

Introduction aux réseaux

Module IC203

Ramon Casellas
Marceau Coupechoux
Nicolas Dailly
Philippe Martins (martins@telecom-paris.fr)
Télécom Paris
Dép. Informatique et Réseaux
Groupe RMS
Bureau 4B59

Liste de cours

Cours I: Introduction aux réseaux

Cours II: Protocoles de liaison de données

Cours III: Réseaux locaux

Cours IV: Internet

Cours I: Introduction aux réseaux

Philippe Martins

Dép. Informatique et Réseaux

RMS

Bureau 4B59

Objectifs du cours I

- Donner un aperçu des réseaux existants et des services de transport de l'information associés
- Introduire des éléments servant à la classification des réseaux
- Comprendre les facteurs principaux limitant la transmission de données sur un support de transmission
- Quantifier rapidement la capacité d'une liaison point à point
- Connaître les principales techniques de multiplexage
- Introduire un premier exemple de « technique » de transport (la liaison point à point)

Sommaire

- I. Histoire des réseaux
- II. Typologie des réseaux
- III. Transmission de l'information dans les réseaux
- IV. Circuit de données
- V. La liaison de données

I. Histoire des réseaux

I.1. Qu'est ce qu'un réseau ?

Ensemble de moyens matériels et logiciels permettant à plusieurs interlocuteurs d'échanger des informations dans le cadre d'une session de communication.

Une session de communication est une association entre interlocuteurs souhaitant échanger des informations d'un ou plusieurs types.

Une session de communication peut impliquer des êtres humains, des machines, ou une combinaison des deux.

Les types d'information échangées peuvent se présenter sous différentes formes:

- Voix (temps réel, streaming audio)
- Vidéo (temps réel, streaming vidéo)
- « Données » (transfert de fichiers, messagerie électronique, messagerie instantanée, navigation Internet, messages cours, relevé de compteurs, informations provenant de capteurs, jeux en ligne ...)

I. Histoire des réseaux

Les premiers réseaux de communication permettaient d'échanger un seul type d'information dans le cadre d'une même session de communication:

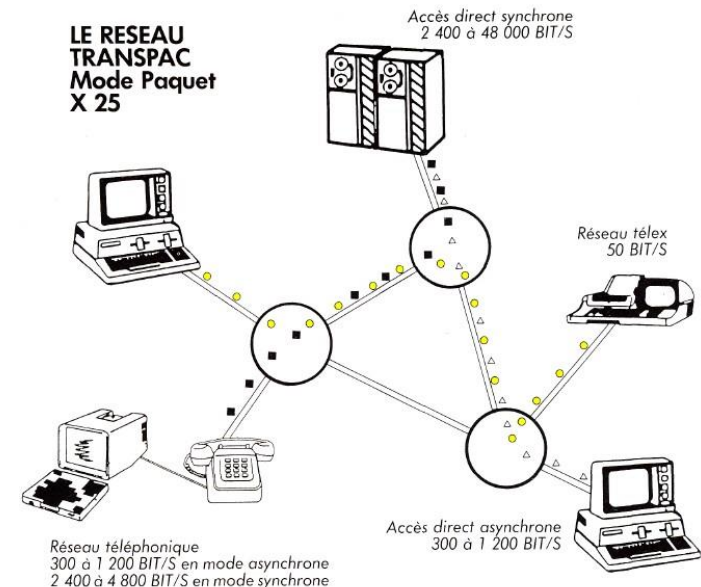
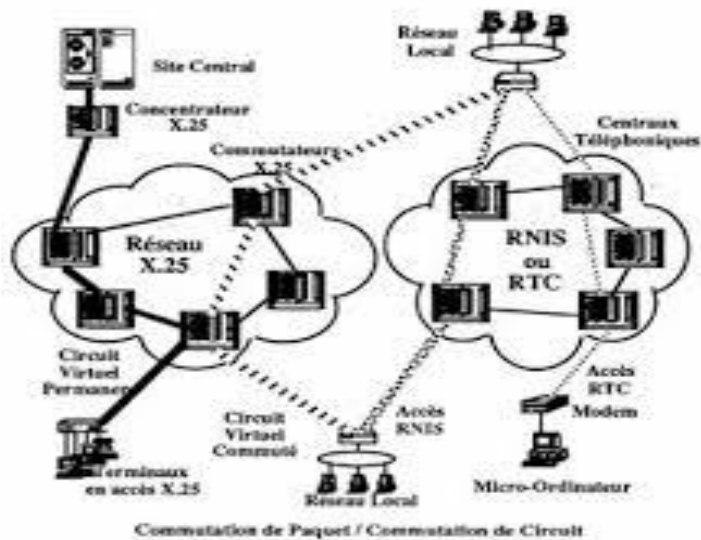
- Télégraphe et Telex pour les messages,
- Téléphone pour les conversations vocales.
- Les utilisateurs se servaient de terminaux spécifiques pour communiquer



I. Histoire des réseaux

Un réseau se subdivise en deux parties:

- Une première partie comprenant les terminaux des utilisateurs et les liaisons servant à les raccorder à des points d'entrée au réseau
- Une seconde partie comprenant des équipements chargés de recevoir les informations des utilisateurs et de les acheminer vers les destinataires.



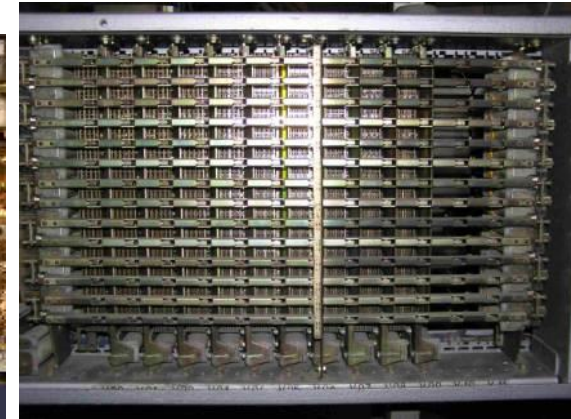
I. Histoire des réseaux

Rapide historique

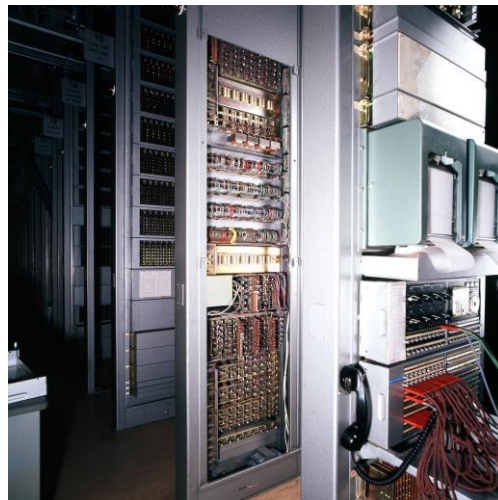
- 1865: Télégraphe (Morse)
- 1876: Téléphone (Bell)
- 1963: Télex, liaisons spécialisés – (données)
- 1964: Transport de données sur le réseau téléphonique
- 1969: Naissance de L'Internet – (données)
- 1970: Réseaux locaux – (données)
- 1978: Transpac (réseau X.25 français) – (données)
- 1988: RNIS (Réseau Numérique à Intégration de services) - (voix et données)
- 1992: GSM (voix)
- 1995: ATM (Asynchronous Transfer Mode) – réseau multimédia
- 1996: GPRS (données)
- 2003: lancement commercial 3G - (voix et données)
- 2008: premier lancement LTE (Long Term evolution) – réseau multimédia
- 2018: premier lancement 5G – réseau multimédia, IoT

D'après [1] (quelques dates d'après présentation transmissions de données de M. Tuy et Gauthier, UREC)

I. Histoire des réseaux



https://pierremarandet.pagesperso-orange.fr/telephone_fr.html



I. Histoire des réseaux

Les principaux réseaux de télécommunications déployés aujourd'hui sont :

- « L'Internet » sous toutes ces formes:
 - Réseaux d'accès
 - Réseau locaux filaires et sans fils
 - Boucle locales des opérateurs: ligne d'abonné ADSL et accès fibre
 - Réseau cœur de transport Internet
 - Cloud et datacenter pour les services
 - Internet des objets (IoT)
- Les réseaux radiomobiles *GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio Service), UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), HSPA (High Speed Packet Access) et LTE (Long Term Evolution), la 5G (déploiement en cours);*
- Le *RTC (Réseau téléphonique commuté)* ;

I. Histoire des réseaux

I.2. Transport des informations d'un réseau

Plusieurs méthodes de transport ont été conçues au fil de l'histoire pour acheminer des informations entre interlocuteurs.

Les premières méthodes d'acheminement d'information s'appuyaient sur un usage exclusif des ressources de transmissions pendant toute la durée des échanges entre les interlocuteurs impliqués dans une même session de communication: c'est le concept de commutation de circuit.

Approche rentable si l'usage effectif de la ressource dédiée associé à la session de communication est important: c'est le cas de la voix pour le téléphone.

En revanche, la commutation de circuit n'est pas optimale pour les usages sporadiques de la ressource: c'est le cas pour la transmission de données.

I. Histoire des réseaux

Il peut être intéressant dans ce dernier cas de partager dynamiquement la ressource de transmission entre différents utilisateurs

Cela a conduit à la définition de nouvelles approches de transfert de l'information

- La commutation de paquets
- La commutation de message
- La commutation de circuits virtuels.

Pour des réseaux économiques, les opérateurs et les équipementiers Telecom ont cherché à concevoir des réseaux permettant de transporter des informations de nature différente.

Cette tendance s'est accélérée à partir des années 90 et a abouti à la construction de l'Internet tel que nous le connaissons aujourd'hui.

Difficulté: chaque type d'information à ses propres contraintes de transport qui peuvent être antagonistes.

I. Histoire des réseaux

Exemple de contraintes :

- Voix = trafic à caractère temps réel, très sensible à la variation du délai de propagation (gigue)- Tolérance vis-à-vis des erreurs de transmission
- Vidéo= trafic à caractère temps réel, sensible à la gigue
- Données = trafic en général non temps réel, mais les données transportées ne tolèrent pas les erreurs de transmission ou les pertes de données.

I. Histoire des réseaux

Les premiers réseaux étaient pilotés par des opérateurs humains (cas notamment du réseau téléphonique, du télégraphe)

Un opérateur humain était chargé d'établir l'appel téléphonique sollicité par l'abonné (standardiste dans un central téléphonique).

Avec la croissance du réseau téléphonique, il est devenu nécessaire d'automatiser les procédures d'établissement d'appel:

- Conception d'automates mécaniques
- Conception de circuit électroniques
- Conception de logiciels de pilotage (fonction de traitement d'appel des commutateurs téléphoniques)

I. Histoire des réseaux

I.3. Exemples de réseaux

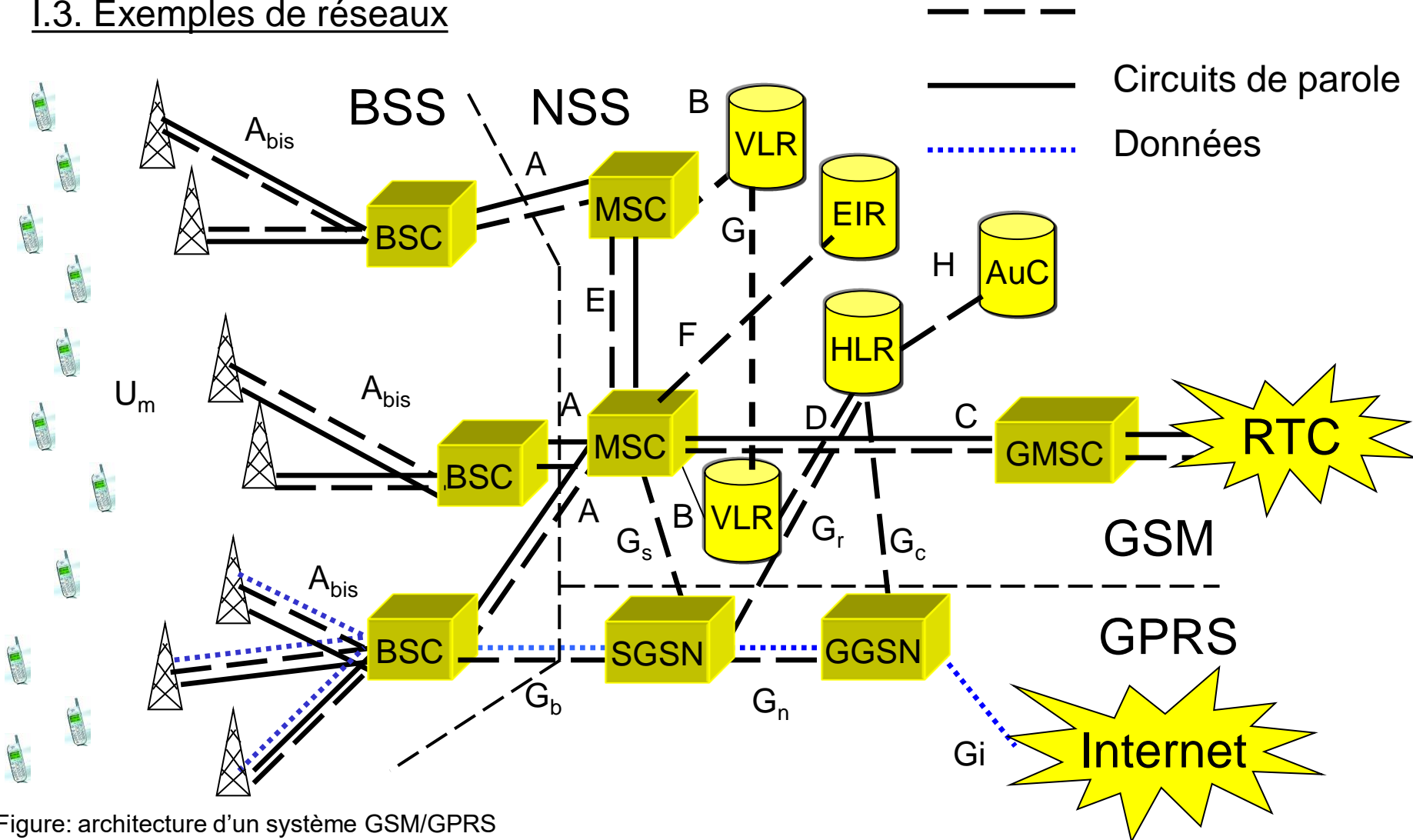


Figure: architecture d'un système GSM/GPRS

I. Histoire des réseaux

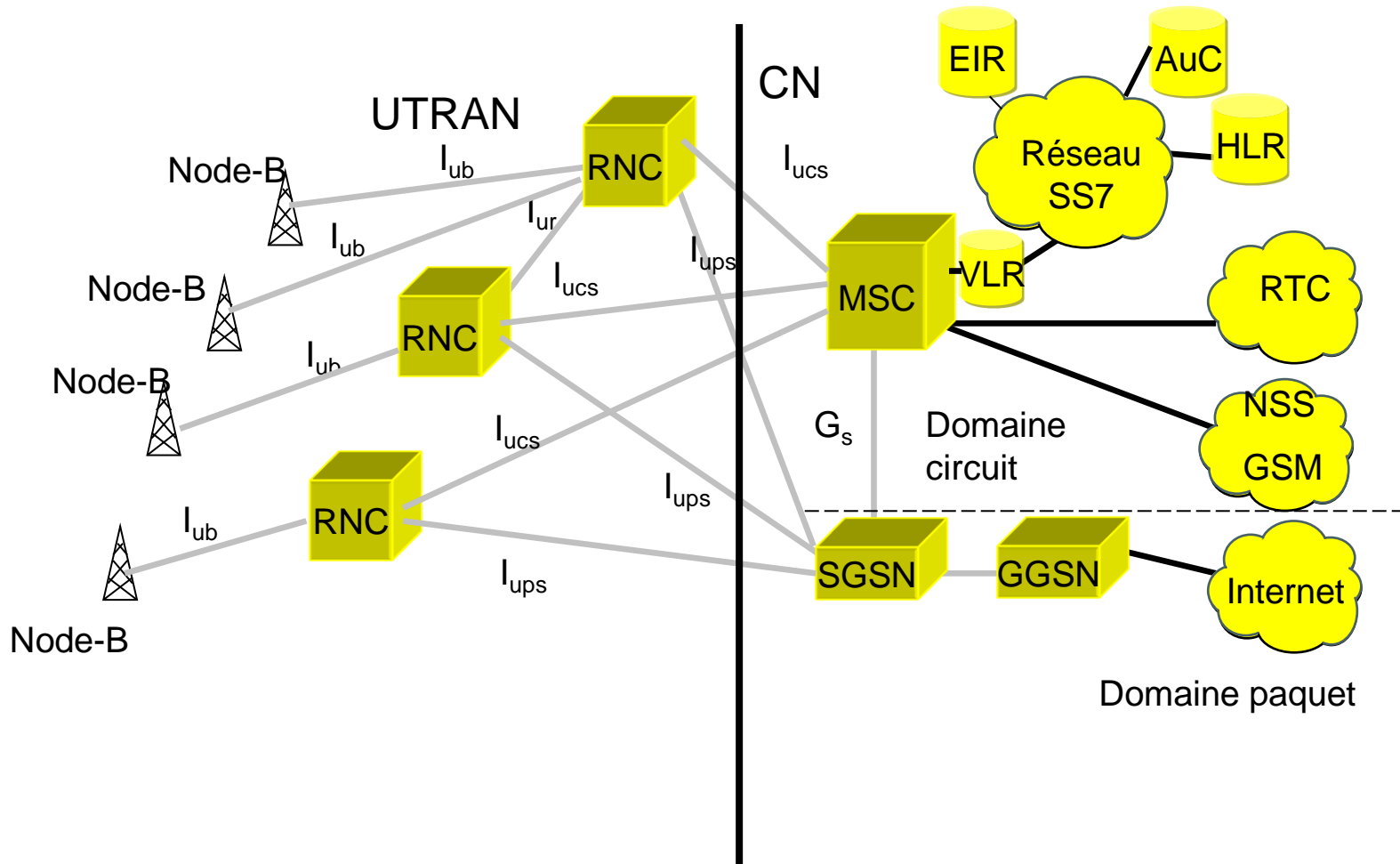


Figure: architecture simplifiée d'un système UMTS/HSPA

I. Histoire des réseaux

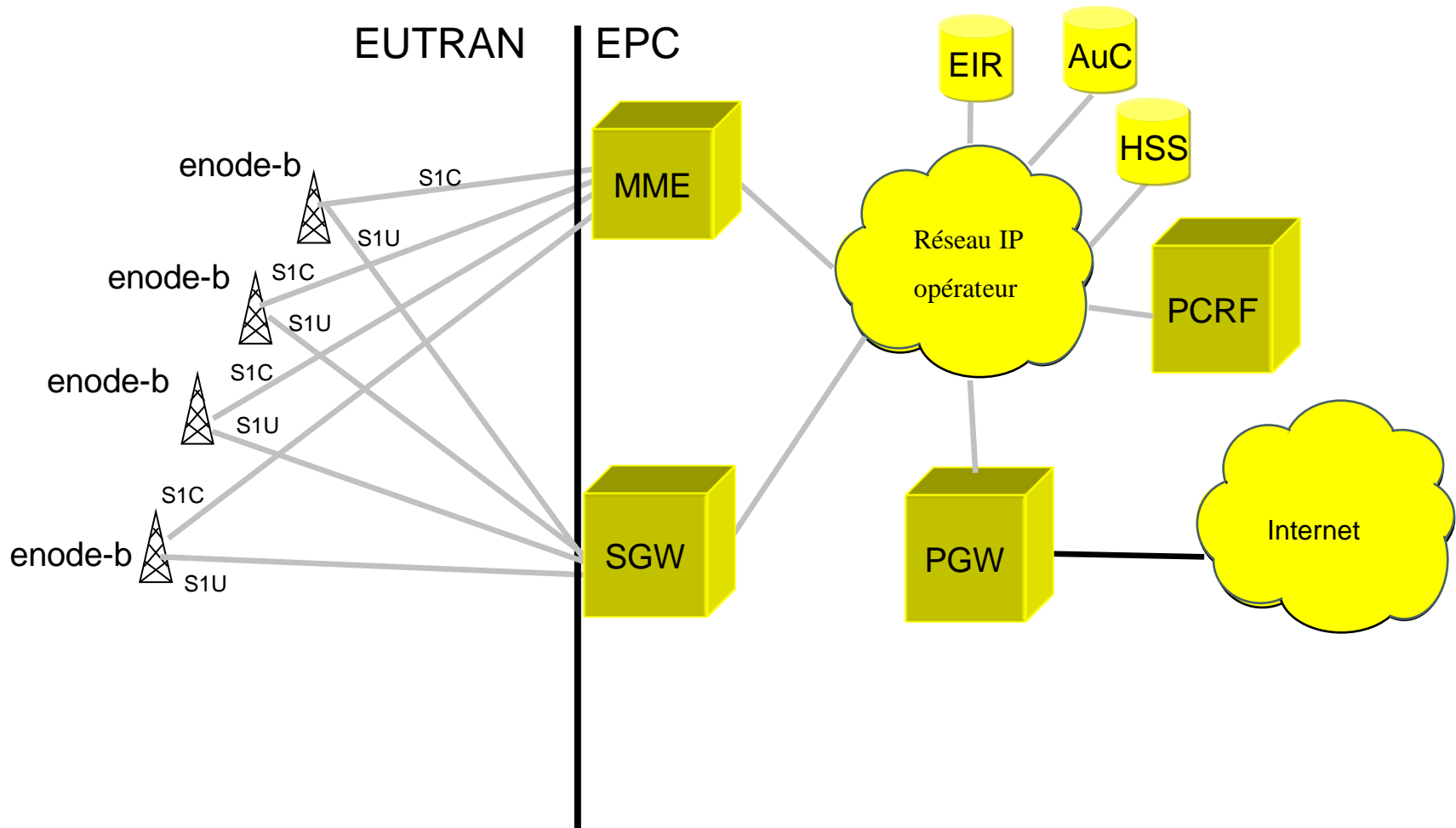


Figure: architecture simplifiée d'un réseau LTE

II. Typologie des réseaux

II.1. Typologie suivant la portée

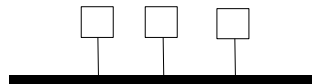
Quelques ordres de grandeurs:

- 0-1 m : *BAN (Body Area Network)*, *PAN (Personal Area Network)*, réseau courte portée (interface USB, RS232, Bluetooth, ZigBee, NFC, RFID, ...)
- 1m - 1 km : Réseau local *LAN (Local Area Network)*
- 1 km - 100 km : Réseau métropolitain *MAN (Metropolitan Area Network)*
- 100 km ->... : Réseau longue distance *WAN (Wide Area Network)*

II. Typologie des réseaux

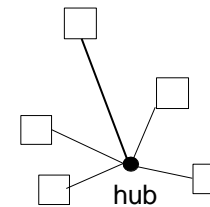
II.2. Typologie suivant la topologie et exemples

Les principales topologies de réseau et des exemples ...



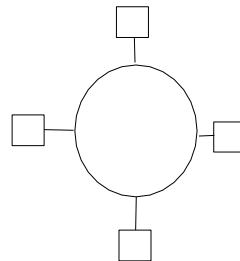
Réseau en bus

Exemple: Ethernet 10base-2
(Utilisée au début des années 90)



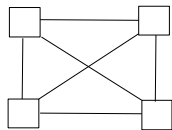
Réseau en étoile

Exemple: Ethernet 10base-T+hub
(Surtout utilisé au milieu des années 90)



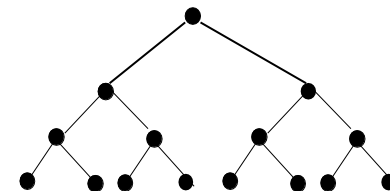
Réseau en anneau

Exemple: FDDI, Token ring,
SDH, SONET



Réseau complètement maillé (mesh)

Exemple: Réseau SS7
(Utilisé encore aujourd'hui
pour le transport de la signalisation
dans le réseau téléphonique)



Réseau en arbre

Exemple: Ethernet commuté 100baseTX,
Gigabit Ethernet, réseau d'accès téléphonique
(topologie très souvent utilisée de nos jours)

II. Typologie des réseaux

II.3. Typologie suivant le mode d'exploitation

Réseau opéré ou public (exploité par un opérateur à des fins de commercialisation pour le grand public ou des professionnels)

- Réseaux mobiles, téléphone, accès Internet haut débit, ...
- Internet

Réseau privé (destiné à un usage privé, pour les grandes entreprises ou les administrations)

- Réseaux locaux d'entreprises, commutateurs téléphoniques privés (*IPBX IP Branch Exchange*), ...
- Réseaux WLAN (*Wifi*)

III. Transmission de l'information dans les réseaux

III.1. Supports de transmission

Le transport de l'information sur un réseau requiert tout d'abord l'usage d'un support de transmission

Plusieurs types de supports peuvent être utilisés:

- Paire torsadée (cuivre)
- Câble coaxial
- Fibre optique
- Voie hertzienne, paire de cuivre téléphonique, prise de courant EDF...

Les supports de transmission sont caractérisés par plusieurs paramètres physiques:

- Bande passante
- Atténuation et longueur maximale admissible
- Bruit/Interférences, ...

III. Transmission de l'information dans les réseaux

En pratique sur les réseaux locaux actuels, les taux d'erreurs bit sont de l'ordre de 10^{-9}

Pour la paire de cuivre téléphonique, de l'ordre de 10^{-4}

Type de support	Bande passante	Capacité	Distance maximale
Paire torsadée (Catégorie 5)	~ 100 MHz	100 Mb/s	centaine de mètres
Câble coaxial	[30MHz-3GHz]	1 Gb/s	sur 1 km (sans répéteur) 2 à 18 dB/km
Fibre optique	~GHz	~10 Gb/s	100km (sans répéteur) (0,3 dB/km)

Tableau 1: Quelques ordres de grandeurs

III. Transmission de l'information dans les réseaux

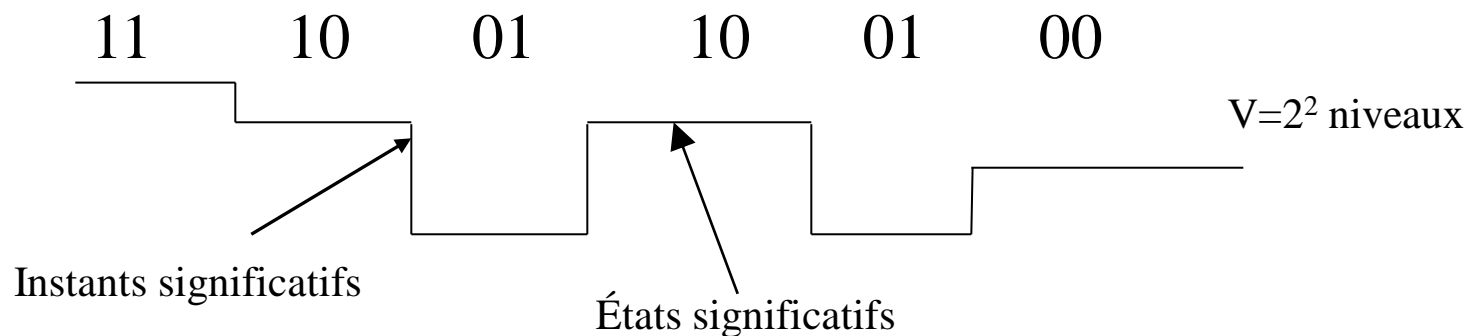
III.2. Rapidité de modulation et débit binaire :

Rapidité de modulation R

- Nombre de symboles émis par unité de temps (inverse de la durée du temps symbole) - s'exprime en bauds

Débit binaire D

- Quantité d'éléments binaires envoyés par unité de temps
- $D = R \log_2(V)$, V valence du signal,
- 1 symbole \rightarrow séquence binaire codée sur $\log_2(V)$ bits



III. Transmission de l'information dans les réseaux

III.3. Nyquist: capacité d'un support de transmission non bruité de bande passante W

$C = W \log_2(2^n)$ capacité exprimée en bit/s

W largeur de bande passante du support en Hz

1 symbole peut avoir 2^n niveaux du signal différents (valence)

Borne supérieure de la capacité.

III. Transmission de l'information dans les réseaux

III.4. Shannon: capacité d'un support de transmission bruité d(Bruit Gaussien additif) de largeur de bande W .

Capacité C du support de transmission (exprimés en bit/s ou en bps)

$$C=W.\log_2(1+S/B),$$

W bande passante du support en Hz

S/B rapport signal sur bruit

Le théorème de Shannon est utilisé pour déterminer la capacité du canal

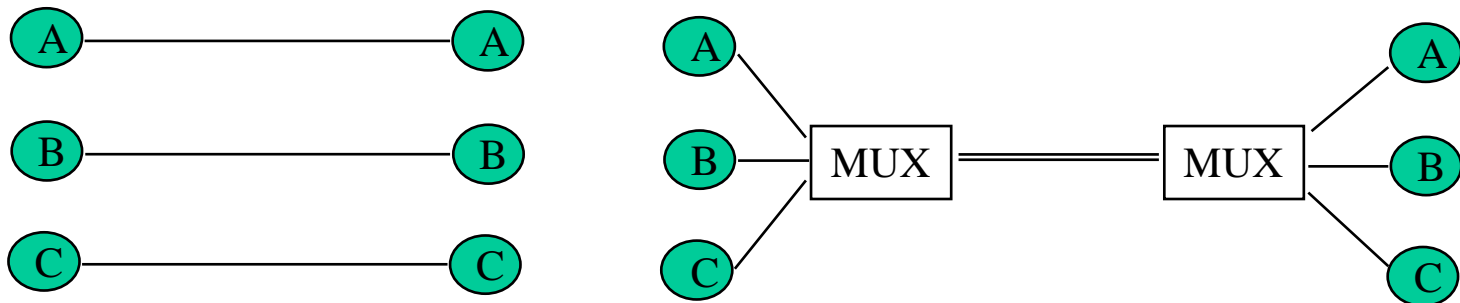
III. Transmission de l'information dans les réseaux

III.5. Multiplexage

Lorsque le support de transmission devient rare et onéreux (ce qui est souvent le cas ...), il devient nécessaire de partager un même support entre plusieurs utilisateurs pour rentabiliser l'investissement.

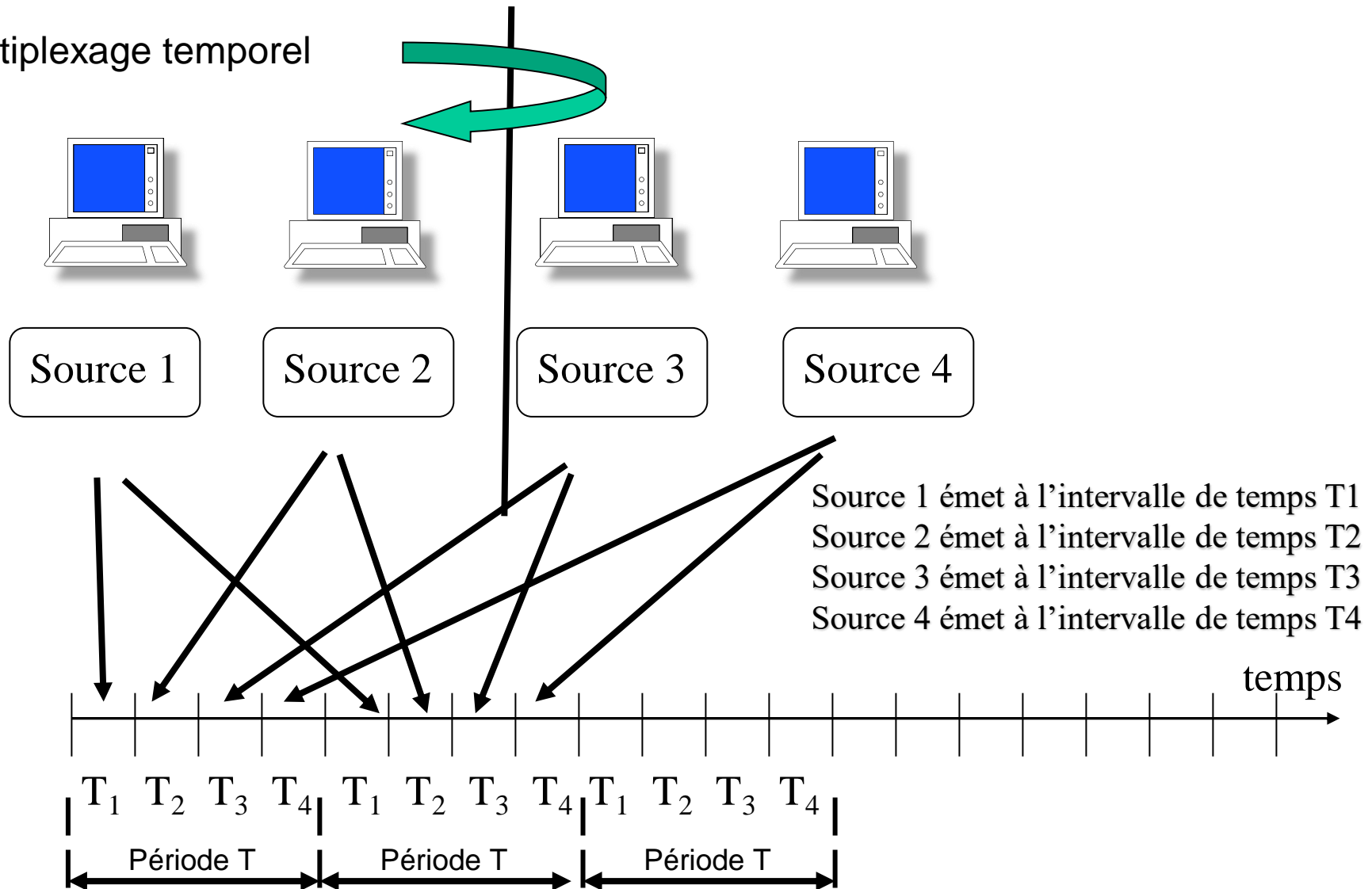
Les techniques de multiplexage permettent de réaliser ce partage:

- Multiplexage temporelle (dit *TDM Time Division Multiplex*)
- Multiplexage fréquentielle (dit *FDM Frequency Division Multiplex*)
- Multiplexage en longueur d'onde (dit *WDM Wavelength Division Multiplex*)



III. Transmission de l'information dans les réseaux

Multiplexage temporel



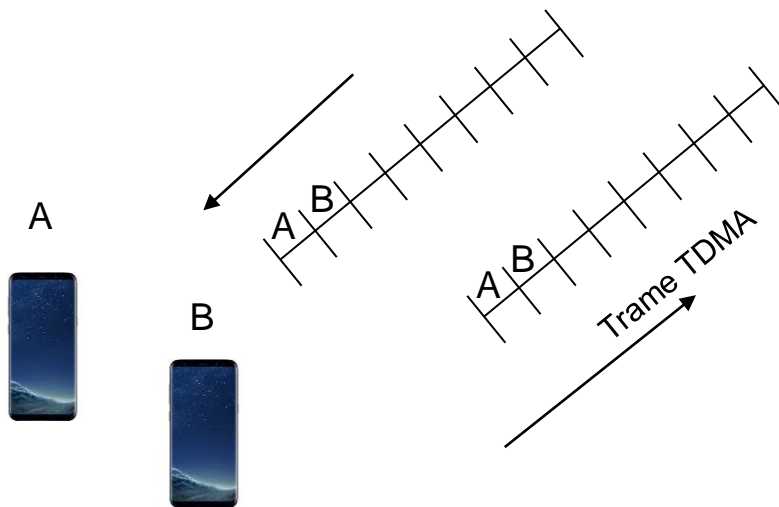
III. Transmission de l'information dans les réseaux

Les terminaux se partagent en temps un même support de transmission

Méthode d'accès largement utilisée dans les réseaux de télécommunications.

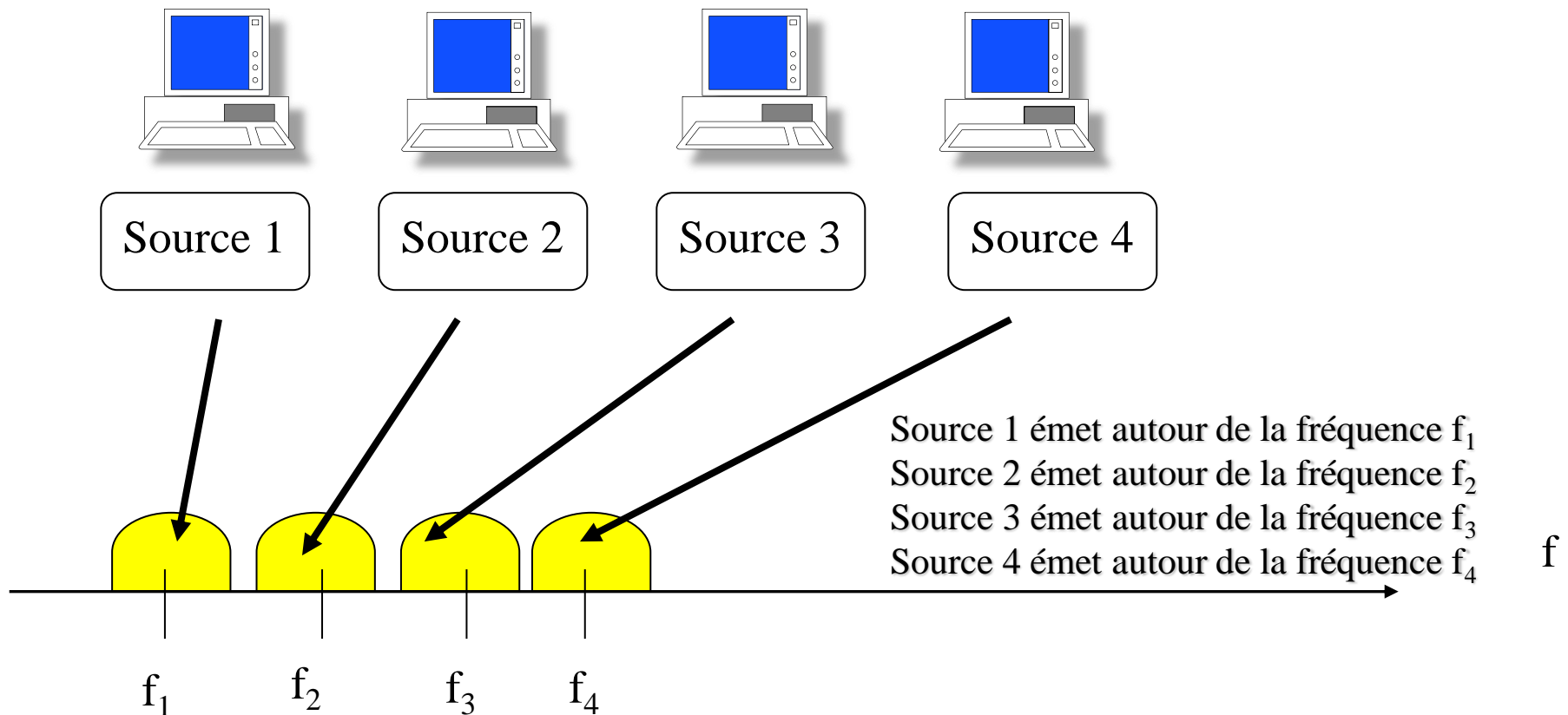
Exemples :

- GSM, GPRS (trames TDMA)



III. Transmission de l'information dans les réseaux

Multiplexage fréquentiel

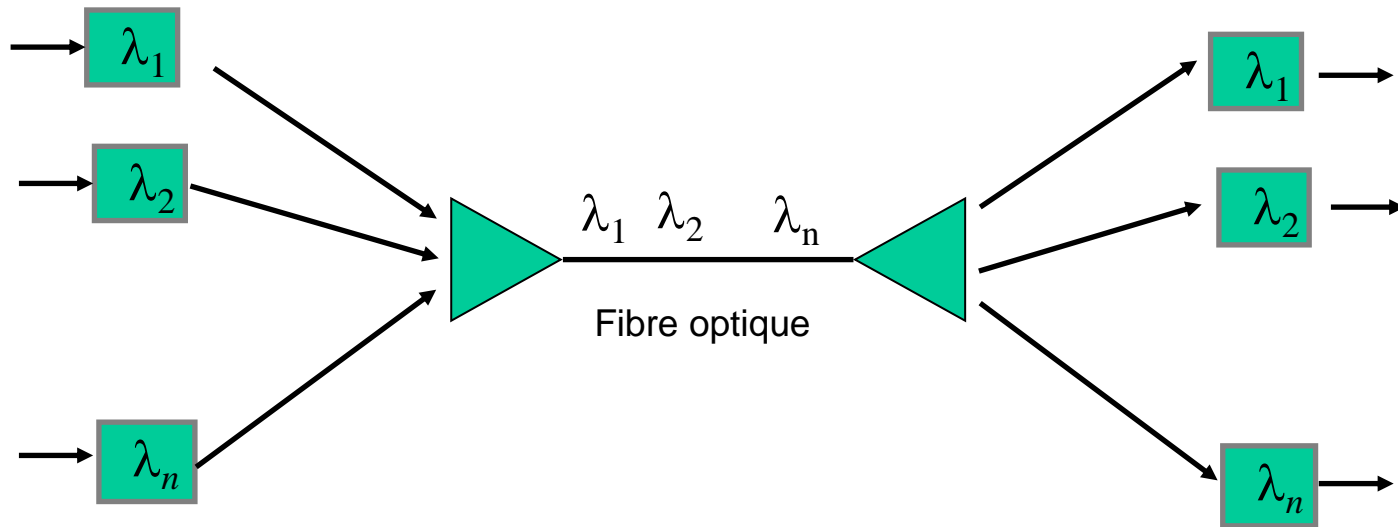


III. Transmission de l'information dans les réseaux

Chaque terminal utilise une bande de fréquence.

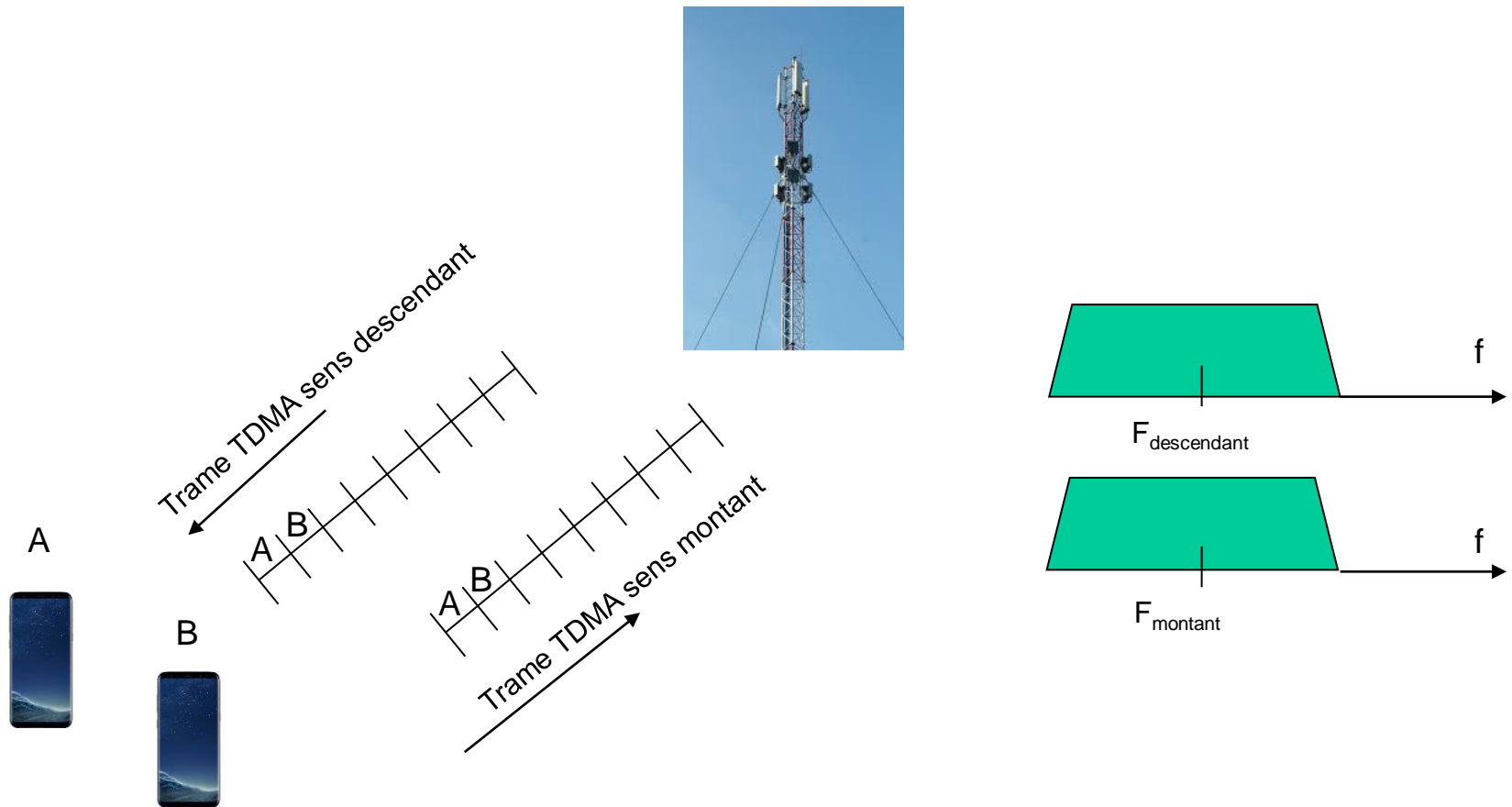
Exemples :

- Transmissions radiophoniques et télévisées
- Fibres optiques *WDM Wavelength Division Multiplexing*, *DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing*



III. Transmission de l'information dans les réseaux

Canalisation GSM/GPRS (FDMA pour les sous canaux à 200kHz)



III. Transmission de l'information dans les réseaux

III.6. Méthodes de transmission

Les réseaux de communication peuvent utiliser trois types de méthodes de transmission:

- Transmission synchrone
 - Instants d'émission de données = multiples de la période d'horloge
 - Flux d'éléments binaire continue (synchronisation)
 - Insertion de transitions d'horloge via un codage de ligne adapté
- Transmission asynchrone
 - Instants d'émission des données sont aléatoires
 - Chaque paquet contient une entête permettant au récepteur de détecter un début d'émission
- Transmission par trame
 - Les instants d'émission des trames sont quelconques
 - Détection du début de trame grâce à la présence d'un entête prédéfini
 - Horloge de l'émetteur récupérer à partie du code en ligne

III. Transmission de l'information dans les réseaux

... Méthodes de transmission

Exemples d'utilisation :

- La transmission asynchrone est utilisée sur des liaisons courte distance à débit faibles (liaison série RS232 entre un ordinateur et un périphérique)
De moins en moins utilisée au profit de techniques plus performantes (USB notamment)
- La transmission synchrone est adaptée pour les plus hauts débits et sur des liaisons plus longues que les liaisons asynchrones
(exemple de liaison *MIC Modulation par Impulsions codées* utilisée en téléphonie)
- La transmission par trame est également adaptée aux hauts débits et est notamment utilisée dans les réseaux locaux de type Ethernet.

III. Transmission de l'information dans les réseaux

III.7. Mode d'échanges

Il existe plusieurs modes d'échanges d'information entre deux terminaux:

- Transmission Half Duplex

Les terminaux peuvent émettre et recevoir des informations, mais à l'alternat.

Exemple: Cas des réseaux Ethernet 10 base-2, et des réseaux Ethernet 10 base-T raccordés à des hubs.

- Transmission Full Duplex

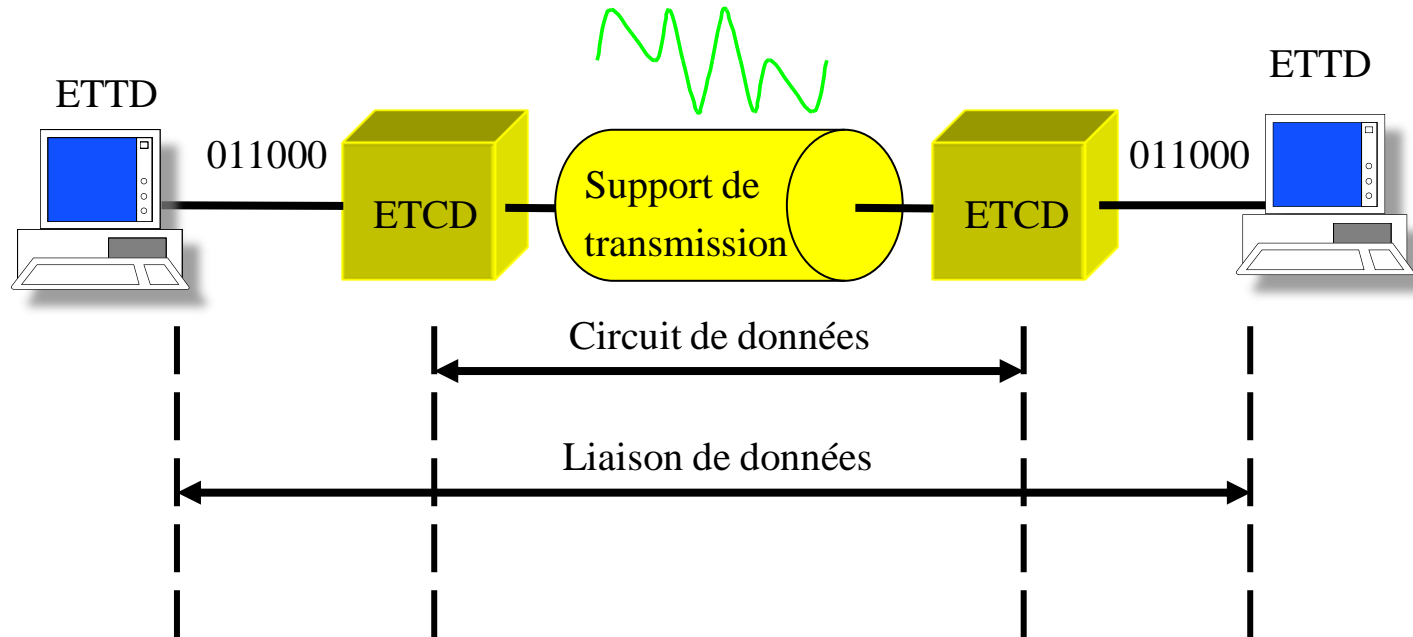
Exemple: Les terminaux peuvent émettre et recevoir des informations simultanément. Cas des réseaux ADSL, Ethernet 100 base-TX, Gigabit Ethernet, modem téléphoniques V90/V.92.

- Transmission Simplex

Il est possible d'envoyer l'information que dans un seul sens. Un terminal est spécialisé dans l'envoi d'information. L'autre ne peut que recevoir des données (réseaux de diffusion télévisées).

IV. Le circuit de données

IV.1. Un premier exemple de technique de transport : la liaison de données



Réseau utilisé pour le transport de données entre deux terminaux informatiques

IV. Le circuit de données

Un *ETTD* (*Equipement Terminal de Transmission de Données*) est un équipement qui est susceptible de transmettre des données sur un réseau (*exemple : ordinateurs, télétype, console vt100, ...*). Il est raccordé à un *ETCD*.

Un *ETCD* (*Equipement Terminal de Circuit de Données*) est un modem dont la principale fonction est d'adapter le signal à transporter aux caractéristiques du support utilisé afin de véhiculer l'information dans les meilleures conditions possibles. Il réalise pour cela un nombre important de traitements au niveau du signal à transporter (modulation, codage correcteurs d'erreurs, compression, ...).

Exemple:

Les modems analogiques (V90/V.92) et les modems ADSL sont des exemples de *ETCD*.

Une liaison entre deux *ETCD* est appelé circuit de données.

Une liaison entre deux *ETTD* est appelé liaison de données.

Cours II: Protocoles de liaison de données

Philippe Martins, Talal Achkar Diab
Département Informatique et Réseaux
Groupe RMS
Bureau 4B59

Objectifs du cours II

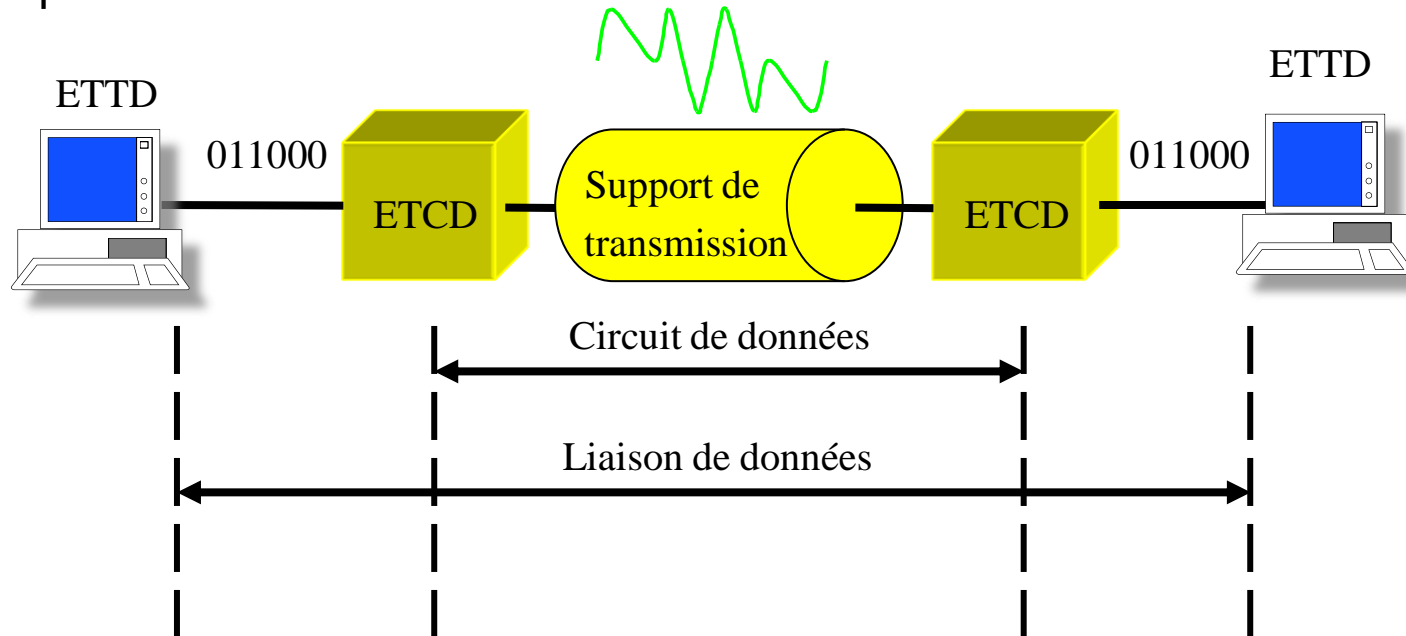
- Introduire la notion de protocole
- Maîtriser les différentes stratégies de délimitation de trames
- Rôle et fonctionnement du contrôle de flux
- Comprendre le fonctionnement des différents mécanismes de reprise sur erreurs (contrôle d'erreurs) – Exemple du LAP-B
- Comprendre les contraintes existant entre taille de la fenêtre d'anticipation et la politique de retransmission
- Savoir dimensionner une fenêtre d'anticipation

Sommaire

- I. Définitions
- II. Mise en forme des données
- III. Nécessité du contrôle de flux
- IV. Contrôle d'erreurs
- V. Le protocole du bit alterné, ou Stop and Wait
- VI. Les protocoles à fenêtre
- VII. Le protocole LAP-B

I. Définitions

Protocole : « Un protocole est un ensemble de règles/procédures à respecter pour échanger des données dans de bonnes conditions entre deux équipements »



Un protocole « **de liaison de données** » a pour vocation essentielle de rendre fiable le transport d'information entre deux équipements utilisant un même circuit de données.

I. Définitions

Un protocole requiert de réaliser un certain nombre de procédures/traitements sur les équipements s'échangeant des informations. On appelle cet ensemble de procédures « **entité** ».

Les activités d'une entité sont souvent modélisées par des automates à états finis.

Les informations échangées entre les **entités de liaison de données** sont regroupées dans des structures appelées trames.

Les unités d'information de base des trames peuvent être

- des caractères (octets) : **protocole orienté caractère**
- des éléments binaires : **protocole orienté bit**

Il existe trois modes d'exploitation possibles de la liaison de données (pas nécessairement le même mode qu'au niveau circuit de données) :

- Simplex
- Half Duplex
- Full Duplex

II. Mise en forme des données – Délimitation des trames

Trames réduites à 1 caractère

Les données sont codées par des caractères transmis 1 à 1.

Utilisé pour le bas débit et les courtes distances.

Cas des transmissions asynchrones entre un ordinateur et un périphérique (terminal, imprimante) et du minitel.

II. Mise en forme des données – Délimitation des trames

Délimitation par caractères

Pour les protocoles orientés caractère, on utilise des caractères de début de trame et de fin de trame.

Exemple : code CCITT n°5

STX Start of Text (code ASCII 03) pour indiquer les débuts de trames et
ETX End of Text (code ASCII 02) pour les fins de trames.

Problème: On est obligé de réserver un certain nombre de caractères pour pouvoir entre autres marquer les débuts et fins de trames.

Ces caractères sont appelés des caractères de commande.

Pour le code CCITT N°5, les 32 caractères dont la valeur hexadécimale est inférieure à 20 (codes 00 à 1F).

Pour pouvoir utiliser tous les caractères (octets) possibles dans la partie information de la trame, on introduit l'utilisation d'un caractère de transparence (**DLE Data Link Escape**, on parle aussi de caractère d'échappement).

II. Mise en forme des données – Délimitation des trames

Délimitation par caractères - Exemple :

- Info à transmettre (en hexadécimal) : 31 03 32 10 4D 10
(en ASCII): 1 ETX 2 DLE M DLE
- En l'absence de mécanisme de transparence la séquence suivante serait envoyée:
STX 1 ETX 2 DLE M DLE ETX
=> problème car le premier ETX serait interprété comme une fin de trame
- Solution: insérer un caractère de transparence DLE devant chaque occurrence de caractère de commande ou de transparence.

STX 1 **DLE** ETX 2 **DLE** DLE M **DLE** DLE ETX

II. Mise en forme des données – Délimitation des trames

Délimitation par séquence binaire

Dans les protocoles orientés bits, on utilise une séquence de bits spécifique, appelée **fanion** pour indiquer les débuts et les fins des trames.

Exemple: Le fanion = 01111110, inséré au début et à la fin de chaque trame.

Avantage : Permet d'avoir des trames de longueur quelconque.

Inconvénient: Une séquence de 6 bits d'information consécutifs de valeur 1 risque d'être interprétée comme un fanion. Il faut introduire une méthode de transparence (bit stuffing)

L'émetteur insère un zéro après cinq 1 consécutifs.

Le récepteur supprime tout zéro placé à la suite de cinq 1 consécutifs.

Exemple :

Trame à transmettre = **01111110** 011101110101010101111110011110 **01111110**

Données transmises = **01111110** 0111011101010101011111010011110 **01111110**

Méthode utilisée pour le protocole LAP-D, LAP-B,

II. Mise en forme des données – Délimitation des trames

Délimitation par transmission de la longueur

Utilisation d'un fanion pour indiquer le début de la trame
+ longueur de la trame codé dans un champ longueur

Avantage: Il n'est pas nécessaire d'introduire un mécanisme de transparence

Inconvénient: trames de longueur limitée et méthode sensible aux erreurs de transmission si altération du champ longueur de trame

Cette méthode est utilisée dans certains réseaux locaux et radiomobiles.

II. Mise en forme des données – Délimitation des trames

Utilisation de techniques de transmission

Utilisation d'une séquence de délimitation représentée par des états spécifiques du signal que l'on ne retrouvera jamais dans le reste de la trame.

Pas besoin de mécanisme de transparence.

Exemple : violation du principe de l'alternance des impulsions positives et négatives dans le cas d'un code bipolaire.

Technique très souvent utilisée dans le monde des réseaux locaux (par exemple Ethernet).

II. Mise en forme des données – Structure générale d'une trame

Les trames sont structurées en champs dont la signification et le contenu est précisé par le protocole.

Exemples de champs :

- champ adresse source
- champ adresse destination
- champ longueur de trame
- champ type de la trame
- champ information



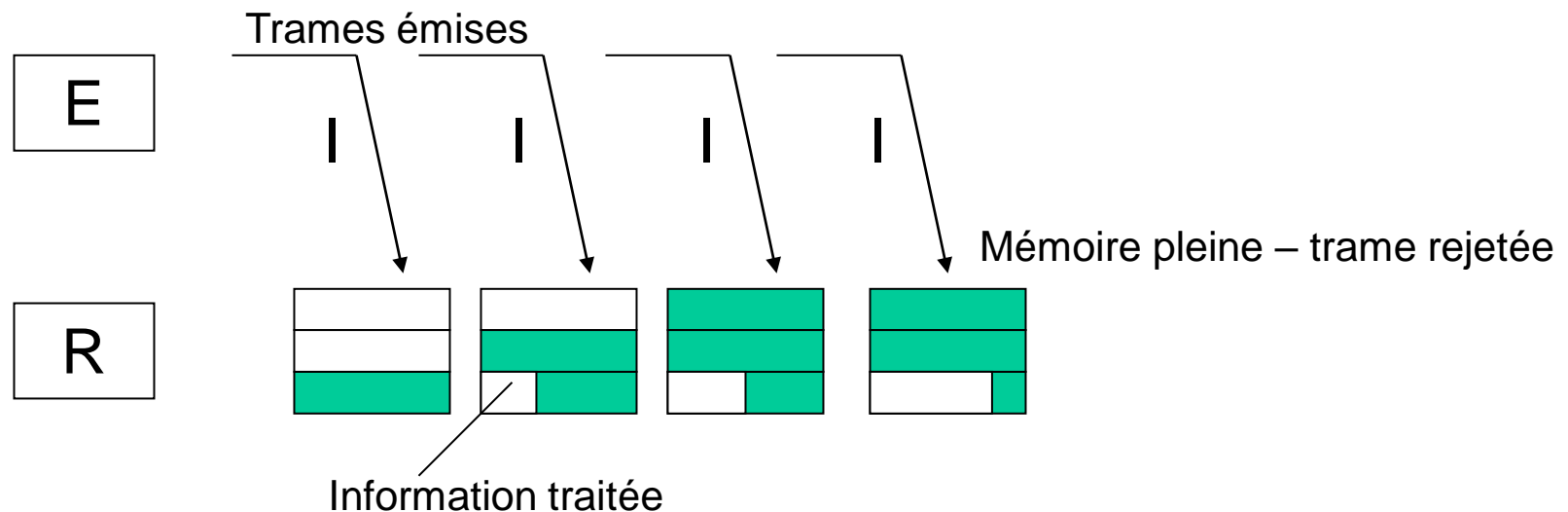
III. Nécessité du contrôle de flux

On considère un émetteur E et un récepteur R reliés par un circuit de données parfait (pas d'erreurs de transmission)

E découpe les données en trames d'information (notées I) et les envoie les unes à la suite des autres.

R garde en mémoire les trames reçues et les traite. Si le rythme d'émission de E est plus rapide que le rythme de traitement des données par R, la mémoire de R risque de saturer et causer ainsi une perte de données.

Il faut donc mettre en place un mécanisme pour contrôler le rythme d'émission des informations : **le contrôle de flux**.



III. Mécanisme du contrôle de flux

On introduit deux trames, dites **de trames supervision** :

RR : Receiver Ready

RNR : Receiver Not Ready

Ces trames ne transportent pas d'information utile.

Elles sont générées et exploitées par le protocole pour la gestion du dialogue.

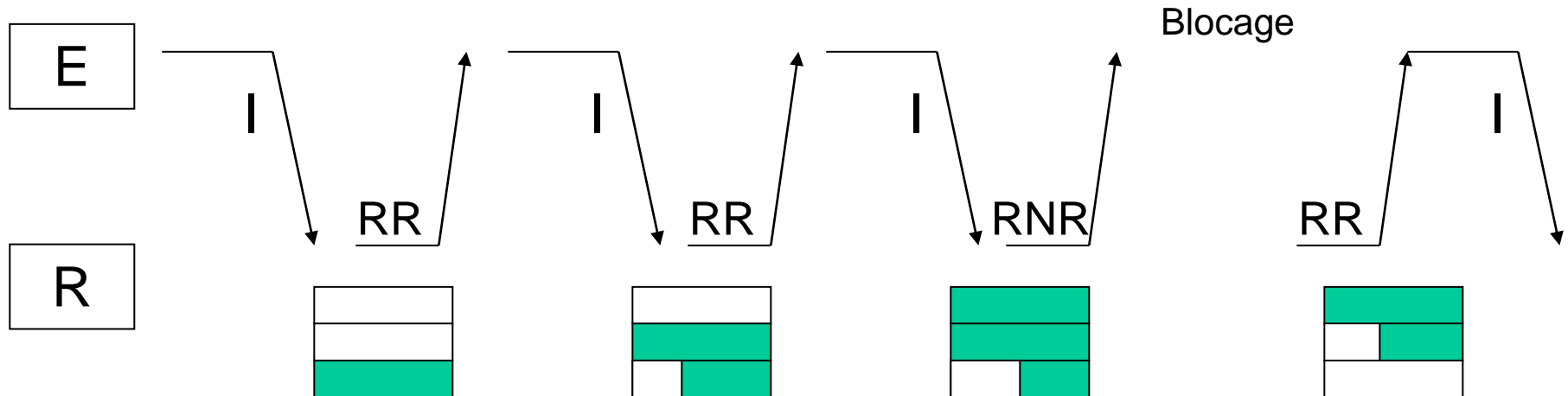
Elles sont invisibles pour l'utilisateur.

III. Mécanisme du contrôle de flux

A chaque réception de trame, la station R envoie

- une trame RR si elle est prête à accepter d'autres trames,
- une trame RNR sinon

Après l'émission d'une trame RNR, R envoie RR dès qu'elle est de nouveau prête à recevoir une nouvelle trame.



Il existe des variantes de ce mécanisme :

- Le récepteur s'abstient d'envoyer des trames RR dans le cas général. Quand la mémoire disponible descend au dessous d'un seuil, elle envoie une ou plusieurs RNR, suivies de RR quand la mémoire est libérée.
- Le récepteur transmet de façon continue des RR ou des RNR (cas du protocole XON/XOFF entre PC et imprimante)

IV. Le contrôle d'erreurs - Principe

Les supports de transmission déforment les signaux qu'ils transportent. Le bruit et les perturbations de l'environnement font que certains bits sont mal reçus.

Le rôle principal d'un protocole de liaison de données est de détecter et corriger ces erreurs :

- L'émetteur protège les données transmises par une redondance.
- Le récepteur détecte la validité de la trame reçue et en informe l'émetteur par un mécanisme d'acquittement.
- L'émetteur répète les trames erronées.

C'est le principe du *Automatic Repeat Request* (ARQ)

IV. Le contrôle d'erreurs – Détection des erreurs

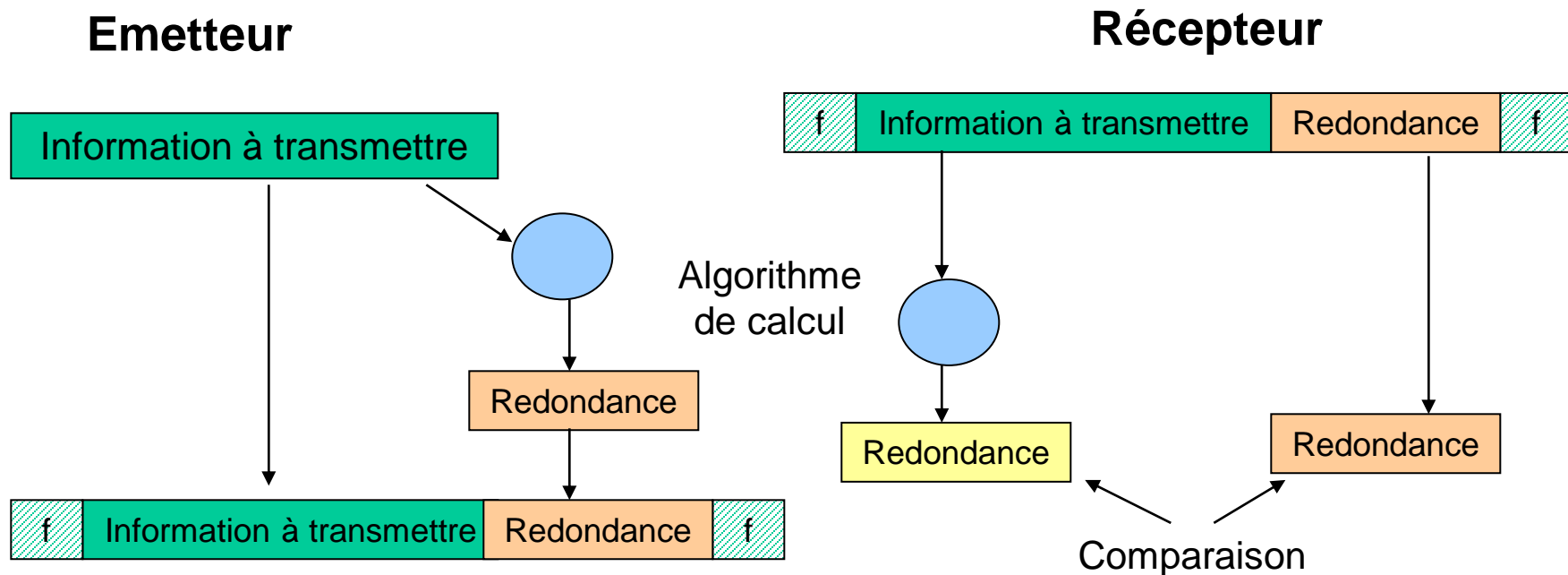
Le protocole spécifie un algorithme pour le calcul de la redondance.

L'émetteur calcule la redondance et l'insère dans un champ de la trame.

Le récepteur applique le même algorithme aux données et compare le résultat à la redondance contenue dans la trame.

Si les deux sont identiques, on estime que la trame est bien reçue.

S'ils sont différents, la trame est erronée. Elle est entièrement rejetée.



IV. Le contrôle d'erreurs – Calcul de la redondance

Protection au niveau du code

Une protection au niveau du code consiste à organiser une redondance interne au code utilisé, où seules quelques combinaisons binaires possibles sont retenues comme valides.

On parle de *Longitudinal Redundancy Checking* (LRC)

Par exemple, on rajoute un bit de parité à chaque caractère transmis. Pour chaque caractère, on fait la somme des bits représentant ce caractère.

Si la somme est paire, le bit de parité est 0.

Si la somme est impaire, le bit de parité est 1.

(cas du code CCITT n°5)

exemple : le caractère M, est codé par 1001101. Le bit de parité est 0.

On transmet 10110010

7 bits d'information en commençant par le bit de poids faible puis le bit de parité.

Inconvénient : les erreurs doubles ne sont pas détectées.

IV. Le contrôle d'erreurs – Calcul de la redondance

Contrôle au niveau de la trame – Contrôle de parité transversale

On forme un mot de contrôle en faisant la somme modulo 2 des bits de même rang. On parle alors de parité verticale Vertical Redundancy Checking (VRC). Souvent, LRC et VRC sont utilisées en même temps. On effectue également la somme de tous les bits de parité.

Exemple :

On veut émettre les caractères L, 2 et M, de codes respectifs 4C, 32, 4D. Les bits de parité sont respectivement 1, 1, 0.

<u>1</u> 1 0 0 1 1 0 0	Caractère L + parité 1
<u>1</u> 0 1 1 0 0 1 0	Caractère 2 + parité 1
<u>0</u> 1 0 0 1 1 0 1	Caractère M + parité 0

<u>0 0 1 1 0 0 1 1</u>	VRC

La suite binaire transmise est

0 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0 1 1 0 1 1 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 1 1 0 0
en commençant par les bits de poids faible

IV. Le contrôle d'erreurs – Calcul de la redondance

Contrôle au niveau de la trame – Contrôle de parité polynomial appelé aussi contrôle cyclique, *Cyclic Redundancy Checking* (CRC)

On fait correspondre à la trame à transmettre un polynôme $P(x)$ tel que le coefficient de degré i corresponde à la valeur du $i^{\text{ème}}$ bit.

Exemple :

la séquence 1 0 0 1 1 0 0 1 correspond au polynôme $P(x) = x^7 + x^4 + x^3 + 1$

Les calculs sur ces polynômes se font modulo 2.

On choisit un polynôme $G(x)$ de degré r , appelé polynôme générateur. $G(x)$ est caractéristique de l'algorithme CRC.

A l'émission, on divise le polynôme $x^r \cdot P(x)$ par $G(x)$. On obtient alors un reste $R(x)$.
 $x^r \cdot P(x) = G(x) \cdot Q(x) + R(x)$

On transmet alors la séquence binaire correspondant au polynôme

$$T(x) = x^r \cdot P(x) + R(x) = G(x) \cdot Q(x)$$

Ce polynôme est divisible par $G(x)$

IV. Le contrôle d'erreurs – Calcul de la redondance

Contrôle au niveau de la trame – Contrôle de parité polynomial (suite)

Soit $E(x)$ le polynôme correspondant aux erreurs introduites par le circuit.
Les données reçues correspondent au polynôme $S(x) = T(x) + E(x)$

A la réception, on divise $S(x)$ par $G(x)$ et on obtient un reste $R_1(x)$
$$S(x) = G(x) \cdot Q_1(x) + R_1(x)$$

Si $R_1(x)$ est nul, on considère que $E(x)$ est nul.
Sinon, $E(x)$ n'est pas nul et la trame est considérée comme erronée.

IV. Le contrôle d'erreurs – Calcul de la redondance

Contrôle au niveau de la trame – Contrôle de parité polynomial (suite)

Exemple :

Soit la séquence binaire à émettre 1000001110000100
associée au polynôme $P(x) = x^{15} + x^9 + x^8 + x^7 + x^2$

Soit le polynôme générateur $G(x) = x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$

La division de $x^{12} \cdot P(x)$ par $G(x)$ donne

$$R(x) = x^{11} + x^9 + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$$

On transmet

$$\begin{array}{cccccccccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

$x^{12} \cdot P(x)$ $R(x)$

IV. Le contrôle d'erreurs – Gestion des acquittements

Il est possible d'utiliser les mêmes trames de supervision RR et RNR utilisés pour le contrôle de flux pour émettre les acquittements.

Comportement du récepteur

Lorsque le récepteur reçoit une trame correcte, elle émet une trame RR ou RNR suivant l'état de sa mémoire.

S'il reçoit une trame erronée, il ne mémorise pas la trame et n'envoie pas d'acquiescement.

Comportement de l'émetteur

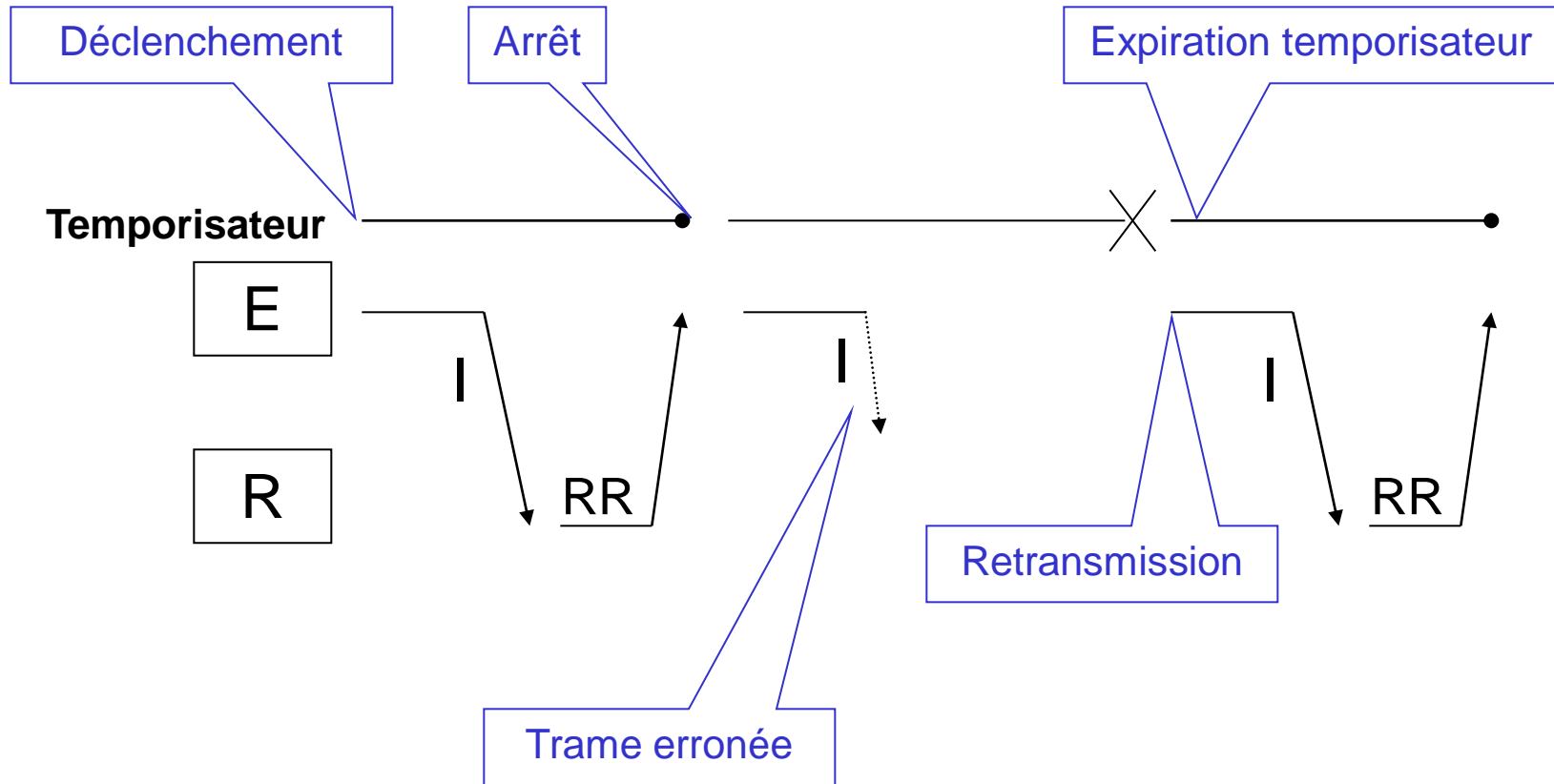
A l'émission de chaque trame, l'émetteur lance une temporisation correspondant à l'attente maximale d'un acquiescement de la part du récepteur.

Quand il reçoit un acquiescement, il arrête le temporisateur et émet la trame suivante.

Si à l'échéance de la temporisation, aucun acquiescement valide n'a été reçu, l'émetteur retransmet la trame précédente.

Après un certain nombre de retransmissions échouées, la connexion est abandonnée.

IV. Le contrôle d'erreurs – Gestion des acquittements

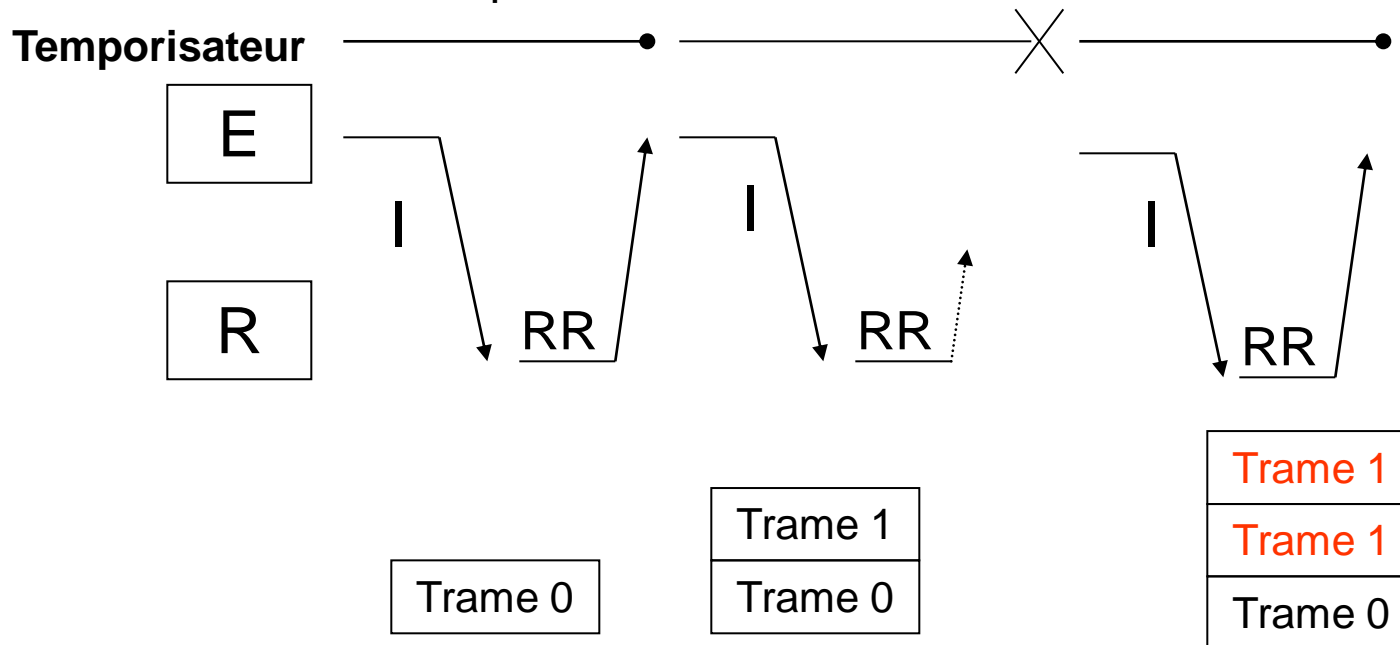


IV. Le contrôle d'erreurs – Nécessité de numéroté les trames

Il est possible qu'une trame soit bien reçue mais que l'acquittement soit erroné.

Dans ce cas, la trame sera retransmise et le récepteur aura deux copies de la même trame.

Il est donc nécessaire de numéroté les trames pour que le récepteur puisse reconnaître deux copies de la même trame.



IV. Le contrôle d'erreurs – Numérotation des trames

Chaque trame d'information est numérotée.

Le numéro est placé dans l'en-tête de la trame.

La variable donnant le numéro de la trame est appelée $N(S)$, codée sur un certain nombre de bits M .

La numérotation se fait alors modulo 2^M .

La numérotation impose des compteurs au niveau de chaque station, pour mémoriser le numéro de la trame en cours.

La présence de compteurs impose l'initialisation du dialogue pour que les deux stations se mettent d'accord sur les valeurs initiales des compteurs.

On parle de **protocole orienté connexion**.

IV. Le contrôle d'erreurs – Numérotation des trames

Comportement de l'émetteur

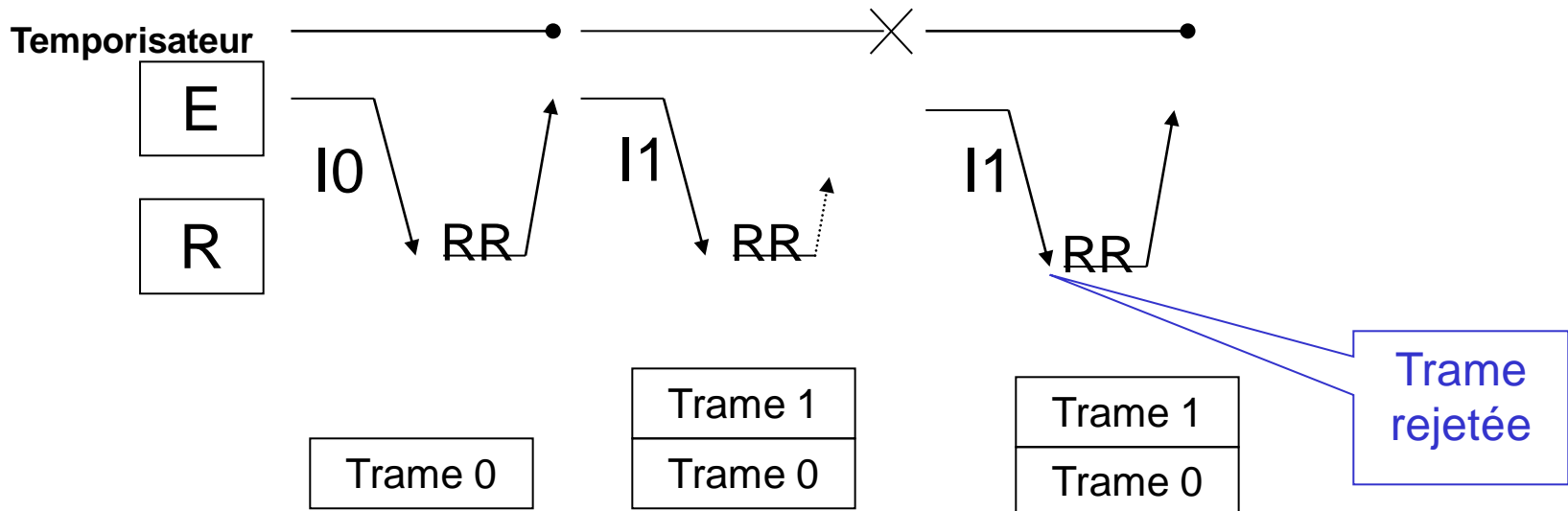
Pour toute nouvelle émission, l'émetteur émet la trame en insérant la valeur du compteur dans l'en-tête, puis incrémente le compteur.

Pour une retransmission, l'émetteur émet la trame sans modifier le compteur.

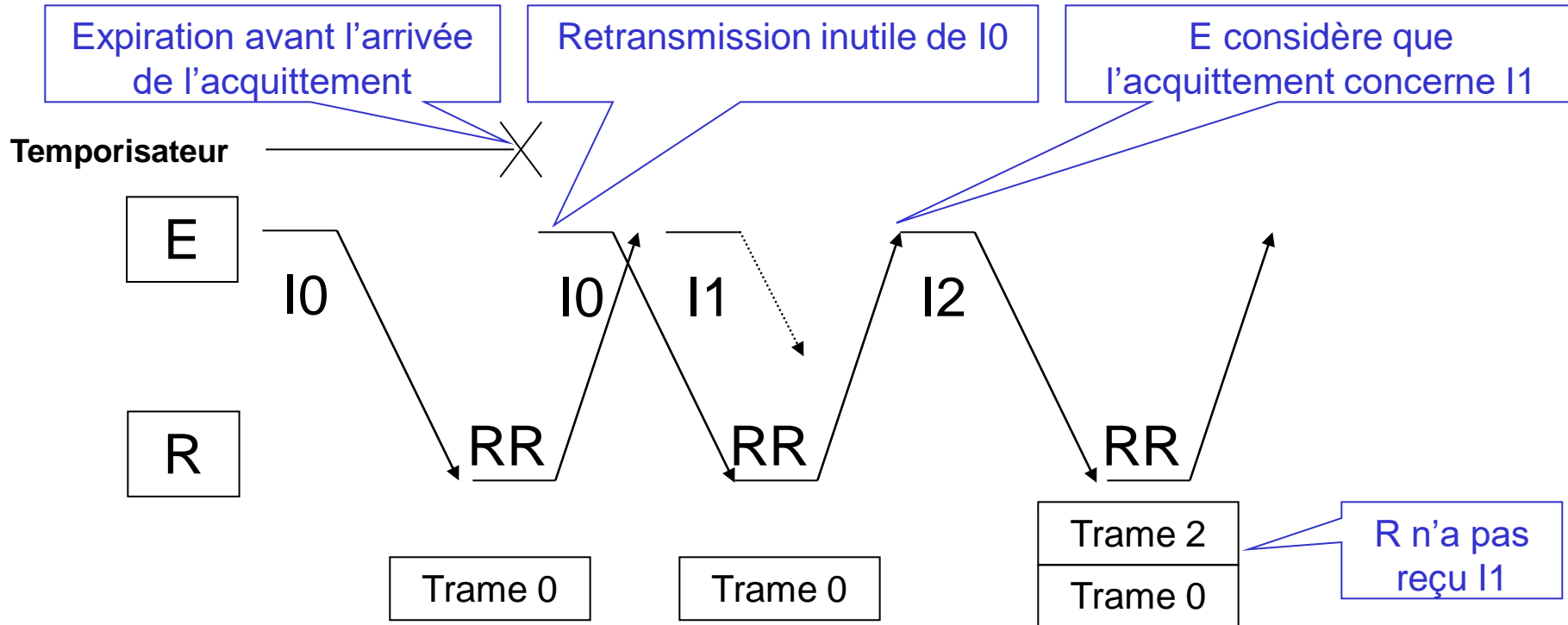
Comportement du récepteur

Le récepteur teste la valeur de $N(S)$. Si elle est égale à la valeur de la trame précédente, la trame est dupliquée. Elle est alors rejetée.

Le récepteur émet une trame de supervision pour acquitter la trame reçue.



IV. Le contrôle d'erreurs – Nécessité de numéroté les acquittements



Une mauvaise valeur du temporisateur peut entraîner un dysfonctionnement du protocole.

Il faut préciser dans la trame d'acquittement quelle trame d'information elle acquitte.

V. Le protocole du bit alterné, ou Stop and Wait

Les trames d'information portent le numéro $N(S)$, codé sur 1 bit.

Les trames de supervision portent un numéro $N(R)$ tel que
la prochaine trame attendue doit porter un $N(S)$ de valeur égale à $N(R)$
Il signifie que toutes les trames qui précèdent $N(R)$ sont bien reçues.

Comportement de l'émetteur

A l'émission d'une trame, il garde en mémoire son $N(S)$ et lance une temporisation.

A la réception d'un acquittement,

Si $N(R)$ est supérieur d'une unité au $N(S)$ mémorisé,
il émet la trame suivante en incrémentant $N(S)$

Sinon, il ne fait rien.

A l'expiration de la temporisation, il retransmet la dernière trame émise.

Ainsi, après l'émission d'une trame, l'émetteur arrête l'émission et attend une réponse du récepteur ou l'expiration d'une temporisation.

On parle de protocole Stop and Wait.

Comme la numérotation se fait sur un seul bit, le protocole est aussi appelé protocole du bit alterné.

V. Le protocole du bit alterné, ou Stop and Wait

Comportement du récepteur

Lorsque le récepteur reçoit une trame correcte, il lit $N(S)$

Si $N(S)$ est égal au numéro de la dernière trame reçue
la trame est dupliquée donc rejetée.

Sinon,

Il mémorise la trame

Il incrémente de 1 son compteur interne

Il envoie une trame de supervision avec $N(R)$ égale à la valeur du compteur

Le stop and wait fonctionne bien pour les bas débits et les courtes distances (temps de propagation faibles).

Mais son efficacité est faible. Le canal reste inutilisé pendant l'attente de l'acquittement. La notion de fenêtre d'anticipation est introduite pour augmenter l'efficacité du protocole.

V. Les protocoles à fenêtre - Principe

Au lieu d'émettre une seule trame à la fois, l'émetteur a la possibilité d'émettre jusqu'à un nombre W de trames sans recevoir d'acquittement.

C'est le mécanisme de la fenêtre d'anticipation.

Dans ce cas, une trame de supervision n'acquitte plus une seule trame mais un ensemble de trames (toutes les trames inférieures à $N(R)$)

On appelle fenêtre d'émission l'ensemble des trames émises et pas encore acquittées.

Il existe 2 types de protocole à fenêtre, qui diffèrent par l'ARQ utilisé :

- Les protocoles Go-Back-N, où une erreur nécessite la retransmission de toutes les trames qui ne sont pas encore acquittées.
- Les protocoles de rejet sélectif, Selective Reject (parfois appelés selective repeat), où seules les trames erronées est retransmises.

VI. Les protocoles à fenêtre – Variables d'état de la fenêtre d'émission

La fenêtre d'émission correspond à l'ensemble des trames que l'émetteur a envoyé sans recevoir d'acquittement.

La taille maximale de la fenêtre d'émission est égale à la taille de la fenêtre d'anticipation.

L'état de la fenêtre d'émission est maintenu via deux variables d'état :

- $V(N)$: dernier numéro de trame acquittée en séquence
- $V(S)$: prochain numéro de trame à envoyer

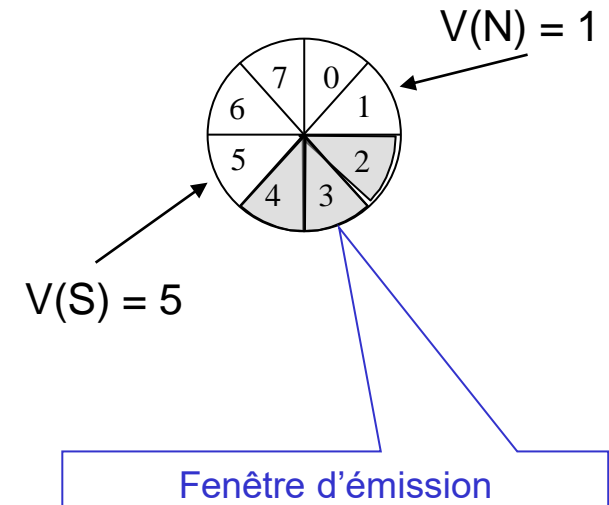
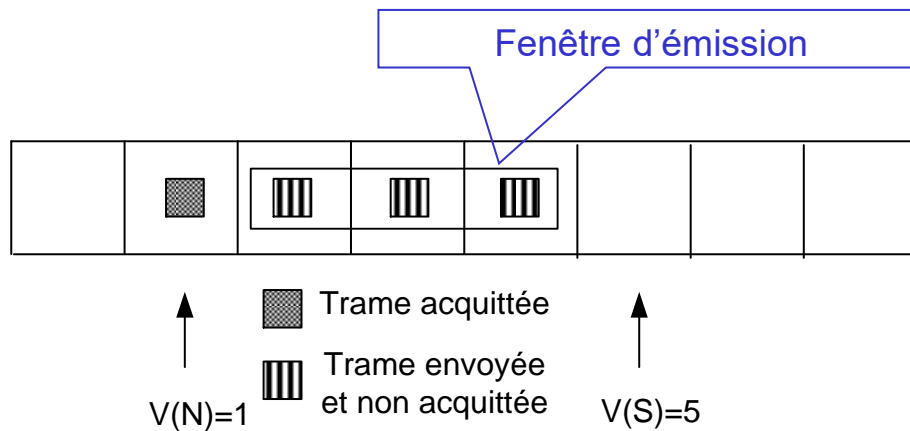
Si nous appelons W , la taille de la fenêtre d'anticipation, tout numéro de séquence $N(S)$ compris entre $V(N) + 1$ et $V(N) + W$ correspond à un numéro de trame valable du point de vue de l'émission.

Si $V(S)=V(N)+1$, la fenêtre d'émission est vide

VI. Les protocoles à fenêtre – Variables d'état de la fenêtre d'émission

Exemple : La numérotation se fait sur 3 bits. $W=3$ et $V(N)=1$.

Dans cet exemple la fenêtre d'émission est pleine ; l'émetteur doit donc attendre un acquittement avant de pouvoir émettre une nouvelle trame.



VI. Les protocoles à fenêtre – Variables d'état de la fenêtre de réception

La fenêtre de reception correspond à l'ensemble des trames que le recepteur peut recevoir de l'émetteur.

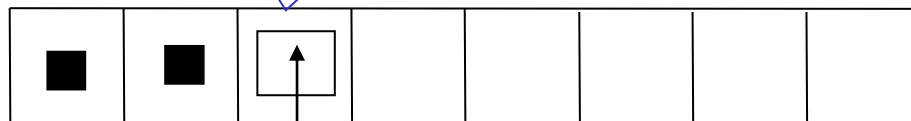
Le nombre de variables servant à la gestion de l'état de la fenêtre de réception dépend du type d'ARQ utilisé.

Cas du Go-Back-N

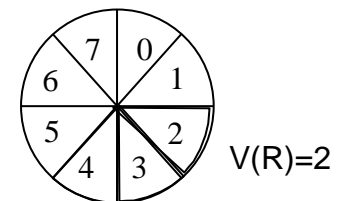
Si l'ARQ utilisé est de type Go Back-N, une seule variable suffit. Il s'agit de la variable $V(R)$ qui indique le prochain numéro de trame attendue en séquence.

La taille maximale de la fenêtre de reception est de 1.

Prochaine trame attendue



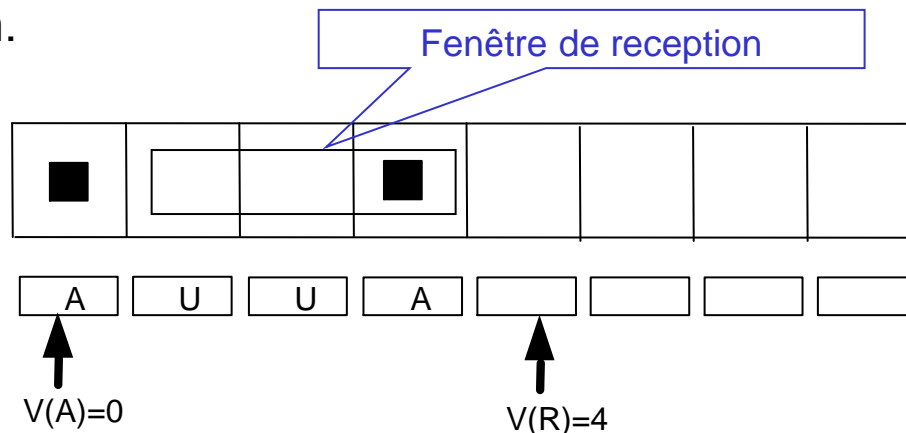
$V(R) = 2$



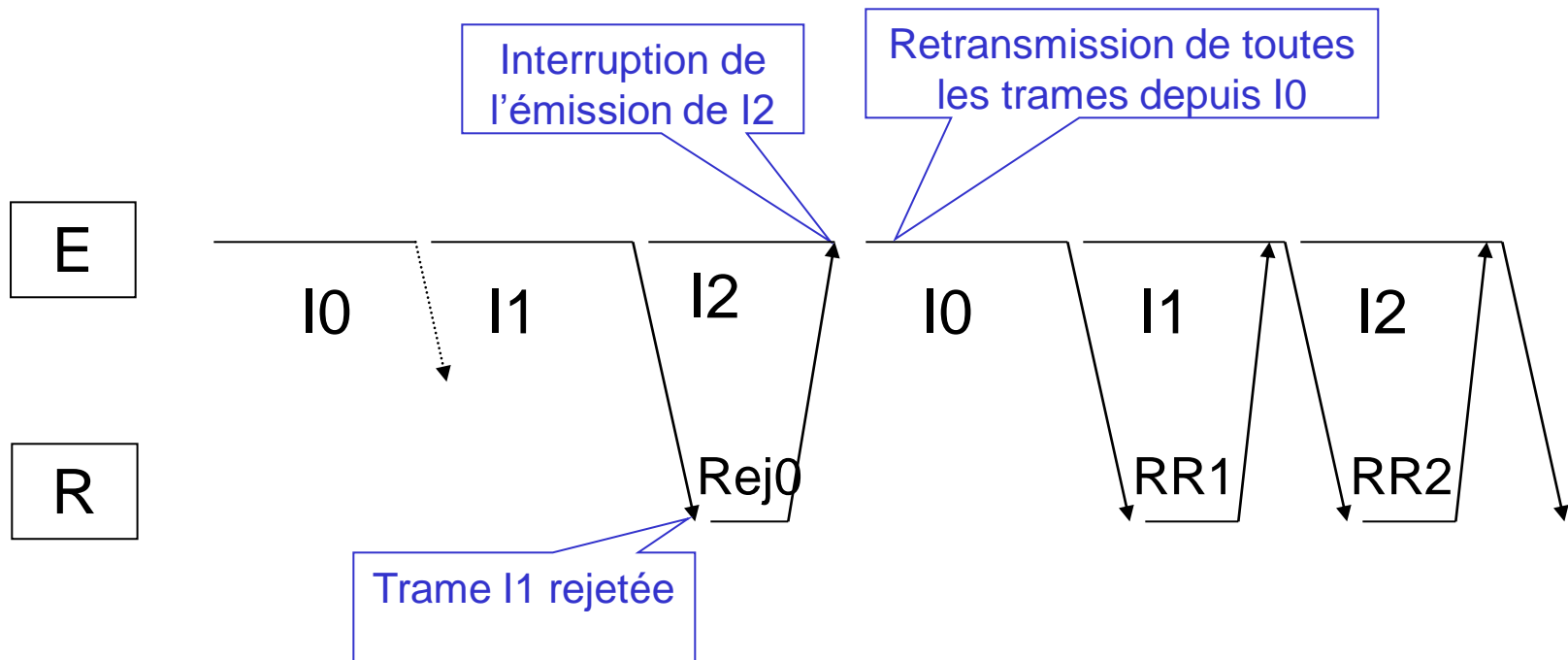
VI. Les protocoles à fenêtre – Variables d'état de la fenêtre de réception

Cas du selective reject

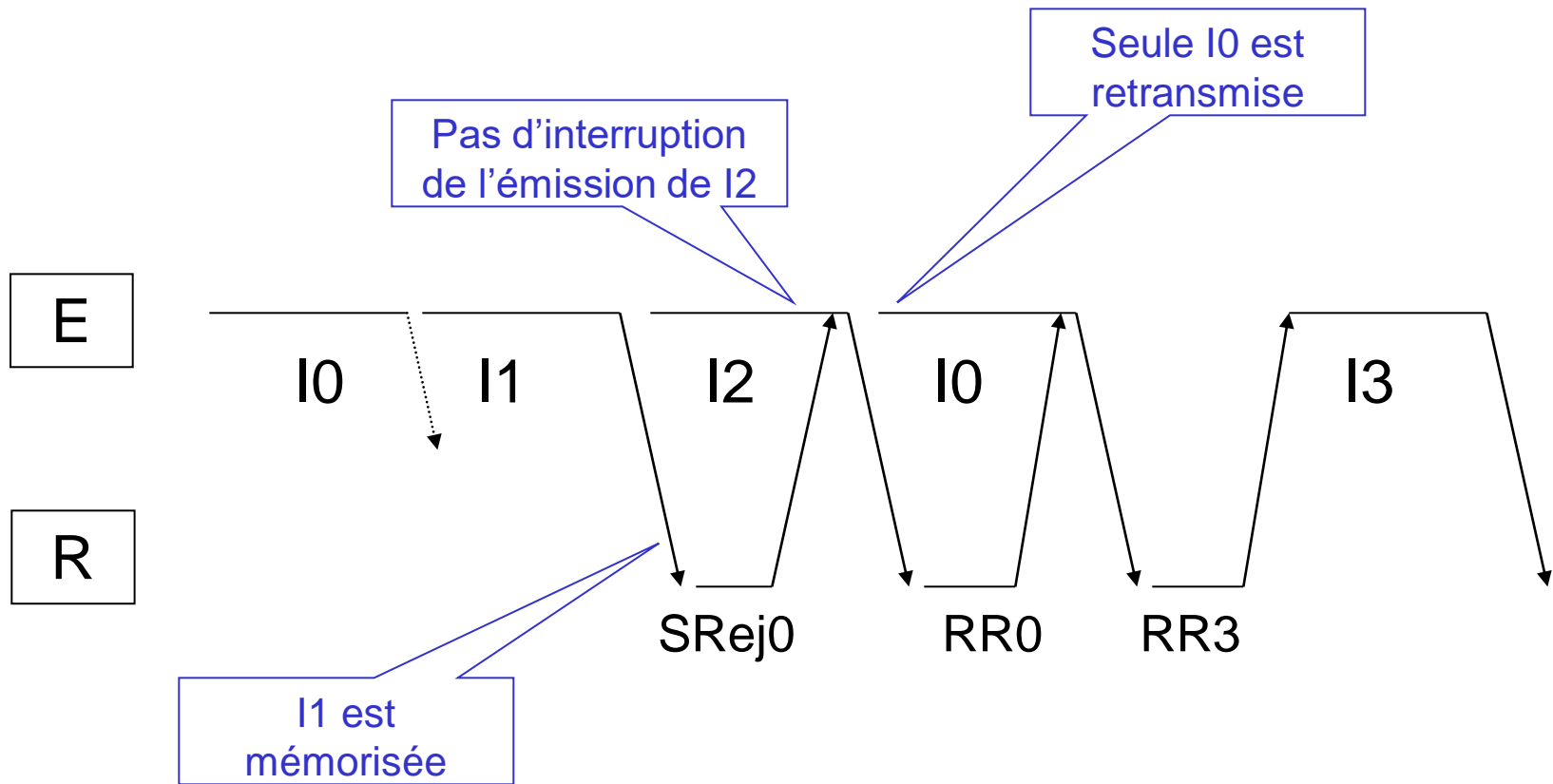
- $V(R)$: prochain numéro de trame attendue
- Une structure de données supplémentaire indique l'état de réception de chaque trame dans la fenêtre de réception. Les états possibles sont
 - A : pour une trame acquittée
 - U : pour indiquer la présence de trous dans la séquence de la fenêtre de réception.
- $V(A)$: indique le dernier numéro de trame reçue et acquittée en séquence.
- La taille maximale de la fenêtre de réception est égale à la taille de la fenêtre d'anticipation.



VI. Illustration du Go-Back-N



VI. Illustration du Selective Reject



VI. Taille maximale de la fenêtre d'anticipation

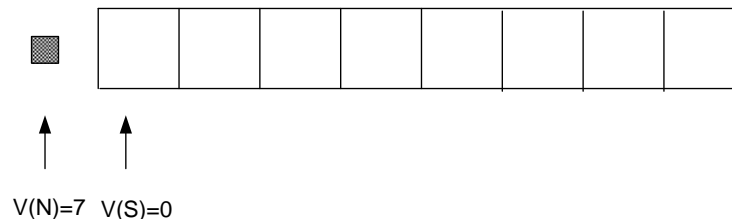
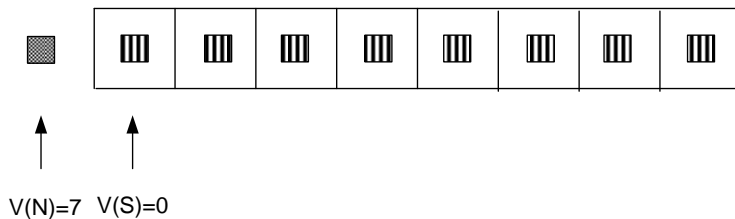
Cas du Go-Back-N

Si la fenêtre est de taille 8, il est possible d'émettre 8 trames successives sans recevoir d'acquittement. Dans ce cas, $V(S) = 0$ et $V(N) = 7$.

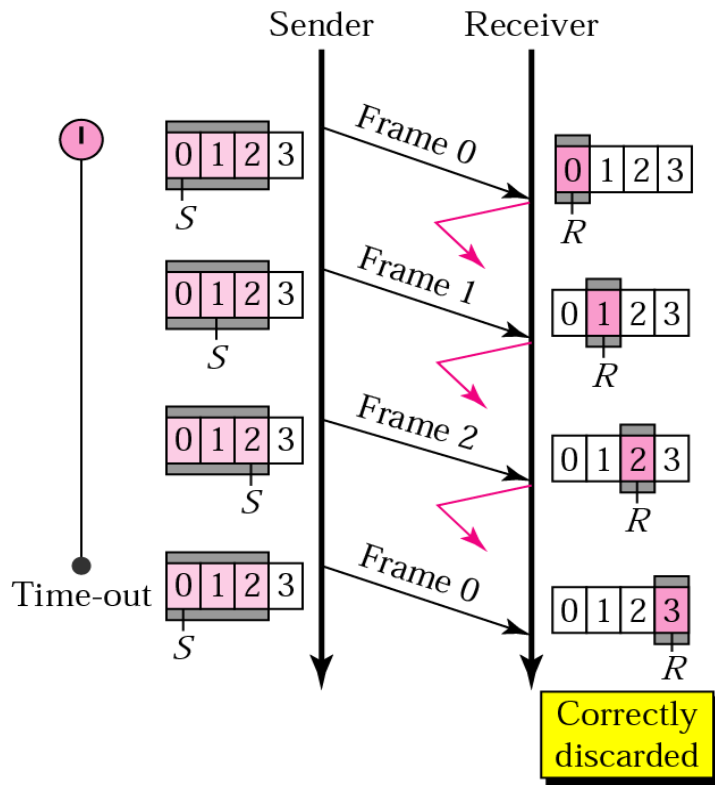
On peut retrouver les mêmes valeurs de $V(S)$ et $V(N)$ dans le cas où la trame 7 a été acquittée et que la prochaine trame à émettre est la trame 0.

A cause du modulo, l'émetteur ne peut pas distinguer les cas où la fenêtre est vide et le cas où la fenêtre contient 8 trames.

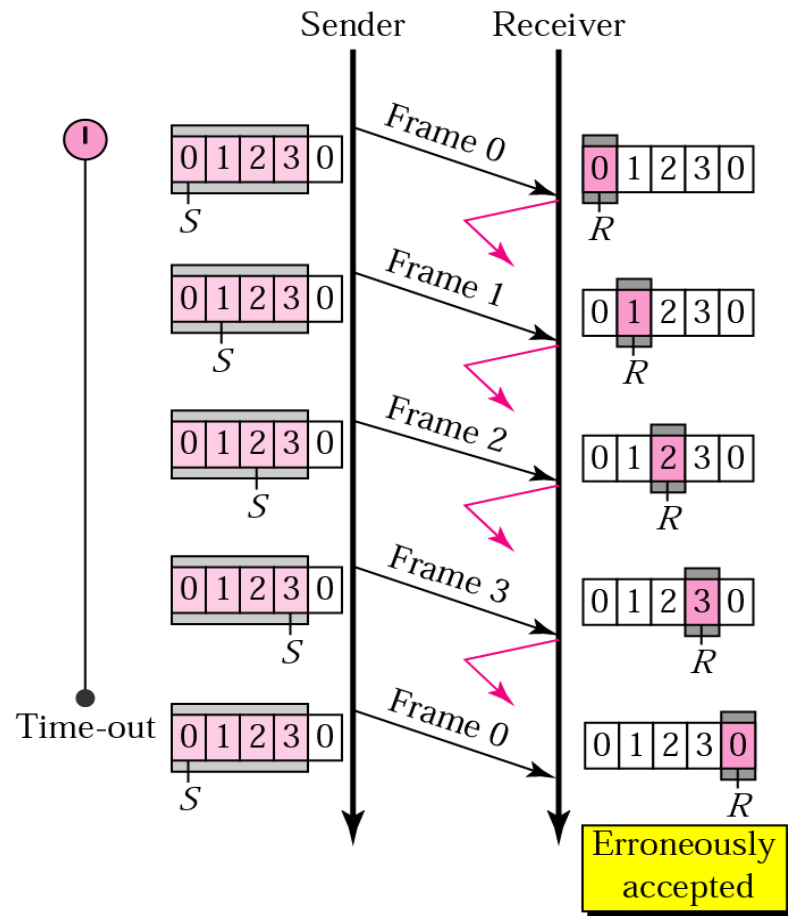
Pour lever l'ambiguïté, il est nécessaire de limiter la fenêtre à $N(S)_{\max} = 7$ trames dans notre cas.



VI. Taille maximale de la fenêtre d'anticipation



a. Window size $< 2^m$



b. Window size $= 2^m$

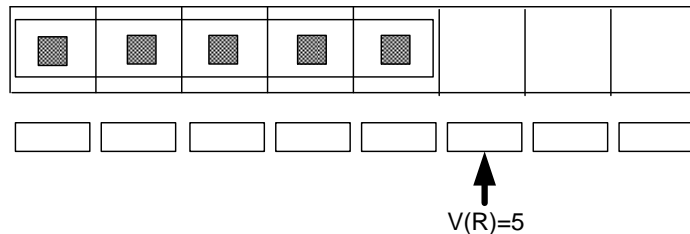
Source: Data communications and networking, Behrouz A. Forouzan

VI. Taille maximale de la fenêtre d'anticipation

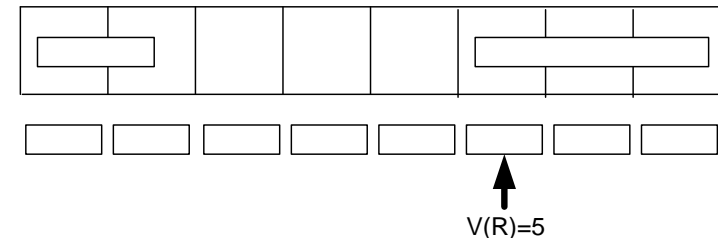
Cas du Selective Reject

On suppose qu'on peut envoyer cinq trames sans recevoir d'acquittement préalable (trame 0 à 4).

On suppose que toutes les trames ont été correctement reçues par le récepteur.



Etat de la fenêtre de réception avant l'acquittement



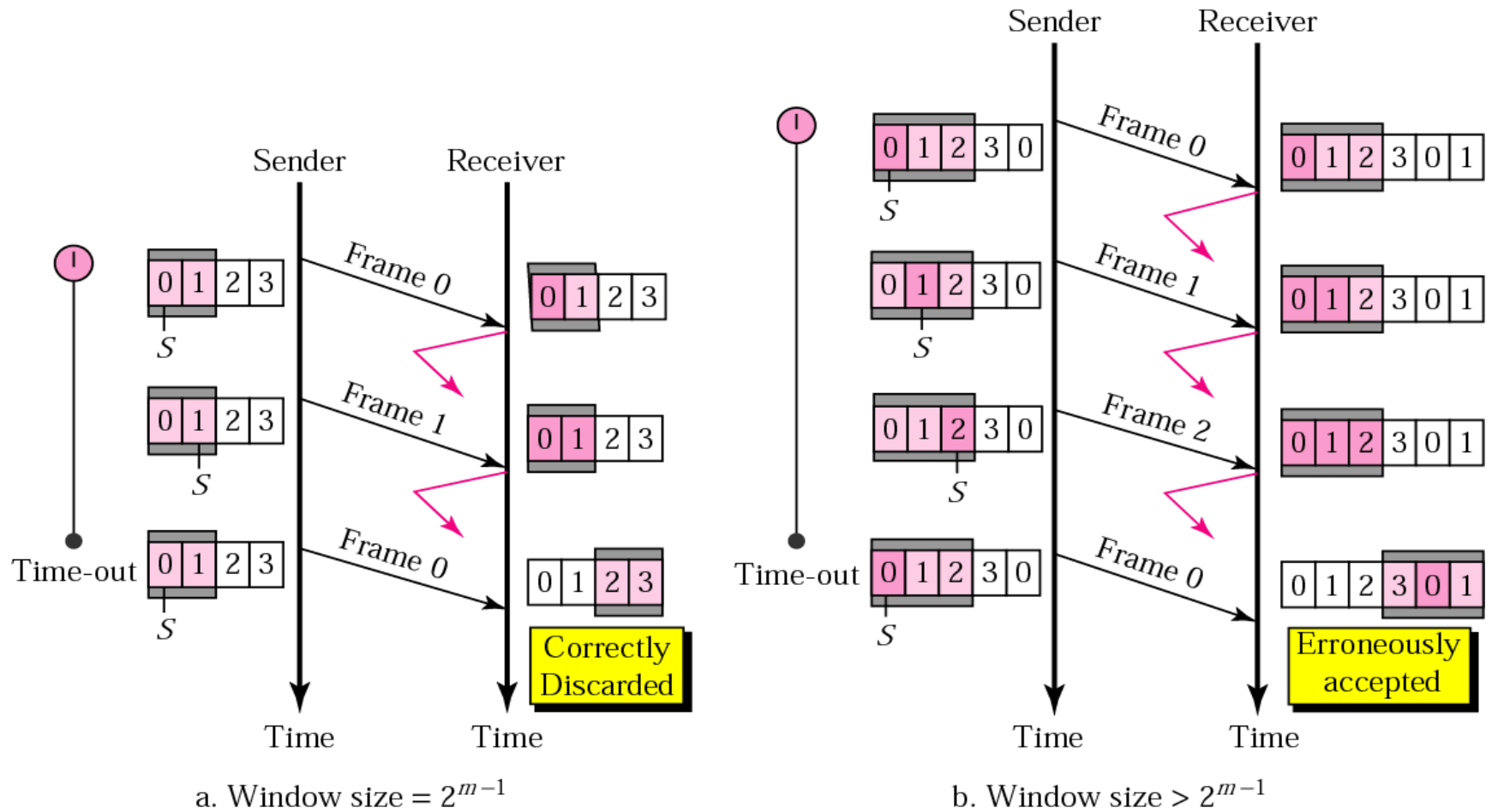
Etat de la fenêtre de réception après l'acquittement

Si l'acquittement est perdu, l'émetteur va retransmettre les 5 trames après expiration du temporisateur.

Mais les trames 0 et 1 sont des trames valides appartenant à la nouvelle fenêtre de réception. Donc la retransmission de ces trames est interprétée comme 2 nouvelles trames valides.

Pour lever cette ambiguïté, Il faut limiter la taille de la fenêtre à $(N(S)_{\max}+1)/2 = 4$ trames dans notre cas.

VI. Taille maximale de la fenêtre d'anticipation



Source: Data communications and networking, Behrouz A. Forouzan

VII. Le protocole LAP-B – Généralités

Le protocole HDLC (High Level Data Link Control), normalisé par l'ISO, est un protocole de référence très général.

Le protocole LAP-B (Link Access Procedure - Balanced) est un protocole de la famille HDLC, normalisé par l'ITU pour l'accès aux réseaux de données (X25). Il est de type go-back-N.

Balanced signifie que le protocole est symétrique, que les deux stations sont au même niveau hiérarchique. Contrairement à d'autres modes où il y a une station primaire (maître) et une station secondaire (esclave), chaque station peut se comporter à tout moment comme une station primaire ou secondaire. Ainsi, après l'établissement de la connexion, chaque station peut émettre des trames d'information à tout moment, sans attendre une autorisation.

LAP-B est utilisé sur des liens point à point full-duplex, mais il possède aussi un mode half-duplex.

VII. Le protocole LAP-B – Le format de trame

Fanion	Adresse	Contrôle	Information	FCS	Fanion
--------	---------	----------	-------------	-----	--------

01111110 1 octet 1 octet N octets 2 octets 01111110

La trame est délimitée par le fanion de début et de fin de trame 01111110.

Le champ Adresse (1 octet) identifie l'une des deux extrémités de la liaison.

Le champ Contrôle (1 octet) indique le type de la trame et contient les valeurs de N(S) et N(R). En « mode étendu », ce champ est de 2 octets.

Le champ Information contient les informations utilisateur. Il est facultatif et de longueur variable.

Le champ FCS (Frame Check Sequence) est la séquence de contrôle qui permet la détection des erreurs. Il est obtenu par un contrôle polynomial de polynôme générateur $x^{16}+x^{12}+x^5+1$.

VII. Le protocole LAP-B – Règles d'émission

Les données sont transmises en commençant par le bit de poids faible (du bit 1 au bit 8 de chaque champ).

Le mécanisme de transparence consistant à insérer un 0 après cinq 1 consécutifs est utilisé.

La transmission est continue. S'il n'y a aucune trame à transmettre, les équipements émettent des fanions consécutifs.

VII. Le protocole LAP-B – Les types de trames

Il existe 3 types de trames identifiées par le champ contrôle.

- La trame I : trame d'information qui permet la transmission des données utilisateur.
- Les trames S : trames de supervision qui gèrent les acquittement et le contrôle de flux.
- Les trames U : trames non numérotées (Unnumbered) qui ne transportent pas de données utilisateur. Elles sont utilisées pour les fonctions de contrôle de la liaison, comme l'établissement et la libération des connexions.

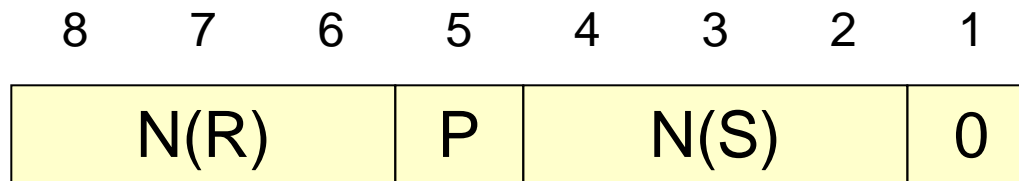
Les trames sont aussi classifiées en « commandes » ou « réponses ». Une station primaire envoie des commandes à la station secondaire qui doit répondre dans un bref délai par une trame de réponse.

Certaines trames ne peuvent être que des commandes, d'autres ne peuvent être que des réponses. Certaines trames peuvent être soit une commande, soit une réponse.

VII. Le protocole LAP-B – La trame d'information

La trame I permet la transmission des données utilisateur.

Le champ contrôle de la trame I a le format suivant



Le bit numéro 1 de valeur 0 identifie la trame I.

N(S) représente le numéro de séquence de la trame I.

N(R) représente le numéro d'acquittement des trames dans le sens inverse (piggybacking)

Le bit P (Poll) signifie que la trame est une commande qui contient une interrogation à laquelle l'autre extrémité doit répondre immédiatement.

VII. Le protocole LAP-B – Les trames de supervision

8	7	6	5	4	3	2	1
N(R)		P/F	S	S	0	1	
N(R)		P/F	0	0	0	1	
N(R)		P/F	0	1	0	1	
N(R)		P/F	1	0	0	1	

Format général des trames S

RR : Receiver Ready

RNR : Receiver Not Ready

REJ : Reject

- **RR** : indique que la station est prête à recevoir des trames et que toutes les trames de numéro de séquence inférieur à N(R) ont été bien reçues.
- **RNR** : indique que la station n'est pas prête à recevoir des trames et que toutes les trames de numéro de séquence inférieur à N(R) ont été bien reçues.
- **REJ** : indique un acquittement négatif. Il faut reprendre la transmission à partir de la trame de numéro de séquence N(R).

Les trames de supervision peuvent être soit des commandes, soit des réponses.

Commande => le 5^{ème} bit est un bit P (Poll)

Réponse => le 5^{ème} bit est un bit F (Final)

VII. Le protocole LAP-B – Les trames non numérotées

8	7	6	5	4	3	2	1	
U	U	U	P/F	U	U	1	1	Format général des trames S
0	0	1	P	1	1	1	1	SABM : Set Asynchronous Balanced Mode
0	1	0	P	0	0	1	1	DISC : Disconnect
0	1	1	F	0	0	1	1	UA : Unnumbered Acknowledgement
1	0	0	F	0	1	1	1	FRMR : Frame Reject
0	0	0	F	1	1	1	1	DM : Disconnect Mode

- SABM (Set Asynchronous Balanced Mode) : la trame d'initialisation de connexion.
- DISC (DISConnect) : la trame de libération de connexion
- UA (Unnumbered Acknowledgement) : acquitte les trames SABM ou DISC
- FRMR (Frame Reject) : permet de rejeter une commande invalide
- DM (Disconnect Mode) : indique l'état de déconnexion d'une station, utilisé pour répondre négativement à une demande de connexion.

VII. Le protocole LAP-B – Le champ Adresse

Le protocole LAP-B est utilisé sur le lien entre un ETTD et un équipement du réseau public de transmission de données (le commutateur d'accès au réseau).

Par convention, le commutateur a toujours l'adresse 01.
L'ETTD a toujours l'adresse 03.

C'est le champ Adresse qui permet de distinguer une commande d'une réponse.

Par convention, chaque station place dans une commande l'adresse du destinataire, et dans une réponse sa propre adresse.

Ainsi, l'adresse de la trame est toujours celle de la station secondaire.

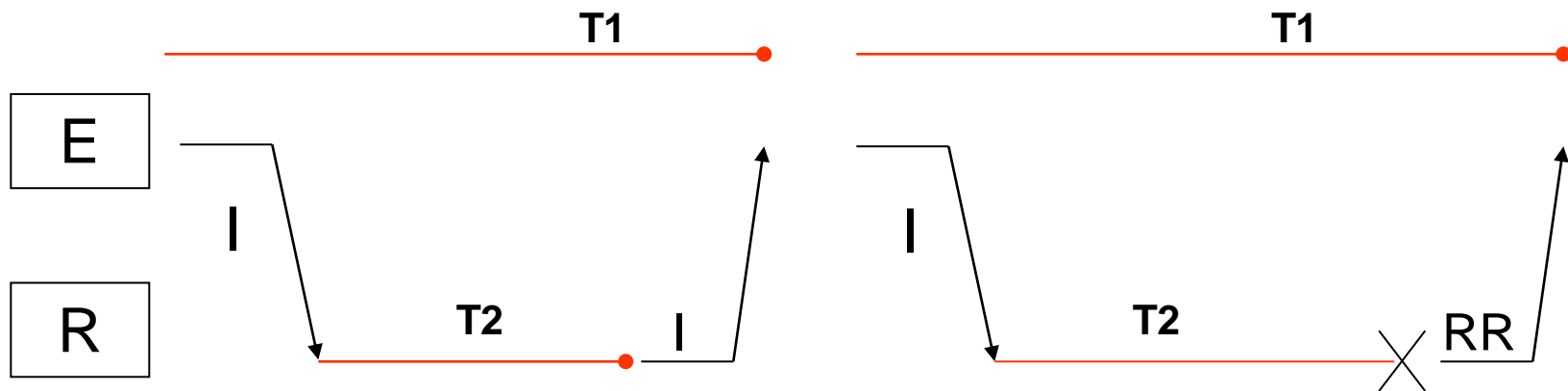
VII. Le protocole LAP-B – Les temporisateurs

Le temporisateur T1

Le temporisateur T1 représente la durée maximale d'attente d'un acquittement. Si T1 expire, la première trame non acquittée est retransmise. T1 est réarmé à la réception d'un acquittement qui acquitte des trames qui ne sont pas encore acquittées.

Le temporisateur T2

Le temporisateur T2 représente la durée maximale que peut attendre le récepteur après la réception d'une trame. Pendant ce temps, le récepteur attend qu'il ait une trame I à émettre. L'acquittement sera transmis en piggybacking dans la trame I. Si T2 expire, le récepteur doit envoyer une trame RR pour acquitter les données.



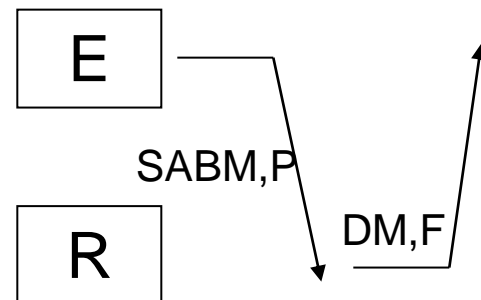
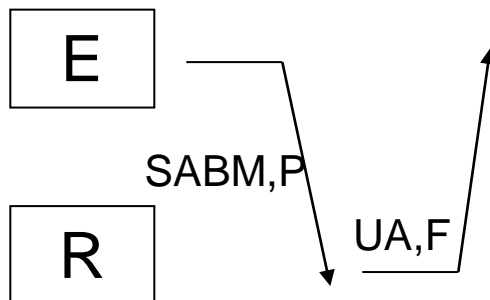
VII. Le protocole LAP-B – Établissement de la connexion

LAP-B est orienté connexion. Avant de pouvoir transférer des données utilisateur, il faut initialiser les compteurs et les temporisateurs de chaque entité en établissant une connexion.

La station qui veut commencer le dialogue envoie une trame SABM avec le bit P mis à 1.

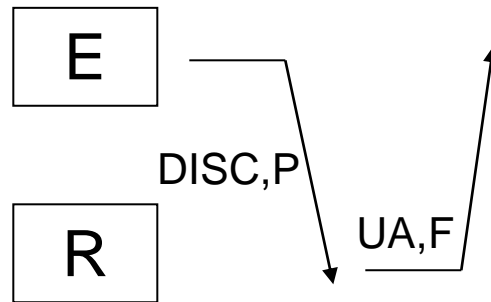
L'autre station accepte la demande de connexion par l'émission d'une trame UA avec le bit F mis à 1.

Elle peut refuser l'établissement de la connexion en émettant une trame DM avec le bit F mis à 1.



VII. Le protocole LAP-B – Fermeture de la connexion

La fermeture de la connexion se fait avec les trames DISC et UA



VII. Le protocole LAP-B – Le mode étendu

LAP-B possède un mode étendu. Il permet la numérotation des trames sur 7 bits au lieu de 3, permettant d'augmenter la taille de la fenêtre d'anticipation à 127 octets au lieu de 7.

Le champ contrôle est codé sur 2 octets.

Le mode étendu introduit deux nouvelles trames.

- SABME : ouverture de connexion en mode étendu
- XID (eXchange of IDentification) : permet l'identification, l'authentification et l'échange des caractéristiques techniques entre les deux stations.

Références

- [1] Introduction aux réseaux, Xavier Lagrange et Dominique Seret, éditions Hermès
- [2] Computer Networks, Andrew S. Tanenbaum, éditions Prentice Hall
- [3] Principes de commutation numérique, Claude Rigault, Éditions Hermès
- [4] Data communications and networking, Behrouz A. Forouzan, éditions Mc Graw-Hill Higher education, 5^{ème} édition 2012.