

## Résumé des fonctions réalisées à la couche liaison

1. Découpage du flot de bits en trames
2. Contrôle d'erreurs
3. Retransmission de trames erronées
  - Accusé de réception
  - Numéros de séquence
  - Stratégies ARQ
4. Établissement et terminaison de connexions

1

1

---

---

---

---

---

---

---

---

## Stratégies de retransmission

- Méthode principale de correction d'erreurs :  
Retransmission des trames erronées
  - Plus efficace que les codes correcteurs

Stratégies ARQ : (*Automatic Repeat reQuest*)

1. « Envoyer et attendre », « Stop-and-Go », « send-and-wait »
2. « Go-back-n » ou « Fenêtre glissante »
3. « Rejet sélectif »

2

2

---

---

---

---

---

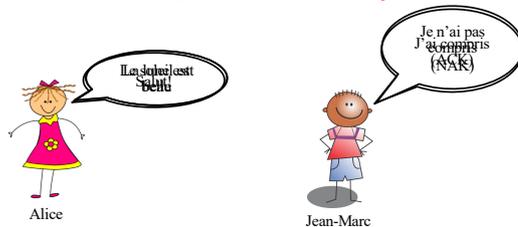
---

---

---

## Envoyer et attendre

Pour voir les animations, visionnez la vidéo ARQ



3

3

---

---

---

---

---

---

---

---

## Envoyer et attendre

### Principe

- S'assurer qu'un paquet a été reçu avant d'envoyer le suivant

### Protocole simple

- Le paquet contient un CRC qui permet de détecter des erreurs
- Si le paquet est correct, le récepteur renvoie un **acquittement positif (ACK)**
- Si le paquet est erronée, le récepteur renvoie un **acquittement négatif (NAK)**
- ACK et NAK sont également protégés par un CRC
- Lors de la réception d'un NAK le paquet est retransmis

4

4

---

---

---

---

---

---

---

---

## Que se passe-t-il si un ACK est perdu?

Pour voir les animations, visionnez la vidéo ARQ



Alice n'a pas entendu!

5

5

---

---

---

---

---

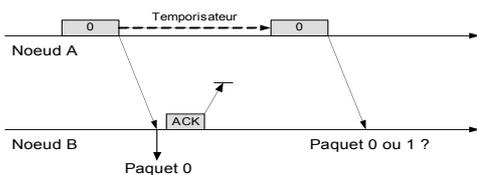
---

---

---

## Faiblesse du protocole avec ACK/NAK

- Le protocole se comporte de manière incorrecte en cas de perte d'un acquittement



6

6

---

---

---

---

---

---

---

---

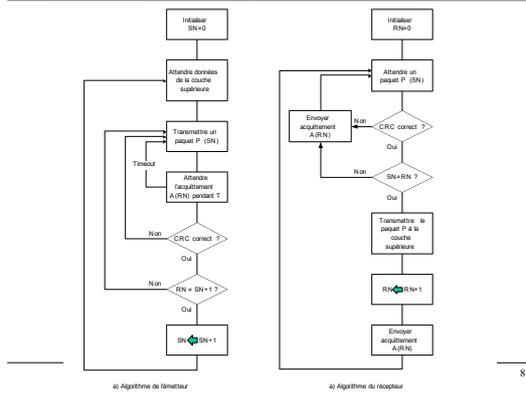
## Protocole avec numéros de séquence

- Tous les paquets sont numérotés avec un **numéro de séquence SN**
- Un ACK contient le **numéro de séquence RN du prochain paquet attendu**
  - Le NAK n'est plus nécessaire, puisque le récepteur peut redemander la transmission du paquet précédent avec un ACK
- Un numéro de séquence sur 1 bit est suffisant puisqu'il n'y a que deux possibilités:
  - Un ACK demande le prochain paquet (confirmant implicitement la réception du précédent)
  - Le ACK demande le même paquet

7

7

## Algorithme



8

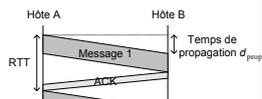
## Performances de « Envoyer et attendre »

Taux d'utilisation du réseau  $\rho$ :

- Rapport entre le débit effectif obtenu D et le débit de lien C
- Calcul
  - $d_{data}$ : longueur en bits de transmission d'un paquet
  - $d_{ACK}$ : longueur en bits de transmission d'un ACK

$$RTT = (l_{data} + l_{ACK}) / C + 2d_{prop}$$

$$\rho = \frac{l_{data}}{RTT \cdot C}$$



- Utilisation est inversement proportionnelle au « produit largeur de bande – délai » (*bandwidth delay product*)
 
$$BWD = RTT \cdot C$$

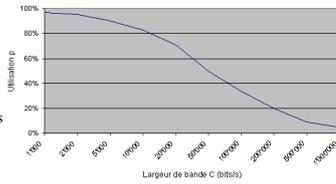
9

9

## Exemple numérique

- Paramètres:

- $I_{data}=1000$  bits
- $I_{ack}: 10$  bit
- Délai de propagation  $d = 10$ ms
- Débit binaire C entre 1 kb/s et 1 Mb/s



> Utilisation inférieure à 5% à  $C = 1$  Mb/s

- > « Envoyer et attendre » n'est approprié que pour les liens à faible produit largeur de bande – délai
- > La distance joue également un rôle important

10

10

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Exercice

- Estimez du taux d'utilisation pour WiFi:

- Distance: 10 m
- $C=54$  Mb/s
- $I_{data}=12$  kb
- $I_{ACK}=110$  b

11

11

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Exercice

- Estimez du taux d'utilisation si la transmission se faisait entre une station terrestre et un satellite géostationnaire:

- Distance:  $39e3$  km
- $C=54$  Mb/s
- $I_{data}=12$  kb
- $I_{ACK}=110$  b

12

12

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Protocole « Go-back-n »

- Méthode ARQ très répandue dans les protocoles de la couche liaison et de la couche transport

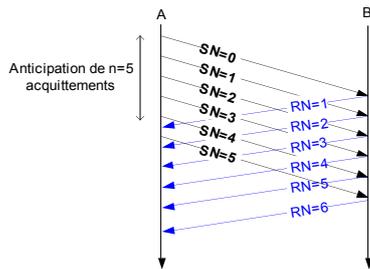
### Principe

- L'émetteur envoie **plusieurs paquets de suite** sans attendre d'acquittement
- Tous les paquets contiennent un **numéro de séquence SN**
- L'émetteur conserve une copie des paquets envoyés mais non acquittés afin de pouvoir les retransmettre
- Le paramètre  $n$  indique combien de paquets peuvent être envoyés sans recevoir d'acquittement
- Le récepteur **n'accepte que le prochain paquet attendu**
- Le récepteur envoie un acquittement pour chaque paquet correctement reçu

13

13

## Exemple



14

14

## La fenêtre glissante

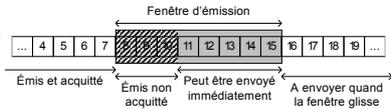
- La méthode « Go-back-n » peut être réalisée à l'aide d'une fenêtre glissante (*Sliding Window*)
  - La fenêtre contient les  $n$  paquets après le dernier paquet acquitté  $s-1$
  - Numéros de séquence SN autorisés à l'expédition :
$$s \leq SN < s + n$$
  - Après l'acquittement d'un paquet transmis, la fenêtre glisse à droite et autorise la transmission d'un nouveau paquet

15

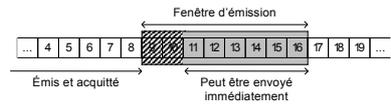
15

## Exemple

Dernier acquittement reçu : RN=8



Nouvel acquittement reçu : RN=9



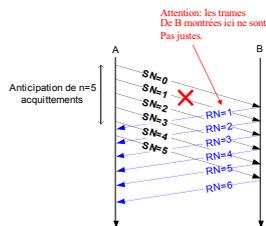
16

16

Question: si la trame SN=1 était erronée...

Le nœud B...

- ne transmet pas de ACK
- transmet un ACK avec RN=1
- transmet un ACK négatif (NACK)



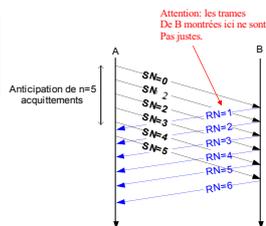
17

17

Question: si la trame SN=1 arrivait avec SN=2...

Le nœud B...

- n'accepte pas la trame et transmet un ACK avec RN=1
- accepte la trame et transmet un ACK avec RN=1



18

18



## Rejet Sélectif

### Problème de Go-back-n

Une erreur dans un paquet provoque la retransmission de tous les paquets à partir du paquet erroné

- Le récepteur n'accepte pas de paquet hors séquence

### Principe du rejet sélectif

- Le récepteur gère un **tampon de réception** dans lequel il place les paquets reçus hors séquence
- Un nouveau type d'**acquiescement négatif SREJ** permet d'indiquer le paquet rejeté

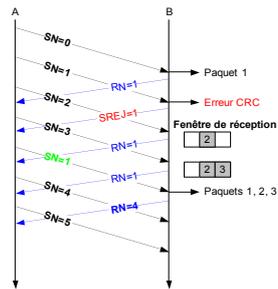
22

22

## Rejet sélectif

### Principe

- Lorsqu'un paquet erroné est reçu, le récepteur renvoie un **SREJ** avec le numéro de séquence du paquet erroné
- Les paquets reçus hors séquence sont placés dans une **fenêtre de réception**, avec la même taille que la fenêtre d'émission
- L'émetteur retransmet uniquement les paquets pour lesquels il a reçu un SREJ



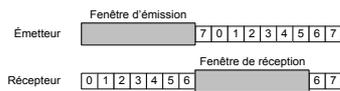
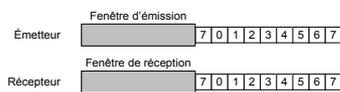
23

23

## Gestion des numéros de séquence

- Numéros de séquence sur 3 bits
- Taille de fenêtre = 7

1. L'émetteur transmet toute la fenêtre
2. Les paquets sont reçus correctement mais tous les acquiescements sont perdus
3. Après l'expiration du temporisateur l'émetteur retransmet le paquet 0
4. Le paquet 0 se trouve dans la fenêtre de réception. Il est alors accepté par le récepteur
5. Erreur !!!



24

24

## Gestion des numéros de séquence

### Problème dans l'exemple précédent

- Les numéros de séquence des deux fenêtres se superposent
- L'émetteur a le droit de transmettre tous les numéros de séquence SN avec  $SN \in [SN_{\min}, SN_{\min} + n - 1]$
- Après la réception du paquet SN<sub>min</sub>+n-1, le récepteur accepte les paquets  $SN \in [SN_{\min} + n, SN_{\min} + n + n - 1]$
- En fonction des acquittements reçus, le prochain paquet transmis se trouve dans  $SN \in [SN_{\min}, SN_{\min} + 2n - 1]$

Condition pour Rejet sélectif :  $M \geq 2n$

25

25

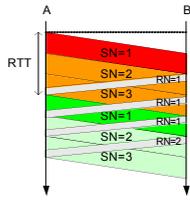
## Amélioration des performances par rapport à Go-back-n

- Données retransmises en cas d'erreur dans Go-back-n:
  - $\text{Min}(\text{RTT} \cdot C, \text{taille de la fenêtre en bits})$
  - Ou
  - $\text{Min}(\text{RTT} \cdot C / l_{\text{data}}, \text{taille de la fenêtre en trames})$

### Exemple numérique :

- $C = 1 \text{ Mb/s}$
- $P(\text{paquet erroné}) = 10^{-4}$
- Longueur de paquet = 1000 bits
- En moyenne une erreur toutes les 10s
- Canal avec  $\text{RTT} \cdot C = 10 \text{ ms} \cdot 1 \text{ Mb/s} = 10 \text{ kb}$

- Surcharge pour Go-back-n  $\approx 10 \text{ kb} / 10 \text{ Mb} = 0.1 \%$
- Surcharge pour Rejet sélectif  $\approx 1 \text{ kb} / 10 \text{ Mb} = 0.01 \%$



26

26

## Efficacité des protocoles

### Envoyer et attendre

$$\rho = \frac{l_{\text{data}}}{\text{RTT} \cdot C} = \frac{l_{\text{data}}}{l_{\text{data}} + l_{\text{ACK}} + 2dC}$$

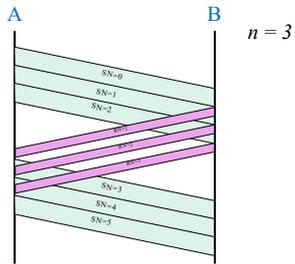
- Taux d'utilisation faible pour les canaux avec un produit largeur de bande – délai élevé
  - Typiquement des canaux avec un délai de propagation élevé

27

27

*Go-back-n et Rejet sélectif*

Taille optimale de la fenêtre?



28

---

---

---

---

---

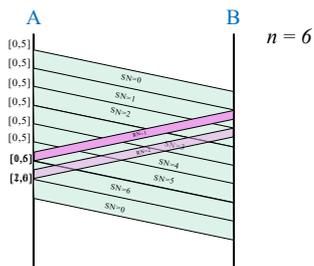
---

---

---

*Go-back-n et Rejet sélectif*

Taille optimale de la fenêtre?



29

---

---

---

---

---

---

---

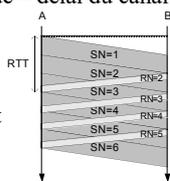
---

Taille optimale de la fenêtre glissante

- La taille optimale doit permettre à l'émetteur de transmettre en permanence
- La taille de fenêtre (en bytes et en trames) est alors fonction du produit largeur de bande – délai du canal :

$$n_{\text{bytes}} = \left\lceil \frac{RTT \cdot C}{8} \right\rceil \quad n_{\text{trames}} = \left\lceil \frac{RTT \cdot C}{l_{\text{data}}} \right\rceil$$

- Go-back-n et Rejet sélectif peuvent alors atteindre un taux d'utilisation (sans erreurs) de  $\rho=1$



30

---

---

---

---

---

---

---

---

## Taux d'utilisation en cas d'erreurs

### Hypothèse :

Uniquement les erreurs dans les paquets de données sont considérées, les erreurs dans les acquittements sont négligées

### Rejet sélectif

- Le nombre de paquets reçus correctement est le nombre de paquets émis moins les paquets erronés

$$n_{reçu} = n_{émis} - p \cdot n_{émis} \quad (p: \text{probabilité d'une erreur dans un paquet})$$

- Taux d'utilisation

$$\rho_{max} = \frac{n_{reçu}}{n_{émis}} = 1 - p$$

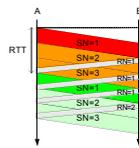
31

31

## Taux d'utilisation de Go-back-n

- En cas d'une erreur :  
Nombre de paquets retransmis :  $\beta = \min(\lceil RTT \cdot C / l_{data} \rceil, n)$
- Espérance no. paquets émis / paquet reçu

Nombre de retransmissions d'un paquet	Probabilité	Nombre de paquets transmis
0	$1-p$	1
1	$(1-p)p$	$1+\beta$
2	$(1-p)p^2$	$1+2\beta$
k	$(1-p)p^k$	$1+k\beta$



$$E \left[ \frac{n_{émis}}{n_{reçu}} \right] = \sum_{k=0}^{\infty} (1+k\beta)(1-p)p^k = \frac{1-p+p\beta}{1-p}$$

- Taux d'utilisation :  $\rho_{max} = E \left[ \frac{n_{reçu}}{n_{émis}} \right] = \frac{1-p}{1-p+p\beta}$

32

32

## Probabilité d'erreur de paquets P et de bits BER (ou p)

- Si la bit error rate (BER) est 0.1, quelle est la valeur de la probabilité d'erreurs de paquets P?
- Voir au tableau

33

33

### Exemple numérique

Débit binaire	$C=1$ Mb/s
Longueur de trame	$l_{\text{data}}=1000$ bits
Longueur d'ACK	$l_{\text{ACK}}=1000$ bits
Décal de propagation	$d=4$ ms
Taux d'erreurs bit	$\text{BER}=10^{-6}$
Longueur de trame	$l_{\text{data}}=1000$ bits

#### Calculer

- La probabilité  $P$  d'une trame erronée
- Taille optimale de la fenêtre ( $n = \beta$ )
- Le taux d'utilisation maximum (avec erreurs) pour
  - Envoyer et attendre
  - Go-back-n
  - Rejet sélectif

34

---

---

---

---

---

---

---

---