

# MIF05 Réseaux

Contrôle terminal - 2024-2025

Durée : 1h30 minutes

Aucun document autorisé - Calculatrice (non sur téléphone) et règle autorisées

L'énoncé comprend deux parties : un énoncé sur la partie de Florent Dupont et un énoncé sur la partie d'Isabelle Guérin Lassous. Vous répondrez directement sur les énoncés qui seront rendus dans une copie d'examen. Le numéro d'anonymat de la copie d'examen sera reporté sur les énoncés.

**Numéro d'anonymat (à reporter de la copie d'examen) :**  
**Il ne s'agit pas de votre numéro étudiant !**

Barème :

Partie F. Dupont			Partie I. Guérin Lassous		
7 pts			13 pts		
Exo1	Exo 2	Exo3	Exo1	Exo2	Exo3
1 pt	3,5 pts	2,5 pts	4 pts	5 pts	4 pts

## Partie I. Guérin Lassous

### Exercice 1 - Étude des délais dans les communications spatiales

La sonde spatiale DART a été utilisée pour dévier la trajectoire d'un astéroïde. La communication entre la sonde DART et la Terre a été assurée grâce au réseau DSN (Deep Space Network) permettant les communications spatiales entre des antennes sur Terre et des sondes spatiales. Supposons que la communication avec la sonde DART soit réalisée avec une des antennes terrestre du réseau DSN notée A et que la distance entre A et la sonde DART est notée  $d$ . On suppose que le signal généré pour communiquer se déplace à la vitesse de la lumière notée  $v$  et égale à  $3.10^8$  m/s.

**Questions :**

1. La sonde DART repose sur un mode de navigation qui n'est pas complètement autonome et ajuste sa trajectoire à partir de messages envoyés de l'antenne terrestre A. Quel est le délai de propagation de ces messages si la distance  $d$  entre l'antenne A et la sonde DART est de 10 millions de km ? Vous donnerez l'expression littérale du délai de propagation et sa valeur numérique en secondes avec une précision de 2 chiffres après la virgule.

$$\text{délai propagation} = \frac{d}{v} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = \frac{10^{10}}{3 \cdot 10^8} = 33,33 \text{ s}$$

La capacité d'émission des liens de communication dépend de la taille des antennes (qui sont différentes entre l'antenne sur Terre et l'antenne embarquée sur la sonde DART) et de la distance entre l'antenne terrestre A et la sonde DART. Dans cet exercice, on supposera que la capacité d'émission du lien de communication montant (c'est-à-dire de la Terre vers la sonde DART), notée  $c_m$ , est de 100 kb/s tandis que la capacité d'émission du lien de communication descendant (c'est-à-dire de la sonde DART vers la Terre), notée  $c_d$ , est de 10 kb/s.

2. Quel est le temps d'émission sur le lien de communication montant pour envoyer un paquet de taille  $ta$  égale à 100 octets ? On supposera que les 100 octets comprennent tous les en-têtes de la pile TCP/IP. Vous donnerez l'expression littérale du temps d'émission et sa valeur numérique en secondes.

$$\text{temps d'émission} = \frac{ta \cdot 8}{c_m} = \frac{100 \cdot 8}{100 \cdot 10^3} = \frac{8 \cdot 10^2}{10^5} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

3. Par la suite, on va négliger le temps d'émission par rapport au temps de propagation sur le lien de communication montant. Est-ce une hypothèse raisonnable ? Vous justifierez votre réponse.

Oui car  $8 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  est très inférieur à 33,33 s (il y a un rapport de plus de 4000 entre ces deux valeurs).

4. La sonde DART se déplace (avant son impact sur l'astéroïde) à une vitesse de 24 000 km/h. Sachant que la sonde DART doit passer en mode de navigation complètement autonome à une distance de 10 110 000 km de l'antenne terrestre A et qu'elle doit recevoir le dernier message de navigation à une distance de 10 100 000 km de l'antenne terrestre A, à quelle distance de l'antenne A la sonde DART se trouve-t-elle quand le dernier message de navigation est émis par l'antenne terrestre A ? Pour simplifier les calculs on supposera que le délai de propagation est identique à celui calculé à la question 1 pour toutes les positions de la sonde DART autour de 10 millions de km de l'antenne A. Vous donnerez le résultat en km avec une précision de 1 chiffre après la virgule.

Il s'écoule 33,33 s entre le moment où l'antenne terrestre A émet son message et le moment où la sonde DART reçoit le message.

En 33,33 s, la sonde DART s'est déplacée de  $\frac{24000 \cdot 33,33}{3600}$  km soit 222,2 km.

Comme la sonde DART doit recevoir le dernier message de navigation à la distance de 10 100 000 km de l'antenne A, cela implique qu'elle se trouve à une distance de 10 099 777,8 km de l'antenne A quand cette dernière émet le dernier message.

Sur le lien de communication descendant, la sonde DART communique, à destination de l'antenne terrestre A, des images spatiales (notamment de l'astéroïde visé) prises par une caméra embarquée.

5. Chaque image prise par la caméra embarquée sur la sonde DART a une résolution de  $2560 \times 2160$  pixels. Supposons que chaque pixel est encodé sur 1 bit. Est-ce que la capacité d'émission du lien descendant  $c_d$  est suffisante pour que la sonde DART envoie une image par seconde à l'antenne terrestre A ?

Une image correspond à un volume de  $2560 \cdot 2160$  bits soit plus de 5 Mbits (5 529 600 bits exactement). Envoyer une image par seconde nécessiterait une capacité d'émission de plus de 5 Mb/s. Avec une capacité d'émission de 10 kb/s sur le lien descendant, la sonde DART n'est pas en mesure d'envoyer 1 image par seconde.

6. Quel est le temps d'émission pour envoyer une image de la sonde DART vers l'antenne terrestre A ? La réponse sera donnée en seconde avec une précision de deux chiffres après la virgule.

$$\text{Temps d'émission d'une image} = \frac{\text{taille-image}}{c_d} = \frac{5529600}{10 \cdot 10^3} = 552,96 \text{ s.}$$

7. Peut-on, comme pour le lien de communication montant, négliger le temps d'émission pour envoyer une image sur le lien de communication descendant par rapport au temps de propagation quand la sonde DART se trouve à environ 10 millions de km de l'antenne A ? Vous justifierez votre réponse.

Non, on ne peut plus faire cette hypothèse car le temps d'émission est devenu plus important que le délai de propagation.

## Exercice 2 - Wi-Fi et protocoles de transport

Considérons un réseau Wi-Fi constitué d'un point d'accès et d'une station associée à ce point d'accès. Supposons qu'ils utilisent le canal 1 pour échanger des paquets. Les valeurs des paramètres utilisés pour cet exercice sont données dans le tableau ci-dessous. On supposera que les étapes d'authentification et d'association Wi-Fi ont déjà été effectuées au préalable.

Pour toutes les questions nécessitant un calcul, on supposera que le temps de propagation est négligeable. Pour toutes les questions se basant sur un schéma, on supposera que le temps de propagation peut exister et que n'importe quelle valeur est acceptable (c'est-à-dire que les valeurs données dans les schémas sont donc correctes). Seul l'ordre entre les paquets doit être considéré pour analyser les schémas proposés.

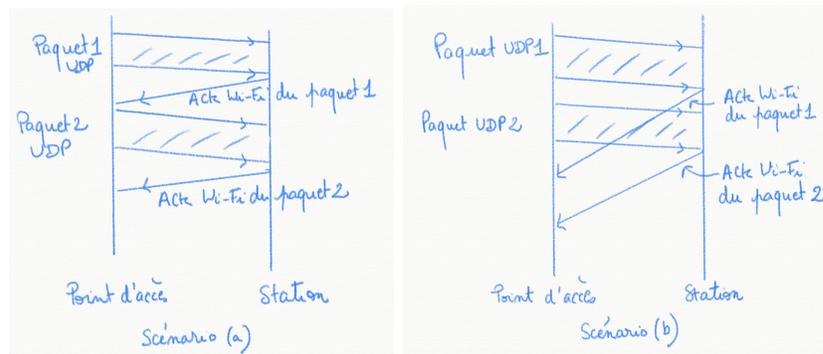
Paramètre	Valeur
Temps DIFS	50 $\mu s$
Temps SIFS	10 $\mu s$
Temps slot	20 $\mu s$
Fenêtre de contention initiale	[0 ; 31]
Temps en-tête physique	192 $\mu s$
Taille en-tête MAC données Seulement pour les paquets de données	34 octets
Taille données contrôle ACK Seulement pour les paquets ACK Wi-Fi	14 octets

### Questions :

- Est-ce que l'échange des paquets serait toujours possible si la station utilisait un canal différent de celui utilisé par le point d'accès ? Justifiez votre réponse.

Non la communication ne sera pas possible car pour que deux nœuds puissent communiquer en Wi-Fi, il faut qu'ils soient configurés sur le même canal.

- Supposons que le point d'accès a toujours des paquets à envoyer à la station et que c'est le protocole de transport UDP qui est utilisé. Est-ce que le scénario (a) donné dans la figure ci-dessous peut avoir lieu ? Est-ce que le scénario (b) donné dans la figure ci-dessous peut avoir lieu ? Justifiez vos réponses.



Le scénario (a) est possible car le Wi-Fi, tel que vu en TD, fonctionne en mode Send & Wait, ce qui implique que la source doit avoir reçu l'acquittement Wi-Fi du 1er paquet UDP avant de pouvoir émettre le 2e paquet.

Pour la même raison que précédemment (mode Send & Wait), le scénario (b) ne peut pas avoir lieu.

3. Expliquez comment le Backoff est décrémenté.

Le backoff est décrémenté unité de temps par unité de temps. À la fin d'une unité de temps le nœud source regarde si le médium est libre. Si c'est le cas, il décrémente le backoff de 1. Lorsque le Backoff prend la valeur 0, alors la source émet son paquet.

4. Pour simplifier les calculs, nous utiliserons le Backoff moyen. Calculez le Backoff moyen et le temps d'attente aléatoire moyen si le Backoff est tiré aléatoirement et uniformément dans la fenêtre de contention initiale (dont les valeurs sont données dans le tableau de paramétrage).

$$\text{Backoff-moyen} = \sum_{i=0}^{i=31} i \times p(\text{Backoff} = i) = \frac{1}{32} \sum_{i=0}^{i=31} i = \frac{31 \times 32}{32 \times 2} = 15,5.$$

$$\text{Temps d'attente aléatoire moyen} = \text{Backoff-moyen} \times \text{unité-temps} = 310 \mu\text{s}.$$

5. Déterminez le débit utile en réception (débit au niveau de la couche 3). Vous supposerez

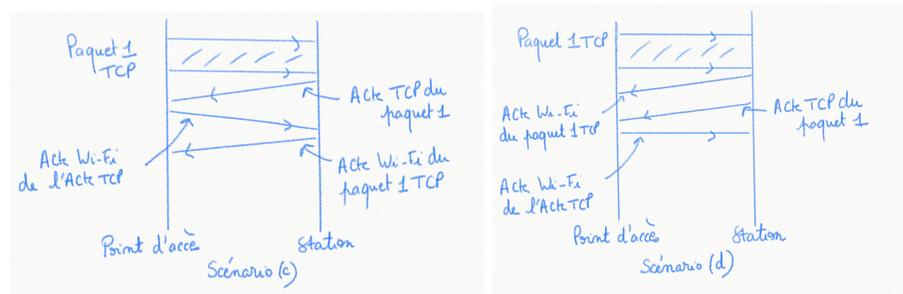
que les paquets ont des données utiles (de couche 3) de 1000 octets, que la capacité d'émission du lien Wi-Fi est de 1 Mb/s, que les paquets arrivent sans erreur et ne sont pas perdus et que les temps de propagation sont négligeables. Vous n'oublierez pas d'ajouter les en-têtes de niveau 2 et de niveau physique aux paquets de données utiles. On rappelle que les acquittements Wi-Fi (de niveau 2) ont seulement des données de contrôle de niveau 2 et un-tête de niveau physique, mais pas d'en-tête de niveau 2. Vous utiliserez les valeurs données dans le tableau de paramétrage ainsi que le temps d'attente aléatoire moyen calculé à la question précédente. Le temps calculé sera exprimé en  $\mu s$ .

Temps séparant deux réceptions de paquets envoyés consécutivement =  $T = SIFS + \text{Temps-ACK} + DIFS + \text{Temps-attente-aléatoire} + \text{Temps-émission-paquet-données}$ .

$T = 10 + 192 + 14 \times 8 + 50 + 310 + 192 + 1034 \times 8 = 9138 \mu s$ .

1000 octets de données utiles sont reçues par la station toutes les 9138  $\mu s$ , ce qui donne un débit en réception au niveau de la couche 3 de  $\frac{1000 \times 8}{9138} = 0,87 \text{ Mb/s}$

6. Supposons maintenant que les paquets envoyés par le point d'accès utilisent le protocole de transport TCP. Pour cette question, nous supposons qu'un seul paquet de données TCP est envoyé du point d'accès vers la station. Supposons que la fenêtre d'anticipation de TCP est fixe (non dynamique) et est fixée à 1. Parmi les scénarios donnés ci-dessous, un seul est possible. Lequel? Vous justifierez vos réponses en expliquant pourquoi vous reprenez tel scénario et pourquoi vous écartez l'autre scénario.



Le scénario (c) ne peut pas avoir lieu, car la station doit forcément acquitter, au niveau Wi-Fi, le paquet de données TCP qu'elle reçoit du point d'accès avant de pouvoir envoyer son acquittement TCP.

Le scénario (d) est le seul scénario qui peut se passer avec une fenêtre d'anticipation de taille 1. En effet, on doit avoir l'ordre suivant : le point d'accès envoie le paquet de données TCP qui est acquitté au niveau Wi-Fi par la station. Ensuite la station envoie son acquittement TCP au point d'accès qui acquitte immédiatement ce paquet au niveau Wi-Fi.

7. Plaçons nous maintenant dans le cas du scénario correct que vous avez identifié à la question précédente. Déterminez le débit utile en réception (au niveau de la couche 3) du flux TCP. Vous supposerez que les paquets de données TCP ont des données utiles de 1000 octets (les données utiles correspondent au paquet provenant de la couche 3), que l'acquittement TCP a une taille de 20 octets au niveau transport auquel 20 octets d'en-tête IP sont ajoutés (ce qui fait donc un paquet de niveau 3 de 40 octets au total), que la capacité d'émission du lien Wi-Fi est de 1 Mb/s, que les paquets arrivent sans erreur et ne sont pas perdus et que les temps de propagation sont négligeables. Vous utiliserez les valeurs données dans le tableau de paramétrage ainsi que le temps d'attente aléatoire moyen calculé à la question 4. Vous n'oublierez pas les en-têtes de niveau 2 et de niveau physique quand cela est nécessaire. Le temps calculé sera exprimé en  $\mu s$ .

Le temps séparant deux réceptions de paquets envoyés consécutivement,  $T$ , correspond au temps calculé à la question 6 auquel il faut ajouter le temps nécessaire pour envoyer l'acquittement TCP et l'acquittement WI-Fi à cet acquittement TCP. Le temps supplémentaire est donc égal à = DIFS + Temps-attente-aléatoire + Temps-émission-paquet-ACK-TCP + SIFS + Temps-ACK-WiFi.

$$\text{Temps-supplémentaire} = 50 + 310 + 192 + (40 + 34) \times 8 + 10 + 192 + 14 \times 8 = 1468 \mu s.$$

$$T = 9138 + 1468 = 10596 \mu s.$$

1000 octets de données utiles est reçues par la station toutes les 10596  $\mu s$ , ce qui donne un débit en réception au niveau de la couche 3 de  $\frac{1000 \times 8}{10596} = 0,755 \text{ Mb/s}$

8. Supposons que la fenêtre d'anticipation de TCP est fixe (non dynamique) et est fixée à 2. Dessinez deux scénarios possibles et corrects qui diffèrent sur l'ordre des paquets envoyés si deux paquets de données TCP doivent être envoyés par le point d'accès.

Possibilité 1 : ACK TCP du paquet TCP 1 est envoyé avant le paquet TCP 2.  
Possibilité 2 : Paquet TCP 2 est envoyé avant l'ACK TCP du paquet TCP 1.

## Exercice 1 - Routage par vecteur de distances

On s'intéresse au routage par vecteur de distances dont l'algorithme est donné ci-dessous pour un nœud  $x$  (Algorithme 1). On suppose que chaque nœud du réseau connaît tous les autres nœuds du réseau ( $\mathbf{N}$ ).

### Questions :

1. Rayer les caractéristiques qui ne correspondent pas à l'algorithme de routage par vecteur de distances.

Synchrone - Distribué - Centralisé - Asynchrone - Itératif

```

1  Paramètres
2   $\mathbf{N}$  : ensemble des nœuds du réseau
3   $\mathbf{V}_x$  : ensemble des voisins du nœud  $x$ 
4   $c(x, y)$  : coût du lien entre les nœuds  $x$  et  $y$ ; si  $x$  et  $y$  ne sont pas voisins  $c(x, y) = \infty$ 
5   $D_x(y)$  : coût du chemin entre le nœud  $x$  et le nœud  $y$ ;  $D_x(x) = 0$ 
6   $D_w(y)$  : coût du chemin entre le nœud  $w$  et le nœud  $y$  ( $w$  voisins de  $x$ );  $D_w(w) = 0$ 
7   $S_x(y)$  : saut suivant sur le chemin entre le nœud  $x$  et le nœud  $y$ ; initialisé à  $\emptyset$ 
8  Initialisation
9  for chaque nœud  $y$  de  $\mathbf{N}$  do
10 |    $D_x(y) \leftarrow c(x, y)$ ;
11 |   if  $y \in \mathbf{V}_x$  then
12 |      $S_x(y) \leftarrow y$ ;
13 |   end
14 end
15 for chaque voisin  $w$  de  $\mathbf{V}_x$  do
16 |    $D_w(y) \leftarrow \emptyset$  pour tout  $y$  dans  $\mathbf{N}$ ;
17 end
18 for chaque voisin  $w$  de  $\mathbf{V}_x$  do
19 |   envoyer le vecteur de distances  $\mathbf{D}_x = \{D_x(y) : y \text{ dans } \mathbf{N}\}$  à  $w$ ;
20 end
21 Boucle infinie
22 if le coût d'un lien a changé pour un voisin de  $x$  OU  $x$  a reçu un vecteur de distances
    d'un de ses voisins then
23 |   for chaque  $y$  de  $\mathbf{N}$  do
24 |      $D_x(y) \leftarrow \min_{v \in \mathbf{V}_x} (c(x, v) + D_v(y))$ ;
25 |      $S_x(y) \leftarrow v$  qui minimise  $(c(x, v) + D_v(y) : v \in \mathbf{V}_x)$ ;
26 |   end
27 |   if  $D_x(y)$  a changé pour un nœud  $y$  then
28 |     envoyer le vecteur de distances  $\mathbf{D}_x = \{D_x(y) : y \text{ dans } \mathbf{N}\}$  à tous ses voisins;
29 |   end
30 end

```

**Algorithm 1:** Algorithme du routage par vecteur de distances pour le nœud  $x$

Synchrone - Distribué - Centralisé - Asynchrone - Itératif

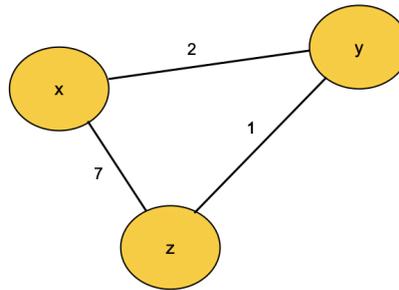


FIGURE 1 – Réseau avec les coûts sur les liens.

2. Remplir les tables de routage ci-dessous une fois l'étape d'initialisation de l'algorithme 1 appliquée.

Table de routage de $x$		
Destination	Saut suivant	Coût
$y$		
$z$		

Table de routage de $y$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$		
$z$		

Table de routage de $z$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$		
$y$		

Table de routage de $x$		
Destination	Saut suivant	Coût
$y$	$y$	2
$z$	$z$	7

Table de routage de $y$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$	$x$	2
$z$	$z$	1

Table de routage de $z$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$	$x$	7
$y$	$y$	1

3. Remplir les tables de routage une fois que chaque nœud a reçu les vecteurs de distances de chacun de ses voisins envoyés à la fin de l'étape d'initialisation (et est donc entré dans la boucle infinie).

Table de routage de $x$		
Destination	Saut suivant	Coût
$y$		
$z$		

Table de routage de $y$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$		
$z$		

Table de routage de $z$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$		
$y$		

Table de routage de $x$		
Destination	Saut suivant	Coût
$y$	$y$	2
$z$	$y$	3

Table de routage de $y$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$	$x$	2
$z$	$z$	1

Table de routage de $z$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$	$y$	3
$y$	$y$	1

4. Supposons que le coût du lien entre  $y$  et  $x$  passe de 2 à 1. Indiquer la table de routage de  $y$  quand  $y$  observe que  $c(y, x)$  vaut maintenant 1.

Table de routage de $y$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$		
$z$		

Table de routage de $y$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$	$x$	1
$z$	$z$	1

5. D'après l'algorithme 1, que fait  $y$  quand il met à jour sa table de routage comme à la question précédente? Vous indiquerez la ou les numéros de ligne de l'algorithme associés à cette action.

$y$  envoie son vecteur de distances à tous ses voisins (lignes 27 et 28 de l'algorithme).

6. Indiquer les vecteurs de distances envoyés par  $x$  et  $z$  à  $y$  une fois qu'ils ont mis à jour leur table de routage suite à l'action de  $y$  effectuée.

$$D_x(y) = 1 \quad D_x(z) = 2$$

$$D_z(x) = 2 \quad D_z(y) = 1$$

7. Supposons maintenant que  $c(y, x)$  passe de 1 à 10 et que  $y$  s'en rend compte. Déterminer  $D_y(x)$  et  $S_y(x)$ . Vous donnerez le détail du calcul pour  $D_y(x)$  (ligne 24 de l'algorithme).

$$D_y(x) = \min[(c(y, x) + D_x(x)), (c(y, z) + D_z(x))] = \min[(10 + 0), (1 + 2)] = 3.$$

$$S_y(x) = z.$$

8. Quel est le problème qui se pose, à ce stade, avec le calcul de la question précédente, et donc avec cet algorithme ?

Une boucle de routage est créée car, pour atteindre  $x$ ,  $y$  doit envoyer à  $z$  et  $z$  doit envoyer à  $y$ .

9. Donner la table de routage de  $z$  une fois que  $z$  a reçu le nouveau vecteur de distances envoyé par  $y$  suite aux calculs de la question précédente.

Table de routage de $z$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$		
$y$		

Table de routage de $z$		
Destination	Saut suivant	Coût
$x$	$y$	4
$y$	$y$	1

10. Au bout de combien d'échanges de vecteurs de distances entre  $y$  et  $z$ , le problème, mis en évidence à la question 8, va disparaître ? L'envoi du vecteur de distances de  $y$  à  $z$ , effectué à la question précédente, sera pris en compte dans cette question. Vous expliquerez votre réponse.

À chaque échange entre  $y$  et  $z$  (ou  $z$  et  $y$ ), le coût vers  $x$  ( $D_y(x)$  ou  $D_z(x)$ ) est augmenté de 1 car  $c(y, z) = 1$ . Au bout de 5 échanges,  $D_z(x) = 8$ , et donc  $z$  va considérer que le plus court chemin pour aller à  $x$  est d'envoyer directement à  $x$  (car  $c(z, x) = 7$ ).