

Réseaux 6^e édition

Andrew Tanenbaum, Nick Feamster, David Wetherall

Corrigés des exercices

Chapitre 2 : La couche physique

ISBN : 978-2-3260-0239-5

1. Une route à sens unique ou une rivière sont des systèmes simplex. En revanche, dans un oléoduc, le fluide peut circuler dans les deux sens, mais pas en même temps. C'est donc un système semi-duplex comme une communication de type talkie-walkie, où l'un parle pendant que l'autre écoute, et inversement.
2. La fibre optique présente de nombreux avantages sur le cuivre. Elle offre une bande passante bien plus large. Elle n'est pas affectée par les surtensions ou les microcoupures électriques, ni par les interférences électromagnétiques et les actions corrosives de l'air ambiant. Ne présentant pas de perte de lumière en ligne, elle est quasi impossible à « écouter ». Fine et légère, elle est de plus en plus présente dans de nombreuses installations. La fibre présente toutefois certains inconvénients. L'interface optique est plus coûteuse que l'électrique. La fibre est fragile, ne supporte pas les torsions, les pliures et les courbes. Les communications optiques sont unidirectionnelles. Aussi, pour transmettre dans les deux sens il faut : soit utiliser deux fibres, soit deux bandes de fréquences, si l'on n'utilise qu'une seule fibre.
3. En utilisant la formule $\Delta f = c\Delta\lambda/\lambda^2$ avec $\Delta\lambda = 10^{-7}$ m et $\lambda = 10^{-6}$ m, on obtient une bande passante (Δf) de 30 000 GHz.
4. Le débit binaire est de : $2\,560 \times 1\,600 \times 24 \times 60$ bit/s, soit 5 898 Mbit/s. Pour simplifier, considérons que 1 bit/s est égal à 1 Hz. De l'équation (2 – 3), on obtient $\Delta\lambda = \lambda^2\Delta f/c$. Avec $\Delta f = 5,898 \times 10^9$ Hz et $\Delta\lambda = 3,3 \times 10^{-5}$ micron, on constate que la largeur de bande requise est extrêmement faible.
5. Il a été précisé que les trois bandes avaient une plage de fréquences quasiment égales. D'après la formule, la fréquence $f = c/\lambda$. Pour une plage de longueurs d'onde entre λ et $\lambda + x$, $f_{basse} = c/(\lambda + x)$ et $f_{haute} = c/\lambda$. Pour la même valeur de x , la plage sera plus large si λ est plus petite. C'est pourquoi la plage de longueurs d'onde de gauche est plus petite bien que les trois plages de fréquences sont quasiment de même taille.
6. Ce serait une découverte scientifique majeure. Les électrons sont sensibles aux champs électromagnétiques, mais les photons interagissent difficilement. En supposant qu'il existe des ordinateurs fonctionnant ainsi, cela ne changerait rien au débit de données maximal que détermine la théorie de l'information. Néanmoins, on s'épargne les conversions de signal entre optique et électrique, ce qui permet d'accéder à des débits supérieurs avec les mêmes fibres optiques.
7. Considérons la formule $\lambda f = c$. On sait que c vaut 3×10^8 m/s. Par application de la formule, on obtient $\lambda = 1$ cm pour une fréquence de 30 GHz et $\lambda = 5$ m pour 60 MHz. Les plages de fréquences couvertes par les antennes s'échelonnent donc de 60 MHz à 30 GHz.
8. À 1 GHz, la longueur d'onde est de 30 cm. Si une des deux ondes prend 15 cm d'avance, elles vont arriver déphasées. Le fait que la liaison mesure 100 km n'a aucun effet.

9. Si le faisceau laser est dévié de 1 mm à l'extrémité, il ne frappe plus le photodétecteur. Cela correspond à un triangle rectangle de 100 m de base et 1 mm de hauteur. La tangente de l'angle α correspondant est $\text{tg } \alpha = 1 \times 10^{-5}$, ce qui correspond à un angle α de 0,00057 degré.
10. $a_n = \frac{-1}{\pi n}, b_n = 0, c = 1$
11. Le théorème de Shannon prévoit un débit maximal de $5 \times \log_2(1 + 10000) \approx 66,44$ Gbit/s. Selon le théorème de Nyquist, le plafond est de $2 \times 5 \log_2(2) = 10$ Gbit/s qui est donc la limite. Elle est inférieure selon Nyquist parce que le signal est binaire. Dans un canal avec un rapport signal/bruit de 40 dB, on peut augmenter le débit en utilisant un plus grand nombre de niveaux.
12. Un canal sans bruit peut véhiculer un volume d'information sans limite, quelle que soit la fréquence d'échantillonnage. Il suffit d'envoyer le volume de données requis pour chaque échantillon. Dans le cas du canal à 3 kHz, avec 6000 échantillons par seconde sur 16 bits, le canal peut transmettre 96 kbit/s. Avec des échantillons de 1024 bits, il peut transmettre 8,2 Mbit/s. Le fait essentiel est l'absence de bruit. Dans le cas d'un canal réel, bruité, à 3 kHz, la limite de Shannon ne le permet pas. Un rapport signal/bruit de 30 dB signifie un ratio S/N de 1000. Avec $B = 3000$, nous pouvons atteindre un débit d'environ 29,895 kbit/s.
13. Le théorème de Nyquist est une propriété mathématique qui n'a strictement rien à voir avec une quelconque technologie. Il s'applique indifféremment à tout type de média. Elle stipule qu'en échantillonnant à deux fois la plus haute fréquence à capturer, il n'y a aucune perte d'information, ce qui reste vrai quel que soit le média.
14. Selon le théorème de Nyquist, nous pouvons échantillonner 12 millions fois par seconde. Avec un signal à quatre niveaux, nous disposons de 2 bits par échantillon et d'un débit de 24 Mbit/s.
15. Un rapport signal/bruit de 20 dB équivaut à $S/N = 100$. Puisque $\log_2 101$ vaut environ 6,658, la limite de Shannon est d'environ 19,975 kbit/s. La limite de Nyquist est de 6 kbit/s pour un signal binaire (1 bit par symbole). C'est cette limite de Nyquist qui fait plafonner la capacité du canal à 6 kbit/s.
16. Pour chaque groupe de quatre bits de données, on envoie cinq bits. Le canal transporte 80 millions de bits par seconde, ce qui correspond à un débit de 40 MHz.
17. Puisque seule la distance de l'origine change, on utilise la modulation ASK.
18. Oui. Le QAM-16 exploite 16 symboles différents, chacun d'eux pouvant être affecté à une séquence de bits. On peut envoyer 4 bits par symbole. Si on utilise certains symboles pour le contrôle, il en reste moins pour les séquences de bits.
19. En codage NRZ, le signal varie de façon cyclique tous les 2 bits (cas d'une alternance de 1 et de 0). Ainsi, la bande passante minimale pour obtenir un débit de B bit/s est égale à $B/2$ Hz. En codage Manchester, le signal varie à chaque bit. Il faut donc B Hz pour transmettre B bit/s.
20. Dans le codage 4B/5B qui est associé au codage NRZI, il y a une transition de signal à chaque fois qu'un 1 est transmis. En outre, la table de correspondance 4B/5B (voir figure 2.21) montre qu'il n'y a pas plus de deux 0 consécutifs. Il apparaît dès lors qu'une transition de signal a lieu au moins tous les quatre temps bit. Par exemple, la séquence de bits 10001 serait transmise avec une transition de signal au 4^e bit.
21. Puisque quatre valeurs sont possibles par baud, le débit en bits est le double du débit en baud. Avec un débit de 1200 baud, le débit de données s'élève à 2400 bit/s.
22. Deux, une en sens montant et une en sens descendant. La modulation concerne l'amplitude et la phase. Il n'y a pas modulation de la fréquence.
23. Il y a 10 signaux à 4000 Hz. Nous avons donc besoin de neuf garde-bande pour éviter toute interférence. La largeur de bande minimale est de $4000 \times 10 + 400 \times 9 = 43\,600$ Hz.
24. On obtient le résultat tout d'abord en passant les séquences de chips des stations A, B et C en négatif (bit 0 à transmettre) puis en additionnant les trois séquences. Cela donne (+3 +1 +1 -1 -3 -1 -1 +1).

25. Par définition

$$S \bullet T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i$$

Si T envoie un bit à 0 au lieu de 1, sa séquence de chip est inversée, le i-ème élément devenant $-T_i$. En conséquence,

$$S \bullet T \equiv \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i (-T_i) = -\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i T_i = 0.$$

26. Lorsque deux séquences correspondent, leur produit est égal à +1. Il est égal à -1 dans le cas contraire. Pour que la somme des séquences soit égale à 0 et, donc, présente la propriété d'orthogonalité, il faut qu'il y ait autant de séquences identiques que de différentes.

27. Il faut calculer les quatre produits normalisés suivants :

$$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \bullet (-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1)/8 = 1$$

$$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \bullet (-1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1)/8 = -1$$

$$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \bullet (-1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1)/8 = 0$$

$$(-1 +1 -3 +1 -1 -3 +1 +1) \bullet (-1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 -1)/8 = 1$$

Il en résulte que : A et D émettent chacune un bit à 1, B émet un bit à 0 et C est passive.

28. Voici les séquences de chips :

(+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1)

(+1 -1 +1 -1 +1 -1 +1 -1)

(+1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 -1)

(+1 -1 -1 +1 +1 -1 -1 +1)

29. Un produit normalisé interne de 1/4 signifie que le produit interne est égal à $128/4 = 32$. Chaque paire de chips peut être égale ou pas. Le nombre de paires égales E moins celui de paires inégales U doit donner 32 : $E - U = 32$. Nous savons que $E + U = 128$ donc $U = 128 - E$. En remplaçant $128 - E$ par U, nous obtenons $E - (128 - E) = 32$ donc $E = 80$. La probabilité de $E = 80$ s'élève à

$$\frac{\binom{128}{80}}{2^{128}} \approx 0,0013$$

La probabilité d'un produit interne normalisé de 1/4 ou plus est égale à

$$\sum_{i=80}^{128} \frac{\binom{128}{i}}{2^{128}} \approx 0,003$$

La notation $\binom{x}{y}$ est celle d'un coefficient binomial.

30. Oui, ils peuvent l'être. Un réseau comportant des topologies locales en étoile ne doit pas nécessairement être totalement hiérarchique. La dorsale du réseau peut adopter le modèle de commutation distribuée de Baran.

31. Le système de numérotation du réseau téléphonique (RTC) français comprend 10 chiffres (5 groupes de 2 chiffres). Les deux premiers chiffres du RTC de France Télécom sont 01, 02, 03, 04 et 05. Ces derniers délimitent cinq régions. Les quatre autres groupes de deux chiffres peuvent théoriquement être compris entre 00 et 99 (soit 100 numéros). Le nombre maximum (théorique) de numéros de téléphone peut être alors de $5 \times 100 \times 100 \times 100 \times 100$, soit 5×10^8 numéros. En réalité, le réseau est organisé de façon très hiérarchique et chaque groupe délimite à nouveau une sous-région, une sous-sous-région, etc., à tel point que ce nombre théorique ne peut être atteint. En outre, ce nombre augmente lorsque l'on tient compte des téléphones mobiles (06 et 07), des numéros spéciaux (08), de téléphones par l'internet *via* des box (09), des codes des opérateurs alternatifs dont les chiffres du premier groupe sont 2x, 4x, 7x, 9x, etc.

32. Chaque téléphone effectue en moyenne 0,5 appel/heure de 6 min. Un téléphone occupe un circuit pendant en moyenne 3 min par heure. Vingt téléphones peuvent ainsi se partager un circuit ; en supposant une charge de 100 % (ce qui correspond à $\rho = 1$ en terme de file d'attente), cela entraîne un très long temps d'attente. Comme 10 % des appels sont des appels à longue distance, cela conduit à ce que 200 téléphones occupent en permanence un circuit longue distance. Une artère interurbaine qui compte de l'ordre de 250 circuits multiplexés (avec 200 téléphones par circuit) peut acheminer ainsi le trafic de $200 \times 250 = 50\,000$ téléphones. Soutenir un tel trafic conduirait à l'allongement important du temps d'attente. Par exemple, si 5 000 abonnés (soit 10 % des 50 000) décidaient de faire un appel à longue distance simultanément avec un temps moyen d'appel de 3 min, le temps d'attente atteindrait alors 57 min. Cela se traduirait par un fort mécontentement des abonnés.
33. La section de chaque fil d'un câble à paires torsadées est de $\pi/4 \text{ mm}^2$. Une boucle locale de 10 km de long comprenant deux fils par paire représente un volume de $2\pi/4 \times 10 - 2 \text{ m}^3$, volume de l'ordre de $15,708 \text{ cm}^3$. Avec une densité de cuivre de 9 g/cm^3 , cela représente un poids de 141 kg. La société de téléphonie, qui compte 10 millions d'abonnés, possède $1,4 \times 10^9 \text{ kg}$ de cuivre. Cela représente, à 6 € le kilo de cuivre, 8,4 milliards d'euros.
34. 32 symboles permettent de coder 5 bits. A 4800 baud, on obtient $5 \times 4800 = 24\,000 \text{ bit/s}$.
35. Généralement, les bits sont transmis sur une ligne sans mise en place de correction d'erreur au niveau physique. La présence d'un microprocesseur dans chaque modem rend possible la mise en place d'une correction d'erreur au niveau physique, afin de réduire le taux d'erreur effectif au niveau liaison. Cette correction d'erreur au sein du modem est transparente au niveau liaison. La plupart des modems actuels pratiquent cette correction au niveau physique. Certes, cela pour effet de réduire notablement le nombre d'erreurs au niveau liaison, mais cela n'élimine toutefois pas la nécessité du contrôle et de la correction des erreurs dans la couche 2, car il s'agit d'erreurs d'autre nature.
36. Sur 256 canaux au départ, nous en réservons 6 pour la téléphonie et 2 pour le contrôle, ce qui en laisse 248 pour les données. Si 3/4 sont dédiés au flux descendant, cela correspond à 186 canaux. La modulation ADSL est à 4000 baud, avec QAM-64 (6 bits/baud), nous disposons de 24 000 bit/s pour chacun des 186 canaux. La bande passante descendante totale est donc égale à 4,464 Mbit/s.
37. Une période d'échantillonnage de $125 \mu\text{s}$ correspond à 8 000 échantillons par seconde. En relation avec le théorème de Nyquist, cela correspond à la vitesse d'échantillonnage optimale d'un signal de fréquence 4 000 Hz. Cela équivaut *grosso modo* à la fréquence maximale du réseau téléphonique. (En réalité, cette fréquence maximale se situe plutôt autour de 3 200 Hz. Toutefois, comme la fréquence de coupure n'est pas aussi franche, 4 000 Hz est un choix optimal.)
38. Pour émettre un signal T1, il nous faut $H \log_2(1 + S/N) = 1,544 \times 10^6$ avec $H = 1\,000\,000$. Il en résulte $S/N = 2^{1,544} - 1$, soit environ 2,82 dB.
39. Dans les deux cas, un échantillonnage à 8 000 échantillons par seconde est possible. Dans le premier cas, avec 2 bits par échantillon, on obtient un débit de 16 kbit/s. Dans le second, sur une ligne T1, 7 bits sont transmis par échantillon, ce qui donne un débit de 56 kbit/s.
40. 10 trames. La probabilité d'apparition de la séquence 0101010101 (sur un canal numérique) est de $1/1\,024$.
41. L'utilisateur d'une ligne T1 dispose de $8 \times 24 = 192$ bits parmi les 193 bits que compte la trame (les anciens T1 n'utilisaient que 7 bits pour les données). Le surdébit (overhead) est de $1/193$, soit 0,5 %. À la figure 2.41, on voit que, pour une ligne OC-1, le surdébit atteint : $(51,84 - 49,536)/51,84 = 3,63 \%$ et, pour une ligne OC-768, il atteint : $(39\,813,12 - 38\,043,648)/39\,813,12 = 4,44 \%$.
42. Un taux de glissement de 10^{-9} signifie 1 s sur 10^9 s, ou 1 ns sur 1 s. Sur un lien OC-1 à 50 Mbit/s, un bit dure environ 20 ns. Cela signifie qu'avec le taux de glissement annoncé, le décalage d'un bit survient toutes les 20 secondes. En conséquence, les horloges doivent être synchronisées régulièrement, par exemple toutes les 10 secondes.

43. Sur les 90 colonnes de la trame SONET, 86 sont dédiées aux données utilisateur d'un lien OC-1. Ce qui correspond à une capacité de : $86 \times 9 = 774$ octets par trame. Et, avec 8 000 trames par seconde et 3 liens OC-1 multiplexés dans OC-3, on obtient une capacité totale de : $3 \times 774 \times 8 \times 8\,000 = 148,608$ Mbit/s.
- Pour une ligne OC-3072 on obtient :
- Débit brut : $51,84 \times 3\,072 = 159\,252,48$ Mbit/s
- Débit conteneur (SPE) : $50,112 \times 3\,072 = 153\,944,064$ Mbit/s
- Débit utilisateur : $49,536 \times 3\,072 = 152\,174,592$ Mbit/s
44. VT1.5 fournit 8 000 trames par seconde \times 3 colonnes \times 9 lignes \times 8 bits = 1,728 Mbit/s. Typiquement, on peut l'utiliser pour un service DS-1 (lien T1). VT2 fournit 8 000 trames par seconde \times 4 colonnes \times 9 lignes \times 8 bits = 2,304 Mbit/s. Typiquement, on peut l'utiliser pour un lien CEPT-1 ou E1. VT6 fournit 8 000 trames par seconde \times 12 colonnes \times 9 lignes \times 8 bits = 6,912 Mbit/s. Typiquement, on peut l'utiliser pour un service DS-2 (lien T2).
36. Une trame OC-12c compte $12 \times 90 = 1\,080$ colonnes de 9 lignes. Parmi ces colonnes, $12 \times 3 = 36$ sont utilisées par les surdébits de lignes (LOH) et de section (SOH). Il reste alors un conteneur de données (SPE) de 1 044 colonnes. Le SPE contient lui-même une colonne de surdébit de conduit (POH), il reste alors 1 043 colonnes pour les données utilisateur. Comme chaque colonne contient 8 bits (insérés dans 9 lignes), un lien OC-12c contient 75 096 bits utilisateur. Et avec 8 000 échantillons par seconde, le débit utilisateur sur un lien OC-12c est de 600,768 Mbit/s.
46. Un codec accepte n'importe quel signal analogique en entrée et génère, en sortie, le signal numérique qui en découle. Un démodulateur n'accepte et ne traite qu'un signal sinusoïdal modulé et génère, en sortie, un signal numérique qui est le reflet de la modulation.
47. Les trois réseaux présentent les propriétés suivantes :
- l'étoile : le plus faible = 2, le cas moyen = 2, le plus long = 2 ;
- l'anneau : le plus faible = 1, le cas moyen = $n/4$, le plus long = $n/2$;
- le réseau à interconnexion totale : le plus faible = 1, le cas moyen = 1, le plus long = 1.
48. En commutation de circuit, à $t = s$ secondes, le circuit est établi ; à $t = s + x/b$, le dernier bit à transmettre est envoyé ; à $t = s + x/b + kd$, le message arrive à destination. En commutation de paquets, le dernier bit est transmis à $t = x/b$ (en considérant qu'on est en mode non connecté). Pour atteindre sa destination finale, le dernier paquet doit être retransmis par $(k - 1)$ routeurs. Chaque retransmission nécessitant p/b secondes, le délai de transmission du dernier paquet est de $x/b + (k - 1)p/b + kd$. La commutation de paquet est plus rapide si $s > (k - 1)p/b$. De cette analyse, il apparaît en outre que la commutation de paquet est préférable notamment du point de vue de la tolérance aux pannes en cas de défaillance d'un commutateur.
49. Le nombre total de paquets est de x/p , d'où un trafic global (en-tête + données) égal à $(p + h)x/p$ bits. La source demande $(p + h)x/pb$ secondes pour transmettre ces bits. Les retransmissions du dernier paquet par les routeurs intermédiaires prennent au total $(k - 1)(p + h)/b$ secondes. En additionnant le temps mis par la source pour transmettre les bits avec le temps mis par les routeurs pour acheminer le dernier paquet à destination, on obtient un total de $((p + h)x/p) + ((k - 1)(p + h)/b)$ secondes. En minimisant cette équation relativement à p , on obtient $p = \sqrt{hx/(k - 1)}$.
50. Une cellule hexagonale compte six cellules voisines. Si la cellule centrale utilise les fréquences du groupe A, les cellules voisines peuvent employer les fréquences des groupes B, C, B, C, B et C respectivement. On utilise ainsi 3 cellules élémentaires que l'on peut dupliquer. En conséquence, dans ce schéma, chaque cellule élémentaire dispose de 280 fréquences.

51. Il faut savoir qu'au début des réseaux cellulaires les cellules n'étaient déployées que dans des régions à forte densité de population ou de véhicules. La mobilité (le transfert) intercellulaire n'était pas toujours assurée à l'origine. Aujourd'hui, la taille et la forme des cellules varient beaucoup. Les antennes radio (le plus souvent omnidirectionnelles) sont en général placées sur un point élevé ; en haut d'un immeuble, sur une colline ou un pic montagneux. En étroite relation avec la position de l'antenne émettrice, la zone couverte est plus ou moins régulière, surtout lorsqu'il y a des obstacles dans le champ du rayonnement de l'émetteur. Lorsqu'il y a de nombreux obstacles ou que les antennes doivent être déplacées, pour cause de nouvelles constructions par exemple, ce sont le plus souvent des antennes directionnelles qui sont installées. L'antenne n'est donc plus forcément au centre de la cellule. Lorsque les cellules sont de forme régulière et de même taille, une même bande de fréquences n'apparaît que toutes les deux cellules, ce qui garantit une séparation efficace et une faible interférence. Dans le cas où les cellules sont de forme et de taille irrégulières, l'allocation des fréquences est variable. Elle dépend étroitement de la largeur de la cellule intermédiaire. Cela rend alors cette allocation bien plus complexe et difficile.
52. Si l'on considère que le diamètre d'une microcellule est de 100 m, chaque cellule couvre une zone de 2500π m². Pour couvrir une ville de 120 km², il faut environ 15 280 microcellules. Ce chiffre est théorique, il ne tient pas compte des obstacles ou des zones d'ombre. En réalité, il faudrait plutôt 20 000 microcellules pour assurer la couverture de cette ville.
53. Les plages de fréquences sont différentes entre deux cellules adjacentes. Lorsqu'un utilisateur, en communication sur une certaine fréquence, passe dans une nouvelle cellule, son téléphone portable doit changer la fréquence sur laquelle la communication se poursuivra. Cette fréquence est l'une de celles disponibles dans la nouvelle cellule. Toutefois, il se peut que dans la nouvelle cellule, il n'y ait plus une fréquence de disponible lors de l'arrivée de l'utilisateur en mobilité. Sa communication est alors interrompue brutalement.
54. Si on ignore la compression de la parole, le débit sur une ligne téléphonique numérisée est de 64 kbit/s. Si l'on divise 10 Gbit/s par 64 kbit/s, on obtient 156 250 habitations par câble. En réalité, les systèmes courants n'alimentent guère qu'une centaine d'habitations par câble.
55. Les deux. Chacun des 100 canaux dispose de sa propre bande de fréquence (FDM), et les deux flux logiques sont mixés sur chaque canal par TDM (bien que ce ne soit pas un bon exemple d'utilisation de TDM parce que l'alternance est irrégulière).
56. Un câble offrant une bande passante avec un débit descendant de 100 Mbit/s et garantissant à chaque habitation un débit de 2 Mbit/s peut raccorder au maximum 50 habitations. Pour offrir un débit de 2 Mbit/s à 5 000 habitations, il faut donc installer 100 câbles coaxiaux et les connecter dans un centre de distribution sur une fibre optique. C'est une solution de type HFC.
57. OLD50 La bande passante du canal montant est de 37 MHz (de 5 à 42 MHz). En utilisant une technique de modulation QPSK avec 2 bit/Hz, on obtient un débit montant de 74 Mbit/s. Sur le canal descendant, la bande passante est de 200 MHz. En utilisant une technique QAM-64, on obtient 1 200 Mbit/s. On atteint 1 600 Mbit/s en utilisant la technique QAM-256.
58. Théoriquement, il pourrait disposer du débit global du câble. En réalité, le débit dont il dispose correspond au plus faible de deux débits possibles : celui, global, du câble ou celui de l'interface entre l'ordinateur et le modem-câble. Par exemple, si le débit global sur le câble est de 27 Mbit/s, le débit de l'utilisateur selon l'interface de son ordinateur est :
- 10 Mbit/s pour une interface Ethernet à 10 Mbit/s ;
 - 27 Mbit/s pour une interface Ethernet à 100 Mbit/s ;
 - 27 Mbit/s pour une interface sans fil à 54 Mbit/s.
- Dans la plupart des cas, les câblo-opérateurs ne proposent qu'une interface Ethernet à 10 Mbit/s afin d'éviter qu'un utilisateur n'accapare toute la bande passante disponible.
59. Soixante-six satellites répartis en 6 anneaux correspondent à 11 satellites par anneau. Ainsi, toutes les 90 minutes, 11 satellites passent au-dessus d'une station terrestre fixe. Cela conduit à un temps de transit entre deux satellites de 491 secondes, ce qui correspond à une durée moyenne de transfert intercellulaire, pour une station terrestre fixe, de 8 minutes et 11 secondes.
60. Le satellite se déplace du zénith vers l'horizon au sud, avec une excursion maximale par rapport à la verticale de 2θ . L'aller-retour entre les deux positions prend 24 heures.

61. Temps de transit de bout en bout est égal à $2 \times (\text{altitude}/\text{vitesse de la lumière})$. La vitesse de la lumière dans l'air étant de 300 000 km/s, le temps de transit d'un paquet pour un satellite GEO est de 239 ms, de 120 ms pour un MEO et de 5 ms pour un LEO.
62. L'appel part du pôle Nord, monte vers le satellite qui se trouve au-dessus du pôle, puis transite par quatre autres satellites pour enfin atteindre le satellite au-dessus du pôle Sud et descendre. La distance totale parcourue est égale à : $2 \times 750 + 0,5 \times \text{circonférence à l'altitude de 750 km}$. La circonférence à l'altitude de 750 km est : $2 \times \pi \times (6\,371 + 750) = 44\,720$ km. La distance totale parcourue est alors de 23 860 km. Le temps pour parcourir cette distance est : $23\,860/300\,000 = 79,5$ ms. En outre, il faut ajouter le temps de commutation de 6 satellites, soit 60 μ s. Ainsi, la latence totale d'un appel du pôle Nord au pôle Sud est de 79,56 ms.
63. La liaison à faible débit (1 Mbit/s) est le goulet d'étranglement du système. Le temps requis pour transmettre 1 Go à 1 Mbit/s est égal à 1024×8 secondes. Le temps de latence dans un sens est de : $4 \times (35\,800/300\,000) = 480$ ms. Le temps de transmission total est de : $1,2 + 1024 \times 8 + 0,48 = 8193,68$ s.
64. La liaison à faible débit (1 Mbit/s) est toujours le goulet d'étranglement du système. Dans un fichier de 1 Go, il y a 16 paquets de 64 Ko. On ajoute donc $16 \times 32 = 512$ octets d'en-tête. Le temps de transmission s'élève donc à $1024,5 \times 8$ secondes. La latence dans un sens s'obtient en additionnant le délai de propagation de $4 \times (35800 / 300000) = 480$ msec et y ajoutant trois délais de commutation de 0,01 ms pour les commutateurs. Le temps total est donc égal à $1024,5 \times 8 + 0,48 + 3 \times 0,00001 = 8196,48003$ secondes.
65. Exercice pratique. Appréciation entre collègues ou par un enseignant.
66. Exercice pratique. Appréciation entre collègues ou par un enseignant.