \text{ stations de bases}$$

La trame TDMA est constituée de 8 ITs. Chaque IT contient 156.25 bits qui sont transmis en un temps de 0.5769ms. Dans chaque IT, seuls 114 bits sont réservés aux données (c'est-à-dire l'information utile à l'utilisateur et le reste des bits pour entête, queue,...). Dans notre cas, notre cellule contient que 53 IT (de trafic) de 114 bits utiles chacun. Chaque IT est transmise en 0.5769ms. Chaque cellule transmet ses 53 IT utiles en une durée de  $8 \times 0.5769\text{ms} = 4.6152 \text{ ms}$  (durée de la trame TDMA). Le débit de chacune des cellules est donc:

$$D = \frac{53 \times 114}{8 \times 0.5769 \cdot 10^{-3}} \approx 1,31 \text{ Mb/s par cellule}$$

### Solution

#### **Le nombre total de canaux**

✓ 1736

2415

2629

3906

### Explication

La trame TDMA est constituée de 8 ITs. Chaque IT contient 156.25 bits qui sont transmis en un temps de 0.5769ms. Dans chaque IT, seuls 114 bits sont réservés aux données (c'est-à-dire l'information utile à l'utilisateur et le reste des bits pour entête, queue,...).

Dans notre cas, notre cellule contient que 53 IT (de trafic) de 114 bits utiles chacun. Chaque IT est transmise en 0.5769ms. Chaque cellule transmet ses 53 IT utiles en une durée de  $8 \times 0.5769\text{ms} = 4.6152 \text{ ms}$  (durée de la trame TDMA). Le débit de chacune des cellules est donc:

$$D = \frac{53 \times 114}{8 \times 0.5769 \cdot 10^{-3}} \approx 1,31 \text{ Mb/s par cellule}$$

- Nombre de canaux total

Par cellule, on a 7 fréquences et par fréquence, on a 8 canaux. Ceci nous fait:  $8 \times 7 = 56$  canaux par cellule (*trafic+BCCH+SDCCH*). et sachant que l'opérateur possède 31 cellules, cela fait :

$$56 \times 31 = 1736 \text{ canaux au total}$$

## Exercice 2 : Estimation des ressources

### Énoncé

- Quel est le nombre minimum de canaux nécessaires pour desservir une zone où la demande potentielle est estimée à 50 000 abonnés dont la consommation moyenne à l'heure de pointe est de 50 mErlangs pour une qualité de service de 1%.
- Quel est le nombre minimum de stations de base nécessaires et leurs capacités respectives quand l'opérateur dispose de 63 fréquences pour un motif de réutilisation de 9 ?
- Quel est le nombre de canaux total ? Commentaires.

On supposera que dans chaque cellule, 1 IT est réservé au canal BCCH et 2 ITs sont réservés aux canaux SDCCH.

#### **Le nombre de minimum de canaux**

- 2125 canaux
- 2526 canaux
- 2944 canaux
- 3209 canaux

#### **Le nombre de minimum de stations de base et capacité**

- 14 stations et 0,56 Mbits
- 22 stations et 0,88Mbits
- 31 stations et 1,21MBits
- 48 stations et 1,31Mbits

#### **Le nombre total de canaux**

- 2688
  - 2808
  - 3022
  - 3416
- 

### Solution

#### **Le nombre minimum de canaux**

2125 canaux

**2526 canaux**

✓ 2944 canaux

3209 canaux

### Explication

Nombre minimum de canaux.

Détermination du trafic total A:

$$A = 50000 \times 50.10^{-3} = 2500 \text{ Erlang}$$

si A= 2500 et Pr = 1%, en effectuant le même raisonnement que dans l'exercice 1 (c'est-à-dire, en rentrant les valeurs dans la table de calcul du chapitre 8, à la section Déploiement d'un réseau cellulaire), on trouve :

**C = 2526 canaux**

### Solution

#### **Le nombre de minimum de station**

14 stations et 0,56 Mbits

22 stations et 0,88Mbits

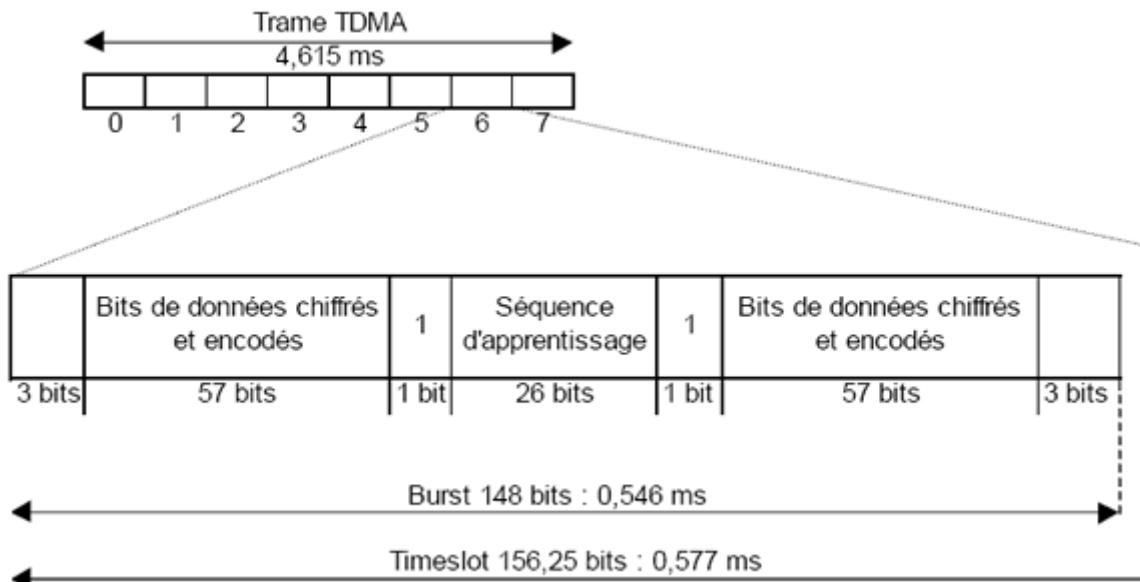
31 stations et 1,21MBits

✓ **48 stations et 1,31MBits**

### Explication

La fréquence ou porteuse ou porteuse fréquentielle ou canal fréquenciel très souvent désigne la même chose. Le canal physique ou IT (Interval de Temps ou Timeslot chez les anglosaxons) désigne la même chose. Le canal de trafic (ou aussi canaux TCH) est le

canal transfert des données.



### Rappel : structure de la trame TDMA

On a un motif de réutilisation de 9, alors on écrit  $N = 9$ ; L'opérateur a 63 fréquences. En utilisant ces 63 fréquences dans un motif de  $N$  cellules, on a donc :

$$63/9 = 7 \text{ fréquences par cellules}$$

### Solution

#### Le nombre total de canaux

✓ **2688**

2808

3022

3416

### Explication

- Nombre de canaux total

Par cellule, on a 7 fréquences et par fréquence, on a 8 canaux. Ceci nous fait:  $8 \times 7 =$

56 canaux par cellule (*trafic+BCCH+SDCCH*). et sachant que l'opérateur possède 48 cellules, cela fait :

$$56 \times 48 = 2688 \text{ canaux au total}$$

Chaque canal fréquentiel est divisé en 8 IT. Soit par cellule, on a  $7 \times 8 = 56$  IT. Si 1 IT est réservé pour le canal BCCH et 2 ITs pour le canal SDCCH, il reste 53 IT pour les canaux de trafic.

Le nombre total de cellules de trafic est :

$$\frac{\text{nombre total de canaux de trafic}}{\text{nombre de canaux de trafic par cellule}} = \frac{2526}{53} = 47,66$$

Soit 48 cellules en tout, et donc 48 stations de base en tout

$$C = 48 \text{ stations de bases}$$

La trame TDMA est constituée de 8 ITs. Chaque IT contient 156.25 bits qui sont transmis en un temps de 0.5769ms. Dans chaque IT, seuls 114 bits sont réservés aux données (c'est-à-dire l'information utile à l'utilisateur et le reste des bits pour entête, queue,...).

Dans notre cas, notre cellule contient que 53 IT (de trafic) de 114 bits utiles chacun.

Chaque IT est transmise en 0.5769ms. Chaque cellule transmet ses 53 IT utiles en une durée de  $8 \times 0.5769\text{ms} = 4.6152 \text{ ms}$  (durée de la trame TDMA). Le débit de chacune des cellules est donc:

$$D = \frac{53 \times 114}{8 \times 0.5769 \cdot 10^{-3}} \approx 1,31 \text{ Mb/s par cellule}$$

# Exercice 3 : Dimensionnement des canaux TCH

## Énoncé

- Soit une zone à desservir caractérisée par les paramètres suivants :

$r = 1000$  abonnés/km

$S = 0,5 \text{ km}^2$

Durée moyenne de communication =  $t = 90$  secondes,

Taux d'appels entrants = 0,5 appels/abonné à l'heure de pointe,

Taux d'appels sortants = 0,6 appels/abonné à l'heure de pointe,

Taux d'appels entrants avec succès = 0,80,

Taux d'appels sortants avec succès = 0,65,

Taux de blocage admissible sur les canaux de trafic = 1%.

Quel est le trafic total de la zone à l'heure de pointe ?

Quel est le nombre de canaux de trafic nécessaires pour desservir cette zone ?

### **Le trafic total**

- 10 Erlang
- 15 Erlang
- 20 Erlang
- 25 Erlang

### **Le nombre de canaux de trafic**

- 6 canaux
- 10 canaux
- 14 canaux
- 18 canaux

## Solution

### **Le trafic total**

✓ **10 Erlang**

15 Erlang

20 Erlang  
25 Erlang

### Explication

$$A_{\text{total}} = A_{\text{entrant}} + A_{\text{sortant}}$$

$$A_{\text{entrant}} = A' \cdot S;$$

$A_{\text{sortant}} = A'' \cdot S$ ; avec  $S$  la surface total de la zone à desservir;  $A'$  le trafic entrant par unité de surface;  $A''$  le trafic sortant par unité de surface.

$$A' = ? \cdot A'_u ;$$

$A' = ? \cdot A''_u$ ; avec  $?$  le nombre d'abonnés par unité de surface;  $A'_u$  le trafic entrant par abonné;  $A''_u$  le trafic sortant par abonné

$$A'_u = \mu' \cdot H$$

$\mu'_u = \mu' \cdot H$ ; avec  $H$  la durée d'appel moyen ;  $\mu'$  le taux d'appels entrants réussi par abonné ;  $\mu''$  le taux d'appels sortants réussi par abonné.

On obtient:

$$A_{\text{total}} = p \cdot (\mu' + \mu'') \cdot H \cdot S$$

$$\mu' = 0.5 \times 0.8 = 0.40 ; \mu'' = 0.6 \times 0.65 = 0.39 ; H = 90/3600 = 0.025 \text{ Erlang} ; A_{\text{total}} = 1000 \times (0.4+0.39) \times 0.025 \times 0.5 = 9,875 \text{ Erlang}$$

$$A_{\text{total}} \approx 10 \text{ Erlang}$$

### Solution

#### **Le nombre de canaux de trafic**

6 canaux

10 canaux

14 canaux

✓ **18 canaux**

### Explication

En appliquant la loi d'ErlangB, si  $A=10$  et  $Pr=1\%$ , même raisonnement que dans l'exercice 1 (c'est-à-dire, en rentrant les valeurs dans la table de calcul du chapitre 8, à la

section Déploiement d'un réseau cellulaire) le nombre de canaux de trafic nécessaire est:

$$C = 18 \text{ canaux de trafic}$$

## Exercice 4 : dimensionnement des canaux SDCCH sans SMS

### Énoncé

- Soit une cellule comportant 2 TRX.

Le trafic moyen par abonné est de 25 mErlangs.

Nombre d'appel par abonné à l'heure de pointe = 1,0.

Mise à jour de localisation périodique : une localisation toutes les 120 minutes.

Le taux de blocage admissible est de 2% sur les canaux de trafic.

Le temps d'occupation d'un canal SDCCH pour :

authentification/Chiffrement = 5 sec

Mise à jour de localisation périodique = 0,6 sec.

Quel est le nombre de canaux SDCCH nécessaires pour un taux de blocage de 1%,

### Nombre de canaux SDCCH.

- 1 canal
- 3 canaux
- 5 canaux
- 7 canaux

### Solution

### Nombre de canaux SDCCH.

1 canal

✓ 3 canaux

5 canaux

7 canaux

## Explication

2 TRX soit donc 2 paires de fréquences (uplink et downlink)

En regardant le trafic d'un seul sens (soit uplink, soit downlink), on a 2 fréquences et pour chaque fréquence correspond 8 canaux physiques. Soit 16 canaux physiques au total. Sachant pour chaque fréquence, un IT est utilisé pour le canal BCCH, il reste 14 ITs pour le trafic TCH et SDCCH.

Soit  $n$  canaux alloués au SDCCH, sachant une probabilité de blocage de 1%, on a un trafic de  $A'$ .

On a  $(14-n)$  canaux alloués au TCH, sachant une probabilité de blocage de 2%, on a un trafic de  $A$ .

Déterminons le trafic  $A'$  dans les canaux SDCCH.

A l'heure de pointe, on a l'authentification/chiffrement de 5 secondes à chaque appel, et 1 appel par utilisateur. On a également une localisation de 0.6 secondes toute les 120 minutes, c'est-à-dire 0.5 fois l'heure. Ceci nous donne un temps moyen de communication:

$$t = 5 \times 1 + 0.6 \times 0.5 = 5,3 \text{ secondes.}$$

Le nombre d'appels par abonnés est :

$$Q = 1 \times (A/25.10^3) = 40A$$

On a un trafic:

$$A' = Qxt/3600 \approx 0.06A.$$

On se retrouve alors avec deux équations à deux inconnus  $A$  et  $n$  à résoudre:

équation (1) : probabilité de blocage  $Pr = 2\%$ ; trafic  $A$  et  $(14 - n)$  canaux.

équation (2) : probabilité de blocage  $Pr = 1\%$ ; trafic  $0.06A$  et  $n$  canaux

Puisque ces équations sont implicites, il faut procéder de proche en proche (on peut aussi utiliser un algorithme).

$$\mathbf{n = 3; \quad A \approx 5.8 \text{ Erlang}}$$

On trouve qu'il faut allouer  **$n = 3$  canaux physiques au trafic SDCCH**

## Exercice 5 : Liaison répéteurs – cas 1

### Énoncé

- Montrer à l'aide d'un calcul de bilan de liaison si les caractéristiques suivantes permettent d'avoir une liaison équilibrée.

BTS		MS	
Puissance d'émission	39dBm	PIRE	33 dBm
Perte de feeder	+3 dB	Sensibilité en réception	-103 dBm
Gain de l'antenne	+14 dB		
Sensibilité en réception	-104 dBm		
Gain de diversité	+5 dB		

Quelle est le rayon de la cellule en considérant une loi d'atténuation :  $L = 137 + 35,2 \log_{10}(R)$  où  $R$  est exprimé en km ?

(On pourra s'intéresser à la partie Budget de liaison du chapitre 8).

### **Liaison équilibrée?**

- Oui, car elle est toujours équilibrée pour fonctionner.
- Non, car les deux sensibilités sont différentes.
- Oui, car les pertes sont les mêmes en uplink et downlink.
- Non, car les deux PIRE sont différentes.

### **Le rayon de la cellule**

- 1,56 km
- 1,96 km
- 2,30 km
- 2,84 km

---

### Solution

### **Liaison équilibrée?**

Oui, car elle est toujours équilibrée pour fonctionner.

Non, car les deux sensibilités sont différentes.

✓ **Oui, car les pertes sont les mêmes en uplink et downlink.**

Non, car les deux PIRE sont différentes.

### **Explication**

Bilan de liaison: Il sera équilibré si les pertes de propagation maximale acceptable par le système sont égales en uplink et en downlink.

Downlink (BTS => MS): le bilan de liaison nous donne:

$$P_R = P_T + G_T - L_T - L + G_R - L_R$$

soit

$$L = P_T + G_T - L_T - P_R + G_R - L_R$$

sachant que 0dBm = -30dB;

$$L = 9 + 14 - 3 - (-133) + G_R - L_R \text{ donc } L = 153 + G_R - L_R$$

Si on néglige le gain du mobile ainsi que les pertes de connexion (c'est-à-dire la sensibilité est la PIRE en réception), on a :

$$\mathbf{L = 153dB}$$

Downlink (MS => BTS): le bilan de liaison nous donne:

$$P_R = PIRE - L + G_R - L_R + G_d$$

soit

$$L = PIRE - P_R + G_R - L_R + G_d$$

sachant que 0dBm = -30dB;

$$L = 3 - (-134) + 14 - 3 + 5 \text{ donc } L = 153 \text{ dB}$$

$$\mathbf{L = 153dB}$$

Nous pouvons affirmer que cette liaison est équilibrée.

### **Solution**

#### **Le rayon de la cellule**

1,56 km

1,96 km

2,30 km

✓ **2,84 km**

### Explication

En considérant la loi d'atténuation  $L = 137 + 35,2 \log_{10}(R)$  où R est exprimé en km, on a :

$$R = 10^{\frac{L - 137}{35,2}}$$

donc

$$R = 2,84 \text{ km}$$

## Exercice 6 : Liaison répéteurs – cas 2

### Énoncé

- Montrer à l'aide d'un calcul de bilan de liaison si les caractéristiques suivantes permettent d'avoir une liaison équilibrée.

BTS		MS	
Puissance d'émission	39dBm	PIRE	30 dBm
Perte de feeder	+3 dB	Sensibilité en réception	-103 dBm
Gain de l'antenne	+14 dB		
Sensibilité en réception	-104 dBm		
Gain de diversité	+5 dB		

Quelle est le rayon de la cellule en considérant une loi d'atténuation :  $L = 137 + 35,2 \log_{10}(R)$  où  $R$  est exprimé en km ?

(On pourra s'intéresser à la partie Budget de liaison du chapitre 8).

### **Liaison équilibrée?**

- Oui, car les pertes sont les mêmes en uplink et downlink.
- Non, car les deux sensibilités sont différentes.

- Non, car les pertes sont les mêmes en uplink et downlink.
- Oui, car les deux PIRE sont identiques.

### Le rayon de la cellule

- 1,56 km
- 1,80 km
- 2,34 km
- 2,68 km

### Solution

#### Liaison équilibrée?

Oui, car les pertes sont les mêmes en uplink et downlink.

Non, car les deux sensibilités sont différentes.

✓ **Non, car les pertes en uplink et downlink sont différentes.**

Oui, car les deux PIRE sont identiques.

### Explication

Bilan de liaison: Il sera équilibré si les pertes de propagation maximale acceptable par le système sont égales en uplink et en downlink.

**Downlink (BTS => MS)** : le bilan de liaison nous donne:

$$P_R = P_T + G_T - L_T - L + G_R - L_R$$

soit

$$L = P_T + G_T - L_T - P_R + G_R - L_R$$

sachant que  $0\text{dBm} = -30\text{dB}$ ;

$$L = 9 + 14 - 3 - (-133) + G_R - L_R \text{ donc } L = 153 + G_R - L_R$$

Si on néglige le gain du mobile ainsi que les pertes de connexion (c'est-à-dire la sensibilité est la PIRE en réception), on a

$$\mathbf{L = 153dB}$$

**Downlink (MS => BTS)** : le bilan de liaison nous donne:

$$P_R = PIRE - L + G_R - L_R + G_d$$

soit

$$L = PIRE - P_R + G_R - L_R + G_d$$

sachant que 0dBm = -30dB; L = 0 - (-134) + 14 - 3 + 5 donc L = 150 dB

$$\mathbf{L = 150dB}$$

Nous pouvons affirmer que cette liaison n'est pas équilibrée car le signal émis de la BTS n'atteindra pas le mobile à partir d'une certaine distance tandis que l'inverse reste vrai.

### Solution

#### **Le rayon de la cellule**

1,56 km

1,80 km

✓ **2,34 km**

2,68 km

### Explication

En considérant la loi d'atténuation  $L = 137 + 35,2 \log_{10}(R)$  où R est exprimé en km , on a :

On prend les pertes minimale L = 150 dB

$$R = 10^{\frac{L-137}{35,2}}$$

donc

$$\mathbf{R = 2,34 km}$$

Pour une différence de 3dB (voir exercice 5), on note une différence de 500m entre les deux cas étudiés.

# Exercice 7: Dimensionnement des canaux TCH et SDCCH et du nombre de cellules

## Énoncé

- Soit une zone où la demande potentielle est estimée à 100 000 abonnés dont le profil de trafic et de mobilité (à l'heure de pointe) est le suivant :
- Nombre de SMS entrants = 0,5
- Nombre de SMS sortants = 0,51
- Nombre d'appels entrants = 0,75
- Nombre d'appels sortants = 0,8
- Nombre de mise à jour de localisation intra-VLR = 0,6
- Nombre de mise à jour de localisation inter-VLR = 0,2
- Nombre de TRX maximum par cellule = 6
- Trafic moyen par abonné = 25mE

On suppose de plus que :

- Durée de réception d'un SMS = 1,3sec
- Durée d'envoie d'un SMS = 1,6sec
- Durée d'établissement d'appel entrant = 5sec
- Durée d'établissement d'appel sortant = 18sec
- Nombre de mise à jour de localisation intra-VLR = 0,7sec
- Nombre de mise à jour de localisation inter-VLR = 3,5sec
- Mode d'allocation de canal dédié : OACSU
- Taux de blocage ne doit pas dépasser 5% sur les canaux TCH et 1% sur les canaux SDCCH.

Calculer le nombre de canaux TCH et SDCCH puis le nombre de cellules pour desservir la zone considérée.

### Le nombre de canaux TCH et SDCCH

- 2092 canaux TCH et 415 canaux SDCCH
- 2392 canaux TCH et 415 canaux SDCCH
- 2392 canaux TCH et 603 canaux SDCCH
- 2840 canaux TCH et 725 canaux SDCCH .

### Le nombre de cellule

- 22 cellules
- 45 cellules

- 63 cellules
- 78 cellules

### Solution

#### **Le nombre de cellule**

2092 canaux TCH et 415 canaux SDCCH

2392 canaux TCH et 415 canaux SDCCH

✓ **2392 canaux TCH et 603 canaux SDCCH**

2840 canaux TCH et 725 canaux SDCCH .

### Explication

Le trafic total sur les canaux TCH est :  $A_t = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 100000 = 2500 \text{ Erlang}$

Le trafic sur les canaux SDCCH est :  $A'_t = (0.5 \cdot 1.3 + 0.51 \cdot 1.6 + 0.75 \cdot 5 + 0.8 \cdot 18 + 0.6 \cdot 0.7 + 0.2 \cdot 3.5) / 3600 = 576 \text{ Erlang}$

Pour un trafic  $A_t = 2500E$  et une probabilité de blocage  $Pr = 5\%$ , on a le nombre de canaux TCH :  $Nc_{(TCH)} = 2392 \text{ canaux}$

Pour un trafic  $A'_t = 576E$  et une probabilité de blocage  $Pr = 1\%$ , on a le nombre de canaux SDCCH :  $Nc_{(SDCCH)} = 603 \text{ canaux}$

Nombre de canaux TCH:  **$Nc_{(TCH)} = 2392 \text{ canaux}$**   
 Nombre de canaux SDCCH :  **$Nc_{(SDCCH)} = 603 \text{ canaux}$**

### Solution

#### **Le nombre de cellule**

22 cellules

45 cellules

✓ **63 cellules**

78 cellules

### Explication

Le trafic total est :  $Nc_{(TCH)} + Nc_{(SDCCH)} = 2995$  canaux;

Par cellule, on a 6TRX, soit 6 paires de fréquences (6 fréquences en uplink et 6 fréquences en downlink) et 1 fréquence c'est 8 canaux IT. Donc on a :  $8 \cdot 6 = 48$  canaux.

D'où le nombre total de cellules est :  $2995 / 48 \approx 63$  cellules

**63 cellules**

### **Exercice 8: Dimensionnement d'une zone**

#### Énoncé

- On souhaite implanter un réseau cellulaire de type GSM dans une ville de 2 millions d'habitants. Les hypothèses de travail sont les suivantes :
  - Trafic deux fois plus dense au centre ville qu'à la périphérie,
  - Trafic par abonné à l'heure de pointe = 25 mErlangs
  - Taux de pénétration du service mobile = 25%
  - Nombre de fréquence allouées à l'opérateur = 63
  - Motifs de réutilisation = 3/9
  - Qualité de service : 1% de taux de blocage
  - Pour chaque cellule, 3 ITs sont réservés aux canaux BCCH et SDCCH
  
- a) Quel est le trafic total à écouler à l'heure de pointe ?
- b) Quel est le trafic maximum que peut écouler une cellule ?
- c) Quel est le nombre de cellules à prévoir pour écouler le trafic des abonnés au centre ville ?
- d) Quel est le nombre de cellule à prévoir pour écouler le trafic des abonnés à la périphérie ?
- e) Quel est le nombre total (centre et périphérie) de site correspondants ?
- f) On suppose que la mobilité des utilisateurs nécessite le surdimensionnement de la capacité totale d'un facteur de 20%. Reprendre les questions a), c) et d) en intégrant cette nouvelle hypothèse.

Données : Extrait des Tables d'Erlang

QoS			
Canal	1%	2%	3%
51	38,8	41,2	42,9
52	39,7	42,1	43,9
53	40,6	43,1	44,8
54	41,5	44,0	45,8
55	42,4	44,9	46,7

### **Le trafic à l'heure de pointe**

- 12500 Erlang
- 14500 Erlang
- 15500 Erlang
- 17500 Erlang

### **Le trafic maximum d'une cellule**

- 24,5 Erlang
- 32,2 Erlang
- 47,8 Erlang
- 63,9 Erlang

---

### **Le nombre maximum de cellules au centre ville**

- 206 cellules
- 258cellules
- 370 cellules
- 413 cellules

### **Le nombre maximum de cellules à la périphérie et le nombre total dans la ville**

- 38 cellules et 408 au total
- 64 cellules et 270 au total
- 88 cellules et 294 au total
- 112 cellules et 525 au total

**Surdimensionnement de 20%, valeurs trafic total, nombre de cellules au centre ville et nombre de cellules à la périphérie**

- 15000 Erlang, 247 cellules au centre et 105 à la périphérie
  - 18000 Erlang, 310 cellules au centre et 77 à la périphérie
  - 17400 Erlang, 444 cellules au centre et 46 à la périphérie
  - 21000 Erlang, 496 cellules au centre et 135 à la périphérie
- 

**Solution**

**Le trafic à l'heure de pointe**

✓ **12500 Erlang**

14500 Erlang

15500 Erlang

17500 Erlang

**Explication**

Le nombre d'abonnés  $N_{ab} = 0.25 \cdot 2000000 = 500000$  abonnés  
Soit  $A_t = 500000 \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 12500$  Erlang

**$A_t = 12500$  Erlang**

**Solution**

**Le trafic à l'heure de pointe**

24,5 Erlang

32,2 Erlang

✓ **47,8 Erlang**

63,9 Erlang

**Explication**

Avec un motif de réutilisation de 3 (pour la périphérie) et disposant 63 fréquences, on a  $63 / 3 = 21$  porteuses par cellules, mais pour des raisons technique, le nombre maximale de porteuse d'une cellule est de 8.

Avec un motif de réutilisation de 9 (pour le centre) et disposant 63 fréquences, on a  $63 / 9 = 7$  porteuses par cellules, ici il n'y a donc pas de problèmes.

Donc pour une cellule, on a au maximum 8 porteuses et chaque porteuse c'est 8 canaux, soit  $8 \cdot 8 = 64$  canaux par cellules. Si 3 canaux sont réservés aux canaux BCCH et SDCCH. Il reste 61 canaux pour le trafic des canaux TCH.

Donc avec une probabilité de blocage de 1% et 61 canaux, on a un trafic de 47,8 Erlang

$$A_{\text{max/cell}} = 47,8 \text{ Erlang}$$

### Solution

#### **Le trafic à l'heure de pointe**

✓ **206 cellules**

258 cellules

370 cellules

413 cellules

### Explication

On sait que le trafic au centre  $A_{\text{centre}}$  est le double du trafic à la périphérie  $A_{\text{peri}}$ . Soit  $A_{\text{centre}} = 2 \cdot A_{\text{peri}}$

Or, on a:  $A_t = A_{\text{centre}} + A_{\text{peri}}$

Donc  $A_{\text{centre}} = 2/3 \cdot A_t ; \rightarrow A_{\text{centre}} = 2/3 \cdot 12500 = 8333,3$  Erlang;

Au centre, chaque cellule a 7 fréquences et chaque fréquence 8 canaux, soit 56 canaux. En réservant 3 canaux pour le trafic de signalisation (BCCH et SDCCH), on a 53 canaux pour le trafic. D'après la table de QoS, pour un trafic de 1%, on a  **$A_{\text{centre/cell}} = 40,6$  Erlang/cellule**.

Soit  $N_{\text{centre}} = A_{\text{centre}} / A_{\text{centre/cell}} ; \rightarrow N_{\text{centre}} = 8333,3 / 40,6 = 205,25$

$$N_{\text{centre}} = 206 \text{ cellules au centre}$$

### Solution

#### **Le trafic à l'heure de pointe**

38 cellules et 408 au total

64 cellules et 270 au total

✓ **88 cellules et 294 au total**

112 cellules et 525 au total

### Explication

$$A_{peri} = 1/3 \cdot A_t ; \\ \text{Donc } A_{peri} = 1/3 \cdot 12500 = 4166,7 \text{ E}$$

A la périphérie, chaque cellule a 8 fréquences et chaque fréquence 8 canaux, soit 64 canaux. En réservant 3 canaux pour le trafic de signalisation (BCCH et SDCCH), on a 61 canaux pour le trafic. Pour un trafic de 1%, on a  $A_{centre/cell} = 47.8$

**Erlang/cellule.**

Soit  $N_{centre} = A_{centre} / A_{centre/cell} ; \rightarrow N_{centre} = 4166,7 / 47.8 = 87,17$

**$N_{peri} = 88 \text{ cellules à la périphérie}$**

$N_t$  nombre total de cellules de la ville (centre et périphérie).

$$N_t = N_{centre} + N_{peri} ; \rightarrow N_t = 206 + 88 = 294 \text{ cellules};$$

**$N_t = 294 \text{ cellules dans la ville}$**

### Solution

**Surdimensionnement de 20%, valeurs trafic total, nombre de cellules au centre ville et nombre de cellules à la périphérie**

✓ **15000 Erlang, 247 cellules au centre et 105 à la périphérie**

18000 Erlang, 310 cellules au centre et 77 à la périphérie

17400 Erlang, 444 cellules au centre et 46 à la périphérie

21000 Erlang, 496 cellules au centre et 135 à la périphérie

### Explication

Surdimensionnement de la capacité de 20%.

a) Le trafic total;  $A_t = 12500 * 1.2 = 15000 \text{ Erlang}$

b)  $N_{centre}$  le nombre de cellules au centre ville;  $A_{peri} = 2/3 \cdot 15000 = 10000 \text{ E}$ ;  $N_{centre} = 10000 / 40.6 = 246,31 ; N_{centre} = 247 \text{ cellules}$

c)  $N_{centre}$  le nombre de cellules au centre ville;  $A_{peri} = 1/3 \cdot 15000 = 5000 \text{ E}$ ;  $N_{peri} = 5000 / 47.8 = 104,60 ; N_{peri} = 105 \text{ cellules}$

## **Exercice 9: Dimensionnement de la charge de signalisation SS7**

### **Énoncé**

- Le tableau suivant résume les statistiques de trafic à l'heure de pointe d'un MSC, avec une longueur de MSU (Message Signaling Unit) par un type de procédure :

Procédures	Nombre par seconde	Total MSU échangé (octets) par procédure
MOC	17,3	670
MTC	10,1	858
LU Intra VLR	5,3	461
LU Inter VLR	16,6	896
HO intra MSC	2,1	148
HO inter MSC	3,6	530
SMS-MO	3,7	400
SMS-MT	6,4	270

**Note** : MOC = Mobile originating Calls, MTS = Mobile Terminating Calls, LU = Location Update, HO = Handover, SMS-MO = Short Message Service – Mobile Originating, SMS-MT = Short Message Service – Mobile Terminating.

Quel est le nombre de liens de signalisation E0 et E1 pour une charge  $U = 0,3 E$ ?

### **Le nombre de lien $E_0$ et $E_1$**

- Nombre de lien  $E_0 = 2$  ; et      Nombre de lien  $E_1 = 1$
- Nombre de lien  $E_0 = 12$  ; et      Nombre de lien  $E_1 = 2$
- Nombre de lien  $E_0 = 6$  ; et      Nombre de lien  $E_1 = 1$
- Nombre de lien  $E_0 = 32$  ; et      Nombre de lien  $E_1 = 2$

---

## Solution

### **Nombre de canaux SDCCH.**

Nombre de lien E<sub>0</sub> = 2 ; et      Nombre de lien E<sub>1</sub> = 1

Nombre de lien E<sub>0</sub> = 12 ; et      Nombre de lien E<sub>1</sub> = 2

✓ **Nombre de lien E<sub>0</sub> = 6 ; et      Nombre de lien E<sub>1</sub> = 1**

Nombre de lien E<sub>0</sub> = 32 ; et      Nombre de lien E<sub>1</sub> = 2

## Explication

Le nombre de liens de signalisation E0 et E1.

Déterminons le débit total:

$$D = 17,3 \cdot 670 + 10,1 \cdot 858 + 5,3 \cdot 461 + 16,6 \cdot 896 + 2,1 \cdot 148 + 3,6 \cdot 530 + 3,7 \cdot 400 + 6,4 \cdot 270 = 43000,5 \text{ octets/s}$$

Ceci nous donne en bits (1octet = 8bits): D = 43000,5 · 8 = 344004 bits/s; ou **D = 335,94 kbits/s**

Hors 1 lien E<sub>0</sub> = 64kbits/s ; et 1 lien E<sub>1</sub> = 2048 kbits/s ; Soit 335,94 / 64 = 5,30 lien E<sub>0</sub>

**Nombre de lien E<sub>0</sub> = 6 ;      Nombre de lien E<sub>1</sub> = 1**

# Exercice 10: Dimensionnement de la capacité d'un CPU d'un MSC

## Enoncé

- Soit le MSC décrit ci-dessus et le modèle de trafic des abonnés de la zone desservie et le temps de traitement de chaque procédure suivants :

Evénement	Durée/événement	Taux par abonné à l'heure de pointe
Appel sortant	25 msec	0,70
Appel entrant	35 msec	0,50
LU inter VLR	45 msec	0,15
IMSI Attach	15 msec	0,30

- Quelle est la consommation moyenne à l'heure de pointe ?
- Quelle est la capacité maximum du commutateur pour la zone considérée

### **Consommation moyenne à l'heure de pointe**

- 0,35 mE / Abonné
- 0,08 mE / Abonné
- 0,02 mE / Abonné
- 0,013 mE / Abonné

### **capacité maximum du commutateur**

- 15055 appels simultanés.
- 18020 appels simultanés.
- 23077 appels simultanés.
- 29510 appels simultanés.

---

### Solution

#### **Le nombre de cellule**

0,35 mE / Abonné

0,08 mE / Abonné

0,02 mE / Abonné

✓ **0,013 mE / Abonné**

### Explication

Consommation moyenne à l'heure de pointe

$$A = (25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,70 + 35 \cdot 10^{-3} \cdot 0,50 + 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 + 15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,30) / 3600 = 0,013 \text{ mE} ;$$

**A = 0,013 mE / Abonné.**

### Solution

#### **Le nombre de cellule**

15055 appels simultanés.

18020 appels simultanés.

✓ **23077 appels simultanés.**

29510 appels simultanés.

### Explication

Pour un trafic de 0,3 E

$$C = 0,3 / 0,013 \cdot 10^{-3} = 23076,9 \text{ appels simultanés}$$

**C = 23077 appels simultanés.**

## Exercice 11: Dimensionnement de la capacité de la liaison MSC-VMS

### Enoncé

- Soit le modèle de trafic pour le serveur de messagerie vocale (VMS) suivant :

Nombre de boîtes vocales	10 000
Nombre moyen de messages /jour/abonné	4
Durée du message d'accueil	10 secondes
Durée moyenne de message	20 secondes
Nombre de retraits/jour/abonné	4
Durée du message d'accueil pour le retrait	10 secondes
Pourcentage de trafic à l'heure de pointe	12%

- a) Quel est le trafic total écoulé par jour sur ce serveur ?
- b) Quel est le nombre de liens MIC ( $E_0$  et /ou  $E_1$ ) à prévoir entre le MSC et le VMS si le taux de blocage admissible est de 1% ?

### Le trafic écoulé par jour

- 215,7 Erlang par jour
- 414,9 Erlang par jour
- 548,3 Erlang par jour
- 666,7 Erlang par jour

### Le nombre de lien mic E0 et E1

- Nombre de lien  $E_0 = 96$  ; et Nombre de lien  $E_1 = 3$  ;
- Nombre de lien  $E_0 = 112$  ; et Nombre de lien  $E_1 = 3$  ;
- Nombre de lien  $E_0 = 128$  ; et Nombre de lien  $E_1 = 4$  ;
- Nombre de lien  $E_0 = 144$  ; et Nombre de lien  $E_1 = 5$  ;

### **Solution**

a) Le trafic total  $A_t$  écoulé par jour sur le serveur VMS

Pour déposer un message sur le répondeur, on écoute pendant 10 secondes le message d'accueil, puis on laisse le message durant 20 secondes, soit 30 secondes en tout.  
Pour récupérer un message du répondeur, on écoute pendant 10 secondes le message d'accueil (pour le retrait), puis on écoute le message déposé pendant 20 secondes, ce qui fait aussi 30 secondes.  
Ainsi chaque message prend un temps 60 secondes.  
 $A_t = 4 \cdot (60) \cdot 10000 / 3600 = 666,7$  Erlang par jour

**$A_t = 666,7$  Erlang par jour**

b) Le nombre de liens MIC ( $E_0 / E_1$ ).

A l'heure de pointe, nous avons un trafic de 12% dans le VMS. Donc le trafic à l'heure de pointe  $A_p = 12\% A_t$  ;  
 $A_p = 0,12 \cdot 666,67 = 80$  E ;  
Avec un taux de blocage de 1%, et un trafic de 80E, on obtient 96 canaux. Donc on a 96 lien  
 $E_0$ , 1MIC = 32 voie =  $32E_0 = E_1$  ;

**Nombre de lien  $E_0 = 96$  ;      Nombre de lien  $E_1 = 3$  ;**

### **Solution**

#### **Le trafic écoulé par jour**

- 215,7 Erlang par jour
- 414,9 Erlang par jour
- 548,3 Erlang par jour
- ✓ **666,7 Erlang par jour**

### **Explication**

Le trafic total  $A_t$  écoulé par jour sur le serveur VMS

Pour déposer un message sur le répondeur, on écoute pendant 10 secondes le message d'accueil, puis on laisse le message durant 20 secondes, soit 30 secondes en tout.  
Pour récupérer un message du répondeur, on écoute pendant 10 secondes le message

d'accueil (pour le retrait), puis on écoute le message déposé pendant 20 secondes, ce qui fait aussi 30 secondes.

Ainsi chaque message prend un temps 60 secondes.

$$A_t = 4 \cdot (60) \cdot 10000 / 3600 = 666,7 \text{ Erlang par jour}$$

$$\mathbf{A_t = 666,7 \text{ Erlang par jour}}$$

### **Solution**

#### **Le nombre de cellule**

✓ **Nombre de lien E<sub>0</sub> = 96 ; et Nombre de lien E<sub>1</sub> = 3 ;**

Nombre de lien E<sub>0</sub> = 112 ; et Nombre de lien E<sub>1</sub> = 3 ;

Nombre de lien E<sub>0</sub> = 128 ; et Nombre de lien E<sub>1</sub> = 4 ;

Nombre de lien E<sub>0</sub> = 144 ; et Nombre de lien E<sub>1</sub> = 5 ;

### **Explication**

Le nombre de liens MIC (E<sub>0</sub> / E<sub>1</sub>).

A l'heure de pointe, nous avons un trafic de 12% dans le VMS. Donc le trafic à l'heure de pointe A<sub>p</sub> = 12%A<sub>t</sub> ;

$$A_p = 0,12 \cdot 666,67 = 80 \text{ E} ;$$

Avec un taux de blocage de 1%, et un trafic de 80E, on obtient 96 canaux. Donc on a 96 lien E<sub>0</sub>, 1MIC = 32 voie = 32E<sub>0</sub> = E<sub>1</sub> ;

$$\mathbf{\text{Nombre de lien E}_0 = 96 ; \quad Nombre de lien E}_1 = 3 ;$$

## Exercice 12: Compromis spectre limité / trafic important

### Énoncé

- Soit un réseau GSM formé de cellules hexagonales de rayon R. La distance D de réutilisation des fréquences est liée à la taille du motif par,  $D/R = \sqrt{3N}$  ; avec N le nombre de cellules dans le motif. On suppose que l'affaiblissement varie selon la distance selon  $d^{-4}$ .
  - a) Si  $N = 4$ , calculer le nombre de porteuses GSM qu'un opérateur disposant de 12,5MHz peut en théorie attribuer à chaque cellule.
  - b) Estimer le nombre maximal d'abonnés qu'il peut espérer accueillir dans une cellule sachant qu'un abonné moyen a un trafic de 0,03E à l'heure.
  - c) Le rayon R ne pouvant être inférieur à 350m, combien d'abonnés cela représente-t-il dans une ville comme Paris de forme approximative circulaire de rayon  $R_p = 6$  km. Commenter brièvement ce résultat.

### Le nombre de porteuses GSM

- 7 porteuses
- 15 porteuses
- 23 porteuses
- 29 porteuses

### Le nombre maximal d'abonnés par cellule

- 1866 abonnés
- 2470 abonnés
- 2944 abonnés
- 3581 abonnés

### **Le nombre total d'abonné**

- 548138 abonnés
  - 383418 abonnés
  - 300238 abonnés
  - 210130 abonnés
- 

### **Solution**

#### **Le nombre de porteuses GSM**

- 7 porteuses
- 15 porteuses**
- 23 porteuses
- 29 porteuses

### **Explication**

Le nombre de porteuses GSM. (Si l'on a les 12,5 MHz pour les voies montantes et descendantes)

Sachant qu'une porteuse occupe  $200\text{kHz} = 0,2 \text{ MHz}$ ; le nombre de porteuse disponible dans 12,5 MHz (en voie montante) est:

$12,5 / 0,2 = 62,5$  porteuses; Ayant un motifs de 4, le nombre de porteuses par cellules est :  $62,5 / 4 = 15,625$  porteuses par cellules.

**Le nombre de porteuses par cellule = 15 (soit 7 paires de canaux de communication).**

---

### Solution

**Le nombre maximal d'abonnés par cellule**

✓ **1866 abonnés**

2470 abonnés

2944 abonnés

3581 abonnés

### Explication

Le nombre maximal d'abonnés par cellule.

Pour une porteuse correspond 8 canaux (soit 8 Erlang) . Dans un cellule, on a:  $8 \cdot 7 = 56$  Erlang.

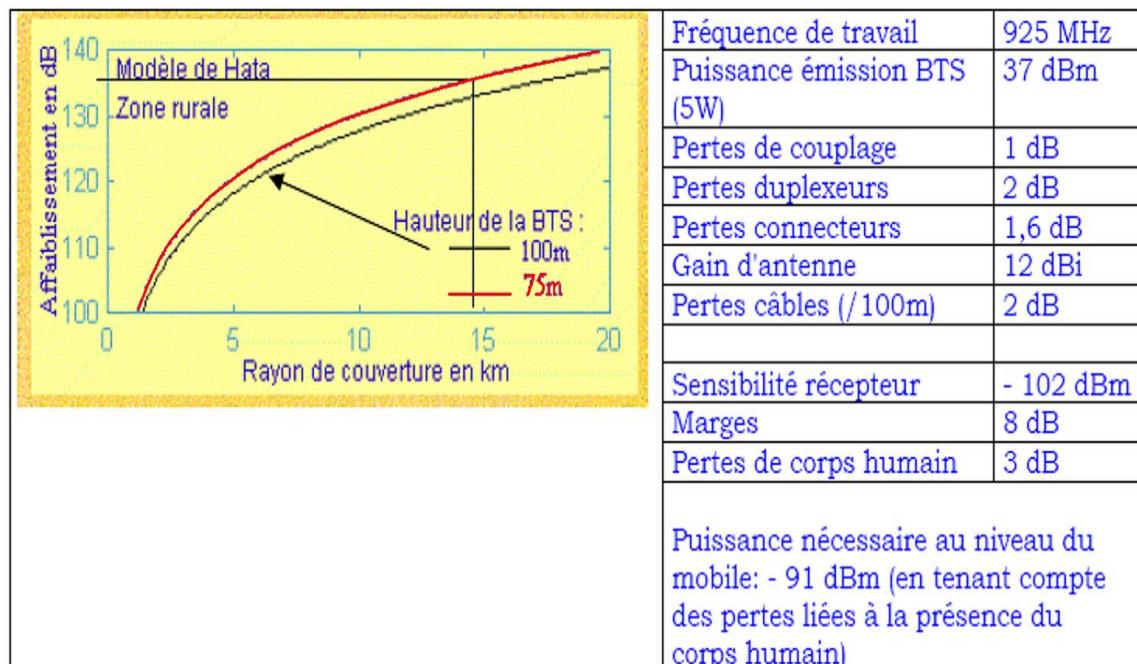
Le nombre d'abonnés est donc:  $56 / 0,03 = 1866$  abonnés

**Nombre d'abonnés = 1866 par cellule;**

## Exercice 13: Configuration d'antennes et hauteur de la BTS

### Énoncé

Étude de la liaison descendante : en zone rurale, quelle configuration d'antenne et quelle hauteur de BTS choisiriez-vous pour couvrir une zone d'environ 14,6 km de rayon pour un coût minimal ?



### Configuration d'antennes

- 1 antenne E/R
- 2 antennes: 1 antenne E/R, 1 antenne réception
- 2 antennes: 1 antenne émission, 1 antenne réception

### Hauteur de la BTS

- 100 m
- 75 m

## Solution

### **Configuration d'antennes**

✓ **1 antenne E/R**

2 antennes: 1 antenne E/R, 1 antenne réception

2 antennes: 1 antenne émission, 1 antenne réception

## Explication

**Une antenne** parce que la zone est peu peuplée.

## Solution

Hauteur de la BTS

100 m

✓ **75 m**

## Explication

La zone rurale est caractérisée par un fort encombrement dû aux arbres. D'après, les pertes maximale acceptable sont :

$$L_f = 32,5 + 20\log(14,6) + 20\log(925) = 115 \text{ dB.}$$

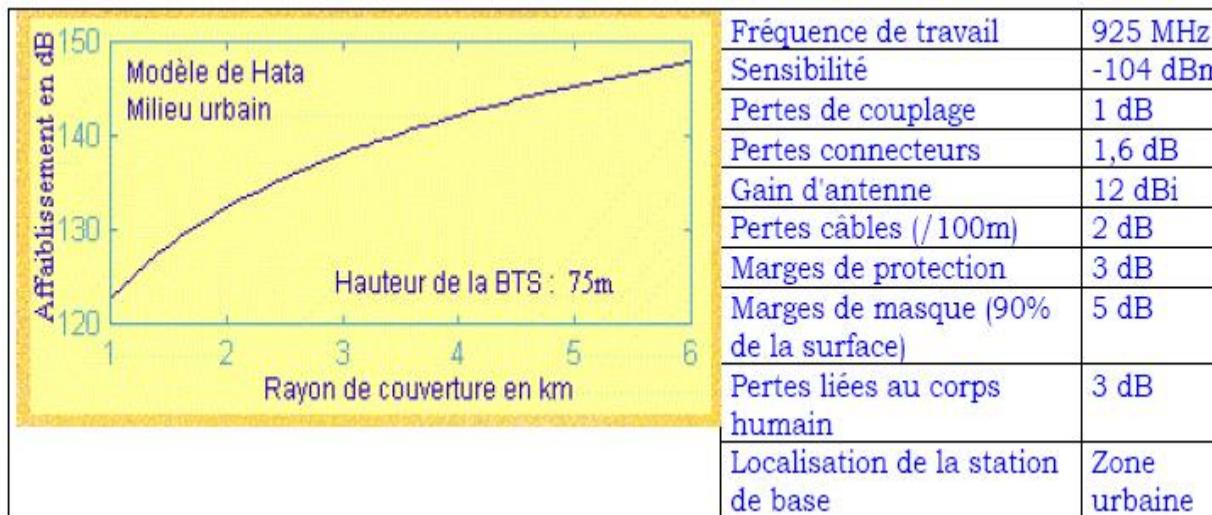
Or, d'après le graphe, une BTS de 75 m autorise 136 dB et celle de 100m autorise 132 dB.

La BTS de **75 m** est donc satisfaisante pour un coût moindre.

## Exercice 14: Configuration d'antennes et type de portable

### Énoncé

Étude de la liaison montante dans une ville fortement peuplée , quelle configuration d'antennes et quel type de portable choisiriez-vous pour couvrir une zone d'environ 3,5 km de rayon ?



### Configuration d'antennes

- 1 antenne E/R
- 2 antennes: 1 antenne émission, 2 antennes réception (dont une pour la diversité)

### Type de portable

- 2W
- 8W

### Solution

### Configuration d'antennes

1 antenne E/R

✓ **2 antennes: 1 antenne émission, 2 antennes réception (dont une pour la diversité)**

On utilise **2 antennes** pour accroître la diversité car c'est une extrêmement puissante pour améliorer la qualité des communications.

### Solution

Type de portable

✓ **2W**  
8W

La puissance du portable PR = 3,9 dB soit :  
 $P = 10^{3,9/10} = 2,45W$  Donc **2W** peut aller

## Exercice 15: Détermination du nombre de fréquences

### Énoncé

Supposons un trafic prévisionnel de 10 Erlang avec un système qui permet d'avoir 7 voies de parole par fréquence. Combien de fréquences devez-vous utiliser pour garantir une probabilité de blocage inférieure à 1% ?

		Probabilité de blocage								
		0,01%	0,02%	0,05%	0,10%	0,20%	0,50%	1,00%	2,00%	
Nombre d'organes	1	0,0001	0,0002	0,0005	0,0010	0,0020	0,0050	0,0101	0,0204	
	5	0,452	0,527	0,649	0,762	0,900	1,13	1,36	1,66	
	10	2,26	2,47	2,80	3,09	3,43	3,96	4,46	5,08	
	15	4,78	5,12	5,63	6,08	6,58	7,38	8,11	9,01	
	20	7,70	8,16	8,83	9,41	10,1	11,1	12,0	13,2	
	25	10,9	11,4	12,3	13,0	13,8	15,0	16,1	17,5	
	30	14,2	14,9	15,9	16,7	17,5	19,0	20,3	21,9	
	35	17,8	18,5	19,6	20,5	21,6	23,2	24,6	26,4	
	40	21,4	22,2	23,4	24,4	25,8	27,4	29,0	31,0	
	45	25,1	26,0	27,3	28,4	29,7	31,7	33,4	35,8	
	50	28,9	29,9	31,3	32,5	33,9	36,0	37,9	40,3	

### Le nombre de fréquences

- 2 fréquences
- 3 fréquences
- 5 fréquences
- 10 fréquences

## Solution

### Le nombre de fréquences

2 fréquences

✓ **3 fréquences**

5 fréquences

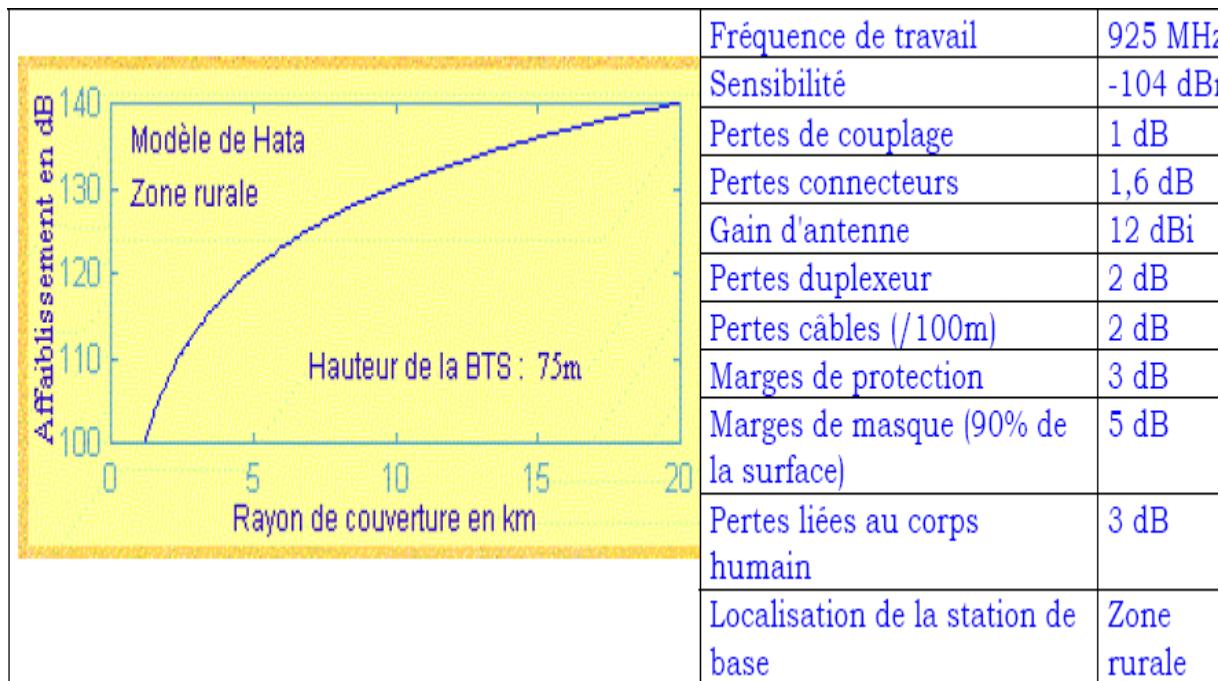
10 fréquences

D'après le tableau, pour  $Pr = 1,00\%$ , la valeur proche de 10 Erlang par excès est 12,0. Ceci correspond à 20 organes de communications (ou canaux voie). A une fréquence correspond 7 canaux voie. Donc il faut en tout **3 fréquences** en tout.

## Exercice 16: Configuration d'antennes et type de portable

### Enoncé

Etude de la liaison montante: en zone rurale faiblement peuplée , quelle configuration d'antenne et quel type de portable choisiriez-vous pour couvrir une zone d'environ 20 km de rayon ?



### Configuration d'antennes

- 1 antenne E/R
- 2 antennes: 1 antenne émission, 2 antennes réception (dont une pour la diversité)

### Type de portable

- 2W
- 8W

## Solution

### Configuration d'antennes

✓ **1 antenne E/R**

2 antennes: 1 antenne émission, 2 antennes réception  
(dont une pour la diversité)

En zone rurale, on n'a pas tellement besoin d'accroître la diversité.

## Solution

Type de portable

✓ **2W**

8W

La puissance du portable PR = 3,9 dB soit :  
 $P = 10^{3,9/10} = 2,45\text{W}$  Donc **2W** peut aller

## Exercice 17: Détermination du nombre de fréquences

### Enoncé

Avec le même trafic prévisionnel de 10 Erlang on souhaite abaisser la probabilité de blocage à 0,01% toujours avec 7 voies par fréquences, combien de fréquences sont selon vous nécessaires ?

		Probabilité de blocage								
		0,01%	0,02%	0,05%	0,10%	0,20%	0,50%	1,00%	2,00%	
Nombre d'organes	1	0,0001	0,0002	0,0005	0,0010	0,0020	0,0050	0,0101	0,0204	
	5	0,452	0,527	0,649	0,762	0,900	1,13	1,36	1,66	
	10	2,26	2,47	2,80	3,09	3,43	3,96	4,46	5,08	
	15	4,78	5,12	5,63	6,08	6,58	7,38	8,11	9,01	
	20	7,70	8,16	8,83	9,41	10,1	11,1	12,0	13,2	
	25	10,9	11,4	12,3	13,0	13,8	15,0	16,1	17,5	
	30	14,2	14,9	15,9	16,7	17,5	19,0	20,3	21,9	
	35	17,8	18,5	19,6	20,5	21,6	23,2	24,6	26,4	
	40	21,4	22,2	23,4	24,4	25,8	27,4	29,0	31,0	
	45	25,1	26,0	27,3	28,4	29,7	31,7	33,4	35,8	
	50	28,9	29,9	31,3	32,5	33,9	36,0	37,9	40,3	

### Le nombre de fréquences

- 3 fréquences
- 4 fréquences
- 5 fréquences

## Solution

### Le nombre de fréquences

3 fréquences

✓ **4 fréquences**

5 fréquences

D'après le tableau, pour  $\text{Pr} = 00,1\%$ , la valeur proche de 10 Erlang par excès est 10,9. Ceci correspond à 25 organes de communications (ou canaux voie). A une fréquence correspond 7 canaux voie. Donc il faut en tout **4 fréquences** en tout.

## Exercice 18: Choix de modèles

### Enoncé

Vous devez répondre à un appel d'offre concernant le déploiement d'un réseau de téléphonie mobile. Quel modèle choisiriez vous pour chacun des pays ci-dessous ?

**Pays:** Cameroun, Chine, Pologne.

**Modèle:** Hata, COST231-Hata, Lancer de rayon, CCIR.

	Cameroun	Chine	Pologne
Hata	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
COST231-Hata	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lancer de rayon	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CCIR	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

---

### Solution

Résultat	
Région	Modèles
Pologne	HATA
Chine	HATA
Cameroun	COST 231-HATA

Le modèle de Hata convient au milieu urbain fortement peuplé (et faiblement peuplé aussi) et le modèle COST231-Hata convient au milieu périurbain et faiblement peuplé.

## Exercice 19: Détermination du trafic

### Énoncé

Avec ces 4 fréquences, et donc 28 voies de paroles, quel trafic notre cellule pourra-t-elle accepter avec un taux de blocage de 1% ?

		Probabilité de blocage								
		0,01%	0,02%	0,05%	0,10%	0,20%	0,50%	1,00%	2,00%	
Nombre d'organes	1	0,0001	0,0002	0,0005	0,0010	0,0020	0,0050	0,0101	0,0204	
	5	0,452	0,527	0,649	0,762	0,900	1,13	1,36	1,66	
	10	2,26	2,47	2,80	3,09	3,43	3,96	4,46	5,08	
	15	4,78	5,12	5,63	6,08	6,58	7,38	8,11	9,01	
	20	7,70	8,16	8,83	9,41	10,1	11,1	12,0	13,2	
	25	10,9	11,4	12,3	13,0	13,8	15,0	16,1	17,5	
	30	14,2	14,9	15,9	16,7	17,5	19,0	20,3	21,9	
	35	17,8	18,5	19,6	20,5	21,6	23,2	24,6	26,4	
	40	21,4	22,2	23,4	24,4	25,8	27,4	29,0	31,0	
	45	25,1	26,0	27,3	28,4	29,7	31,7	33,4	35,8	
	50	28,9	29,9	31,3	32,5	33,9	36,0	37,9	40,3	

### Le nombre de fréquences

- 15 Erlang
- 20 Erlang
- 25 Erlang

### Solution

### Le trafic

- 15 Erlang
- ✓ 20 Erlang
- 25 Erlang

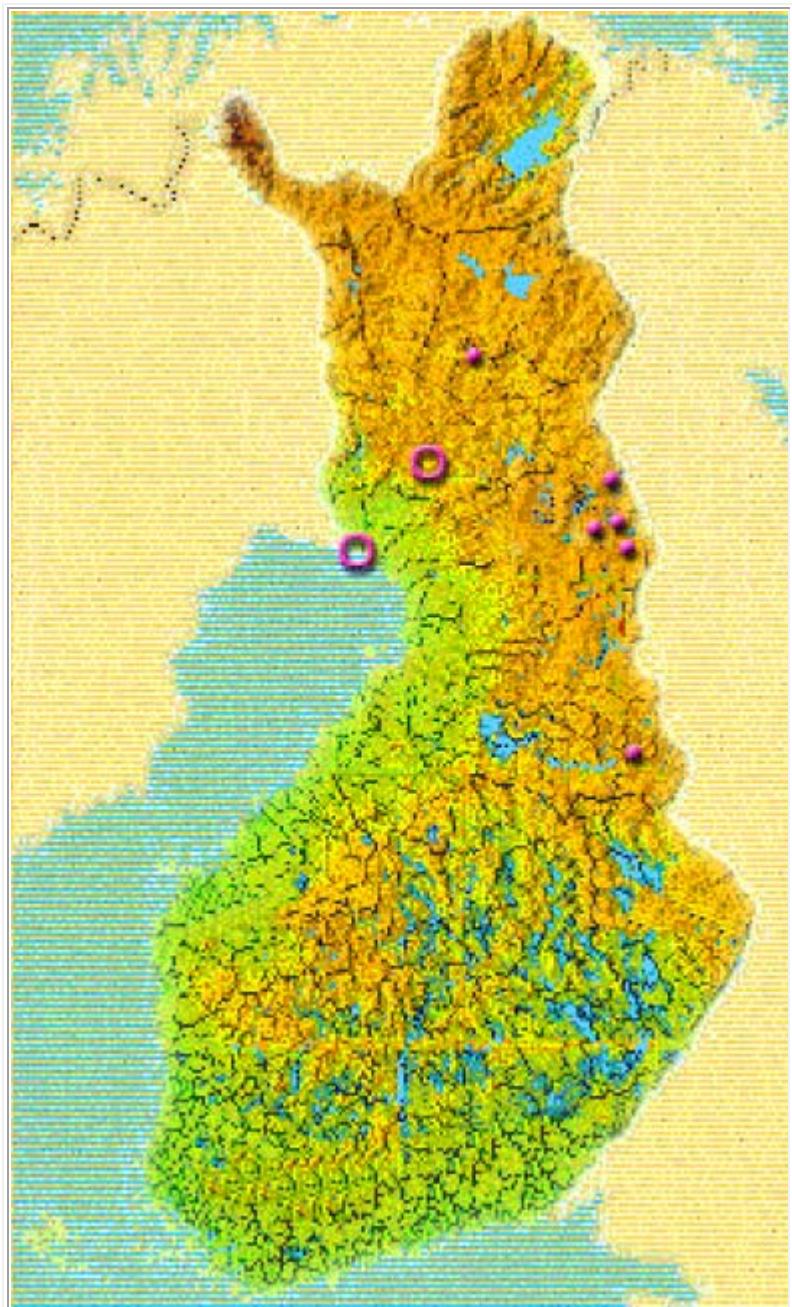
D'après le tableau, pour  $Pr = 1,00\%$ , la valeur proche de 28 canaux voie (ou organes de communications) par excès est 30. Ceci correspond à un trafic de 20,3 Erlang. Soit donc un trafic de **20 Erlang**.

## Exercice 20: Choix de modèles

### Énoncé

Vous devez répondre à un appel d'offre concernant le déploiement d'un réseau de téléphonie mobile. Quel modèle choisiriez-vous pour chacun des pays ci-dessous ?

Pays: la Finlande	Type de régions	Modèles disponibles
-------------------	-----------------	---------------------



- Montagn e
- Ville
- Campagn e
- Bordure de mer, îles, lacs

1. COST231-Hata
2. Hata
3. Modèle à deux rayons
4. CCIR

### Solution

Résultat

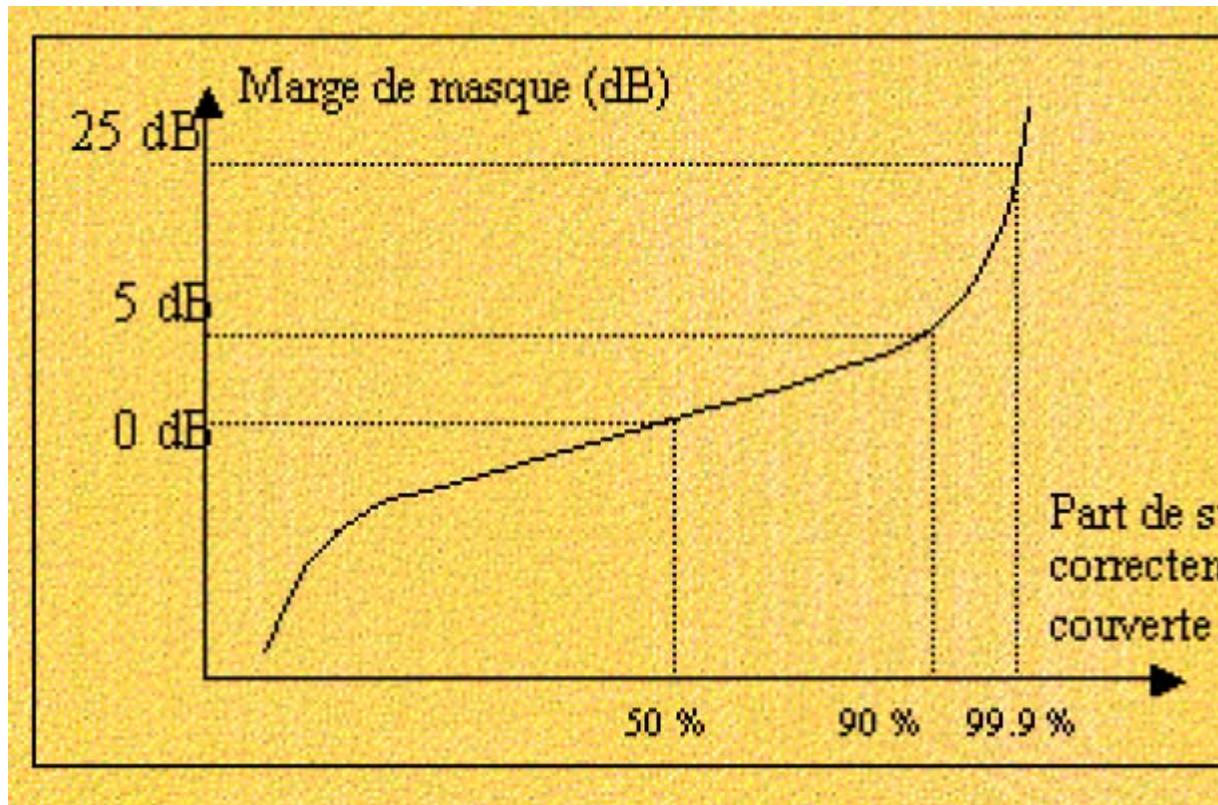
Région	Modèles
Montagne	COST 231-HATA
Ville	HATA
Campagne	COST 231-HATA
Bordure de mer, îles, lacs	COST 231-HATA

Le modèle de Hata convient au milieu urbain fortement peuplé (et faiblement peuplé aussi) et le modèle COST231-Hata convient au milieu péri-urbain et faiblement peuplé.

## Exercice 21: Détermination d'une puissance

### Enoncé

Une puissance d'antenne de 4 W permet dans une zone urbaine de densité moyenne de couvrir 90% de surface. Pouvez-vous déterminer la puissance nécessaire (en watt) pour étendre cette couverture à 99,9% ?



### La puissance nécessaire

- 4,4 W
- 40 W
- 400 W
- 1000 W

### Solution

#### La puissance nécessaire

✓ **4,4 W**

40 W

400 W

1000 W

$R = PT/PR$  ;  $R' = P'T/PR$  ; Soit :  $P'T = R'/R \times PT = 99,9/90 \times 4 = 4,44W$   
La puissance reçue étant la même.

## Exercice 22: Détermination du nombre de cellules

### Énoncé

Un pays (imaginaire) a une superficie de 543 965 km<sup>2</sup> et 60 000 000 d'habitants. Son ministre des Télécommunications vous propose d'implanter un système de téléphonie GSM. Pour tester vos compétences, il vous demande d'abord combien de cellules sont nécessaires (ce ne serait pas élégant d'utiliser une calculette !). Choisissez une évaluation parmi les 4 valeurs proposées, sachant que l'objectif est de couvrir tout le territoire de cellules raisonnables, et en tenant compte des conditions de propagation (relief) moyennes.

#### **Le nombre de cellules :**

- 500
  - 1000
  - 2500
  - 7500
- 

### Solution

#### **Le nombre de cellules**

- 500
- 1000
- 2500
- 7500

On peut estimer à environ 5 km le rayon d'une macrocellule. Avec un tel rayon, on peut estimer à  $7500 \times \pi \times 25 = 538750$  km. La surface couverte, ce qui englobe tout le pays. Les autres chiffres ne permettraient pas d'avoir une couverture totale du pays.

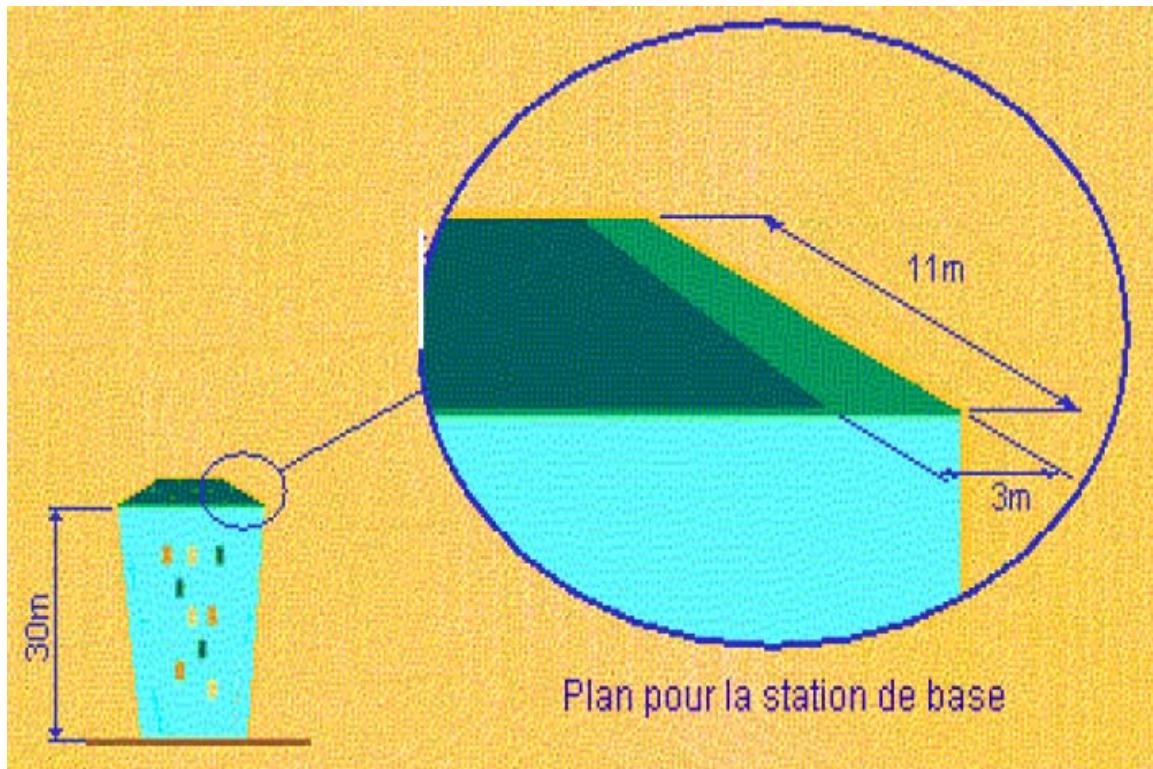
## Exercice 23: Choix de diversité

### Énoncé

Vous devez installer une antenne de diversité pour la station de base ci-dessous.

Quel type de diversité choisissez-vous ?

La station de base doit être placée sur un bâtiment mais l'espace disponible est limité.



Aide :

h hauteur de la station de base

D distance entre des antennes

### Le type de diversité

- Diversité d'espace : trois antennes, dont une pour l'émission.
- Diversité d'espace : quatre antennes, dont une pour l'émission.
- Diversité de polarisation.

## Solution

### **La puissance nécessaire**

Diversité d'espace : trois antennes, dont une pour l'émission.

Diversité d'espace : quatre antennes, dont une pour l'émission.

✓ **Diversité de polarisation.**

L'espace étant limité, la diversité de polarisation permet de placer 2 antennes polarisées comme branche d'un récepteur à diversité. De plus, cette diversité permet de résoudre les erreurs de polarisation.

## Exercice 24: Choix d'un modèle

### Énoncé

Vous êtes opérateur et vous devez modéliser la province de l'ouest Cameroun c'est-à-dire un environnement de massifs montagneux ainsi que d'agglomérations. Pour cela quel modèle choisissez vous et pourquoi ?

### **Le modèle adéquat**

- Canal de Rice.
- Modèles COST 207.
- Canal de Rayleigh.

### **Justifier votre choix**

- Car il permet de prédire la fonction de transfert du canal
- Car il permet de modéliser des communications mobiles dans le cas où le mobile et la station de base ne sont pas en visibilité directe
- Car il permet de modéliser l'affaiblissement dans un environnement varié (plaines, plateaux, villes, montagnes)

---

### Solution

### **Le modèle adéquat**

✓ **Canal de Rice**

Modèles COST 207.

Canal de Rayleigh.

---

## Solution

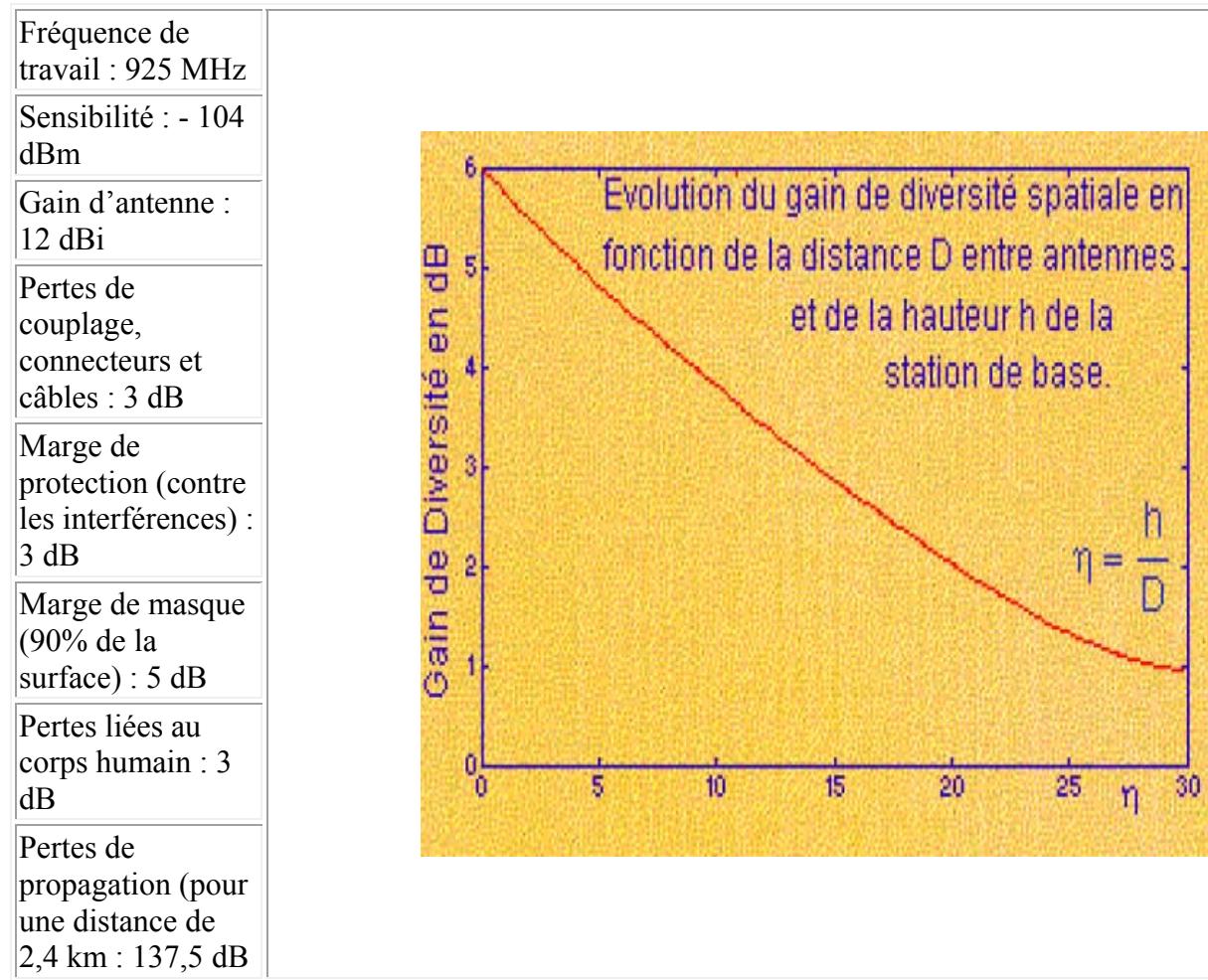
### **Justifier votre choix**

- Car il permet de prédire la fonction de transfert du canal
- ✓ **Car il permet de modéliser des communications mobiles dans le cas où le mobile et la station de base ne sont pas en visibilité directe.**
- Car il permet de modéliser l'affaiblissement dans un environnement varié (plaines, plateaux, villes, montagnes)

## Exercice 25: Configuration d'antennes et type de mobile

### Enoncé

Dans une ville fortement peuplée, comment configureriez-vous les antennes de la BTS et quel type de mobile choisiriez-vous pour couvrir une zone d'au moins 2,4 km de rayon ?



### Configuration d'antennes

- 2 antennes : 1 antenne émission et 1 antenne réception
- 3 antennes : 1 antenne émission et 2 antennes réception séparées de 1,3 m
- 3 antennes : 1 antenne émission et 2

antennes réception séparées de 3,6 m

- 3 antennes : 1 antenne émission et 2 antennes réception séparées de 8 m

---

#### Le type de mobile

- 2 W
  - 8 W
- 

### Solution

#### Configuration d'antennes

2 antennes : 1 antenne émission et 1 antenne réception

- 3 antennes : 1 antenne émission et 2 antennes en réception séparées de 1,3 m

3 antennes : 1 antenne émission et 2 antennes réception séparées de 3,6 m

3 antennes : 1 antenne émission et 2 antennes réception séparées de 8 m

Il nous faut 3 antennes ; mais la différence de phase à un mobile donné entre les signaux provenant des différentes antennes doit être faible ;  $\phi = \exp(-j kD \sin\theta)$  ; plus D est faible, plus les signaux sont vraisemblables.

Et plus D est faible, plus  $\eta$  ( $\eta = h / D$ ) est grand. Ceci permet de maintenir la hauteur de la station de base à des proportions raisonnables (gain économique), avec un gain de diversité intéressant. En effet, Pour nous D = 1.3 m; si on veut un gain de diversité de 1 dB, soit h =  $1.3 * 30 = 39$  m (Ceci est acceptable, par contre si D = 3,6m, h = 108m et si D = 8m, h = 240m. trop haut pour un rayon de 2.4km seulement).

---

### Solution

#### Justifier votre choix

- 2 W
- 8 W

Calcul de la puissance d'émission du portable  $P_t$ .

$G_d$  = gain de diversité. On sait que : 0 dBm = -30 dB. La sensibilité devient alors -134 dB.

$$P_t + G_d = -134 - 12 + 137,5 + 5 + 3 + 3 + 3 = 5,5 \text{ dB}$$

D'après le graphique, pour un gain d'au moins 1 dB, la hauteur de la station de base doit être

30 fois la distance D entre les antennes. Pour nous  $D = 1.3 \text{ m}$  soit  $h = 1.3 * 30 = 39 \text{ m}$ . (acceptable, par contre si  $D = 3.6\text{m}$ ,  $h = 108\text{m}$  et si  $D = 8\text{m}$ ,  $h = 240\text{m}$ . trop haut pour un rayon de 2.4km).

En prenant donc dans le pire des cas  $G_d = 1 \text{ dB}$ , on a  $P_t = 4.5 \text{ dB}$ , soit  $P_t = 10^{(4.5/10)} = 2.82 \text{ W}$ . Ainsi le portable doit avoir une faible puissance d'où le choix. Donc la puissance à prendre est 2 W.

## Exercice 26: Problèmes de temps de dispersion

### Énoncé

Après modélisation de l'environnement dans lequel vous intervenez, vous vous rendez compte que le temps de dispersion n'est pas négligeable devant le temps d'émission d'un symbole. Que choisissez-vous de faire pour remédier à ce problème ?

### **Configuration d'antennes**

- Estimer la fréquence Doppler
  - Synchroniser le portable
  - Égaliser le signal
- 

### Solution

### **Configuration d'antennes**

#### **✓ Estimer la fréquence Doppler**

- Synchroniser le portable
- Egaliser le signal

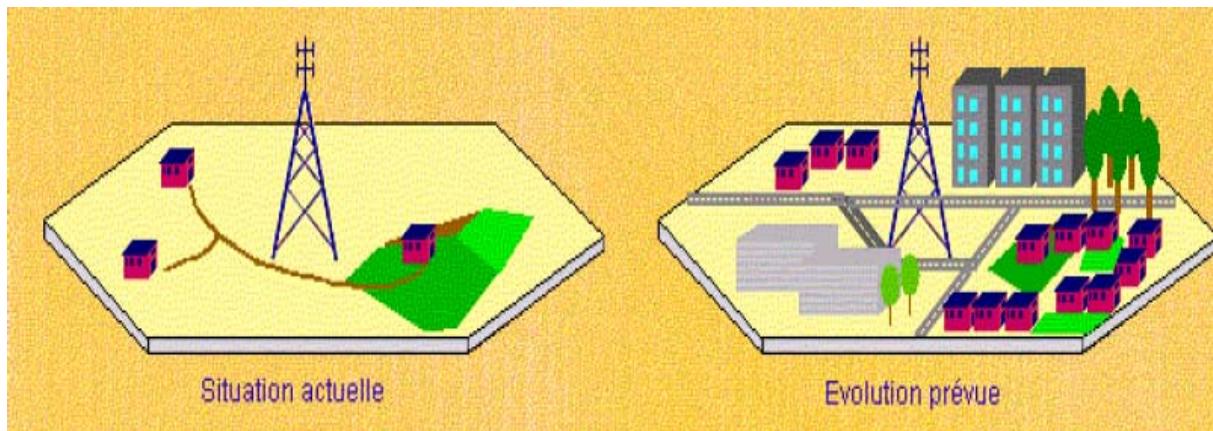
L'effet Doppler peut considérablement atténuer la fréquence du signal si la vitesse est considérable.

( $B_{\text{dmax}} = f_c \times V/C$ )

## Exercice 27: Augmentation de trafic

### Enoncé

Vous êtes un opérateur. Vous disposez dans une zone rurale d'une station de base avec une antenne omnidirectionnelle couvrant une cellule. Or dans cette zone la population augmente rapidement et votre réseau sera prochainement saturé. Quelle solution allez-vous adopter pour faire face à cette augmentation de trafic ?



### **Choix d'une solution**

- Vous décidez d'implanter sur votre station de base une antenne qui rayonne de façon plus privilégiée dans le plan horizontal.
- Vous décidez de diviser votre cellule, par exemple en trois secteurs (angles de 120°), tout en gardant la même station de base.
- Vous décidez de diviser votre cellule en cellules plus petites, et d'implanter sur chacune une nouvelle station de base.

---

### Solution

#### **Choix d'une solution**

Vous décidez d'implanter sur votre station de base une antenne qui rayonne de façon plus privilégiée dans le plan horizontal.

- ✓ Vous décidez de diviser votre cellule, par exemple en trois secteurs (angles de 120°), tout en gardant la même station de base.**

Vous décidez de diviser votre cellule en cellules plus petites, et d'implanter sur chacune une nouvelle station de base.

La sectorisation constitue la meilleure solution pour cette situation car elle augmente la capacité et est moins coûteuse que la dernière solution.

## Exercice 28: Comment dimensionner le lien BSC – MSC ?

### Énoncé

Trafic de 1200 Erlang	
Circuit s	Probabilité de perte
1200	2,3 %
1250	0,4 %
1300	0,02 %
1550	0%

The diagram illustrates a mobile communication network architecture. On the left, a mobile phone icon is labeled "Mobile". A red line connects it to a blue antenna tower labeled "BTS". Another red line connects the BTS to an orange rectangular box labeled "BSC". A third red line connects the BSC to two more orange boxes labeled "MSC-VLR".

### Hypothèses de calcul :

- 20 sites à 3 BTS convergent vers le BSC
- chaque BTS écoule 20 Erlang ce qui correspond à 29 canaux TCH
- pour chaque canal TCH, il y a un circuit entre BTS et BSC

Sur la liaison BSC – MSC, vous choisissez :

### Choix du nombre de circuits

- 1740 circuits
- 1320 circuits
- 1278 circuits
- 1206 circuits

### Solution

### Choix du nombre de circuits



**1740 circuits**

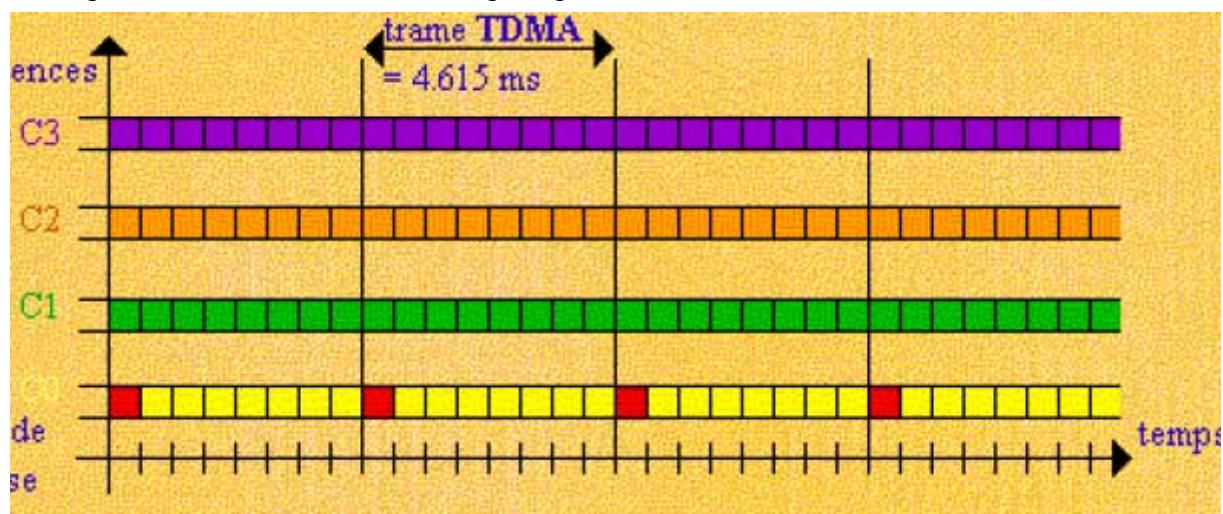
- 1320 circuits
- 1278 circuits
- 1206 circuits

On a 20 sites chaque sites à 3 BTS. Donc on a au total  $20 \times 3 = 60$  BTS.  
 Chaque BTS utilise 29 canaux TCH soit au total  $29 \times 60 = 1740$  circuits.

## Exercice 29: Sélection d'un canal logique

### Enoncé

Vous êtes spécificateur GSM et vous devez spécifier un canal logique pour synchroniser les mobiles sur la BTS. On considère le cas d'une BTS avec 4 porteuses duplex. Quel choix faites-vous et pourquoi ?



### Choix du canal logique

- de former un canal logique sur toutes les fréquences de la BTS
- de former un canal logique sur un intervalle quelconque, mais fixé (autre que l'intervalle de temps 0), de la fréquence de la voie balise.
- de former un canal logique sur l'intervalle 0 de la fréquence de la voie balise.

### Arguments

- Pour minimiser la durée de recherche du réseau à la mise sous tension du mobile.

- Pour minimiser la ressource consommée par la transmission de synchronisation.
- 

### **Solution**

#### **Choix du canal logique**

- de former un canal logique sur toutes les fréquences de la BTS
  - de former un canal logique sur un intervalle quelconque, mais fixé (autre que l'intervalle de temps 0), de la fréquence de la voie balise.
- ✓ **de former un canal logique sur l'intervalle 0 de la fréquence de la voie balise.**

Le temps d'accès au réseau doit être minimal. La solution N°1 crée une perte de temps considérable car rien que 8 IT nécessitent déjà 4,615 ms.

### **Solution**

#### **Choix du canal logique**

- ✓ **Pour minimiser la durée de recherche du réseau à la mise sous tension du mobile.**
- Pour minimiser la ressource consommée par la transmission de synchronisation.

## Exercice 30: Impact du changement de fréquence

### Énoncé

Vous avez déployé un réseau mobile à 900 MHz. Les instances de régulation des télécommunications viennent de vous accorder une deuxième bande de fréquences autour de 1800 MHz. Vous devez évaluer l'impact du changement de fréquence. Quels phénomènes physiques sont sensibles à la fréquence et à quel degré ?

		Phénomènes			
		LOS	Réflexion	Transmission	Diffraction
<i>Évolution de la puissance</i>	Pas de sensibilité à la fréquence	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$\approx 1/f^2$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	$\approx 1/f$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Sensibilité indirecte par $\epsilon_r$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

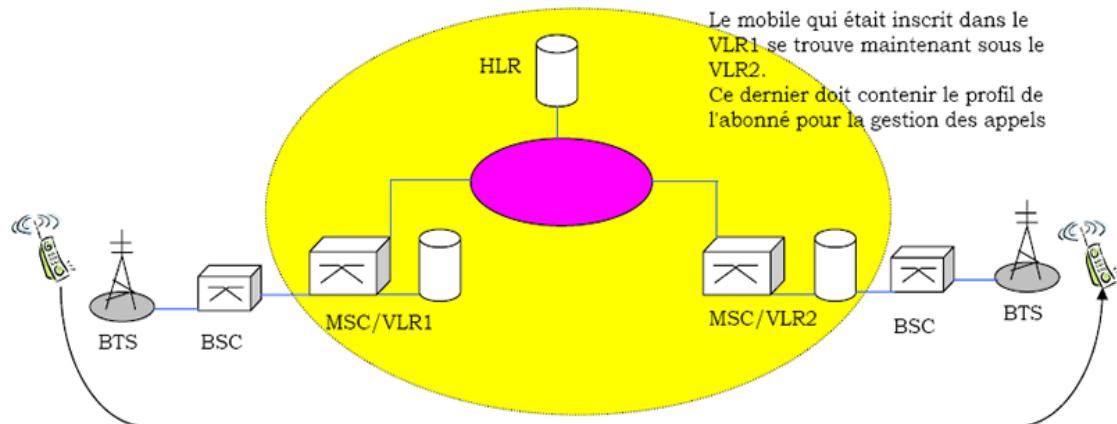
### Solution

Phénomènes	Évolution de la Puissance
LOS	$\approx 1/f$
Réflexion	Sensibilité indirecte par $\epsilon_r$
Transmission	Pas de sensibilité à la fréquence
Diffraction	$\approx 1/f^2$

## Exercice 31: Spécifier le mécanisme de mise à jour de localisation

### Énoncé

Vous êtes spécificateur de GSM et vous devez spécifier le mécanisme de mise à jour de localisation en cas de changement de MSC/VLR. Que choisissez-vous de faire et pourquoi ?



### Choix du mécanisme

- Recopier le profil du VLR1 vers le VLR2
- Recharger le profil à partir du HLR

---

### Arguments

- Parce que le coût de transfert du profil est moindre.
  - Pour se ramener au cas d'une première mise sous tension du mobile
  - Pour garantir l'exactitude des données
-

## **Solution**

### **Choix du mécanisme**

#### ✓ **Recopier le profil du VLR1 vers le VLR2**

Recharger le profil à partir du HLR

### **Arguments**

Parce que le coût de transfert du profil est moindre.

Pour se ramener au cas d'une première mise sous tension du mobile

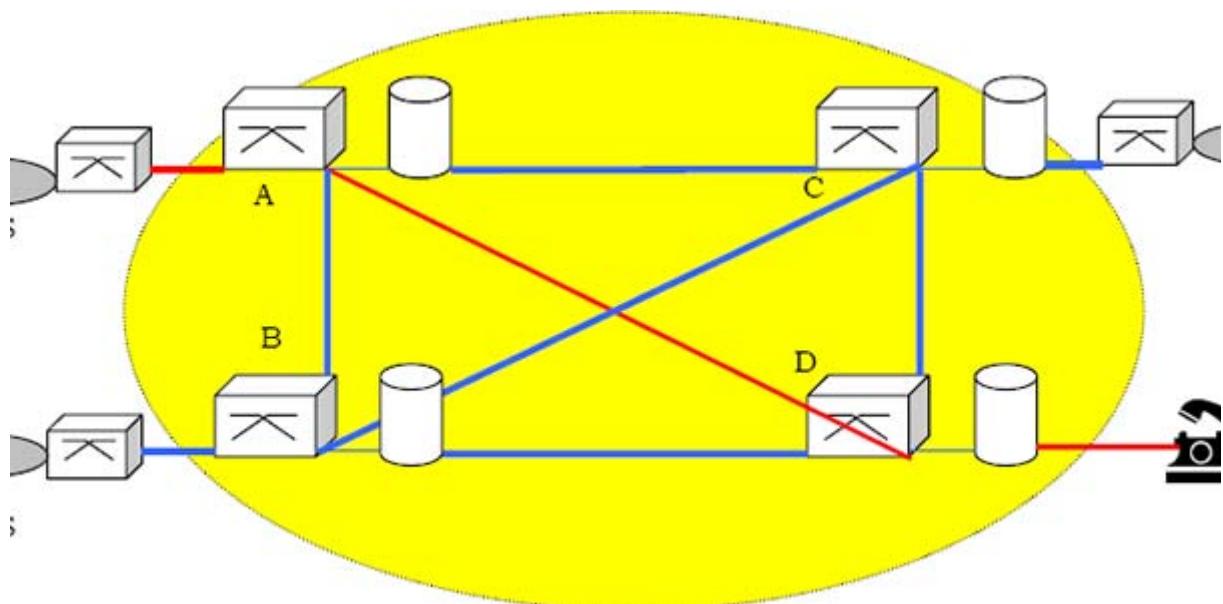
#### ✓ **Pour garantir l'exactitude des données**

En effectuant la recopie, on est sur d'avoir l'exactitude des données de l'abonné et le risque de modification du profil de l'abonné est quasi nul.

## Exercice 32: Spécifier le mécanisme de handover

### Énoncé

Vous êtes spécificateur de GSM et vous devez spécifier le mécanisme de handover. Que faites-vous en cas de handover inter-MSC, par exemple de A à B ?



### Choix du mécanisme

- Vous décidez de transférer tout le contexte d'une communication d'un MSC vers un autre.
- Vous décidez de garder la communication sous le contrôle du MSC A

---

### Arguments

- car en cas de retour du mobile dans la zone de couverture A, il n'est pas nécessaire de re-transférer le contexte de la communication de B vers A.
- car on évite ainsi d'utiliser un circuit supplémentaire entre deux MSC, y compris en cas de handover ultérieur.

- Car en cas de handover ultérieur vers un autre MSC (par exemple C), on peut établir facilement un circuit de A vers C.
- 

## **Solution**

### **Choix du mécanisme**

- ✓ **Vous décidez de transférer tout le contexte d'une communication d'un MSC vers un autre.**

Vous décidez de garder la communication sous le contrôle du MSC A

### **Arguments**

car en cas de retour du mobile dans la zone de couverture A, il n'est pas nécessaire de re-transférer le contexte de la communication de B vers A.

- ✓ **car on évite ainsi d'utiliser un circuit supplémentaire entre deux MSC, y compris en cas de handover ultérieur.**

Car en cas de handover ultérieur vers un autre MSC (par exemple C), on peut établir facilement un circuit de A vers C.

Le handover ou handoff est le passage d'un usager en communication d'une cellule à une autre. Transférer tout le contexte d'une communication d'un MSC vers un autre est délicat. Il nécessite en fait un aiguillage rapide. Mais, les cas de handover étant peu à un instant t et la communication étant courte en moyenne, vaut mieux que la MSC A garde le contrôle jusqu'à la fin de la communication.

## **Exercice 33: Communication téléphonique**

### **Énoncé**

Lors d'un changement de cellule, votre communication téléphonique est interrompue alors que d'autres personnes déjà présentes dans la nouvelle cellule poursuivent leur communication, citez 4 raisons de cette interruption.

### **Solution**

Les causes de rupture de communication sont nombreuses, citons :

- mobile dans une zone d'ombre ;
- batterie trop faible ;
- vitesse de déplacement du mobile trop importante ;
- mobile en limite de portée d'une cellule et plus de capacité d'accueil dans la cellule qui aurait dû, compte tenu de la position du mobile, le prendre en charge.

## Exercice 34: Réutilisation de fréquence

### Énoncé

Un système de téléphonie cellulaire dispose de 240 fréquences, sachant que les cellules ont un profil hexagonal et qu'une même fréquence ne peut être réutilisée dans une cellule adjacente, quel est le nombre de fréquences disponibles pour une cellule (accès FDMA) ?

Le récepteur reçoit la somme du trajet direct et du trajet réfléchi. Le trajet réfléchi est presque aussi fort que le trajet direct (légère atténuation de distance supplémentaire). Le signal étant à bande étroite, on obtient des interférences.

Le signal reçu est retardé de  $r = \frac{2d}{c}$ , si  $d$  = distance au mur donc déphasé de

$$\phi = 2\pi f r = 2\pi f \frac{2d}{c} \text{ avec } f = \text{fréquence émise.}$$

$$\phi = 2\pi \cdot 2.10^9 \cdot \frac{2d}{3.10^8} = 2\pi \frac{d}{0,075}$$

On obtient une courbe de puissance présentant des maxima quand le déphasage est un multiple de  $2\pi$ , donc espacés de 7,5 cm. Les minima sont presque nuls puisque les puissances sont presque égales.

## 2. Pertinence, avantages et inconvénients

### 2.1 Boucle de Costas

Une boucle de Costas est un moyen de récupération de porteuse.

Cette fonction est toujours nécessaire, mais elle ne règle en rien notre problème (intensité reçue très variable)

### 2.2 Egaliseur par filtre à réponse impulsionnelle finie

Un égaliseur a pour but de corriger la réponse du canal. A priori, il devrait s'appliquer à notre problème. Mais compte tenu de la réponse particulière de notre canal (réponse impulsionnelle composée de 2 diracs d'amplitudes voisines), la réponse impulsionnelle du filtre inverse sera très longue. Un filtre à réponse finie n'est donc pas la meilleure solution.

De toute façon on aura un très mauvais rapport signal sur bruit dans les situations d'interférences destructives.

### 2.3 Modulation à étalement de spectre

L'utilisation d'une modulation à étalement de spectre répond à notre problème : l'interférence destructive ne sera que une partie du spectre. L'autre partie sera correctement reçue.

On peut expliquer cela temporellement : si on utilise un étalement par séquence directe, on obtient en sortie du filtre adapté des pics suffisamment étroits pour séparer le trajet direct du trajet réfléchi.

L'inconvénient est l'élargissement non souhaitable de la bande spectrale. Cela peut être compensé par une superposition d'utilisateur dans la même bande (CDMA)

### 2.4 Modulation multi-porteuses

Si on élargit le spectre, on obtient le même gain que précédemment, à condition d'ajouter du codage correcteur d'erreur. Mais si on ne souhaite pas un accroissement de débit, cette modulation n'est pas utile

### 2.5 Autre

Egaliseur « DFE »

### **Solution**

On passe rapidement d'une situation bonne à une situation mauvaise. Les dispositifs adaptatifs (Costas et égaliseur) seront plus délicats à régler. Un ajout de redondance pour effectuer une correction d'erreur fonctionnera.

Si la vitesse est vraiment très rapide, l'effet doppler devient non négligeable. Il pourrait être mis à profit pour apporter une diversité.

## Exercice 36: Station de base d'un réseau GSM

### Énoncé

On considère la station de base d'un réseau GSM. Cette station gère l'interface air avec les mobiles de sa cellule. L'interface air utilise une technique d'accès au canal de type TDMA, dans laquelle la trame de base possède 16 porteuses, c'est-à-dire 16 fréquences disponibles. la durée de la trame est de 4,615ms, et chaque trame est divisée en 8 tranches de temps.

1. Si une parole téléphonique compressée en GSM représente 12 Kbit/s, combien de communications simultanées une cellule peut-elle contenir au maximum ?
2. Si un client souhaite obtenir une communication à 64 Kbit/s, combien doit-il trouver de tranches disponibles sur chaque trame pour arriver à ce débit ?
3. En supposant que l'on puisse permettre à un utilisateur d'atteindre des débits en mégabit par seconde, combien de tels abonnés pourraient être pris en charge simultanément ?
4. On suppose que deux cellules se recouvrent partiellement de façon à éviter une coupure des communications. Un mobile peut-il capter la même fréquence sur les deux cellules ?
5. On suppose que le mobile capte les fréquences des deux cellules. Comment doit-il choisir sa cellule dans le GSM ?

### **Le nombre de communications simultanées**

- 24
- 16
- 128
- 8

### **Le nombre de tranches disponibles**

- 8
- 12
- 6

### Débit total

- 1228,8 kbits/s
- 1000 kbits/s
- 2 Mbits/s
- 500 kbits/s

**Un mobile peut-il capter la même fréquence sur les deux cellules ?**

- oui
- non

### Choix de la cellule dans le GSM

---

## **Solution**

### **Le nombre de communications simultanées**

- 24
- 16
- 128**
- 8

## **Explication**

Une tranche de temps correspond au passage d'une voie GSM. Il y a donc 8 voies de parole par porteuse et donc  $8 \times 16 = 128$  voies de parole.

### **Solution**

**Le nombre de communications simultanées**

- 8
- 12
- 6
- 4

### **Explication**

Il faut 6 tranches de temps. Sur chaque tranche, un débit de 9,6 Kbit/s peut être pris en charge.

### **Solution**

**Un mobile peut-il capter la même fréquence sur les deux cellules ?**

Oui

✓ Non

### **Explication**

Non, un mobile ne peut capter la même fréquence sur les deux cellules si un TDMA est utilisé car il y aurait des interférences. En revanche, si la technique employée est du CDMA, il peut capter la même fréquence.

### **Solution**

Dans le GSM, le terminal choisit la cellule d'où provient l'émission la plus forte.

## **Exercice 37: Station de base d'un réseau GSM (suite et fin)**

### **Énoncé**

En fait, pour être plus précis par rapport à l'exercice 37, chaque cellule ne dispose que d'un certain nombre de porteuses, qui lui ont été allouées lors de la mise en place d'un plan de fréquences.

- a) Les porteuses sont partiellement utilisées pour la signalisation, c'est-à-dire pour les communications entre mobile actifs (allumés mais sans communication orale) et la station de base. Si l'on suppose qu'une cellule possède 5 porteuses, elle dispose de 40 intervalles de temps, dont un est utilisé pour le contrôle commun et la diffusion, deux pour fournir des canaux de signalisation point à point, et le reste pour donner 37 canaux de trafic utilisateur. Si l'on suppose que, pour contrôler un utilisateur, il faille 2 pour 100 d'un canal de signalisation, combien de mobiles peuvent être actifs dans la cellule ?
- b) Si l'on suppose qu'un utilisateur téléphone en moyenne dix-huit minutes pendant les six heures de pointe de la journée, quel est le nombre moyen de clients qui téléphonent en même temps ?
- c) Cette cellule paraît-elle bien dimensionnée ?
- d) La possibilité de passer une parole téléphonique en demi-débit sur un canal à 5,6 Kbit/s, au lieu d'un canal standard plein débit à 13 Kbit/s, paraît-elle une solution ?

### **Le nombre de mobiles actifs**

- 37
- 100
- 40
- 200

### **Le nombre moyen de clients**

- 6
- 100
- 5
- 180

**La cellule est -t-elle bien dimensionnée?**

- oui
- non

**Possibilité de en demi-débit sur un canal à 5,6 Kbit/s, au lieu d'un canal standard plein débit à 13 Kbit/s**

- non
  - oui
-

## **Solution**

### **Le nombre de mobiles actifs**

- 37
- 100
- 40
- 200

### **Explication**

Comme il y a 5 porteuses et 8 canaux par porteuse, nous avons bien un équivalent de 40 intervalles de temps. Pour chaque canal de signalisation, il est possible de gérer 50 terminaux mobiles. Puisqu'il y a 2 canaux de signalisation, il est possible de gérer 100 utilisateurs mobiles actifs. Sur les 100 utilisateurs, 37 seulement peuvent avoir une communication téléphonique, mais les 100 pourraient avoir des communications GPRS simultanément.

## **Solution**

### **Le nombre moyen de clients**

- 6
- 100
- 5
- 180

### **Explication**

Un utilisateur téléphone en moyenne 18 min sur les 360 min des heures de pointe. Si l'on suppose qu'il y a 100 utilisateurs actifs dans la cellule et que les communications téléphoniques se déroulent d'une façon équirépartie sur les 360 min, cela représente un total de 1 800 min, qui se répartissent sur 360 min, c'est-à-dire 5 utilisateurs en moyenne.

## **Solution**

**La cellule est -t-elle bien dimensionnée?**

- oui
- non

## **Explication**

Cette cellule paraît mal dimensionnée car nous avons en moyenne 5 clients en train de téléphoner pour 37 canaux disponibles. Dans les faits, le trafic n'est pas équiréparti, et la probabilité d'atteindre plus 37 clients souhaitant téléphoner en même temps est réelle tout en restant extrêmement faible.

## **Solution**

**Possibilité de en demi-débit sur un canal à  
5,6 Kbit/s, au lieu d'un canal standard  
plein débit à 13 Kbit/s**

- non  
 oui

## **Explication**

Si, sur un intervalle de temps, on fait passer deux paroles téléphoniques à la place d'une, cela n'apporte rien s'il n'y a que 5 clients en moyenne. En revanche, les 74 canaux de parole disponibles permettent d'écouler correctement le trafic moyen de 40 utilisateurs. On peut calculer par la formule d'Erlang la probabilité de rejet d'un client à environ 2 p.100, ce qui est la valeur maximale classiquement utilisée dans les réseaux de mobiles.

## Exercice 38: Liaison sans répéteurs

### Énoncé

BTS			MS		
Puissance d'émission	39	dBm	PIRE	33	dBm
Perte de feeder	+3	dB	Sensibilité en reception	-103	dBm
Gain de l'antenne	+14	dBi			
Sensibilité en réception	-104	dBm			
Gain de diversité	+5	dB			

- Déterminer la perte de propagation entre la MS et la BTS en liaison montante et en liaison descendante.
- La liaison est équilibrée ?
- Quel est le rayon de la cellule en considérant une loi d'atténuation  $L = 137 + 35,2 \log R [km]$  ?
- Montrer à l'aide d'un calcul de bilan de liaison si les caractéristiques précédentes et la PIRE de la MS égale à 30 dBm permettent d'avoir une liaison est équilibrée.

### **La perte de propagation entre la MS et la BTS**

### **La liaison est -t-elle équilibrée?**

- oui
- non

### **Le rayon de la cellule**

- 2.85 Km
- 10 Km
- 40 Km

□ 200 Km

### Démonstration

---

Liaison descendante :

$$\text{Sensibilité}_{MS} = 39 - 3 + 14 - L_1 \text{ donc } L_1 = 103 + 39 - 3 + 14 = 153 \text{ dB}$$

Liaison montante

$$\text{Sensibilité}_{BTS} = 33 - L_2 + 5 + 14 - 3 \text{ donc } L_2 = 104 + 33 + 5 + 14 - 3 = 153 \text{ dB}$$

Conclusion : La liaison est équilibrée.

### Solution

La liaison est -t-elle équilibrée?

✓ oui

non

### Explication

Liaison descendante :

$$\text{Sensibilité}_{MS} = 39 - 3 + 14 - L_1 \text{ donc } L_1 = 103 + 39 - 3 + 14 = 153 \text{ dB}$$

Liaison montante

$$\text{Sensibilité}_{BTS} = 33 - L_2 + 5 + 14 - 3 \text{ donc } L_2 = 104 + 33 + 5 + 14 - 3 = 153 \text{ dB}$$

Conclusion : La liaison est équilibrée.

### Solution

Le rayon de la cellule

✓ 2.85 Km

10 Km

40 Km

200 Km

### Explication

$$\text{Le rayon correspondant de la cellule est : } R = 10^{\frac{153-137}{35,2}} = 2,85 \text{ km.}$$

Liaison descendante :

$$\text{Sensibilité}_{MS} = 39 - 3 + 14 - L_1 \text{ donc } L_1 = 103 + 39 - 3 + 14 = 153 \text{ dB}$$

Liaison montante

$$\text{Sensibilité}_{BTS} = 30 - L_2 + 5 + 14 - 3 \text{ donc } L_2 = 104 + 30 + 5 + 14 - 3 = 150 \text{ dB}$$

Conclusion : La liaison n'est pas équilibrée.



## Exercice 39: Opérateur de GSM

### Énoncé

Un opérateur GSM désire couvrir une ville de taille moyenne et sur une surface de 20 [km<sup>2</sup>] à l'aide d'un nombre N d'antennes omnidirectionnelles de puissance égale à 80 [W], de gain égal à 5 [dB] et de hauteur égale à 40 [m].

Cet opérateur impose une couverture en deep indoor avec un pourcentage de couverture égal à 90 %.

(a) Déterminez, à 900 [MHz] :

- a1) l'affaiblissement de propagation L [dB]. On suppose que les termes dus au corps humain valent 3 [dB]
- a2) le rayon de couverture d [km] et la surface d'une cellule en considérant le modèle hexagonal. On utilisera le modèle COST 231-HATA en négligeant les effets dépendant de la hauteur du mobile.
- a3) le nombre minimum N d'antennes nécessaires pour couvrir la surface mentionnée si l'on suppose que ces antennes couvrent la totalité de la surface sans trou ni recouvrement.

(b) Comparez le résultat obtenu ci-dessus à celui obtenu à la fréquence  $f = 1800$  [MHz].

Commentez votre réponse.

(c) Si les antennes omnidirectionnelles sont remplacées par des antennes trisectorielles de gain maximum égal à celui des antennes omnidirectionnelles, peut-on placer plus d'antennes ? Quels en seraient les avantages ?

Remarques :

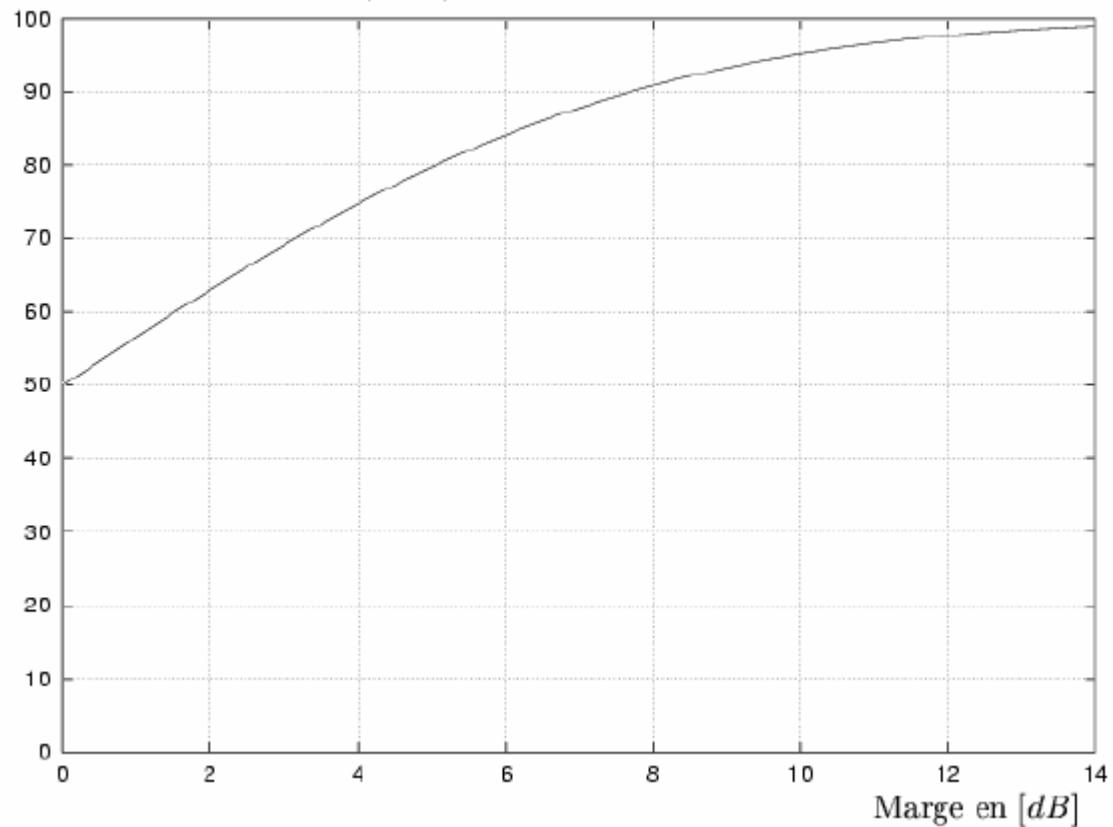
- Les antennes de réception et d'émission sont supposées isotropes.
- Les valeurs des marges seront prises identiques à 900 et 1800 [MHz].
- Suivant le modèle COST 231-HATA, l'affaiblissement  $L_u$  en milieu urbain vaut, en [dB],

$$L_u = 46,33 + 33,91 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log d + C_m$$

avec

- $f$  la fréquence,  $d$  la distance,  $h_b$ ,  $h_m$ , des hauteurs ; ces grandeurs sont exprimées respectivement en [MHz], [km] et [m].
- $a(h_m) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_m - (1,56 \log(f) - 0,8)$  pour une ville de taille moyenne ; Ce facteur de correction dépend de la hauteur de l'antenne du mobile mais également du type d'environnement.
- $C_m = 0 [dB]$  pour les villes de taille moyenne et les banlieues, et  $C_m = 3 [dB]$  pour les grands centres métropolitains.

Probabilité de couverture (en %)



**Affaiblissement de propagation**

**Rayon de couverture**

**Comparaison avec f=1800 MHz**

**Avantages des antennes tri-sectorielles**

---

**Solution**

A1) Affaiblissement de propagation

$$P_e [dBm] = 10 \log \left( \frac{80}{10^{-3}} \right) = 10 \log(80) + 30 = 49,03 \text{ dBm}$$

$$P_r = P_e + G_e + G_r - L - Perte_{Corps} = 49,03 + 5 - L - 3 = 51,03 - L$$

M = Marge se déduit de la courbe à 90% de couverture on obtient 7,8 dB

$$P_r [dBm] > Sensibilité_{MS} + M = -102 + 7,8 \text{ donc } 51,03 - L > -102 + 7,8$$

$$L < 102 + 51,03 - 7,8 \quad \text{soit } L < 145,23 \text{ dB}$$

**Solution**

A2) Calcul du rayon de couverture

$$L = 46,33 + 33,9 \log(900) - 13,82 \log(40) + 1,5 \log(900) - 0,8 + (44,9 - 6,55 \log(40)) \log d + C_m$$

$$L = 127,96 + 34,4 \log d + C_m$$

Ville de taille moyenne :  $C_m = 0$  donc  $L = 127,96 + 34,4 \log d$ .

$$d = 10^{\frac{145,23-127,96}{34,4}} = 10^{0,5} = 3,1769 \text{ km}$$

$$\text{Grands centres métropolitains } C_m = 3 \quad d = 10^{\frac{145,23-130,96}{34,4}} = 2,60 \text{ km}$$

$$\text{Motif hexagonal } S = \frac{3\sqrt{3}}{2} d^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} (3,1769)^2 = 26,22 \text{ km}^2$$

1 seule antenne pour couvrir toute la zone en ville moyenne et banlieue

Si grands centres métropolitains  $S = \frac{3\sqrt{3}}{2} (2,6)^2 = 17,56 \text{ km}^2$ . Il faudra 2 antennes pour couvrir les  $20 \text{ km}^2$ .

**Solution**

B) Comparaison avec  $f = 1800 \text{ MHz}$

Nous allons utiliser la même formule pour cette fréquence.

$$L = 138,76 + 34,4 \log d + C_m$$

Ville de taille moyenne :  $C_m = 0$  donc  $L = 138,76 + 34,4 \log d$ .

$$d = 10^{\frac{145,23 - 138,76}{34,4}} = 10^{0,1881} = 1,5421 \text{ km}$$

Grands centres métropolitains  $C_m = 3$   $d = 10^{\frac{145,23 - 141,76}{34,4}} = 1,26 \text{ km}$

$$\text{Motif hexagonal } S = \frac{3\sqrt{3}}{2} d^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} (1,5421)^2 = 6,1784 \text{ km}^2$$

Soit  $N = \frac{20}{6,1784} = 3,23$ . Il faudra 4 antennes.

Si grands centres métropolitains  $S = \frac{3\sqrt{3}}{2} (1,26)^2 = 4,1247 \text{ km}^2$ . Il faudra  
 $N = \frac{20}{4,1247} = 4,84$  soit 5 antennes pour couvrir les  $20 \text{ km}^2$ .

Il faut 3 à 5 fois plus d'antennes en DCS 1800.

**Solution**

### C) Antennes trisectionnelles

La sectorisation consiste à diviser une cellule en 3 secteurs, chaque secteur utilisant un ensemble différent de canaux et une antenne directionnelle couvrant environ 120°.

Avantages :

- Gain de couverture

Les antennes omnidirectionnelles ont des gains bien plus faible que les antennes directionnelles : environ 12 dB de gain contre 18 dB ; cet écart de 6 dB provoque une perte de couverture surfacique d'environ un facteur 4.

De plus, l'utilisation d'antennes directionnelles permet d'augmenter le rapport C/I.

- Gain de capacité

La limitation des équipements fournis par les constructeurs ne permet pas de mettre plus d'un certain nombre de TRX dans une BTS. Or lorsqu'il y a un fort trafic à écouler dans une cellule, il faut un grand nombre de TRX. Le fait de diviser une cellule en 3 permet donc d'augmenter la capacité.

- enfin, la renégociation de sites n'est pas nécessaire lors de ce type de densification.

## Exercice 40: Système de radiocommunication

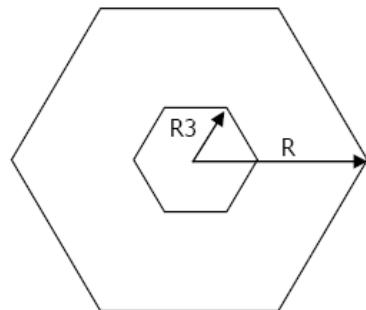
### Énoncé

On considère un système de radiocommunication dont on connaît les caractéristiques suivantes :

- 54 porteuses gérées en TDMA duplex fréquentiel avec 8 canaux par porteuse (7 pour le trafic et une pour la signalisation)
  - propagation : affaiblissement donnée par  $A[dB] = 21 + 35 \log_{10} d$  (d en m)
  - cellules hexagonales avec un motif à 9 cellules de 5 km de rayon.
- a) Combien de canaux de communication par relais offre ce système ?  
Avec un taux de blocage de 2% quel est le trafic maximum de chaque relais ?
  - b) Quelle est la PIRE du relais si la sensibilité du terminal est de  $-104 dBm$  (le terminal n'a aucun gain d'antenne et aucune perte en réception).
  - c) Quelle est la distance de réutilisation et le C/I en limite de couverture ?
  - d) On propose de répartir les 54 porteuses en deux groupes, l'un de P3 porteuses et l'autre de P9 porteuses. Les P3 porteuses sont réservées (pour chaque cellule) à un mini hexagone de rayon  $R_3$  et les P9 à l'anneau extérieur au mini hexagone.

Les porteuses P3 sont réutilisées selon un motif à trois cellules et les P9 selon un motif à 9. Déterminer R3 pour que le C/I en limite du mini hexagone soit identique au C/I en c).

Déterminer P9 si P3 = 9. Quel est alors le trafic maximum à l'intérieur du mini hexagone et le trafic dans l'anneau ? Comparer avec les résultats du (a) en particulier en densité de trafic ( $E/km^2$ ) dans les deux zones et la densité moyenne. Expliquer.



Remarques :

- Les antennes de réception et d'émission sont supposées isotropes.
- Les valeurs des marges sont supposées indépendantes de la fréquence.
- Suivant le modèle Okumura-HATA, l'affaiblissement  $L_u$  en milieu urbain vaut, en [dB],

$$L_u = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log d$$

### Le nombre de canaux de communication

- 42
- 54
- 72
- 200

### Le trafic maximum

- 32.83 E
- 30 E
- 20 E
- 15 E

### La PIRE du relais

- 44W
  - 20W
  - 18W
  - 46.46W
- 

#### **La distance de réutilisation**

- 26 Km
  - 20 Km
  - 15 Km
  - 46 Km
- 

#### **Rapport C/I**

- 17.26 dB
  - 20 dB
  - 53 dB
  - 46 dB
- 

#### **Valeur de R3**

#### **Valeur de P9**

---

#### **Solution**

a) nombre de porteuses par cellule :  $\frac{54}{9} = 6$

Nombre de canaux de communication =  $6 \times 7 = 42$

#### **Solution**

b) Le trafic maximum

Avec un taux de blocage de 2% on a un trafic de 32,83 E (Table Erlang B)

#### **Solution**

c) La PIRE du relais

$$PIRE - A(5km) = -104 \quad \text{or} \quad A = 21 + 35 \log(5000) = 150,46 \quad \text{et}$$

$$PIRE = 150,46 - 104 = 46,46 \text{ dBm soit } 44 \text{ W.}$$

### Solution

d) distance de réutilisation

On sait que  $D = R\sqrt{3 \times 9} = 26 \text{ km.}$  En limite de portée

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6}(3 \times 9)^{\frac{3,5}{2}} = 53,3 \text{ ou } 17,26 \text{ dB}$$

### Solution

e) le rapport C/I

On sait que  $D = R\sqrt{3 \times 9} = 26 \text{ km.}$  En limite de portée

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6}(3 \times 9)^{\frac{3,5}{2}} = 53,3 \text{ ou } 17,26 \text{ dB}$$

### Solution

f) Valeur de R<sub>3</sub>

Le calcul du C/I pour les minis hexagones donne  $\frac{1}{6} \left( \frac{R\sqrt{3 \times 3}}{R_3} \right)^{3,5} = \frac{1}{6}(3 \times 9)^{\frac{3,5}{2}}$

$$\text{Donc } \left( \frac{R}{R_3} \right)^2 3 \times 3 = 3 \times 9 \text{ et } R_3 = \frac{R}{\sqrt{3}}$$

### Solution

g) Valeur de P9

On a  $P3 + P9 = 54$  d'où  $P9 = 54 - P3 = 54 - 9 = 45$  et dans chaque anneau on a  $\frac{54 - 9}{9} = 5$  porteuses tandis que dans chaque mini cellule on a  $\frac{9}{3} = 3$  porteuses.

On dresse le tableau comparatif :

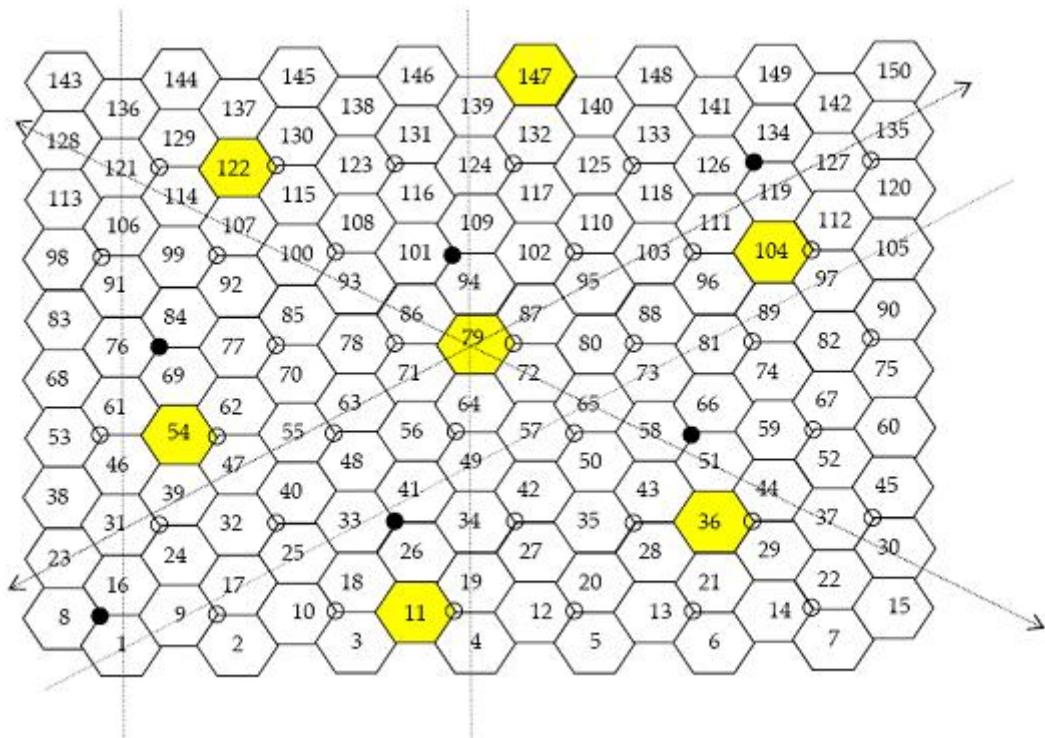
Cas	Rayon hexagone (km)	Aire ( $km^2$ )	Porteuses	Canaux	Trafic (E) pour 2% de blocage	Densité ( $E/km^2$ )
Cellules normales	5	64,85	6	$6 \times 7 = 42$	32,83	0,505
Mini hexagone	$\frac{5}{\sqrt{3}}$	21,65	3	$3 \times 7 = 21$	14	0,64
Anneau		43,3	5	$5 \times 7 = 35$	26,4	0,61
Moyenne cellule		64,95		$21 + 35 = 56$	$14 + 26,4 = 40,4$	0,62

On réutilise plus intensément certaines porteuses et la densité a augmenté sur toute la cellule (+22%). Le prix à payer est l'introduction de nouveau handovers entre les minis cellules et les anneaux.

## Problème 1: Nouvelles allocations de fréquences

### Énoncé

Les 150 cellules de forme hexagonale d'un réseau radio mobile sont numérotées ainsi qu'il apparaît sur la figure ci-dessous.



On donne les caractéristiques suivantes :

- modèle de propagation utilisé Okumura-Hata  $L=69,55+26,16\log(f[\text{en MHz}])-13,82\log(hr[\text{en m}])+36.2\log(d[\text{en km}])$
- Bande de fréquence utilisable de  $2 \times 6,3\text{MHz}$  à  $f = 1,8\text{ GHz}$
- Espacement des porteuses de 100 kHz ; 6 canaux de parole par porteuse dont 1 pour la signalisation
- Trafic par abonné de 0,08 E à l'heure chargée
- Hauteur des relais 25 rh= m
- Distance entre relais les plus proches 7 km
- Taux de perte à 2%

a. Quel est le "rayon" des hexagones?

- 
- 1,35 km
  - 2,54 km
  - 4,04 km
  - 9,02 km
- 

**b. Les cellules 11, 36, 54, 79, 104, 122 et 147 utilisent les mêmes porteuses.**

**b1) Quelles cellules sur la figure utilisent les mêmes porteuses que la cellule 1 ?**

- 41, 55 , 65, 85, 110 et 123
  - 11, 36, 54, 79, 104, 122 et 147
  - 26, 51, 69, 94, 119 et 137
  - 17, 20, 59 , 77, 143 et 150
- 

**b2-1) Quelle est la distance de réutilisation entre cellules ?**

- D=15,73 km
  - D=23,78 km
  - D=31,74 km
  - D=45,80 km
- 

**b2-2) Quelle est la taille du motif utilisé?**

- N=12
  - N=15
  - N=21
  - N=31
- 

**b3) Quel niveau de protection offre cette organisation (C/I)?**

- $(C/I)=17,36 \text{ dB}$
  - $(C/I)=22,15 \text{ dB}$
  - $(C/I)=24,78 \text{ dB}$
  - $(C/I)=39,06 \text{ dB}$
- 

**b4) Quel est le nombre maximum d'abonnés que peut servir une cellule ?**

- 93 abonnés
- 105 abonnés
- 112 abonnés

140 abonnés

**c. Les cellules sont groupées par triplets et les cellules d'un triplet partagent dynamiquement les mêmes porteuses.**

On a les triplets notés par des lettres

$$\begin{aligned} A &= (1, 8, 16) ; \quad B = (2, 9, 17) ; \quad C = (3, 10, 18) ; \quad D = (4, 11, 19) ; \quad E = (5, 12, 20) ; \\ F &= (6, 13, 21) ; \quad G = (7, 14, 22) ; \quad H = (24, 31, 39) ; \quad I = (25, 32, 40) ; \quad J = (26, 33, 41) ; \\ K &= (27, 34, 42) ; \quad L = (28, 35, 43) ; \quad M = (29, 36, 44) ; \quad N = (30, 37, 45) ; \quad O = (46, 53, 61) ; \\ P &= (47, 54, 62) ; \quad Q = (48, 55, 63) ; \quad R = (49, 56, 64) ; \quad S = (50, 57, 65) ; \quad T = (51, 58, 66) ; \\ U &= (52, 59, 67) ; \quad V = (69, 76, 84) ; \quad W = (70, 77, 85) ; \quad X = (71, 78, 86) ; \quad Y = (72, 79, 87) ; \\ Z &= (73, 80, 88) ; \quad AA = (74, 81, 89) ; \quad BB = (75, 82, 90) ; \quad DD = (91, 98, 106) ; \\ EE &= (92, 99, 107) ; \quad FF = (93, 100, 108) ; \quad GG = (94, 101, 109) ; \quad HH = (95, 102, 110) ; \\ II &= (96, 103, 111) ; \quad JJ = (97, 104, 112) ; \quad KK = (114, 121, 129) ; \quad LL = (115, 122, 130) ; \\ MM &= (116, 123, 131) ; \quad NN = (117, 124, 132) ; \quad OO = (118, 125, 133) ; \quad PP = (119, 126, 134) ; \\ QQ &= (120, 127, 135) \end{aligned}$$

Les centres de ces triplets figurent sur la figure. Les triplets A, J, T, V, GG et PP utilisent les mêmes porteuses (centres représentés en points noirs).

**c1) Quels triplets utilisent les mêmes porteuses que le triplet I ?**

- A, S, B, F et O
- A, C, D, JJ et MM
- G, S, BB, FF et OO
- G, S, R, Q et U

**c2-1) Quel est la distance de réutilisation entre triplets ?**

- D= 12,40km
- D= 21,75km
- D= 31,74km
- D= 39,22km

**c2-2) Quel est, au pire cas pour les interférences, la distance de réutilisation entre cellules ?**

- D= 08,3km

- D= 20,8km
  - D= 25,2km
  - D= 26,5km
- 

c3) Quel est la taille du motif utilisé (pour les triplets) ?

- N' = 4
  - N' = 6
  - N' = 7.
  - N' = 10
- 

c4) Quel niveau de protection offre cette organisation (C/I) (on fera des simplifications justifiées) ?

- (C/I)=15,01 dB
  - (C/I)=18,24 dB
  - (C/I)=24,78 dB
  - (C/I)=39,06 dB
- 

c5-1) Quel est le nombre maximum d'abonnés que peut servir une cellule qui utilise toutes les porteuses du triplet ?

- 256 abonnés
  - 384 abonnés
  - 456 abonnés
  - 512 abonnés
- 

c5-2) Quel est le nombre moyen d'abonnés que peut servir une cellule en en supposant les abonnés uniformément répartis entre les 3 cellules d'un triplet ?

- 85 abonnés
  - 128 abonnés
  - 152 abonnés
  - 170 abonnés
- 

d) Conclure sur le principal intérêt de l'organisation c, son origine et sur ses principales difficultés.

- Aucun intérêt
- Cette organisation permet d'accroître la zone couverture (+35%) mais elle demande plus d'E/R par cellule. Il y a aussi un risque d'interférence accrue car on a rapproché

les cellules pouvant avoir les mêmes porteuses.

Cette organisation permet d'accroître le nombre d'abonnés (+35%) mais elle demande

- la coordination entre les cellules d'un triplet et plus d'E/R par cellule. Il y a aussi un risque l'interférence accrue car on a rapproché les cellules pouvant avoir les mêmes porteuses.

- Cette organisation permet de diminuer les interférences entre les cellules mais elle demande la coordination entre les cellules d'un triplet et plus d'E/R par cellule.

---

#### e) Comparer le traitement des handovers dans les deux cas.

- Le handover est identique dans les deux cas
  - Les terminaux restant dans un triplet doivent effectuer un handover ; ceux-ci sont nombreux et il faut changer de cellule du même triplet sans changer de porteuse.
  - Les terminaux restant dans un triplet n'ont pas à effectuer de handover ; ceux-ci sont moins nombreux mais il faut quand même changer de cellule du même triplet sans changer de porteuse.
  - Les terminaux restant dans un triplet n'ont pas à effectuer de handover ; ceux-ci sont très nombreux et pas besoin de changer de cellule du même triplet en changeant de porteuse.
- 

### Solution

#### "Rayon" des hexagones

1,35 km

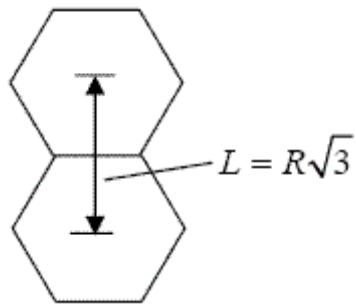
2,54 km

✓ **4,04 km**

9,02 km

### Explication

L = distance entre relais le plus proche = 7km



### Solution

#### **Cellules utilisant les mêmes porteuses que la cellule 1**

41, 55, 65, 85, 110 et 123

11, 36, 54, 79, 104, 122 et 147

✓ **26, 51, 69, 94, 119 et 137**

17, 20, 59, 77, 143 et 150

### Explication

La distance réutilisation se calcule avec les coordonnées hexagonales (6,3), soit:

$$D^2 = R^2 \left( 6^2 + 3 \times 6 + 3^2 \right) \quad D = 31,74 \text{ km} \quad \text{Comme } \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \text{ on a } N =$$

### Solution

#### **Distance de réutilisation**

D=15,73 km

D=23,78 km

✓ **D=31,74 km**

D=45,80 km

### Explication

La distance réutilisation se calcule avec les coordonnées hexagonales (6,3), soit:

$$D^2 = R^2 \left( 6^2 + 3 \times 6 + 3^2 \right) \quad D = 31,74 \text{ km} \text{ Comme } \frac{D}{R} = \sqrt{3N} \text{ on a } N$$

### Solution

#### **Taille du motif utilisé**

N=12

N=15

✓ **N=21**

N=31

### Explication

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \text{ on a } N = 21$$

### Solution

#### **Niveau de protection C/I**

(C/I)=17,36 dB

(C/I)=22,15 dB

✓ **(C/I)=24,78 dB**

(C/I)=39,06 dB

### Explication

$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6} (3N)^{\frac{3,62}{2}} = 301 \text{ soit } \left( \frac{C}{I} \right)_{dB} = 10 \log 301 = 24,78 dB$$

### Solution

#### **Nombre maximum d'abonnés**

93 abonnés

105 abonnés

✓ **112 abonnés**

140 abonnés

### Explication

Nombre de porteuses disponibles  $6300\text{kHz} / 100\text{kHz} = 63$ . Avec 63 porteuses on a  $63/21$  soit 3 porteuses par cellule soit  $3 \times 5 = 15$  canaux de parole, soit un trafic de 9E et donc  $9/0,08 = 112$  abonnés au maximum par cellule.

### Solution

#### **Triplet utilisant les mêmes porteuses que le triplet I**

A, S, B, F et O

A, C, D, JJ et MM

✓ **G, S, BB, FF et OO**

G, S, R, Q et U

### Explication

Le principe utilisé est le même que celui utilisé pour la répartition des fréquences au niveau des cellules

### Solution

#### **Distance de réutilisation entre triplets**

D= 12,40km

D= 21,75km

✓ D= **31,74km**

D= 39,22km

### Explication

La distance de réutilisation entre triplets est le même que ci-dessus soit D= 31,74km.

### Solution

#### **Distance de réutilisation entre cellules**

D= 08,3km

D= 20,8km

✓ D= **25,2km**

D= 26,5km

### Explication

La distance de réutilisation entre cellules est variable selon les cellules du triplet qui ont les mêmes porteuses. Au pire cas elle est calculée par les coordonnées hexagonales (5,2) soit:

$$D^2 = R^2 \left( 5^2 + 2 \times 5 + 2^2 \right)$$

## **Solution**

### **Taille des motifs utilisés**

$$N' = 4$$

$$N' = 6$$

✓ **N' = 7**

$$N' = 10$$

## **Explication**

Les centres des triplets sont placés comme des centres de cellule distants de  $3R$  donc de rayons:

$$R' = \frac{3R}{\sqrt{3}} \text{ donc } \frac{D}{R'} = \sqrt{3N'}$$

et en remplaçant D par la valeur trouvée en b2 on trouve  $N' = 7$ .

## **Solution**

### **Niveau de protection C/I**

$$(C/I)=15,01 \text{ dB}$$

$$(C/I)=18,24 \text{ dB}$$

✓ **(C/I)=24,78 dB**

$$(C/I)=39,06 \text{ dB}$$

### Explication

En prenant comme distance moyenne entre cellules utilisant la même porteuse la distance entre triplets utilisant les mêmes porteuses on a le même C/I que ci-dessus

### Solution

#### **Nombre maximum d'abonnés**

256 abonnés

384 abonnés

✓ **456 abonnés**

512 abonnés

### Explication

On a 63 porteuses soit 9 par triplets soit 45 canaux par triplet soit 35,6 E par triplet ou encore 456 abonnés

## Problème 2: Réseau GSM

### Enoncé

On étudie ici la voie descendante (Downlink) d'un réseau cellulaire type GSM.

#### **Caractéristiques principales du réseau :**

- Motif de réutilisation de 1 :7 (K = 7).
- Perte de propagation à une distance d (en km) de l'émetteur :  $96 + 32\log(d)$ .
- Sensibilité du terminal : -105 dBm , mais pour avoir une marge de fonctionnement on
- considérera que le niveau reçu doit être égal à -80 dBm .
- Les antennes (station de base et terminaux) sont sans gain (0 dBi).
- On ne considère aucune perte additionnelles (ex. couplage, câbles, ...)
- C/I visé +10 dB .
- La station de base applique un contrôle de puissance pour que le niveau de puissance reçu au niveau du terminal soit exactement égal à -80 dBm.
- Les BTS sont au centre des cellules.
- Le terminal est au centre de la cellule à 300 m de la station de base. Pour les calculs d'interférences on le considérera exactement au centre de la cellule.

**Rappel :** Constante de Boltzmann :  $k=1.38\times10^{-23}JK^{-1}$

Température de réception  $T= 300K$ .

Distance D entre des centres de cellules utilisant la même fréquence :  $D=R \sqrt{3K}$ , K représente le motif et R le rayon de la cellule.

TABLE D'ERLANG B

Nombre de canaux	Niveau de service (taux de blocage admissible)						Nombre de canaux
	1%	2%	3%	5%	10%	20%	
1	0.0101	0.0204	0.0309	0.0526	0.1111	0.25	1
2	0.1526	0.2235	0.2815	0.3813	0.5954	1	2
3	0.4555	0.6022	0.7151	0.8994	1.2708	1.9299	3
4	0.8694	1.0923	1.2589	1.5246	2.0454	2.9452	4
5	1.3608	1.6571	1.8752	2.2185	2.8811	4.0104	5
6	1.909	2.2759	2.5431	2.9603	3.7584	5.1086	6
7	2.5009	2.9354	3.3497	3.7378	4.6662	6.2302	7
8	3.1276	3.6271	3.9865	4.543	5.5971	7.3692	8
9	3.7825	4.3447	4.7479	5.3702	6.5464	8.5217	9
10	4.4612	5.084	5.5294	6.2157	7.5106	9.685	10
11	5.1599	5.8415	6.328	7.0764	8.4871	10.857	11
12	5.876	6.6147	7.141	7.9501	9.474	12.036	12
13	6.6072	7.4015	7.9667	8.8349	10.47	13.222	13
14	7.3517	8.2003	8.8035	9.7295	11.473	14.413	14
15	8.108	9.0096	9.65	10.633	12.484	15.608	15
16	8.875	9.8284	10.505	11.544	13.5	16.807	16
17	9.6516	10.656	11.368	12.461	14.522	18.01	17
18	10.437	11.491	12.238	13.385	15.548	19.216	18
19	11.23	12.333	13.115	14.315	16.579	20.424	19
20	12.031	13.182	13.997	15.249	17.613	21.635	20
21	12.838	14.036	14.885	16.189	18.651	22.848	21
22	13.651	14.896	15.778	17.132	19.692	24.064	22
23	14.47	15.761	16.675	18.08	20.737	25.281	23
24	15.295	16.631	17.577	19.031	21.784	26.499	24
25	16.125	17.505	18.843	19.985	22.833	27.72	25
26	16.959	18.383	19.392	20.943	23.885	28.941	26
27	17.797	19.265	20.305	21.907	24.939	30.164	27
28	18.64	20.15	21.221	22.867	25.995	31.388	28
29	19.487	21.039	22.14	23.833	27.053	32.614	29
30	20.337	21.932	23.062	24.802	28.113	33.84	30
31	21.191	22.827	23.987	25.773	29.174	35.067	31
32	22.048	23.725	24.914	26.746	30.237	36.297	32
33	22.909	24.626	25.844	27.721	31.301	37.524	33
34	23.772	25.529	26.776	28.698	32.367	38.754	34
35	24.638	26.435	27.711	29.677	33.434	39.985	35
36	25.507	27.343	28.647	30.657	34.503	41.216	36
37	26.378	28.254	29.585	31.64	35.572	42.448	37
38	27.252	29.166	30.526	32.624	36.643	43.68	38
39	28.129	30.081	31.468	33.609	37.715	44.913	39
40	29.007	30.997	32.412	34.596	38.787	46.147	40
41	29.888	31.916	33.357	35.584	39.861	47.381	41
42	30.771	32.836	34.305	36.574	40.936	48.616	42
43	31.656	33.758	35.253	37.565	42.011	49.851	43
44	32.543	34.682	36.203	38.557	43.088	51.086	44
45	33.432	35.607	37.155	39.55	44.165	53.322	45
46	34.322	36.534	38.108	40.545	45.243	53.559	46
47	36.109	38.392	40.018	42.537	47.401	56.033	47
48	36.109	38.392	40.018	42.537	47.401	56.033	48

## 1. Calculez la puissance émise par la BTS pour le mobile

- 0.392 mW
- 0.633 mW
- 0.844 mW
- 18,21 mW

b. Les cellules 11, 36, 54, 79, 104, 122 et 147 utilisent les mêmes porteuses.

2) Calculez la puissance de bruit thermique vue par le mobile dans la bande de réception GSM de 200 kHz

- 63.9 dBm
- 110.5 dBm
- 120.8 dBm
- 125.3 dBm

3) Calculez le rayon R de la cellule sachant que la BTS a une puissance limitée à 20W (on supposera que le bilan montant est équilibré).

- R=4.34 km
- R=5.80 km
- R=6.98 km
- R=10.25 km

4) Calculez, au niveau du mobile, la puissance interférente due aux cellules qui utilisent la même fréquence. On se limitera aux cellules de la première couronne des cellules interférentes. On considérera que les BTS n'émettent que sur une seule porteuse (1TRX / BTS). Enfin on considérera que toutes les BTS de la première couronne émettent à la puissance maximale (10W)

- I=55.23dBm
- I=67.74dBm
- I=96.37dBm
- I=102.86dBm

5) Calculer le rapport C/I au niveau du mobile.

- (C/I)=50.5 dB
- (C/I)=54.2 dB
- (C/I)=60.1 dB
- (C/I)=70.3 dB

6) En considérant que sur chaque porteuse on réserve un time slot pour la signalisation et que les 7 autres time slots transportent des TCH, quel est, en Erlang, avec un taux de blocage de 1%, le trafic que peut écouler une station de base qui utiliserait 3 porteuses ?

- T=10.11E

- T=10.13E
  - T=12.83E
  - T=20.24E
- 

**7) En considérant des usagers ayant un trafic de 50 mE , combien d'usagers par km<sup>2</sup> sont servis par la BTS à 3 porteuses de la questions précédente (on gardera la taille de la cellule calculée à la question 3.**

- 6 abonnés/km<sup>2</sup>
- 3abonnés/km<sup>2</sup>
- 2 abonnés/km<sup>2</sup>
- 1 abonnés/km<sup>2</sup>

### Solution

#### **Puissance émise par la BTS pour le mobile**

- 0.392 mW
- 0.633 mW
- 0.844 mW**
- 18,21 mW

### Explication

$$P_r = P_e - L = \text{Seuil} + \text{Marges}$$

$$P_e = P_r + L = -80 + 96 + 32 \log 0.3 = -0.732 \text{ dBm}$$

$$P_e [dBW] = -0.732 - 30 = -30.732 \text{ dBW P}$$

$$P_e [W] = 10^{-3.07} = 0.844 \text{ mW}$$

### Solution

**puissance de bruit thermique vue par le mobile**

-63.9 dBm

-110.5 dBm

✓ **-120.8 dBm**

-125.3 dBm

### Explication

$$P_B [dBm] = 10 \log(kTB) + 30$$

### Solution

**Rayon de la cellule**

R=4.34 km

R=5.80 km

✓ **R=6.98 km**

R=10.25 km

### Explication

$$P_{BTS} [dBm] = 10 \log(20) + 30 = 43,01 dBm$$

$$P_r = P_e - L \Rightarrow L = P_e - P_r = 43,01 + 80 = 123,01 dB$$

$$123,01 = 96 + 32 \log(R) \Rightarrow \log(R) = 0.844$$

$$R = 10^{0.844} = 6.98 km$$

### Solution

**Puissance d'interférence due aux cellules qui utilisent la même fréquence**

$$I=55.23 \text{ dBm}$$

$$I=67.74 \text{ dBm}$$

✓

$$\mathbf{I=96.37 \text{ dBm}}$$

$$I=102.86 \text{ dBm}$$

### Explication

Sur la première couronne on a 6 interféreurs.

Puissance d'un interféreur :

Interféreur situé à une distance  $D = R\sqrt{3k} = 6.98 \times \sqrt{3 \times 7} = 31.98 \text{ km}$

affaiblissement  $L = 96 + 32\log(31.98) = 144.15 \text{ dB}$

$$P_r [\text{dBm}] = P_e - L = 10\log(10) + 30 - 144.15 = -104.15 \text{ dBm}$$

Pour 6 interféreurs sur la première couronne on aura :

$$P_n [\text{dBm}] = -104.15 + 10\log(6) = -96.37 \text{ dBm} = I$$

### Solution

**Rapport C/I au niveau du mobile**

$$(C/I)=50.5 \text{ dB}$$

(C/I)=54.2 dB

✓ **(C/I)=60.1 dB**

(C/I)=70.3 dB

### Explication

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{dB} = C[dBm] - I[dBm] = 43 - 96 - 32 \log(0.3) + 96.37 = 60.1 dB$$

### Solution

#### **Traffic que peut écouler la station de base**

T=10.11E

T=10.13E

✓ **T=12.83E**

T=20.24E

### Explication

$3 \times 7 = 21$  canaux/cellule D'après la table d'Erlang cela génère un trafic de 12.83E pour un taux de blocage à 1%.

## Solution

**Nombre d'usagers au km<sup>2</sup>**

6 abonnés/km<sup>2</sup>

3abonnés/km<sup>2</sup>

✓ **2 abonnés/km<sup>2</sup>**

1 abonnés/km<sup>2</sup>

## Explication

Nombre d'abonnés au  $km^2$

Nombre d'abonnés par cellule

$$n = \frac{12.838}{50 \times 10^{-3}} = 257 \text{ abonnés/cellule}$$

Nombre d'abonnés au  $km^2$

motif circulaire       $S = \pi R^2 = \pi \times 6.98^2 = 153.05 \text{ km}^2$

$$\text{Nombre d'abonnés}/\text{km}^2/\text{cellule} = \frac{n}{S} = \frac{257}{153} = 2 \text{ abonnés}/\text{km}^2$$

Faible trafic dû à la grande couverture. Pour augmenter le nombre d'abonnés au  $km^2$  il faut réduire la puissance d'émission qui est de 20 W dans ce cas.

## Problème 3: Dimensionnement du trafic

### Enoncé

On considère la station de base d'un réseau GSM. Cette station gère l'interface air avec les mobiles de sa cellule. L'interface air utilise une technique d'accès au canal radio de type TDMA, dans laquelle la trame de base possède 16 porteuses, c'est-à-dire 16 fréquences disponibles. La durée de la trame est de 4,615ms, et chaque trame est divisée en 8 tranches de temps.

### **Exercice 48**

*On considère un réseau à transfert de paquets.*

- a) Montrer que les deux méthodes de transfert décrites ci-après sont très différentes :
  1. Lorsqu'un paquet arrive dans un nœud, il est mis en attente jusqu'à ce que tout le paquet soit mémorisé dans le nœud puis transféré vers la ligne de sortie. Cette méthode s'appelle store-and-forward.
  2. Le paquet est transféré petit à petit vers la ligne de sortie au fur et à mesure de l'arrivée des octets, avec tout de même un peu de retard pour obtenir l'adresse du récepteur avant de commencer le transfert mais sans attendre l'arrivée de la fin du paquet. Cette méthode s'appelle cut-through.
- b) Quel est l'avantage du store-and-forward ?
- c) Quel est l'avantage du cut-through ?

### **Corrigé exercice 48**

- a) Effectivement les deux méthodes de transfert sont très différentes. Dans le premier cas, le nœud attend que le paquet soit complètement reçu avant de l'émettre sur une ligne de sortie. Cette solution permet de détecter des erreurs de transmission ou une fin de paquet manquante et permet de demander des transmissions. Dans le second cas, il n'est pas possible de détecter des erreurs sur le paquet
- b) L'avantage de la technique store-and-forward est d'apporter une meilleure sécurité à la transmission.
- c) L'avantage de la technique cut-through est d'accélérer le transfert des paquets et éventuellement d'offrir un délai de transit beaucoup plus court. Cette solution n'est intéressante que si le réseau est relativement vide.

### **Exercice 49.**

*On veut comparer un réseau à commutation de circuit et un réseau à transfert de paquets.*

- a) Un paquet envoyé sur un circuit a-t-il le choix de sa destination ?
- b) Un paquet envoyé en transfert de paquets a-t-il le choix de sa destination ?
- c) Un nœud peut-il être saturé en commutation de circuits ? Et en transfert de paquets ?
- d) Pourquoi est-ce plus facile d'acheminer de la proie téléphonique sur un circuit que dans un transfert de paquets,

### **Corrigé exercice 49**

- a) Non un paquet envoyé sur un circuit n'a pas le choix de sa destination. Il doit suivre le circuit jusqu'à son extrémité.
- b) Un paquet envoyé en transfert de paquets est soit routé vers son adresse de destination, soit commuté par un chemin unique.
- c) Un nœud en commutation de circuits ne peut pas être saturé puisque le circuit, au moment de son ouverture, réserve les ressources correspondant à la capacité de transmission du circuit en revanche, un nœud de transfert en commutation de paquets peut devenir saturé par un afflux trop important de paquets.
- d) La parole téléphonique étant une application très contraignante du point de vue du délai de transit dans le réseau, il est beaucoup plus facile de la faire transiter dans un

réseau à commutation de circuits. En revanche, l'utilisation des ressources est bien moins bonne puisqu'il n'y a pas de multiplexage des ressources du réseau

### **Exercice 50.**

On considère un réseau à transfert à de paquets composé de trois nœuds en série, A B et C. Supposons que le temps de transfert d'un nœud c'est-à-dire le temps entre le moment où le paquet est complémenté activé dans le nœud et le moment où il est dans la ligne de sortie, prêt à être émis vers le nœud suivant, soit nul.

- a) Montrer que le temps de réponse du réseau est la somme des temps de propagation et des temps d'attente dans les lignes de sortie du nœud.
- b) Pourquoi le temps de transit d'un paquet est-il variable ?
- c) Le flux de paquets va du nœud A au nœud C. Si le nœud C est congestionné, que se passe t-il ?
- d) Le réseau Internet possède une technique de transfert de paquets appelée routage, qui consiste à router les paquets en relation avec une table de routage. En d'autres termes, lorsqu'un paquet arrive dans un nœud, on examine son adresse de destination et l'on détermine la ligne de sortie du nœud. Montrer que cette solution utilise des chemins fixes si la table de routage n'est pas dynamique. Montrer que le fait de rendre la table de routage dynamique complexifie les problèmes de routage.

### **Corrigé exercice 50**

- a) Le temps d'attente pour aller de l'entrée à la sortie est composé uniquement des temps de traversée des nœuds et du délai de propagation sur les lignes de communication. Ce temps d'attente est donc égal à la somme des délais de propagation entre les nœuds et des temps d'attente dans les nœuds, ces derniers se réduisant d'après l'hypothèse aux temps d'attente dans les lignes de sortie.
- b) Le temps de transit d'un paquet est variable puisque les temps d'attente dans les lignes de sortie des nœuds sont variables. Ces derniers dépendent du nombre de paquets en attente provenant de l'ensemble des flux transitant par cette ligne de sortie. Le temps de réponse d'une commutation de circuits est meilleur que le temps de transit dans un réseau à transfert de paquets. En effet, il n'y a aucune attente dans les nœuds intermédiaires puisque les ressources sont réservées.
- c) Si le nœud C est congestionné, les paquets y arrivant risquent d'être perdus puisqu'il n'y a plus de place en mémoire.
- d) Si la table de routage est fixe, à une adresse de destination correspond toujours la même ligne de sortie. On en déduit que tous les paquets d'un même flot empruntent toujours le même chemin. Si la table est dynamique, cela signifie que pour aller à une même destination plusieurs routes peuvent être utilisées. L'algorithme de choix des routes, qui n'est autre que l'algorithme de routage, est donc bien plus complexe.

### **Exercice 51.**

Le protocole utilisant les paquets IP ou les trames ATM et Ethernet sont des réponses possibles pour la mise en place de réseau multimédias.

- a) Quels sont les atouts de la technique ATM ?
- b) Quels sont les atouts de la technique IP ?

- c) Quels sont les atouts de la technique Ethernet ?
- d) Les architectures de réseau consistent souvent à encapsuler les blocs de données les uns dans les autres. Supposons que les clients d'un réseau travaillent sur des PC munis du logiciel de communication IP. Les réseaux à traverser sont, dans l'ordre, un réseau Ethernet, puis un réseau ATM, puis de nouveau un réseau Ethernet. Faire un schéma des différentes encapsulations.
- e) Montrer que cette solution a l'inconvénient de transporter beaucoup d'information de supervision redondante.
- f) Dans le transport des trames Ethernet ou ATM, indiquer quelle adresse est utilisée.
- g) Montrer que l'on peut suivre une autre technique, très différente de l'encapsulation, consistant à transformer l'en-tête en un nouvel en-tête lors du passage d'un réseau à un autre réseau. Cette solution s'appelle la translation. Faire un schéma de ce qui se passe à chaque passage d'un réseau dans un autre réseau.

### Corrigé exercice 51

- a) Les atouts de la technique ATM proviennent d'une technique permettant d'obtenir une qualité de service et pouvant supporter de très hauts débits.
- b) Les atouts de la technique IP pour transporter des applications multimédias sont plus faibles, surtout dans la première génération que nous connaissons, puisqu'une seule classe de service est disponible, la classe best effort. La deuxième génération, qui introduit des classes de service, aura des atouts beaucoup plus importants pour le transport des applications multimédias.
- c) La technique Ethernet permet de très hauts débits à bas coût. Son atout principal consiste en un surdimensionnement des réseaux pour satisfaire au passe du multimédia. La nouvelle génération Ethernet introduit des priorités, ce qui permet de superposer plusieurs classes de service et de prendre en charge des applications avec une priorité plus grande.
- d) La figure A donne le schéma des différentes encapsulations.

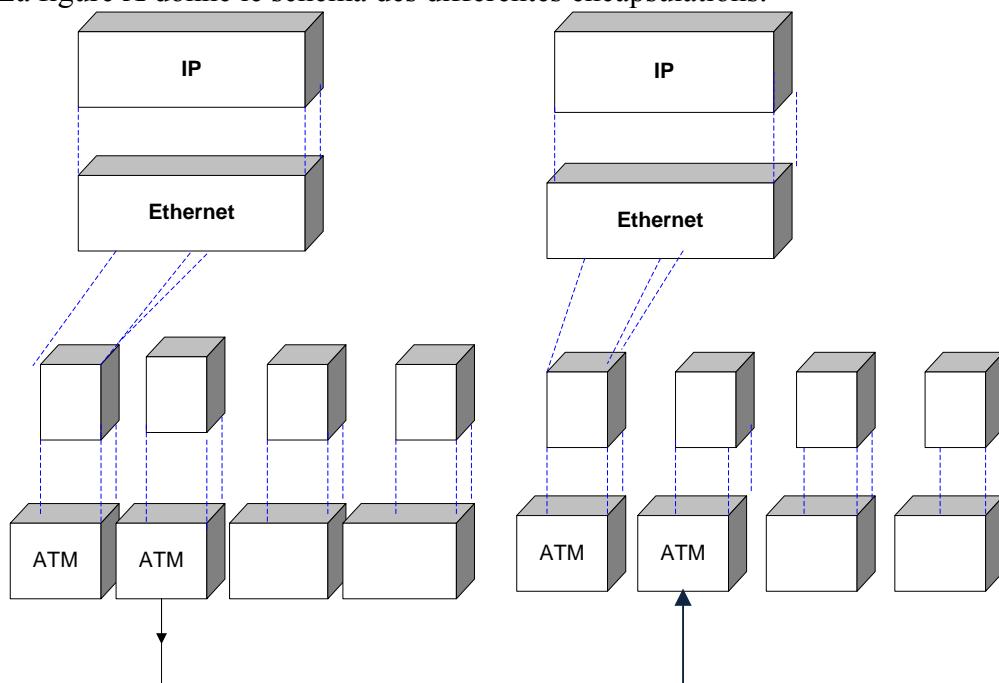


Figure A

- e) Cette solution transporte tous les champs de supervision du paquet **IP** dans la trame Ethernet puis tous les champs de la trame Ethernet dans les cellules **ATM**. De plus, comme la trame Ethernet a été découpée en plusieurs morceaux de 48 octets pour entrer dans les cellules **ATM**, il faut pour chaque morceau, ajouter 5 octets de supervision supplémentaires, qui n'apportent rien au transport de l'information utilisateur.
- f) Dans le paquet **IP**, il y a l'adresse du destinataire. Lorsqu'on encapsule le paquet **IP** dans Ethernet, il doit y avoir l'adresse du destinataire de la trame Ethernet, donc l'adresse qui va permettre d'atteindre le **PC** destinataire. Cette adresse doit être déduite de l'adresse **IP** par le **PC** émetteur. Dans les paquets **ATM**, il n'y a pas d'adresse ; il y a une référence. Ces références ont été posées par une cellule de supervision qui devait contenir l'adresse de sortie du réseau **ATM**. Donc à l'entrée du réseau **ATM**, il a fallu trouver l'adresse **ATM** qui permettait d'atteindre le réseau Ethernet de sortie.
- g) La translation consiste à trouver l'adresse du destinataire dans chaque unité de protocole transportée sur le réseau. En d'autres termes, le paquet **IP** doit transporter l'adresse **IP** du destinataire. Puis, cette adresse **IP** doit être transformée en une adresse Ethernet du destinataire qui doit être transformée en une adresse **ATM** du destinataire, et ainsi de suite. On voit que pour pratiquer une translation il faut que le destinataire ait des adresses dans les mondes **IP**, Ethernet et **ATM**, même si le destinataire n'est pas branché directement sur les réseaux concernés. Le schéma de la translation est illustré à la figure B.

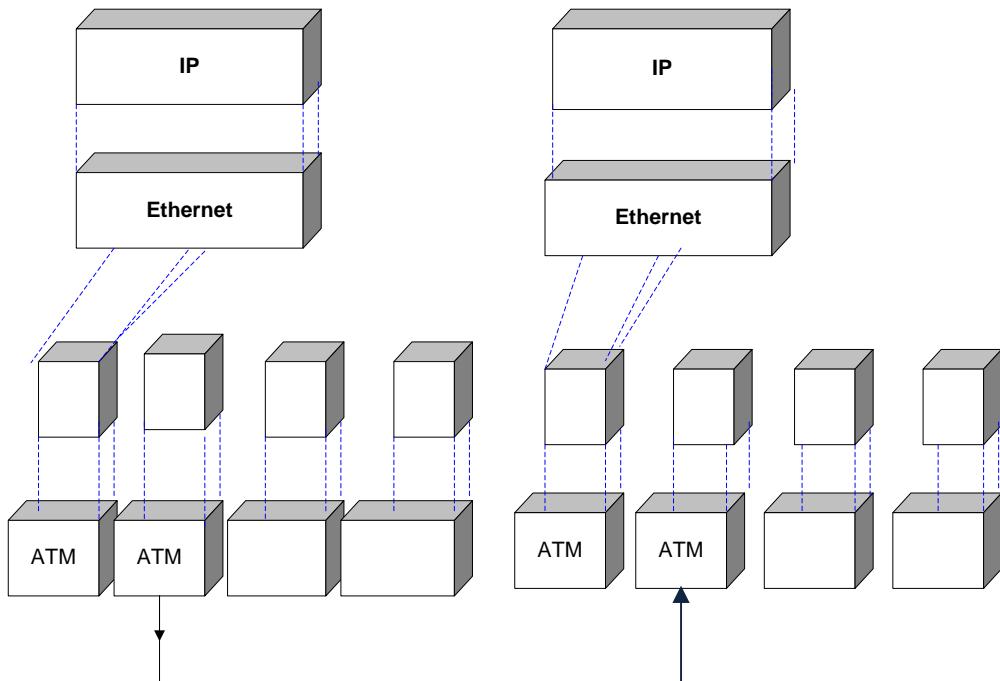


Figure B

## **Exercice 52**

*On considère une application de télévision sur Internet, c'est-à-dire la diffusion d'un canal vidéo de qualité télévision vers des utilisateurs connectés à Internet.*

- a) Les utilisateurs qui souhaitent regarder cette chaîne de télévision la reçoivent-ils automatiquement ou doivent-ils demander à l'émetteur de leur envoyer ? Montrer qu'il faut développer un protocole très spécifique pour réaliser cette application.
- b) Si l'émetteur diffuse vers 10000 utilisateurs, doit-il envoyer 10000 flots et associer à un flot l'adresse d'un destinataire ?
- c) Que se passe t-il lorsqu'un client veut changer de chaîne ?
- d) Sachant que l'on utilise une compression vidéo de type MPEG-2, générant un flot isochrone à 2Mbits/s, est-il difficile de synchroniser ce flot à la sortie du réseau Internet ?
- e) Quelle est la difficulté pour réaliser aujourd'hui une telle application ?
- f) Si l'on remplace la qualité télévision par une qualité beaucoup plus basse, permettant une compression à un débit moyen de 64Kbits/s, le problème est-il différent ?
- g) Dans le cas de la télévision hertzienne diffusée que l'on connaît aujourd'hui, utilise-t-on une technique paquet ou une technique circuit ? L'utilisateur reçoit-il autant de circuits qu'il existe de programmes de télévision ?
- h) Pourquoi n'y a t-il pas d'adresse dans la télévision hertzienne diffusée ?
- i) Chez les câblo-opérateurs, le système de distribution des canaux, de télévision vidéo ressemble-t-il à celui de la télévision hertzienne ou à celui de la télévision sur Internet ?
- j) En déduire la place de la télévision Internet dans le futur.

## **Corrigé exercice 52**

- a) Dans un réseau de télévision classique par câble ou télédiffusé, chaque récepteur reçoit l'ensemble des chaînes et choisit le programme à visualiser. Dans le réseau internet, les canaux de télévision ne sont pas diffusés. L'utilisateur doit donc effectuer une demande de transmission particulière. L'application de transmission d'un canal de télévision est spécifique : il faut que l'information arrive régulièrement pour être rejouée mais il peut y avoir un décalage important entre l'instant d'émission et l'instant où l'on rejoue la vidéo sur l'écran de télévision. En effet, il n'y a pas d'interactivité entre les deux extrémités de la communication.
- b) Sur Internet, il est possible de mettre en place des applications multipoints dans lesquelles les flots sont regroupés jusqu'à un point proche de l'utilisateur final où plusieurs copies sont effectuées et émises vers les utilisateurs.
- c) Lorsqu'un client veut changer de chaîne, il doit envoyer une demande d'interruption du premier programme puis demander la transmission vers son poste de la nouvelle chaîne. Il faut donc un système de supervision, que l'on appelle une signalisation.
- d) Si le débit des différentes liaisons par lesquelles transite le flux vidéo est d'au moins 2 Mbit /s, il est relativement facile de resynchroniser le flux puisque l'application n'est pas interactive. Il peut y avoir une latence importante entre le moment d'émission par le cœur de transmission et le moment où l'on rejoue la séquence. Un problème important provient de la capacité nécessaire pour stocker dans la mémoire du récepteur l'information en attente d'être rejouée, surtout si le temps de latences est important.

- e) La difficulté aujourd’hui pour réaliser une telle application provient du manque de débit des différents liens entre le serveur vidéo et le terminal de l’utilisateur et en particulier sur le réseau d’accès (la boucle locale).
- f) L’application est la même mais elle demande un débit beaucoup plus faible. Si le débit moyen est de 64 Kbit/s, cela indique qu’il existe un débit crête bien supérieur au débit moyen. Ce débit crête peut introduire des problèmes de capacité et de respect du temps de traversée du réseau, celui-ci devant rester acceptable par rapport au retard choisi pour rejouer la vidéo.
- g) On utilise une technique circuit : il faut compresser la vidéo de telle sorte que le débit soit constant. L’ensemble des programmes arrive sur le terminal.
- h) Il n’y a pas d’adresse de réception parce que l’ensemble des vidéos est diffusé et que chaque terminal reçoit toutes les chaînes, même lorsque le téléviseur est éteint.
- i) Chez les câblo-opérateurs, le mode de diffusion est similaire à celui des télévisions hertziennes.
- j) La place de la télévision dans l’Internet du futur sera très importante, mais elle ne concerne que des chaînes à diffusion limitée. En effet, s’il y a énormément de spectateurs, il y a intérêt à diffuser fortement et donc à utiliser les réseaux de télédiffusion. En revanche, si la chaîne n’intéresse qu’un petit nombre de personnes, il serait dommage de gâcher de la bande passante par une diffusion globale. La télévision sur Internet sera thématique et spécialisée ainsi que fortement localisée.

### **Exercice 53.**

*Un opérateur veut transformer son réseau téléphonique commuté (RTC) en un réseau Internet sans toucher à l’infrastructure physique.*

- a) Le peut-il ?
- b) Dans ce cas, les paquets IP peuvent-ils prendre des chemins différents ?
- c) Si un utilisateur demande un débit supérieur à 64Kbits/s, le réseau peut-il le lui proposer ?
- d) Si le gestionnaire du réseau remplace les commandes de circuits du RTC par des routeurs, est-ce toujours un réseau Internet ?
- e) Dans ce cas, peut-il y avoir plusieurs routes différentes pour les paquets d’un même flot ?
- f) Si l’ensemble des lignes téléphoniques à 64Kbits/s entre deux nœuds est remplacé par une seule ligne dont le débit est égal à la somme des débits des lignes à 64Kbits/s, cela peut-il apporter un trafic supplémentaire ?

### **Corrigé exercice 53**

- a) Le réseau téléphonique utilise la commutation de circuit. Il n’est donc, a priori, pas prêt à se transformer en un réseau Internet. Sur un circuit, on peut toujours envoyer un paquet IP. Il est donc possible de considérer qu’un réseau téléphonique peut donner naissance à un réseau Internet, mais l’efficacité d’un tel réseau serait particulièrement faible.
- b) Si le réseau téléphonique est transformé en un réseau Internet, tous les paquets IP d’un même flot suivent toujours le même chemin, celui du circuit téléphonique ouvert pour transporter ce flot.
- c) Les circuits téléphoniques transportant des flots dont la vitesse maximale est égale à 64 Kbit/s, ils ne peuvent dépasser cette valeur. Cependant, si l’utilisateur peut ouvrir plusieurs circuits simplement, des multiples de 64 Kbit/s peuvent être atteints. En

revanche, si l'utilisateur est relié par modem au réseau téléphonique, la vitesse maximale du circuit risque d'être celle de transmission du modem, c'est-à-dire généralement inférieure à 64 Kbit/s.

- d) Oui, c'est même un réseau qui ressemble beaucoup plus à l'Internet classique.
- e) Oui, il peut y avoir plusieurs routes puisque le rôle des routeurs est de router les paquets IP par la meilleure route possible.
- f) Oui, puisqu'il pourra y avoir un meilleur multiplexage des paquets sur un regroupement de liaisons à 64 Kbit/s

### Exercice 54.

On appelle *bande passante* d'un rapport de transmission la plage des fréquences qui peuvent être utilisées sur un câble ou par toute autre voie de communication. Par exemple, la paroi utilise les fréquences de 300 à 3400Hz, et sa bande passante est de 3100Hz. Les autres fréquences présentent trop d'affaiblissement et ne peuvent être utilisées. L'affaiblissement, exprimé en décibel (dB), est obtenu par la formule **10LogR** est le rapport des puissances aux deux extrémités de la communication.

- a) Donner l'affaiblissement en décibel lorsque le signal, à la sortie de la voie de communication, n'est plus que de 50p. 100 et 1p. 100 de sa puissance initiale.
- b) On définit en général la bande passante comme la plage des fréquences qui ne perdent pas plus de 3dB sur la voie de communication. Quelle est la bande passante H d'un câble qui accepte des fréquences de 4000Hz à 24000Hz avec un affaiblissement inférieur à 3Db ?
- c) Avec un câble de 20000Hz de bande passante, il est à, priori possible de faire passer 20000 bits en transportant 1bit par signal. Les lignes de communication sont cependant perturbées par ce que l'on appelle du bruit, provenant de phénomènes électromagnétiques divers. Le rapport R d'affaiblissement qui en résulte s'exprime sous la forme  $R = \frac{S}{B}$ , S correspondant à l'énergie du signal et B à l'énergie du bruit. Le rapport  $\frac{S}{B}$  s'appelle rapport signal sur bruit. On calcule la capacité (C) de transmission maximale d'un canal par la formule de Shannon :  $C = \log_2(1 + \frac{S}{B})$ , où H est la bande passante.

En supposant que le rapport signal sur bruit du câble précédent soit de 30dB, quelle est la capacité de transmission maximale ?

- d) Pour augmenter simplement le débit d'une voie de communication, il faut transporter plus d'un élément binaire par signal de base. Pour cela, il suffit de prendre 2, 4, 8, n configurations différentes sur un même temps de base. Par exemple, l'émission sur un temps de base d'une différence de potentiel de +4V (volts) indique la combinaison 00, de +2V la combinaison 10, de -2V la combinaison 01 et de -4V la combinaison 11. Combien de combinaisons différentes sont-elles nécessaires pour atteindre la capacité maximale obtenue à la question précédente ?

### Corrigé exercice 54

- a) Si le rapport des puissances aux deux extrémités est de 50p.100, l'affaiblissement est de :

$$10\log_{10}2=3\text{db}$$

Les deux autres cas donnent :

$$10\log_{10}10=10\text{db} \text{ et } 10\log_{10}100=20\text{db}.$$

- b) Comme entre 4.000 et 24.000hz l'affaiblissement est inférieur à 3db, la bande passante du support physique est de 20.000hz.
- c) On obtient par la formule de Shannon :  $C=20.000 \log_2 x (1+30)=100.000\text{bit/s}.$
- d) Pour obtenir la capacité maximale C, il faut transporter  $C/20.000$ , soit 5 combinaisons.

**Exercice 55.** Soit un réseau en bus bidirectionnel sur lequel sont connectées les différentes machines terminales. Dans un réseau en bus bidirectionnel, le signal est en diffusion.

- a) Monter que chaque coupleur peut capter une copie de tous les paquets émis par les machines terminales.
- b) Comment la machine terminale reconnaît-elle que le paquet lui est destiné ?
- c) Comment éviter que deux machines terminales émettent des paquets au même moment, ce entraînerait une collision sur le support physique ?
- d) Si la vitesse de propagation est d'approximativement 200000 Km /s, (un peu moins que la vitesse de la lumière), en combien de temps un bit émis par une machine arrive-t-il à une seconde machine située à 200 mètres ?
- e) En déduire que si l'on écoute le support physique avant de transmettre, la probabilité de collision est quasiment nulle.

### **Corrigé exercice 55**

- a) Le signal étant émis en diffusion, cela signifie qu'il se propage sur l'ensemble du bus et que chaque coupleur connecté sur le bus peut écouter les signaux qui passent.
- b) La machine terminale reconnaît que le paquet lui est destiné en comparant l'adresse de sa carte coupleur avec l'adresse du destinataire portée dans le paquet. S'il y a identité, la trame est recopiée dans la mémoire centrale de la machine terminale.
- c) Si deux machines terminales émettent au même moment, il y a collision. Si l'on calcule le temps mis par le signal pour se propager sur le support physique, on obtient quelques dizaines de microsecondes au maximum. Plus précisément, pour une distance de 2.000mètres entre deux coupleurs, il faudrait un temps de 10us à la vitesse classique de 200.000km/s sur un support électrique. Il suffit donc que les coupleurs écoutent le câble avant de transmettre ; si le câble est vide, la probabilité de collision est extrêmement faible puisqu'il faudrait que deux coupleurs situés à 2km émettent dans les mêmes 10μs.
- d) 1μs.
- e) il faudrait que deux stations situées à 200mètres émettent dans la même microseconde pour qu'il puisse y avoir collision. Cette probabilité est quasiment nulle.

**Exercice 56.** On considère un réseau en bus bidirectionnel de 1Km de long dont le débit est de 10Mbit /s

- a) En supposant que la vitesse de propagation soit de 200000 Km/s, quel est le temps de propagation d'une extrémité à l'autre du réseau.

- b) Quel est le temps qui sépare la transmission de deux éléments binaires sur le support physique ?
- c) En déduire le nombre d'éléments binaires en cours de propagation sur le support physique.
- d) Peut-il y avoir deux communications qui transitent en même temps ?
- e) Si l'on couple le support physique en deux, au milieu, et que l'on interconnecte les deux réseaux, qui en résultent par un récepteur, quel est débit de l'ensemble des deux réseaux ?
- f) Si l'on remplace le récepteur par un point, quel est le débit de l'ensemble des deux réseaux ?
- g) Si l'on suppose que tous les paquets émis partant d'un réseau se dirigent vers l'autre réseau, y a-t-il un intérêt à remplacer le récepteur par un pont ?
- h) En supposant que tous les paquets émis partant d'un réseau aient comme destinataire le même réseau, y a-t-il un intérêt à remplacer le récepteur par un pont ?
- i) Si l'on découpe de nouveau chaque réseau en deux et que l'on interconnecte les nouveaux réseaux deux à deux par un équipement intermédiaire, discuter de l'opportunité de mettre un récepteur ou un pont.
- j) Conclure sur l'intérêt d'utiliser des récepteurs ou des ponts.

### Corrigé exercice 56

- a)  $5\mu s$ .
- b) La vitesse de transmission étant de  $10Mbit/s$ , deux bits sont séparés de  $0,1 \mu s$ .
- c) Il y a donc 50bits en cours de propagation sur le support physique ( $5\mu s / 0,1 \mu s$ ).
- d) Non, puisque la taille d'une trame Ethernet est d'eau moins 64 octets et qu'il n'y a jamais plus de 6 octets et 2bits (50bits) sur le support physique.
- e) Le débit total est le même puisque le répéteur ne fait que répéter les éléments binaires sans les arrêter.
- f) Le débit des deux réseaux devient :  $2 \times 10Mbit/s = 20Mbit/s$ .
- g) Non, il n'y a pas aucun intérêt à remplacer le répéteur par un pont, en effet, un paquet utilise  $10Mbit/s$  sur chacun des deux réseaux.
- h) Non, il n'y a pas beaucoup d'intérêt à remplacer le répéteur par un pont puisque le débit réel total pourrait atteindre  $20Mbit/s$ .
- i) Si l'on met un répéteur, cela ne change rien au réseau précédent en ce qui concerne la capacité globale du réseau. En revanche, si l'on installe des ponts, cela démultiplie la capacité totale, qui devient égale à  $4 \times 10Mbit/s = 40Mbit/s$ . Pour que cette capacité soit utilisée au maximum, il faudrait que chaque communication reste locale.
- j) Il y a généralement tout intérêt à remplacer des répéteurs par des ponts, sauf si les paquets transitent par l'ensemble des sous-réseaux.

### Exercice 57. On considère un réseau en arbre dans lequel les hubs recopient les paquets dans toutes les directions à l'exception de leur ligne d'arrivée.

- a) Monter que le comportement de ce réseau est le même que celui d'un réseau en bus bidirectionnel.
- b) Monter que le temps pour aller d'une extrémité du réseau à l'autre est beaucoup plus important que sur un bus bidirectionnel (on suppose que la distance entre les deux extrémités du réseau est la même).

- c) Que se passe t-il si un hub tombe en panne ? A-t-on le même problème avec un bus ?
- d) On suppose maintenant que le hub ne transmet que vers l'unique sortie permettant d'atteindre le récepteur. Pourquoi cette solution est-elle nettement plus complexe que la précédente ?
- e) Montrer que l'on pourrait avoir des communications en parallèle.

### Corrigé exercice 57

- a) Dans ce réseau, chaque machine finit par recevoir une copie des paquets qui sont émis. Il y a donc diffusion, comme dans le cas d'un bus bidirectionnel.
- b) Le temps de traversée des hubs est à ajouter au délai de propagation. Ces temps de traversée ne sont pas du tout négligeables en regard des délais de propagation et peuvent même devenir assez importants.
- c) Si un hub tombe en panne, le réseau est coupé en deux, et il n'y a plus de communication entre les deux parties du réseau. Cela vient du fait que le hub est une structure active qui possède des registres à décalage pour réémettre les signaux sur les différentes sorties du hub. Ce problème ne peut arriver dans les réseaux en bus puisque ce sont des structures passives.
- d) Cette solution est plus complexe puisqu'il n'y a plus diffusion du paquet mais routage pour aller vers un point de sortie précis. Il faut donc ajouter une table de routage, laquelle, même fixe, ajoute de la complexité au hub.
- e) On peut avoir des communications en parallèle si les hubs sont capables d'acheminer des flux de paquets passant par le même nœud mais pas par les mêmes entrées ni les mêmes sorties.

### Exercice 58. Soit un réseau en boucle sur lequel sont connectés des PC.

- a) Pourquoi la boucle est-elle une structure active ?
- b) Montrer que pour attacher une nouvelle station, il faut couper la boucle et ajouter un registre à décalage.
- c) En combien de temps un bit peut-il faire le tour de la boucle ?
- d) On utilise une technique de jeton pour effectuer la transmission. Seule la station qui possède le jeton a le droit de transmettre un paquet. Dans un premier temps, on suppose qu'une station recevant le jeton émet un paquet et attend que le paquet lui revienne avant de passer le jeton à la station suivante. Combien de temps s'écoule entre le moment où une station reçoit le jeton et celui où le jeton lui revient de nouveau après un tour de la boucle ?
- e) Montrer que cette solution de boucle gérée par un jeton peut transporter des paquets de façon synchrone.
- f) On suppose maintenant que lorsque la station reçoit le jeton, elle émet le paquet puis émet directement après le jeton vers la station suivante. Augmente t-on ainsi le débit du réseau ? De combien ?

### Corrigé exercice 58

- a) la boucle est une structure active puisqu'il faut être capable de reconnaître les signaux pour savoir si la machine terminal doit prendre une copie du paquet ou non. De même, pour accéder à une boucle, on utilise généralement un jeton. Un jeton est une

structure parfaitement déterminée, qu'il faut reconnaître sur le support et donc arrêter dans un registre pour être à même de la reconnaître et éventuellement de la modifier.

- b) Pour ajouter une nouvelle station, il faut couper la boucle pour ajouter un registre à décalage actif permettant de lire ce qui passe sur la boucle.
- c) Un débit effectue un tour de boucle dans un temps incluant les délais de propagation et les temps de latence dus à la traversée des registres à décalage qui se trouvent dans les coupleurs.
- d) Il s'écoule un temps égal à  $n$  fois le tour de boucle s'il y a  $n$  stations terminales actives.
- e) pour transporter des paquets de façon synchrone, il faut que le jeton revienne à la station qui émet le flux synchrone avant l'instant de synchronisation. Comme la question précédente montre qu'il y a une valeur maximale avant que le jeton revienne à la station émettrice, il suffit que les intervalles entre les temps de synchronisation soient plus grands que les  $n$  délais de rotation, si  $n$  est le nombre de stations actives.
- f) Oui. On augmente le débit du réseau puisque, au lieu d'attendre le tour de boucle du jeton puis de passer le jeton à la station suivante. L'augmentation du débit correspond au temps supplémentaire pendant lequel les stations du réseau peuvent transmettre. Ce temps supplémentaire est égal à  $n$  fois le temps pour effectuer le tour de boucle, si  $n$  est toujours le nombre de stations actives. L'augmentation du débit est égale au temps précédent divisé par le temps total de retour du jeton à une station donnée. Cette augmentation est d'autant plus importante que la vitesse du réseau est élevée. En effet, le temps de propagation du jeton sur la boucle est indépendant de la vitesse du réseau alors que le temps de retour du jeton en est au contraire fortement dépendant. Si le réseau a une vitesse multipliée par quatre, le gain de débit est quatre fois plus important. Dans le Token-Ring d'IBM à 4Mbit/s, on attendait le tour du jeton avant de le transmettre à la station suivante. Si l'on avait adopté la solution proposée dans cette question, on aurait gagné approximativement 2p.100 en débit. Un changement de la technique d'accès a évidemment été effectué pour les versions à 16Mbit/s puis à 100Mbit/s avec des gains de débit respectifs d'environ 8p.100 et 50p.100.

**Exercice 59.** *On souhaite étudier les problèmes qui pourraient survenir sur un réseau en boucle avec une technique de jeton pour réguler les accès.*

- a) Que se passe-t-il si une station tombe en panne ?
- b) Proposer un mécanisme pour éviter cette panne.
- c) Que se passe-t-il si l'un des bits qui représente le jeton est erroné à la réception ?
- d) Proposer un mécanisme pour éviter cette panne.
- e) Que se passe-t-il si une coupure de la boucle se produit ?
- f) Proposer un mécanisme pour éviter cette panne.

### **Corrigé exercice 59**

- a) Si une station tombe en panne le réseau est arrêté. En effet comme le coupleur est actif, s'il n'est plus alimenté électriquement, il ne peut plus faire passer les signaux.
- b) Pour éviter cette panne, il est possible de poser un by-pass permettant au signal de transiter sans être stoppé par la carte. En cas de panne ou de coupure électrique le by-pass se met automatiquement en place.
- c) Si l'un des bits qui représente le jeton est erroné à la réception, le jeton est perdu. Dès lors, aucune station ne dispose d'un jeton, ce qui entraîne l'arrêt du réseau.

- d) Le mécanisme le plus courant pour éviter cette panne consiste à avoir une station de contrôle sur la boucle qui met un bit particulier, dit bit de nettoyage, à la valeur 1. La valeur de ce bit est remise à 0 par la station qui capte le jeton. Si personne n'a capté le jeton pendant un tour de boucle, le bit de nettoyage revient à 1 dans la station de supervision, ce qui implique que personne n'a capté le jeton pendant un tour de boucle et donc que la station de supervision peut remettre un nouveau jeton correct sur la boucle.
- e) Si une coupure de la boucle se produit le réseau est arrêté et ne peut plus fonctionner sans un mécanisme spécifique.
- f) Le seul moyen pour desservir l'ensemble des stations est la continuité de la boucle. Si la boucle est coupée, il faut avoir la possibilité de reconfigurer le réseau pour que l'ensemble des stations soit toujours connecté. Pour cela on utilise une double boucle contrarotative, c'est-à-dire deux supports physiques en boucle mais un point sur les deux boucles, les paquets repartent sur l'autre boucle aux stations encadrant la coupure de sorte à reformer une nouvelle boucle unique, comme illustré à la figure 3.22.

**Exercice 60.** Soit un réseau en bus bidirectionnel avec une technique de jeton pour gérer les accès. Seule la station possédant le jeton a le droit d'émettre. Chaque station possède une table qui lui indique la station suivante devant recevoir le jeton et la station dont elle doit recevoir le jeton.

- a) Montrer que cette solution permet aux stations d'avoir régulièrement le jeton suivant une boucle logique.
- b) Montrer que des applications synchrones peuvent emprunter ce réseau.
- c) Que se passe-t-il si une station se déconnecte ou bien tombe en panne ? Montrer que la boucle logique peut être rétablie.
- d) Que se passe-t-il si deux stations successives se déconnectent ou tombent en panne ? Inventer une solution pour pallier ce problème.

### Corrigé exercice 60

- a) Le fait de savoir à qui l'on passe le jeton et de qui on reçoit permet de déterminer une boucle logique.
- b) Comme dans une boucle réelle, le temps maximal pour que le jeton revienne à la station initiale est donné. Si l'intervalle de synchronisation est plus grand que l'intervalle maximal entre deux retours du jeton à la station, le système permet de transporter des applications synchrones.
- c) Si une station se déconnecte ou tombe en panne il suffit d'ajouter un algorithme pour permettre à la station qui possède le jeton après une ou plusieurs tentatives de passage de demander à la station déterminée par « la station suivante de la station en panne de bien vouloir capter le jeton. »
- d) Si deux stations terminales tombent en panne le système global s'arrête de fonctionner. Pour arriver à pallier ce problème, il faut mettre en place un algorithme permettant de redéfinir la boucle logique. Par exemple chaque coupleur réémet un jeton après un temporisateur. Si tous les temporiseurs sont distincts, une station émet le jeton en premier et envoie un message de constitution de l'anneau logique.

### **Exercice 61.**

*On veut comparer différentes techniques de transfert.*

- a) Pourquoi a-t-on besoin d'une signalisation dans les réseaux utilisant la communication ?
- b) Pourquoi une connexion multipoint c'est-à-dire partant d'un point et allant vers plusieurs points dans une technique de transfert à commutation, comment peut-on utiliser la signalisation ?
- c) Montrer que dans une architecture avec connexion, il est relativement simple de contrôler les flots qui circulent dans le réseau.
- d) Si l'application utilisé dans ce réseau est de type navigation, c'est-à-dire de recherche d'information sur de nombreux serveurs connectés sur le réseau, la solution commutée est-elle une bonne solution ?
- e) Montrer que la solution routée ne requiert pas de signalisation mais qu'une signalisation peut cependant être intéressante.
- f) Est-il envisageable qu'un réseau ait à la fois des paquets routés et des paquets commutés ?
- g) On suppose un réseau utilisant le protocole IP au niveau des PC. Le réseau de transport est-il routé ou commuté ?
- h) Si l'on utilise le premier paquet du flot pour mettre en place une route déterminée, que l'on peut éventuellement appeler un circuit virtuel, même s'il n'existe pas forcément de connexion, cela est-il équivalent à une signalisation ?

### **Corrigé exercice 61**

- a) Dans la commutation, il faut mettre en place des tables de commandes, qui indiquent les ports de sortie et la référence de sortie par rapport à un port et à une référence d'entrée. Il faut donc une signalisation pour mettre en place de nouvelles entrées dans les tables de référence des noeuds dans lesquels transite le circuit virtuel.
- b) A priori il faut ouvrir autant de circuits virtuels qu'il y a de points à atteindre. Cependant la signalisation étant transportée par des paquets de contrôle contenant les adresses complètes des destinataires, il est possible d'effectuer une ouverture de liaison multipoint. On utilise en ce cas des adresses multipoint du réseau, et les acheminements des paquets de signalisation ne sont pas dupliqués. En d'autres termes, un seul paquet de signalisation ouvre des circuits virtuels. Dans le noeud de séparation, une ligne de la table de commutation fait correspondre une référence d'entrée et un port d'entrée à plusieurs références sur plusieurs ports de sortie distincts.
- c) La solution commutée n'est pas une bonne solution pour la navigation. En effet, pour aller chercher une information, il faudrait ouvrir un circuit virtuel puis le fermer après. Une technique routée est bien meilleure dans ce cas.
- d) Dans un réseau à commutation ; tous les paquets d'un même flot circulent sur un même chemin. Il est donc possible de contrôler ce flot par différents moyens puisque l'on

connaît les nœuds qui sont traversés. En particulier, il est possible de faire de la réservation de ressources.

- e) Dans une technique routée, chaque paquet est muni de l'adresse complète du récepteur. Les paquets peuvent donc trouver leur route par eux-mêmes, et il n'est pas nécessaire d'ouvrir une route pour émettre le flot. L'inconvénient du routage réside dans l'impossibilité de réserver des ressources sur une route et de signaler aux nœuds traversés le passage d'un flot. La mise en place d'une route par une signalisation peut cependant être intéressante pour réserver des ressources et obtenir une qualité de service. Par exemple la route peut être déterminée par le routage du premier paquet d'un flot, ce qui permet de réserver des ressources et d'obtenir une qualité de service pour la suite du flot.
- f) Oui, il est parfaitement envisageable d'avoir un réseau qui possède des nœuds capables de router ou de commuter. Ces nœuds s'appellent des LSR ('Label Switched Router). Les trames qui arrivent de la liaison physique essaient d'être commutées en premier. Si la commutation est impossible, les trames sont décapsulées, et le paquet récupéré est routé.
- g) Le réseau peut transporter les paquets IP de deux façons. Soit les paquets sont encapsulés dans une trame, elle-même commuté. Soit les paquets sont décapsulés dans chaque nœud dans ce cas le réseau de transport, est de type routé. Un réseau de transport de paquets IP peut donc être soit routé soit commuté.
- h) Oui, l'ouverture d'une route par le premier paquet d'un flot correspond exactement à une signalisation.

### **Exercice 62.**

*On souhaite comparer les avantages des routeurs et des commutateurs.*

- a) Montrer que les tables de routage peuvent devenir très grandes.
- b) Montrer que les tables de commutation sont généralement plus mesurées.
- c) Montrer que les réseaux avec routage sont plus souples en cas de panne ou de surcharge d'un nœud.
- d) Montrer qu'il est plus facile de réserver des ressources à l'intérieur du réseau avec une technique commutée qu'avec une technique routée. Qu'en déduisez-vous pour la qualité de service.

### **Corrigé exercice 62**

- a) Dans une table de routage il y a autant de lignes que de destinations à atteindre. Pour un réseau qui possède beaucoup de destinations, la table de routage peut devenir très grande. Il est possible de diminuer la taille de la table de routage par agrégation des destinations. Par exemple, en agrégeant sur une même ligne de la table de routage, toutes les destinations qui sont situées sur un même sous-réseau. Les adresses IPv4 permettant de faire une telle agrégation grâce à leur structuration hiérarchique à deux niveaux (adresse du sous-réseau et adresse de la station terminale). Cependant, certains sous-réseaux comportent plusieurs centaines de milliers d'adresses terminales, qui ne peuvent donc être agrégées et qui donnent naissance à des tables de routage énormes. Dans un réseau IPv6 la hiérarchisation de l'adresse sur huit niveaux permet de faire descendre la taille de la table de routage à des valeurs acceptables.

- b) Les tables de commutation ne prennent en compte que les communications actives. Leur nombre est donc plus limité.
- c) Les réseaux avec routage sont plus souples que les réseaux avec commutation. Les paquets contenant l'adresse complète des destinataires, leur destination est toujours connue, même en cas de changement de route.
- d) Dans un réseau commuté tous les paquets d'un même flot suivant le même chemin ? Il est donc possible d'effectuer des réservations de ressources; Il est donc plus facile d'obtenir une qualité de service dans un réseau commuté que dans un réseau routé.

### **Exercice 63.**

*On souhaite déterminer les caractéristiques d'un réseau de signalisation.*

- a) Montrer qu'un réseau de signalisation est un réseau de routage.
- b) Montrer qu'un réseau de signalisation doit posséder des adresses d'équipements terminaux les plus communes possibles.
- c) Montrer qu'un réseau IP satisfait parfaitement les deux contraintes précédentes.
- d) Qu'en déduisez-vous ?

### **Corrigé exercice 63**

- a) Un réseau de signalisation a pour tâche première d'ouvrir un chemin dans un réseau pour y faire transiter les paquets. Pour ouvrir un chemin ou circuit virtuel, il faut un paquet de signalisation qui possède l'adresse complète du destinataire. Cela implique qu'un réseau de signalisation est un réseau de routage.
- b) Les paquets de signalisation contiennent l'adresse complète du destinataire. Les utilisateurs récepteurs doivent communiquer leur adresse aux émetteurs. Plus l'adresse est largement utilisée et simple à retenir et plus le réseau de signalisation est facile à utiliser. Par exemple le réseau ATM possède un réseau de signalisation puisque ATM est une technique commutée. C'est un réseau qui ne peut pas être utilisé par le grand public car les adresses ATM complètes ne sont de plus en plus connues puisqu'elles sont même imprimées aujourd'hui sur cartes de visite.
- c) Un réseau IP est un réseau de routage. Comme les adresses IP sont fortement utilisées et assez simples à retenir, le réseau IP satisfait aux critères des deux premières questions.
- d) Les réseaux de signalisation de l'avenir seront des réseaux de routage IP

### **Exercice 64.**

*On considère un réseau à commutation de paquets.*

- a) Montrer que les commutateurs doivent être également des routeurs.
- b) Quelle est la taille de la table de commutation ?
- c) Montrer que la rupture d'une liaison entraîne des problèmes complexes pour le réseau à commutation de paquets.
- d) Est-il possible d'ouvrir plusieurs chemins (circuits, virtuels) entre un nœud d'entrée et un nœud de sortie.

- e) Peut-on donner des qualités de service différentes aux chemins ouverts ?
- f) Pourquoi utilise-t-on des références qui changent au passage de chaque nœud ?
- g) Est-il possible d'utiliser une même référence plusieurs fois dans un même nœud ?
- h) Donner un exemple où il serait possible de conserver la même référence tout le long du chemin.

### **Corrigé exercice 64**

- a) Dans un réseau de commutation, il faut une signalisation pour ouvrir les chemins. Les chemins, les réseaux de signalisation doivent donc posséder un réseau de routage pour la signalisation. Les nœuds du réseau doivent être capables à la fois de router la signalisation et de commuter les données. Il est possible que le réseau de signalisation soit différent du réseau de transport de données par exemple dans les réseaux optiques ; dans ce cas les nœuds ne sont que des commutateurs, mais ceci est un cas particulier. On dit, dans ce dernier cas, que le réseau de signalisation est non bande. Les réseaux de signalisation les plus classiques sont dans la bande.
- b) La taille de la table de commutation est égale au nombre de circuits virtuels ou chemins passant par un nœud.
- c) La rupture d'une liaison entraîne la rupture de tous les circuits virtuels qui passent par la liaison il faut donc demander au système de signalisation d'ouvrir de nouveaux circuits virtuels.
- d) Oui, bien sûr. Rien n'empêche d'ouvrir plusieurs chemins entre un nœud d'entrée et un nœud de sortie.
- e) Oui, il est possible d'ouvrir des chemins avec des qualités de service différentes.
- f) Si les références étaient les mêmes tout le long du chemin il y aurait des difficultés à ouvrir les chemins sans que ceux-ci se croisent. Il faudrait au début de l'ouverture que le choix de la référence soit unique, ce qui est très difficile à assurer sur un grand réseau.
- g) Oui, il est possible d'utiliser plusieurs fois la même référence dans un nœud mais sur des lignes de sortie différentes.
- h) Il serait possible de garder la même référence tout le long du chemin à condition de s'assurer que cette référence soit unique et qu'elle ne puisse être utilisée par personne d'autre. Cela se réalise dans les réseaux Ethernet commutés, qui utilisent l'adresse MAC du destinataire comme référence. Cette référence est unique puisque toutes les cartes coupleur ont une adresse MAC différente.

### **Exercice 65.**

*On considère un réseau dans lequel les nœuds peuvent se comporter soit comme des commutateurs, soit comme des routeurs. On appelle ces nœuds des LSR (Label Switched Router).*

- a) Montrer que de tels nœuds sont indispensables à partir du moment où il existe une partie communication dans le nœud.
- b) Supposons que la partie soit de type IP. Montrer que le réseau IP peut se comporter comme un réseau de signalisation ou comme un réseau à transfert de paquets de données.
- c) Montrer que les nœuds du réseau possèdent à la fois une table de routage et une table de communication.

- d) La solution envisagée dans ce réseau est d'ouvrir des chemins avec un paquet IP spécifique marquant son passage en faisant des références qui forment des chemins. Montrer que cette solution est séduisante pour un opérateur de télécommunication.
- e) Montrer que les paquets IP de données des utilisateurs sont encapsulés dans des trames qui sont commutées.

### **Corrigé exercice 65**

- a) Si le nœud est un commutateur. Il faut que des paquets de signalisation y soient routés et que le nœud se comporte comme un routeur.
- b) Si la partie routage est de type IP, cela indique que le réseau de signalisation est de type IP. De plus les paquets de données peuvent être routés par l'environnement IP.
- c) Puisque le nœud est à la fois un routeur et un commutateur, il doit y avoir à la fois une table de routage et une table de commutation.
- d) L'ouverture des chemins s'effectue grâce à l'environnement IP et donc prend en compte les adresses IP comme adresses de récepteurs. Une fois le chemin ouvert, les trames encapsulant les paquets IP sont commutées et l'on peut utiliser au niveau trame des réseaux de commutation classiques, comme ATM, qui forment l'ossature des réseaux des opérateurs de télécommunications. Cette solution est séduisante pour ces derniers puisque la technique de base reste la commutation, secondée par de la signalisation IP et le transport de paquets IP.
- e) Pour la traversée des sous-réseaux entre les LSR, il faut encapsuler les paquets IP dans des trames. Ces trames sont commutées dans les LSR.

### **Exercice 66.**

*On considère un réseau TCP/IP constitué de sous réseaux ATM interconnectés entre eux par des routeurs.*

- a) Les paquets d'un même utilisateur arrivent-ils toujours dans l'ordre ?
- b) Comment déterminer le chemin utilisateur qui sera suivi par un paquet d'un routeur vers un ordinateur vers un autre routeur ?
- c) Faut-il encapsuler les paquets IP dans des trames ATM ?
- d) Si, dans un routeur la table de routage est fixé, est-il intéressant de décapsuler les cellules ATM pour récupérer le paquet IP ?
- e) Si une cellule ATM est perdue dans un sous réseau que se passe-t-il ?

### **Corrigé exercice 66**

- a) Non, les paquets d'un utilisateur n'arrivent pas toujours dans l'ordre puisqu'ils peuvent être routés sur des routes différentes au niveau des routeurs reliant les sous-réseaux.
- b) Le chemin entre deux routeurs est déterminé par le système de signalisation des sous-réseaux ATM. Cela veut dire que dans chaque routeur de départ, il faut déterminer l'adresse ATM du routeur de sortie du sous-réseau. Ensuite un circuit virtuel ATM est ouvert vers l'adresse ATM de destination. L'ouverture du chemin dans le sous-réseau

ATM s'effectue grâce au système de signalisation ATM de destination, transportée dans la trame de signalisation.

- c) Oui, il faut nécessairement encapsuler les paquets IP dans des trames ATM pour traverser les sous-réseaux ATM, que ce soit le paquet IP de signalisation globale ou les données à transporter.
- d) Si la table de routage est fixe, il n'y a aucun intérêt à remonter jusqu'au niveau IP puisque le chemin est déjà tracé. Il vaut mieux commuter directement la trame ATM au niveau ATM.
- e) Si une cellule ATM est perdue dans un sous-réseau, cela indique qu'il y a eu une erreur de transmission, par exemple sur le champ de référence. Dans ce cas il faut détruire la cellule car il n'y a plus de repère permettant de connaître la destination de la cellule.

### **Exercice 67.**

*On souhaite étudier les caractéristiques d'un réseau Ethernet commuté.*

- a) Y a-t-il des chemins dans un réseau Ethernet commuté ?
- b) Où se trouvent les références ?
- c) Les références varient-elles le long du chemin ?
- d) Supposons qu'à l'intérieur des trames Ethernet il y ait des paquets IP. Est-il intéressant de remonter au niveau IP dans certains nœuds ? Ces nœuds sont-ils toujours des commutateurs ?
- e) Si l'on introduit dans la trame Ethernet une nouvelle zone pour y placer une référence, peut-on maintenir la même référence tout le long du chemin ?
- f) Quel est l'intérêt de faire des réseaux Ethernet commutés ?

### **Corrigé exercice 67**

- a) Oui, il y a des chemins puisque le réseau est commuté.
- b) Les références utilisées classiquement sont fournies par les adresses MAC des destinataires. Dans les réseaux MPLS, on utilise un champ de référence supplémentaire qui porte le shim label.
- c) Si l'adresse MAC est utilisée, elle ne varie pas le long du chemin et correspond toujours à l'adresse du destinataire. Cela est possible parce que l'adresse MAC est unique, il est possible de rencontrer un autre chemin qui l'utilise, si ce n'est un chemin allant au même destinataire.
- d) Le fait de décapsuler une trame Ethernet permet de récupérer le paquet IP et donc son adresse IP. Il peut être intéressant de remonter à l'adresse IP. Si deux sous-réseaux sont indépendants et s'il n'est pas possible de faire transiter une signalisation commune entre eux. Ces nœuds sont des routeurs.
- e) Non, il n'est pas possible de conserver la même référence tout le long du chemin puisque l'on ne peut plus assurer l'unicité des références sur l'ensemble du chemin.

- f)** L'intérêt de faire des réseaux Ethernet commutés est de ne plus être tenu à des limitations de distance, lesquelles s'exercent dès que le support physique est partagé.

### **Exercice 68.**

*On veut comparer les techniques de transfert et le niveau de l'architecture.*

- a) Montrer que l'on peut effectuer de la commutation au niveau 2 et au niveau 3.
- b) Montrer que l'on peut effectuer du routage au niveau 2 et au niveau 3.
- c) Donner un exemple de commutation de niveau 3.
- d) Donner un exemple de routage de niveau 2.
- e) Qu'en déduisez-vous ?
- f) Peut-on mêler les routages et les commutations de même niveau dans un même réseau ?
- g) Peut-on mêler les routages et les commutations à différents niveaux dans un même réseau ?

### **Corrigé exercice 68**

- a) Il est possible de réaliser une commutation au niveau 2 et au niveau 3. La commutation est de niveau 2 lorsque la référence se trouve dans le paquet. Par exemple, le relais de trames et l'ATM sont de niveau 2 tandis que le protocole X.25 détermine une commutation de niveau 3.
- b) Même chose que précédemment : selon que l'adresse complète du récepteur est dans la trame ou dans le paquet IP, on a un routage de niveau 2 classique.
- c) X.25 est une commutation de niveau 3.
- d) Comme nous l'avons indiqué, le routage de niveau 2 n'est pas classique. On peut dire que la technique de commutation Ethernet est un routage de niveau 2. En effet les nœuds utilisent l'adresse complète du récepteur (l'adresse MAC) table de routage est dans ce cas fixe.
- e) On peut en déduire que les commutations sont généralement de niveau 2 et les routages de niveau 3.
- f) Non. On pourrait imaginer une technique de transfert dans laquelle la trame ou le paquet contiendrait à la fois une zone de référence et une zone contenant l'adresse complète du récepteur. Le nœud pourrait alors choisir entre les deux zones pour router ou commuter.
- g) Oui. Dans MPLS, par exemple. Il y a un routage de niveau 3 et une commutation de niveau 2.

### **Exercice 69.**

*On considère un réseau formé de commutateurs avec des références de longueur n.*

- a) Quelle taille peut atteindre la table de commutation ?
- b) Est-ce raisonnable si n est égal à 28 ?
- c) Pour résoudre ce problème de taille, il est possible de constituer la références en deux parties de longueurs a et b telles que  $a+b = n$ . On suppose que tous les chemins allant d'un même nœud d'entrée à un même nœud de sortie possèdent une référence de longueur a différente mais une référence de longueur d commune. Montrer que cette solution permet de faire baisser la taille des tables de commutation à l'intérieur du réseau.

- d) Montrer que si tous les chemins prennent la même route, l'équilibre de charge du réseau peut être en défaut. Comment y remédier ?

### Corrigé exercice 69

- a) La taille de la table de commutation peut atteindre  $2^b$  à la puissance n.
- b) Non, ce n'est pas raisonnable puisque la taille de la table de commutation pourrait atteindre  $2^b$  à la puissance 28, c'est-à-dire 268 millions de chemins.
- c) Cette solution permet d'agrégner les références à l'intérieur du réseau puisque tous les chemins qui ont la même valeur dans le champ de longueur B vont au même point de sortie. Dans le réseau, il suffit d'examiner la zone de longueur b pour commuter les trames vers la sortie. La taille des tables de commutation est donc restreinte à la valeur b. Cette taille est au maximum de  $2^b$  à la puissance b
- d) Effectivement si l'on fait passer tous les chemins entre une entrée et une sortie du réseau il est pratiquement impossible d'équilibrer les charges dans le réseau. La solution est d'ouvrir plusieurs chemins entre une entrée et une sortie et d'équilibrer les charges des différents chemins.

### Exercice 70.

*Soit un réseau qui suit l'architecture de modèle de références et qui comporte un niveau physique, un niveau trame, un niveau paquet et un niveau message. Le trame commence par la suite 01010101010101010101010101010101.*

- a) Calculer la probabilité qu'une telle suite se trouve dans la suite des éléments à transporter. Ce niveau trame est-il transparent ?
- b) La trame possède un champ de détection d'erreur de 2 octets, de façon à détecter les erreurs éventuelles lors de la transmission, et un champ de numération et de contrôle de 2 octets (1 octet pour la numération et 1 octet pour le contrôle). Combien de trames peut-on émettre sans recevoir d'acquittement ?
- c) On suppose que le paquet possède une longueur fixe de 100 octets. Il est composé d'un champ d'adresse émetteur de 4 octets, d'un champ d'adresse récepteur de 4 octets également et d'un champ de supervision de 6 octets. Quel est le pourcentage de débit utile sur les lignes de communication ?
- d) Quel défaut peut-on en déduire concernant l'architecture de référence ?
- e) On suppose que le niveau 4 transporte un message de 1000 octets. Ce message doit être segmenté pour former les paquets. Quelle information faut-il ajouter dans les fragments avant de les donner à la couche paquet ?
- f) Si l'ensemble de ces informations de contrôle est de 4 octets, trouver la taille des fragments lors du découpage des 1000 octets puis le nombre de fragments obtenus. Déterminer, en pourcentage le débit utile sur les lignes de communications.

### Corrigé exercice 70

- a) Puisqu'il y a 32 bits spécifiques dans la séquence, la probabilité qu'une suite aléatoire suive la même combinaison est de une chance sur  $2^{32}=0.233 \cdot 10^{-9}$ . Un niveau est transparent lorsqu'il utilise un protocole apte à transporter n'importe quelle suite d'éléments binaires sans avoir à les transformer. Les protocoles qui ont des suites binaires réservées ne sont pas transparents puisqu'ils ne peuvent pas

transporter ces suites réservées. Dans le protocole de l'énoncé, la probabilité de retrouver la suite réservée des 32 bits de l'en-tête est tellement négligeable que l'on considère que le protocole est transparent.

- b) La numérotation étant effectuée sur 1 octet, il est possible de numéroter les trames de 0 à  $2^8 - 1$ . Les trames sont donc numérotées de 0 à 255. L'anticipation maximale est donc de 256 puisque si l'on n'a pas reçu l'acquittement de la trame 0, il est interdit d'envoyer une nouvelle trame 0. En effet, si l'émetteur recevrait un acquittement de valeur 0, il ne pourrait savoir si cet acquittement s'adresse à la première trame ou à la deuxième.
- c) Le paquet possède 14 octets de supervision. Lorsqu'on ajoute la trame, il faut ajouter 4 octets. Au niveau trame, il y a donc 18 octets de supervision pour une longueur totale de la trame de 104 octets. Le drapeau d'en-tête ajoute 8 octets de supervision (le drapeau de fin de trame sert également de drapeau d'en-tête de la trame suivante et ne doit pas être comptabilisé). On a donc un total de 26 octets de supervision (14 octets pour le paquet + 4 octets pour la trame + 8 octets pour le drapeau) sur 112 octets transportés (104 pour la trame + 8 pour le drapeau). Le nombre d'octets servant à transporter les données de l'utilisateur est de  $112 - 26 = 86$  octets pour un total de 112 octets transportés sur la ligne physique. Le pourcentage de débit utile est de 77 p.100.
- d) La lourdeur est le défaut principal de l'architecture OSI puisqu'il faut ajouter des zones de supervision assez longues à chaque étage de l'architecture.
- e) Il faut généralement ajouter une information d'appartenance et d'emplacement du segment dans le message. Lorsque le message est segmenté, il faut en effet ajouter un élément d'information pour désigner le propriétaire du paquet et indiquer où se place le segment dans le corps du message. Dans certains cas, il est possible de se passer de ces éléments d'information. Par exemple, si l'on ajoute au paquet une référence et que les paquets se suivent sur un circuit virtuel, il est relativement facile de reformer les messages à l'arrivée. Un problème à résoudre consiste toutefois à déterminer les débuts et fins des messages si la connexion permet d'envoyer des messages successifs.
- f) Si l'information de supervision de niveau message est de 4 octets, cela indique qu'il faut ajouter ces 4 octets dans chaque segment. Les paquets ayant une longueur de 100 octets avec une zone de 14 octets de supervision, il y a 86 octets disponibles. Sur ces 86 octets, il faut prendre 4 octets pour mettre l'information de niveau message. Il ne reste donc, sur les 100 octets du paquet, que 82 octets disponibles pour les 1000 octets en segments de 82 octets, ce qui donne 12 paquets. Comme il reste 16 octets à transporter, il faut transporter 13 paquets.  
Pour les 12 premières trames, 82 octets utilisateur sont transportés et 112 octets sont émis sur le support physique. Le dernier paquet, concernant les 16 derniers octets, a une longueur de  $16 + 4 + 14 + 4 + 4 = 42$  octets. On en déduit une charge de 1386 octets pour transporter les 1000 octets de données du message d'information, de transport de paquet IP sur Ethernet ou ATM, plus d'un quart du débit concerne la supervision.

### **Exercice 71.**

*On étudie un réseau ayant pour but de servir au support d'une application téléphonique non-temps réel, c'est-à-dire d'une application échangeant des messages téléphoniques qui peuvent être écoutés sans interactivité.*

- a) Quelle application générique de la couche 7 peut-elle prendre en charge l'application décrite précédemment ? Si cette application sert à faire de la publicité pour un article lors d'un achat en ligne (on-line) sur Internet, quelle est la contrainte sur le temps d'acheminement de ces messages téléphoniques ?
- b) Cette application est-elle réalisable sur un réseau comme Internet ?
- c) Le développeur de cette application utilise un réseau Intranet, c'est-à-dire un réseau privé utilisant le protocole IP. Pour gérer son réseau (prendre en charge la facturation, la sécurité, les performances, les pannes etc.), il utilise une base de données, appelée MIB (management Information base), dans laquelle il mémorise des informations sur tous les éléments du réseau provenant de toutes les couches. Dans quelle syntaxe a-t-il intérêt à écrire ces informations ?
- d) Le processus qui déclenche les actions à effectuer dans le cadre de la gestion de réseau a été intégré dans un niveau du modèle OSI. Quel est ce niveau ?
- e) Ces informations de gestion qui transitent dans le réseau doivent-elles avoir une priorité forte ou faible par rapport aux informations de l'utilisateur ?
- f) Est-il intéressant que les protocoles qui prennent en charge les paquets de gestion soient en mode avec connexion plutôt qu'en mode sans connexion ?
- g) Si le réseau développé pour l'application de téléphonie non-temps réel ne correspond pas à la réponse précédente, quelle solution préconiser pour transporter l'information de gestion ?
- h) On suppose maintenant que sur le réseau les paquets de contrôle soient nécessaires, c'est-à-dire des paquets capables de transporter en des temps très court des informations de contrôle concernant le passage de données nécessaires au bon fonctionnement du réseau. Ces paquets doivent-ils être plus prioritaires que les informations de gestion ? Plus prioritaires que les informations des utilisateurs ? Comment ces informations doivent-elles transiter dans le réseau ?

### **Corrigé exercice 71**

- a) Au moins deux applications génériques peuvent prendre en charge l'application de téléphonie non-temps réel : la messagerie électronique et le transfert de fichiers. Si l'application devient temps réel, c'est-à-dire si la parole doit être rejouée rapidement l'application est dite en «streaming». Dans une telle application, les données à rejouer doivent être disponibles au récepteur à un moment précisé à l'avance. Dans cet exercice, l'application n'est pas une application de parole téléphonique puisqu'il n'y a pas d'interactivité. On peut donc se permettre un retard entre le moment où la personne clique sur la demande de commentaire (la parole) et le moment où la parole est effectivement entendue. Cette durée ne doit pas dépasser une à deux secondes.
- b) Cette application est réalisable sans problème sur Internet à condition que le laps de temps correspondant au décalage soit au moins de l'ordre de 1s.
- c) Ces informations doivent être écrites en ASN-1, le langage syntaxique normalisé.
- d) C'est le niveau 7, ou application, la gestion de réseau étant une application parmi beaucoup d'autres.

- e) En règle générale les informations de gestion ont une priorité faible par rapport aux données utilisateurs puisque l'acheminement de certains comptes-rendus, par exemple de facturation, n'a rien d'urgent. En revanche, certaines primitives peuvent présenter un caractère d'urgence, comme celles s'occupant des pannes. Les données de gestion sont généralement avec une priorité basse.
- f) Comme les données de gestion n'ont le plus souvent aucun caractère d'urgence et que l'on n'a pas besoin d'une qualité de service déterminée, il est plus simple de les étendre dans un mode sans connexion. Cela devient cependant de moins en moins évident du fait de l'intégration de plus en plus fréquente de données de contrôle dans les données de gestion. Le mode avec connexion apporterait une meilleure fiabilité au transport.
- g) Sur un réseau on peut avec des applications en mode avec connexion et d'autres en mode sans connexion. La gestion peut donc être en mode sans connexion et la parole téléphonique non-temps réel utiliser une application en mode avec connexion.
- h) Les informations de contrôle décident du fonctionnement du réseau. Elles doivent être prises en compte le plus rapidement possible. Les paquets transportant ces informations doivent donc avoir une priorité forte par rapport aux autres types de paquet

### **Exercice 72**

*On considère un réseau utilisant un niveau physique ayant les caractéristiques suivantes : le codage est de type Manchester, c'est-à-dire que le 0 est indiqué par un front montant (signal qui passe instantanément d'une valeur à une autre dans le sens montant) et le 1 par un front descendant auquel on ajoute un signal supplémentaire, par exemple, un signal constant sans front. Ce troisième signal s'interprète comme une violation du code puisqu'il ne suit pas le principe du code Manchester.*

- a) Ce réseau peut-il n'avoir qu'un seul niveau trame et pas de niveau paquet ?
- b) Si les machines extrémité sont de type IP, peut-on parler de trame IP et non plus de paquet IP ?
- c) Les segments provenant du niveau supérieur (du niveau TCP) doivent-ils posséder une information indiquant où se trouve le segment dans le message ?
- d) Une application traitée par ce réseau concerne le transport de très gros fichiers. Le niveau application doit-il être en mode avec connexion ou sans connexion ?
- e) Une autre application concerne le Web, c'est-à-dire une application client serveur dans laquelle des liens hypermédias peuvent diriger l'utilisateur. Cette application doit-elle être en mode avec connexion ou sans connexion ?
- f) Si les deux applications cohabitent et si l'une est en mode avec connexion et l'autre en mode sans connexion, cela est-il possible ?
- g) Au niveau paquet ou trame peut-on avoir la coexistence d'un protocole en mode avec connexion et d'un protocole sans connexion ?
- h) Le niveau session du réseau propose un mode avec connexion, avec des points de reprise dits majeurs ou mineurs. Le cas majeur indique que les taux extrémités de la connexion se sont mises d'accord sur les point de reprise tandis que dans le cas mineur seule une extrémité a posé un point de reprise et a émis un message vers l'autre extrémité pour l'en informer mais sans exiger que l'autre extrémité acquitte ce message. Comment la couche session peut-elle procéder au redémarrage sur un point de reprise ?

## **Corrigé exercice 72**

- a) Ce réseau peut n'avoir qu'un niveau trame et pas de niveau paquet. En effet, la violation de code peut être utilisée pour détecter un début ou une fin de trame. On peut donc mettre l'ensemble de la supervision dans le niveau supérieur, c'est-à-dire le niveau trame.
- b) Effectivement, on peut parler de trame IP si le coupleur de ligne indique le début et la fin du paquet IP par une violation de code. On voit sur cet exemple la difficulté de discerner un paquet d'une trame. Comme la violation de code est située au niveau physique, on peut dire que l'on n'a pas besoin de niveau trame et que le paquet IP est bien situé au niveau 3. On peut également dire que le paquet IP est une trame IP puisqu'on n'a pas besoin de l'encapsuler dans une trame. Actuellement, on a tendance à se placer au niveau le plus bas possible. C'est pourquoi l'on parle de trame IP.
- c) Oui, il doit y avoir une information permettant de situer les segments les uns par rapport aux autres. En effet, les segments vont se transformer en paquets (ou en trames) IP, susceptibles de prendre des chemins divers. A la réception, il est nécessaire de rassembler les segments. Il faut pour cela pouvoir les situer les uns par rapport aux autres puisque certains paquets (trames) auraient pu dépasser d'autres paquets, le routage modifiant l'acheminement des paquets.
- d) Il faut que le niveau application soit en mode avec connexion pour prendre en compte avec certitude la grande quantité d'information qui va lui arriver. La connexion permet à l'émetteur de négocier la quantité d'information qu'il doit émettre vers le récepteur.
- e) Pour le web, il est beaucoup plus simple de ne pas avoir de connexion. L'utilisateur se déplace de serveur en serveur à la recherche d'informations. Si à chaque communication, il doit mettre en place une connexion, cela implique des paquets de supervision pour ouvrir puis fermer les connexions, ne serait-ce que le transport d'un seul paquet à chaque fois.
- f) Oui, bien sûr. Il peut y avoir sur un même réseau coexistence d'applications en mode avec et sans connexion.
- g) Le mode avec connexion demande une supervision, c'est-à-dire un plan de signalisation pour gérer l'ouverture et la fermeture de la connexion. Le mode sans connexion utilise un routage pour transporter les paquets. Un réseau comme MPLS dispose de ces deux possibilités c'est-à-dire d'une communication et d'un routage dans le même nœud. Dans ce réseau, les LSR (Label Switched Router), ou commutateurs-routeurs sont des nœuds, relativement complexes. En revanche, il est simple de mélanger les deux modes aux niveaux supérieurs. Par exemple, dans l'environnement IP, le niveau message comporte le protocole TCP, en mode avec connexion, et le protocole UDP, en mode sans connexion.
- h) A la suite d'un problème, l'entité de session commence par essayer de redémarrer sur un point de synchronisation mineur (si le dernier point de reprise posé est de synchronisation majeure, la solution consiste évidemment à redémarrer directement sur ce point). L'entité qui effectue la reprise propose ses points de synchronisation mineurs. Si l'autre extrémité de la session accepte un de ces points de synchronisation, la session redémarre. Sinon le dernier point de synchronisation majeur est utilisé.

### **Exercice 73**

On considère un réseau ATM auquel on ajoute un protocole X.25.3 au niveau paquet et une classe 4 au niveau message.

- Donner la suite depuis le niveau message jusqu'au niveau liaison, des entités de protocoles -les Protocol Data Unit- sans décrire en détail tous les champs. Indiquer simplement le champ de données et les zones de supervision.
- Existe-t-il des duplications de fonctions parmi les protocoles mis en jeu aux différents niveaux ? Si oui, lesquelles ?
- Que peut apporter cette possibilité en plus d'un transport ATM qui ne prendrait en compte que les niveaux physiques (PMD), trame (ATM) et message (AAL) ?
- On veut introduire un contrôle de flux, c'est-à-dire un contrôle qui empêche les flux de devenir trop importants et d'occasionner ainsi une congestion des noeuds sur une connexion ATM de 2000 km de long. On suppose que les temps de traversée des commutateurs de cellules sont négligeables. Sachant que le signal se propage à la vitesse de 2000km/s, donner le nombre de cellules qui sont en cours de propagation si la vitesse des circuits est de 2,5Gbit/s.
- Si on souhaite un contrôle de flux où on limite le nombre de paquets entre une entrée et une sortie, ce qu'on appelle contrôle par fenêtre, quelle doit être la taille minimale de la fenêtre pour qu'il n'y ait pas d'interruption dans la transmission en supposant qu'il n'y ait pas d'erreurs en ligne ?
- Donner la taille minimale de la fenêtre lorsqu'il y'a des erreurs et qu'on emploie une procédure de reprise sélective (du type rejet sélectif c'est-à-dire que l'on ne retransmet que la cellule en erreur).
- Dans ce dernier cas, combien faut-il d'éléments binaires pour coder le numéro de cellule (il faut une numérotation puisque pour effectuer une retransmission, il faut connaître le numéro de la cellule à retransmettre) ? Est-ce compatible avec la cellule ATM telle qu'elle est définie par les normalisateurs ?
- On veut limiter le temps de transfert de bout en bout, montrer qu'avec la méthode précédente cela n'est pas possible.

### **Corrigé exercice 73**

a) figure C

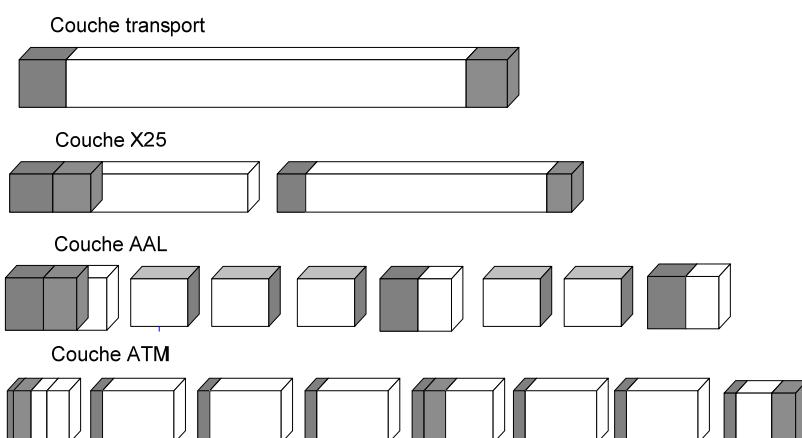


Figure C

- Oui, il existe un certain nombre de duplications entre ATM et X.25. Le circuit virtuel ouvert pour faire passer les paquets X.25 à des propriétés similaires au

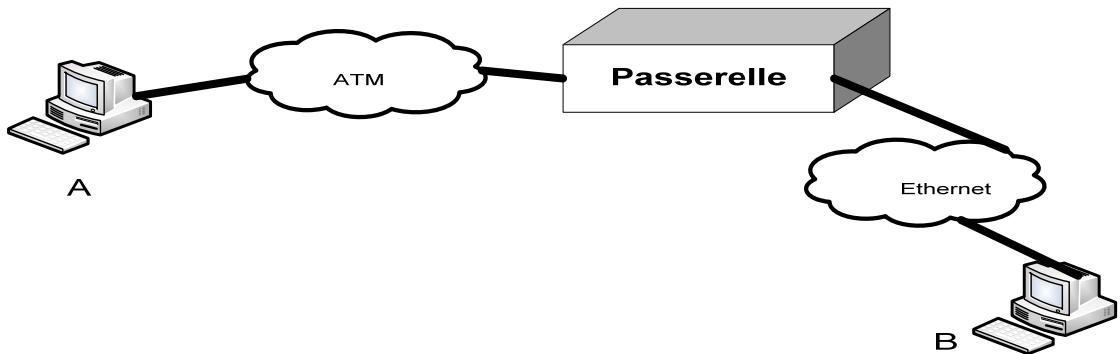
circuit virtuel ouvert pour transporter les cellules ATM. Ici, le circuit virtuel est très simple : il fait correspondre un nœud d'entrée à un nœud de sortie. Les paquets X.25 pour aller de ce nœud d'entrée au nœud de sortie empruntent un tuyau qui n'est pas autre chose que le circuit virtuel ATM sur lequel sont transportées les cellules ATM qui contiennent les paquets X.25. De même, entre X.25 et la classe 4 de la couche transport, on peut trouver des redondances. Il y a dans les deux cas une détection des paquets perdus et une demande de reprise, même si cette de dernière ne se fait pas de la même façon.

- c) Cette redondance de fonction peut apporter une meilleure qualité de certains services mais pas de tous les services. Par exemple, une duplication de la détection et de la reprise sur erreur peut mener à un taux d'erreur extrêmement bas. Ainsi, la couche AAL peut effectuer une retransmission, de même que la classe 4 du niveau message.
- d) Un circuit de 2000 Km de long demande un temps de propagation de 10ms. Avec une capacité de 2.5 Gbit/s ce délai représente 25 Mbit/s de données en cours de propagation. Comme une cellule ATM a une longueur de 424 bits, il y a 58962 cellules en cours de propagation.
- e) Il faut pouvoir numérotter les cellules pour qu'il n'y en ait pas deux de même valeur. Il faut en outre pouvoir associer des numéros à chaque trame émise jusqu'à réception de l'acquittement. Il faut donc avoir assez de numéros disponibles pour en donner un différent à chaque trame émise pendant l'intervalle de temps correspondant au temps aller-retour. Pour cela, il faut une fenêtre dont la taille soit au moins égale à  $2 \times 58962 = 117924$ .
- f) Lorsque des trames erronées se présentent, il faut pouvoir continuer à transmettre de nouvelles trames même après avoir retransmis la trame en erreur. En effet, la trame en erreur ne pouvant être acquittée positivement qu'une fois bien reçue, il faut, pendant sa retransmission pouvoir continuer à transmettre de nouvelles trames sans que l'émetteur ait à s'arrêter, bloqué par la taille de la fenêtre. Il faut donc pouvoir émettre de nouvelles trames pendant le temps de deux allers-retours. Ce cas n'est exact que s'il n'y a qu'une trame en erreur ou que la procédure de niveau trame permette de demander des retransmissions en parallèle. Si deux trames successives sont erronées et que la seconde doive attendre l'acquittement de la première d'un aller-retour.
- g) La taille totale de la fenêtre étant de 235848, il faut trouver la puissance de 2 qui permette d'atteindre cette valeur. Nous avons :  $2^{17} = 131072 < 235848 < 2^{18} = 262144$ . Il faut donc 18 bits pour coder la valeur minimale de la fenêtre. Cette valeur n'est pas compatible avec la structure de la trame ATM puisqu'il faudrait un champ d'au moins 18 bits pour la numérotation des cellules.
- h) Si l'on détecte les erreurs et que l'on effectue des retransmissions, le temps de la traversée du réseau ne peut plus être limité. Il suffit qu'une trame soit erronée plusieurs fois de suite pour que le temps de transfert dépasse la limite admissible.

### **Exercice 74**

*On considère un réseau formé de deux sous réseaux. L'un est un réseau ATM et l'autre un réseau Ethernet comme illustré à la figure 6.8. L'environnement TCP/IP est utilisé pour transporter de l'information de A à B.*

Figure 6-8



- a) Faire un schéma en couches montrant l'architecture de ce réseau.
- b) Est-il possible d'ouvrir un circuit virtuel de bout en bout ?
- c) Donner un cas où la passerelle, c'est-à-dire l'équipement qui permet de passer d'un réseau à un autre est un routeur et un autre où la passerelle est un commutateur.
- d) On suppose maintenant que A soit un PC possédant une carte coupleur Ethernet plutôt qu'une carte coupleur ATM mais que le premier réseau à traverser soit toujours le réseau ATM, que faut-il ajouter entre A et le réseau ATM ?
- e) Toujours dans le cadre précédente, faire un schéma en couches de la passerelle.

#### Corrigé exercice 74

- a) La passerelle est un routeur : voir figure D. (FIGURE D). La passerelle est un LSR (Label Switched Router) : voir figure E. (FIGURE E)

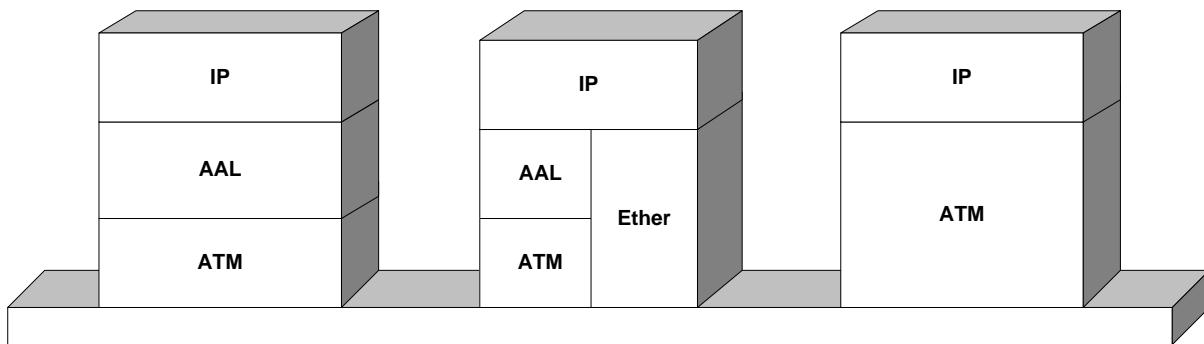


Figure D

- b) Dans le cas de la figure D il n'est pas possible d'ouvrir un circuit virtuel de bout en bout puisqu'il faut repasser par la couche IP dans la passerelle intermédiaire. Pour la figure E, représentant une architecture MPLS, la réponse est oui : on peut ouvrir un circuit virtuel de bout en bout, même si les termes « circuit virtuel » ne sont pas appropriés, le mot utilisé étant « route ».
- c) Ce sont les deux cas que nous venons de décrire. La passerelle est un routeur dans le premier et un commutateur de type MPLS dans le second.

- d) Entre A et le réseau ATM. Il faut ajouter un réseau Ethernet. Il faut donc encapsuler le paquet IP dans une trame Ethernet. Trois possibilités peuvent être identifiées :
- 1) Décapsuler la trame Ethernet dans le premier nœud du réseau ATM, qui ré encapsule à son tour le paquet IP dans des cellules ATM.
  - 2) Encapsuler directement la trame Ethernet dans des cellules ATM.
  - 3) Utiliser le protocole MPLS et donc commuter la trame Ethernet vers des cellules ATM. Dans ce cas, il y a également décapsulation du paquet IP de la trame Ethernet. Le paquet IP n'est toutefois pas examiné mais est immédiatement remis dans des cellules ATM.
- e) Le schéma en couches de la passerelle dépend de la solution choisie à l'entrée du réseau. Le premier cas de figure donne naissance à l'architecture de la passerelle illustrée à la figure D. Le troisième donne naissance à l'architecture illustrée à la figure E. Le deuxième cas correspond à l'architecture illustrée à la figure F. (FIGURE E)

### Exercice 75

*On veut étudier un réseau multimédia composé de réseaux interconnectés. Les clients utilisent des PC munis de cartes coupleurs Ethernet. L'interface utilisateur interne au PC utilise le protocole TCP/IP. Les PC sont connectés par l'intermédiaire de réseaux Ethernet. Les réseaux Ethernet sont interconnectés par trois réseaux : un réseau ATM, un réseau à commutation de circuits et un réseau utilisant l'architecture TCP/IP suivant le schéma utilisé à la figure 6-9.*

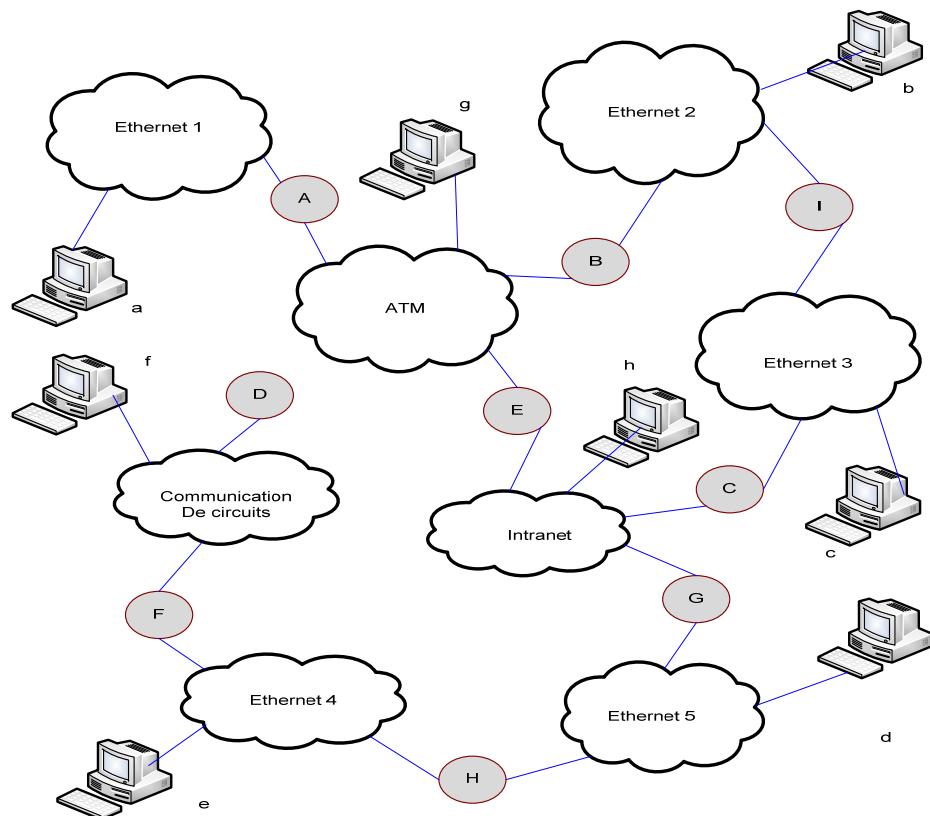
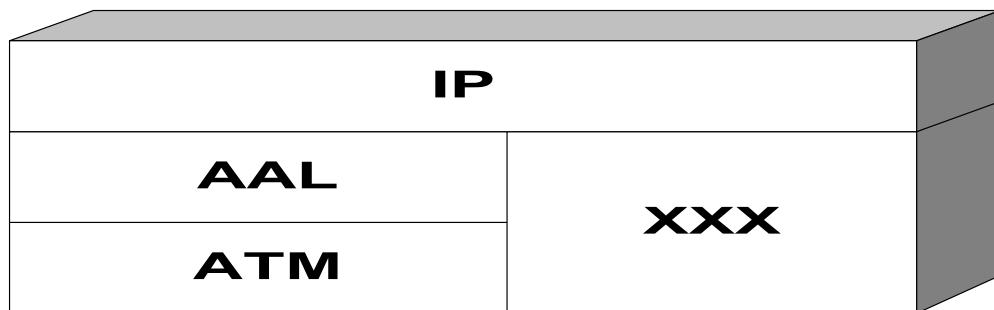
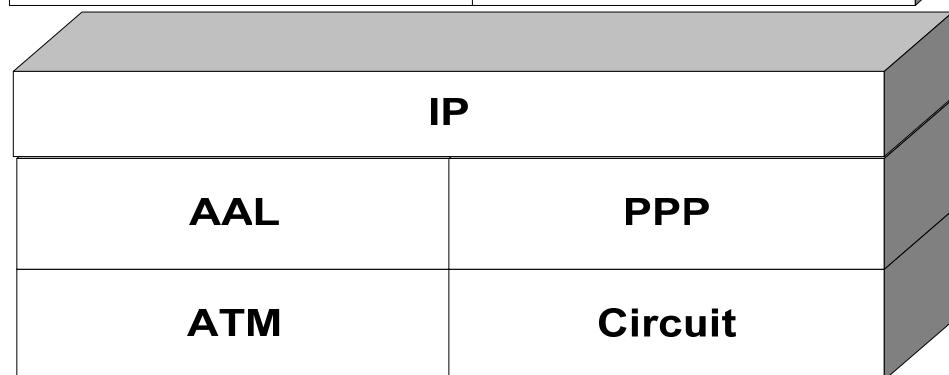
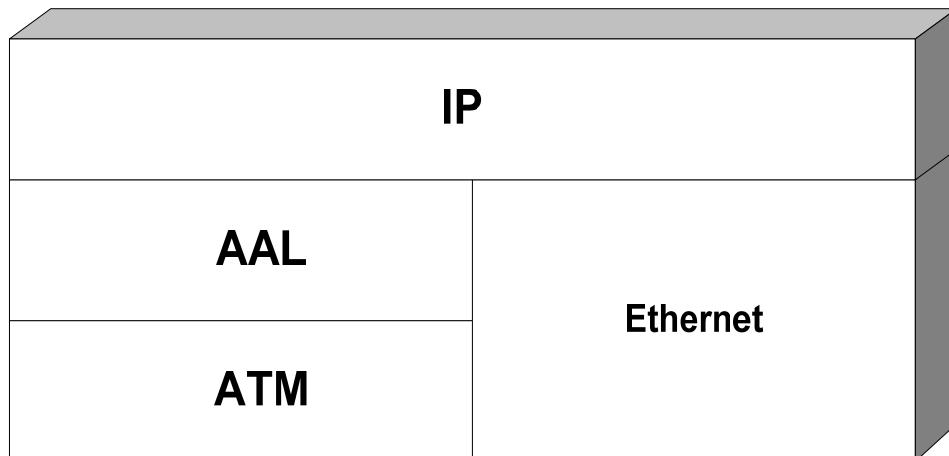


Figure 6.9

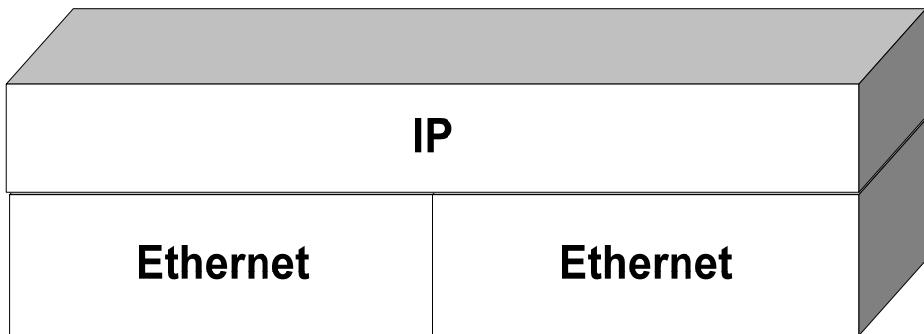
- a) Le réseau Ethernet n°1 est un réseau de type partagé. La passerelle A est un routeur. Donner un schéma architectural (description des couches à traverser) de cette passerelle. Les passerelles D et E sont également des routeurs. Donner un schéma architectural de ces passerelles.
- b) Une communication de PCa au PCg est-elle possible en utilisant la passerelle A comme décrite dans la réponse précédente ? Si la réponse est négative, donner une solution pour permettre la communication.
- c) Le réseau Ethernet n°2 est de type partagé de même que le réseau Ethernet n°3. Si la passerelle I est un routeur, décrire ce qui se passe dans la passerelle I dans une communication entre b et c. Quelle est la distance maximale entre les PC b et c ?
- d) Les réseaux Ethernet n°4 et n°5 sont des réseaux Ethernet commutés. Décrire la passerelle H.
- e) Une communication entre les PC a et h est-elle possible ? Pourquoi ?
- f) Une communication entre les PC a et f est-elle possible ? Pourquoi ?
- g) On souhaite utiliser le protocole MPLS (MultiProtocol Label Switching) pour l'interconnexion globale.
  - 1- Le réseau Ethernet peut-il être considéré comme un réseau commuté (au sens de la commutation, c'est-à-dire par l'utilisation des références)?
  - 2- Le réseau à commutation de circuit peut il être considéré comme un réseau commuté ? Pourquoi ?
  - 3- Le réseau TCP/IP peut il être considéré comme un réseau commuté ? Pourquoi ?
- h) Donner le schéma architectural d'une communication entre les PC a et d si le flot passe par les passerelles A, D et F.
- i) Donner le schéma architectural d'une communication entre les PC a et h si le flot passe par les passerelles A et E.
- j) Le flot entre les PC a et h pourrait-il passer par le chemin A, B I et C ?
- k) On veut la passerelle A soit un pur commutateur dans une communication entre a et g. comment effectuer la traduction d'adresse IP de g en l'adresse ATM de g pour que la passerelle A puisse effectuer une commutation dès le premier paquet du flot ?
- l) Est il pensable d'avoir une qualité de service de bout en bout sur le réseau global ?

### Corrigé exercice 75

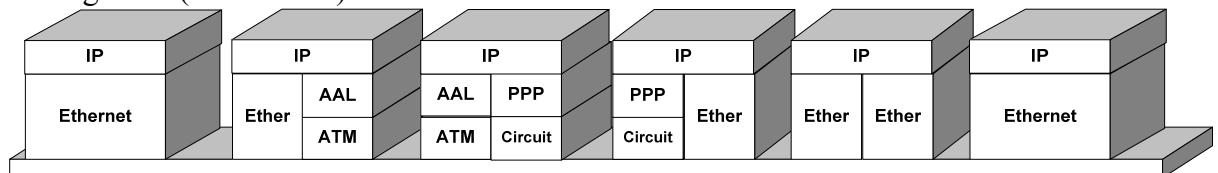
- a) Passerelle A : voir figure G (FIGURE G). Passerelle B : voir figure H (FIGURE H). Passerelle C : figure I (FIGURE I)



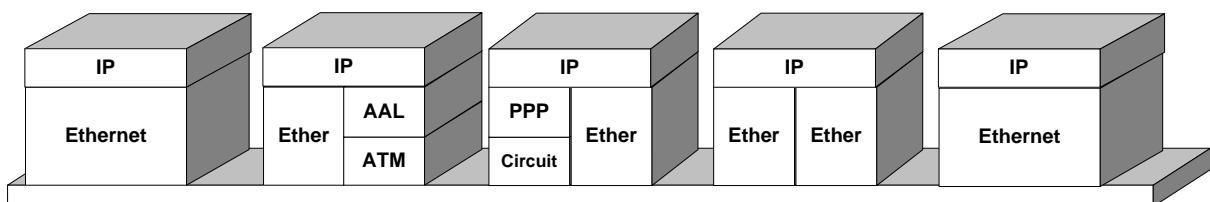
- b) La communication se fait effectivement par la passerelle A. Le paquet IP est mis dans une trame Ethernet dans le PC a et cette trame est transportée dans le réseau Ethernet jusqu'à la passerelle A. Dans la passerelle A, la trame Ethernet est décapsulée puis réencapsulée dans des cellules ATM. La réponse aurait pu être négative si le schéma de la passerelle A montrait une encapsulation de la trame Ethernet dans des cellules ATM. Dans ce cas il aurait fallu dans le PC g qu'une décapsulation de la trame Ethernet ait eu lieu (celui-ci possède une carte ATM). On dit que le PC effectue une émulation Ethernet. Il a besoin pour cela d'un logiciel donne l'impression à l'utilisateur qu'il est connecté sur Ethernet et non sur un réseau ATM.
- c) La passerelle I possède l'architecture illustrée à la figure j. (FIGURE J). La distance entre b et c est limitée puisque les deux réseaux Ethernet sont partagés. La distance dépend de la vitesse des réseaux Ethernet (voir cours 15)



- d) La passerelle H est exactement la même que celle de la question précédente. La différence provient de la non-diffusion des trames à l'intérieur du réseau et à une distance non limitée entre les équipements d'un réseau commuté.
- e) Oui si le réseau global est de type Internet. La communication s'effectue alors par des routeurs IP intermédiaires. La communication n'est pas possible si une encapsulation est effectuée sur le chemin et ne donne pas lieu à une décapsulation. Dans ce cas, le PC terminal doit posséder le logiciel ou le matériel pour effectuer cette décapsulation.
- f) Même réponse qu'à la question précédente.
- g)
  1. Oui, le réseau Ethernet peut faire partie d'un réseau MPLS. Il faut pour cela que les équipements Ethernet puissent traiter un champ spécifique dans lequel se trouve la référence. Ce champ porte le shim label.
  2. Le réseau à commutation de circuits est considéré comme un réseau commuté s'il peut transporter des trames dans lesquelles se trouve une référence. Le protocole MPLS permet d'ajouter à tous les types de trame un champ dans lequel se trouve une référence.
  3. Oui. Le réseau TCP/IP peut être considéré comme un réseau commuté puisque les paquets IP doivent être encapsulés dans des trames pour acheminés sur un support physique. Comme pour la question précédente, soit la trame possède en elle-même une référence, soit le protocole MPLS ajoute un champ spécifique contenant une référence.
- h) On revient au cas où les passerelles sont des routeurs IP. Dans MPLS, il faudrait enlever la couche IP dans toutes les passerelles intermédiaires, comme illustré à la figure K (FIGURE K)



i) Voir figure L. (FIGURE L)



- j) Oui, si toutes les passerelles sont des routeurs IP. Il est possible que le routage fasse transiter des paquets IP entre les PC a et h.
- k) On revient au cas MPLS puisque la passerelle A est un commutateur. L'architecture est celle décrite à la figure E. Dans MPLS, il faut ouvrir des circuits virtuels qui transportent des paquets IP. Etant donné l'adresse IP du destinataire, le premier nœud du réseau doit être capable de faire la correspondance entre cette adresse IP du destinataire et une référence d'entrée dans le réseau. Une fois cette référence acquise, le paquet IP est encapsulé dans des trames, qui sont commutées sur le circuit virtuel jusqu'à la sortie. Il n'y a donc pas de correspondance d'adresse directe avec l'adresse ATM de sortie. Les correspondances d'adresse ont été résolues par le niveau de signalisation de MPLS, pris en charge par le protocole LDP (Label Distribution Protocole). Dans ce protocole, les paquets de contrôle IP sont routés comme dans l'Internet classique par la couche IP qui se trouve dans les nœuds, ou LSR. A chaque passage dans un sous-réseau, il doit effectivement y avoir une résolution de correspondance entre l'adresse IP du prochain routeur et l'adresse de ce dernier dans le protocole utilisé dans le sous-réseau ATM, il faut trouver l'adresse ATM du nœud de sortie ou éventuellement du PC destinataire qui y est raccordé.
- l) Si le réseau utilise des routeurs IP de bout en bout, il est aujourd'hui très difficile d'obtenir une qualité de service puisque l'on ne connaît pas à priori les routeurs et les sous-réseaux par lesquels vont transiter les paquets. Il faudrait implanter dans tous les routeurs des algorithmes de ce contrôle de la qualité de service. Si le protocole MPLS est utilisé avec des réseaux commutés permettant d'y associer des algorithmes de qualité de service, il est possible d'obtenir une qualité de service de bout en bout.

### Exercice 76

On considère le réseau à quatre nœuds dont la topologie est illustrée à la figure 7-12. Ce réseau transporte des paquets d'une extrémité à l'autre (de A à B par exemple).

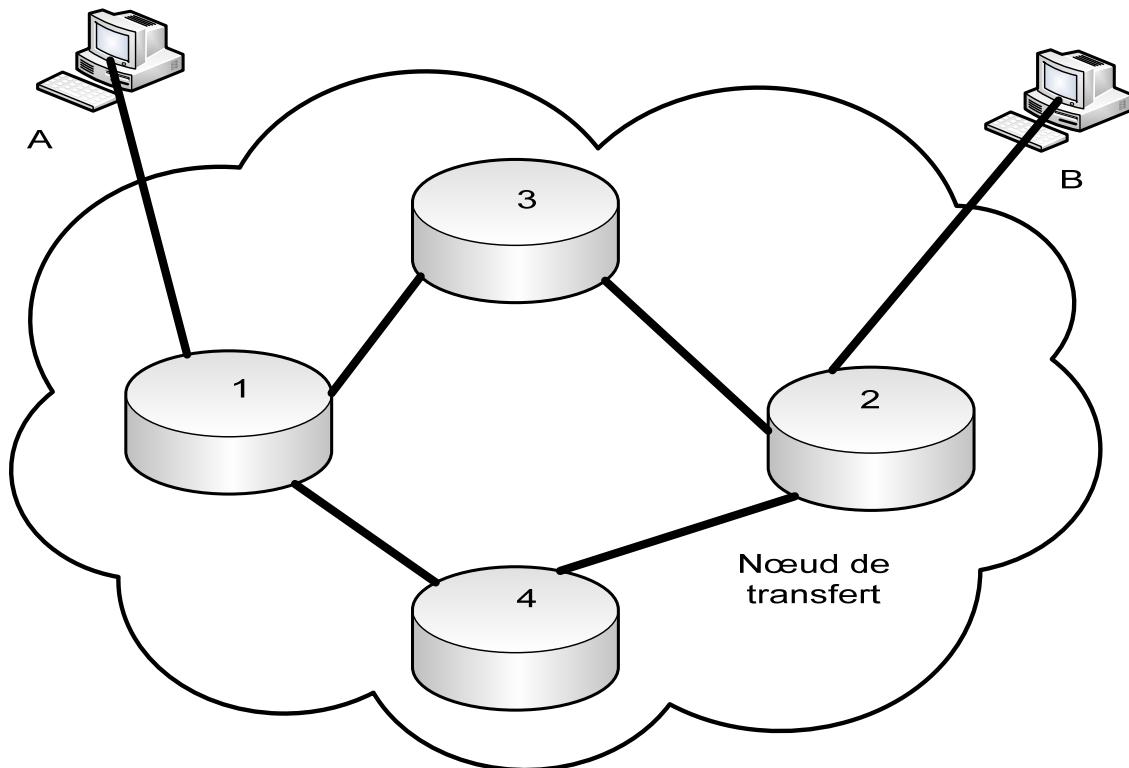


Figure 7-12

- Dans un premier temps on suppose que les nœuds à l'intérieur du réseau sont des commutateurs ATM. Le réseau est-il nécessairement dans un mode avec connexion ? Pourrait-on envisager de construire de routeurs ATM ?
- Supposons maintenant que les nœuds soient des commutateurs ATM. Est-il possible de réaliser un tel réseau dans un mode sans connexion ?
- Dans la topologie illustrée à la figure 7-12, les nœuds pourraient être des commutateurs ou des routeurs. La taille de la table de routage (cas des routeurs) est-elle toujours plus grande que la table de commutation (cas de commutateurs) ?
- Supposons que le temps de traversée moyen du réseau d'un paquet soit de 1s si le réseau est commuté et de 1,5s si le réseau est routé. Ces temps sont les mêmes dans les deux sens du réseau de l'émetteur vers le récepteur (A vers B) et du récepteur vers l'émetteur (B vers A). Si une fenêtre de bout en bout de taille 5 est utilisée et que le flot de paquets de l'émetteur vers le récepteur (c'est-à-dire arrivant simultanément à l'émetteur en début de communication) soit de dix paquets, quelle solution donne le temps de réponse le plus court pour faire parvenir ces dix paquets au récepteur ? Détaillez les approximations le cas échéant. (on suppose que les paquets soient de petite taille).
- Si l'on réduit la taille de la fenêtre à 3, quelle est la meilleure solution ? Qu'en déduire à propos du comportement du réseau ?
- Si au lieu de mettre des fenêtres de bout en bout, on suppose que les fenêtres sont locales (de nœud en nœud), les résultats des deux exemples précédents sont ils modifiés ? ) On suppose que les fenêtres locales sont de valeur 2 et que le temps

moyen de traversée d'une liaison soit de 0,25s dans le cas commuté et de 0,375s dans le cas routé.)

### **Corrigé exercice 76**

- a) Le réseau ATM est en commutation pour l'acheminement des cellules puisque le protocole ATM se fonde sur la commutation. Cependant il pourrait très bien fonctionner dans un mode sans connexion. Cette solution n'a que peu d'intérêt puisque l'existence d'une signalisation pour ouvrir le circuit virtuel entraîne le mode avec connexion. Pour avoir un routeur ATM, il faudrait doter la cellule ATM d'un champ portant l'adresse complète du récepteur et de l'émetteur, ce qui n'est pas pensable pour une structure de trame aussi petite que celle utilisée dans l'architecture ATM.
- b) Le protocole ATM utilise un mode avec connexion pour qu'il y ait une négociation de qualité de service entre l'émetteur et le récepteur. On pourrait éventuellement réaliser un réseau ATM dans un mode sans connexion. Dans ce dernier cas, on perdrat en partie tout le travail effectué par la signalisation d'ouverture de circuit virtuel.
- c) Dans le réseau examiné, si les nœuds sont des routeurs, cela indique que l'on remonte au niveau IP dans chaque nœud. La table de communication est généralement plus petite que la table de routage puisqu'il n'y a que les circuits virtuels qui sont répertoriés, c'est-à-dire les communications actives. En cas d'utilisation de routeurs, il doit y avoir moyen de router les paquets contenant l'ensemble des destinataires possibles du réseau. Il peut y avoir des cas particuliers dans lesquels la table de routage est plus petite que la table de communication. Il suffit d'envisager un réseau dans lequel il n'y a que deux clients. La table de routage n'a donc que deux lignes. La table de commutation est plus grande si les deux utilisateurs ont ouvert plus de deux circuits virtuels entre eux.
- d) L'hypothèse de petits paquets implique que le temps d'émission sur la ligne est négligeable par rapport au temps de transit. Si la fenêtre est de 5, on envoie 5 paquets puis on attend 2s dans un cas et 3s dans l'autre pour transmettre les 5 paquets suivants. Les 10 paquets en commuté arrivent donc après 3s lorsque le circuit virtuel est ouvert. Pour ouvrir le circuit virtuel, il faut un aller-retour c'est-à-dire 2s. Au total, il faut donc 5s en commutation. Comme il n'y a pas besoin de signalisation dans une technique de routage, les paquets arrivent en 4.5s (un aller-retour et l'envoi des cinq derniers paquets). On voit ainsi que le routage donne un meilleur résultat en comparaison de la commutation.
- e) Il faut 2s pour obtenir les acquittements dans le commuté. Comme la fenêtre est de 3, pour envoyer les 10 paquets il faut trois groupes de trois plus l'envoie du dernier paquet. Il faut donc 7s au total pour que 10 paquets arrivent au récepteur (2s pour recevoir l'acquittement des trois premiers paquets, plus 2s pour les trois suivants et 1s pour permettre au dernier paquet d'atteindre le récepteur). La signalisation prenant 2s, on obtient un total de 9s. Pour le routage, il faut 3s pour obtenir les acquittements depuis l'émission du paquet, c'est-à-dire 10.5s au total pour acheminer les 10 paquets. La technique routée est dans ce cas moins bonne que la solution commutée. On en déduit que plus le flot est long et la fenêtre petite, plus la technique commutée donne de bons résultats. A l'inverse, plus le flot est court et la fenêtre grande, plus la technique de routage s'impose.
- f) Si la fenêtre est de 2, comme il y a quatre liaisons à franchir, il faut  $4 \times 0.5 + 0.25s$  pour que les dix paquets franchissent la première liaison en commutation, c'est-à-dire 2.25s. Les deux derniers paquets du flot transitent sur les 3 dernières liaisons sans attendre.

Le temps total de transit des dix paquets est donc de 3s. Si l'on ajoute 2s pour la signalisation (un aller-retour), on obtient un total de 5s pour le transport des 10 paquets.

En routage il faut au total :  $4 \times 0.75 + 0.375 + 3 \times 0.375 = 40.5$ s

### Exercice 77

*On souhaite étudier la technique de contrôle de flux dite leaky-bucket dans sa version la plus simple : un jeton arrive toutes les T unités de temps et s'il n'y a aucun paquet prêt à être transmis, le jeton est perdu*

- Montrer que si le flot d'arrivée est constant, le leaky-bucket est une technique qui laisse entrer le flot dans le réseau sans le modifier.
- Si le flot d'arrivée n'est pas constant mais qu'il possède une moyenne de  $m$  paquets par seconde et un débit crête de  $n$  paquets par seconde, quel doit être le taux d'arrivée des jetons pour que le flot puisse entrer dans le réseau ?
- Dans ce dernier cas, le flux de sortie est-il constant ?
- On suppose maintenant que les jetons soient conservés même s'il n'y a pas de paquet en attente, répondez aux mêmes questions a b et c que précédemment.

### Corrigé exercice 77

- Si le flot d'arrivée est constant, les paquets arrivent à des instants bien précis, avec un intervalle de temps entre les arrivées égal à  $T$ . Si  $T=T$ , le paquet attend l'arrivée du jeton et est mis à ce moment-là. Si le temps entre deux arrivée de paquets est  $T=T$ , lorsque le jeton arrive, il y a toujours un paquet en attente, et le processus de sortie des paquets est le même que celui en entrée décalé de l'intervalle de temps séparant l'arrivée du paquet et l'arrivée du jeton.
- Si l'utilisateur veut être sûr que tous ses paquets de données sont pris en compte, il doit opter pour un leaky-bucket, qui traite le débit crête. Il faut donc que  $T=1/n$ .
- Non, le flux n'est pas constant. Pour qu'il soit constant, il faudrait qu'un paquet soit présent chaque fois qu'un jeton arrive à la cadence de  $1/n$ . Ce n'est pas possible puisque  $1/n$  est le débit crête et non le débit moyen.
- Pour la question a, il n'y a pas de différence. Pour la question b, il suffit que le taux d'arrivée des jetons soit de  $1/n$ . Pour la question c, non. Le flux n'est pas constant puisque les jetons peuvent être utilisés à des instants quelconques.

### Exercice 78

*Soit un contrôle de flux par fenêtre dont la taille est N. Chaque fois que le récepteur reçoit une trame, il renvoie un acquittement.*

- On suppose qu'au démarrage de la communication,  $N=1$  et que la fenêtre reste à cette valeur. Montrer que cette solution est acceptable si l'acquittement revient très vite après la fin de la transmission d'un paquet.
- On suppose maintenant que la taille de la fenêtre est multipliée par deux chaque fois que tous les acquittements sont reçus correctement. Montrer qu'à partir d'un certain stade, il n'est plus nécessaire de multiplier la taille de la fenêtre par deux pour avoir le débit maximal de la communication.
- Que se passe t-il si un paquet est perdu ?

- d) Trouver une solution en cas de perte de paquet, pour que le système continue à fonctionner.

### **Corrigé exercice 78**

- a) Si la taille de la fenêtre est de 1, cela indique qu'à la fin de la transmission l'émetteur doit attendre l'acquittement avant d'émettre une nouvelle trame. Une fenêtre de 1 n'est acceptable que si le temps d'attente de l'acquittement est négligeable, c'est-à-dire si le temps de transmission est très grand par rapport au temps de propagation sur le support physique.
- b) Si l'on suppose que la fenêtre est multipliée par 2 chaque fois que les acquittements sont reçus correctement, il est évident qu'à partir d'une certaine fenêtre, les acquittements reviennent à l'émetteur avant même que l'émetteur ait pu envoyer toutes ses trames. Dans ce cas, il suffit de rester à la valeur de la fenêtre qui permet de saturer la liaison.
- c) Si un paquet est perdu, cela engendre une absence d'acquittement de ce paquet à l'émetteur.
- d) Une solution consiste à redémarrer sur une fenêtre de 1 ou sur une fenêtre comprise entre 1 et la valeur de la fenêtre comprise entre 1 et la valeur de la fenêtre qui avait été atteindre.

### **Exercice 79**

*On veut introduire une qualité de service dans un réseau de routage par une technique utilisant des classes. Pour cela on suppose la définition de trois classes 1, 2 et 3 avec 1 de plus haute priorité et 3 de plus faible priorité. Les paquets prioritaires sont servis avant les paquets moins prioritaires.*

- a) Expliquer pourquoi la priorité d'un paquet ne peut être préemptive (capacité à arrêter la transmission pour émettre un paquet plus prioritaire).
- b) Montrer que si tous les paquets de priorité 1 traversent le réseau comme s'il était vide, les paquets de priorité 1 peuvent obtenir une qualité de service garantie.
- c) Comment être sûr que les paquets de priorité 1 voient le réseau comme étant toujours vide ?
- d) Montrer qu'on peut donner une garantie aux paquets de priorité 2 sur le taux de perte de paquets, mais pas sur le temps de réponse.
- e) Les paquets de priorité 3 peuvent ils avoir une garantie ?

### **Corrigé exercice 79**

- a) La priorité ne peut être préemptive car une fois la transmission entamée, il faudrait pouvoir arrêter la transmission pour passer à la trame prioritaire. Le temps nécessaire pour interrompre la transmission étant plus grand que le temps de transmission de la fin de la trame non prioritaire, cette solution ne présente aucun intérêt. De plus, il faudrait pouvoir indiquer au récepteur qu'un morceau de trame seulement a été transmis, ce qui complique également énormément la procédure.
- b) Si les paquets de plus haute priorité traversent le réseau comme s'ils étaient vides, le temps de transit est approximativement égal au délai de propagation plus les temps d'émission, ce qui permet d'obtenir une borne supérieure du délai de transit. Si cette borne est suffisamment petite, la qualité de service est garantie.

- c) Pour que les paquets de priorité 1 voient le réseau toujours vide, il faut que le nombre de ces paquets soit limité à l'intérieur du réseau. Une solution parmi d'autres pour les opérateurs est d'appliquer une tarification telle que le nombre de clients de la plus haute priorité soit limité à une valeur déterminée.
- d) On ne peut garantir le temps de transit des clients de classe 2. Les clients de classe 1 étant prioritaires, il est impossible de savoir combien du temps les clients de classe 2 doivent attendre. En revanche, si le nombre de mémoires est suffisant dans le réseau, en effectuant un contrôle à l'entrée sur le nombre de clients de classe 2 pouvant entrer, il est possible de garantir un taux de perte dans le réseau.
- e) Les paquets de classe 3 ne peuvent avoir aucune garantie puisqu'il est possible de garantir un temps de transit entre un taux de perte. Il est clair que si les clients de classe 2 ne peuvent avoir un temps de transit garanti, les clients de classe 3 non plus. En ce qui concerne le taux de perte, les clients de classe 2 ont une garantie. Les clients de classe 3, en revanche, étant en nombre indéfini, puisqu'il n'est pas possible de les limiter (il n'y a pas de quatrième classe), leur taux de perte ne peut être contrôlé.

### **Exercice 80**

*Considérons un réseau de signalisation.*

- a) Montrer qu'un réseau de signalisation utilise un routage.
- b) Supposons que la signalisation ouvre un chemin de A à B. Si un nouvel utilisateur souhaite également émettre un flux de A à B est il nécessaire d'ouvrir un nouveau circuit virtuel ?
- c) Ce nouveau circuit virtuel peut-il emprunter la même route entre A et B que le premier circuit virtuel ?
- d) Quel serait l'intérêt de lui faire emprunter la même route ou au contraire de le faire passer par une autre route ?
- e) Montrer que les réseaux IP forment d'excellents réseaux de signalisation.

### **Corrigé exercice 80**

- a) Un réseau de signalisation émet des paquets qui portent l'adresse complète de leur destinataire de sorte que ces paquets puissent ouvrir des chemins dans le réseau. Un réseau avec des paquets portant l'adresse complète du destinataire est un réseau de routage.
- b) Deux solutions sont possibles : suivre la même route ou ouvrir un nouveau chemin. Le plus classique, comme dans ATM ou MPLS, est de suivre le même chemin. Même en suivant le même chemin, il est nécessaire d'ouvrir un nouveau circuit virtuel pour que les paquets soient discernés à la sortie.
- c) Oui, le nouveau circuit virtuel peut utiliser la même route que le précédent. C'est même le cas le plus classique, comme indiqué à la question précédente.
- d) L'avantage de faire passer le nouveau circuit virtuel par la même route est de permettre un multiplexage des deux circuits virtuels et de les rassembler sur un même conduit virtuel, ce qui permet de diminuer la taille des tables de commutation. L'avantage de prendre des routes différentes est de mieux gérer le partage de charge dans le réseau, c'est-à-dire d'étaler le trafic sur l'ensemble du réseau.
- e) Les réseaux IP utilisent la technique de routage et sont donc bien adaptés à la signalisation. De plus, les adresses IP sont devenues le moyen le plus classique d'attribuer une adresse électronique.

### Exercice 81

On considère un réseau de communication qui utilise la commutation de cellules ATM avec une architecture normalisée UIT-T. Pour effectuer le transport de l'information de l'utilisateur A vers l'utilisateur B, le circuit virtuel qui est ouvert passe par deux nœuds intermédiaires C et D. le schéma général du réseau est illustré à la figure 7 -13.

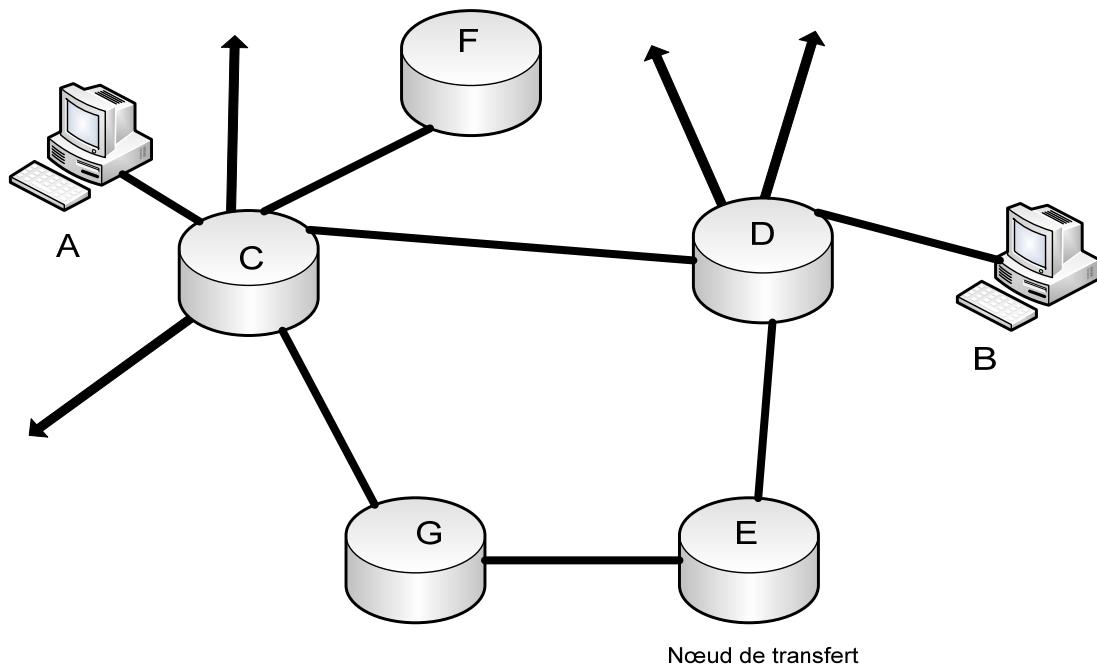


Figure 7-13

- Combiens de circuits virtuels peuvent-ils passer sur la liaison AC et sur la liaison CD ?
- On envisage de réaliser des communications multipoint. Comment la liaison multipoint de A vers B et F peut elle être mise en place ? Décrire la table de commutation de C.
- L'adresse ATM est une adresse hiérarchique liée à l'emplacement géographique. L'ouverture du circuit virtuel peut-elle être réalisée grâce à cette adresse ?
- L'adresse IP est également hiérarchique, mais elle ne donne pas d'information précise sur l'emplacement géographique. Si l'on veut ouvrir une route dans un réseau Internet (l'équivalent d'un circuit virtuel), ce qui s'effectue par le protocole RSVP, comment est-il possible de définir la route ?
- Si le réseau physique est de nouveau ATM, mais que les stations travaillent avec le protocole IP et donc que la station destinataire soit connue par son adresse IP, imaginez une solution pour ouvrir le circuit virtuel ATM qui relie les deux points.

### Corrigé exercice 81

- La valeur de la référence VPI/VCI étant sur 28 bits entre deux nœuds du réseau ATM, le nombre de circuits virtuels est de  $2^{28}$ .

- b) Pour effectuer du multipoint au niveau ATM, il faut qu'à une référence d'entrée correspondent plusieurs références de sortie.
- c) Oui, l'ouverture du circuit virtuel ATM peut être effectuée par le plan de signalisation de l'ATM qui gère les adresses ATM.
- d) Les adresses IP n'étant pas hiérarchiques, il faut utiliser une autre solution que l'ouverture des routes par une correspondance géographique. La route est déterminée par des algorithmes de routage de type RIP ou OSPF qui permettent de déterminer les sous-réseaux à traverser pour aller à l'adresse du destinataire.
- e) Une solution est d'utiliser l'environnement IP comme réseau de signalisation. En d'autres termes, l'environnement IP, grâce à l'utilisation des algorithmes de routage classiques dans l'Internet, peut permettre de trouver la correspondance d'adresse entre l'adresse IP du destinataire et son adresse ATM. Connaissant l'adresse ATM du destinataire, il suffit d'ouvrir un circuit virtuel avec cette adresse, passant de sous-réseau en sous-réseau en utilisant des commutateurs ATM. L'intégration d'un plan de signalisation IP avec des sous-réseaux ATM interconnectés par des commutateurs même à la solution MPLS. La solution globale MPLS peut être étendue par d'autres techniques de commutation.

### **Exercice 82**

*On veut exploiter une liaison bidirectionnelle simultanée (full-duplex) entre un serveur et un terminal à 1200 bits/s dans les deux sens.*

- a) Si le rapport signal sur bruit vaut 20db, 30db et 40db quelle est la bande passante minimale de la liaison ?
- b) On utilise une modulation de phase utilisant quatre phases distinctes. Faire un schéma donnant la suite 001001.
- c) Si le taux d'erreur par bit est de  $\theta$ , quelle est la probabilité pour qu'un message sur 1000 bits soit erroné pour  $\theta=10^{-3}$ ,  $\theta=10^{-4}$ ,  $\theta=10^{-5}$  ?

### **Corrigé exercice 82**

- a) La bande passante minimale de la station est de :  $1200=H \log_2 (1+S/B)$ . On obtient les valeurs suivantes de H pour un rapport signal sur bruit égal à S/B=20, 30, 40dB :  $H=280\text{Hz}$ ,  $H=245\text{Hz}$ ,  $H=230\text{Hz}$ . Si la ligne est en full duplex, il faut que la bande passante soit au moins égale à deux fois les valeurs précédentes.
- b) Les quatre phases peuvent être égales respectivement à 0 pour représenter 00,  $\pi/2$  pour représenter 01,  $\pi$  pour représenter 10 et  $3\pi/2$  pour représenter 11. La suite 001001 représente donc trois signaux sinusoïdaux correspondant aux phases  $0, 3\pi/2$  et  $\pi/2$ .
- c)  $1-\theta$  est la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur sur un bit. Donc la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur sur 1000 bits est de  $(1-\theta)^{1000}=x$  et donc la probabilité qu'il ait au moins un paquet erroné de 1000 bits d'obtient simplement : pour  $\theta=10^{-3}$  on obtient  $1-x=0.633$  ; pour  $\theta=10^{-4}$  on obtient 0.095 pour  $\theta=10^{-5}$  on obtient 0.009.

### Exercice 83

On souhaite analyser le comportement d'un multiplexeur temporel par caractère (qui multiplexe des caractères et non des trames ou des paquets) chargé de gérer le trafic provenant de  $N$  terminaux asynchrones fonctionnant à 110bit/s. Un caractère émis sur une ligne de basse vitesse est composé de 7 bits de donnée, 1 bit de parité, 1 bit Start et 2 bits Stop. Le débit de la ligne haute vitesse est de 9600bit/s. De plus 5% de la capacité de la ligne haute vitesse sont réservés à la signalisation et la synchronisation.

- a) Quel est le nombre  $N$  maximal de terminaux que le multiplexeur peut superposer ?
- b) Si  $N=100$ , quel est le taux d'utilisation de la ligne haute vitesse ?
- c) On veut multiplexer sur une voie à haute vitesse trois voies de qualité haute fidélité (hi-fi) avec une bande passante de 25khz. On numérise les voies basse vitesse par la technique MIC. En supposant que la numérisation s'effectue sur huit bits, quel est le débit de la voie hi-fi une fois numérisée ?
- d) Si le rapport signal sur bruit est de 10, quelle est la largeur minimale de bande requise pour faire transiter la parole hi-fi ?
- e) Qu'en déduire ? Pourquoi est-il intéressant de numériser la parole avant de la transporter ?
- f) On multiplexe les trois voies hi-fi numériques par le multiplexeur temporel. En supposant que la transmission s'effectue par une trame comprenant dix échantillons de chaque voie hi-fi complétée de 2 intervalles de temps (IT) de verrouillage et de signalisation, quel est le débit total demandé par la voie haute vitesse ?

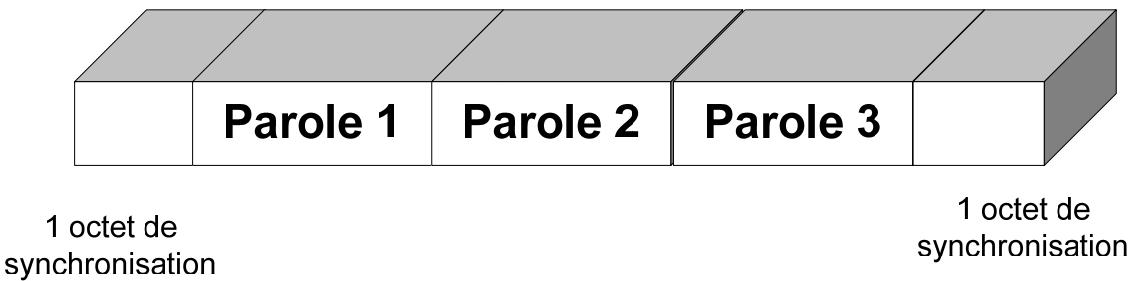


Figure 8-17

- g) On suppose que le signal électrique soit propagé à la vitesse de 200000km/s. Calculer le temps de propagation de ce signal sur 100km.
- h) En supposant qu'un octet de la voie basse vitesse se présente juste au moment où la partie de la trame qui lui est consacrée se termine, calculer le temps d'attente de cette trame et la quantité de mémoire tampon que le multiplexeur doit posséder ? Qu'en déduire par rapport au temps de propagation ?
- i) Peut-on remplacer le multiplexeur temporel par un multiplexeur statistique ?
- j) Des erreurs de transmission peuvent se reproduire sur la voie haute vitesse. Si le taux d'erreur par bit est de  $10^{-6}$ , donner la valeur du taux d'erreur sur une trame.
- k) Faut-il rajouter une technique de reprise sur erreur ?

## Corrigé exercice 83

- a) La ligne haute vitesse possède un débit utilisant de 95p. 100 de 600 bit/s, soit 9120 bit/s. Les lignes de basse vitesse étant de 110 bit/s, elles correspondent à un transport de 10 caractères par seconde. Comme le multiplexeur enlève les bits Start et stop, cela fait un débit de 10 octets par seconde, c'est-à-dire 80 bit/s. Sur une ligne à 9120 bits utiles par seconde, cela fait au maximum 114 terminaux.
- b) S'il ya 100 terminaux branchés sur le multiplexeur, cela fait un débit maximal de  $100 \times 80 = 8000$  bit/s et donc une utilisation de  $8000 / 9600 = 0.83$ .
- c) Pour numériser la voie hi-fi, il faut échantillonner à au moins deux fois la largeur de la bande passante, c'est-à-dire à 50 KHz. Si chaque échantillon est codé sur un octet cela fait un débit de  $50000 \times 8 = 400$  Kbit/s.
- d) Pour faire transiter 400Kbit/s sur une voie dont le rapport signal sur bruit est de 10, il faut une bande passante de H déterminée par :  $400 \text{ Kbit/s} = H \log_2 (1+S/B)$ . On en déduit  $H=112\text{Khz}$ .
- e) La question précédente montre que pour transporter une voie analogique de 50kHz, il faut une largeur de bande égale à 115kHz. La numérisation ne semble pas avantageuse. Cependant plusieurs fonctionnalités démontrent l'intérêt de cette solution :
1. Une compression peut être exercée, réduisant le débit numérique.
  2. La qualité de la parole hi-fi est excellente.
  3. Lors du multiplexage, plusieurs paroles peuvent passer sur une voie haute vitesse par un multiplexage temporel. Sinon, dans ce dernier cas, il aurait fallu effectuer un multiplexage en fréquence, qui aurait fortement diminué la bande passante disponible.
- f) Il y a 30 échantillons plus 2 octets supplémentaires, soit 32octets par trame. Pour 10 octets on aurait un débit de 400 kbit/s. On en déduit le débit de la voie haute vitesse :  $400 \times 32 / 10 = 1280$ kbit/s.
- g) Pour 100km, il faut  $100 / 20000 = 0.5$  ms.
- h) Un octet attend au maximum la transmission de 22 octets sur la voie haute vitesse, soit une durée de :  $22 \times 8 / 1280 = 0.1375$  ms = 137.5  $\mu$ s. Ce temps n'est pas négligeable par rapport au temps de propagation et doit donc être pris en compte pour le délai de bout en bout.
- i) On peut remplacer le multiplexeur temporel par un multiplexeur statique si le délai des voies basse vitesse devient variable. A priori, ce n'est pas le cas de notre exemple.
- j) Une trame est composée de  $32 \times 8 = 256$ bits. Si  $(1- \theta)$  est la probabilité qu'il n'y est pas d'erreur sur 256bits est de  $(1- \theta)^{256} = s = 0.999744$ . La probabilité qu'il y ait au moins une erreur sur une trame de 256 bits est de  $1-s = 0.356 \times 10^{-3}$ .
- k) Pour des voies de musique ou de parole, il n'est pas nécessaire d'ajouter une technique de détection et de retransmission sur erreur. Il est même conseillé de ne pas en ajouter car le temps mis pour récupérer les erreurs compliquerait la communication.

### **Exercice 84**

*On veut étudier l'interface RNIS (Réseau Numérique à Intégration de Service) de base, qui permet de faire transiter simultanément trois canaux sur une même liaison. Cette interface commercialisée par plusieurs opérateurs permet de faire transiter deux voies téléphoniques et une voie de donnée. Les deux voies téléphoniques proposent un débit de 64kbit/s, et la voie de données un débit de 16kbit/s. l'interface étant numérique, on peut remplacer directement une communication téléphonique par un transfert de données allant à la vitesse de 64kbit/s*

- a) L multiplexage étant temporel et la trame globale contenant les trois tranches associées aux trois communications simultanées durant  $125\mu s$ , en déduire la structure de cette trame.
- b) Sachant que dans la trame, il faut ajouter six bits pour la signalisation et la synchronisation, quelle est la vitesse globale de l'interface RNIS de base ?
- c) L'interface RNIS primaire permet dans des conditions similaires de faire transiter sur une liaison physique trente voies de téléphone à 64kbit/s et une voie de données à 64kbit/s également. Quelle doit être la structure de la voie à haute vitesse si un multiplexage temporel est effectué avec une trame de durée toujours égale à  $125\mu s$  ?
- d) En fait il existe un canal supplémentaire d'une vitesse de 64kbit/s pour la signalisation et la synchronisation. Quelle est la vitesse globale de l'interface ? Pourquoi a-t-on choisi cette vitesse ?
- e) A la différence des Européens, les Américains ont choisi une interface primaire de vingt trois voies téléphoniques et d'une voie de signalisation et de synchronisation. Toutes ces voies ayant un débit de 64kbit, quelle est la capacité globale de l'interface ? pourquoi une telle différence avec ce qui se passe en Europe ?
- f) Est-il possible d'envisager un multiplexage statistique sur des interfaces primaires ?
- g) Quel est l'intérêt pour un utilisateur de prendre un abonnement à l'interface de base du RNIS plutôt que de s'abonner à deux lignes téléphoniques ?
- h) On veut maintenant comparer un accès réseau par un modem ADSL sur une ligne téléphonique et un accès par câblo-opérateur. Les techniques de multiplexage sont-elles comparables ? les comparer à la technique de multiplexage exercée dans le RNIS bande étroite. (les interfaces proposées dans la première partie de cet exercice correspondent au RNIS bande étroite).
- i) Chez les câblo-opérateurs, l'accès à internet s'effectue par le biais d'un modem câble. Expliquer ce que fait ce modem.
- j) La parole téléphonique chez les câblo-opérateurs peut aussi utiliser un équivalent du modem câble. Expliquer ce que fait ce modem et donner son débit.
- k) Dans quel cas les voies de télévision utilisent-elles l'équivalent d'un modem câble ?
- l) Essayer d'effectuer une conclusion sous forme de comparaison des avantages et des inconvénients des deux solutions.

### **Corrigé exercice 84**

- a) Cette trame doit comprendre deux champs d'un octet correspondant aux deux circuits à 54 kbit/s et un champ de 2 bits correspondant au canal paquet à 16 kbit/s.
- b) L'interface RNIS de base comprend donc  $8+8+2+6=24$  bits toutes les  $125\mu s$ . La vitesse est donc de  $24 \times 8000 = 192$  Kbit/s.
- c) L'interface transporte 31 octets toutes les  $125\mu s$ , ce qui correspond à une vitesse de 1.984 Kbit/s.

- d) Si l'on ajoute l'octet de supervision supplémentaire, l'interface correspond à 32 octets toutes les 125 µs. Sa vitesse est donc de 2 Mbit/s. Cette valeur a été choisie pour correspondre à l'infrastructure de communication développée pour les groupes primaires en Europe.
- e) Les Américains ont un total de 24 octets toutes les 125 µs, soit une vitesse de 1,526 Mbit/s. Cette valeur correspond aux liaisons T1 développées par les Américains.
- f) On peut envisager d'effectuer un multiplexage statistique s'il n'y a pas que des flots constants. En particulier, il est souvent possible de faire passer 2 voies de parole sur une seule voie à 64 Kbit/s.
- g) Le premier intérêt est d'avoir une liaison numérique et la possibilité de véhiculer jusqu'à 128 Kbit/s. Le second est d'avoir un canal de signalisation permettant de prendre en charge des données utilisateur sous forme paquet à des débits peu élevés.
- h) Non, les techniques de multiplexage ne sont pas comparables puisque les flots des modems ADSL ne sont pas multiplexés mais empruntent les fils métalliques du téléphone, qui permettent à chaque utilisateur d'avoir sa propre voie de communication avec l'opérateur. Avec un modem câble, les voies utilisateur sont multiplexées sur un câble commun qui remonte jusqu'à la source. Aucune des deux technologies du RNIS bande étroite, qui travaille avec un multiplexage temporel. Le modèle câble introduit un multiplexage en fréquence. Le modem ADSL effectue aussi un multiplexage en fréquence avec la parole téléphonique.
- i) Le modem câble permet de connecter un PC à un ISP. Pour cela le PC utilise une bande dans le câble qui le relie directement à l'ISP.
- j) Le modem qui transporte la parole téléphonique chez les câblo-opérateurs est du même type que pour les données. Il utilise toutefois une voie de capacité bien inférieure. Donc la largeur de bande permet de transporter la parole numérisée par un codec (souvent 32 ou 16 Kbit/s).
- k) Lorsque les canaux de télévision sont émis en analogique ou en numérique par diffusion sur le câble, le téléviseur utilise un décodeur associé au modem câble. La télévision sur ADSL suit un processus complètement différent : un canal spécifique achemine la chaîne demandée par l'utilisateur. Le canal utilise généralement une capacité de 500 Kbit/s, qui est prise sur la vitesse du modem ADSL.
- l) La technologie des câblo-opérateurs est excellente pour la diffusion d'information. En revanche elle peut poser des problèmes pour les canaux individuels si le nombre de canaux devient très grand. La technologie des modems ADSL est au contraire très bonne pour les canaux individuels, très coûteuse pour les applications ayant une diffusion massive.

### **Exercice 85**

*La technique de transmission appelée SONET (Synchronous Optical Network) transporte de façon synchrone une trame toutes les 125µs. Cette trame contient neuf tranches qui à leur tour contiennent trois octets de supervision et 87 octets de données.*

- a) Donner les raisons pour cette synchronisation.
- b) Quelle est la capacité de transmission globale de SONET ?
- c) Quelle est la capacité de transport efficace, c'est-à-dire disponible pour l'utilisateur ?
- d) Cette interface SONET multiplexe de nombreux utilisateurs qui doivent venir mettre leurs paquets dans la trame. Si l'on suppose que tous les clients ont des paquets d'un seul octet au total et qu'ils n'aient le droit que d'en mettre un seul par trame, quel est le débit par utilisateur ? e déduire le nombre de voies téléphoniques que peut transporter un canal SONET.

- e) Si dans une trame SONET on met des cellules ATM de 53 octets dont 48 octets de données, quel est le débit utilisé ?
- f) Cette solution permet de multiplexer plusieurs clients par le biais de leurs cellules ATM. Y'a-t-il multiplexage statistique ?
- g) La version de base présentée ici s'appelle SONET 1 ou OC-1 (Optical Carrier 1). Il existe des multiples de cette version de base pour lesquels il suffit de multiplier la longueur de la trame par n pour avoir la version SONET n ou OC-n Aujourd'hui l'OC-192 et l'OC-768 sont implantés. Quels sont les débits de ces interfaces? Combien de lignes téléphoniques peut-on y faire passer ?
- h) On s'en sert pour faire transiter des paquets IP. Si l'on suppose que la longueur moyenne des paquets IP soit de 200 octets, quelle devrait être la puissance d'un routeur internet qui recevrait 4 liaisons OC-768 ?

### **Corrigé exercice 85**

- a) Pour atteindre de très hautes vitesses, il faut que l'émetteur et le récepteur soient bien synchronisés. C'est la raison pour laquelle SONET, qui maintient sans arrêt cette synchronisation est une bonne solution pour les hauts débits.
- b) La capacité de transmission est d'une trame de 810 octets toutes les 125 µs, ce qui donne :  $810 \times 8 \times 800 = 51.84 \text{ Mbit/s}$ .
- c) L'utilisateur a 783 octets disponibles toutes les 125 µs. La capacité est donc de :  $783 \times 8 \times 800 = 50.112 \text{ Mbit/s}$ .
- d) Cela fait toutes les 125 µs par utilisateur ce qui correspond à une voie téléphonique sans compression. Il peut donc y avoir 783 voies téléphoniques en parallèle.
- e) Il y a la possibilité de mettre  $783 / 53 = 14$  cellules, soit  $14 \times 48 = 672$  octets utiles sur les 810 octets. Cela donne un débit utile de :  $672 \times 8 \times 800 = 43 \text{ Mbit/s}$ .
- f) Oui il y a un multiplexage statistique car les clients peuvent utiliser les cellules ATM quand ils en ont besoin.
- g) L'OC-192 et L'OC-768 correspondent à des multiples de 51.84 Mbit/s, c'est-à-dire  $192 \times 51.84 = 9.953 \text{ Gbit/s}$  et  $768 \times 51.84 = 39.813 \text{ Gbit/s}$ , que l'on appelle 10 et 40 Gbit/s. Nous avons vu à la question d que l'OC-1 possédait 783 octets permettant de réaliser 783 voies de téléphonie en parallèle. Le nombre d'octets disponibles dans une trame OC-192 est donc 192 fois plus grand, c'est-à-dire  $783 \times 192 = 150336$  lignes téléphoniques. De la même façon, nous avons  $783 \times 768 = 601344$  lignes téléphoniques sans compression dans un OC-768.
- h) Dans une trame OC-768, il y a 601344 octets. On a donc 3000 paquets IP toutes les 125 µs, soit 2.405 millions de paquets par seconde. S'il y a 4 liaisons à gérer, cela fait un total de près de 10 millions de paquets IP par seconde.

### **Exercice 86**

*On considère une liaison entre deux nœuds de transfert*

- a) Montrer que l'objectif d'un protocole de niveau trame est de transporter des paquets d'un nœud de transfert à l'autre
- b) Les protocoles du niveau trame de première génération étaient du type send –and–wait, c'est à dire que le nœud émetteur émettait une trame puis attendait l'acquittement avant d'émettre une deuxième trame. Montrer que cette solution n'est plus acceptable dans les réseaux à très haut débit.

- c) On utilise aujourd’hui des protocoles avec anticipation, qui permettent d’émettre une nouvelle trame sans avoir reçu l’acquittement de la trame précédente. Montrer que cette solution permet à l’émetteur de ne pas s’arrêter de transmettre.
- d) Si  $N$  est la taille de la fenêtre d’anticipation, quel rapport y’a-t-il entre cette valeur, la vitesse d’émission et la longueur de la trame (On suppose que le temps de propagation est négligeable dans un premier temps puis non négligeable ensuite) ?
- e) Si une technique de reprise d’erreur est incorporée dans un protocole de niveau trame, montrer que la taille de la fenêtre  $N$  nécessaire pour que l’émetteur ne s’arrête pas de transmettre est égale au nombre de trames qui doivent pouvoir être émises pendant le temps de deux aller et retour.

### **Corrigé exercice 86**

- a) Les paquets ne pouvant pas être émis directement sur un support physique puisqu’ils n’y a pas d’indication de début ou de fin, il faut les encapsuler dans des trames. Le rôle d’un protocole de niveau trame est de transporter des paquets d’un nœud à un autre.
- b) Dans un protocole de type send-and-wait, l’émetteur est obligé de s’arrêter de transmettre après chaque trame transmise. Cela ne fait que peu de temps si l’acquittement arrive peu après la fin de la transmission. Lorsque les temps de propagation s’allongent en comparaison des temps d’émission, ce qui est le cas lorsque le débit d’une liaison est très élevé, le temps d’attente de l’acquittement s’allonge également, et la propagation de temps perdu sans transmettre devient importante.
- c) En effet, si l’émetteur n’est pas obligé de stopper de transmettre pour attendre les acquittements, il n’y a pas de temps à perdu.
- d) Si le temps de propagation est négligeable, il n’y a pas besoin d’anticipation puisque l’acquittement revient tout de suite. Le temps d’émission d’une trame est égal à la longueur de la trame multipliée par la vitesse de transmission. Si le temps de propagation n’est pas négligeable et set égal à  $T$ , il faut calculer la valeur obtenue par  $T$  divisée par le temps d’émission pour avoir le nombre de trame  $M$  que représente le délai de propagation. L’anticipation  $N$  doit être au moins égale à  $2(M+1)$ .
- e) Si une technique de reprise sur erreur est incorporée dans le protocole, il faut que l’émetteur puisse continuer à émettre pendant le temps de la reprise. Comme il faut un temps aller-retour supplémentaire pour effectuer la reprise la valeur de la fenêtre d’anticipation doit être doublée.

### **Exercice 87**

*Soit un protocole de niveau trame permettant la communication entre deux nœuds de transfert.*

- a) Si la trame Ethernet est adoptée sur cette liaison, décrivez la succession de tâches effectuées par le nœud d'émission et le nœud de réception.
- b) Même question mais avec la trame ATM utilisée par le protocole de liaison.
- c) Comme il n'y a pas d'acquittement dans les protocoles Ethernet et ATM, comment s'effectuent les reprises sur erreur ?

### **Corrigé exercice 87**

- a) Le nœud d'émission met le paquet IP dans la trame Ethernet qui est émise sur le support de communication ; Le récepteur reçoit la trame Ethernet et la décapsule pour le paquet IP.
- b) Le nœud d'émission fragmente le paquet et met les fragments dans les cellules ATM qui sont envoyées sur le support physique. Le récepteur récupère les cellules ATM, qui sont décapsulées puis rassemblées pour reformer le paquet IP.
- c) Dans le cas d'Ethernet la reprise sur erreur ne peut se faire que par les couches supérieures à IP, c'est-à-dire au niveau TCP. Dans le cas d'ATM, la couche de fragmentation-réassemblage peut comporter une technique de détection d'erreur et reprise sur erreur.

### **Exercice 88**

*Un réseau IP a pour objectif de transporter des paquets IP d'une machine terminale vers une autre. Les nœuds de transfert sont des routeurs.*

- a) Montrer que pour transporter des paquets IP d'un routeur vers un autre, il faut un niveau trame.
- b) Si l'on choisit un niveau trame de type PPP, montrer que le champ de données de cette trame est constituée du paquet IP.
- c) Montrer que la fenêtre de contrôle de PPP englobe des paquets pouvant appartenir à des utilisateurs différents.

### **Corrigé exercice 88**

- a) Le paquet IP ne peut pas être émis directement sur le support physique. Pour l'émettre, il faut l'encapsuler dans une trame.
- b) Comme pour toute autre transmission il faut encapsuler le paquet IP dans une trame PPP.
- c) Plusieurs circuits virtuels peuvent emprunter la même liaison. Le protocole PPP ne fait aucune différence entre les paquets des différents circuits virtuels. Ce protocole englobe donc des paquets provenant de différents utilisateurs.

### **Exercice 89**

*On considère une liaison LAP-B d'une capacité de transmission de 2Mbit/s.*

- a) Si les trames ont une longueur moyenne de 2000 bits, quelle devrait être la taille minimale de la fenêtre pour que la liaison ne soit jamais bloquée dans le cas où il n'y a pas d'erreur ? (Ne pas tenir compte de la taille maximale imposée par la procédure LAP-B).
- b) Même question mais en supposant qu'il y ait parfois des trames en erreur et que la procédure de reprise soit REJ.
- c) Même question en supposant que la procédure de reprise soit SREJ.
- d) Même question mais en supposant qu'il y ait successivement trois trames en erreur, d'abord avec la technique REJ, puis la technique SREJ.
- e) La trame RNR peut-elle servir de contrôle de flux ?
- f) On considère que le taux d'erreur soit de  $10^{-5}$ . Calculer la probabilité qu'une trame soit en erreur.
- g) Si la trame doit passer successivement par cinq liaisons identiques, quelle est la probabilité pour que la trame soit en erreur au récepteur ? (On suppose qu'il n'y ait pas de reprise sur erreur).
- h) Pour ce réseau de 5 liaisons en série, le relais de trame peut-il être une solution mieux adaptée qu'une infrastructure de réseau ayant 5 procédures LAP-B de suite ?
- i) Si l'on suppose que le niveau paquet soit de type IP, quel serait l'avantage de remplacer le protocole LAP-B sur une liaison à 2Mbit/s par un protocole PPP ?
- j) La trame Ethernet peut-elle remplacer la trame LAP-B ? Peut-on faire une reprise sur erreur avec la trame Ethernet ? En déduire que la trame Ethernet doit encapsuler dans sa zone de données une trame équivalente au LAP-B si l'on souhaite effectuer des reprises sur erreur.
- k) Si l'on remplace maintenant les trames précédentes par une trame ATM, peut-on effectuer une reprise sur erreur sur la liaison ?
- l) Pour détecter les pertes de cellules ATM, il est possible de rajouter dans certains cas au début de la zone de données, à l'intérieur du premier octet trois bits pour effectuer cette recherche. Trouver une solution au fonctionnement de ces trois bits pour la détection de perte d'une cellule.
- m) Pourquoi n'a-t-on choisi que trois bits au lieu d'une numérotation un peu plus longue ?
- n) Trouver une application simple dans laquelle il soit nécessaire de détecter les pertes de cellules mais dans laquelle récupérer l'erreur n'ait aucun intérêt.

### **Corrigé exercice 89**

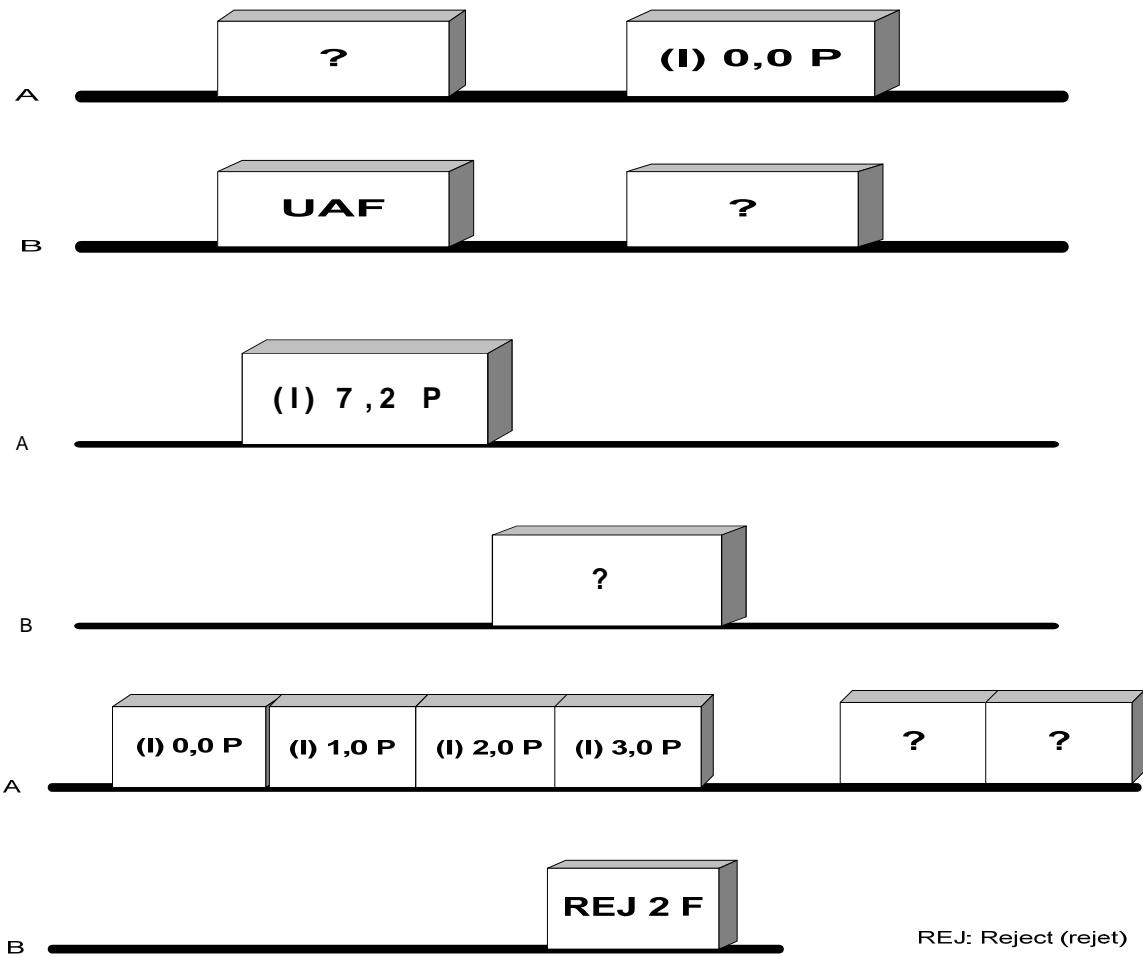
- a) Pour déterminer la taille minimale de la fenêtre pour que l'émetteur ne soit jamais bloqué, il faut connaître le temps mis pour obtenir l'accusé de réception. Cette valeur n'étant pas précisée dans l'exercice, prenons une valeur de référence  $T+100\text{ms}$  correspondant au temps maximal pour aller de l'émetteur au récepteur. Le temps maximal pour avoir un acquittement étant de  $2T$ , il faut pouvoir envoyer un nombre de paquets suffisant pour remplir cette durée. Comme pour envoyer un paquet de 2000 bits il faut 1ms, le nombre de paquets doit être d'au moins  $2T/1=200$ .
- b) Dans le cas d'une procédure LAP-B avec une reprise REJ, il suffit d'avoir la même fenêtre qu'à la question précédente. En effet, les trames étant toutes retransmises à partir de la trame erronée, il n'y a pas besoin d'une anticipation plus grande.

- c) S'il n'y a qu'une seule trame en erreur, il faut pouvoir envoyer autant de trames que 2 fois l'aller-retour. En effet, pendant que la trame est retransmise, ce qui représente un aller-retour de plus, il faut pouvoir continuer à émettre de nouvelles trames, 400 dans notre exemple. Pour retransmettre  $n$  fois la même trame, si celle-ci est erronée les  $n$  fois, il faut une fenêtre de  $n+1$  fois 200 trames. De plus, si  $n$  trames sont erronées de suite, il faut approximativement  $n+1$  fois 200 trames. En réalité, il faudrait décompter les temps de retransmission des trames erronées.
- d) Comme indiqué aux deux questions précédentes, si l'on utilise la procédure REJ, il suffit de travailler avec la fenêtre de base. A partir du moment où il y a une erreur, il y a retransmission de toutes les trames. Avec la procédure SREJ et 3 trames en erreur, il faut une fenêtre de 800.
- e) La trame RNR peut servir de contrôle de flux car elle permet d'arrêter le flot des paquets.
- f) Une trame est composée de 2000 bits. Si  $(1-\theta)$  est la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur sur un bit, la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur sur 2000 bits est de  $(1-\theta)^{2000}=X=0.9802$ . La probabilité qu'il y ait au moins une erreur dans un paquet de 2000 bits est donc de  $1-X=0.0198$ .
- g) Si la trame passe par 5 liaisons successivement, la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur est  $X^5=\delta=0.905$ . La probabilité qu'il y ait au moins une erreur vaut donc  $1-\delta=0.095$ .
- h) Comme dans le relais de trames il n'y a pas de reprise intermédiaire, la probabilité qu'il y ait une erreur de bout en bout est d'approximativement  $10p.100$ , soit d'un paquet sur 10. Dans cet exemple, il serait beaucoup plus prudent de choisir une procédure de reprise par liaison que de bout en bout. Le relais de trames est donc à déconseiller dans notre exemple où le taux d'erreur est fort.
- i) Il n'y a pas de différence fondamentale de fonctionnement entre une procédure LAP-8 et PPP. Ici, on utilise la procédure PPP parce que le paquet à transporter est de type IP.
- j) La trame Ethernet peut effectivement remplacer la trame LAP-8. Suivant la nature du protocole de niveau liaison situé au-dessus du protocole Ethernet, il y a ou non détection d'erreur et reprise sur erreur. De façon plus précise, le protocole LLC1 ne comporte pas de reprise sur erreurs, à la différence du protocole LLC2. Dans le cas le plus classique, il n'y a pas de reprise sur erreur (cas des réseaux Ethernet). Si le taux d'erreur est fort, il est concevable d'encapsuler les données à transporter dans une trame spécifique avant de les intégrer dans la trame Ethernet. Cela permet de détecter une erreur éventuellement et d'effectuer une reprise sur erreur.
- k) Non, il n'y a aucune reprise sur erreur sur les liaisons ATM.
- l) Les trois bits permettent de numérotter les cellules d'une façon cyclique. Si une cellule  $n+2$  est reçue après une cellule  $n$ , cela indique que la cellule  $n+1$  est perdue. Bien évidemment, cette solution ne permet pas d'effectuer des retransmissions puisque le nombre de cellules numérotées  $n+1$  peut-être très grand.
- m) On n'a choisi que 3 bits car une numérotation modulo 8 est suffisante. En effet, la numérotation s'exerce par circuit virtuel et non sur l'ensemble des circuits virtuels.
- n) L'application de téléphonie donne un bon exemple d'utilisation de cette solution. Lorsqu'une cellule ATM est perdue, cela signifie que 6 ms de parole sont manquantes. On peut dans ce cas remplacer ces 6 ms par un signal recomposé à partir du dernier octet reçu avant la cellule perdue et du premier octet de la cellule suivante.

### Exercice 90

Soit une liaison entre deux équipements. Un contrôleur de communication gérant une procédure HDLC est installée sur les deux stations

- Le taux d'erreur par bit est de  $10^{-4}$  sur la liaison. Quelle est la probabilité d'erreur d'une trame HDLC de 128 octets ? Quelle est la probabilité qu'il y ait successivement deux trames en erreur ?
- Le mécanisme SREJ paraît meilleur que REJ dans cet environnement ?
- On modifie le drapeau de la procédure HDLC. Pour le remplacer par la succession 01010101. Comment rendre la procédure transparente ? (Toute suite d'éléments binaires doit pouvoir être transportée dans la trame).
- Dans les schémas des figures 9-19, 9-20 et 9-21 remplacer les points d'interrogation par des trames HDLC. Pourquoi la station B renvoie-t-elle la trame REJ 2 F ?



Figures 9-19 à 9-21

- L'UIT-T préconise un contrôle de flux dans X.25 au niveau paquet (niveau réseau X.25.3) et au niveau trame (niveau liaison HDLC). Un seul contrôle n'aurait-il pas suffi ? Etudier le cas d'un multiplexage de plusieurs connexions X.25 sur une liaison HDLC.
- Dans le modèle OSI, les trames encapsulent-elles les paquets ou est ce le contraire ?

## Corrigé exercice 90

- a) Une trame HDLC est composée de  $128 \times 8 = 1024$  bits. Si  $(1-\theta)$  est la probabilité qu'il y ait pas d'erreur sur un bit, la probabilité qu'il n'y ait pas d'erreur sur 1024 bits est de  $(1-\theta)^{1024} = X = 0.903$ . La probabilité qu'il y ait au moins une erreur dans un paquet de 1024 bits est donc de  $1-X=0.097$ . La probabilité qu'il y ait deux trames en erreur se calcule par  $0.097^2=0.009$ .
- b) La probabilité qu'il y ait deux erreurs de suite étant faible (une trame sur cent), il peut être intéressant d'utiliser la procédure SREJ. Pour le savoir vraiment, il faudrait connaître l'anticipation de la procédure. Si l'anticipation est petite, la procédure SREJ est bonne. En revanche, si l'anticipation est importante, la probabilité qu'il y ait plus d'une trame en erreur pendant un temps aller-retour devient grande et la procédure SREJ peut devenir moins intéressante.
- c) Pour que la procédure soit transparente, il faut qu'il n'y ait pas la possibilité de retrouver une structure ressemblant au drapeau, et ce quelle que soit la suite entre les deux drapeaux. Il suffit, par exemple d'insérer un zéro après le 6<sup>e</sup> bit d'une séquence qui ressemble au drapeau. Après une séquence 010101, si le récepteur trouve un zéro derrière il doit l'enlever sinon c'est un drapeau.
- d) 1. A la figure 9-19, la première trame est une trame de demande d'ouverture SABM qui réclame une réponse du récepteur de type UA en mettant le bit P/F pour indiquer la réponse. Ensuite l'émetteur envoie une trame de numéro 0. La seconde trame à découvrir est de type RR, indiquant que la prochaine trame attendue possède le numéro 1 avec le bit F positionné pour indiquer que c'est une réponse.  
2. A la figure 9-20 la trame qui part de A possède u numéro 7 et attend la trame numérotée 1. La trame qui part de 8 possède donc, le numéro 2 et acquitte la trame 7 en portant la valeur 0 pour indiquer que la prochaine trame attendue doit posséder le numéro 0.  
3. A la figure 9-21 la trame REJ est envoyée de B vers A pour indiquer que la trame 2 est erronée et qu'il faut la retransmettre ainsi que toutes les trames suivantes. Le bit F est positionné puisque l'émetteur réclame une réponse avec son bit P. Les trames partant de A avec un point d'interrogation sont donc les trames numérotées 2 et 3 attendant toujours la trame 0.
- e) Effectivement le contrôle de flux se place à la fois à la couche 3 et à la couche 2 mais pas exactement sur les mêmes entités. Les flots des paquets sur les circuits virtuels sont contrôlés par le niveau paquet de X.25. Le niveau HDLC contrôle quant à lui les trames entre deux nœuds, c'est-à-dire toutes les trames de tous les circuits virtuels qui passent entre deux nœuds. Ces deux contrôles ne sont pas identiques.
- f) Dans le modèle ISO les paquets sont encapsulés dans les trames.

## Exercice 91

On considère le réseau Ethernet illustré à la figure 9-22

- a) Sur chaque brin dix utilisateurs sont connectés. Il y'a donc 40 utilisateurs au total. On suppose que sur chaque brin, huit utilisateurs émettent en diffusion c'est-à-dire que leur message est destiné à l'ensemble des utilisateurs. En utilisant les répéteurs comme illustré à la figure 9-22, quel est le débit maximal de ce réseau ?

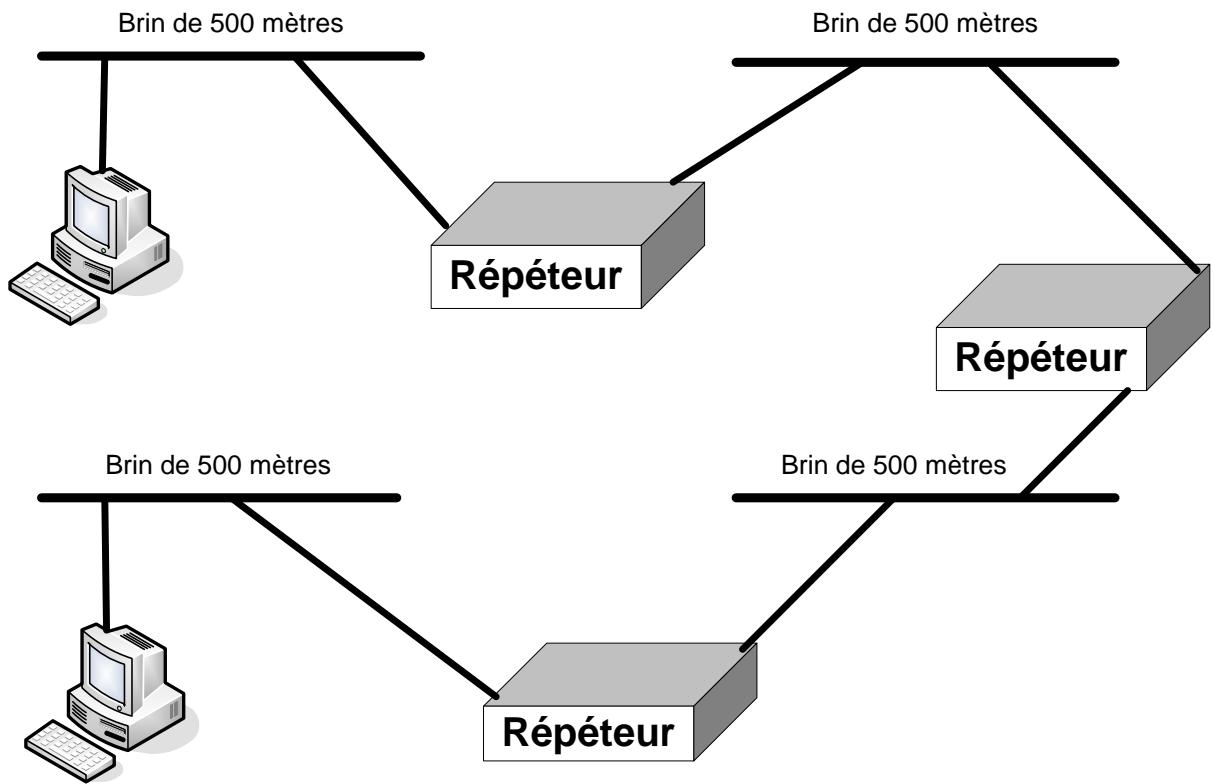


Figure 9-22

- b) On remplace les répéteurs par des ponts qui sont des organes intelligents capables de traiter des adresses MAC et qui filtrent les trames : seules les trames qui ont une adresse extérieure aux brins d'où ils proviennent sont retransmises. Quel est le débit théorique total de tous les brins interconnectés de la figure lorsque les répéteurs sont remplacés par des ponts ? Quel est le débit maximal étant donné la configuration des utilisateurs ?
- c) Pour augmenter le débit on remplace un brin par un commutateur qui commute les trames Ethernet. Sur ce commutateur les dix utilisateurs sont connectés en étoile. Chaque utilisateur peut donc accéder directement au commutateur. En d'autres termes il y a quarante réseaux Ethernet et chaque réseau possède deux connexions, l'une du client et l'autre du commutateur. Les commutateurs sont reliés entre eux par des liaisons bipoints. Quel est le débit théorique total de ce système ?

- a) Le débit maximal de ce réseau est de 10Mbit/s.
- b) Le débit maximal théorique est de  $4 \times 10$  Mbit/s, soit 40Mbit/s si les émetteurs ne transmettent que sur leur propre brin. Comme 20p.100 des stations émettent en diffusion et en notant  $\lambda$  le débit de chaque émetteur, il y a  $8\lambda$  qui diffusent. Comme il y a également  $8\lambda$  en local, sur chaque Ethernet il y a la moitié en trafic local et la moitié en trafic général. 5Mbit/s restent donc en local et 5Mbit/s sont diffusés sur le réseau. Le trafic total est donc de  $5 \times 4 + 5 = 25$ Mbit/s.
- c) Le débit total des clients vers leur commutateur est de  $10 \times 10$ Mbit/s, c'est-à-dire 100Mbit/s. Le réseau peut théoriquement accepter de transporter 400Mbit/s si les liaisons sont également capables de prendre en charge l'ensemble du débit qui va d'un commutateur à un autre.

### **Exercice 92**

*Pour se connecter à son serveur, un client IPv4 doit passer par un premier réseau Ethernet puis par un routeur sur un réseau WAN puis de nouveau par un routeur sur une liaison PPP qui aboutit au serveur.*

- a) Indiquer la suite d'encapsulations-décapsulations effectués pour aller du terminal du client jusqu'au serveur.
- b) Les adresses IP du client et du serveur sont respectivement 23.18.237.34 et 170.178.45.3. Le client et le serveur sont-ils sur le réseau ?
- c) Dans le premier réseau Ethernet, montrer que le PC du client doit connaître l'adresse Ethernet du routeur.
- d) En supposant que le PC du client ne connaisse pas l'adresse Ethernet du routeur, montrer qu'une diffusion permet d'obtenir cette adresse Ethernet et aussi d'envoyer les paquets IP vers le routeur.
- e) On suppose que le réseau WAN soit un réseau X.25. Trouver une solution pour ouvrir un circuit virtuel avec le deuxième routeur, en considérant qu'on ne connaît ni son adresse X.25 ni son adresse IP au début de la communication.
- f) Si l'on suppose que le réseau WAN soit maintenant un réseau ATM, la solution pour ouvrir le circuit virtuel ATM entre les deux routeurs est-elle du même type que celle de la question précédente ?
- g) Faut-il fragmenter les paquets IP pour traverser le réseau ATM ?
- h) Les paquets IP peuvent-ils passer par des routes différentes entre le client et le serveur dans la configuration étudiée ?
- i) Jusqu'à combien de paquets IP peut-on envoyer sans acquittement ?
- j) On suppose que le réseau WAN soit celui d'un ISP (Internet Service Provider), par exemple, celui de la compagnie UUNET. Cet opérateur garantit un temps de réponse, sur son propre réseau, de 85ms sur la partie américaine, de 85ms sur la partie européenne et de 120ms entre son routeur de New York et celui de Londres. Ces garanties sont-elles possibles ?
- k) Peut-on faire de la téléphonie sur IP (Voip ? Voice Over IP) entre le client et le réseau, si l'un est situé à Los Angeles et l'autre à Paris ?

### **Corrigé exercice 92**

a) Voir la figure M. (Figure M)

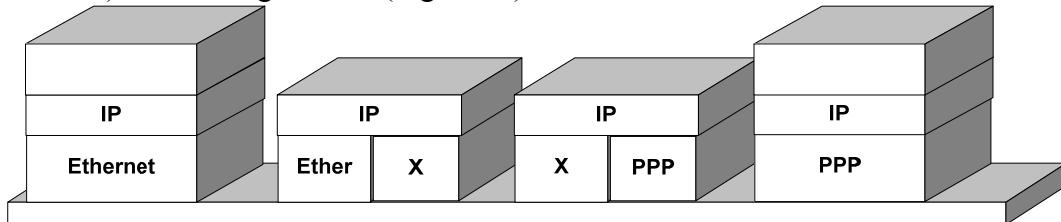


Figure M

- b) Non, le client n'est pas sur le même réseau que le serveur car il n'y a pas d'adresse sous-réseau commun.
- c) Pour transporter une trame Ethernet sur un réseau, il faut nécessairement mettre une adresse dans la trame pour l'acheminer jusqu'au routeur. Cette adresse est celle du routeur de sortie du réseau Ethernet.
- d) Si l'émetteur ne connaît pas d'adresse Ethernet du routeur de sortie, il peut la trouver par une diffusion, en demandant si l'un des récepteurs connaît la correspondance d'adresse entre l'adresse IP de sortie et l'adresse Ethernet correspondante.
- e) Au début de la commutation, l'émetteur ne connaît que l'adresse IP du destinataire, il n'a aucune raison de connaître l'adresse IP des passerelles intermédiaires. Il faut pourtant trouver l'adresse de la sortie du réseau WAN dans la technologie utilisée. Si le réseau WAN est un réseau X.25, il faut trouver l'adresse X.25 du routeur de sortie. Une solution est d'utiliser des serveurs d'adresses capables de trouver sur un domaine donné les correspondances d'adresse. Avant d'effectuer l'ouverture du circuit virtuel, il faut trouver l'adresse X.25 une adresse conforme à la normalisation internationale et ressemblant à l'adresse téléphonique. Un message IP part de l'émetteur et se dirige de serveur d'adresses en serveur d'adresses du réseau WAN, la correspondance d'adresse peut s'effectuer, ce qui permet d'obtenir l'adresse X.25 du routeur de sortie.
- f) Exactement de même type puisque les réseaux X.25 et ATM se ressemblent fortement. Les serveurs d'adresses effectuent la correspondance entre adresses IP et adresses ATM dans ce cas.
- g) Oui, il faut fragmenter les paquets IP car la trame ATM ne fait que 48 octets de long pour les données utilisateur.
- h) Oui, les paquets du flot IP peuvent passer par des itinéraires différents puisque les routeurs effectuent un routage pouvant modifier l'acheminement des flots. Cependant, si le réseau WAN est de type X.25 ou ATM, le fait de changer de route à chaque paquet autrement dit de changer de circuit virtuel pour chaque paquet peut s'avérer catastrophique.
- i) Le nombre de paquets IP que l'on peut envoyer sans acquittement dépend de la procédure TCP, lorsque TCP est utilisé Il n'y a pas de contrainte sur la norme UDP.
- j) Oui, ces garanties sont possibles puisque le temps de propagation est inférieur aux valeurs citées. Cependant il faut un contrôle de flux pour éviter les éventuelles pertes de temps dues aux congestions dans le réseau.
- k) Le temps de réponse garanti entre Los Angeles et Paris est de 290ms sur le réseau WAN. Pour réaliser de la téléphonie IP, il faut un temps maximal de 300ms. Pour

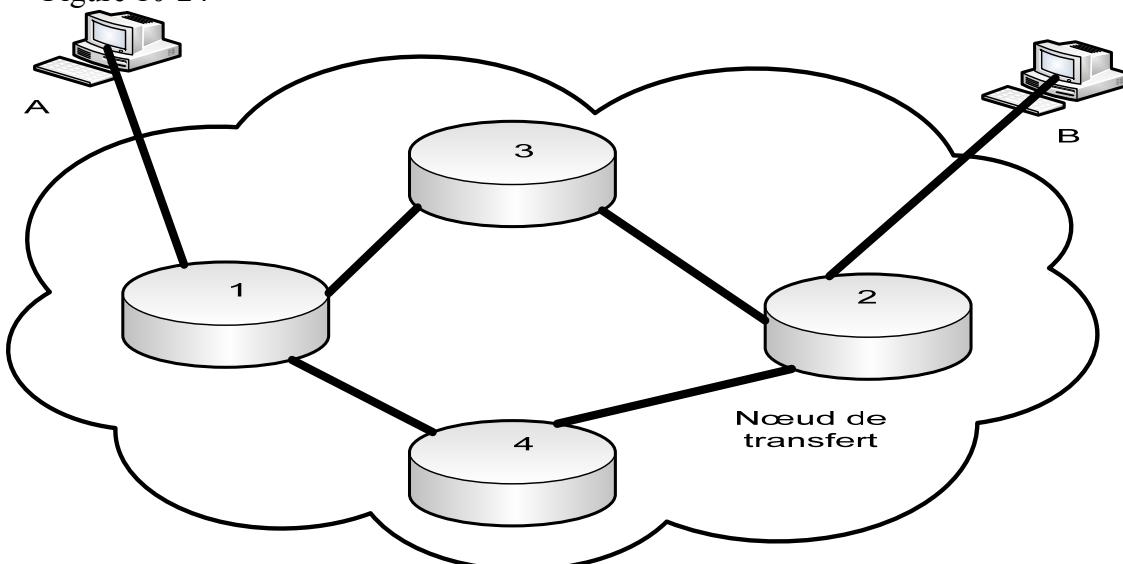
une bonne qualité, mieux vaut rester en dessous de 200ms En comptabilisant les temps dans les réseaux extrémités, la parole téléphonique n'est pas possible dans ce contexte.

### Exercice 93 :

On considère le réseau dont la topologie est illustrée à la figure 10-24. C'est un réseau à commutation de paquets possédant quatre nœuds de transfert. Un client A veut communiquer avec un client B.

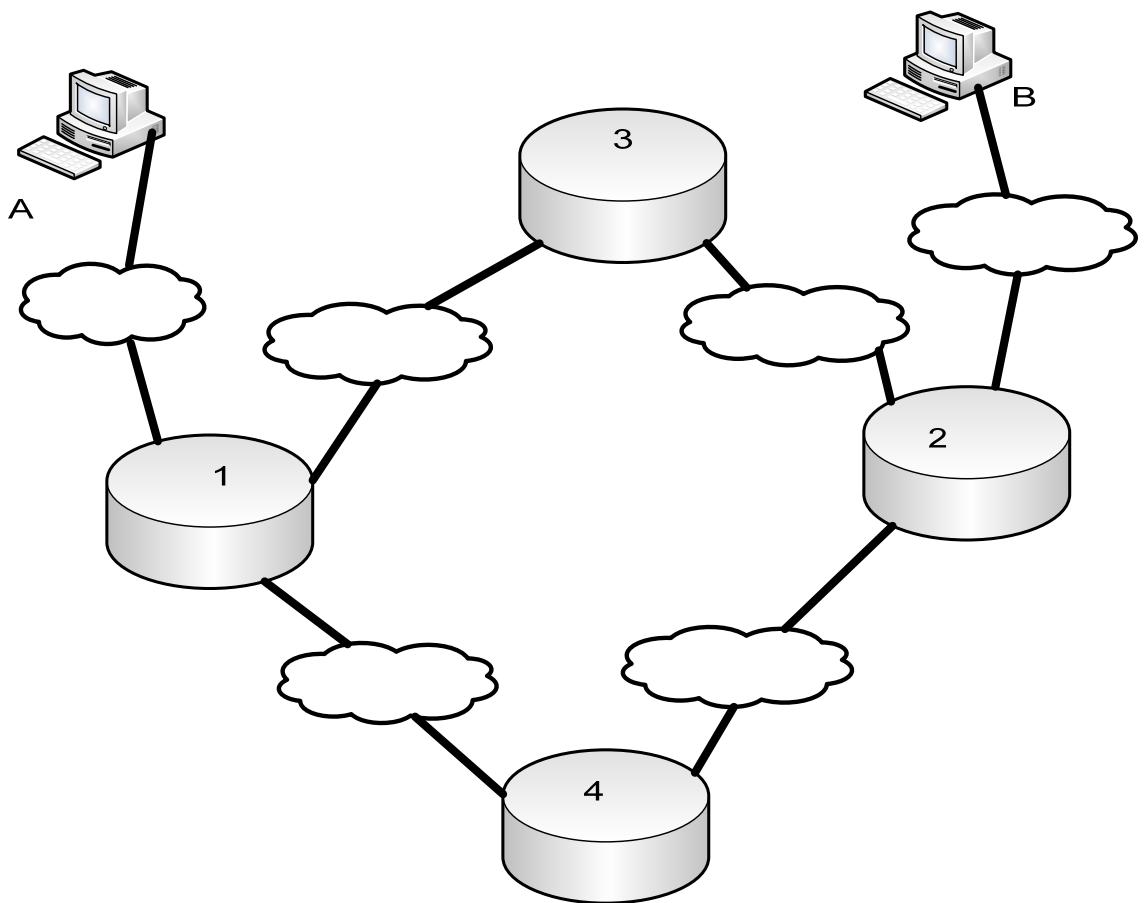
- a) On considère que le réseau est du type intranet (un réseau utilisant les protocoles d'internet mais dans un domaine privé). Quand le nœud 1 reçoit un paquet IP provenant de A, il a le choix de l'envoyer vers 3 ou 4. Comment définit-il sa stratégie

Figure 10-24



- b) Si au lieu d'être un réseau intranet, le réseau à la figure 10-24 est du type X.25, quelle est la stratégie du nœud 1 lorsqu'il reçoit un paquet d'appel venant de A, vers B pour destination ? Pourquoi est-ce différent de la réponse à la première question ?
- c) On suppose que A navigue sur le Web et qu'il accède à des serveurs différents à chaque émission de paquet. Quelle stratégie paraît-elle la meilleure, X.25 ou le protocole IP ? En expliquant les raisons.
- d) En fait, pour aller d'un nœud de transfert à un autre nœud de transfert du réseau, il faut traverser un sous-réseau, comme illustré à la figure 10-25. Les nœuds de transfert 1, 2, 3 et 4 sont des routeurs IPv4. Pour aller de A à B, il faut traverser 4 sous-réseaux. Si, dans l'ordre, ces sous-réseaux sont Ethernet entre A et 1, X.25 entre 1 et 3 entre 1 et 4, ATM entre 3 et 2 et entre 4 et 2 et enfin de nouveau Ethernet entre 2 et B, décrire à l'aide d'un schéma architectural les couches de protocoles traversées pour aller de A à B. Les paquets IP doivent-ils être fragmentés dans certains des routeurs ?

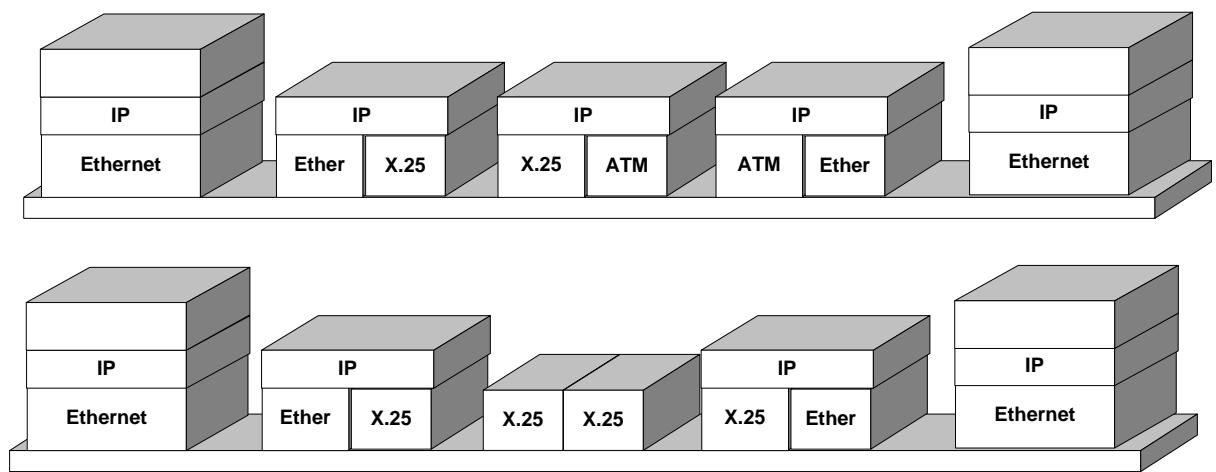
Figure 10-25



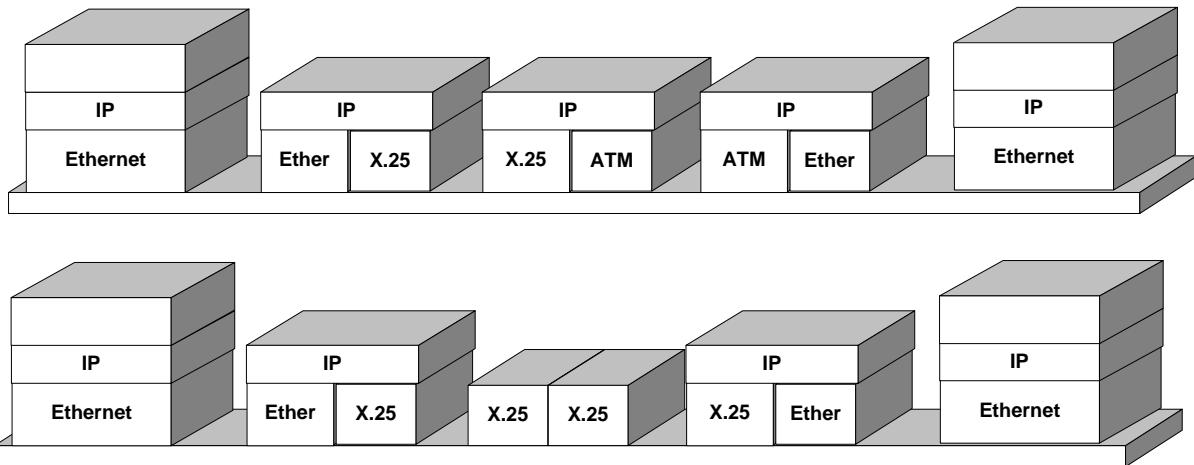
- e) L'utilisateur peut-il demander une qualité de service sur ce réseau ?
- f) Si l'on remplace l'ensemble des protocoles IPv4 par IPv6, y a-t-il fragmentation-réassemblage dans le réseau ?
- g) L'utilisateur peut-il indiquer une qualité de service pour que les paquets de son soient traités en conséquence dans les nœuds du réseau ?
- h) On revient à des nœuds 1, 2, 3 et 4, qui sont des nœuds de transfert X.25. Les deux clients A et B sont également sous X.25 mais possèdent des cartes Ethernet pour leur accès au réseau. Un circuit virtuel va-t-il s'établir dans ce réseau ?
- i) Faire un schéma architectural de ce nouveau réseau. Est-ce très différente de ce qui a été fait à la question d ?
- j) Cette solution paraît-elle viable ?
- k) Si maintenant les nœuds de transfert 1, 2, 3 et 4, sont toujours des commutateurs X.25 mais que les clients A et B soient des clients IP, qui génèrent des paquets IP, que faut-il ajouter dans le réseau pour qu'il puisse fonctionner ?

### Correction exercice 93

- a) Dans un intranet, les nœuds sont des routeurs qui gèrent les adresses IP. Le routeur d'accès décide d'envoyer les paquets vers les routeurs 3 ou 4 suivant l'indication de la table de routage, laquelle peut varier dynamiquement. Il n'y a donc pas de stratégie particulière dans ce cadre.
- b) Lorsque le nœud 1 reçoit un paquet d'appel, il est routé par une table de routage contenue dans le nœud 1. Dans ce cas, le paquet d'appel ouvre un circuit virtuel et les paquets de données du flot suivent ce circuit virtuel sans aucun choix de routage contrairement à la situation de la première question, où chaque paquet était routé individuellement. La demande d'ouverture du circuit virtuel par le paquet d'appel peut donc influencer le routage suivant les caractéristiques du flot suivant. Le routeur peut adopter une stratégie consistant à modifier sa table de routage pour satisfaire aux caractéristiques du flot suivant.
- c) La différence fondamentale entre les deux types de réseaux réside dans la technique de transfert : routage pour IP et circuit virtuel pour X.25. Si A navigue sur le web il est plus intéressant pour lui de choisir un réseau IP puisque la technique de routage ne demande pas de signalisation. Et donc pas d'ouverture ni fermeture d'un circuit virtuel, pour envoyer des flots très courts.
- d) Voir la figure N (Première figure). Si le paquet IP est trop grand pour la structure de trame dans laquelle il doit être encapsulé, il faut le fragmenter. C'est le cas pour franchir le réseau ATM dont les trames ne font que 48 octets de longueur.



- e) L'utilisateur ne peut pas demander de qualité de service car le flot doit traverser des réseaux qui ne peuvent la garantir.
- f) L'avantage d'IPv6 est de trouver la meilleure longueur du fragment pour qu'il n'y ait pas de fragmentation-réassemblage intermédiaire dans le réseau. A priori IPv6 permet cette recherche de l'optimum du segment. Dans notre cas, le passage par ATM demande une opération de fragmentation-réassemblage qui est effectuée par la couche AAL et qui peut être considérée comme indépendante d'IPv6.
- g) Oui, il est possible d'introduire dans les routeurs des gestions de la qualité de service notamment en implémentant les protocoles de gestion IntServ et DiffSrv.
- h) Oui, un circuit virtuel va s'établir entre les deux extrémités du réseau X.25. Pour introduire les paquets IP dans ce réseau à l'intérieur des paquets X.25, il y a un bond Ethernet on encapsule le paquet IP dans une trame Ethernet entre le client A et le nœud d'accès X.25. De même à la sortie du réseau, il y a de nouveau passage par l'environnement Ethernet.
- i) Voir figure O.(Deuxième figure)



L'architecture de ce réseau est semblable à celle illustrée à la figure N. La différence essentielle réside dans le nœud central, qui n'est pas un routeur mais un commutateur.

- j) Cette solution très classique est utilisée dans la plupart des réseaux X.25 qui transportent des paquets IP.
- k) Les paquets IP doivent être acheminés jusque dans les nœuds X.25 pour qu'ils soient mis dans la zone de données des paquets X.25. Comme IP est un paquet, il faut encapsuler les paquets X.25 dans des trames entre les terminaux et le nœud X.25. Plusieurs solutions existent pour cela, notamment celle de la question précédente ou l'encapsulation dans une trame PPP sur une ligne téléphonique ou dans une cellule ATM sur un modem ADSL.

#### **Exercice 94.**

On considère le réseau d'un ISP, qui utilise des liaisons à très haut débit sur lesquelles transitent des paquets IP encapsulés dans des trames PP.

- a) Indiquer les différents encapsulations et décapsulations, depuis le niveau TCP, qui sont effectuées dans ce réseau.
- b) Au niveau du protocole TCP, on souhaite étudier les fragments émis par un émetteur et les acquittements reçus. Le protocole TCP utilise l'algorithme Slow-start and congestion avoidance et des fragments de longueur constante. On suppose qu'il n'y a pas de trafic d'information du récepteur vers l'émetteur et que, à chaque segment reçu, le récepteur envoie immédiatement un acquittement. On suppose également que le temporisateur de reprise est égal à 2.

Fragment 0 émis à 51.456	Acquittement reçu à 52.739 avec n° 1
Fragment 1 émis à 52.784	Acquittement reçu à 53.923 avec n° 2
Fragment 2 émis à 52.792	Acquittement reçu à 54.056 avec n° 3
Fragment 3 émis à 54.123	Acquittement reçu à 55.773 avec n° 4
Fragment 4 émis à 54.131	Acquittement reçu à 55.992 avec n° 5
Fragment 5 émis à 54.139	Acquittement reçu à 56.043 avec n° 6
Fragment 6 émis à 54.147	

- 1) Quelles sont la taille des fragments et la vitesse de la relation d'accès ?
- 2) Le fragment 3 est-il réémis ?

- 3) A partir de quel instant le fragment 7 peut-il être émis ?
- 4) Le fragment 7 est-il un nouveau fragment ou la répétition d'un fragment déjà envoyé ?
- 5) A partir de quel instant, au plus tôt, le fragment 8 peut-il être émis ?
- 6) Que penser d'ISP qui perdrait des paquets régulièrement de façon concertée ? Quel serait l'effet sur le débit de l'utilisateur, et peut-on interpréter ce comportement comme un contrôle de flux ?

### Corrigé exercice 94

- a) Voir la figure P (figure P)

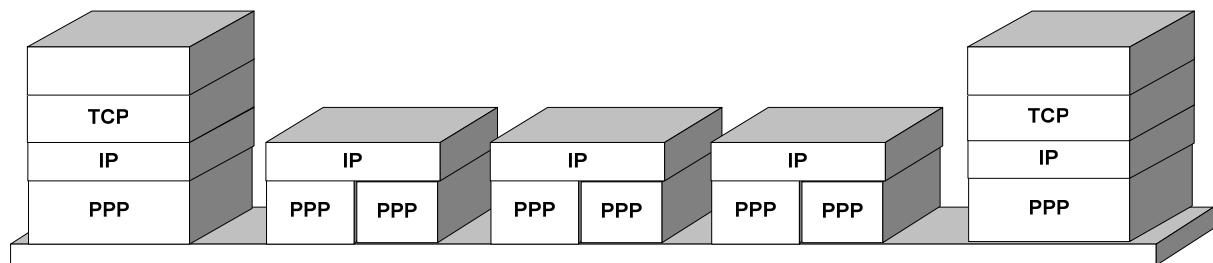


Figure P

- b) La figure Q représente des émissions et les réceptions des acquittements à l'émetteur.

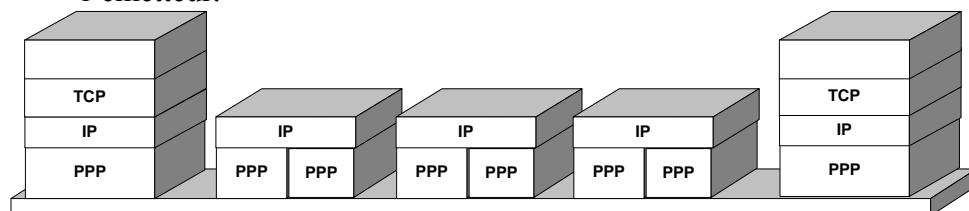


Figure P

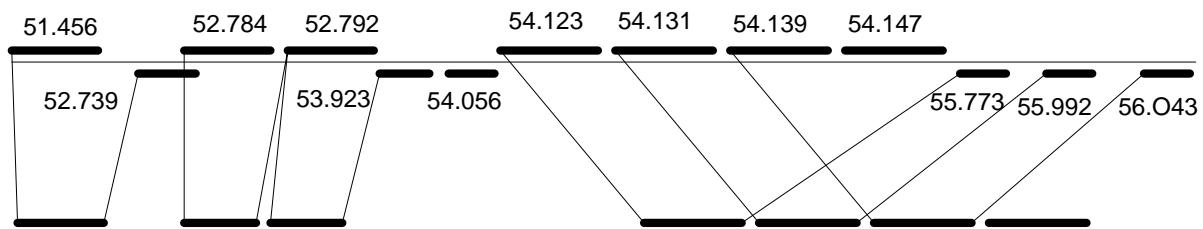


Figure Q

1. L'algorithme slow-Start indique que le paquet 0 est émis et que l'acquittement est attendu avant d'envoyer deux fragments pour que, de nouveau il y a attente avant d'émettre quatre fragments. Le fragment 1 prend un temps de 0,008s. Les fragments 3, 4 et 5 demandent également 0,008s. On en déduit que le temps de transmission d'un paquet est de 0,008s. Pour avoir la vitesse de la liaison d'accès, il faut connaître

la longueur du paquet, et plus exactement de la trame PPP qui transmet le paquet IP. Si  $L$  est la longueur de la trame PPP la vitesse de la liaison est de  $L/0,008$ . (figure Q)

2. Le fragment 3 est retardé puisqu'il n'est pas acquitté par les acquittements qui partent avec la réception des fragments 4 et 5. L'acquittement du fragment 3 s'effectue au temps 56,043. Le fragment 3 n'est donc pas retransmis puisqu'il est reçu correctement, mais dans un ordre non séquentiel du fait du routage dans le réseau.
3. Le fragment 7 est reçu juste après le fragment 6 puisqu'il n'y a pas de redémarrage en Slow-Start.
4. Le fragment 7 est un nouveau fragment.
5. Le fragment 8 est émis à la suite du fragment 7 puisque la fenêtre est de 8.
6. Un opérateur qui perdrat des paquets IP impliquerait un redémarrage en Slow-Start puisque l'acquittement correspondant n'arriverait jamais. C'est un moyen pour limiter le flot de l'utilisateur en même temps qu'une méthode de contrôle de flux : la perte d'un paquet équivaut à une réduction forte du flot de l'utilisateur.

**Exercice 95.** On considère un réseau formé de deux routeurs. Sur le premier routeur se connecte le PC du client 1 et sur le second PC du client 2. Les deux PC travaillent sous le logiciel TCP/IP pour leur connexion réseau.

- a) Les routeurs doivent-ils posséder un logiciel TCP ?
- b) L'application du client sur le PC 1 travaille, dans une fenêtre de son écran, sous la messagerie électronique SMTP. Quel en est le numéro de port ? Ce client peut-il en même temps effectuer une recherche sur un serveur Web distant ?
- c) En fait, le PC 1 effectue principalement un transfert de fichiers FTP vers le PC 2 sur le port 21. Les fragments émis ont une longueur de 8000 bits. Le premier fragment émis possède le numéro 1. Quel est le numéro de séquence du deuxième fragment émis ?
- d) Supposons que les acquittements sont regroupés tous les quatre fragments reçus. Quelle est la valeur portée dans le champ d'acquittement du premier paquet d'acquittement ?
- e) On suppose qu'un ordinateur à Paris et le second à Los Angeles et que le débit d'acheminement d'un routeur à l'autre soit de 50 ms. Sachant que la fenêtre de TCP ne peut pas dépasser 65535 octets ('valeur maximale sur 16 bits), quelle valeur maximale doit avoir le débit de la connexion pour que l'émetteur ne soit pas bloqué par le contrôle dû à la fenêtre ?
- f) Si dans l'exemple précédent, la capacité de la liaison est de 622 Mbits/s, quelle peut être l'utilisation maximale de la ligne entre les deux routeurs ?
- g) Pour éviter cette opération de capacité, il existe une option WFC (window scale factor), qui permet de multiplier la valeur de la fenêtre par  $2^n$ ,  $n$  étant la valeur indiquée dans le champ WFC. En d'autres termes, si la valeur du paramètre de l'option est 3, la nouvelle valeur de la taille maximale de la fenêtre est  $3 \times 2^n \times WNDW$ . Calculer, pour l'exemple précédent la taille du champ WFC qu'il faudrait choisir pour qu'il n'ait pas de blocage du à la fenêtre de contrôle.
- h) Le protocole TCP dans deux PC utilise l'option Timestamp. Cette option, qui intervient dans tous les paquets de la session contrairement aux autres options, qui ne concernent que le premier fragment demande un champ de 10 octets, contenant deux valeurs sur 4 octets, précédée du type d'option (8) et d'un octet donnant la longueur

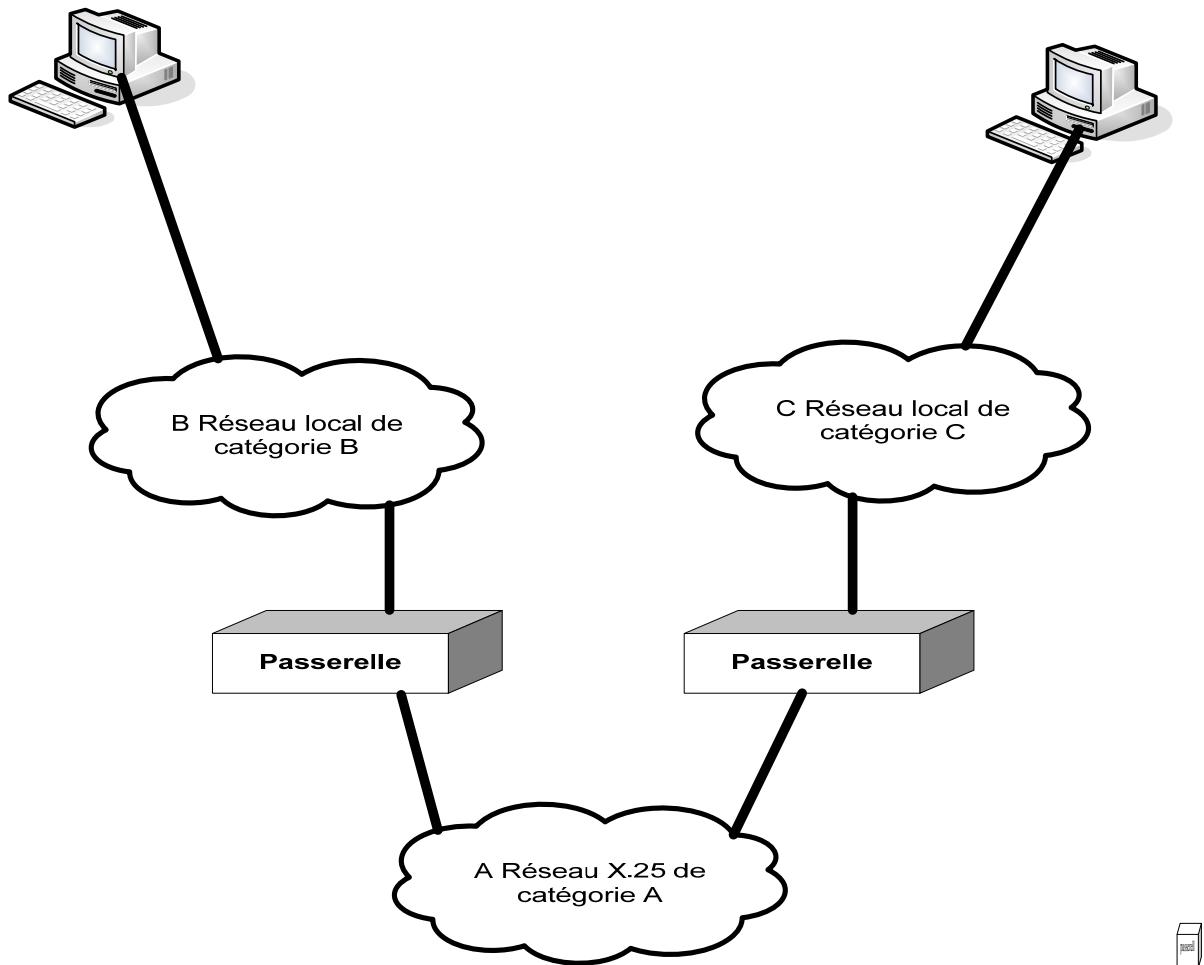
totale (10). La première valeur indique l'heure d'entrée dans le réseau. La deuxième n'est utilisée que dans l'acquittement, qui recopie la valeur d'entrée dans le réseau du paquet qu'il acquitte. A quoi cette option peut-elle être utilisée ?

### **Corrigé exercice 95**

- a) Non, les routeurs n'ont pas à posséder le logiciel TCP puisqu'ils ne sont qu'à la couche IP pour router les paquets IP.
- b) Le numéro de port est de 25. Le client peut ouvrir une autre connexion TCP lui permettant d'effectuer une recherche sur le Web.
- c) Le deuxième fragment porte le numéro 2.
- d) La valeur portée dans l'acquittement est 5, indiquant que le fragment 5 est attendu et donc que les fragments précédents sont bien acquittés.
- e) Les acquittements revenant après un délai aller-retour. Il faut que l'émetteur puisse émettre de nouvelles trames au minimum durant le temps de l'aller-retour c'est-à-dire durant 100 ms. Il faut donc émettre 65535 octets dans ce temps c'est-à-dire 524280 bits, et ce en 0,1 s. Le débit de la ligne ne doit donc pas dépasser 5,2428 Mbit/s. Si la capacité de la ligne dépasse cette valeur le récepteur est obligé de s'arrêter et d'attendre des acquittements. On voit également que s'il y a des erreurs ou bien s'il faut attendre un temporisateur de reprise lors de la perte d'un paquet la liaison n'est pas bien utilisée.
- f) Si la liaison est de 622 Mbit/s un utilisateur unique ne peut pas utiliser la ligne à sa capacité maximale sans utiliser une extension du protocole. Le taux maximal d'utilisation dans le cas standard serait de :  $5,2428/622=0,84\text{p.}100$ .
- g) Etant donné une utilisation de  $0,84\text{p.}100$ , il faut multiplier le débit par  $100/0,84=119$  et donc prendre  $n=60$ .
- h) Cette option permet de calculer le temps aller-retour. Cette valeur peut avoir plusieurs utilisations dont la plus classique est de modifier le temporisateur de reprise. La valeur à l'aller permet d'effectuer une resynchronisation des paquets par rapport à leur date d'entrée dans le réseau.

### **Exercice 96.**

*Soit trois réseaux interconnectés par des passerelles, comme illustré à la figure 11-9. On suppose que le réseau A est un réseau X.25 de catégorie A, que B est un réseau local de catégorie B et que C est un réseau local de catégorie C.*



**Figure 11-9** Trois réseaux interconnectés par deux passerelles.

- L'utilisateur du PC 1 veut émettre en direction de l'utilisateur du PC 2. En utilisant les protocoles normalisés de la couche transport, dans quelle classe doit-il émettre pour que la communication s'effectue sans problème ? Pourquoi ?
- Les utilisateurs des trois réseaux doivent pouvoir communiquer entre eux. Nous nous intéressons ici aux utilisateurs situés sur le réseau X.25 et accédant à ce réseau par un PAD (assembleur-désassembleur de paquet) permettant de récupérer des octets provenant d'un terminal non intelligent et de les regrouper dans un paquet X.25, envoyé sur le réseau et vice versa. Donner raison pour laquelle une communication de classe 4 entre un terminal PAD et un client connecté sur le réseau C n'est, à priori, pas possible. Que faudrait-il pour que cette communication soit réalisable ? Est-ce possible ?
- En supposant que les terminaux connectés sur le réseau A aient des accès directs (carte X.25 dans le terminal) et ne supportent que la classe 0 et que les clients du réseau C n'aient à leur disposition que la classe 4, comment une communication d'un client du réseau A avec un client du réseau C est-elle possible ?
- Conclure en décrivant les deux grands choix d'architecture suivants, qui s'offrent à l'entreprise qui possède un tel réseau, et en donnant pour chacun deux, les protocoles de niveau 4 à supporter sur les équipements terminaux des trois réseaux :
  - Architecture de bout optimisée pour l'ensemble et pour chaque réseau à un coût important.

2. Architecture qui ne permet pas de réaliser une communication de bout en bout, comme demandée dans la couche transport mais à un coût moindre.
- e) Si la communication entre les clients 1 et 2 est rompue, c'est-à-dire si elle est coupée suffisamment longtemps pour que même les temporiseurs de reprise ne puissent effectuer la reprise, comment s'effectue le redémarrage ?
  - f) Lorsque l'émetteur est avisé de la coupure de la communication il n'y a aucune idée du dernier paquet qui a pu passer avant la coupure. Comment peut-il déterminer le point de reprise sur lequel il va pouvoir redémarrer ?
  - g) Si la communication concerne une application de téléphone, une couche présentation est-elle utilisée ?

### **Corrigé exercice 96**

- a) Le PC doit émettre en utilisant le protocole de transport de classe 4 parce qu'il existe sur le chemin un réseau de catégorie C.
- b) Une communication avec un terminal situé sur le réseau de catégorie C demande l'utilisation d'une classe 4, laquelle est complexe et demande une puissance de calcul importante. Le PAD connecte des clients qui ne sont pas capables de gérer la couche 3 du protocole X.25 et qui n'ont aucune raison de savoir gérer la complexité d'un protocole de transport de classe 4. Pour que la communication soit acceptable deux solutions se présentent :
  1. On ajoute dans le PAD un équipement capable de gérer la classe 4 pour l'utilisateur. Cette solution n'est toutefois pas implantée dans les réseaux X.25.
  2. Le réseau X. travaille avec une classe 0 sans fonctionnalité particulière et communique avec la passerelle qui mène vers le réseau C sous une classe 0. Dans la passerelle la classe 0 est transformée en une classe 4 pour traverser le réseau C. Cette solution n'est pas acceptable pour l'environnement normalisé OSI, qui demande un contrôle de bout en bout de la part de la couche transport. Dans la deuxième solution, le bout en bout est rompu au niveau de la passerelle puisqu'il y a changement de protocole.
- c) Comme indiqué à la question précédente on passe de la classe 0 à la classe 4 dans la passerelle en interrompant la continuité de bout en bout de la couche transport.
- d) 1. Permettre à chaque terminal du réseau de travailler dans la classe optimale correspondant aux niveaux des réseaux à traverser. Si le réseau de catégorie C doit être traversé, on utilise une classe 4. Si le réseau de catégorie B doit être traversé mais pas celui de catégorie A, le terminal utilise la classe 1 ou 3. Enfin, si seul le réseau de catégorie A doit être traversé alors une classe alors une classe 0 ou 2 est employée. C'est une solution assez onéreuse puisque les terminaux doivent être capables de travailler dans la solution optimale. On pourrait opter pour l'utilisation de la seule classe 4 dans l'ensemble des machines terminales : c'est une possibilité assez classiquement utilisée pour ne pas compliquer la négociation de la meilleure classe, bien qu'elle puisse s'avérer assez lourde dans certains cas, puisque presque tous les réseaux sont de catégorie A.
  2. Abolir le bout en bout dans la couche transport et prendre sur chaque réseau le protocole le mieux adapté.
- e) Le redémarrage s'effectue au niveau des points de reprise de la couche session.
- f) L'utilisateur émetteur demande au récepteur le dernier point de reprise qu'il a reçu et à l'utilisateur de redémarrer par rapport à ce point. Ces points de reprise peuvent être de type mineur ou majeur. Pour les points de reprise mineurs, il n'est pas demandé au récepteur d'envoyer d'acquittement, de telle sorte que ce point n'est

pas un point de reprise garanti. A l'inverse, les points de reprise majeurs sont acquittés par le récepteur. Si une reprise sur un point de reprise mineur s'avère impossible, le redémarrage s'effectue sur un point de reprise majeur.

- g) Dans le cas d'une application de téléphonie, il n'y a pas besoin de point de reprise puisque les deux utilisateurs sont en interaction et que le récepteur peut indiquer à quel moment la coupure s'est produite.

### **Exercice 97.**

*Soit un réseau IP intégrant une messagerie de type SMTP.*

- a) Monter que le corps du message peut contenir un fichier.
- b) La messagerie électronique est-elle en mode avec ou sans connexion ?
- c) Dans le cas d'un transport de fichiers par le biais de la messagerie électronique, est-ce une messagerie électronique ou une technique de transfert de fichiers ?
- d) Lorsqu'un fichier à transporter est trop grand il est souvent refusé par le réseau. Pourquoi ? Le problème se situe-t-il au niveau du réseau ou de la boîte aux lettres distantes?

### **Corrigé exercice 97**

- a) Une messagerie électronique a pour objectif de transporter des messages de différents types, dont le type fichier.
- b) La messagerie est en mode sans connexion.
- c) C'est une messagerie électronique puisqu'un transfert de fichiers est en mode avec connexion.
- d) Si un fichier à transporter est trop grand l'application ne correspond plus à une messagerie électronique. En effet, la messagerie électronique étant en mode sans connexion, elle ne vérifie pas si le destinataire ou sa boîte électronique est connecté et s'il a de la place mémoire pour accueillir le message. Les opérateurs préfèrent ne pas transporter de messages trop importants, qui pourraient être refusés par leur destinataire. Le problème provient essentiellement de la taille de la boîte aux lettres, qui est limitée et peut refuser un gros message.

### **Exercice 98.**

*Soit un transfert de fichiers utilisé sur un réseau IP. Les routeurs du réseau sont connectés par des liaisons ATM.*

- a) Faire un schéma des découpages et des encapsulations qui doivent être effectués dans la machine de départ pour que l'on suppose dotée du protocole TCP/IP et d'une carte de communication ATM.
- b) Pourquoi le transfert de fichiers nécessite-t-il un mode avec connexion ?
- c) Le mode avec connexion indique-t-il que le temps de transfert doit être tout petit ?
- d) Montrer que s'il existe trois classes de service dans un réseau, le transfert de fichiers doit généralement utiliser la classe intermédiaire.

## Corrigé exercice 98

- a) Voir la figure R. (Figure R).

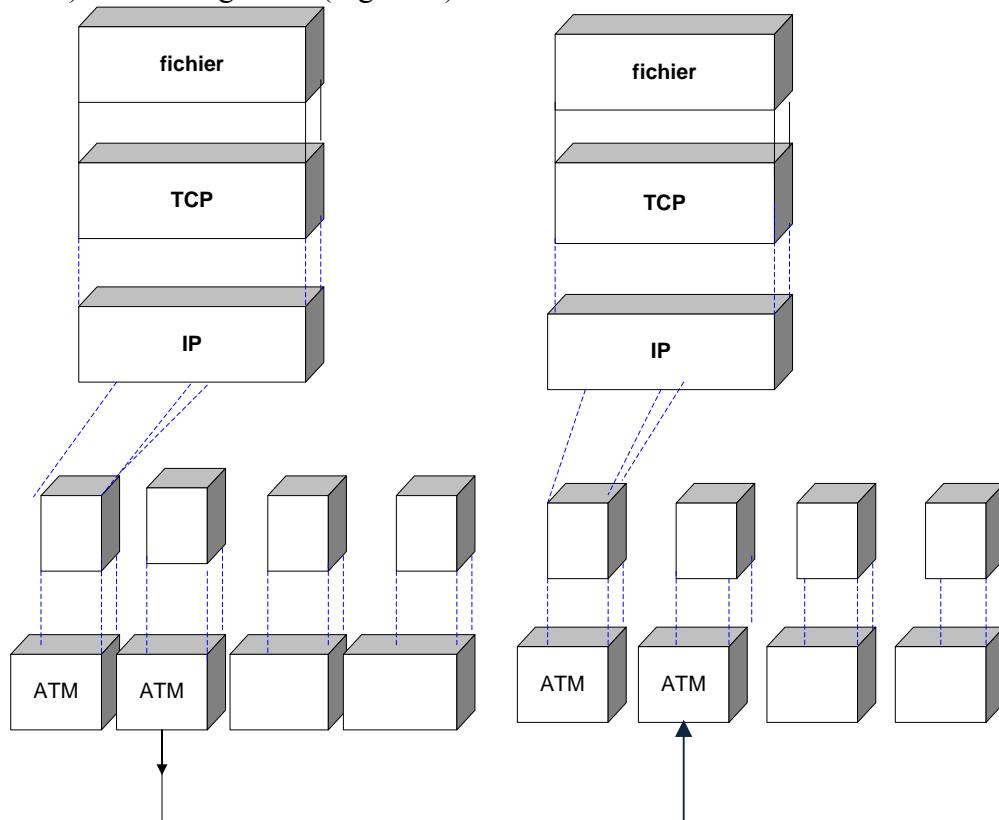


Figure R

- b) Le transfert de fichiers nécessite un mode avec connexion du fait que la signalisation doit s'assurer qu'il y a une place suffisante au récepteur pour recevoir le fichier. Le mode avec connexion garantit en outre une meilleure négociation entre l'émetteur et le récepteur pour s'accorder sur les paramètres du transfert.
- c) Non, pas du tout. Le temps de transfert peut être très long et l'intervalle de temps entre le départ des informations de l'émetteur et leur arrivée au récepteur très important.
- d) La première classe est réservée aux applications temps réel. La troisième classe est réservée aux applications qui ne demandent aucune qualité de service. Le transfert de fichiers se classe dans la deuxième catégorie. Il n'y a pas à assurer de temps réel mais il faut pouvoir garantir que le message transféré a bien été reçu sans erreur.

## Exercice 99.

On souhaite étudier un environnement intranet dans une société utilisant des bases de données Web.

- a) Le protocole http est-il en mode avec ou sans connexion.
- b) Pourquoi le protocole http utilise-t-il le protocole TCP, qui est en mode avec connexion ?
- c) Pourquoi est-ce intéressant pour une société d'utiliser un intranet et non une technologie fondée sur une autre architecture ?

- d) Le protocole http est très mal sécurisé. Si les informations transportées étaient chiffrées, la sécurité serait-elle améliorée ?

### **Corrigé exercice 99**

- a) Le protocole http est un mode sans connexion pour permettre une navigation simple sur Internet.
- b) Le protocole http utilise de façon sous-jacente le protocole TCP pour garantir qu'il y a bien un serveur actif à l'autre bout du réseau et permettre une bonne qualité du transport des informations.
- c) L'avantage pour une société d'utilise un Intranet est la compatibilité avec l'architecture et les bases d'informations d'Internet.
- d) Oui, la sécurité serait bien meilleure en authentifiant le client et le serveur et en chiffrant les informations. Cela a donné naissance au protocole HTTPS. Pour sécuriser totalement une communication http, il faut ajouter d'autres fonctionnalités, comme le non-reçu ou la non-répudiation.

### **Exercice 100.**

*On considère le réseau internet.*

- a) Pourquoi une URL indique-t-elle de façon unique l'adresse d'un document sur le Web ?
- b) Pourquoi le navigateur (browser) est-il un logiciel client ?
- c) Montrer que l'utilisateur des liens hypertextes génère chaque fois une nouvelle connexion TCP, qui peut engendrer un flux de supervision important sur internet.
- d) Une page HTML ayant une taille de 10 Ko quel temps faut-il pour la transporter sur le poste client, en supposant que le goulet d'étranglement provient de la liaison téléphonique vers l'ISP, qui est limitée à une cinquantaine de kilobits par seconde (prendre 50 Kbits/s dans le calcul) ?
- e) Pourquoi n'obtient-on que rarement ce temps de présentation dans la réalité ?

### **Corrigé exercice 100**

- a) Une URL est déterminée par la combinaison d'un nom de domaine d'un protocole et d'un nom de fichier. Cette combinaison définit d'une manière unique un fichier sur un serveur.
- b) Le navigateur est un logiciel client puisqu'il travaille d'un poste utilisateur vers un poste serveur, lequel lui donne accès à de l'information mémorisée dans des bases de données.
- c) Les clients type textes permettent de rediriger l'utilisateur vers un nouveau site. Il faut dans ce cas ouvrir une nouvelle connexion TCP. Si l'utilisation de liens hypertextes est importante, le nombre d'ouvertures de textes est important, le nombre d'ouvertures de connexions TCP croît de façon proportionnelle et leur mise en place peut apporter une surcharge très importante dans les équipements réseau.
- d) A 50 kbit/s il faut un temps de  $10 \times 8 / 50 = 1,6\text{ms}$ .

- e) On obtient rarement ce temps d'affichage d'une page HTML pour différentes raisons. La première provient de la difficulté de rester à la valeur de trafic maximal d'un modem sous TCP à cause des redémarrages en Slow-Start.

### **Exercice 101.**

*On considère un réseau Ethernet à 100 Mbits/s dans lequel la longueur de la trame est au moins égale à 512 octets.*

- a) On veut y faire transiter une parole téléphonique compressée à 8 Kbits/s.
  - 1) Calculer la longueur de la zone de données, si l'on accepte un temps de remplissage de 48ms.
  - 2) Quelle est l'occupation utile du support physique par rapport à l'utilisation toute pour une parole téléphonique ?
  - 3) Quelle quantité de parole téléphonique faut-il multiplexer pour arriver à une occupation satisfaisante de la bande passante ?
- b) On suppose que la parole transportée pour la téléphonie soit une parole de qualité hi-fi avec une bande passante de 20000 Hz, et que lors de l'échantillonnage, le codage soit effectué sur 2 octets. Calculer le nouveau pourcentage de débit utile par rapport au débit total.
- c) On ajoute à cette parole de qualité hi-fi une vidéo MPEG-2 utilisant un débit fixe de 2Mbits/s en supposant que la voix et les données soient multiplexées dans la même trame, indiquer le temps qui doit s'écouler entre deux émissions de trames Ethernet, si les trames sont toujours à leur valeur minimale de 472 octets de données.
- d) On suppose maintenant qu'on ne veuille pas multiplexer les deux voies de parole et d'image. Décrire les difficultés à surmonter au niveau du récepteur.
- e) Que se passe-t-il si une trame Ethernet est perdue ?

### **Corrigé exercice 101**

- a) 1. A 8kbit/s 1 octet sort en moyenne du CODEC toutes les millisecondes. Pour un temps de remplissage de 48 ms, la longueur de la zone de données est de 48 octets.  
 2. Si la trame qui transporte ces 48 octets fait 512 octets, l'utilisation réelle du support physique pour le transport d'une parole téléphonique est de  $48/512=9,4\%$   
 3. Pour arriver à une utilisation satisfaisante de la bande passante, il faut multiplexer un grand nombre de paroles téléphoniques simultanément, soit au moins 10 paroles pour monter à 480 octets utiles sur 512.
- b) Pour une bande passante de 20000Hz, il faut un échantillonnage de 40000 fois par seconde, et donc un débit de 640 kbit/s. Pour remplir une trame de 512 octets, c'est-à-dire un champ d'information de 472 octets soit 3776 bits, il faut un temps de  $3,776/640=5,9$  ms. Le débit utile est donc de près de 100p.100.
- c) S'il faut ajouter une voie de 2Mbit/s, le débit applicatif total est de 2,640 Mbit/s. Pour remplir une trame Ethernet, il faut  $3,772/2640=1,43$  ms. Il faut donc émettre une trame Ethernet toutes les 1,43 ms.
- d) La voix et les images arrivent au récepteur par les des flux différents. La difficulté qui se pose est de resynchroniser les deux flux de façon que les paroles coïncident avec les mouvements des lèvres.

- e) Si une trame Ethernet est perdue, il ne se passe rien de particulier puisqu'il n'y a pas retransmission. Un intervalle de temps de 1,43 ms est perdu. Cette perte doit être détectée pour permettre au décodeur de sauter cet intervalle ou, au mieux, de remplir cet intervalle par du bruit ou par une synthèse de parole déterminée par les derniers et les premiers échantillons des trames précédente et suivante.

### **Exercice 102.**

*On considère un réseau IP connecté à plusieurs réseaux d'opérateurs de télécommunications utilisant des techniques de communication de circuits classiques.*

- a) Montrer qu'une première difficulté de cette configuration concerne le choix de l'opérateur de télécommunication.
- b) Montrer que le réseau IP doit transporter une signalisation avant de pouvoir établir la communication téléphonique.
- c) Que penser de la possibilité de transporter la signalisation téléphonique classique en l'encapsulant dans IP ?
- d) La communication H.323 de l'UIT-T propre des procédures de signalisations à partir du terminal informatique. Cela consiste à recourir à des passerelles pour assurer le passage du réseau IP au réseau téléphonique commuté (RTC). Ces passerelles, ou gatekeepers, prennent en charge les traductions d'adresses. Une unité de contrôle multipoint est utilisée pour la téléconférence. Expliquer les raisons de l'implémentation du protocole de signalisation H.323 dans différents équipements.
- e) Le protocole de signalisation H.323 est transporté dans des fragments TCP. Dans TCP, le numéro de port est généralement attribué lors de la demande d'ouverture. Montrer que cela peut poser des problèmes s'il existe un pare-feu (firewall) à traverser.
- f) SIP (Session Initiation Protocol) est un autre protocole de signalisation provenant des travaux de l'ETF fondé sur le protocole HTTP de façon à être compatible avec Internet. Le premier travail de SIP consiste à localiser le terminal du correspondant. Un serveur de localisation est nécessaire pour effectuer des correspondances d'adresses. Comment le serveur peut-il traduire une adresse téléphonique en une adresse IP de sortie du réseau ?

### **Corrigé exercice 102**

- a) Lorsque l'adresse du récepteur est de type IP, il est difficile de situer où se trouve ce récepteur. Le fait d'y accéder par le biais d'un opérateur téléphonique demande donc une passerelle spécialisée, capable d'établir des correspondances d'adresse entre adresse IP et adresses téléphoniques.
- b) La signalisation est nécessaire pour mettre en place la communication téléphonique. Cette signalisation sert à la fois à assurer qu'il y a un destinataire, à ouvrir un chemin si nécessaire et à négocier les différents paramètres à utiliser pour le contrôle du flot.
- c) C'est une possibilité étudiée par les organismes de normalisation en particulier l'ETF sous le nom de SIGTRAN (signaling transport). Cette solution intéresse les communications téléphoniques partant d'un réseau classique et allant vers un réseau classique en traversant un réseau IP.

- d) Le protocole H.323 a pour fonction d'ouvrir une connexion entre deux utilisateurs et de définir les protocoles utilisés tout au long du chemin entre les deux utilisateurs en communication. Ce protocole doit donc intervenir dans tous les équipements intermédiaires, en particulier si la conversion s'effectue en multipoint dans le cadre d'une téléconférence audio.
- e) Le pare-feu fait une discrimination entre les ports et ne laisse passer que les flux possèdent des numéros de port déterminés à l'avance et correspondant à des applications ne permettent pas d'attaques sur l'utilisateur. Si le numéro de port est attribué lors de la demande, cela exige de la part de la passerelle de ne pas filtrer ce flot, ce qui devient complexe s'il y a de nombreux flots dynamiques.
- f) Le protocole SIP traite entre autres, les adresses téléphoniques pour déterminer l'adresse IP de la passerelle susceptible d'accéder à un opérateur téléphonique donnant accès au meilleur tarif pour l'utilisateur téléphonique destinataire. En règle générale, il s'agit de déterminer un opérateur téléphonique ayant un accès local au destinataire et donc de situer une passerelle pour accéder localement au client.

### **Exercice 103.**

*On considère la connexion d'un PC, appelé  $PC_A$ , à un autre PC, appelé  $PC_B$ , par l'intermédiaire d'un réseau ATM. Les deux PC travaillent sous un environnement IP.*

- a) Expliquer comment s'effectue le transport d'un PC à l'autre.
- b) Si  $PC_A$  connaît  $PC_B$  par son adresse logique IP, comment peut s'effectuer la communication ? Peut-on utiliser le protocole ARP ?
- c) Si l'adresse de  $PC_A$  est 127.76.87.4 et celle de  $PC_B$  127.76.14.228, ces deux stations étant sur le même réseau, à quelle classe d'adresse IP appartient ce réseau ?
- d) On suppose maintenant que les deux PC ne soient plus sur le même réseau mais sur deux réseaux ATM interconnectés par un routeur. Si, comme à la question 2,  $PC_A$  connaît  $PC_B$  par son adresse logique IP, comment peut s'effectuer la communication ?
- e) On suppose que le réseau sur lequel  $PC_A$  est connecté possède un serveur d'adresses, c'est-à-dire un serveur capable d'effectuer la correspondance entre les adresses IP du réseau et les adresses physiques des coupleurs ATM sur lesquels sont connectés les PC. Que se passe-t-il si  $PC_A$  lui envoie une requête de résolution de l'adresse IP de  $PC_B$  ?
- f) Montrer que si chaque sous-réseau qui participe au réseau internet sous-réseaux appelés LIS (Logical IP Subnetwork) —possède un tel serveur d'adresses, le problème global de la résolution d'adresse peut être résolu.

### **Corrigé exercice 103**

- a) Les PC A et B doivent avoir une carte ATM pour accéder au réseau ATM. Comme les PC travaillent sous le protocole IP, les paquets IP doivent être transportés à l'intérieur des cellules ATM. Il faut donc utiliser une couche AAL pour fragmenter les paquets IP pour les transporter dans des cellules ATM puis pour les ré assembler à l'autre extrémité du réseau.
- b) Pour effectuer le transport des paquets IP dans réseau ATM, il faut ouvrir un circuit virtuel. Pour ouvrir un circuit virtuel, il faut utiliser une signalisation dans laquelle il y a l'adresse ATM du destinataire, c'est-à-dire une correspondante entre l'adresse IP et l'adresse ATM de la carte ATM (l'adresse de l'interface physique arrivant à la

carte). On ne peut utiliser le protocole ARP (Adress Resolution Protocol) qui a été conçu pour une correspondance d'adresse IP et Ethernet. Il faut donc un protocole ATMARP (ATM's Address Resolution Protocol) ou bien choisir une autre solution, consistant, par exemple à changer le plan de signalisation ATM par un plan de signalisation IP comme dans la solution MPLS.

- c) Les deux stations sont sur un réseau de catégorie B puisque 127.76 est l'adresse commune.
- d) La solution est effectivement plus complexe car le protocole ATMARP doit utiliser une diffusion pour réclamer la correspondance d'adresse lorsqu'elle n'est pas en possession de l'émetteur. S'il y a plus d'un seul sous-réseau, la solution utilisant une diffusion devient quasiment impossible à implémenter. De nouveau, plusieurs solutions peuvent être envisagées. La première consiste à mettre des serveurs d'adresses capables de résoudre les correspondances dans leur sous-réseau. Ces serveurs peuvent s'échanger des demandes et ces dernières
- e) Comme indiqué à la réponse précédente, le serveur d'adresses peut localiser un serveur d'adresse suivant, qui peut à son tour déterminer le routeur d'adresses suivant et ainsi de suite jusqu'au destinataire.
- f) C'est ce que démontre la première solution de la question d

#### **Exercice 104.**

*Avec les commandes demande d'écho (Echo Request) et réponse d'écho (Echo Reply) d'ICMP, il est possible de tester un réseau IP. La commande Ping est un petit programme qui intègre ces deux commandes pour réaliser des tests facilement. La commande Ping envoie un datagramme à une adresse IP et demande au destinataire de renvoyer le datagramme.*

- a) Que mesure la commande Ping ?
- b) En retour de la commande Ping on reçoit un message ICMP portant le numéro de type 3. Ce message indique que le paquet IP qui transporte le message ICMP de demande d'écho a vu la valeur de son champ Temps de vie ? Ou TTL (Time To Live), dépasser la limite admissible. Que faut-il en déduire ?
- c) Si l'on est sûr de l'adresse IP du correspondant mais que le message de retour soit un message ICMP avec. Destinataire inaccessible, que faut-il en déduire ?
- d) En règle générale, la commande Ping ne génère pas une seule commande d'écho mais plusieurs (souvent 4). Quelle en est la raison ?

#### **Corrigé Exercice 104**

- a) La commande Ping permet de mesurer le temps aller-retour entre un émetteur et un récepteur.
- b) On peut déduire que le récepteur n'est pas présent.
- c) On peut en déduire que le destinataire est pour le moment non connecté.
- d) La réponse correspond à quatre échantillons différents ce qui permet d'avoir une idée de la variance du temps de transit. Par exemple, si les 4 réponses sont de 10, on en déduit que le temps de transit est à peu près constant. Si les 4 réponses sont 1, 5, 12 et 22, la moyenne est très grande.

### **Exercice 105.**

*Soit un réseau IP utilisant le protocole RSVP.*

- a) Montrer que RSVP est un protocole de signalisation.
- b) RSVP effectue une réservation dans le sens retour, c'est-à-dire du récepteur vers l'émetteur. Pourquoi ?
- c) RSVP est un protocole multipoint, c'est-à-dire qu'il peut ouvrir des chemins allant de l'émetteur à plusieurs récepteurs. Montrer que la réservation s'effectuant des récepteurs vers l'émetteur est une bonne solution dans ce cas.
- d) Le protocole RSVP peut très bien faire une réservation explicite. Quel est dans ce cas l'intérêt de RSVP ?

### **Corrigé Exercice 105**

- a) Le protocole RSVP a pour objectif un chemin. Il utilise pour cela l'adresse IP du destinataire. C'est donc un protocole de signalisation.
- b) RSVP effectue une réservation dans le sens retour, du récepteur vers l'émetteur pour connaître les caractéristiques du ou des récepteurs avant de réservier des ressources sur le chemin.
- c) Comme RSVP réserve du récepteur vers l'émetteur les signalisations de retour connaissent les caractéristiques des récepteurs et ne réservent que les ressources nécessaire. Lorsque l'ouverture d'un chemin croise un chemin déjà ouvert vers l'émetteur, et la signalisation ne réserve de nouvelles ressources que si la demande du récepteur est supérieure à ce qui a été déjà réservé. On a donc un ensemble de chemins en arbre, les feuilles étant les récepteurs et la racine l'émetteur.
- d) RSVP peut faire des réservations implicites le nœud traversé prenant note des demandes de réservation des flots qui le traversent. Etant donné la somme des réservations déjà effectuées, le nœud peut décider à tout moment de refuser toute nouvelle demande apportée par la signalisation.

### **Exercice 106.**

*Soit une application téléphonique sur l'internet utilisant le protocole RTP/RTCP*

- a) L'émetteur et le récepteur doivent-ils posséder plusieurs ou un seul codec, un codec permettant de compresser plus ou moins la voix ?
- b) Le protocole RTCP a pour objectif d'indiquer au récepteur les performances du réseau. Est-ce un protocole indispensable à RTP ?
- c) Cette solution de gestion de la qualité de service au niveau de l'émetteur en adaptant les flux aux contraintes internes du réseau vous paraît-elle conforme à la philosophie d'internet ?
- d) Si le réseau est capable d'offrir lui-même une qualité de service, le protocole RTP/RTCP est-il encore utile ?

## Corrigé Exercice 106

- a) L'émetteur et le récepteur peuvent posséder un ou plusieurs codec. En règle générale, il n'y a qu'un. Ce dernier s'adapte et effectue une compression plus ou moins forte.
- b) Oui, c'est un protocole quasi indispensable puisqu'il indique le degré de compression de l'émetteur en fonction de l'état du réseau.
- c) Oui, cette solution est conforme à la philosophie d'Internet qui demande à la station terminale de prendre en charge le contrôle de son flux pour permettre au réseau lui-même de rester le plus simple possible. En revanche le fait d'essayer d'imposer au réseau des qualités de service est plutôt contradictoire avec la philosophie d'Internet puisque la qualité de service de niveau réseau doit être offerte par les équipements réseau, ce qui augmente le coût de l'infrastructure réseau.
- d) A priori non, puisque c'est le réseau qui s'adapte à la demande de l'utilisateur. Cependant l'utilisateur ne connaît pas forcément la qualité de service exacte dont il a besoin ni la valeur des paramètres. Il peut donc éventuellement compléter la qualité de service offerte pour sa connexion par le protocole RTP/RTCP. Ce protocole RTP/RTCP permet à la station terminale de s'adapter à la qualité de service fournie par le réseau

## Exercice 107.

Soit un réseau IP proposant de la qualité de service au travers d'une technique DiffServ.

- a) Les clients EF (Expedited Forwarding) ont la priorité la plus haute. Expliquer pourquoi les clients EF peuvent obtenir une qualité de service garantie.
- b) Montrer que, dans certains cas, cette garantie peut être remise en cause.
- c) Dans la classe AF (Assured Forwarding), il existe trois sous-classes. Montrer qu'aucune de ces sous-classes ne peut espérer obtenir une garantie sur le temps de transit du réseau.
- d) Montrer que les clients de la classe AF doivent être soumis à un contrôle de flux.
- e) Pourquoi les normalisateurs de l'IETF ont-ils proposé quatre classes, dites classes de précédence, ou priorité, dans chacune des trois classes de base ?
- f) Les clients best effort ont-ils le même service que dans l'Internet classique, n'offrant que la classe best effort ?

## Corrigé Exercice 107

- a) Les clients EF sont servis avec la priorité la plus haute pour les données de l'utilisateur. Les paquets EF ne voient donc pas les autres paquets de priorité inférieure. Pour obtenir une qualité de service sur les clients EF, il faut que le réseau soit surdimensionné par rapport au volume représenté par les paquets des clients EF. Dans ce dernier cas, les clients EF voient le réseau pratiquement vide et obtiennent une qualité de service garantie.
- b) Cette garantie peut être remise en cause si le réseau n'est plus surdimensionné pour les clients EF. Dans ce cas, des files d'attente de clients EF peuvent se former dans les routeurs, et les routeurs de réponse du réseau ne peuvent plus être garantis.

- c) Les clients de la classe AF ne peuvent obtenir de garantie sur le temps de transit dans le réseau. En effet comme ces paquets ne sont pas prioritaires, ils doivent laisser passer les paquets EF. Comme il est de ce fait impossible de déterminer à l'avance les temps d'attente que devront subir les paquets AF, il est impossible de leur garantir un temps de transit.
- d) Les clients AF doivent laisser passer les clients EF. Pour cela on doit les mémoriser dans les mémoires tampons des nœuds du réseau. Si l'on veut garantir un taux de perte, ce qui est le service proposé pour la classe AF, il faut contrôler les flux pour qu'il n'y ait pas de débordement des mémoires des nœuds puisque les temps d'attente imposés pour laisser passer les clients EF sont imprévisibles.
- e) Les normalisateurs ont choisi quatre classes de précédence pour donner des priorités différentes aux clients AF, que ces derniers soient or, argent ou bronze. Ces ordres de priorité sont les suivants : Or1, Argent1, Bronze1 ; Or2, Argent2, Bronze2 ; Or3, Argent3, Bronze3 ; Or4, Argent4, Bronze4 ? Un client Bronze1 est donc plus prioritaire qu'un client Or2. Cette classification s'explique par les applications : un client peut souhaiter être en classe Or pour avoir une garantie forte sur le taux d'erreur mais n'être pas pressé du tout. Au contraire un client peut choisir Bronze parce que l'application accepte un taux d'erreur déterminé mais posséder des contraintes temporelles assez fortes par exemple pour le transport de canaux de télévision.
- f) Non, les clients best effort de DiffServ n'ont pas du tout le même service que le best effort d'Internet. Dans DiffServ, les clients best effort sont servis après tous les autres et ils ne peuvent guère espérer un temps de transit acceptable pour de nombreuses applications. Dans Internet, tous les clients étant best effort chacun dispose d'un minimum de bande passante, et même les applications temps réel sans trop de contrainte peuvent espérer un service correct.

### **Exercice 108.**

*Soit un réseau composé de terminaux mobiles IP qui peuvent se déplacer dans des cellules. Un client est enregistré dans la cellule où il a pris son abonnement.*

- a) Pourquoi son adresse IP n'est-elle pas suffisante pour que le réseau le retrouve lorsqu'il se déplace ?
- b) Si l'on donne à un utilisateur qui ne se trouve pas dans la cellule où il n'est enregistré une nouvelle adresse IP, comment peut-on faire le lien entre son adresse de base et sa nouvelle adresse ?
- c) Si l'utilisateur émet un paquet, doit-il utiliser son adresse de base ou l'adresse que le réseau lui a affectée ?
- d) Dans quel cas pourrait-il être intéressant de donner à un utilisateur qui souhaite joindre notre client son adresse provisoire, décernée par la cellule dans laquelle il se trouve ?

## Corrigé Exercice 108

- a) Son adresse IP n'est pas suffisante parce qu'elle indique un sous-réseau dans lequel le client est connecté. Si ce dernier se déplace et qu'il sort de son sous-réseau, son adresse IP ne permet plus de le situer et donc de lui envoyer des messages.
- b) Il faut un agent appelé local ou home agent, pour faire la corrélation entre l'adresse locale et la nouvelle adresse IP du client, appelée adresse visiteur ou care-of-address. Lorsqu'un message est destiné à notre client, il arrive dans son sous-réseau local, et l'agent local (home agent) modifie l'adresse destination la nouvelle adresse IP du client.
- c) Lorsque le client émet un paquet, il doit indiquer son adresse locale parce que s'il se déplace de nouveau son adresse visiteur ne permet plus de faire suivre le message.
- d) Plutôt que de passer toujours par l'agent local, il peut être intéressant de donner à l'émetteur l'adresse visiteur du destinataire. Cette solution est acceptable si le destinataire n'est pas en mouvement et qu'il reste suffisamment longtemps dans le réseau visité.

## Exercice 109.

On considère un réseau X.25.

- a) Le bit D étant positionné à 1, montrer que le contrôle de flux ne dépend pas de l'opérateur.
- b) On considère maintenant que le bit D est positionné à 0 et que l'opérateur contrôle l'intérieur du réseau par une fenêtre entre le commutateur d'entrée et le commutateur de sortie. Montrer que, pour obtenir un contrôle de flux de bout en bout, il ne faut acquitter un paquet X.25 qu'une fois que celui-ci est accepté dans la fenêtre suivante.
- c) Montrer que l'opérateur peut arriver à faire descendre le débit d'un utilisateur pour éviter une congestion d'un nœud à l'intérieur du réseau.
- d) Combien de plans existe-t-il dans un réseau X.25 ?
- e) Un nœud de commutation peut-il faire une différence entre un paquet de contrôle et un paquet utilisateur ?

## Corrigé exercice 109

- a) Lorsque le bit D est mis à 1, cela indique que le contrôle s'effectue de bout en bout sur le circuit virtuel. Si le circuit virtuel commence dans la carte X.25 de la machine utilisateur, cela indique que l'opérateur n'a pas vraiment d'impact sur cette fenêtre.
- b) Un contrôle de flux est efficace s'il est capable de limiter le nombre de paquets qui circulent sur chaque circuit virtuel. Pour que cette limitation soit effective, il est nécessaire que la fenêtre de contrôle soit de bout en bout. Si un paquet est acquitté par un nœud mais n'entre pas dans la fenêtre suivante, il peut être perdu sans que le protocole de niveau 4 s'en aperçoive. Il faut donc qu'un paquet ne soit acquitté que lorsqu'il est pris en charge par la fenêtre suivante.
- c) L'opérateur peut effectivement faire descendre le débit d'un utilisateur en diminuant la fenêtre interne au réseau. Si l'opérateur met la valeur de la fenêtre à 0, il bloque

les acquittements de la fenêtre précédente, puisque des paquets ne peuvent entrer dans la nouvelle fenêtre.

- d) Il y a un seul plan, le plan utilisateur. Toutes les données de contrôle passent en même temps que les données utilisateur avec une égale priorité.
- e) A priori non. Un nœud ne peut pas être de différence entre un paquet de contrôle et un paquet utilisateur. Il peut exister quelques cas qui échappent à cette règle, comme les paquets émis avec le bit Q à 1, qui indiquent qu'ils contiennent des données qualifiées, c'est-à-dire des paquets de signalisation portant des informations de supervision.

### **Exercice 110.**

*On suppose maintenant un réseau que l'on veuille interconnecter deux réseaux X.25 entre eux.*

- a) La passerelle intermédiaire est-elle un routeur ?
- b) Peut-on ouvrir un circuit virtuel de bout en bout ? (Examiner les différents cas de valeur du bit D sur les deux réseaux)

### **Corrigé exercice 110**

- a) La passerelle intermédiaire interconnecte deux réseaux X.25. Cette passerelle récupère le paquet X.25. Premier cas de figure le paquet X.25 est décapsulé pour récupérer le paquet IP. Dans ce cas la passerelle est bien un routeur puisqu'on examine le paquet IP pour décider de son routage. Deuxième cas de figure, le paquet X.25 n'est pas décapsulé. Cela indique que la passerelle doit émettre de nouveau le paquet X.25 sur une référence. La passerelle se comporte alors comme un commutateur car le paquet a été au niveau de sa référence. Il peut y avoir un problème de terminologie dans la mesure où nous avons une passerelle de niveau 3 et que ces dernières sont généralement appelées les routeurs.
- b) Oui, on peut ouvrir un circuit virtuel de bout en bout si les deux réseaux acceptent de mettre le bit D à 1 et si la passerelle intermédiaire est un commutateur. Si l'un des deux réseaux n'accepte pas y avoir de circuit de bout en bout.

### **Exercice 111.**

*On veut interconnecter un réseau en relais de trames et un réseau X.25.*

- a) Peut-on mettre directement les trames provenant du relais de trames dans les paquets X.25 ? Et l'inverse, c'est-à-dire les paquets X.25 dans la trame du relais de trames ?
- b) Donner un schéma architectural de cette interconnexion.

### **Corrigé exercice 111**

- a) Les paquets de niveau 3 doivent être encapsulés dans des trames de niveau 2. Il est donc nécessaire d'encapsuler un paquet X.25 dans une trame du relais de

trames (LAP-F). On pourrait envisager de mettre une trame LAP-F dans un paquet X.25 mais ce serait un cas assez farfelu.

- b) Le schéma architectural illustré à la figure 5 est réalisé pour un transport du paquet X.25 de bout en bout.

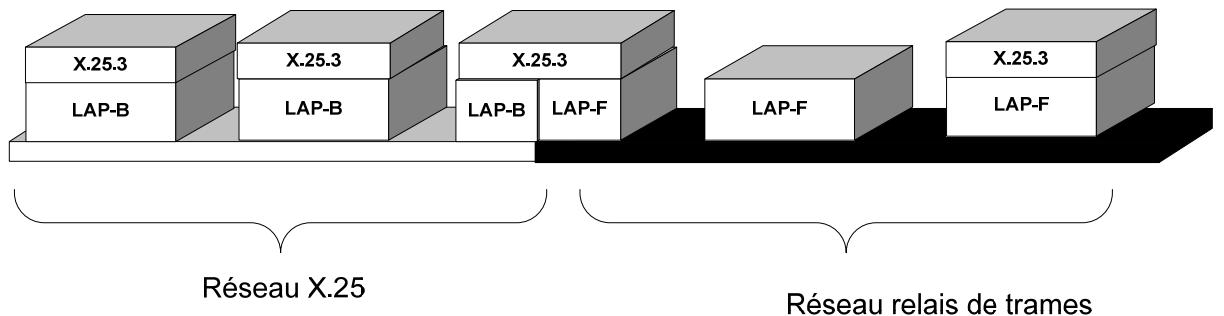


Figure S

### Exercice 112.

*On considère l'interconnexion de deux réseaux en relais de trames.*

- La liaison virtuelle peut-elle être de bout en bout ?
- Comment peut se passer le contrôle de flux sur cette interconnexion de réseaux ?
- Si les équipements extrémité travaillent sous IP, comment peut se présenter la passerelle entre les deux réseaux ?
- Les deux utilisateurs veulent réaliser dans cette configuration une conversation téléphonique. A quelle condition celle-ci est-elle possible ?
- Si l'émetteur choisit un CIR de 32 Kbit/s et un EIR de 64 Kbit/s pour transporter une voie de parole numérique à 64Kbit/s, la qualité téléphonique peut-elle être conservée ?

### Corrigé exercice 112

- Oui, la liaison virtuelle peut être réalisée de bout en bout. Il faut pour cela que la passerelle soit un commutateur relais de trames et donc qu'elle accepte de commuter une trame LAP-F
- Pour être efficace, le contrôle de flux doit prendre en compte le circuit virtuel de bout. Pour cela il faut que la négociation entre l'utilisateur et les deux opérateurs soit identique, c'est-à-dire que le débit garanti négocié soit le même. Le bit DE doit donc avoir la même définition dans les deux réseaux.
- Si les utilisateurs travaillent sous IP, cela indique que des paquets IP sont encapsulés dans les trames du relais de trames. A la passerelle, il est possible de décapsuler les paquets, de récupérer le paquet IP et d'effectuer le routage à partir de l'adresse IP située dans le paquet. La passerelle est donc un routeur. Une seconde possibilité consiste à rester au niveau LAP-D et à commuter la trame dans la passerelle.
- La conversation téléphonique est possible si un débit d'une valeur correspondant au débit crête de la voie téléphonique peut être garanti par les opérateurs des deux réseaux relais de trames et si le temps de réponse reste inférieur à 200 ms, voire 300 ms pour une qualité inférieure. Il faut donc que le client ait négocié un débit garanti CIR correspondant au passage du débit crête de la voix téléphonique.

- e) Les choix indiquent une garantie de débit de 32Kbits/s et la possibilité de dépasser ce débit pour atteindre le débit maximal de l'utilisateur c'est-à-dire 64Kbit/s. Pour que la qualité de la parole soit acceptable, il faut un codeur hiérarchique. Dans lequel l'hiérarchie 1 correspond à un débit de 32Kbit/s. Les hiérarchies supérieures susceptibles d'apporter une amélioration de la qualité peuvent atteindre également 32Kbit/s. L'utilisateur peut utiliser un codage à 32Kbit/s/qui donne une excellente qualité téléphonique sans avoir recours à des améliorations qui n'apportent finalement pas grand-chose de plus

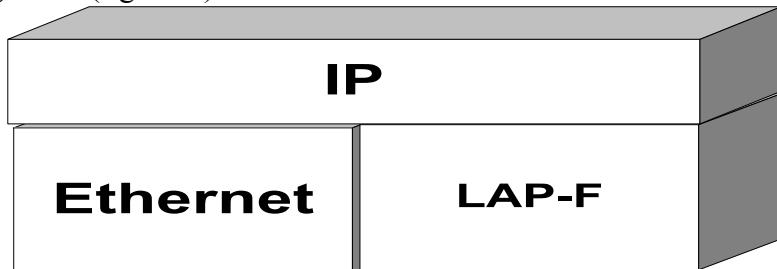
### **Exercice 113.**

*Soit un réseau en relais de trames interconnectant deux réseaux locaux Ethernet sur lesquels sont connectés des PC sous IP. Cet exercice s'intéresse au type de passerelle à mettre en place entre le réseau Ethernet et le réseau en relais de trames.*

- a) Première solution : dans la passerelle, on remonte au niveau IP. Donner l'architecture de cette passerelle.
- b) Dans le réseau Ethernet d'entrée, quelle est l'adresse MAC portée dans la trame Ethernet ?
- c) Deuxième solution : on encapsule la trame Ethernet dans la trame de relais de trames. Donner l'architecture de la passerelle.
- d) Dans la trame Ethernet encapsulée, quelle est l'adresse MAC ?
- e) Quelle est la meilleure solution ?

### **Corrigé exercice 113**

- a) Voir la figure T. (figure T)



**Figure T**

- b) L'adresse MAC portée par la trame du réseau Ethernet est celle de la passerelle avec le réseau relais de trames.
- c) Voir figure U. (figure U)

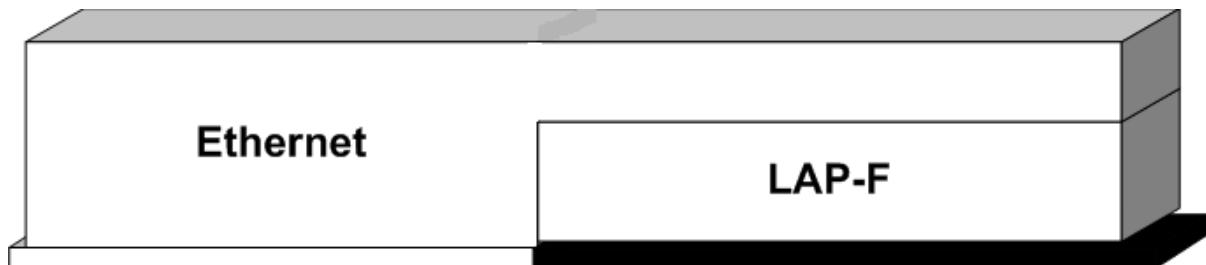


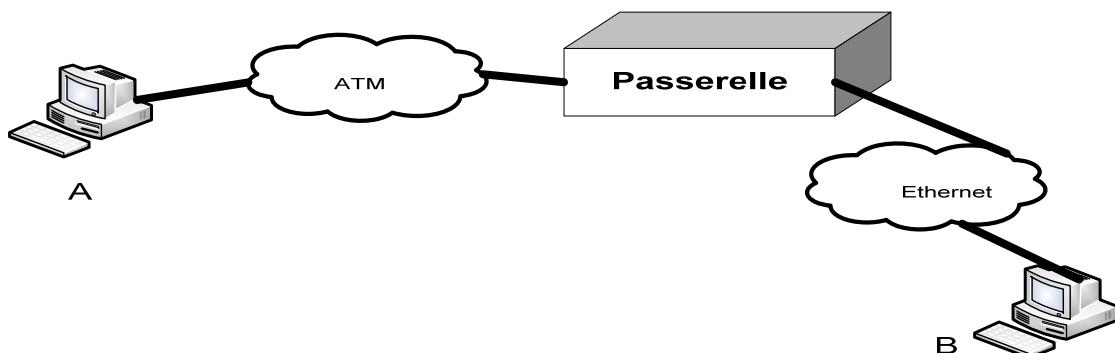
Figure U

- d) L'adresse MAC est celle du destinataire.
- e) Les deux solutions ont leurs avantages et leurs inconvénients. La première est compatible avec la normalisation et permet de passer d'un réseau à l'autre sans se surcharger des zones de supervision que l'on doit transporter dans la seconde. La difficulté est de trouver l'adresse physique du coupleur de la passerelle pour aller vers le réseau suivant. Cette résolution d'adresse se fait assez facilement dans le cas de correspondance Ethernet-IP.  
Dans la seconde solution, l'encapsulation est simple à mettre en œuvre. Elle permet de garder l'adresse du destinataire dans la structure encapsulée mais a comme désavantage d'exiger le transport de toutes les zones de supervision des entités intermédiaires. De plus, il faut que la signalisation du réseau relais de trames puisse effectuer l'ouverture de la liaison virtuelle en connaissant l'adresse Ethernet du destinataire, qu'il faut donc aussi connaître par une correspondance d'adresse puisque l'adresse connue du destinataire est son adresse IP.

#### Exercice 114.

On considère un réseau formé de deux sous réseaux. L'un est un réseau ATM et l'autre un réseau Ethernet, comme illustré à la figure 15-19. L'environnement TCP/IP est utilisé pour transporter de l'information de A à B.

Figure 15-19. Un réseau formé d'un sous réseau ATM d'un sous réseau Ethernet.



- a) Faire un schéma en couches montrant l'architecture de ce réseau.
- b) Est-il possible d'ouvrir un circuit virtuel de bout en bout ?

- c) Donner un cas où la passerelle est un routeur et un cas où la passerelle est un commutateur.
- d) Si l'on met en place sur ce réseau une commutation de référence MPLS (Multiprotocol Label Switching), où se place la référence dans la cellule ATM et où se place cette référence dans la trame Ethernet ?

### Corrigé exercice 114

- a) Deux cas se présentent selon que la passerelle est un routeur ou un LSR (Label Switched Router). La figure V illustre le premier cas et la figure W le second. (Figure V) (Figure W)
- b) Dans le cas de la figure V il n'est pas possible d'ouvrir un circuit virtuel de bout en bout puisqu'il faut repasser par la couche IP dans la passerelle intermédiaire. En revanche si le schéma choisi correspond à la figure W, qui représente une architecture MPLS, on peut ouvrir un circuit virtuel de bout en bout, même si le nom de circuit virtuel n'est pas celui employé sur Ethernet, ou l'on parle plutôt de route.
- c) Les deux cas décrits précédemment répondent à la question. Dans le premier, la passerelle est un routeur. Dans le second, il s'agit d'un commutateur de type MPLS.
- d) La référence se place dans la zone VPI/VCI pour la cellule MPLS et dans la zone shim address située entre l'adresse située entre l'adresse MAC et l'adresse IEEE pour la trame Ethernet.

### Exercice 115.

*On suppose que A est un PC possédant une carte couleur Ethernet au lieu de la carte coupleur ATM mais que réseau à traverser soit toujours le même réseau ATM.*

- a) Que faut-il ajouter entre A et le réseau ATM.
- b) Faire un schéma en couche de la passerelle.

### Corrigé exercice 115

- a) Entre A et le réseau ATM, il faut ajouter un réseau Ethernet. Il faut donc encapsuler le paquet IP dans une trame Ethernet.  
Trois possibilités peuvent être proposées :
  1. Décapsuler directement la trame Ethernet dans le premier noeud du réseau ATM et réencapsuler le paquet IP dans des cellules ATM
  2. Encapsuler directement la trame Ethernet dans des cellules ATM
  3. Utiliser le protocole MPLS pour commuter la trame Ethernet vers des cellules ATM. S'il y a alors également décapsulation du paquet IP de la trame Ethernet, ce dernier n'est pas examiné mais est immédiatement inséré dans des cellules ATM.
- b) Le schéma en couches de la passerelle dépend de la solution décrite ci-dessus pour l'entrée du réseau. Le premier cas correspondant à l'architecture de passerelle illustrée à la figure V et le troisième à celle de la figure W. L'architecture de la deuxième solution est illustrée à la figure X.

**Exercice 116** On considère maintenant que le réseau ATM est remplacé par un réseau Ethernet. Le réseau global est donc formé de sous réseaux Ethernet interconnectés par une passerelle. Les deux sont des Gigabits Ethernet (1Gbits/s) compatible avec la norme IEEE802.3 à mode partagé. La trame Ethernet est comprise entre 512 et 1500 octets. (En effet, dans le Gigabit Ethernet la longueur minimale de la trame est 512octets de sorte que la longueur du réseau atteint quelques centaines de mètres). La même technique CSMA/CD que dans les autres réseaux Ethernet est utilisée sur ces réseaux partagés.

- a) Quelle est la distance maximale entre A et B.
- b) Donner un cas où la passerelle est un routeur, un cas où la passerelle est un routeur-passérelle qui peut être un routeur ou un pont et un cas où la passerelle est un pont.

### **Corrigé exercice 116**

- a) La distance entre A et B est limitée puisque les deux réseaux Ethernet sont partagés. La distance maximale pour un réseau Gigabit Ethernet est de 409,6m. Cette valeur est obtenue en calculant le délai nécessaire pour émettre une trame de 512 octets, délai qui doit représenter un temps aller-retour. Comme 512 octets=4096 bits, à 1 Gbit/s cela représente, à la vitesse de 200000 km/s un temps de 8,192 µs. La plus longue distance d'un Gigabit Ethernet est donc de 409,6m (819,2 m/2 pour tenir compte de l'aller-retour).
- b) La passerelle est un routeur si l'on remonte à une couche 3, sui ici serait la couche IP. La passerelle est un b-routeur si elle est capable de se comporter d'abord comme un point en examinant l'adresse MAC, puis si l'adresse MAC est inconnue comme un routeur. Dans ce dernier cas le b-routeur décapsule la trame pour retrouver le paquet IP et se comporte comme un routeur.  
La passerelle est un point seule l'adresse MAC est utilisée.

### **Exercice 117.**

On suppose maintenant que l'Ethernet sur lequel A est connecté soit un Ethernet commuté.

- a) Quelle est la distance maximale entre A et B ?
- b) L'adresse MAC sur 6 octets est-elle suffisante pour acheminer les paquets de A à B ?
- c) Faut-il un contrôleur de flux dans l'architecture étudiée ? Peut-on utiliser une technique CAC (connection admission control) pour réaliser un contrôle ?
- d) Si les deux réseaux sont différents (celui sur lequel A est raccordé a une capacité de 1 gigabit/s et celui sur lequel B est raccordé une capacité de 100 Mbit/s), ce système peut-il fonctionner valablement ?

## Corrigé exercice 117

- a) Il n'y a pas de distance maximal puisqu'on utilise une technique de transfert commutée.
- b) L'adresse MAC peut être suffisante si tous les ponts sont capables de connaître l'ensemble des adresses des cartes coupleurs du réseau.
- c) Oui, il faut un contrôle de flux puisque le réseau est commuté et qu'une trame peut traverser plusieurs nœuds de transfert. Un contrôle du type CAC (Connection Admission Control) effectue une demande de réservation de ressources ou au moins signale l'arrivée d'un flot déterminé. Dans un réseau Ethernet, il n'y a pas de signalisation et par voie de conséquence pas possibilité de contrôle CAC.
- d) Oui, ce système peut fonctionner valablement car il y a compatibilité entre les différents réseaux Ethernet. Des problèmes de congestion peuvent se poser puisque les vitesses sont différentes. Il faut donc qu'un système de contrôle de flux soit installé.

## Exercice 118.

*On considère le réseau Ethernet à 1Gbit/s. La trame Ethernet est d'une taille comprise entre 512 et 1500 octets. La longueur minimale de la trame Ethernet, qui est compatible avec la norme IEEE802.3, est plus longue dans cette version d'Ethernet que dans la version de base. La même technique CSMA/CD que dans les autres réseaux Ethernet est utilisée.*

- a) Calculer la distance maximale entre les deux points les plus éloignés,
- b) Si l'on considère que toutes les stations sont connectées sur le même hub et que ce hub possède un temps de traversée de 100ns quelle est la nouvelle distance maximale de ce réseau ?
- c) Un répéteur allonge-t-il ou diminue-t-il cette longueur ? De combien ?
- d) Un pont allonge-t-il ou diminue-t-il cette longueur ? De combien ?
- e) La plupart des publicités sur le Gbit Ethernet annoncent une distance maximale entre les deux stations les plus éloignées de 500m sur fibre optique. Cette valeur est en contradiction avec celle calculée aux questions précédentes. Comment est-ce possible ?

## Corrigé exercice 118

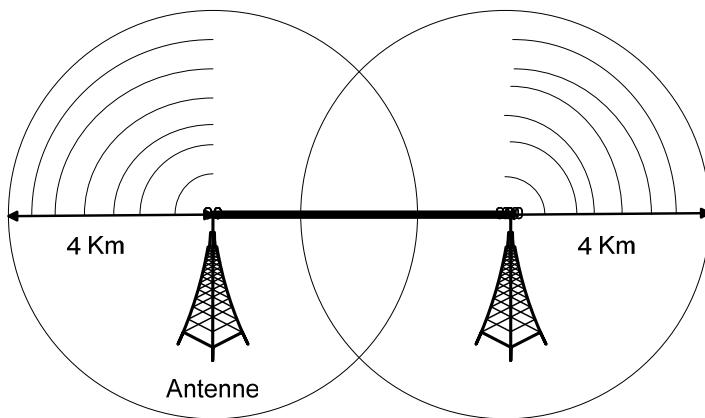
- a) Si la longueur maximale de la trame est de 512 octets, cela induit un délai maximal pour effectuer l'aller-retour correspondant à l'envoi de 512 octets, soit 4096 bits. Comme il faut 1 ns pour émettre 1 bit, le temps maximal d'aller-retour correspondant est de 4096 ns. En comptant toujours une vitesse de propagation de 200000 km/s on obtient 8192m pour l'aller-retour, soit 409,6 m de longueur maximale.
- b) Si le hub prend 100 ns pour faire passer le signal à l'aller et autant au retour, il y a 200 ns à prendre en compte pour le hub dans le budget temps. De propagation aller-retour descendant donc à  $409,6 - 200 = 3896$  ns, soit une distance maximale de 389,6m.
- c) Un répéteur inséré dans le réseau réduira la distance maximale puisque le répéteur prend du temps, temps qui sera déduit du temps de propagation maximal (le temps de base). Par exemple, si le temps de traversée du répéteur est de 1μs pour un aller-retour, le temps restant pour la propagation n'est plus que de 2,096 μs. La distance maximale est donc réduite.

- d) Un pont permet de découper le réseau en deux réseaux distincts. Il double donc automatiquement la longueur du réseau.
- e) Sur de la fibre optique on peut facilement atteindre la vitesse de 300000km/s. La longueur maximale est obtenue par  $4,096 \times 300 = 1228,8$ m pour aller-retour, soit 614,4m de longueur maximale. Il n'y a donc pas contradiction.

### **Exercice 119**

*On considère un réseau Ethernet utilisant les ondes hertziennes comme support physique. On suppose que les stations puissent émettre et écouter la porteuse. Les terminaux peuvent se déplacer sur un cercle de diamètre D. Ce réseau est compatible avec le réseau Ethernet à 10Mbit/s terrestre. La vitesse de propagation des ondes hertziennes est supposée égale à 300000 Km/s.*

- a) Quelle est la valeur de D ?
- b) En fait, les obstacles et l'affaiblissement du signal ne permettent pas d'obtenir cette distance. Supposons que la distance D maximale soit de 8 Km. Plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre pour augmenter la couverture du réseau. La première consiste à utiliser de antennes d'émission-réception fixes utilisant des fréquences différentes et à relier ces antennes par un fil métallique suivant le schéma de la figure 15-20. Lorsque le terminal à atteindre est situé sur l'autre zone, la trame Ethernet est captée par 1 antenne sur laquelle l'émetteur est connecté et envoyé vers la seconde antenne pour diffusion. Les deux antennes sont reliées par un câblage de x KM sur lequel la vitesse de propagation est de 20000 Km/s. Si A évolue dans le premier cercle et B dans le deuxième et en supposant que les antennes ne demandent aucun temps de traversé, quelle est la valeur maximale de x ?



- c) On suppose que la vitesse de transmission des trames sur le support métallique soit de 100Mbit/s. Cela change-t-il quelque chose à la distance x ?
- d) Si la vitesse de transmission sur le support métallique est de 1 Mbit/s, cela change-t-il quelque chose au système ?
- e) On revient à une capacité de transmission de 10 Mbit/s sur le support métallique. On suppose maintenant qu'il y ait un temps de latence de  $2\mu s$  (temps de traversée de la station antenne) au niveau de l'antenne et que cette station joue le rôle d'un répéteur. Quelle est la nouvelle valeur maximale pour x ?

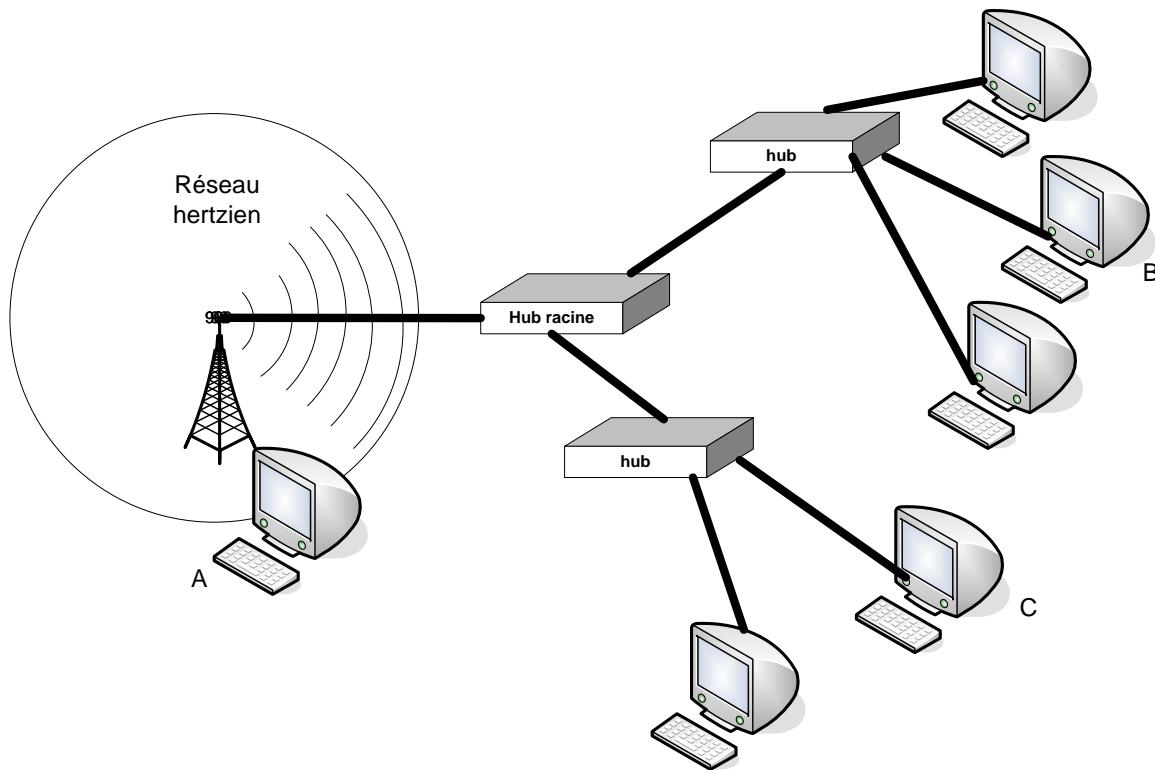
- f) On suppose maintenant que les stations antennes soient des points, c'est-à-dire que les trames Ethernet ne soient transmises vers l'autre antenne que si le répéteur ne peut être atteint que par cette deuxième antenne. Quelle est la valeur maximale de  $x$  ?
- g) Une autre stratégie pour obtenir une bonne couverture consiste à doter les terminaux du logiciel et du matériel leur permettant de se comporter comme une antenne intermédiaire. Si les deux stations qui communiquent entre elles peuvent s'atteindre directement, il y a communication directe. Si en revanche, les deux stations ne peuvent pas s'atteindre directement parce qu'elles sont trop éloignées, elles utilisent un ou plusieurs terminaux intermédiaires. C'est ce que l'on appelle un réseau *ad hoc*. Supposons que les terminaux intermédiaires servent de répéteur. Jusqu'à quelle distance maximale peut-on aller si les répéteurs ont des temps de traversée négligeables.
- h) En supposant que le débit soit augmenté de 20 Mbit/s, quelle est la portée maximale de ce système ?
- i) Si maintenant chaque terminal joue le rôle de point, quelle est la distance maximale entre les deux points les plus éloignés du système ? Quels sont les principaux avantages et inconvénients de ce système.

### **Corrigé exercice 119**

- a) Il faut que le temps maximal aller-retour soit de  $51,2 \mu\text{s}$ , ce qui, à la vitesse de  $300000\text{km/s}$ , représente  $15,36\text{km}$ . La valeur de  $D$  est donc de  $15,36/2=7,68\text{km}$ .
- b) Il y a  $4\text{km}$  de propagation par les ondes hertziennes et  $x$  kilomètres par la paire métallique. Le temps maximal étant toujours de  $51,2 \mu\text{s}$  pour le temps aller-retour nous avons  $51,2=8/0,3+2x/0 ; 2$  ce qui donne  $x=2,46 \text{ km}$ . Les deux cercles se coupent bien.
- c) Bien sûr, puisque le temps aller-retour maximal est de  $51,2 \mu\text{s}$
- d) Oui, il peut y avoir des problèmes de congestion dans l'accès au support métallique.
- e) La distance  $x$  peut devenir infinie.
- f) La valeur maximale de  $x$  peut être une valeur quelconque seulement limitée par le nombre de terminaux. L'avantage de cette méthode est sa mise en place instantanée. Elle est d'ailleurs utilisée par les sauveteurs lors de tremblements de terre. Son inconvénient est que chaque terminal doit prendre en charge du trafic provenant d'autres terminaux.
- g) Comme pour la première question, le temps aller-retour ne doit pas dépasser  $51,2 \mu\text{s}$ . Comme la capacité de transmission est toujours de  $300000\text{km/s}$ , la distance maximale est de  $7,68\text{km}$ .
- h) Pour transporter les 64 octets de taille minimale de l'environnement Ethernet, il faut  $512/20=25,6 \mu\text{s}$  de délai aller-retour. La portée maximale est donc de  $3,84 \text{ hm}$ .
- i) Si chaque terminal joue le rôle de pont, la distance n'est limitée que par la couverture effectuée par les terminaux. Il n'y a donc pas de limitation intrinsèque.

### **Exercice 120**

On réalise un réseau hertzien mélangé à un réseau terrestre, comme illustré à la figure 15-21. Le réseau terrestre est un réseau station constitué de trois hubs. L'antenne est reliée au hub racine. La station antenne joue le rôle de récepteur.



- Lorsque A émet les stations B et C reçoivent-elles une copie de la trame Ethernet ?
- Si C émet une trame Ethernet, toutes les stations mobiles reçoivent-elles une copie ?
- En fait, sur les Ethernet hertziens, il est très difficile d'utiliser la méthode CSMA/CD car l'émetteur ne peut pas écouter en même temps qu'il transmet. En cas de collision, il n'y a pas moyen d'arrêter immédiatement la collision. Il faut donc éviter les collisions. Pour cela, on utilise une technique d'accès au support physique : on écoute toujours la porteuse avant de transmettre. Si la porteuse est libre, la station émet immédiatement. Montrer que la probabilité de collision est très faible. Si la porteuse est occupée, on attend la fin de la transmission, puis on attend un temps précis dépendant de chaque station. Donner une façon de déterminer ces temps de sorte qu'il ne puisse y avoir de collision.
- Quel est l'inconvénient de cette solution ?

### **Corrigé exercice 120**

- Oui, bien sûr.
- Oui, bien sûr.
- Lorsque la porteuse n'est pas occupée pour qu'il y ait collision il faut que deux stations émettent dans un temps inférieur au délai de propagation aller-retour entre ces deux stations. Comme ce temps correspond au maximum à  $51,2 \mu\text{s}$ , pour qu'une collision se

produise il faut que les deux stations émettent dans ce temps de 51,2 µs. La probabilité d'occurrence d'un tel évènement est négligeable.

Il faut choisir des temporisateurs d'émission séparés d'au moins 51,2 µs pour être sûr que, lorsqu'une station transmet, toutes les autres stations ont le même temps de s'apercevoir que la porteuse est occupée avant d'avoir le droit de transmettre.

- d) Cette solution donne toujours la priorité à la station qui a le plus court temporisateur, station qui est donc fortement privilégiée. La station possédant le plus long temporisateur est de ce fait fortement pénalisée. On peut éventuellement modifier les temporisateurs dynamiquement, mais ce mécanisme est assez complexe.

### Exercice 121

*On veut se servir de l'un de ces réseaux Ethernet à 10 Mbit/s pour transporter de la parole téléphonique. La contrainte pour obtenir une parole téléphonique de bonne qualité nécessite un temps de transport inférieur à 150 ms entre le moment où la parole sort de la bouche et l'instant de remise du son à l'oreille du destinataire. (On suppose que la parole téléphonique soit compressée et demande un débit de 8 Kbit/s).*

- Sachant que la trame Ethernet doit transporter 46 octets de données au minimum, quel est le temps de paquetisation-dépaquetisation de la parole ?
- On suppose que le temps de passage dans le terminal et son coupleur soit négligeable. Si l'on suppose le réseau assez chargé et le nombre de collisions égale à dix avant que la trame Ethernet soit effectivement transmise, quel est le temps d'attente maximal ?
- Montrer que, sur un Ethernet partagé, on peut donc faire de la parole téléphonique assez simplement.
- Si le réseau est un Ethernet commuté dans lequel il faut traverser trois nœuds de transfert de type commutateur, la parole est-elle encore possible ? (On peut faire l'hypothèse qu'en moyenne la file de sortie du nœud de transfert possède 10 trames Ethernet en attente d'une longueur moyenne de 512 octets.)

### Corrigé exercice 121

- A la vitesse de 8kbit/s, cela représente un octet toutes les 1 ms. Pour remplir et vider la trame Ethernet, il faut donc 46 ms. Ces temps de remplissage et de vidage s'effectuant en parallèle, le temps de paquetisation-dépaquetisation est de 46 ms. Il reste donc 104ms pour le transport de la trame.
- Si l'on attend toujours le temps maximal avant répétition de la trame, le temps jusqu'à l'émission gagnante, la dixième, est de :  $51,2 \times (1+3+7+15+31+63+127+255+511+1023)=104\text{ms}$ .
- En effet, le temps de transfert de l'information correspond à la somme des temps de paquetisation-dépaquetisation, d'attente dans la station terminale et le coupleur, d'accès au support physique et de transport sur ce dernier. Les temps de propagation et de traversée de la station étant négligeable, le temps total de transport est au maximum de  $46+104=150\text{ms}$ . On se situe bien dans un temps acceptable.
- Le temps de paquetisation-dépaquetisation reste le même ; 46ms. Le délai de transit dépend de la distance ; Enfin, le temps de traversée des nœuds dépend de l'occupation et éventuellement de la congestion. Si l'on suppose qu'il y a en moyenne 10 paquets Ethernet dans une ligne de 51,2 octets, cela représente un temps moyen d'attente de  $512 \times 8 / 10 = 409 \mu\text{s}$  par trame. Pour 10 trames, on arrive à un temps de traversée d'un

nœud de 4ms. Pour traverser les 3 nœuds, il faut donc 12ms. La possibilité de faire de la parole dépend essentiellement de la distance à parcourir. La valeur maximale peut être déterminée par l'équation :  $150 = 46 + 12 + \text{temps de propagation (en ms)}$

A la vitesse de 200000km/s, cela représente une distance de 18400km. On voit ainsi que l'on peut réaliser assez facilement de la parole sur de l'Ethernet commuté, surtout si les trames de parole sont prioritaires dans les nœuds de transfert.

### **Exercice 122.**

*On suppose que deux clients A et B communiquent entre eux par l'intermédiaire d'un réseau à commutation de cellule de type ATM.*

- a) Monter pourquoi cette technique ATM est acceptable pour le transport des applications asynchrones et isochrones.
- b) Le circuit virtuel entre A et B est composé d'une succession de VC (Virtual Circuit) de numéro i, j, k et de VP (Virtual Path) de valeurs m, n, o. Déduire une table de routage dans un commutateur ATM de type VC/VP. Quand peut-on multiplexer plusieurs VC sur un VP ?
- c) Donner les différentes techniques de multiplexage sur l'interface utilisateur. En d'autres termes, comment un utilisateur peut-il multiplexer ses différents médias sur la même interface ?
- d) On suppose que le transport de A vers B concerne une parole numérique compressée à 16 Kbit/s. La contrainte de délai de transport pour ce type de données analogiques numérisées est de 28 ms. En supposant que la vitesse de transmission des signaux sur les supports physiques soit de 200000 Km/s, donner le temps maximal de traversée du réseau pour que le signal de parole puisse être reçu correctement. Quelle solution peut-on adopter ?
- e) Le réseau ATM est correctement de plusieurs commutateurs Banyan en série. Quels sont les avantages et les inconvénients d'une telle topologie ?

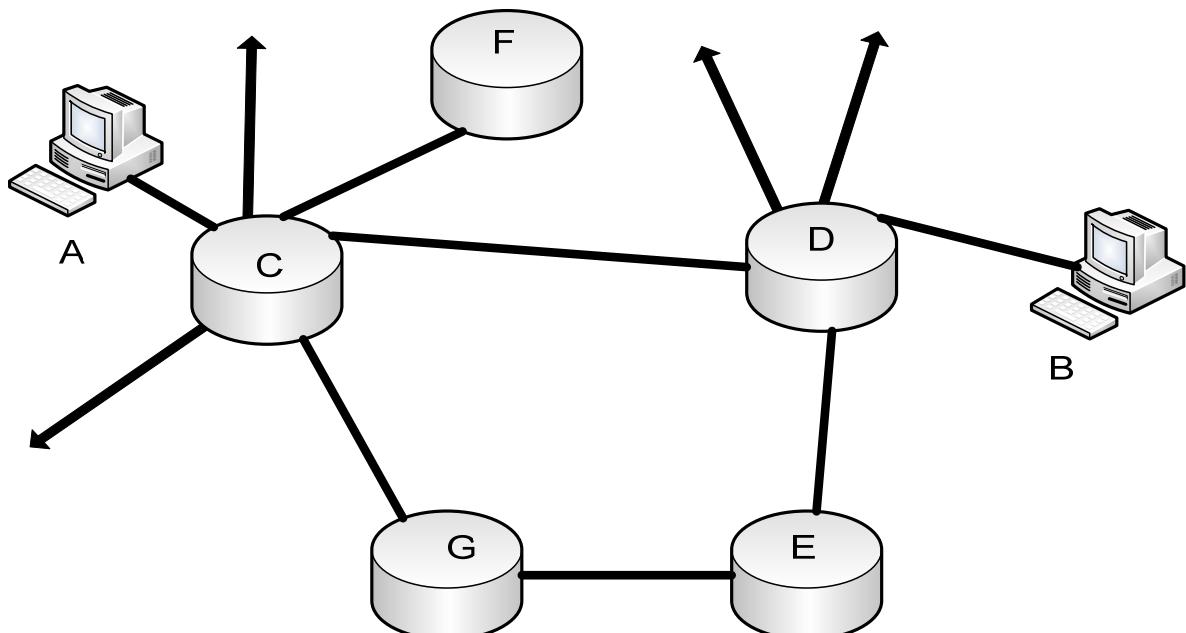
### **Corrigé exercice 122**

- a) La technique de transfert ATM est conçue pour réaliser des transferts de parole téléphonique en minimisant le temps de paquetisation et en permettant l'obtention d'un délai de transit borné par l'adoption d'une qualité de service appropriée, la classe CBR.
- b) Dans le circuit virtuel considéré, les références sont (i, m), (j, n) et (k, o). Dans un commutateur ATM, il y a une table de routage pour la signalisation et une table de commutation pour les données utilisateur. Dans la question, il s'agit de la table de routage. Cette table se présente comme une table de routage d'un réseau avec une technique de transfert de type Internet : à une adresse de destination correspond une adresse de sortie du nœud. Si la question avait porté sur la table de commutation, elle se serait présentée sous forme x, (i, m) : y, (j, n), ce qui indique un accès par l'entrée x avec la référence (i, m) et une commutation vers la sortie y avec la référence (j, n). Au niveau du routage il doit y avoir une décision qui permette aux nouveaux circuits virtuels qui s'ouvrent de suivre un conduit déjà ouvert pour effectuer un multiplexage de plusieurs circuits virtuels sur un conduit virtuel.

- c) Un utilisateur peut multiplexer ses coordonnées dans une même cellule en utilisant les protocoles AAL3 ou AAL4, mais c'est totalement inusité aujourd'hui. Il peut y avoir un multiplexage sur un même circuit virtuel, en utilisant soit le GFC, soit un protocole AAL, il est aussi possible pour un utilisateur de multiplexer plusieurs circuits virtuels sur un même conduit virtuel
- d) Le temps de paquétisation est de 0,5ms par octets. Pour remplir une cellule, il faut donc  $48 \times 0,5\text{ms} = 24\text{ms}$ . Comme un temps maximal de 28ms peut être accepté il reste 4ms pour le transport. A la vitesse de 200000km/s, cela fait une distance de 800km. Une solution pour augmenter la distance est de ne pas remplir complètement la cellule ou de ne pas compresser autant la parole téléphonique.
- e) Les commutateurs Banyan en série permettent d'augmenter le nombre de chemins entre un port d'entrée et un port de sortie. Cela permet d'acheminer les cellules en parallèles entre les ports d'entrée et les ports de sortie. En contrepartie, cela allonge le temps de traversée du commutateur.

**Exercice 123.** On considère un réseau de communication qui utilise la commutation de cellules ATM avec une architecture normalisée UIT-T. Pour effectuer le transport de l'information de A à B, le chemin virtuel qui est ouvert passe par deux nœuds intermédiaires C et D. Le schéma général du réseau est illustré à la figure 16-14.

FIGURE16-14



- a) Indiquer comment est mis en place le circuit virtuel.
- b) Donner les tables de routage des cellules dans les nœuds C et D.
- c) Si D est un commutateur VP (de chemin virtuel VP), montrer comment il effectue sa commutation.
- d) Indiquer la structure de l'en-tête des cellules sur les différentes interfaces.
- e) Indiquer comment s'effectue le contrôle de flux.

- f) Si le taux d'erreur sur les lignes de communication est comment s'effectuent les corrections nécessaires pour maintenir la qualité de la transmission ?
- g) Si la connexion d'un utilisateur sur le réseau ATM s'effectue par une connexion RNIS bande étroite, c'est-à-dire par l'intermédiaire, par exemple, d'une interface SO, cela est-il contradictoire avec la commutation de cellules ATM à l'intérieur du réseau ? Expliquer *comment s'effectue le passage du RNIS bande étroite vers le RNIS large bande.*
- h) Supposons que le débit de A vers B soit de la parole compressée à 32 Kbit/s .Quelle est la distance maximale admissible entre deux terminaux téléphoniques ? Trouver une solution si l'on veut aller plus loin sans ajouter de suppresseur d'écho.
- i) Quelles sont les différentes solutions pour multiplexer plusieurs médias sur un circuit virtuel unique ?

### Corrigé exercice 123

- a) La mise en place d'un circuit virtuel s'effectue par une signalisation. Soit cette signalisation est explicite et ouvre à la fois un circuit virtuel et un conduit virtuel, soit elle permet de détecter le meilleur conduit. Dans ce dernier cas, la signalisation s'effectue par un conduit déjà ouvert.
- b) Puisqu'on parle de table de routage il faut s'intéresser à la signalisation. La table de routage permet à la signalisation d'être routée par la meilleure route possible et d'ouvrir un circuit virtuel. Dans le cas de notre réseau, la ligne de la table de routage précisant la route à suivre pour atteindre B indiquait la sortie en direction de D lorsque le paquet de signalisation s'est présenté. Cette ligne, comme l'ensemble de la table de routage, peut varier dans le temps.
- c) Le commutateur D ne travaille que sur le numéro de circuit virtuel.
- d) Les en-têtes sont conformes à ce qui a été énoncé dans ce cours ; Les différences concernent la longueur de la zone de référence. Sur l'interface UNI, entre A et C, l'en-tête ne comporte que 24 bits de référence. Sur les interfaces NNI, les références sont sur 28 bits.
- e) Dans l'environnement ATM, le contrôle de flux s'effectue par classe. Les classes CBR et VBR sont mises en priorité dans les nœuds, et leurs trafics sont maîtrisés par une allocation de ressources. Le vrai contrôle de flux s'effectue essentiellement sur le trafic ABR, grâce aux cellules RM (Ressources Management) qui remonte le long des circuits virtuels pour indiquer aux nœuds d'accès la quantité de trafic ABR qui peut être absorbée sur le circuit virtuel. C'est un contrôle de flux de type rate-based, c'est-à-dire sur un contrôle du taux d'accès.
- f) Si le taux est mauvais les corrections d'erreurs peuvent s'effectuer sur les paquets de niveau AAL. Si la couche AALS est utilisée, une zone de détection d'erreur est ajoutée au paquet AAL. Une erreur déclenche de ce fait un, mécanisme de reprise consistant à renvoyer tout le paquet AAL en erreur. Si la couche est de type AAL3 ou AAL4, la zone de données comporte un champ de contrôle d'erreur sur 10bits. Lorsqu'une erreur est détectée sur les données transportées, la cellule est détruite, et cela enclenche une retransmission du paquet AAL.
- g) Oui, il y a une certaine contradiction entre l'utilisation d'un réseau ATM et une interface du RNIS bande étroite. Cette dernière est essentiellement à base de circuit tandis que l'interface d'un réseau ATM s'effectue par un trafic de cellules ATM. Le passage du RNIS bande étroite vers le RNIS large bande doit s'effectuer par une

modification de l'interface utilisateur. Pour le RNIS large bande il faudrait une interface permettant d'y faire entrer des cellules haut débit.

- h) Si la parole est compressée à 32kbit/s cela indique un flot moyen d'un octet toutes les 250 µs. Pour remplir une cellule ATM il faut donc un temps de 12ms. Si le réseau possède des échos, le temps aller-retour doit être de 56ms, soit 28ms pour aller simple. Comme la paquetisation demande 12ms, il reste 16ms pour la traversée du réseau. A la vitesse de 200000km/s, cela donne une portée de 3200km. Plusieurs solutions permettent d'aller plus loin : ne pas remplir complètement la cellule, multiplexer plusieurs utilisateurs dans une même cellule comme dans l'AAL2 ou augmenter le débit en compressant moins le flot téléphonique.
- i) Même réponse qu'à la question de l'exercice précédent.

### Exercice 124 :

On suppose qu'on multiplexe deux VC par l'intermédiaire d'un VP. Le contrôle de flux peut être assuré soit par deux leaky-buckets distincts, un par circuit (VP/VC) par un seul leaky-bucket sur le VP.

- a) Quelle est la meilleure des deux solutions si les flux sont isochrones ?
- b) Quelle est la meilleure des deux solutions si les deux flux sont asynchrones
- c) Indiquer les solutions et les inconvénients des deux méthodes.

### Corrigé exercice 124

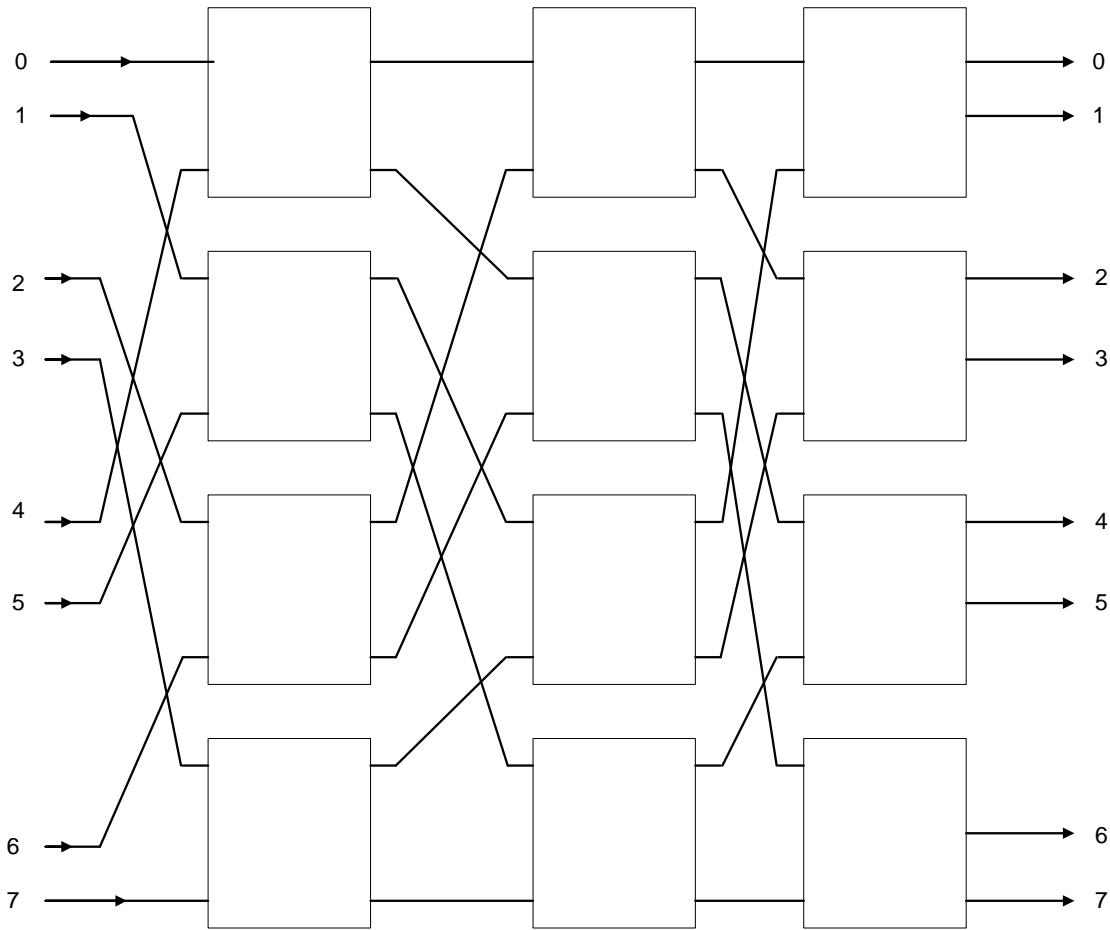
- a) Si les flux sont isochrones le mieux est d'avoir deux leaky-buckets puisque chaque leaky-bucket s'adapte parfaitement à chaque flux isochrone.
- b) Si les flux sont asynchrones la meilleure solution consiste à prendre un seul leaky-bucket. Si n'a plus de cellule pendant un moment toute la puissance du leaky-bucket est transférée à l'autre flot.
- c) Les deux leaky-buckets fonctionnent bien lorsque les flux à prendre en charge sont synchrones. Si les flux sont asynchrones il peut y avoir une perte de puissance puisqu'un des deux leaky-buckets peut devenir inactif s'il n'a plus de cellule à émettre. Dans l'autre cas si les flux sont asynchrones, il peut y avoir attente à chaque paquet.

### Exercice 125.

On considère le commutateur 8X8 illustré à la figure 16-15, qui est un commutateur Oméga.

- a) Donner en cas de figure ou le parallélisme est de 8.
- b) Ce commutateur vous paraît-il meilleur qu'un commutateur Banyan ?
- c) Si on met deux commutateurs de ce type en série, calculer le nombre de chemin possible entre une entrée et une sortie.

FIGURE 16-15



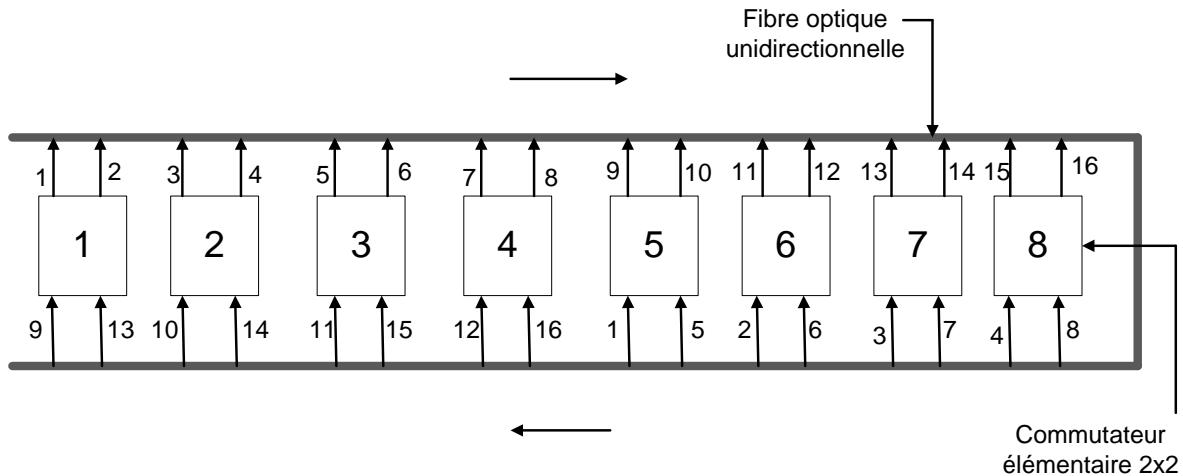
### Corrigé exercice 125

- a) Pour que le parallélisme atteigne 8, il faut que les 8 cellules puissent passer en parallèle. La solution s'obtient par une cellule en allant droit devant elle. La cellule arrivant par l'entrée 0 doit sortir par la sortie 0 ; si l'entrée est 1 il faut que la sortie soit 1, et ainsi de suite. On trouve donc la matrice suivante : à l'entrée  $i$  correspond la sortie  $i$ .
- b) Ce commutateur est semblable au commutateur Banyan.
- c) Le nombre de chemins possibles est 8. Depuis une entrée, on peut aller vers les 8 sorties distinctes, et depuis l'une de ces sorties. Il n'y a qu'un seul chemin pour aller à la sortie prédéterminée du commutateur.

### Exercice 126.

On considère maintenant le commutateur *Shuffle-Net* illustré à la figure 16-16 qui est un commutateur ATM particulier permettant de transporter des trames ATM depuis n'importe quelle porte d'entrée (numérotée de 1 à 8 au centre de la figure) vers n'importe quelle porte de sortie (les mêmes que les entrées).

*FIGURE 16-16*



- a) Montrer que deux cellules arrivant simultanément aux ports 1 et 2 se dirigent vers les ports 5 et 7 respectivement peuvent effectuer la commutation en parallèle.
- b) Quel est le taux de parallélisme moyen ?

### Corrigé exercice 126

- a) Pour aller du port 1 au port 5, il y a plusieurs chemins, mais le plus simple est de prendre le canal 1 qui va directement de 1 à 5. Pour aller du port 2 au port 7 ; il suffit de prendre le canal 3. Il y a donc bien parallélisme.
- b) Pour déterminer le taux de parallélisme moyen, il faut examiner les différents chemins pour aller d'une porte d'entrée à une porte de sortie. La figure Y détermine le graphe des chemins de ce commutateur.

(FIGURES-Y)

En supposant que 8 cellules se présentent en parallèle sur les ports d'entrée numérotés de 1 à 8 et que chacune de ces cellules a une probabilité égale d'aller vers l'une des 8 portes de sortie, le taux de parallélisme moyen se détermine par le nombre moyen de cellules qui arrivent à leur port de sortie en parallèle. Dans le graphe on voit tout d'abord que les paquets entrant par les portes 1, 2, 3 et 4 n'entrent pas en collision avec les cellules entrant par les portes 5, 6, 7 et 8. En examinant le cas des cellules 1, 2, 3 et 4, on voit qu'il y a une chance sur 2 qu'il y ait une collision sur les portes 5, 6, 7 et 8. En moyenne une cellule sur 2 franchit donc cet obstacle. De plus, il y a 2 chances sur 8 que les cellules arrivent à bon port. Il y a donc une chance sur 8 qu'une cellule arrive bien. À l'étape suivante, il y a une chance sur deux supplémentaire que la cellule arrive à son port de sortie. Comme il y a une chance sur 4 qu'elle entre en collision avec une autre cellule, cela fait 1 chance sur 8 qu'une cellule arrive à bon port. Enfin, lors d'une troisième étape, il y a 1 chance sur 4 qu'il y ait une collision.

Cela donne 1 chance sur 64 que la cellule arrive à destination. On obtient au total  $2 \times (1/8+1/8+1/64) = 0,53$ . En moyenne il y a donc approximativement un parallélisme de 4 sur 8.

### Exercice 127.

On considère un réseau ATM constitué de deux commutateurs et d'un brasseur. On suppose que deux clients A et B communiquent entre eux suivant le schéma illustré à la figure 16-17. La capacité de commutation entre A et B est de 100 Mbit/s.

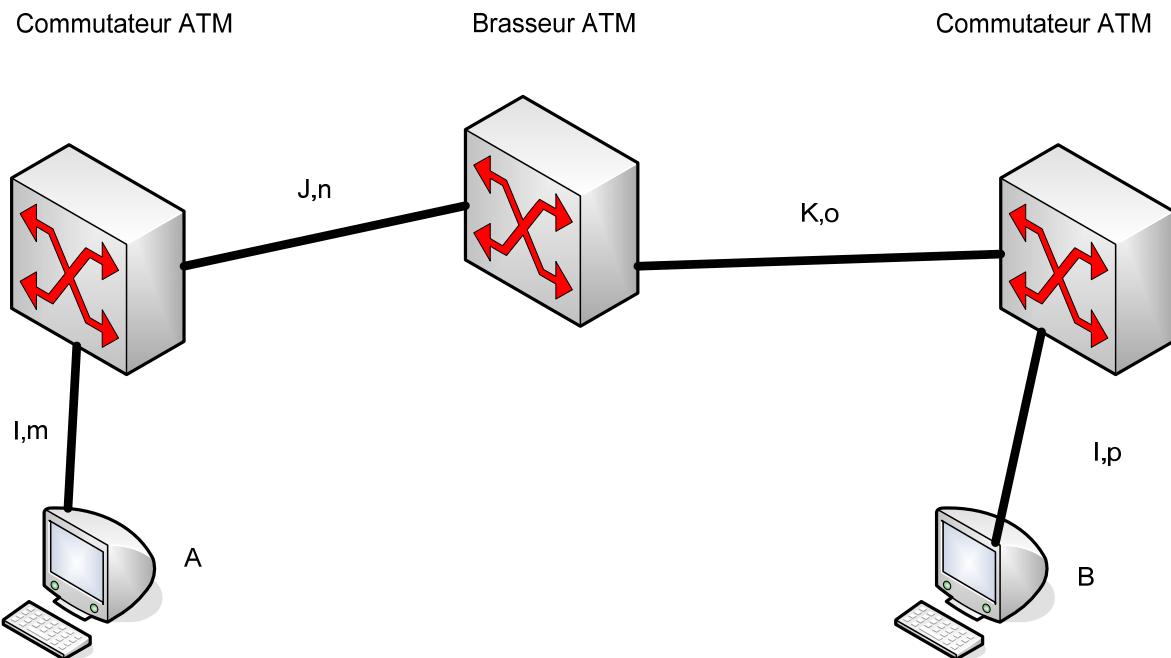


FIGURE 16-17

- Soit le circuit virtuel entre A et B composé d'une succession de VC (Virtual circuit)  $i, j, k, I$  et de VP (Virtual path)  $m, n, o, p$ . Le nœud central est un brasseur qui ne commute que sur le numéro VP. Y a-t-il des valeurs  $i, j, k, I, m, n, o, p$  qui soient égales ?
- On suppose que le transport de A vers B concerne une voie vidéo analogique, numérisée à 32 Mbit/s. La contrainte de délai de transport pour ce type de données analogiques puis numérisée est de 28ms (comme pour la parole). En supposant que la vitesse de transmission des signaux sur les supports physiques soit de 250000 Km/s, donner la distance maximale entre A et B (rappelons qu'une cellule contient 48 octets de données.)
- Les commutateurs et le brasseur ATM sont de type Oméga, dont la topologie est illustrée à la figure 16-18. En fait, chaque commutateur-brasseur est composé de trois commutateurs Oméga en série. Combien existe-t-il de chemins possibles entre un port d'entrée externe et un port de sortie externe pour chaque commutateur ? quel est l'intérêt de mettre plusieurs réseaux Oméga en série ?

- d) Que se passe-t-il si deux cellules entrant en même temps par des ports d'entrée distincts ont le même port de sortie ? Proposer une solution à ce problème.
- e) On permet deux classes de clients sur ce réseau, les clients avec contrainte (temporelle et perte), que l'on considère comme des clients CBR (Constant Bit Rate), et les clients avec la contrainte de ne pas perdre d'informations, qui sont associés à un trafic ABR (Available Bit Rate). On utilise le bit CLP pour distinguer ces deux classes de clients. On considère 10 communications simultanées entre A et B, chaque de 10 Mbit/s de trafic crête et de 5 Mbit/s de trafic moyen. Ces 10 clients demandent une qualité de service CBR. Dans un premier temps, le réseau réserve les ressources à 100p. 100 pour les clients CBR. Montrer que, dans ce cas les garanties en temps et en perte des 10 clients sont réalisées.
- f) On ajoute maintenant aux 10 clients précédents 10 clients ABR, représentant chacun un débit moyen de 5 Mbit/s. Donner un algorithme permettant de transporter les informations des 20 clients (10 CBR et 10 ABR) de telle sorte que tous soient satisfaits.

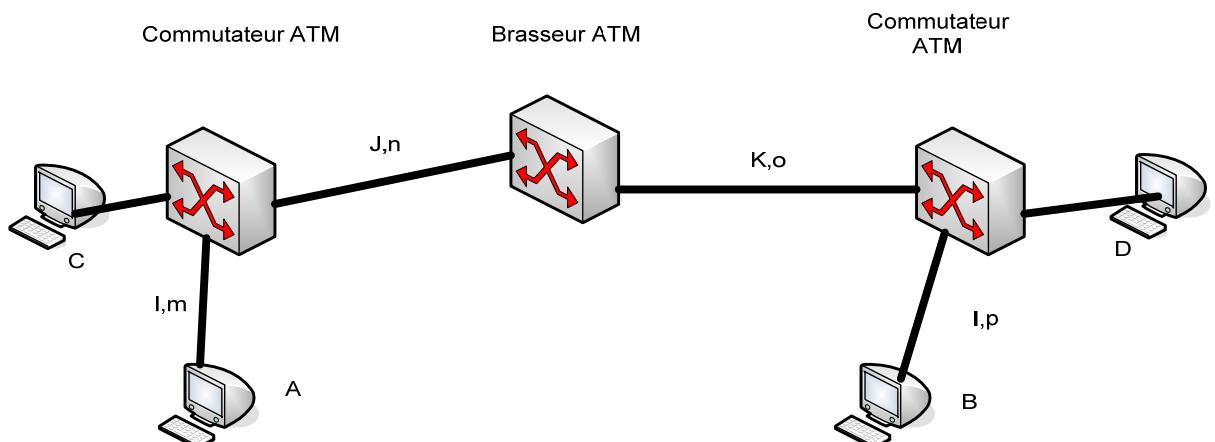


FIGURE 16-18.

- g) Supposons qu'il y ait simultanément une communication entre C et D de type ABR de 20 Mbit/s de débit moyen. Les 20 clients peuvent-ils toujours être satisfaits dans leur qualité de service (garantie totale pour les clients CBR, garantie d'aucune perte de cellules pour les clients ABR) ? Que faut-il faire ? Décrire un algorithme.
- h) Si un client CBR de plus se présente sur la connexion CD et demande un trafic crête de 10Mbit/s, peut-on toujours satisfaire les contraintes des clients CBR, des clients ABR et des clients CBR et ABR ensemble ?
- i) La même infrastructure est transformée en un réseau IP. Peut-on laisser des commutateurs brasseurs ou doit-on les remplacer par des routeurs ? Expliquer les raisons.
- j) Dans un premier temps, si on suppose qu'on ait remplacé les commutateurs et les brasseurs par des routeurs, peut-on effectuer la même différence entre le routeur remplaçant le brasseur et les routeurs remplaçant les commutateurs ATM ? En d'autres termes peut-on trouver un routeur travaillant de manière équivalente à ce que fait un brasseur ?
- k) Dans un deuxième temps, on garde les commutateurs ATM que l'on a adaptés pour les paquets IP. Comment pourrait-on faire une commutation sur des paquets IP ?

(Comment se présente la table de routage ? Comment utilise t-on l'adresse ? Quelle adresse ?)

- i) Si l'on prend les 20 premiers clients (10 CBR et 10 ABR) avec leurs caractéristiques, peut-on les satisfaire dans ce nouveau réseau ?

### **Corrigé exercice 127**

- a) Puisque le nœud central est de type brasseur, il ne travaille que sur le numéro de VP. Il est donc possible de garder le numéro de voie logique sur le brasseur central. Donc j peut être égal à k.
- b) Pour remplir la cellule à la vitesse de 32 %bit/s, il faut un temps négligeable. Les 28ms sont uniquement affectées au délai de transfert. Avec 28ms et une vitesse de 200000km/s, la distance maximale est de 7000km.
- c) S'il y a 3 réseaux Oméga en série, il y a 64 chemins possibles. L'intérêt de mettre plusieurs chemins est évidemment de permettre un parallélisme maximal.
- d) Il est possible de faire transiter les deux cellules jusqu'à la porte de sortie, mais il faut que les deux cellules arrivent par des voies différentes sur le dernier commutateur élémentaire.
- e) On suppose dans cet exercice que sous le vocabulaire CBR se cachent les clients CBR et VBR. Les garanties en temps et en perte sont obtenues puisque chaque client peut recevoir son débit crête.
- f) Effectivement tous les clients peuvent être satisfaits si l'on adopte l'algorithme suivant :  
Les clients CBR/VBR sont servis en priorité et les clients ABR ne peuvent être servis que s'il n'y a pas de clients CBR/VBR. Avec cet algorithme les clients CBR/VBR peuvent utiliser les 100Mbit/s quand ils en ont besoin. Les clients ABR sont quand même servis puisqu'en moyenne les clients CBR/VBR ne prennent que 50Mbit/s.
- g) Les clients CBR/VBR peuvent toujours être garantis puisqu'ils sont en priorité. Ils prennent en moyenne 50Mbit/s. Il n'est pas possible de faire transiter 70Mbit/s supplémentaires, en moyenne sur la partie du réseau situé entre C et D. Le seul algorithme à mettre en place est un contrôle qui interdit un flux moyen total de 20 Mbit/s supplémentaire, autrement dit qui interdit de dépasser le flux moyen total de 100 Mbit/s.
- h) Si un client supplémentaire CBR demande 10 Mbit/s de débit crête et 5 Mbit/s de débit moyen, il n'est plus possible de garantir la qualité de service CBR si on le laisse entrer dans le réseau puisqu'il y a une probabilité non nulle que le flux total des clients CBR dépasse 100Mbit/s. Il n'y a, bien sûr, aucune garantie pour les trafics ABR dans ce contexte.
- i) Si le réseau est IP, cela indique que les machines extrémité traitent des paquets IP. Si l'on veut rester dans le domaine Internet classique, il faut transformer les commutateurs en routeurs. Ces routeurs auront des cartes de communication ATM permettant de faire transiter les paquets IP encapsulés dans des cellules ATM, de routeur en routeur. Il y a aussi la possibilité de garder le réseau de commutateurs ATM et, dans les machines terminales uniquement, d'encapsuler le paquet IP dans des cellules ATM.
- j) Oui, il suffit que le routeur ne travaille qu'on fonction du réseau à atteindre et non de l'utilisateur à atteindre. Il y a une hiérarchie à deux niveaux dans l'adresse IP, qui en un sens, ressemble à la hiérarchisation à deux niveaux de la référence ATM (niveaux VCI et VPI).

- k) C'est le cas de MPLS, où les paquets IP sont non pas récupérés au niveau du commutateur MPLS mais commutés à l'intérieur des cellules ATM. La table de routage ne concerne que la signalisation MPLS. Elle se présente sous la forme classique, que l'on trouve dans le réseau Internet et est utilisée pour mettre en place les circuits virtuels ATM.
- l) Oui, tout aussi bien. Les clients CBR/VBR sont affectés à des circuits virtuels MPLS de type CBR/VBR et les clients ABR à des adresses virtuelles MPLS de type ABR.

### **Exercice 128**

*On cherche à multiplexer les différentes voies d'une station multimédia transmettant vers une machine distante. Ces voies sont les suivantes : Vidéo à 35Mbit/s de moyenne, parole à 64Kbit/s de moyenne et données à 2Mbit/s de moyenne.*

- a) Première possibilité : on multiplexe ces trois voies sur une liaison ATM. Donner une méthode de contrôle de flux sur la connexion ATM à base de leaky-bucket, qui puisse prendre en compte les différentes contraintes. Comment discerner en sortie ces trois types de voies ?
- b) On envoie les trois voies sur trois conduits virtuels distincts. Donner les techniques de leaky-bucket qu'il est possible d'utiliser sur ces trois conduits.
- c) Que penser dans les deux cas des deux fonctionnalités suivantes :
  - 1- Synchronisation des trois voies au récepteur.
  - 2- Contrôle des erreurs
- d) On suppose que les nœuds de commutation soient des réseaux Banyan 8x8. On suppose également que les destinations soient équidistribuées c'est-à-dire que la probabilité d'aller vers une sortie quelconque à partir d'une entrée quelconque soit égale à 1/8.
  - 1- Calculer l'accélération du réseau Banyan c'est-à-dire le nombre moyen de cellules qui sont servies par le réseau Banyan, si 8 cellules se présentent simultanément à l'entrée sur les huit portes d'entrée ?
  - 2- Quelle serait la valeur pour un réseau Banyan 16x16 ?

### **Corrigé exercice 128**

- a) La première possibilité consiste à mettre un leaky-bucket pour chaque type d'application. Dans la seconde possibilité les 3 flots sont multiplexés sur un même circuit virtuel. La zone GFC ne peut pas être utilisée puisqu'elle disparaît sur les interfaces NNI. La seule possibilité est de remonter à un niveau plus haut, après décapsulation de la couche ATM.
- b) S'il y a 3 circuits virtuels, chacun peut disposer de la propre technique de contrôle par leaky-bucket. Dans le cas d'un débit isochrone, il suffit de prendre une solution dans laquelle les jetons arrivent régulièrement. Pour une application asynchrone, il faut choisir un leaky-bucket qui travaille au débit crête ou garde ses jetons lorsque le trafic descend en dessous de la moyenne.
- c) 1. La synchronisation des trois voies au récepteur est évidemment beaucoup plus facile si les trois voies sont multiplexées sur le même circuit virtuel.

2. Pour le contrôle des erreurs, il est beaucoup plus efficace de contrôler chaque voie indépendamment des autres ; en effet, la vidéo, la parole et les données n'ont pas ou tout les mêmes besoins en matière de taux d'erreur.
- d) 1. A la première étape, il y a 1 chance sur 2 qu'il y ait collision ; 4 cellules franchissent donc la première étape. A la deuxième étape, il reste 4 cellules et la probabilité de collision est maintenant de  $1/2 \times 1/2 = 1/4$ . Il y a donc encore  $4 \times 1/4 = 1$  cellule en collision. Il en reste donc 3. A la troisième étape, il reste 3 cellules, et la probabilité de collision est de  $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8$ . Le nombre de collision est donc de  $3 \times 1/8 = 3/8$ , soit 0,38. Le parallélisme moyen est donc de  $3 - 3/8 = 2,62$ . Il y a moins de 3 cellules qui passent en parallèle.
2. En reprenant le même raisonnement, on a 8 cellules qui passent la première étape. A la seconde, 2 cellules sont en collision. Il en reste 6. A la troisième, il y a  $6/8$ , soit 0,75 cellule en collision, Il reste donc 5,25. A la dernière étape, il y a  $5,25 \times 1/16 = 0,33$  cellules en collision et en reste à la sortie  $5,25 - 0,33 = 4,92$ . Il y a donc un parallélisme de presque 5.

### Exercice 129

*On utilise un contrôle de flux de type espaceur (les paquets à l'entrée du réseau sont séparés un intervalle minimal T.) dans lequel on définit une valeur T égale au temps minimal écoulé entre l'entrée dans le réseau de deux cellules. Un utilisateur ne peut donc pas faire entrer dans le réseau une nouvelle cellule avant le temps T.*

- a) Un utilisateur veut effectuer un transfert de parole haute définition à 512 Kbit/s par un service CBR (Constant Bit Rate). Quelle valeur de T doit-il prendre ?
- b) Si l'on effectue une compression qui ramène le flux à 64Kbit/s, avec une valeur crête de 256Kbit/s. Quelle valeur de T doit-on choisir pour un service VBR et pour un service ABR ?
- c) Supposons que l'application de l'utilisateur soit de la parole compressée à 32Kbit/s. Quelle est la distance maximale admissible entre deux terminaux téléphoniques qui subissent des échos ?
- d) Supposons qu'on multiplexe deux circuits virtuels (VC) par l'intermédiaire d'un conduit virtuel (VP) Le contrôle de flux peut être assuré par deux espaceurs distincts, un par circuit virtuel (VP/VC) ou bien un seul sur le VP
  - 1- Quelle est la meilleure des deux solutions si les flux sont isochrones ?
  - 2- Quelle est la meilleure des deux solutions si les flux sont asynchrones ?
  - 3- Indiquer les avantages et les inconvénients des deux méthodes.
- e) Tous les nœuds sont maintenant des commutateurs Ethernet capable de gérer des adresses MAC, IEEE et MPLS. Le mot commutateur est -il correct ?
- f) Aurait-on intérêt à mettre des ponts à la place de commutateurs Ethernet ?
- g) Le contrôle de flux est effectué par la notification Pause (T). Un nœud qui émet la notification Pause vers un autre nœud demande à celui-ci d'arrêter de lui envoyer des paquets Ethernet pendant le temps T. montrer que s'il y'a des boucles, ce contrôle peut être inefficace ?
- h) Donner un exemple de calcul de cette valeur T.

## Corrigé exercice 129

- a) Le service étant de type CBR cela indique que les cellules entrent selon un processus déterminé. Le nombre de cellules par seconde du processus est égal à  $512000/424$  (en supposant que l'on transporte 48 octets par cellule) ce qui donne  $1/20/1207,54=828\mu s$ .
- b) Pour un service VBR, puisqu'il doit y avoir une garantie sur le délai, il est nécessaire d'avoir un leaky-bucket qui travaille au débit instantané de 256kbit/s. Cette valeur correspondant à la moitié de celle de la question précédente, on trouve  $T=1,656ms$ . Pour le service ABR, il suffit d'avoir un leaky-bucket qui travaille au débit moyen c'est-à-dire à la vitesse de 64kbit/s. On trouve donc  $T=6,624ms$ .
- c) S'il y a des échecs le temps maximal aller-retour ne doit excéder 56ms, c'est-à-dire 28ms en supposant qu'il y ait une symétrie dans le réseau. Le temps de paquetisation best de 16 ms. Comme il y a un parallélisme entre la paquetisation et la dépaquetisation, le temps de transport restant est au maximum égal à 12ms. En comptant 200000km/s comme vitesse de propagation du signal on trouve une valeur de 2400km.
- d)
1. Si les flots sont isochrones, le mieux est d'opter pour deux leaky-buckets distincts correspondant exactement aux deux flots isochrones.
  2. Si les flots sont asynchrones, il faut opter pour un seul leaky-bucket prenant en charge les deux flux. En effet, il est possible pour un circuit virtuel de disposer de toute la puissance du leaky-bucket quand l'autre canal est arrêté.
  3. L'avantage de deux leaky-buckets est au départ, de correspondre parfaitement à deux flots isochrones. Si les flots ne sont plus synchrones un leaky-bucket peut ne rien avoir à faire tandis que l'autre peut devenir surchargé.
- e) Le mot commutateur n'est pas toujours correct. Lorsqu'on utilise l'adresse MAC, on parle plutôt d'un pont, mais il est vrai qu'un commutateur est très similaire à un pont. Pour MPLS on peut aussi parler de commutateur, mais le mot correct est LSR (Label Switched Router). Enfin, le cas le plus complexe concerne l'IEEE. L'adresse IEEE, ou adresse VLAN, est plutôt liée à la technologie associée. Il s'agit le plus souvent plutôt d'un routeur que d'un commutateur.
- f) Les ponts sont des sortes de commutateurs qui se prennent généralement en charge que L'interconnexion de deux sous-réseaux.
- g) Si l'on suppose que les trois noeuds A, B et C forment une boucle, A peut demander à B une pause de temps  $T$ . Si B demande à C une pause de  $T$ , et que C demande à son tour une pause de  $T$  à A, A ne reçoit plus de paquet de B et A ne peut pas écouler ses paquets vers C. En conséquence l'état de A reste le même et la primitive Pause n'a aucun effet sur l'état du système.
- h) Le calcul de l'intervalle de temps  $T$  pendant lequel une station demande une pause s'effectue en fonction de la taille du nombre d'octets à envoyer et de la vitesse de la ligne de communication. Par exemple, si un commutateur Ethernet possède une mémoire de sortie de 1,25Mo et une vitesse de 10 Mbit/s, on voit que pour vider sa mémoire il lui faudrait exactement 1s. Au maximum, le temps de pause qui pourrait être demandé est donc de 1s. Dans les faits dès que la mémoire commence à se vider, on recommence la transmission pour ne pas pénaliser les autres noeuds ; Dans notre exemple on aurait un temporisateur de 200 à 300 ms pour vider 20 à 30p.100 de la mémoire.

### **Exercice 130**

*On considère un réseau formé d'une interconnexion de plusieurs réseaux ATM. Pour entrer dans un réseau ATM ou pour passer d'un réseau ATM vers un autre, il faut des LSR*

- a) Montrer que ce réseau est un réseau MPLS.
- b) Pour transférer le paquet IP de signalisation d'un LSR vers un autre LSR, montrer que l'on utilise la signalisation ATM.
- c) Montrer que l'on peut utiliser des réseaux ATM existants et les transformer en réseaux MPLS. Quel en est l'intérêt ?
- d) Si l'opérateur de ce réseau souhaite un service de type MPLS DiffServ, comment doit-il s'y prendre ?

### **Corrigé exercice 130**

- a) Ce réseau est bien un réseau MPLS puisque pour entrer dans le réseau il faut passer par un LSR ou plus exactement un LER (Label Edge Router) qui est un LSR de bordure
- b) Une fois le LSR suivant choisi par une technique de routage IP dans le nœud, il faut réaliser cette traversée le réseau ATM qui relie les deux LSR. Pour réaliser cette traversée, il faut ouvrir un circuit virtuel dans le réseau ATM. Celui-ci ne peut être ouvert que par une signalisation ATM.
- c) Effectivement on peut réutiliser les sous-réseaux ATM existants et les relier par des LSR. Il faut également mettre des LSR, ou plus exactement des LER, à toutes les entrées du réseau. L'intérêt de cette réutilisation est de pouvoir migrer doucement vers une technologie MPLS pure, dans laquelle tous les nœuds deviennent des LSR.
- d) Offrir un service MPLS DiffServ indique que les qualités de service offerte par l'opérateur sont celles qui correspondent aux classes DiffServ. Dans ce cas l'opérateur doit dédier ses LSP (Label Switched Path) à des classes de service DiffServ.

### **Exercice 131**

*On considère un réseau MPLS formé de LSR interconnectés par des liaisons Ethernet commutées.*

- a) Montrer qu'il faut ajouter une référence dans le champ d'en-tête de la trame Ethernet (« Le shim label »)
- b) Pourquoi ce champ est-il inséré entre l'adresse Mac et le champ VLAN ?
- c) Les paquets IP de signalisation sont-ils également transportés à l'intérieur des trames Ethernet ?
- d) Peut-on introduire de la qualité de service dans ce réseau MPLS ?
- e) Est-il possible d'avoir un réseau MPLS DiffServ dans toute la généralité de DiffServ ?

### **Corrigé exercice 131**

- a) Puisque nous avons un réseau MPLS, il faut que les trames Ethernet portant des paquets IP utilisateur soient commutés. Comme l'adresse MAC ne peut pas servir

- de référence, la norme MPLS prévoit d'ajouter un champ, le shim label, portant la référence.
- b) Le shim label portant la référence doit se situer à la fin de la zone de supervision de la partie de niveau 2 de la trame. Comme le champ VLAN est interprété comme un champ de niveau 3, il faut mettre le shim label après l'adresse MAC et avant le VLAN.
  - c) Oui, les paquets IP de signalisation sont également portés par les trames Ethernet entre les LSP. Il faut toujours transporter des paquets dans des trames et ici le niveau trame est pris en charge par Ethernet.
  - d) Oui, il est possible d'introduire de la qualité de service dans ce réseau MPLS. Il suffit par exemple, de choisir la technologie DiffServ et de mettre les priorités s'y rapportant dans les LSR du réseau.
  - d) Oui, il est possible d'avoir un réseau MPLS DiffServ puisque le réseau n'est composé que de LSR DiffServ capables de mettre en place les priorités nécessaires pour réaliser un réseau DiffServ.

### **Exercice 132**

*Soit un VPN MPLS c'est-à-dire un réseau MPLS réalisant un réseau d'opérateur permettant d'offrir des VPN (Virtual Private Network), ou réseaux privés virtuels à ses clients. Un VPN a pour objectif principal de sécuriser les communications entre deux entités distantes qui traversent une zone qui n'appartient pas aux deux entités communicantes.*

- a) Monter que le réseau MPLS apporte une solution de base permettant de réaliser un réseau d'opérateur ayant pour objectif de fournir des VPN aux entreprises qui y sont connectées.
- b) Que faut-il ajouter pour finaliser la sécurité à l'intérieur du réseau MPLS ?
- c) Peut-on introduire des notions de qualité de service sur un tel VPN ?

### **Corrigé Exercice 132**

- a) Oui, un réseau MPLS est bien adapté pour réaliser un VPN. Les paquets d'un client peuvent être mis dans un LSP (Label Switched Path), ou circuit virtuel MPLS, spécifique, de telle sorte que la référence d'entrée n'appartienne qu'à ce client. Dans ce cas seuls les paquets de l'entreprise ayant souscrit un abonnement VPN peuvent utiliser le LSP dédié.
- b) Pour finaliser la sécurité, il faut d'abord réaliser une authentification mutuelle des deux équipements situés aux extrémités du LSP puis chiffrer les paquets qui transitent sur le chemin (LSP).
- c) Oui, et c'est l'avantage des VPN MPLS. Il suffit d'affecter une classe de priorité au LSP de l'entreprise pour introduire des qualités de service. On peut par exemple avoir un VPN MPLS DiffServ pour implanter de la qualité de service DiffServ dans le VPN MPLS.

### **Exercice 133.**

*On considère la station de base d'un réseau GSM. Cette station gère l'interface air avec les mobiles de sa cellule. L'interface air utilise une technique d'accès au canal radio de type TDMA, dans laquelle la trame de base possède 16 porteuses, c'est-à-dire 16 fréquences disponibles. La durée de la trame est de 4.615 ms, et chaque trame est divisée en 8 tranches de temps.*

- a) Si une parole téléphonique compressée en GSM représente 15 Kbit/s, combien de communications simultanées une cellule peut-elle contenir au maximum ?
- b) Si un client souhaite obtenir une communication à 64 Kbit/s, combien doit-il trouver de tranches disponibles sur chaque trame pour arriver à ce débit ?
- c) En supposant que l'on puisse permettre à un utilisateur d'atteindre des débits en mégabit par seconde, combien de tels abonnés pourraient être en charge simultanément ?
- d) On suppose que deux cellules se recouvrent partiellement de façon à éviter une coupure des communications. Un mobile peut-il capter la même fréquence sur les deux cellules ?
- e) On suppose que le mobile capte les fréquences des deux cellules. Comment doit-il choisir sa cellule dans le GSM ?

### **Corrigé exercice 133**

- a) Une tranche de temps correspond au passage d'une voie GSM. Il y a donc 8 voies de parole par porteuse et donc  $8 \times 16 = 128$  voies de parole.
- b) Il faut 6 tranches de temps. Sur chaque tranche, un débit de 9,6 kbit/s peut être pris en charge.
- c) Si un utilisateur peut acquérir l'ensemble des 8 tranches de temps d'une porteuse, cela lui donne un débit de  $8 \times 9,6 = 76,8$  kbit/s. Si un seul utilisateur pouvait occuper toutes les tranches et toutes les porteuses. Il prendrait toutes les ressources de la cellule et aurait un débit total de 1228,8 kbit/s, c'est-à-dire un peu plus de 1 Mbit/s.
- d) Non, un mobile ne peut capter la même fréquence sur les deux cellules si un TDMA est utilisé car il y aurait des interférences. En revanche la technique employée est du CDMA, il peut capter la même fréquence.
- e) Dans le GSM, le terminal choisit la cellule d'où provient l'émission la plus forte.

### **Exercice 134**

*En fait, pour être plus précis par rapport à l'exercice précédent, chaque cellule ne dispose que d'un certain nombre de porteuses qui lui ont été allouées lors de la mise en place d'un plan de fréquences.*

- a) Pourquoi la même fréquence ne peut-elle être allouée à deux cellules qui se touchent ?
- b) Les porteuses sont partiellement utilisées pour la signalisation c'est-à-dire pour les communications entre mobiles actifs (allumés mais sans communication orale) et la station de base. Si l'on suppose qu'une cellule possède 5 porteuses, elle dispose de 40 intervalles de temps, dont un est utilisé pour le contrôle commun et la diffusion, deux pour fournir des canaux de signalisation point à point, et le reste pour donner 37

canaux de trafic utilisateur. Si l'on suppose que, pour contrôler un utilisateur, il faille 2p.100 d'un canal de signalisation, combien de mobiles peuvent être actifs dans la cellule ?

- c) Si l'on suppose qu'un utilisateur téléphone en moyenne dix-huit minutes pendant le six heures de pointe de la journée, quel est le nombre moyen de clients qui téléphonent en même temps ?
- d) Cette cellule paraît-elle bien dimensionnée ?
- e) La possibilité de passer une parole téléphonique en demi-débit sur un canal à 5.6 Kbit/s au lieu d'un canal standard plein débit à 13 Kbit/s, paraît-elle une solution ?
- f) Comment peut-on passer à un son de meilleure qualité, comme le EFR (Enhanced Full Rate) ? Dans le cas de la cellule de cet exercice, est-ce possible ?
- g) Au niveau de la couche 2, on utilise dans le GSM le protocole LAP-D<sub>m</sub>, qui est très semblable au protocole HDLC. La fenêtre de contrôle de cette procédure est de taille 1. Donner une explication à cette valeur.

### **Corrigé Exercice 134**

- a) Dans un réseau GSM la même fréquence ne peut être allouée à deux cellules qui se touchent sous peine de produire des interférences.
- b) Comme il y a 5 porteuses et 8 canaux par porteuse, nous avons bien un équivalent de 40 intervalles de temps. Pour chaque canal de signalisation, il est possible de gérer terminaux mobiles. Puisqu'il y a canaux de signalisation il est possible de gérer 100 utilisateurs mobiles actifs et sur les 100 utilisateurs 37 seulement peuvent avoir une communication téléphonique, mais les 100 pourraient avoir des communications GPRS simultanément.
- c) Un utilisateur utilise en moyenne 18 min sur les 360 min des heures de pointe. Si l'on suppose qu'il y a 100 utilisateurs par cellule et que les communications téléphoniques se déroulent d'une façon équirépartie sur les 360 min, cela représente un total de 1800min, qui se répartissent sur 360min, c'est-à-dire 5 utilisateurs en moyenne.
- d) Non, cette cellule pourrait être mal dimensionnée car nous avons en moyenne cinq utilisateurs entrain de téléphoner pour 67 canaux disponibles. Dans les faits, le trafic n'est pas équirépartie et la probabilité d'atteindre plus de 37 clients souhaitant téléphonique en même temps est réelle tout en restant extrêmement faible.
- e) Si, sur un intervalle de temps, on fait passer deux paroles téléphoniques à la place d'une cela n'apporte rien si il n'y a que 5 clients en moyenne. En revanche les 74 canaux de parole disponibles permettent d'écouler correctement le trafic moyen de 40 utilisateurs. On peut calculer par la formule d'Erlang la probabilité de rejet d'un client à environ 2p.100, ce qui est la valeur maximale classiquement utilisée dans les réseaux de mobiles.
- f) Pour améliorer la qualité de la parole, une première solution consiste à donner à chaque utilisateur 2 canaux de parole pour y transporter une bande plus large que la parole téléphonique. Ce n'est pas cette solution qui a été choisie parce qu'elle réduit le nombre d'utilisateur. Une seconde consiste à changer de codec (codeur-décodeur). Le demi-débit sur 5,6kbit/s permet d'avoir une qualité comparable à celle du plein débit. En utilisant un codeur de même type mais sur l'ensemble de l'intervalle de temps, c'est-à-dire sur 13 kbit/s, on arrive à faire passer une parole de meilleure qualité. Cela s'appelle un plein débit amélioré. Pour garder une compatibilité avec le GSM plein débit, le terminal doit toutefois être muni du codeur de base.  
Dans le cas se l'énoncé, il n'y a pas de problème pour passer à cette évolution.

- g) La fenêtre de contrôle valant 1, on peut émettre une trame LAP-Dm avant d'être obligé de s'arrêter pour atteindre l'acquittement. Cette solution s'explique par le fait que la distance à parcourir entre la station de base et le terminal est très faible, de quelques kilomètre au maximum, et que le canal propre un faible débit. Il n'y a donc pas besoin d'une procédure avec anticipation.

### **Exercice 135**

*Pour éviter de déconnecter un utilisateur en cours de transmission, il faut que, hors d'un handover, une fréquence soit disponible dans la nouvelle cellule.*

- a) Existe-t-il un moyen de s'assurer qu'il y ait toujours une fréquence disponible ?
- b) Il existe deux sortes de handovers : les soft-handovers et les hard-handovers. Dans le premier cas, soft-handover, pour être sûr que tout se passe bien, le mobile commence à travailler sur la fréquence de la nouvelle cellule, tout en continuant à utiliser la fréquence de l'ancienne cellule et ce jusqu'à ce que le terminal soit sûr du comportement dans la nouvelle cellule. Cette technique du soft-handover vous paraît-elle très contraignante, en particulier quant à l'utilisation des ressources ?
- c) Le hard-handover s'effectue à un moment précis, le mobile passant de la fréquence de l'ancienne cellule à la fréquence de la nouvelle cellule. Indiquer quels peuvent être les problèmes posés par ce hard-handover.
- d) Est-il possible de prévoir le moment où un mobile va effectivement effectuer un handover, solution qui permettrait d'effectuer une réservation de ressources à l'avance et de minimiser la probabilité d'interruption de la communication ?

### **Corrigé exercice 135**

- a) Il n'y a à priori aucun moyen d'être sûr qu'une fréquence est disponible dans la cellule dans laquelle entre le mobile. Cependant, si un utilisateur est capable de connaître son temps de communication et son déplacement en fonction du temps on pourrait éventuellement lui réserver une fréquence dans toutes les cellules traversées. Cette possibilité est mise en œuvre dans certaines communications par satellite.
- b) Cette solution de soft-handover demande des ressources dans les deux cellules en même temps, il y a donc une certaine contrainte sur les ressources. Cependant, cela n'est pas vraiment contraignant puisque ce ne sont pas les ressources d'une même cellule et que le recouvrement est très court (moins de 1s en général).
- c) Dans le hard-handover, le problème est de permettre la continuité sans perte d'information, que ce soit de parole ou de données et de resynchronisation la communication sur tout s'il s'agit de parole.
- d) Il est presque impossible de connaître avec certitude le lieu et la date du prochain changement de cellule, mais de très bonnes prédictions peuvent en être faites. Il est donc possible d'effectuer des réservations de ressources dans de nombreux cas.

### **Exercice 136**

*L'arrivée de l'UMTS va s'effectuée sur des cellules spécifiques.*

- a) Existe-t-il une probabilité de collision de fréquences entre le GSM et l'UMTS ?
- b) Le client peut-il garder le même code en passant d'une cellule à une autre cellule ?
- c) Les stations de base sont reliées entre elles et aux commutateurs du réseau central (Core Network) par un réseau à transfert de paquets. Le choix de l'UMTS dans sa première génération concerne l'ATM et le protocole AAL2, dans la couche d'adaptation située juste au-dessus de la couche ATM (voir cours 16, « Les réseaux télécoms »). Les trames ATM transportent, en les multiplexant des mini trames AAL2. Pourquoi a-t-on besoin de multiplexer des mini trames dans une cellule de 48 octets ?
- d) Si l'on suppose que le terminal mobile travaille sous un monde IP, que deviennent les paquets IP à transporter sur l'interface air ? Et ceux transportés sur le réseau central (Core network) ?
- e) Dans la deuxième génération de l'UMTS, le réseau ATM devrait être remplacé par un réseau IP. Expliquer comment pourrait s'effectuer le multiplexage des différents canaux de parole dans ce nouveau contexte ?

### **Corrigé exercice 136**

- a) Non, le GSM et l'UMTS ne travaillent pas sur les mêmes fréquences.
- b) Oui, un client garde le même code, en passant d'une cellule à une autre. C'est un avantage car il n'y a pas de handover au sens GSM.
- c) Lorsque les codecs numérisant la parole téléphonique permettent une forte compression (8 kbit/s), le temps de paquetisation devient important (en moyenne un octet toutes les 1ms). Pour que ce temps reste à des valeurs raisonnables, le nombre d'octets de parole à transporter reste à une vingtaine d'octets. Le rôle des mini trames est de transporter ces quelques octets. Comme la cellule ATM est trop grande, l'AAL2 permet de multiplexer ces mini trames sur un circuit virtuel ATM.
- d) Si le terminal génère des paquets IP, ce sont ces paquets IP qui sont transportés sur l'interface air. Les paquets IP forment une suite d'octets transportée comme n'importe quelle autre suite d'octets. Dans le réseau central (Core network), les octets des paquets IP sont encapsulés dans les cellules ATM.
- e) Si le réseau ATM est remplacé par un réseau IP, cela demande une adaptation des mini trames pour qu'elles soient intégrées dans les paquets IP. Les mini trames sont alors non plus de type AAL2 mais IP.

### **Exercice 137**

*Soit un réseau Wi-Fi travaillant à la vitesse de 11 Mbit/s.*

- a) Pourquoi le débit effectif est-il très inférieur à la valeur théorique ?
- b) Si 11 clients se partagent les ressources d'une cellule, pourquoi chaque utilisateur ne reçoit-il pas plus de 1 Mbit/s en moyenne ?
- c) Quel peut être le débit théorique maximal dans une cellule ?
- d) Un client captant les signaux de deux points d'accès doit choisir le point d'accès sur lequel il va se connecter. A votre avis, comment s'effectue ce choix ?
- e) Si un point d'accès 802.11b se trouve au même endroit qu'un point d'accès 802.11a, quel est l'impact sur le débit ?

- f) Si deux clients accèdent à un même point d'accès avec des vitesses différentes (par exemple, l'un à 11 Mbit/s et l'autre à 1 Mbit/s, à quelle vitesse le point d'accès doit-il émettre ses trames de supervision ?
- g) Si deux clients se partagent un point d'accès, l'un travaillant à 11 Mbit/s et l'autre à 1 Mbit/s, quel est le débit effectif moyen du point d'accès en supposant que la partie supervision occupe la moitié du temps de la station d'accès ?
- h) Quelle solution préconisez-vous pour maintenir un haut débit dans la cellule ?
- i) Si une carte Wi-Fi pouvait émettre automatiquement à une puissance suffisante pour atteindre le point d'accès, cela allongerait-il le temps de vie des batteries ?

### Corrigé exercice 137

- a) Le débit réel est effectivement très inférieur à la valeur théorique du fait que la partie supervision pour empêcher les collisions prend beaucoup de temps. Le CSMA/CA occupe beaucoup plus de bande passante que le CMS/CD. En revanche, il peut éviter les effondrements que les réseaux Ethernet peuvent connaître en cas de forte surcharge
- b) Wi-Fi utilise la technique d'accès au réseau CSMA/CA qui partage le support physique de manière équitable entre tous les utilisateurs. Comme la capacité globale est de 11Mbit/s, s'il y a 11 clients présents, chaque client dispose en moyenne de 1 Mbit/s. Comme nous avons vu à la question a qu'une partie importante de la capacité était utilisée pour gérer la technique d'accès, chaque client a en moyenne moins de 1 Mbit/s.
- c) Le débit théorique est de 11Mbit/s.
- d) Ce choix s'effectue normalement en fonction de la liste des réseaux que les clients a déjà introduits dans son système d'exploitation et qui est classée par ordre de priorité. Le réseau essaie le deuxième, et ainsi de suite. Si aucun des deux réseaux n'est présent dans la liste du client, une fenêtre apparaît avec les noms (SSID) des deux réseaux. Le client n'a plus qu'à choisir le réseau sur lequel il souhaite se connecter.
- e) L'impact sur le débit est nul puisque les deux réseaux opèrent sur des fréquences complètement différentes.
- f) Le point d'accès doit émettre ses trames de supervision à la vitesse la plus lente de façon que l'ensemble des stations dans la cellule puisse les capter et les comprendre.
- g) Si deux clients se partagent le point d'accès de façon équitable, chacun émet à son tour. Le débit global du point d'accès est déterminé par les débits de chacun des deux clients et les temps pendant lesquels ils transmettent. En supposant que l'un émette à 11 Mbit/s et l'autre à 1Mbit/s, celui qui émet à 1Mbit/s demande 11 fois plus de temps que celui qui émet à 11Mbit/s. L'émission est donc de 1Mbit/s sur 12 intervalles de temps et de 11 Mbit/s sur l'intervalle de temps. En conséquence, le débit sur 1s est de  $([1 \times 11] + [11 \times 1]) / 12 = 1,8$  Mbit/s. Si la partie supervision occupe la moitié du temps, le débit n'est plus que de 0,9 Mbit/s en moyenne. En fait, si la partie supervision occupe approximativement la moitié de la bande passante à 11Mbit/s, elle occupe proportionnellement nettement moins à 1Mbit/s. Le débit réel dans notre exemple serait d'un peu plus de 1Mbit/s.

h) Deux solutions peuvent être envisagées :

1. Déconnecter les clients qui ne travaillent pas à 11Mbit/s. Cette solution obligerait les opérateurs de hots spots à augmenter énormément le nombre de points d'accès.
  2. Limiter l'émission des clients les plus lents et privilégier les clientèles plus rapides. Dans notre exemple, si on limite le client le plus lent à ne pas prendre plus de la moitié du temps en émission, ce qui veut dire que le client à 11Mbit/s pourrait émettre plusieurs fois de suite, le débit moyen serait de  $(11+1)/2=6$ Mbits. Si la moitié de la capacité est occupée par la supervision, le débit serait de 3Mbit/s, c'est-à-dire une multiplication par 3 du débit moyen.
- i) Oui, puisque les clients ne seraient pas obligés d'émettre à pleine puissance pour accéder au point d'accès. Il faut cependant que la puissance soit suffisante pour atteindre la plus haute vitesse possible de façon à ne pas enclencher les effondrements indiqués à la question précédente.

### **Exercice 138**

*Soit un réseau Wi-Fi travaillant à la vitesse de 11 Mbit/s. Les cartes d'accès ainsi que le point d'accès peuvent moduler leur puissance d'émission.*

- a) Si l'on diminue la puissance d'un point d'accès de 100 mW, par exemple quelles sont les conséquences sur la taille de la cellule ?
- b) Montrer qu'il faut beaucoup plus de points d'accès pour recouvrir un même territoire.
- c) Augmente-t-on ainsi la capacité globale du réseau ?
- d) La mobilité est-elle réduite ?

### **Corrigé exercice 138**

- a) La taille de la cellule est beaucoup plus petite.
- b) Puisque la cellule est plus petite, il faut évidemment plus de points d'accès pour couvrir la même superficie.
- c) Oui, la capacité globale du réseau est augmentée puisqu'une même fréquence peut être utilisée beaucoup plus souvent.
- d) La définition d'un réseau sans fil implique que les changements intercellulaires (handovers) n'existent pas. Si des handovers peuvent être réalisés, ce qui est de plus en plus courant dans les réseaux Wi-Fi, le réseau devient un niveau de mobiles. Si les cellules sont petites, le nombre de handovers est beaucoup plus important que si les cellules sont grandes. Il faut aussi un système sophistiqué pour effectuer les nombreux handovers dus à la petite taille des cellules. On peut donc dire que la mobilité est plus restreinte avec de petites cellules qu'avec de grandes cellules.

### **Exercice 139**

*Soit un réseau Bluetooth.*

- a) Pourquoi un réseau Bluetooth peut-il coexister sur la bande de 2.4 GHz avec un réseau Wi-Fi ?
- b) Montrer que le saut de fréquence est une solution qu'il est plus difficile d'écouter.
- c) La vitesse Bluetooth vous paraît-elle suffisante pour transporter de la vidéo?

### **Corrigé exercice 139**

- a) Les réseaux Bluetooth utilisent une technique avec saut de fréquence. Ils émettent pendant des tranches de  $625\mu s$  puis sautent de fréquence. De ce fait, si un réseau Wi-Fi se trouve recouvrir une cellule Bluetooth, le réseau Bluetooth essaie Wi-Fi. En règle générale, un réseau Wi-Fi utilise un tiers des fréquences de la bande des 2,4Ghz.
- b) Il est plus difficile d'écouter les techniques à saut de fréquence car il faut rechercher sur l'ensemble du spectre les fréquences qui vont être utilisées. Les sauts de fréquence suivent un processus prédéfini entre les stations communicantes mais qui est vu de l'extérieur comme aléatoire.
- c) La vitesse de Bluetooth est inférieure à 500kbit/s en mode symétrique et à peine supérieure à 700 kbit/s dans le meilleur des sens en mode asymétrique. C'est insuffisant pour de la vidéo surtout pour de la vidéo de bonne qualité.

### **Exercice 140**

*On aimerait développer un réseau Wi-Fi de future génération ayant des propriétés meilleures que celles des réseaux Wi-Fi actuels.*

- a) Montrer qu'un premier inconvénient des réseaux actuels est de ne pas avoir la possibilité de choisir la fréquence entre la bande des 2.4 et des 5 GHz. Qu'en déduisez-vous comme amélioration ?
- b) Montrer qu'un contrôle de puissance permettrait d'améliorer le débit global d'un réseau Wi-Fi.
- c) Une bonne partie de la bande passante est perdue par le point d'accès à cause de la supervision et des temporisateurs de démarrage des accès des terminaux vers le point d'accès. Pouvez-vous proposer des améliorations ?
- d) La détérioration de la capacité d'un point d'accès provient en grande partie de l'éloignement de certains utilisateurs. Pourquoi ? Quel pourrait être le remède ? Indiquer les conséquences du remède proposé.

### **Corrigé exercice 140**

- a) Actuellement les réseaux Wi-Fi travaillent actuellement sur l'une des deux parties du spectre mais jamais sur les deux à la fois. Une amélioration pourrait consister à offrir la fréquence la plus disponible entre le point d'accès et les terminaux alentour.
- b) Un contrôle de puissance consisterait à adapter la puissance entre le terminal Wi-Fi et le point d'accès. De ce fait la couverture du point d'accès au terminal serait minimisée et éviterait les interférences au maximum. Globalement le débit des réseaux Wi-Fi devrait être amélioré puisqu'il y a moins de chance que les stations se connectent à bas débit.
- c) La technique CSMA/CA est de moins en moins efficace pour la vitesse car elle oblige à avoir des temporisateurs de plus en long en comparaison de la vitesse de transmission. Il faudrait donc changer de technique d'accès.
- d) Comme expliqué à la question g de l'exercice 1, les clients les plus lents perturbent fortement les clients rapides parce que leur temps d'émission s'allonge en proportion de la décroissance de leur vitesse. Pour pallier ce problème, il faut soit empêcher les clients les clients de descendre en dessous de la valeur nominale de 11Mbit/s, ce qui

réduit la taille des cellules, soit empêcher les clients les plus lents d'émettre trop souvent.

### **Exercice 141**

*On veut étudier les possibilités de multiplexage des accès d'un câblo-opérateur. On suppose que le câble CATV employé possède une largeur utilisable de 500 MHz.*

- a) En considérant que l'ensemble des bandes de télévision utilisent 300 MHz et en supposant que le rapport signal sur bruit atteigne 30 dB, quel débit peut-on atteindre pour les applications autres que la télévision ?
- b) Si 1000 clients sont connectés à Internet, quel est leur débit maximal, en supposant que chaque client doive avoir sa bande en aller et sa bande en retour ?
- c) On suppose que, pour permettre aux clients d'avoir plus de débit, on introduise un multiplexage statistique. Qu'est-ce que cela signifie ?
- d) Pour cela, on réserve une bande passante commune dans le sens montant et une bande commune dans le sens descendant. Ces deux bandes sont supposées équivalentes (en général le sens montant est plus faible que le sens descendant). On découpe le temps en trames, qui sont à leur tour découpées en tranches de 2000 bits, correspondant à la taille unique des paquets émis- le mot exact pour paquet aurait dû être trame, mais nous utilisons paquet pour qu'il n'y ait pas de confusion avec la structuration en trames du canal de communication. En supposant qu'il n'y ait jamais plus de 500 clients en cours de transmission pendant l'émission d'une trame, on découpe cette trame en 500 tranches. Pour qu'il n'y ait pas de perte de bande passante inutile, un utilisateur peut éventuellement transmettre dans plusieurs tranches de la même trame. Montrer qu'il existe un problème d'affectation des tranches de temps, semblable à ce qu'effectue MAC dans un réseau partagé.
- e) Peut-on utiliser le protocole CSMA/CD comme couche MAC ?
- f) Peut-on utiliser un protocole à jeton comme couche MAC ?
- g) Montrer qu'il peut être important que la voie de retour (la voie descendante) transporte de la signalisation vers l'utilisateur.
- h) En supposant qu'un client soit capable de faire savoir (par un canal de signalisation) au cœur de chaîne qu'il est devenu actif, proposer une solution à ce problème d'accès aux tranches de temps.
- i) Peut-on garantir la qualité d'une communication téléphonique avec ce système ?
- j) Si l'on remplace l'ensemble câblé par un câblo-opérateur par un réseau de distribution d'un opérateur de télécommunications et que l'on utilise des modems ADSL sur les paires métalliques correspondant à ce câblage, rencontre-t-on les mêmes problèmes de multiplexage ?

### **Corrigé exercice 141**

- a) Il reste 200Mhz de bande passante. Le débit que l'on peut atteindre est de :  $C=300\log_2 \times (1+30)= 300\log_2(31)= 1500\text{Mbit/s}$ .
- b) Si l'on compte les bandes à l'aller et au retour, cela représente 2000 bandes. Il y a donc  $1500/2000=0,75\text{Mbit/s}=750\text{Kbit/s}$  par bande. Si l'on a une version asymétrique cette valeur moyenne peut s'interpréter comme 1Mbit/s dans le sens réseau vers client et 500Kbit/s dans le sens client vers réseau. Dans la réalité, les bandes de fréquences doivent être séparées pour éviter les interférences, ce qui rend inutilisable une bonne partie de la bande passante (jusqu'à 50p.100). De plus, il peut y avoir beaucoup plus

que 1000 clients connectés sur un cœur de chaîne. Enfin, un rapport sur ce type d'infrastructure avec les longueurs classiques.

- c) Un multiplexage statique indique que les communications sont portées par un canal commun et que celui-ci est utilisé, par exemple, en premier arrivé premier servi. L'avantage est bien sûr de pouvoir réutiliser les ressources de bande passante non utilisées par les autres clients.
- d) Il ne faut pas que deux clients transmettent dans la même tranche de temps, sinon il y aurait collision des signaux et ceux-ci seraient perdus.
- e) Oui, il est possible d'utiliser le protocole CSMA/CD puisque nous avons une sorte de réseau local partagé par 1000 utilisateurs. Cependant, le protocole CSMA/CD n'est pas une très bonne solution car la longueur du câble peut être grande (plusieurs kilomètres).
- f) Difficilement car il faudrait faire transiter le jeton d'une station à une autre comme sur une boucle. Cela demanderait un mécanisme complexe qui prendrait beaucoup de temps.
- g) Dans les techniques de câble CATV, le signal n'est pas diffusé mais transmis dans un seul sens. Lorsqu'une station émet un paquet, elle ne peut écouter directement ce qui se passe sur le canal. Il est donc très utile que la voie de retour provenant du réseau donne aux stations qui ne peuvent s'écouter des informations sur leur état (collision par exemple).
- h) Lorsqu'un client devient ou redevient actif, c'est-à-dire lorsqu'il entre de nouveau dans le système actif, il est possible de lui affecter un canal de communication pour lui seul en lui attribuant une tranche de temps.
- i) On peut garantir la qualité d'une communication téléphonique tant que l'on est sûr d'avoir le débit approprié. Si la solution consiste à réserver une bande suffisante pour faire passer de la parole téléphonique et que cette bande n'est relâchée que lorsque le client se déconnecte, alors n'est relâchée que lorsque le client se déconnecte, alors la parole téléphonique est garantie. Cependant, dans ces systèmes, la bande passante de chaque terminal diminue avec l'arrivée de nouveaux clients. En d'autres termes, la bande passante est divisée entre tous les clients en train de transmettre. Si la bande attribuée à chaque client devient trop petite pour pouvoir y faire passer une voie téléphonique, il est impossible de proposer une garantie.
- j) Non, on ne rencontre pas les mêmes problèmes. En effet, chaque utilisateur possède ses propres paires téléphoniques jusqu'au central de l'opérateur. Cela veut dire que chaque utilisateur possède un circuit de capacité déterminée jusqu'au central. Les goulets d'étranglement de l'environnement ADSL se situent généralement après la récupération des données sur le modem de réception.

### **Exercice 142**

*On considère un satellite géostationnaire*

- a) En supposant que la propagation des ondes hertziennes atteigne 300000 km/s, calculer le délai aller-retour.
- b) Montrer que si le canal a une capacité de 10 Mbit/s et que la longueur des trames soit de 10 Kbit, l'utilisation d'un niveau trame de type HDLC (LAP-B) est inacceptable.
- c) Une solution à ce problème consiste à utiliser une méthode de sous-canaux virtuels, c'est-à-dire à supposer que plusieurs canaux travaillent en parallèle, en utilisant le même satellite, chacun possédant son propre protocole de niveau trame. En supposant

que tous les canaux utilisent le même protocole HDLC avec une fenêtre de taille maximale de 127, quel devrait être le nombre de sous-canaux virtuels ?

- d) Si l'on suppose qu'il se produise une erreur sur un seul canal virtuel, que se passe-t-il ?
- e) Proposer une solution à ce problème.

### **Corrigé exercice 142**

- a) Un satellite géostationnaire est situé à 3600 km de la Terre. Pour effectuer un aller-retour il faut donc  $3600/300000=0,12$ s, soit 120ms.
- b) Si le canal possède une capacité de 10Mbit/s, la quantité d'information entre la Terre et le satellite sur l'aller-retour est de  $10 \times 0,12 = 1,2$ Mbit. Les acquittements demandant encore un temps aller-retour de 0,12s, cela indique qu'il faut que l'émetteur soit capable d'émettre 2,4Mbit/s de données en continu avant de recevoir un acquittement. Si chaque paquet a une longueur de 10Kbit, cela représente 240 paquets. Comme la fenêtre maximale que l'on peut utiliser est de 128 (cas HDLC étendu), cette procédure est inacceptable ou du moins ne permet pas d'obtenir une utilisation satisfaisante de la bande passante, très chère dans les systèmes satellite.
- c) Si l'on considère qu'il n'y a pas d'erreur dans le système ou qu'il ne soit pas nécessaire de les corriger, alors 2 sous-canaux virtuels sont suffisants. Si l'on considère de nouvelles trames sans être interrompu par la fenêtre, il faut doubler la fenêtre c'est-à-dire avoir une fenêtre d'au moins 480. Il faut donc prendre 4 sous-canaux virtuels.
- d) S'il se produit une erreur sur un sous-canal, ce sous canal est obligé de redémarrer après un temps aller-retour et prend donc un retard d'un temps égal à un aller-retour.
- e) Plusieurs solutions peuvent être considérées:
  1. Le plus simple est de servir ce sous-canal une fois de plus que les autres sous-canaux, deux fois de suite par exemple.
  2. Laisser ce sous-canal en retard jusqu'à ce que les autres sous-canaux aient également une erreur. L'inconvénient provient de l'environnement aléatoire qui peut produire une nouvelle erreur sur le même canal. Il faut donc décider qu'à un moment donné, il faudra donner une priorité au sous-canal en retard pour qu'il puisse rattraper son retard.

### **Exercice 143**

*On s'intéresse maintenant à une constellation de satellites situés à 700 km de la terre. Chaque satellite possède 100 antennes directives qui arrosent chacune une cellule de 50 km sur 50 km. On suppose que ces antennes arrivent globalement à couvrir un carré.*

- a) Le satellite se déplaçant à 5 km/s combien de temps s'écoute-t-il entre deux handovers, en supposant que le déplacement du satellite se fasse parallèlement aux bords ?
- b) En supposant que pour un soft-handover, il faille 5 secondes de recouvrement, calculer la perte de capacité du satellite par rapport à un hard-handover.
- c) Expliquer pourquoi et comment un client peut avoir sa communication coupée au moment d'un handover.

- d) On suppose que les clients de cette constellation reçoivent la garantie que les deux premières minutes de communication sont sans coupure. Trouver un algorithme qui le permette dans le cas où la communication n'utilise qu'un seul satellite.
- e) La solution à la question précédente réduit-elle la capacité globale du système du fait que des ressources risquent d'être inutilisées ?
- f) Si tel est le cas, proposer une solution sur l'allocation qui ne garantisse plus complètement les deux premières minutes de communication mais qui permette d'augmenter l'utilisation des ressources de la constellation.
- g) On suppose maintenant que la communication garantie pour deux minutes passe par deux satellites en empruntant une liaison inter satellite. Trouver un nouvel algorithme ou une extension des ressources de la constellation.
- h) Les algorithmes trouvés précédemment sont-ils indépendants du fait que les cellules soient fixes ou variables (c'est-à-dire si les antennes sont fixes ou s'orientent pour recouvrir toujours la même cellule pendant sa période de visibilité) ?

### **Corrigé exercice 143**

- a) Le satellite recouvre une zone de 500km sur 500km. Un handover intra satellite se produit chaque fois que le client change d'antenne sur le même satellite. Il y a donc un handover inter satellite (on passe de l'antenne d'un satellite à celle d'un autre satellite) toutes les 100s.
- b) Si un soft-handover demande 5s (2,5s avant le franchissement de la frontière de la cellule et 2,5s après le franchissement), cela indique que sur le temps de la traversée d'une cellule, il y a 5s de handover (2,5s à l'entrée et 2,5s à la sortie). Sur les 10s de traversée d'une cellule, il y a donc la moitié du temps pendant lequel la transmission est dupliquée. Puisque pendant la moitié du temps il y a duplication, il y a une perte de 33p.100 de la capacité du satellite.
- c) On suppose que les satellites possèdent des antennes fixes. Pour que la communication soit coupée, il faut que le satellite qui arrive et qui remplace le précédent soit saturé. Le vrai problème est de comprendre comment un satellite qui arrive peut être saturé puisque le précédent ne l'était pas au moment de son passage. La seule explication possible est la connexion d'un nouveau client juste avant la demande de handover, entre le moment où le premier satellite ne recouvre plus ce client et celui du handover.
- d) Si l'on veut garantir les deux premières minutes de communication, il suffit de réserver sur la liste de satellites qui va se succéder au-dessus du client une fréquence qui lui est destinée. Il suffit d'effectuer cette réservation sur l'ensemble des satellites qui vont se succéder. Comme le défilement des satellites est parfaitement déterminé à l'avance les satellites concernés par cette réservation sont connus.
- e) Oui, la solution peut réduire la capacité du système puisque le système peut refuser un client parce que la garantie risquerait de ne plus être effective. Cette probabilité est cependant très faible.
- f) La solution est de ne pas faire de réservation. En effet la connexion d'un nouveau client implique l'existence d'une fréquence disponible dans la cellule. Lorsqu'un nouveau satellite se présente, il y a très peu de raison pour qu'une fréquence ne soit pas disponible puisqu'il y en avait de disponible avec le précédent. De nouveau, la seule raison expliquant qu'il n'y ait pas de fréquence disponible est qu'un client situé juste en aval du nouveau satellite quoi qu'il arrive prendrait la fréquence disponible.
- g) Si la communication utilise les ressources de deux satellites connectés par une liaison inter satellite, il faut réserver des ressources sur l'ensemble des couples satellites qui vont se succéder.

- h) Non, nous avons regardé le cas des antennes fixes. Le cas des antennes mobiles est légèrement différent et plus simple. Lorsqu'un utilisateur a réservé une fréquence dans une cellule pour sa communication, il n'y a aucune raison pour que le nouveau satellite qui remplace exactement ce que faisait le précédent n'ait pas une fréquence disponible. En d'autres termes lorsque les antennes s'orientent pour recouvrir une même cellule pendant le temps de passage, la communication est garantie jusqu'à la fin une fois qu'elle a pu s'établir.

**Problème 10.**

Dipôle demi-onde à 100 MHz dans le plan horizontal

1. Soit un dipôle demi-onde à 100 MHz dans le plan horizontal. Calculer sa surface équivalente maximale.

2. Un satellite émet un signal avec les caractéristiques suivantes :

- satellite géostationnaire,  $r=36'000$  km
- PIRE = 49 dBW
- $f = 12$  GHz

On montre que la surface équivalente d'une antenne parabolique est environ égale à la moitié de la surface de son disque. Donner la puissance reçue par une antenne parabolique de diamètre  $d=70$  cm.

3. Soient deux antennes identiques de gain  $G_0=10$  dB et éloignées de 300m. Le signal est émis à une fréquence  $f=400$  MHz avec une puissance de 2.5 W.

Calculer l'affaiblissement de la liaison et la puissance du signal reçu (exprimé en W).

### Corrigé du problème 10

1. Surface équivalente

$$A_{eq} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \left( \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1 \cdot 10^8 \text{ Hz}} \right)^2 \cdot 1.64 = 1.17 \text{ m}^2$$

2. Calcul de la puissance reçue par une antenne parabolique de diamètre  $d=70$  cm

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{12 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 0.025 \text{ m}$$

$$P = \frac{\text{PIRE}}{4\pi \cdot r^2} = \frac{10^{10} \cdot 1 \text{ W}}{4\pi \cdot (3.6 \cdot 10^7 \text{ m})^2} = 4.88 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$A_{eq} = 0.5 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 0.5 \cdot \pi \cdot \frac{0.7^2}{4} = 0.1924 \text{ m}^2$$

$$P_R = P \cdot A_{eq} = 4.88 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.1924 \text{ m}^2 = 9.38 \cdot 10^{-13} \text{ W} = 0.94 \text{ pW}$$

3. Calcul de l'affaiblissement de la liaison et la puissance du signal reçu (exprimé en W)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{4 \cdot 10^8 \text{ Hz}} = 0.75 \text{ m}$$

$$\text{PdBW}_F = 10 \cdot \log\left(\frac{P_F}{1\text{W}}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{2.5}{1}\right) = 3.98 \text{ dBW}$$

$$\text{AdB} = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot r}{\lambda}\right) - \text{GdB}_E - \text{GdB}_R = 20 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot 300}{0.75}\right) - 20 = 54.03 \text{ dB}$$

$$\text{PdBW}_R = \text{PdBW}_F - \text{AdB} = 3.98 - 54.03 = -50.05 \text{ dBW}$$

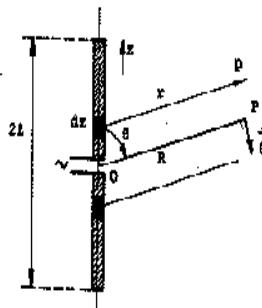
$$P_R = 10^{\frac{\text{PdBW}_R}{10}} \cdot 1\text{W} = 10^{-5.005} \cdot 1\text{W} = 9.88 \mu\text{W}$$

### Problème 11.

Champ électromagnétique rayonné par un doublet et résistance de rayonnement

On considère un doublet symétrique mince de longueur  $2\ell$ , isolé dans l'espace vide, parcouru par un courant instantané de la forme  $I(z) = I_0 \cdot \sin k(l - |z|)$ , avec

$$-\ell \leq z \leq \ell \text{ et } k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (\lambda : \text{longueur d'onde}).$$



Ce courant est variable sinusoïdalement en fonction du temps.

1.- Calculer le module du champ électrique rayonné à grande distance au point P en fonction de l'angle  $\theta$  à l'aide de l'expression du champ rayonné à grande distance par le doublet de Hertz.

2. Que devient l'expression du champ électrique lorsque  $\ell = \frac{\lambda}{4} + n \frac{\lambda}{2}$  ? (où n est un entier positif ou nul).

(doublet à la résonance avec un maxima de courant au point d'alimentation).

3. Tracer avec précision le diagramme de rayonnement pour n=1.

4.- Calculer la puissance dissipée sous forme de rayonnement en intégrant sur la surface  $\Sigma$  d'une sphère de très grand rayon et de centre 0 le vecteur de poynting complexe toujours dans le cas où  $\ell = \frac{\lambda}{4}(1+2n)$ .

La résolution de l'intégrale s'effectue en faisant par successivement les changements variables :  $u = \cos\theta$  et

$$1+u = \frac{x}{(2n+1)\pi}$$

Et sachant que :  $\int \frac{1-\cos x}{x} dx = \log_e t + \gamma - C_i(t)$  où  $\gamma$  est la constante d'Euler, et  $C_i(t)$  le cosinus intégral de t.

5.- Déduire de la puissance rayonnée la résistance de rayonnement  $R_r$  rapportée au courant maxima  $I_0$ .

APPLICATION NUMERIQUE : retrouver la résistance de rayonnement d'un doublet demi – onde (cas n=0) qui est égale à  $R_r = 73,12$  ohms.

On donne :  $\begin{cases} \gamma = 0,5772... \\ C_i(2\pi) = -0,02328... \end{cases}$

6.- Quelle est la relation qui lie la résistance de rayonnement à la directivité maximale ? Retrouver celle du doublet demi mi onde.(n=0).

7 – Donner l'expression de la surface maxima d'absorption du doublet symétrique à la résonance en fonction de sa résistance de rayonnement.

## Correction du problème 11

. Un doublet de Hertz situé à la côte z de longueur dz rayonne à grande distance suivant l'axe  $\theta$  un champ élémentaire :

$$dE_\theta = j \frac{I(z) \sin \theta}{2\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot dz \quad (1)$$

Deux doublets de Hertz symétriques par rapport à 0 vont rayonner à grande distance un champ élémentaire compte tenu que  $I(z)=I(-z)$  :

$$(dE_\theta)_t = j \frac{e^{-jkr}}{\lambda R} I_0 \sin(k(\ell - |z|) \cdot \sin \theta \cdot \cos(kz \cos \theta)) \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot dz$$

Le champ électrique total dirigé suivant l'axe  $\theta$  est donc :

$$E_\theta = j I_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{e^{-jkr}}{R\lambda} \sin \theta \int \sin(k(\ell - z) \cdot \cos(kz \cos \theta)) dz$$

Après intégration, on trouve pour le module du champ électrique rayonné à grande distance l'expression :

$$|E_\theta| = I_0 \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{1}{2\pi R} \left[ \frac{\cos(k\ell \cos \theta) - \cos \theta}{\sin \theta} \right]$$

$$\text{Et dans le système SI : } |E_\theta| = 60 \frac{I_0}{R} \cdot \left[ \frac{\cos(k\ell \cos \theta) - \cos \theta}{\sin \theta} \right] \quad (2)$$

- 2 Si  $\ell = \frac{\lambda}{4} + n \frac{\lambda}{2}$ , on a :  $k\ell = \frac{\pi}{2} + n\pi$ , donc  $\cos k\ell = 0$ ,

$$|E_\theta| = 60 \frac{I_0}{R} \cdot \frac{\cos \left[ m \frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin \theta}$$

- L'expression (2) devient :

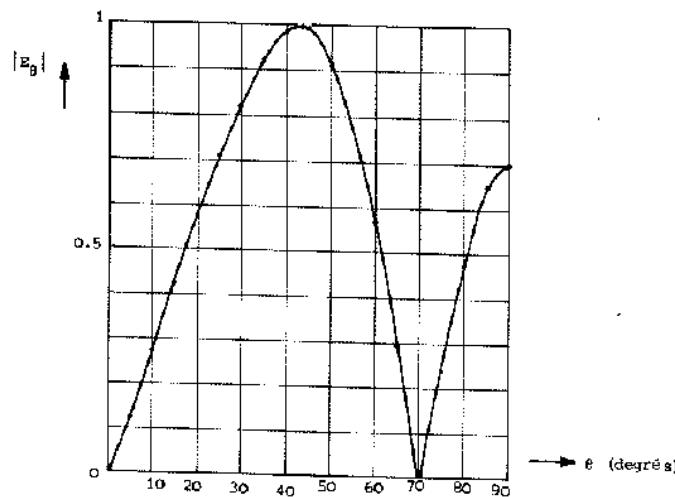
(3)

3. Si  $n=1, m=3$  et l'expression (3) prend la forme :

$$|E_\theta| = K \cdot \frac{\cos(3 \frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} \quad (4)$$

Les zéros sont obtenus pour  $\theta = 70,5^\circ$  et  $\theta = 0$ .

Le maxima du diagramme est obtenu pour  $\theta = 43^\circ$ . L'allure du diagramme de directivité est donnée sur la figure ci-dessous.



4. A grande distance, le module du vecteur de Poynting est tel que (système SI )

$$|\vec{P}| = \frac{[E]^2}{240\pi} \text{ soit à partir de (3) : } |\vec{P}| = \frac{15}{\pi} \cdot \frac{r_0^2}{R^2} \cdot \frac{\cos^2(m \frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin^2 \theta} \quad (5)$$

D'où la puissance totale rayonnée :  $P_r = \int \int \vec{P} \cdot d\vec{s} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |\vec{P}| \cdot R^2 \sin \theta d\theta d\phi$

On obtient à partir de (5) :

$$P_r = \frac{15}{\pi} I_0^2 \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \frac{\cos^2(m \frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} d\theta = 30 I_0^2 \int_0^{\pi} \frac{\cos^2(m \frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} d\theta$$

En posant  $x = m \frac{\pi}{2} (1 + \cos \theta)$ , on obtient aisément :

$$P_r = 15 I_0^2 \int_{m\pi}^{2m\pi} \frac{1 + \cos x}{x} dx$$

$$\text{Or : } \int \frac{1 + \cos x}{x} dx = \log_e t + \gamma - C_i(t)$$

$$\text{D'où : } P_r = 15 I_0^2 [\log_e(2m\pi) + \gamma - C_i(2m\pi)] \quad (6)$$

$\gamma$  est la constante d'Euler :  $\gamma=0,577\dots$ , et Ci le cosinus intégral :

$$C_i(x) = - \int_x^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt.$$

$P_r$  est exprimé en watt si  $I_0$  est exprimé en Ampères.

5. – Par définition, on a :  $P_r = \frac{1}{2} R_r I_0^2$ . D'où compte tenu de (6) :

$$R_r = 30[\log_e(2m\pi) + \gamma - C_i(2m\pi)] \quad (7)$$

Soit :  $R_r = 72,42 + 30\log_e m - 30C_i(2\pi)$

APPLICATION NUMERIQUE :  $n=0$ ,  $m=1$ ,  $C_i(2\pi) = -0,02328$

D'où  $R_r = 73,12$  ohms

$$D_M = \frac{4\pi}{\int_0^{4\pi} r(\theta, \phi) d\Omega} \quad (8)$$

6. On a pour la directivité maximale :

$d\Omega$ =angle solide élémentaire.

$r(\theta, \phi)$  est le diagramme normalisé en puissance qui d'après (3) est égal à

$$r(\theta, \phi) = \frac{\cos^2 \left[ m \frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin^2 \theta}$$

La directivité maximale (3) s'écrit donc :

$$D_M = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \frac{\cos^2(m \frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\cos \theta} d\theta}$$

$$\text{soit } D_M = \frac{2}{\int_0^\pi \frac{\cos^2(m \frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} d\theta}$$

$$\text{D'après ce qui précède : } D_M = \frac{120}{R_x} = \frac{4}{\log_e(2m\pi) + \gamma - C_i(2m\pi)}$$

Pour le doublet demi onde n=0, on trouve :

$$G_M = 1,64 \text{ soit } 2,17 \text{ dB}$$

7.On a pour la surface maximale de captation :

$$S_M = \frac{D_M \cdot \lambda^2}{4\pi} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{R_x}$$

### Problème 12.

Interférences de N sources équiphases d'amplitudes différentes

On désire obtenir à l'aide d'un réseau linéique composé de n sources en phase (nombre pair) alimentées symétriquement, et séparées les unes des autres par une distance d, un diagramme de rayonnement en champ dont les amplitudes maximales de tous les lobes secondaires sont entre elles et  $P$  fois plus faibles que l'amplitude maximum du lobe principal.

1. En utilisant une distribution de Dolph Tchebyscheff , montrer que l'on peut exprimer à un coefficient de proportionnalité près les courants des sources au moyen des polynômes de Tchebyscheff jusqu'à l'ordre n-1 et

$$\text{du paramètre } z_0 = \operatorname{ch} \left[ \frac{\arg \operatorname{ch} \rho}{n - 1} \right]$$

Dans le cas n=12, donner le système des 6 équations linéaires qui lient les courants des sources et dans lesquelles apparaissent les puissances impaires de  $Z_0$

3 Résoudre le système dans le cas où  $P=100(40\text{dB})$  en normalisant les courants.

4.- Définir dans le cas n=12 ,  $P=100$ , la demi ouverture du lobe principal de rayonnement entre directions à mi puissance, et les directions pour lesquelles le champ rayonné est nul, sachant que  $\frac{d}{\lambda}=0,8$ . Tracer le diagramme de rayonnement en coordonnées cartésiennes.

5. Pour quelles valeurs de  $\frac{d}{\lambda}$

n'y aura - t - il qu'un seul lobe principal de rayonnement. ?

## Corrigé du problème 12

1. L'amplitude réelle des champs dont les courants des sources correspondantes en nombre n pair sont :

$G_0, G_1, \dots, G_{n-1}$  et le réseau étant symétrique ( $G_q = G_{n-q-1}$ ), on peut exprimer à une constante près l'amplitude du champ total à grande distance sous la forme

$$R \approx G_0 \cos \frac{n-1}{2} \Phi + G_1 \cos \frac{n-3}{2} \Phi + \dots + G_{\frac{n}{2}-1} \cos \frac{\Phi}{2}$$

avec  $\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$  et  $\lambda$  longueur d'onde .

Introduisons les polynômes de Tchebyscheff  $T_0, T_1, \dots, T_{n-1}(x)$ .

En posant :  $x = \cos \frac{\Phi}{2}$   $-1 \leq x \leq +1$

$$T_{n-1}(x) = \cos \frac{n-1}{2} \cdot \Phi$$

L'amplitude du champ total s'écrit donc :

$$R \approx G_0 T_{n-1}(x) + G_1 T_{n-3}(x) + G_2 T_{n-5}(x) + \dots + G_{\frac{n}{2}-1} T_1(x)$$

La méthode de recherche d'une distribution optimum de Dolph Tchebyscheff consiste à identifier  $R(x)$  à un polynôme  $T_{n-1}(z)$ , avec  $z = z_0 x$  et où  $z_0$  est donné par  $T_{n-1}(z_0) = \rho$ .

Avec  $\rho = \frac{\text{amplitude lobe principal}}{\text{amplitude lobe secondaire}}$

(Les lobes secondaires étant alors tous égaux).  $z_0$  étant  $> 1$ ,  $T_{n-1}(z_0) = \rho = \operatorname{ch}[(n-1) \arg \operatorname{ch} z_0]$

On déduit :  $z_0 = \left( \operatorname{ch} \frac{\arg \operatorname{ch} \rho}{n-1} \right)$

L'identification de R et  $T_{n-1}(z)$  conduit nécessairement à l'expression de  $G_0, G_1, \dots$  en fonction des polynômes de Tchebyscheff et de  $Z_0$ .

$$2.- \text{Cas particulier : } n=12, \frac{n}{2}-1=5 \quad n-1=11$$

D'après ce qui précède, on aura à identifier en  $x$  l'expression :

On a donc :

$$T_{11}(z_0 x) = G_0 T_{11}(x) + G_1 T_9(x) + G_2 T_7(x) + G_3 T_5(x) + G_4 T_3(x) + G_5 T_1(x)$$

$$T_{11}(x) = 1024x^{11} - 2816x^9 + 2816x^7 - 1232x^5 + 220x^3 - 11x$$

$$\begin{aligned} & G_0 [1024x^{11} - 2816x^9 + 2816x^7 - 1232x^5 + 220x^3 - 11x] \\ & + G_1 [256x^9 - 576x^7 + 432x^5 - 120x^3 + 9x] \\ & + G_2 [64x^7 - 112x^5 + 56x^3 - 7x] \\ & + G_3 [16x^5 - 20x^3 + 5x] \\ & + G_4 [4x^3 - 3x] \\ & + G_5(x) \\ & \equiv 1024x^{11}z_0^{11} - 2816x^9z_0^9 + 2816x^7z_0^7 - 1232x^5z_0^5 + 220x^3z_0^3 - 11xz_0 \end{aligned}$$

En identifiant, on obtient les 6 équations :

$$G_0 = z_0^{11}$$

$$G_1 = 11G_0 - 11z_0^9$$

$$G_2 = 9G_1 - 44G_0 + 44z_0^7$$

$$G_3 = 7G_2 - 27G_1 + 77G_0 + 77z_0^5$$

$$G_4 = 5G_3 - 14G_2 + 30G_1 - 55G_0 + 55z_0^3$$

$$G_5 = 3G_4 - 5G_3 + 7G_2 - 9G_1 + 11G_0 - 11z_0$$

3.n=12,  $\rho = 100$ (40dB) on obtient à partir de  $z_0 = \operatorname{ch} \left[ \frac{\arg \operatorname{ch} \rho}{n-1} \right]$  la valeur :  $z_0 = 1,118$

D'où :  $z_0^2 = 1,25$   $z_0^3 = 1,40$   $z_0^5 = 1,75$   $z_0^7 = 2,19$   $z_0^9 = 2,74$   $z_0^{11} = 3,43$

On tire donc des équations précédentes :

$$G_0 = 3,41 \quad G_1 = 7,6 \quad G_2 = 13,9 \quad G_3 = 21,4 \quad G_4 = 28,5 \quad G_5 = 32,8$$

On trouve en normalisant les courants des sources :

---

$$G_0 = 0,105 \quad G_1 = 0,232 \quad G_2 = 0,424 \quad G_3 = 0,653 \quad G_4 = 0,87 \quad G_5 = 1$$

---

$$T_{n-1}(z_0 \cos \frac{\Phi_p}{2}) = \frac{\rho}{\sqrt{2}}$$

1. Le demi angle  $\theta_p$  entre directions à  $\frac{1}{2}$  puissance est donnée par :

$$\text{Soit puisque } \Phi_p = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_p$$

$$\sin \theta_p = \frac{\lambda}{\pi d} \arccos \left[ \frac{1}{z_0} \operatorname{ch} \frac{\arg \operatorname{ch} \rho / \sqrt{2}}{n-1} \right] \text{ avec } z_1 = 1,118, \rho = 100, n = 12, \frac{d}{\lambda} = 0,8$$

$$\sin \theta_p = \frac{\lambda}{d} \frac{1}{18} = 0,0695$$

$$\text{soit } \theta_p \approx 4^\circ$$

Les directions de rayonnement nul sont données par :

$$T_{n-1}(z_0 x) = \cos \left[ (n-1) \cdot \frac{\Phi}{2} \right] = \cos[(n-1) \arccos(z_0 x)]$$

Or ceci est nul pour :  $\cos\left[(n-1)\arccos z_0 \cdot \cos \frac{\Phi_k}{2}\right] = 0$

$$(n-1)\arccos\left[z_0 \cos \frac{\Phi_k}{2}\right] = \frac{(2k+1)\pi}{2}$$

$$\text{ou } \arccos\left[z_0 \cos \frac{\Phi_k}{2}\right] = \frac{(2k+1)\pi}{2(n-1)}$$

$$\text{soit } z_0 \cos \frac{\Phi_k}{2} = \cos\left(\frac{2k+1}{n-1} \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{et } \frac{\Phi_k}{2} = \arccos\left[\frac{1}{z_0} \cos \frac{\pi(2k+1)}{2(n-1)}\right]$$

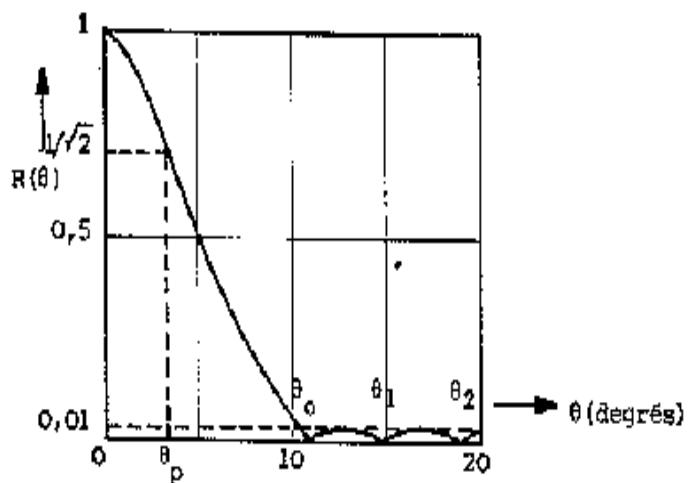
$$\text{Mais } \frac{\Phi_k}{2} = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta_k$$

$$\text{D'où l'on obtient : } \sin \theta_k = \frac{\lambda}{\pi d} \arccos\left[\frac{1}{z_0} \cos \frac{\pi(2k+1)}{2(n-1)}\right]$$

On obtient les angles  $\theta$  correspondant à un champ nul : pour  $k=0 \theta_0=11^\circ,1$

Pour  $k=1 \theta_1=14^\circ,3$

Pour  $k=2 \theta_2=19^\circ,15$



5. Il n'y a qu'un lobe principal pour  $\theta$  variant de 0 à  $\pi/2$  si :

$$z_0 \cos \frac{\Phi}{2} \geq -1 \quad \text{pour} \quad \theta = \pi/2$$

$$\text{soit si } \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right) \geq -\frac{1}{z_0} = -0,895$$

$$\text{C'est à dire } \frac{d}{\lambda} \leq 0,855$$

### Problème 13.

Diffracton de Fraunhofer d'une antenne parabolique

On assimile le rayonnement à la fréquence  $f$  d'une antenne parabolique à asymétrie de révolution à celui d'une ouverture circulaire de diamètre  $D$  en négligeant le caractère vectoriel du rayonnement. L'illumination de l'ouverture est équiphase. La loi d'amplitude sur l'ouverture correspond à la somme d'une distribution uniforme et

d'une distribution parabolique de la forme :  $1 - \left(\frac{2\rho}{D}\right)^2$  où  $\rho$  désigne la distance au centre de l'ouverture. L'amplitude s'atténue à partir du centre de l'ouverture et l'atténuation sur ses bords correspond à  $A$  décibels.

1 Donner l'expression à l'infini du diagramme de rayonnement normalisé de l'antenne parabolique.

2 Pour  $A = 20$  décibels, donner l'ouverture totale  $83\text{dB}$  à mi puissance du lobe principal de rayonnement en utilisant les développements en séries tierces des fonctions de Bessel données ci-dessous.

3 Calculer le gain maximal pour  $D = 24$  m,  $f = 4 \cdot 10^9$  Hz, en utilisant la formule :  $G_M = \frac{27,000}{\theta_{3dB}^2}$

$\theta_{3dB}$  étant exprimé en degrés.

4 On mesure pour une position donnée de l'antenne un facteur de qualité propre égal à  $40\text{dB}$ . Quelle est la température thermodynamique  $T_A$  de l'antenne ? 0

5 L'antenne est maintenant entourée d'un radome supposé à la température

$T_0$  et dont la perte de transmission est  $L_c$ . Le facteur de bruit du récepteur supposé à la température  $T_0$  est  $F_R$ . On néglige l'affaiblissement

des circuits passifs de transmission entre l'antenne et le récepteur.

Quel est le facteur de qualité  $Q$  de la station de télécommunications.

### Corrigé du problème 13

Si la loi de distribution constante a pour valeur x, au centre de l'ouverture ( $P=0$ ) l'amplitude globale sera  $1+x$  et sur les bords ( $P=D/2$ ) égale à x.

$$A(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{1+x}{x}$$

Par définition l'atténuation sur les bords de l'amplitude est définie par l'expression :

$$\text{Soit } \frac{1}{x} = 10^{A/20} - 1$$

Une distribution constante de valeur 1 pour une ouverture

circulaire ,correspond à un diagramme à l'infini défini à un coefficient de proportionnalité près par l'expression:

$$\frac{J_1(u)}{u}$$

Une distribution parabolique égale à 1 au centre correspond à un diagramme défini avec le même coefficient de

$$\frac{2J_2(u)}{u^2}$$

$J_1$  et  $J_2$  sont les fonctions de Bessel de première espèce d'ordres 1 et 2.

$$\text{Le paramètre } u \text{ est égal à : } u = \frac{\pi D}{\lambda} \cdot \sin \theta$$

$\theta$  est l'angle compté à Partir de l'axe normal à l'ouverture circulaire et  $\lambda$  la longueur d'onde,

Le diagramme à l'infini normalisé de l'ouverture dont l'illumination est composée et sera donc égal à :

$$E(u) = \frac{\frac{J_1(u)}{u} + 2 \frac{J_2(u)}{u^2} (10^{A/20} - 1)}{\frac{1}{2} + \frac{1}{4} (10^{A/20} - 1)} \quad (1)$$

Ce diagramme est bien normalisé, puisque lorsque  $\theta$  tend vers 0,  $\frac{J_1(u)}{u} \rightarrow \frac{1}{2}$  et  $\frac{2J_2(u)}{u^2} \rightarrow \frac{1}{8}$ , et l'expression (1) tend bien vers l'unité.

- Si  $A=20$  dB, alors  $x = \frac{1}{9}$  et l'on a d'après l'expression (1) :

$$\bullet E(u) = \frac{4}{11} \left[ \frac{J_1(u)}{u} + 18 \frac{J_2(u)}{u^2} \right] \quad (2)$$

- L'ouverture totale à 3 dB soit  $\theta_{3dB}$  est telle que :  $u_0 = \frac{\pi D}{\lambda} \sin(\frac{\theta_{3dB}}{2})$  avec  $E(u_0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Soit compte tenu des développements limités donnés pour les fonctions de Bessel et transposés dans (2) :

$$u_0^4 - 29,6u_0^2 + 94,6 = 0$$

La seule racine valable est :  $u_0 = 1,90$  d'où  $\theta_{3dB} = 2 \arcsin(1,90 \cdot \frac{\lambda}{\pi D})$  (3)

Si  $D \gg \lambda$ , on peut effectuer un développement limité de l'expression (3) et écrire, l'ouverture étant exprimée en degrés :

$$\theta_{3dB} \approx 69 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

3. Si  $D=24$ m, sachant que  $\lambda=0,075$  m, déduit à partir de (4) avec :

$$G_M = \frac{27000}{\theta_{3dB}^2}$$

$$G_M = 5,9 \cdot 10^5, \text{ soit } 57,7 \text{ dB}$$

4. Le facteur de qualité propre de l'antenne est défini par l'expression :  $Q_A = 10 \log_{10} \frac{G_M}{T_A}$ . Comme  $Q_A = 40$  dB, on déduit  $\frac{G_M}{T_A} = 10^4$  et comme  $G_M = 5,9 \cdot 10^5$ , on déduit  $T_A = 59^\circ K$

5. La température de bruit de la station est égale à :  $T = T_A + \frac{L_e - 1}{L_e} T_0 + (F_R - 1) T_0$

APPLICATION NUMERIQUE :  $L_e = 0,1$  dB, soit  $L_e = 1,023$

$$F_R = 0,4 \text{ dB}, \text{ soit } F_R = 1,096$$

$$T_0 = 290 \text{ K}$$

On déduit :  $T = 59 + 6,5 + 28 = 93,5 \text{ K}$

D'où pour le facteur de qualité de la station de télécommunications :

$$Q = 10 \log_{10} \frac{G_M}{T} = 10 \log_{10} \frac{59 \cdot 10^5}{93,5}$$

soit  $Q = 38 \text{ dB}$

**Problème 14.**

Antenne d'émission

1. Calculer le champ électrique créé à 1 km par une antenne  $\frac{\lambda}{2}$  verticale dont le courant au centre est 1 A, dans les directions 0°, 30° et 60° par rapport à l'horizontale.
2. Comparez avec un dipôle de longueur  $l = 0,1 \lambda$  dans les mêmes conditions.
3. Quel serait ce champ dans le plan horizontal si l'antenne d'émission était une parabole de résistance au rayonnement 50 Ω, et de diamètre 1 m utilisée à 3 GHz.

**Corrigé du problème 14**

1/ Le champ  $\vec{E}$  de l'antenne  $\frac{\lambda}{2}$  est donné dans le cours, on a

$$E = \frac{\eta I_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{2\pi r \sin\theta}$$

Application Numérique

$\phi = 0^\circ$	$E = 60 \text{ mV/m}$
$\phi = 30^\circ$	$E = 49 \text{ mV/m}$
$\phi = 60^\circ$	$E = 25 \text{ mV/m}$

2/ Pour un dipôle, on aurait un champ  $\vec{E}$  dont le module est donnée par

$$E = \frac{\eta I_0 l \sin\theta}{2\lambda r}$$

Application Numérique

$\phi = 0^\circ$	$E = 18,9 \text{ mV/m}$
$\phi = 30^\circ$	$E = 16,3 \text{ mV/m}$
$\phi = 60^\circ$	$E = 9,4 \text{ mV/m}$

L'antenne  $\frac{\lambda}{2}$  est donc plus avantageuse car elle fournit un champ plus de 3 fois plus intense.

3/ Pour une antenne parabolique, on sait que le gain est  $g = 0,6\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$ , donc avec  $D = 1 \text{ m}$  et  $\lambda = \frac{c}{f} = 0,1 \text{ m}$ , nous avons  $g = 592$ .

Or nous avons vu la relation entre gain,  $g$ , et résistance de rayonnement,  $R$ , pour une antenne idéale sans pertes internes

$$Rg = 4\pi \frac{A_0^2}{\eta I_0^2} \Rightarrow A_0^2 = \frac{\eta I_0^2 Rg}{4\pi}$$

Comme le champ lointain  $\vec{E}$  d'une antenne a son module qui varie en  $\frac{A_0}{r}$ , nous aurons

$$E = \frac{A_0}{r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\eta I_0^2 Rg}{4\pi}}$$

Application Numérique :  $E = 0,94 \text{ V/m}$

L'antenne parabolique produit un champ bien plus intense comme l'indique son gain très élevé. La contrepartie est évidemment sa directivité beaucoup plus grande.

### Problème 15.

Résistance du dipôle

Une antenne infiniment fine de longueur  $l = \frac{\lambda}{2}$  présente en réalité une impédance caractéristique  $Z_e$  vérifiant  $Z_e = 73,2 + j42,5 \Omega$ .

1. Placer cette impédance sur un abaque de Smith en considérant l'impédance de normalisation à  $50 \Omega$
2. Cette antenne est alimentée à 550 MHz par le transistor de matrice  $[S]$

$$[S] = \begin{pmatrix} 0,345\angle -177^\circ & 0,063\angle +72^\circ \\ 5,774\angle +82^\circ & 0,390\angle -21^\circ \end{pmatrix}.$$

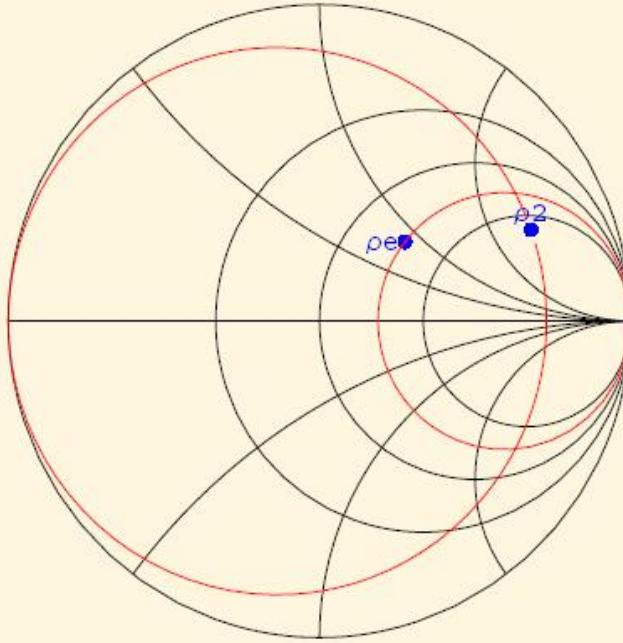
On sait que ce transistor donne son meilleur gain avec les coefficients de réflexion  $\rho_1 = 0,7213\angle +180^\circ$ , et  $\rho_2 = 0,7386\angle +23^\circ$  à l'entrée et à la sortie. Adapter la sortie du transistor à l'antenne avec une cellule réactive à éléments localisés.

3. Le transistor étant supposé adapté à l'entrée avec une cellule réalisant  $\rho_1$ , on l'attaque avec un générateur fournissant 10 dBm, en déduire le champ électrique maximal à 3 km de l'antenne.
4. On combine cette antenne avec un réflecteur parabolique de diamètre 1,63 m. Quel est le gain de la nouvelle antenne ? Quel est le champ à 3 km ? (On supposera que l'impédance de l'antenne  $\frac{\lambda}{2}$  n'a pas varié et que toute la puissance émise par ce dipôle est reprise par le réflecteur parabolique).

### Corrigé du problème 15

1/ L'impédance réduite est  $z_e = 1,464 + j0,85$ .

2/ Ici c'est le cas général d'adaptation qui s'applique car ni la sortie du transistor ni l'antenne ne sont adaptés avec  $50 \Omega$ . On doit adapter  $\rho_e = \frac{z_e - 1}{z_e + 1} = 0,275 + j0,250 = 0,372\angle42,3^\circ$  à  $\rho_2 = 0,739\angle23^\circ$  selon le schéma de la Fig. B.1.5



On trouve entre le transistor à gauche et l'antenne à droite une cellule comportant, une capacité  $C_p$  en parallèle coté transistor, et une inductance  $L_s$  en série coté antenne, avec les valeurs suivantes pour les éléments

$$C_p = 0,51 \text{ pF} \quad L_s = 26,6 \text{ nH}$$

3/ Si ce transistor est adapté à son entrée aussi alors

son gain est  $G = 17,95 \text{ dB}$ , soit une valeur scalaire de  $62,3$ .

Si on l'attaque avec  $P_{in} = 10 \text{ dBm}$ , alors  $P_{out} = 27,95 \text{ dBm}$ , soit  $P_{out} = 623 \text{ mW}$ .

Pour calculer le champ électrique produit par l'antenne dans ces conditions, il faut savoir quel est le courant maximal  $I_0$  qui la traverse. Or la puissance fournie par le transistor n'est dépensée que dans la résistance de rayonnement de l'antenne, donc  $R_e \frac{I_0^2}{2} = P_{out}$ , ce qui donne  $I_0 = 130 \text{ mA}$ . Alors comme

$$E = \frac{\eta I_0 \cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{2\pi r \sin \theta}$$

pour  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ,  $E$  est maximal et  $E = 2,61 \text{ mV/m}$ .

4/ Avec  $D = 1,63 \text{ m}$ ,  $\lambda = \frac{c}{f} = 0,545$ , on a  $\frac{D}{\lambda} = 3$ . Alors le gain de la parabole est  $g = 0,6 \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = 53,3 = 17,3 \text{ dB}$ .

Comme le gain initial de l'antenne  $\frac{\lambda}{2}$  était de  $2,15 \text{ dB}$ ,  $E^2$  a été augmenté de  $17,3 - 2,15 = 15,1 \text{ dB}$  par ce nouveau montage. Donc le champ produit par la parabole est dans ce rapport

$$\frac{E_{\text{parabole}}}{E_{\frac{\lambda}{2}}} = 10^{\frac{15,1}{20}} = 5,7 \quad \Rightarrow \quad E_{\text{parabole}} = 14,9 \text{ mV/m}$$

## Problème 16.

### Amplificateur d'antenne à 2.45 GHz

Transistor	Matrice [S]	$ \det(S) $	Facteur de Bruit
A	$\begin{pmatrix} 0,8\angle -30^\circ & 0,05\angle -120^\circ \\ 1\angle -140^\circ & 0,6\angle -60^\circ \end{pmatrix}$	0,529	1,2 dB
B	$\begin{pmatrix} 0,8\angle -90^\circ & 0,01\angle -100^\circ \\ 4\angle 150^\circ & 0,8\angle -120^\circ \end{pmatrix}$	0,648	1,7 dB
C	$\begin{pmatrix} 0,65\angle -170^\circ & 0,05\angle -10^\circ \\ 2,5\angle 20^\circ & 0,5\angle -130^\circ \end{pmatrix}$	0,263	1,4 dB
D	$\begin{pmatrix} 0,6\angle -120^\circ & 0,05\angle 30^\circ \\ 2\angle 30^\circ & 0,8\angle -130^\circ \end{pmatrix}$	0,423	1,2 dB

On dispose dans un tiroir de quatre transistors A, B, C et D tous différents et dont les caractéristiques à  $f = 2,45$  GHz sont donnés dans la Table ci-dessus.

1. Caractériser ces transistors en terme de stabilité. Si l'adaptation simultanée est possible, donner leur  $G_{max}$ .
2. Choisir deux transistors *differents* pour obtenir le *mieux* amplificateur à deux étages en terme de *gain*. Donner le facteur de bruit résultant.

3. Choisir deux transistors *differents* pour obtenir le *mieux* amplificateur à deux étages en terme de *bruit*. Donner le gain résultant.
4. On retrouve au fond du tiroir un second transistor B. Quel sera le gain et le bruit d'un amplificateur cascadant deux transistors B ? Ceci n'étant possible que si les coefficients de réflexion  $\rho_1 = 0,818\angle 96,4^\circ$  et  $\rho_2 = 0,818\angle 126,4^\circ$  sont présentés respectivement à l'entrée et à la sortie du transistor B, quelle sera la meilleure solution pour réaliser l'adaptation inter-étage ?
5. On utilise l'amplificateur précédent pour alimenter une antenne  $\lambda/2$  dont le brin a une épaisseur  $d = \lambda/100$ . Son impédance est alors approximativement

$$Z_e = \left( 73,2 - \frac{5400}{R_c} \right) + j \left( 42,5 - \frac{9700}{R_c} \right),$$

avec

$$R_c = 120 \left[ \ln \left( \frac{\lambda}{d} \right) - 1 \right],$$

transformer l'impédance correspondant à  $\rho_2 = 0,818\angle 126,4^\circ$  en  $Z_e$  grâce à une capacité-série et une capacité-parallèle pour adapter la sortie de l'amplificateur à l'antenne.

### Corrigé du problème 16

1/ Cela se traite en calculant le facteur de stabilité de Rollet  $K$ . On a

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}| |S_{21}|}.$$

Si  $K > 1$  et  $|\Delta| < 1$  alors

$$G_{max} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} |K - \sqrt{K^2 - 1}|.$$

La bonne idée consiste pour la suite à calculer aussi le facteur de mérrite

$$M = \frac{F - 1}{1 - G^{-1}}.$$

On rappellera aussi dans le tableau ci-dessous le facteur de bruit

Transistor	$K$	$M$	$F$ (dB)	Stable ?	$G_{max}$ (dB)
A	2,8	0,437	1,2	Oui	5,7
B	1,75	0,483	1,7	Oui	21
C	1,59	0,403	1,4	Oui	12,5
D	0,89	—	1,2	Non	—

2/ Le meilleur ampli en terme de gain associe les deux transistors de plus fort gain : le B et le C. Le gain sera alors  $G = 33,5$  dB et le meilleur facteur de bruit sera celui de C + B (ordre croissant des facteurs de mérrite)

$$F_{C+B} = F_C + \frac{(F_B - 1)}{G_C} = 1,48 \text{ dB}.$$

Notez que montés dans l'autre sens (B+C) cela donnerait<sup>2</sup>

$$F_{B+C} = F_B + \frac{(F_C - 1)}{G_B} = 1,71 \text{ dB}.$$

3/ Le meilleur ampli en terme de bruit est obtenu avec la combinaison des deux transistors de plus faibles  $M$  : ce sera C + A, son gain sera  $G = 18,2$  dB, et son facteur de bruit

$$F_{C+A} = F_C + \frac{(F_A - 1)}{G_C} = 1,46 \text{ dB}.$$

Son bruit n'est donc pas vraiment meilleur que le précédent, et ce malgré un nette détérioration du gain.

4/ On aura  $G_{B+B} = 42$  dB, et

$$F_{B+B} = F_B + \frac{F_B - 1}{G_B} = 1,71 \text{ dB}.$$

L'adaptation aura pour rôle de nous faire passer de  $\rho_2$  à  $\rho_1^*$ , ce qui revient à transformer l'impédance d'entrée du second transistor ( $\rho_1^*$ ) en  $\rho_2$ , le coefficient de réflexion à placer à la sortie du premier pour réaliser l'adaptation simultanée. La meilleure solution sera donc une ligne puisque les modules de ces coefficients de réflexions sont égaux. Cette ligne fera passer de  $\rho_2$  à

<sup>2</sup>Notez aussi que pour calculer ces valeurs il faut prendre les valeurs scalaires correspondant aux dB et non pas mettre directement dans ces formules les valeurs en dB, soit trouvées précédemment, soit données dans l'énoncé... voilà l'origine de nombreuses erreurs !

$\rho_1^* = 0,818 \angle -96,4^\circ$  soit  $137,2^\circ$  vers la charge. Comme  $360^\circ$  de déphasage correspondent à une longueur de ligne  $\lambda$ , la longueur de la ligne à utiliser ici sera donné par une simple règle de 3

$$\frac{137,2}{360} \lambda \approx 0,381 \lambda \approx 4,7 \text{ cm.}$$

5/ On calcule  $z_e = 1,214 + 0,402 j$ .

On place le point sur l'abaque directement grâce aux graduations de celui-ci.<sup>3</sup>

La construction de l'abaque Fig. B.1.6 donne alors  $C_{serie} = 12,1 \text{ pF}$ , et  $C_{parallel} = 2,7 \text{ pF}$ .

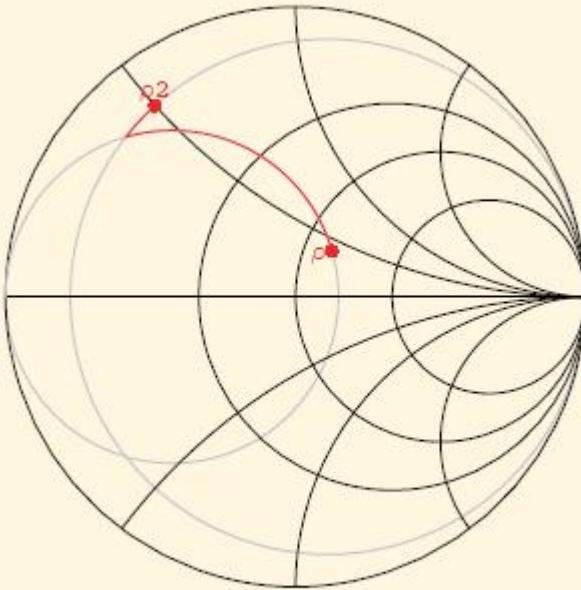


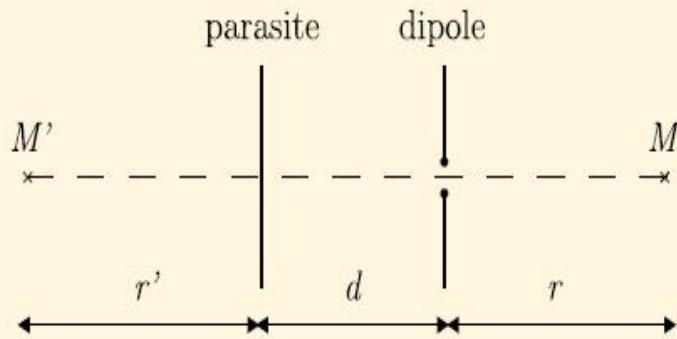
FIG. B.1.6 – Adaptation de  $\rho_2$  à  $\rho = (z_e - 1)/(z_e + 1)$ .

### Problème 17.

Alignement d'antennes (Antenne Yagi)

Deux dipôles résonnantes sont situés à une distance  $d$  l'un de l'autre. L'un de ces dipôles est alimenté et rayonne avec une amplitude  $E_0$  et un déphasage initial nul ; l'autre qui n'est pas alimenté (on l'appelle le parasite) va rayonner par induction avec une amplitude  $E'_0$  et un déphasage propre (entre champ incident et champ rayonné) de  $180^\circ$  (loi de Lenz).

1. En prenant l'origine des phases au niveau du dipôle alimenté, calculer le champ total créé en un point  $M$  situé à une distance  $r$  à droite du dipôle et en un point  $M'$  situé à une distance  $r'$  à gauche du parasite.
2. Application au cas où  $d = \lambda/4$  et  $E'_0 = E_0$  (couplage maximum). Interprétation du résultat.



### Corrigé du problème 17

1/ Pour le dipôle alimenté

$$E_d(M) = E_0 \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r \right) \right]$$

et

$$E_d(M') = E_0 \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (d + r') \right) \right]$$

Pour le parasite

$$E_p(M) = E'_0 \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (d + r) - \phi \right) \right]$$

et

$$E_p(M') = E'_0 \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r' - \phi \right) \right]$$

où  $\phi = +\pi + \frac{2\pi}{\lambda} d$  est la phase de rayonnement du parasite soumis au champ du dipôle.

Donc

$$E_T(M) = E_d(M) + E_p(M)$$

$$E_T(M) = \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r \right) \right] \left[ E_0 - E'_0 \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} d \right) \right]$$

et

$$E_T(M') = E_d(M') + E_p(M')$$

$$E_T(M') = \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} (d + r') \right) \right] [E_0 - E'_0]$$

2/ Si  $d = \frac{\lambda}{4}$  et  $E_0 = E'_0$  qui est le cas du couplage maximal entre le dipôle et le parasite, alors  $\exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}d) = \exp(-j\pi) = -1$ , donc

$$E_T(M) = 2E_0 \exp \left[ j \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r \right) \right]$$

Soit

$$E_T(M) = 2E_d(M)$$

De l'autre côté comme  $E_0 = E'_0$  par supposition,  $E_T(M') = 0$ , le parasite se comporte comme un réflecteur parfait.

### Problème 18.

Liaison avec un satellite météo

On se propose de réaliser une liaison à 2 GHz entre un satellite géostationnaire de météorologie et la terre. On étudiera donc successivement l'émetteur du satellite, et la liaison avec la terre.

#### Émetteur Satellite

L'émetteur du satellite est composé d'un amplificateur et d'une antenne parabolique. Le dernier étage qui alimente l'antenne est réalisé avec un transistor de puissance dont les paramètres  $S$  mesurés sous  $50 \Omega$  sont

$$\begin{pmatrix} 0,4\angle -150^\circ & \simeq 0 \\ 3,162\angle +80^\circ & 0,5\angle -30^\circ \end{pmatrix}.$$

1. Donner les coefficients de réflexion à réaliser à l'entrée et à la sortie pour obtenir le gain maximal. Calculer ce gain.
2. Grâce à l'abaque de Smith adapter l'entrée à  $50 \Omega$  avec un quadripôle à élément localisé.
3. L'antenne parabolique attaquée par cet amplificateur présente une impédance de  $Z_{sat} = 20 - j 30 \Omega$ . Placer cette impédance dans l'abaque de Smith puis adapter la sortie du transistor à l'antenne.

#### Liaison Satellite-Terre

1. Sachant qu'un satellite géostationnaire a une orbite circulaire dans le plan équatorial dont le rayon est 42200 km, que le rayon de la terre est 6400 km, que Montpellier est sensiblement à une latitude de  $43,6^\circ$ , montrer que la distance Satellite-Montpellier est  $\approx 37800$  km et que l'angle de pointage de la parabole sera de  $36,9^\circ$  par rapport au sol.
2. Si l'angle d'ouverture totale de la parabole émettrice du satellite est de  $1,8^\circ$ , quel est le gain de l'antenne d'émission et son diamètre.

3. Pour des raisons de poids des panneaux solaires embarqués, l'amplificateur ne peut fournir qu'un courant modulé maximal de 0,6 A, montrer que si l'antenne a une résistance de rayonnement de  $50 \Omega$ , le champ électrique reçu à Yaoundé est de  $25 \mu\text{V/m}$ .
4. On choisit une antenne de réception parabolique. Quelle est la puissance électromagnétique captée par cette antenne si son diamètre est  $D$ ? En identifiant cette puissance à  $\frac{1}{2}RI_0^2$ , où  $R = 50 \Omega$  est la résistance de rayonnement, en déduire le diamètre  $D$  nécessaire pour obtenir un courant  $I_0 = 1 \mu\text{A}$  à la détection. Quels sont alors le gain et la directivité de cette antenne?

#### Corrigé du problème 18

**1.1/**  $\rho_1 = 0,4 \angle 150^\circ, \rho_2 = 0,5 \angle 30^\circ, G_{max} = 12 \text{ dB}.$

**1.2/**  $C_1 = 1,75 \text{ pF}, L_1 = 2,8 \text{ nH}$

**1.3/**  $C_1 = 3,2 \text{ pF}, L_1 = 3,8 \text{ nH}$

**2.1/** Réponses dans la question.

**2.2/**  $g = 2080, D = 2,8 \text{ m.}$

**2.3/** Réponse dans la question.

**2.4/**  $D = \frac{I_0}{E} \sqrt{\frac{4R\eta}{\pi}} = 6,2 \text{ m}, g \approx 10^4, 2\theta = 1,6^\circ.$

### Problème 19.

#### Étude d'un récepteur

1. La partie active du récepteur est un mélangeur dont le schéma équivalent correspond à une résistance de  $10 \Omega$  en parallèle avec une capacité de  $0,19 \text{ pF}$ . Positionner le coefficient de réflexion correspondant dans l'abaque de Smith (l'impédance de normalisation est  $50 \Omega$ ).
2. Le mélangeur est attaqué par un FET AsGa unilatéral de matrice

$$[S] = \begin{pmatrix} 0,7\angle -60^\circ & \simeq 0 \\ 2,15\angle +180^\circ & 0,3\angle -40^\circ \end{pmatrix}.$$

Quel est le gain maximal que permet ce FET lorsqu'il est correctement adapté ?

3. Grâce à l'abaque de Smith, adapter la sortie du FET au mélangeur avec une cellule à éléments localisés (capacité parallèle et inductance série par exemple).
4. Grâce à l'abaque de Smith, adapter l'entrée du FET à l'antenne parabolique d'impédance  $Z = 20 - j55 \Omega$  (une solution à base de ligne(s) est judicieuse !).
5. Pour fonctionner correctement le mélangeur nécessite une puissance micro-onde minimale de  $0 \text{ dBm}$ . Si la parabole de réception a un diamètre  $D = 1 \text{ m}$  quel doit être le champ électrique minimal capté par cette antenne avec la configuration de récepteur étudiée ?

#### Étude de la liaison

1. Les antennes paraboliques d'émission et de réception sont identiques et possèdent un diamètre  $D = 1 \text{ m}$ . Quel est leur gain réel  $g_r$  et leur directivité  $\theta_r$  ?
2. Dans le cas où l'alignement entre les deux paraboles est parfait quel est le gain obtenu en utilisant ces deux paraboles plutôt que des antennes omnidirectionnelles ? Même question par rapport à des antennes  $\lambda/2$  ? Que deviennent ces gains si l'une des paraboles est désalignée de  $1^\circ$  ?
3. La distance point à point entre les deux antennes est de  $r = 30 \text{ km}$ . Calculer l'atténuation en puissance de la liaison si les deux antennes sont omnidirectionnelles.
4. En utilisant la notion de gain définie auparavant quelle est l'atténuation de la liaison avec les antennes paraboliques ?
5. En déduire la puissance minimale émise qui assure une bonne réception (voir la dernière question de la première partie) et le courant correspondant dans l'antenne sachant qu'une marge de  $m = 10 \text{ dB}$  est nécessaire pour tenir compte des défauts d'alignement, de l'atténuation due à la brume éventuelle, d'un guidage parasite dû au gradient de chaleur (effet mirage), ... On pourra utiliser l'impédance d'antenne donnée précédemment.

### Corrigé du problème 19

1.1/ Placer  $y = \frac{R_0}{R} + j R_0 C \omega = 5 + j 0,6$  dans l'abaque, puis prendre le symétrique.

1.2/  $G_{max} = 10 \text{ dB}$

1.3/  $C = 0,6 \text{ pF}, L = 0,4 \text{ nH}$

1.4/ Comme  $|S_{11}^{\star}| = |\rho_{\text{antenne}}|$ , une ligne de 9,15 mm convient.

1.5/  $E = 0,31 \text{ V/m.}$

2.1/  $g_r = 6580, \theta_r = 1^\circ$ .

2.2/  $G_{\text{paraboles}} = g_r^2 = 76,4 \text{ dB}$ , soit 72 dB de mieux qu'avec des  $\frac{\lambda}{2}$ . 1 ° de désalignement fait perdre 3 dB.

2.3/  $Att_{\text{Omnidirectionnelles}} = -89,5 \text{ dB.}$

2.4/  $Att_{\text{Paraboles}} = -13 \text{ dB.}$

2.5/  $P_{min \text{ émise}} = 20 \text{ mW}, I_0 = 45 \text{ mA.}$

### Problème 20.

Etude d'un radar

Un radar maritime d'aide à l'accostage est constitué d'une antenne « patch » utilisée à l'émission et à la réception et de modules d'émission et de réception reliés par un circulateur. On se propose d'étudier ce système et ses caractéristiques principales.

Le radar est organisé autour d'un circulateur de matrice

$$[S] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \exp(j\theta) \\ \exp(j\theta) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(j\theta) & 0 \end{pmatrix},$$

avec l'oscillateur au port 1, l'antenne au port 2, et la détection au port 3.

1. Montrer que le circulateur isole l'émission et la réception. La valeur de l'angle  $\theta$  est-elle importante ? À quoi correspond-t-elle ? Que se passe-t-il si l'antenne présente une désadaptation ?
2. On donne en TAB. B.1, les matrices  $[S]$  à 10 GHz de trois transistors avec leur déterminant  $\Delta$ . Choisissez parmi ces composants le meilleur transistor pour l'oscillateur et le meilleur transistor pour l'amplificateur à la détection. Justifier vos choix en terme de stabilité et de gain maximum possible.
3. Le transistor choisi pour la détection donne son optimum en terme de gain si les coefficients de réflexion  $\rho_1 = 0,884\angle + 174^\circ$  et  $\rho_2 = 0,837\angle + 150^\circ$  lui sont présentés respectivement en entrée et en sortie. L'amplificateur de détection cascade deux tels transistors, adaptez dans ces conditions l'entrée de ce transistor au circulateur par des éléments localisés, et adaptez les deux étages entre eux.
4. L'antenne « patch » produit un champ lointain de la forme  $E = A_0/r$  avec  $A_0 = 7\sqrt{\eta}I_0f(\theta,\phi)$ , où  $f(\theta,\phi) = \sin\theta\sin^{3/2}\phi$  si  $0 \leq \phi \leq \pi$ , et  $f(\theta,\phi) = 0$  si  $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ . Montrer que le gain  $g$  est  $\approx 7$  et que la résistance de rayonnement est  $R = 88\Omega$ .

TAB. B.1 – Matrice  $[S]$  et déterminant  $\Delta$  de trois transistors à  $f = 10$  GHz

XL102MH2	$\begin{pmatrix} 0,566\angle 9,7^\circ & 0,029\angle -124,7^\circ \\ 1,372\angle -140,4^\circ & 0,868\angle 134,1^\circ \end{pmatrix}$	$\Delta = 0,466\angle 147,5^\circ$
ATF3677	$\begin{pmatrix} 0,69\angle -146^\circ & 0,082\angle -6^\circ \\ 3,566\angle 37^\circ & 0,42\angle -119^\circ \end{pmatrix}$	$\Delta = 0,309\angle 153,4^\circ$
FHC30LG*	$\begin{pmatrix} 0,625\angle -166,4^\circ & 0,087\angle -8,4^\circ \\ 2,401\angle 16,7^\circ & 0,47\angle -135,1^\circ \end{pmatrix}$	$\Delta = 0,227\angle 103,6^\circ$

5. Si la partie imaginaire de l'impédance d'antenne est  $j20\Omega$ , adapter-là au circulateur avec des éléments localisés.
6. Le bateau sur lequel le champ électromagnétique se réfléchit est à la distance  $d$  et renvoie  $\frac{1}{10}$  de la puissance incidente, quel est le champ  $E$  reçu en retour par l'antenne si  $\theta = \phi = \pi/2$  ? Même question avec  $\theta = \pi/2$ , mais avec  $0 < \phi < \pi$  ? A.N. :  $d = 50$  m,  $I_0 = 0,1$  A
7. On appelle  $A(\theta,\phi) = \frac{\lambda^2 g}{4\pi} f(\theta,\phi)$ , la surface de captation d'une antenne, c'est à dire la surface sur laquelle on doit intégrer le vecteur de Poynting pour obtenir la puissance captée. Quel est le courant de modulation reçu dans les conditions précédentes pour  $\theta = \phi = \pi/2$  ?
8. Si un défaut d'adaptation fait que l'antenne présente un coefficient de réflexion de  $\rho_A = 5 \cdot 10^{-5}$ , à partir de quelle distance ne « voit-on » plus le bateau ? Que pensez-vous de ce radar en l'état ?

## Corrigé du problème 20

1/ Développer la matrice et faire comme à l'exercice traitant le coupleur.

2/

XL102MH2	$K = 1,80$	Stable	$G_{max} = 11,6 \text{ dB}$
ATF3677	$K = 0,76$	Instable	
FHC30LG*	$K = 1,05$	Stable	$G_{max} = 13 \text{ dB}$

Le ATF3677 servira d'oscillateur et le FHC30LG\* d'ampli pour son meilleur gain.

3/ À l'entrée  $C_{ff} = 1,17 \text{ pF}$ ,  $L_{\text{série}} = 0,25 \text{ nH}$ , entre étage  $C_{ff} = 2,4 \text{ pF}$ ,  $L_{\text{série}} = 0,23 \text{ nH}$ .

4/ Réponses dans la question.

5/  $L_{\text{série}} = 0,73 \text{ nH}$ ,  $C_{ff} = 0,11 \text{ pF}$ .

6/  $\theta = \phi = \pi/2 \Rightarrow E = 0,43 \text{ V/m}$ , si  $\phi$  est quelconque multiplier par  $\sin^{\frac{3}{2}} \phi$ .

7/ Puissance totale captée  $P = 1,23 \mu\text{W} \Rightarrow i_0 = 5,3 \mu\text{A}$ .

8/ Le radar fonctionne pour  $d \leq 53 \text{ m}$ , un tel radar est inutilisable !

### Problème 21.

Étude d'une liaison hertzienne à 10 GHz

Une liaison hertzienne à 10 GHz est constituée d'une antenne émettrice et d'une antenne réceptrice parabolique distantes de  $D = 10 \text{ km}$ . Ces deux antennes sont associées à des amplificateurs tous réalisés avec le même transistor FHC30LG\* de matrice  $[S]$

$$\begin{pmatrix} 0,625 \angle -166,4^\circ & 0,087 \angle -8,4^\circ \\ 2,401 \angle 16,7^\circ & 0,47 \angle -135,1^\circ \end{pmatrix}$$

dont le déterminant est  $\Delta = 0,227 \angle 103,6^\circ$  et dont le facteur de bruit dans les conditions de gain optimal est  $F = 1,7 \text{ dB}$ . On supposera, tout au long du problème, que les amplificateurs et les antennes incluent toujours les réseaux réactifs les plus adéquats réalisant les adaptations d'entrée et de sortie à  $50 \Omega$ .

1. Le transistor choisi pour réaliser les amplificateurs est-il stable ? Quel est le plus fort gain accessible avec ce composant ? Quel sera dans ces conditions le facteur de bruit d'un amplificateur cascadant  $n$  étages FHC30LG\* ?

*Application Numérique :  $n = 1, 2$ , et  $+\infty$ .*

2. Si l'antenne émettrice est une  $\frac{\lambda}{2}$ , quel est le courant maximal  $I_0$  avec lequel on doit l'alimenter pour obtenir un champ électrique de module  $E$  à la distance  $D$  dans la direction  $\theta$  ? Même question si l'antenne émettrice est un « patch » produisant un champ lointain de la forme  $E = A_0 f(\theta, \phi) / r$ , avec  $A_0 = 7\sqrt{\eta} I_0$  et  $f(\theta, \phi) = \sin \theta \sin^{3/2} \phi$  si  $0 \leq \phi \leq \pi$ , et  $f(\theta, \phi) = 0$  si  $\pi \leq \phi \leq 2\pi$ .

*Application Numérique :  $\eta \approx 377 \Omega$ ,  $E = 100 \mu\text{V/m}$ ,  $\theta = \phi = \pi/2$ .*

3. Quel est le gain  $g$  et la résistance de rayonnement,  $R_p$ , du « patch » précédent ? Montrer que la puissance microonde nécessaire pour produire le champ  $E$  de la question précédente avec ce « patch » est de 3,8 dBm.

4. Si  $d$  est le diamètre de l'antenne réceptrice parabolique, que l'on supposera pointée de façon optimale,  $\theta = \phi = \pi/2$ , et  $E$  le module du champ reçu, quelle est la puissance électromagnétique captée par le réflecteur ? En supposant que le dipôle récepteur  $\lambda/2$  placé au foyer de la parabole ne convertit que seulement 60 % de cette puissance, quelle est la puissance microonde à l'entrée de l'amplificateur de détection ?  
*Application Numérique :*  $E = 100 \mu\text{V/m}$ . En déduire  $d$  pour une puissance microonde utilisable  $P_{util} = -70 \text{ dBm}$  ?
5. Quel est le gain  $G_L$  de la liaison complète incluant l'antenne émettrice « patch » et l'antenne réceptrice parabolique ? Quel est le facteur de bruit,  $F_L$  correspondant ? Pour cela, on supposera connaître le rapport signal à bruit,  $(S/N)_{in} = 50 \text{ dB}$ , à l'attaque de l'antenne émettrice et on calculera sa dégradation lors de la transmission à cause de la puissance de bruit  $P_{bruit} = k_B T_a \Delta f$  directement captée par la parabole, avec  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ , constante de Boltzmann,  $T_a = 50 \text{ K}$ , température de bruit de l'environnement, et  $\Delta f = 145 \text{ MHz}$ , bande passante du système de détection.

### Corrigé du problème 21

1/  $K = 1,053 \Rightarrow$  le transistor est stable et  $G_{max} = 13 \text{ dB}$ .

Pour le chainage des facteurs de bruit voir EXEMPLE A.3.2.

2/ Antenne  $\frac{\lambda}{2}$  :  $I_0 = \frac{2\pi D}{\eta} E \frac{\sin\theta}{\cos(\frac{\pi}{2}\cos\theta)} = 16,66 \text{ mA}$ .

Antenne Patch :  $I_0 = \frac{DE}{7\sqrt{\eta} \sin\theta \sin^{3/2}\phi} = 7,35 \text{ mA}$ .

3/  $g = 8,5 \text{ dB}$ ,  $R_p = 88 \Omega$ ,  $P = \frac{1}{2} R_p I_0^2 = 3,8 \text{ dBm}$ .

4/  $P_{rec} = \frac{2}{\eta} \pi d^2 E^2$  et  $P_{ut} = \gamma P_{rec}$  avec  $\gamma = 60\% \Rightarrow d = \sqrt{\frac{P_{ut}\eta}{2\gamma\pi}} \frac{1}{E}$ , soit  $d = 1 \text{ m}$  et  $P_{ut} = -70 \text{ dBm}$ .

5/  $G_L = -73,8 \text{ dB}$ . On repart de la définition de  $F_L = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$ , comme  $P_{bruit} = -100 \text{ dBm}$  et  $(S/N)_{out} = \frac{G_L S_{in}}{G_L N_{in} + P_{bruit}}$ , on trouve  $F_L = 20 \text{ dB}$ .

### Problème 22.

Autre étude d'une liaison hertzienne à 10 GHz

Une liaison hertzienne à 10 GHz est constituée de deux antennes distantes de  $D = 10$  km. Ces antennes sont associées à des amplificateurs réalisés avec le même transistor de matrice [S]

$$\begin{pmatrix} 0,8\angle -120^\circ & 0,02\angle 100^\circ \\ 4\angle 160^\circ & 0,5\angle -160^\circ \end{pmatrix}, \quad \det[S] = 0,48\angle 80^\circ$$

et de paramètres de bruit

$$F_{min} = 0,6 \text{ dB}, \quad R_n = 80 \Omega, \quad Y_{opt} = (10^{-2} - j 3,24 \cdot 10^{-2}) \Omega^{-1}$$

1. • Ce transistor est-il stable ?
  - Dans quelle condition donne-t-il son plus fort gain et quelle est cette valeur ?
  - Dans ce cas quel est le facteur de bruit d'un amplificateur cascadant  $n$  étages ?

*Application Numérique :*  $n = 1, 2$ , et  $+\infty$ .

2. Ce transistor est alimenté par un générateur  $50 \Omega$ . Adapter son entrée avec des éléments localisés pour obtenir le facteur de bruit minimum.
3. • Si l'antenne émettrice est une  $\frac{\lambda}{2}$ , quel est le courant maximal  $I_0$  avec lequel on doit l'alimenter pour obtenir un champ électrique de module  $E$  à la distance  $D$  ?
  - Même question si l'antenne émettrice est un « patch » produisant le champ lointain

$$E = \rho I_0 \frac{f(\theta, \phi)}{r}, \text{ avec } \rho = 109,5 \Omega/\text{m}, \text{ et } f(\theta, \phi) = \begin{cases} \sin \theta \sin^2 \phi & \text{si } 0 \leq \phi \leq \pi \\ 0 & \text{si } \pi \leq \phi \leq 2\pi \end{cases}$$

*Applications Numériques :*  $E = 100 \mu\text{V}/\text{m}$ ,  $\theta = \phi = \pi/2$ , on rappelle que  $\eta = 377 \Omega$ .

4. • Parmi les 4 représentations de la Fig. 1, laquelle correspond au diagramme de rayonnement du « patch » précédent ?

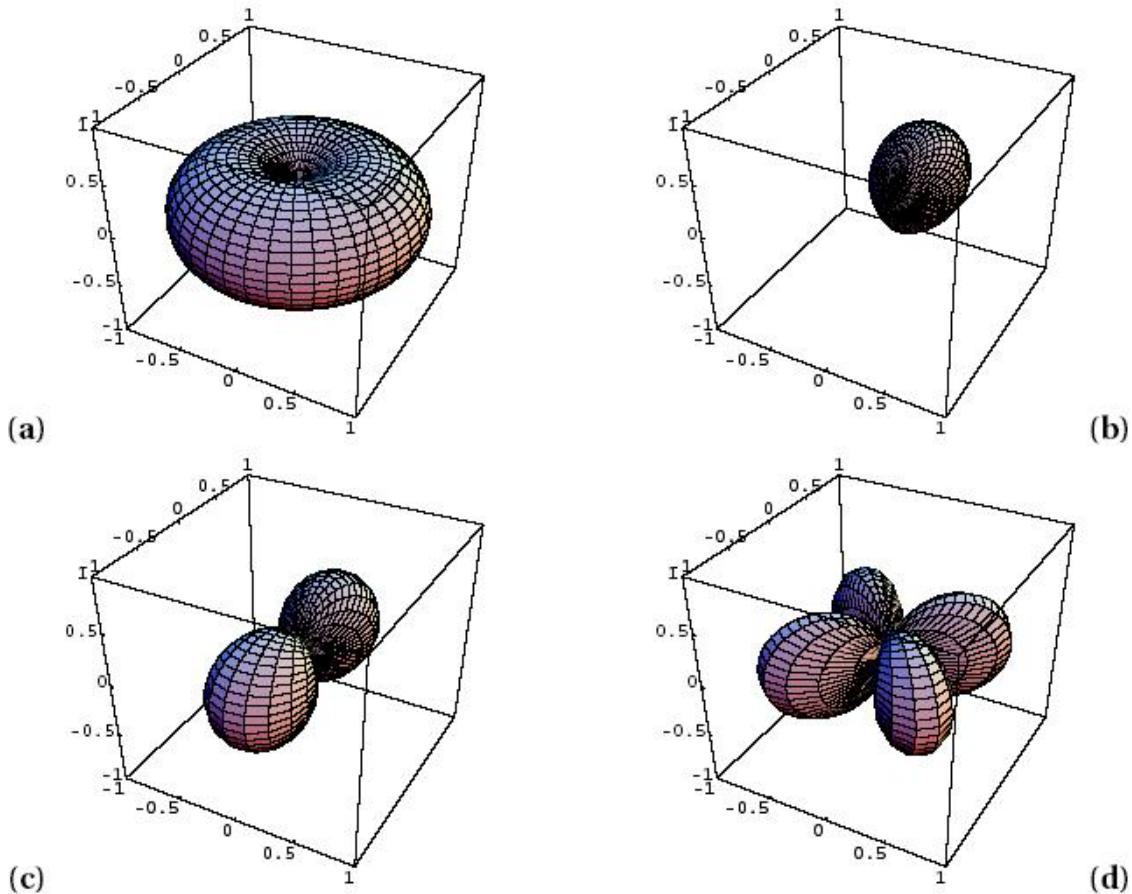


FIG. 1 – Diagrammes de rayonnement de quelques antennes

- Grâce aux formules de la Tab. 1, calculez le gain  $G_p$  et la résistance de rayonnement,  $R_p$ , du « patch ». Montrer que la puissance microonde nécessaire pour produire le champ  $E = 100 \mu\text{V/m}$  de la question précédente avec ce « patch » est de 3,2 dBm.
5. Si  $d$  est le diamètre de l'antenne réceptrice parabolique, que l'on supposera pointée de façon optimale,  $\theta = \phi = \pi/2$ , et  $E$  le module du champ reçu, quelle est la puissance électromagnétique captée par le réflecteur ? En supposant que le dipôle récepteur  $\lambda/2$  placé au foyer de la parabole ne convertit que seulement  $\gamma = 60\%$  de cette puissance, quelle est la puissance microonde utile  $P_u$  à l'entrée de l'amplificateur de détection ?
- Application Numérique :*  $E = 100 \mu\text{V/m}$ , En déduire  $d$  pour une puissance microonde utilisable  $P_u = -70 \text{ dBm}$  ?

$$\begin{aligned}
 \int \sin(x) dx &= -\cos(x) & \int \sin(x)^2 dx &= \frac{x}{2} - \frac{\sin(2x)}{4} \\
 \int \sin(x)^3 dx &= -\frac{3\cos(x)}{4} + \frac{\cos(3x)}{12} & \int \sin(x)^4 dx &= \frac{3x}{8} - \frac{\sin(2x)}{4} + \frac{\sin(4x)}{32} \\
 \int \sin(x)^5 dx &= -\frac{5\cos(x)}{8} + \frac{5\cos(3x)}{48} - \frac{\cos(5x)}{80} & \int \sin(x)^6 dx &= \frac{5x}{16} - \frac{15\sin(2x)}{64} + \frac{3\sin(4x)}{64} - \frac{\sin(6x)}{192}
 \end{aligned}$$

TAB. 1 – Primitives de  $\sin(x)^n$  pour  $n \in [1,6]$

## Corrigé du problème 22

## II.1

Cela se traite en calculant le facteur de stabilité de Rollet  $K$ . On a

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}| |S_{21}|}.$$

Si  $K > 1$  et  $|\Delta| < 1$  alors on sait que

$$G_{max} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \left| K - \sqrt{K^2 - 1} \right|.$$

Ici on obtient  $K = 2,127$  et le transistor est donc *inconditionnellement stable*, alors  $G_{max} = 17$  dB.

Pour le facteur de bruit de quadripôles chaînés on utilise l'exemple A.3.3 du poly.

$$F_n = 1 + (F-1) \frac{1-G^{-n}}{1-G^{-1}}, \quad F_\infty = 1 + \frac{F-1}{1-G^{-1}}$$

avec  $F = 0,6$  dB et  $G = G_{max}$ . Cela donne,  $F_1 = 0,6$  dB (bien sûr !),  $F_2 = 0,6112$  dB et  $F_\infty = 0,6114$  dB, donc dès  $n = 2$  on atteint l'asymptote de facteur de bruit.

## II.2

La première chose à faire est de positionner correctement le point  $Y_{opt}$ . Pour cela il faut calculer l'admittance réduite  $y_{opt}$ , puis positionner ce point *en admittance* sur l'abaque et le transformer en impédance et coefficient de réflexion réel par symétrie par rapport au centre.

Ceci est fait sur l'abaque de la Fig. 1. Si on trace ensuite les jeux de cercles à partie réelle de l'impédance et de l'admittance constantes qui passent par les points d'adaptation, on voit que deux solutions sont possibles (celles pour lesquelles les cercles se coupent en dehors de la frontière de l'abaque...). Ces solutions sur l'abaque sont données comme les portions continues des cercles précédents (les pointillés complètent les cercles pour faciliter la lecture).

**Solution A, en vert sur l'abaque.** Le réseau d'adaptation à utiliser dans ce cas est constitué en partant du générateur  $50 \Omega$  d'une inductance série  $L_s$  puis d'une inductance parallèle  $L_p$  qui est connectée au transistor. Les calculs donnent  $L_s = 0,79$  nH et  $L_p = 0,71$  nH.

**Solution B, en rouge sur l'abaque.** Le réseau d'adaptation à utiliser dans ce cas est constitué en partant du générateur  $50 \Omega$  d'une inductance parallèle  $L'_p$  puis d'une inductance série  $L'_s$  qui est connectée au transistor. Les calculs donnent  $L'_p = 0,37$  nH et  $L'_s = 0,15$  nH.

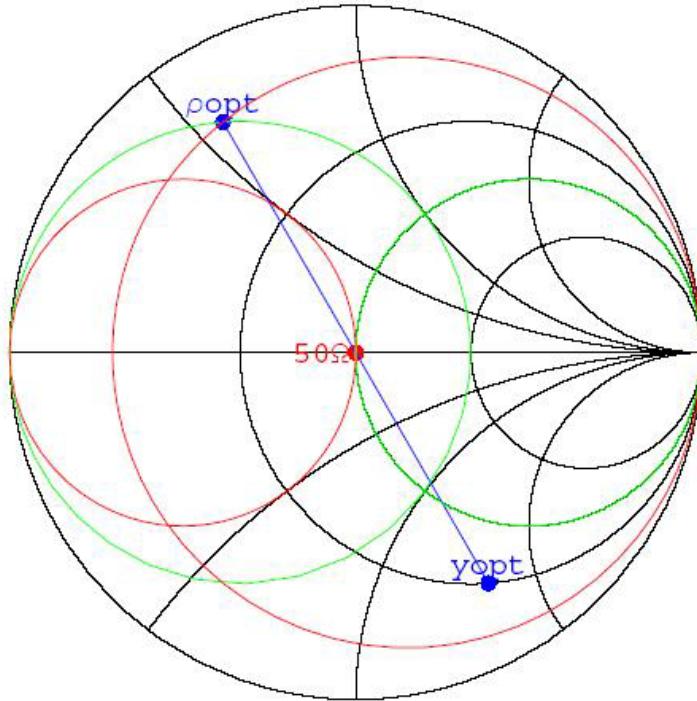


FIG. 1 – Adaptation de l'entrée du transistor à  $50 \Omega$ .

### II.3

Le champ électrique produit par une antenne  $\frac{\lambda}{2}$  est

$$E = \frac{\eta I_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{2\pi D \sin(\theta)}$$

donc

$$I_0 = \frac{2\pi D \sin(\theta) E}{\eta \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}$$

Si on se rappelle que pour  $\theta = 0$  la fonction caractéristique  $f(\theta) = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta}$  vaut 1... alors le calcul est aisé et donne  $I_0 = 16,6 \text{ mA}$ .

Le champ électrique produit par le patch est

$$E = \frac{\rho I_0 f(\theta, \phi)}{D} \Rightarrow I_0 = \frac{ED}{\rho f(\theta, \phi)}$$

et comme si  $\theta = \phi = \frac{\pi}{2}$ ,  $f(\theta, \phi) = 1$ , on a  $I_0 = 9,1 \text{ mA}$ .

## II.4

La figure 1(b) correspond au diagramme de rayonnement du patch.

Le gain du patch est donné par

$$G_p = \frac{4\pi}{\int_S f(\theta, \phi)^2 \sin \theta d\theta d\phi}$$

La difficulté est donc de calculer l'intégrale au dénominateur

$$\mathcal{J} = \int_S f(\theta, \phi)^2 \sin \theta d\theta d\phi = \int_S \sin^3 \theta \sin^4 \phi d\theta d\phi = \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta \int_0^\pi \sin^4 \phi d\phi$$

Soit

$$\mathcal{J} = \left[ -\frac{3}{4} \cos \theta + \frac{\cos 3\theta}{12} \right]_0^\pi \left[ \frac{3\theta}{8} - \frac{\sin 2\theta}{4} + \frac{\sin 4\theta}{32} \right]_0^\pi = \frac{\pi}{2}$$

Donc  $G_p = 8$ , soit 9 dB.

Pour la résistance de rayonnement la même intégrale intervient car

$$R_p = \frac{A_0^2}{I_0^2 \eta} \int_S f(\theta, \phi)^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

avec ici  $A_0^2 = \rho^2 I_0^2$ , donc

$$R_p = \frac{\rho^2}{\eta} \mathcal{J} = 50 \Omega$$

La puissance puissance microonde nécessaire pour produire  $E = 100 \mu\text{V/m}$  est donc  $\mathcal{P} = \frac{1}{2} R_p I_0^2 = 2,07 \text{ mW}$  soit 3,16 dBm.

## II.5

Il faut simplement intégrer le flux du vecteur de Poynting (constant puisque le champ est constant!) sur la surface de la parabole (un disque de diamètre  $d$ ), ce qui donne

$$P_r = \frac{E^2}{2\eta} 4\pi d^2 = \frac{2}{\eta} \pi d^2 E^2$$

La puissance utile est alors

$$P_u = \gamma P_r = \frac{2\gamma}{\eta} \pi d^2 E^2$$

donc

$$d = \frac{1}{E} \sqrt{\frac{\eta P_u}{2\pi\gamma}}$$

L'application numérique donne  $d = 1 \text{ m}$  avec  $P_u = -70 \text{ dBm}$  soit  $10^{-10} \text{ W}$ .

### Problème 23.

Doublets alignés

Considérons deux doublets alignés comme ceux représentés Fig. B.2.9.

- Si les deux antennes sont alimentées en  $O_1$  et  $O_2$  par des courants identiques en module et en phase alors les champs électriques  $\mathcal{E}_1$  et  $\mathcal{E}_2$  qu'ils émettent sont donnés par

$$\mathcal{E}_1 = \frac{A_0}{r_1} \sin\theta \exp(-jkr_1)$$

$$\mathcal{E}_2 = \frac{A_0}{r_2} \sin\theta \exp(-jkr_2)$$

Donner l'expression du facteur d'antenne  $\mathcal{F}$  défini par le rapport entre le champ électrique total  $\mathcal{E}_T$  émis à grande distance par la combinaison des deux doublets et le champ  $\mathcal{E}_1$  émis par le premier doublet seul

$$\mathcal{F} \equiv \mathcal{E}_T / \mathcal{E}_1 = (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2) / \mathcal{E}_1$$

- À présent les deux antennes sont alimentées en  $O_1$  et  $O_2$  par des courants ayant un déphasage  $\phi$ , quel est le nouveau facteur d'antenne  $\mathcal{F}$  de cette antenne réseau?<sup>4</sup> Déterminer alors la valeur de  $\phi$  pour que le maximum d'émission soit dans la direction  $\theta_0$ .

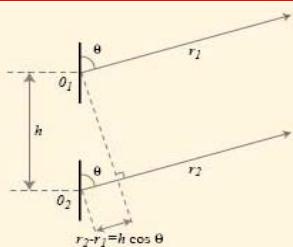


FIG. B.2.9 – Antenne réseau à deux doublets verticaux alignés.

<sup>4</sup>Attention, l'hypothèse  $\phi \neq 0$  modifie les phases des champs  $\mathcal{E}_1$  et  $\mathcal{E}_2$  précédents

### Corrigé du problème 23

$$1/ \quad \mathcal{F} = 2 \exp\left(-j \frac{kh \cos\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{kh \cos\theta}{2}\right)$$

2/  $\mathcal{F} = 2 \exp\left(-j \frac{\phi}{2}\right) \exp\left(-j \frac{kh \cos\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{kh \cos\theta \neq \phi}{2}\right)$ . La dépendance en angle *totale* du doublet est donc  $f(\theta) = \sin\theta \cos\left(\frac{kh \cos\theta + \phi}{2}\right)$ ... et il faut résoudre  $\frac{\partial f}{\partial \theta} = 0$ ... ce qui ne se fait pas analytiquement. Quoique le problème posé soit intéressant en pratique il n'est pas soluble ici analytiquement. Donner la solution numérique en traçant la variation de cette dérivée en fonction de l'angle théta.

### Problème 24.

Micro-robot mobile

Un micro-robot mobile communique avec sa base de contrôle à la fréquence  $f = 60$  GHz.

1. Pour ce projet, on vous laisse tout loisir de choisir l'antenne pour le micro-robot, quelles sont les caractéristiques que vous choisissez pour cette antenne ? Parmi les antennes que vous connaissez lesquelles conviendraient et lesquelles ne conviendraient pas ?
2. En réalité, l'antenne utilisée a la fonction caractéristique  $f(\theta, \phi) = \sin^2 \theta$ , avec  $0 \leq \theta \leq \pi$  et  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ . Quel est le gain de cette antenne en dB ?<sup>1</sup>
3. En supposant que cette antenne est sans pertes ohmiques (elle ne dissipe donc l'énergie que sous forme de rayonnement), et que sa résistance au rayonnement est  $R = 62 \Omega$ , quel champ électrique maximal produit-elle à une distance  $d = 2$  m si elle est alimentée par un courant crête d'intensité  $I_0 = 1$  mA ?

À  $f = 25$  GHz, un transistor a pour matrice  $[S]$

$$\begin{pmatrix} 0,86\angle -90^\circ & 0,03\angle 90^\circ \\ 3\angle 230^\circ & 0,8\angle -160^\circ \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad \det[S] = 0,767\angle 113^\circ$$

1. Ce transistor est-il stable ? S'il y a lieu donner son gain maximal.

---

<sup>1</sup>Une table de primitives est donnée en Annexe.

2. Ce transistor est le premier étage d'un amplificateur faible bruit alimenté par une antenne  $\lambda/2$  dont l'épaisseur du brin est  $d = \lambda/50$ .
  - Calculer l'impédance de l'antenne correspondante grâce à l'Eq. (1)

$$Z_e = \left( 73,2 - \frac{5400}{R_c} \right) + j \left( 42,5 - \frac{9700}{R_c} \right), \quad \text{avec} \quad R_c = 120 \left[ \ln \left( \frac{\lambda}{d} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

- Adapter l'antenne au transistor avec des éléments localisés en présentant à celui-ci un coefficient de réflexion de  $\rho_1 = 0,8\angle 100^\circ$

## Annexe

$$\begin{aligned} \int \sin(x) dx &= -\cos(x) & \int \sin(x)^2 dx &= \frac{x}{2} - \frac{\sin(2x)}{4} \\ \int \sin(x)^3 dx &= -\frac{3\cos(x)}{4} + \frac{\cos(3x)}{12} & \int \sin(x)^4 dx &= \frac{3x}{8} - \frac{\sin(2x)}{4} + \frac{\sin(4x)}{32} \\ \int \sin(x)^5 dx &= -\frac{5\cos(x)}{8} + \frac{5\cos(3x)}{48} - \frac{\cos(5x)}{80} & \int \sin(x)^6 dx &= \frac{5x}{16} - \frac{15\sin(2x)}{64} + \frac{3\sin(4x)}{64} - \frac{\sin(6x)}{192} \end{aligned}$$

## Corrigé du problème 24

## 1.1

Il faut une antenne peu directionnelle car on ne connaît pas *a priori* la position du robot. Si on imagine que le robot se déplace dans un plan contenant sa station de commande une antenne  $\lambda/2$  ou un dipôle conviendrait bien car ils ont des diagrammes de rayonnement avec une symétrie de révolution et un maximum d'émission qui pourrait donc être dans un plan. Par contre une grande antenne filaire ou une parabole ne conviennent pas car leurs diagrammes de rayonnement sont soit hors du plan normal à l'antenne, soit à lobe très étroit.

## 1.2

De façon générale, le champ émis par notre antenne est

$$E = \frac{A_0}{r} f(\theta, \phi), \quad \text{avec} \quad f(\theta, \phi) = \sin^2 \theta$$

on sait aussi que le gain  $g$  est

$$g = \frac{4\pi}{\mathcal{J}}, \quad \text{avec} \quad \mathcal{J} = \int_S f^2(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi$$

Il faut donc ici calculer l'intégrale

$$\mathcal{J} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^5 \theta \, d\theta \, d\phi = 2\pi \left[ -\frac{5 \cos(x)}{8} + \frac{5 \cos(3x)}{48} - \frac{\cos(5x)}{80} \right]_0^\pi \approx 6,70$$

d'où le gain  $g \approx 1,88$  soit  $g \approx 2,73$  dB.

## 1.3

Pour une telle antenne on sait que

$$g = \frac{4\pi A_0^2}{RI_0^2 \eta}$$

donc

$$A_0^2 = \frac{\eta g R I_0^2}{4\pi}, \quad \text{soit} \quad E = \frac{A_0}{d} \sin \theta, \quad \text{et donc} \quad E_{max} = \frac{A_0}{d} = \frac{I_0}{d} \sqrt{\frac{\eta g R}{4\pi}} \approx 0,030 \text{ V/m}$$

## 2.1

Cela se traite en calculant le facteur de stabilité de Rollet  $K$ . On a

$$K = \frac{1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 |S_{12}| |S_{21}|}.$$

Si  $K > 1$  et comme  $|\Delta| < 1$  ici, alors on sait que

$$G_{max} = \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} \left| K - \sqrt{K^2 - 1} \right|.$$

Ici on obtient  $K = 1,16$  et le transistor est donc *inconditionnellement stable*, alors  $G_{max} = 57,2$  soit  $G_{max} = 17,6$  dB.

## 2.2

On calcule aisément l'impédance de l'antenne correspondante

$$Z_e = (57,75 + j14,74) \Omega, \text{ soit en impédance réduite } z_e = 1,16 + j0,30$$

On positionne alors le point sur l'abaque ( $\rho_e = 0,15 \angle 54,5^\circ$ ) et on applique la méthode décrite dans le polycopié (cf Fig. 1). Deux chemins sont possibles dans l'abaque de Smith, ils donnent tous deux comme solution deux selfs, l'une en série l'autre en parallèle. Les solutions sont en remontant les coefficients de réflexion

### 1. Par le chemin bleu

- de  $\rho_e$  au croisement une self série de 0,46 nH
- du croisement à  $\rho_1$  une self parallèle de 0,42 nH

### 2. Par le chemin rouge

- de  $\rho_e$  au croisement une self parallèle de 0,19 nH
- du croisement à  $\rho_1$  une self série de 0,12 nH

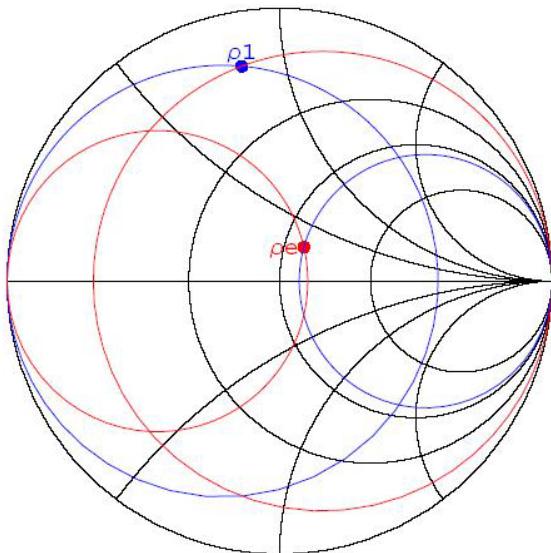


FIG. 1 – Adaptation de l'entrée du transistor ( $\rho_1$ ) à l'antenne ( $\rho_e$ ).

### **Référence Bibliographique**

[1] Guy PUJOLLE. *Cours Réseaux et Télécoms. Avec exercices corrigés.* Editions Eyrolles. 2004. 548 Pages.