

Introduction aux réseaux informatiques

Lila Boukhatem
LRI : Laboratoire de Recherche en Informatique
Université Paris Saclay
Lila@lri.fr

1

ORGANISATION DU COURS

A. Introduction

- B. Codage et transmission
- C. Correction des erreurs
- D. Liaison de données
- E. Réseaux locaux
- F. Protocole réseau IP
- G. Protocoles de transport

2

BIBLIOGRAPHIE

- **A. Tanenbaum**, *Réseaux*, Ed. InterEdition, 5^{ème} édition, 2011
- **G. Pujolle**, *Les réseaux*, Ed. Eyrolles, édition 2018-2020
- **L. Toutain**, *Réseaux locaux et Internet*, Ed. Hermès, Coll. Réseaux et Télécommunications, 3^{ème} édition, 2003
- **LL. Peterson, B.S Davie**, *Computer Networks*, Ed. Morgan Kaufmann, 4^{ème} édition

} bien écrit pour
les étudiant

}
plus technique

PLAN INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Qu'est-ce qu'un réseau ?
- Normes et standards
- Classification des réseaux
- Architecture en couches

QU'EST CE QU'UN RÉSEAU INFORMATIQUE ?

Définitions

Un **réseau** est un ensemble d'objets interconnectés les uns aux autres qui permet de faire circuler des éléments entre ces objets selon des règles bien définies

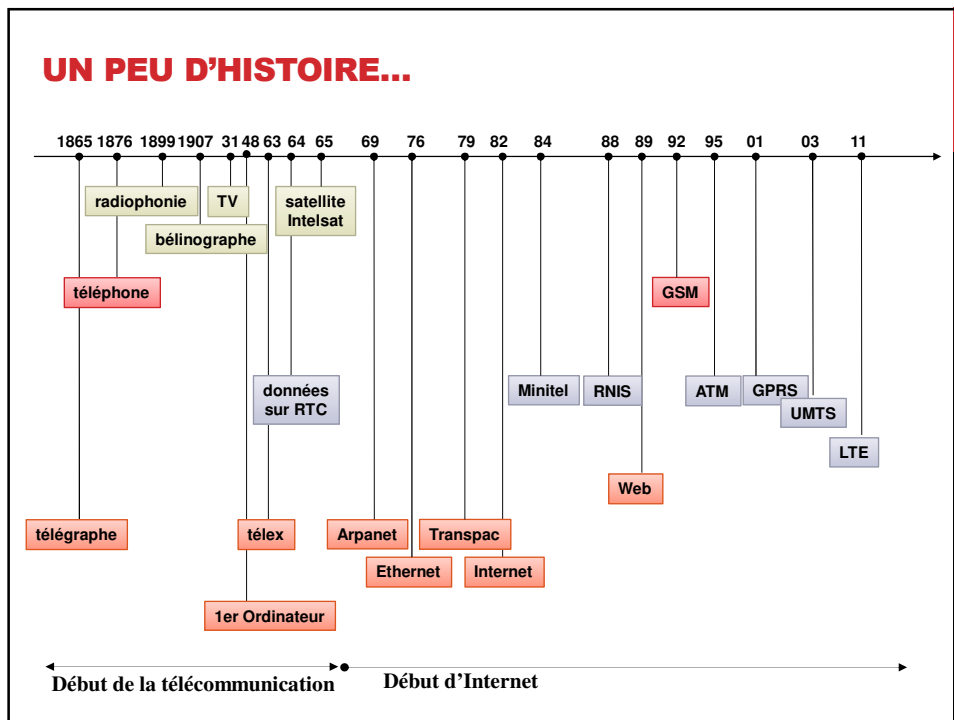
Un **réseau informatique** vise à fournir les moyens matériels et logiciels pour faire communiquer et permettre l'échange d'informations entre plusieurs équipements ou machines informatiques de manière souple et fiable

Intérêt ?

- Partage des ressources
- Fiabilité accrue
- Réduction des coûts
- Passage à l'échelle (scalability)

5

UN PEU D'HISTOIRE...



6

LES ACTEURS ET LEURS APPROCHES

industriels des télécommunications

- but : mettre à la disposition de l'utilisateur un réseau pour interconnecter les équipements terminaux
- applications synchrones à contraintes temporelles (voix)
- solution : commutation de circuits

industriels de l'informatique

- but : relier des machines informatiques entre elles, en local ou à distance
- applications asynchrones à temps de réponse variable (transfert de fichiers, transactions, etc.)
- solution : commutation de paquets

câblo-opérateurs

- but : déployer des réseaux câblés de télévision
- applications à très hauts débits en numérique
- solution : commutation en large bande

7

NORMES ET STANDARDS : LE BESOIN

Bénéfices

- permettre à des équipements hétérogènes de communiquer
- accroître le marché des produits adhérant aux standards

Standards

- *de facto* = standard : lorsqu'un consensus s'établit, sans démarche formelle
- *de jure* = norme : document formel, adopté par une instance reconnue

2 types d'organismes de normalisation/standardisation internationaux

- Organismes créés à la suite d'accords gouvernementaux (ISO, ITU,...)
- Organismes non gouvernementaux (IETF, IEEE,...)

8

PLAN

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Qu'est-ce qu'un réseau ?
- Normes et standards
- **Classification des réseaux**
- Architecture en couches

9

CLASSIFICATION DES RÉSEAUX

Critères de classification

- Taille
 - WAN, LAN, MAN, PAN, ...
- Transmission
 - point à point ou diffusion
- Topologie
 - physique
 - logique

10

CLASSIFICATION PAR TYPE DE TRANSMISSION

la **diffusion** *→ 1 ordinateur, bce une bobem - nasy rasom*

- un seul canal de transmission partagé par toutes les machines du réseau
- les données émises sont reçues par tous, mais seul(s) le(s) destinataire(s) les prend (prennent) en compte
- Diffusion restreinte (*multicast*)
- ex : Ethernet, satellite, TV

le **point à point** *— ordinateur no koley - no konpremmasy*

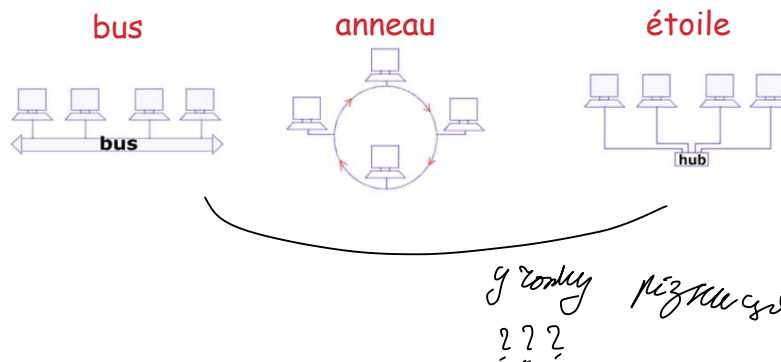
- le réseau repose sur des connexions entre des machines prises 2 à 2
- les données peuvent transiter par plusieurs machines intermédiaires avant d'arriver à leur destination
- ex : Transpac, Internet

11

CLASSIFICATION PAR TOPOLOGIE

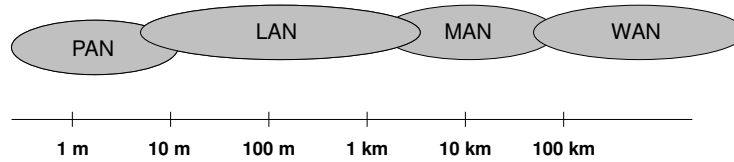
La **topologie physique** décrit la façon selon laquelle les machines sont reliées *physiquement* entre elles (configuration spatiale, visible du réseau)

on distingue



12

CLASSIFICATION PAR TAILLE



PAN - Personal Area Network

LAN - Local Area Network

MAN - Metropolitan Area Network

WAN - Wide Area Network

		WAN	MAN	LAN	PAN
étendue		pays	Région, qlq km	Site, <1km	≈ 10 m
débit		Dizaine Mbit/s	Centaine Mbit/s	Centaine Mbit/s, Gbit/s	Jusqu'à 3 Mbit/s
propriétaire		Opérateur (privé, public)	Regroupement d'utilisateurs	utilisateur	utilisateur
Exemples	commutation	RTC, RNIS	Ethernet commuté, PABX		
	diffusion	satellite	Ethernet, Token Ring		Bluetooth

13

PLAN INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Qu'est-ce qu'un réseau ?
- Normes et standards
- Classification des réseaux
- Architecture en couches

14

POURQUOI UNE ARCHITECTURE ?



transfert de fichier de A à B via un réseau

acheminer des bits
transporter des paquets
gérer les échanges d'applications
etc.

altérations de données
pertes de données
congestions du réseau
pannes matérielles
etc.

 il faut décomposer le problème !

15

COMMENT DÉCOMPOSER ?



principe : structuration en couches (niveaux)

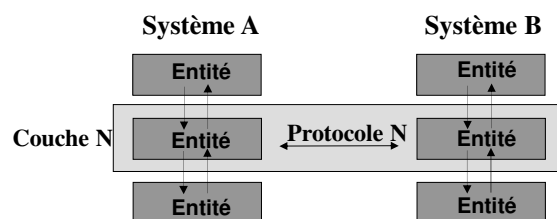
Pour diminuer la complexité de conception, le modèle effectue un découpage hiérarchique des tâches à effectuer
Il est structuré en niveaux appelés couches
Chaque couche est construite sur la précédente
Chaque couche peut être étudiée séparément
Le rôle de chaque couche est d'offrir des services à la couche supérieure

16

MODÈLE EN COUCHES

Fonctionnalités d'une couche N

- **Aspect horizontal** : Gère la conversation avec la couche N d'une autre machine
 - Règles et conventions utilisées : PROTOCOLE de niveau N
- **Aspect vertical** : Propose des services à la couche (N+1)
 - Par l'intermédiaire d'une INTERFACE de SERVICE



17

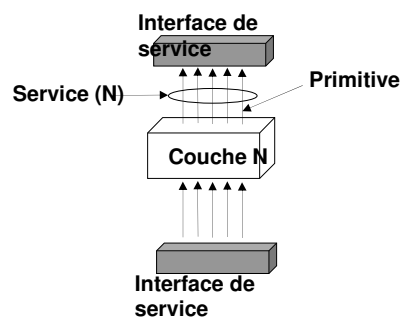
LE SERVICE

Interactions inter-couches

Primitive de service = Fonction précise réalisée par l'entité de niveau N aux entités de niveau N+1

Services = {primitives}

Entité = Regroupement d'un ensemble de primitives réalisant tout ou partie du service

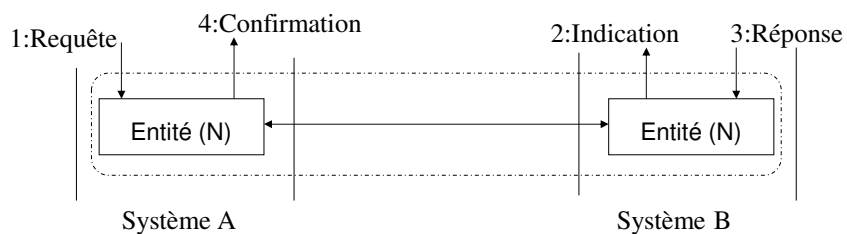


18

LE SERVICE

4 types de primitives

- La requête (request)
 - L'entité N+1 demande à l'entité N d'activer un service
- L'indication (indication)
 - L'entité N avise l'entité N+1 de l'activation d'un service
- La réponse (response)
 - C'est la réponse à une indication reçue, elle indique si l'entité accepte ou non le service
- La confirmation (confirmation)
 - L'entité N avise l'entité N+1 que le service demandé a été accepté



19

LE PROTOCOLE

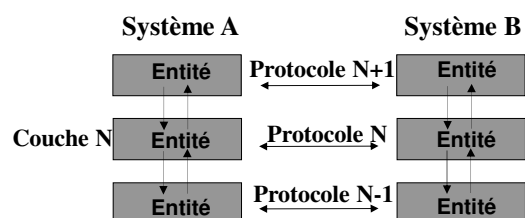
Interactions entre couches de même niveau

Ensembles des règles précisant les échanges valides entre entités paires

Unité de données de protocole (PDU) = Message circulant entre entités de même niveau

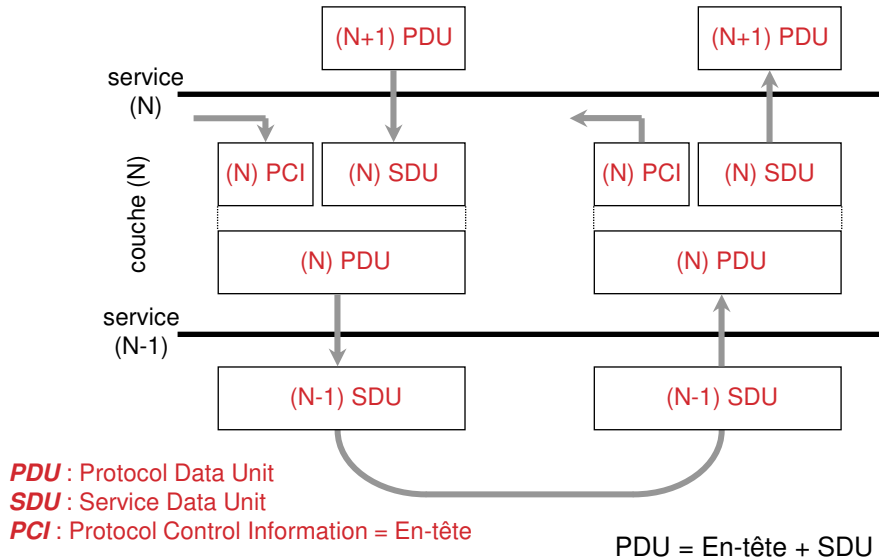
Cheminement d'un message

- Message descend la hiérarchie en respectant les définitions des interfaces
- Peut être modifié (compression, cryptage), fragmenté, ajout d'en-tête, ...
- Remonte la hiérarchie sur la machine distante



20

LES UNITÉS DE DONNÉES

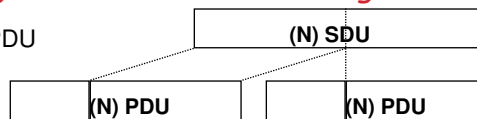


21

OPÉRATIONS SUR LES UNITÉS DE DONNÉES

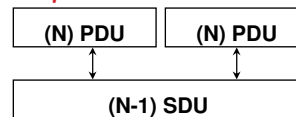
Fonction de *segmentation* / *réassemblage*

1 (N) SDU $\rightarrow$ m (N) PDU



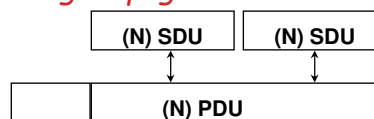
Fonction de *concaténation* / *séparation*

m (N) PDU $\rightarrow$ 1 (N-1) SDU



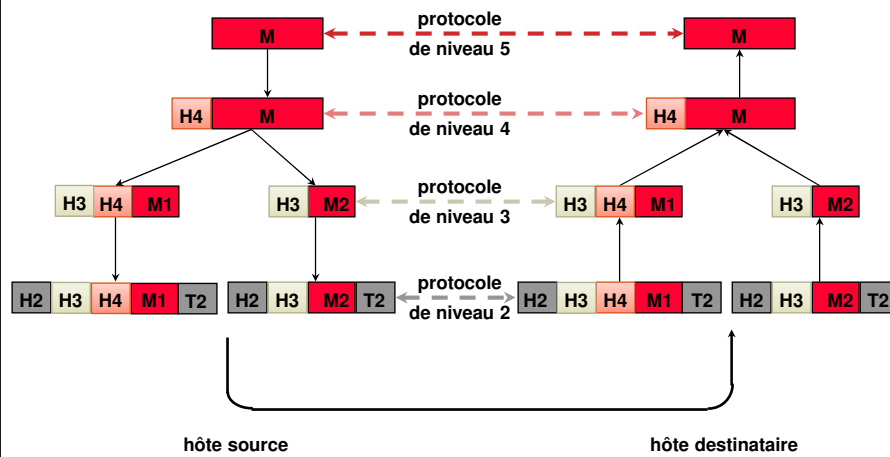
Fonction de *groupage* / *dégroupage*

m (N) SDU $\rightarrow$ 1 (N) PDU



22

L'ENCAPSULATION



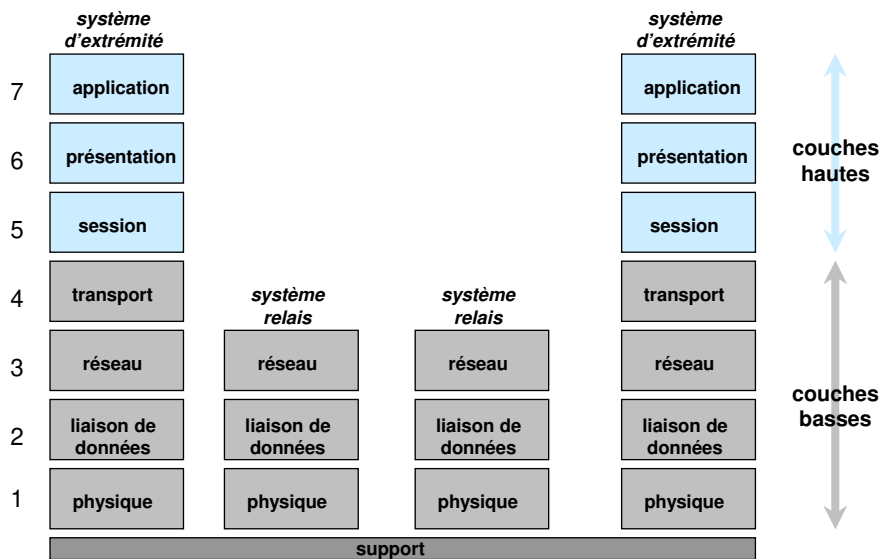
23

LE MODÈLE DE RÉFÉRENCE OSI

- **Grands constructeurs : annonce d'architectures**
 - (IBM : SNA System Network Architecture ...)
- **Définition d'une architecture normalisée internationale OSI faite par l'ISO Organisation des Standards Internationaux**
 - OSI : Open System Interconnection
 - ISO : International Organization for Standardization
- **Travaux entrepris à l'ISO en 1978, norme parue en 1980 : IS 7498**
- **Pourquoi faire ?**
 - régler les problèmes de l'interconnexion de systèmes hétérogènes (logiciel et matériel)
- **Le modèle est une représentation abstraite du système**
- **L'intérêt est de spécifier les services rendus par le réseau à l'aide d'un vocabulaire et des concepts communs**
 - Séparation des fonctions de base en groupes homogènes
 - Minimisation des échanges entre couches
 - Nombre de couches suffisamment :
 - grand : pour éviter que des fonctions très différentes soient dans une même couche
 - petit : pour que le système reste gérable
 - Modèle en 7 couches

24

LES 7 COUCHES OSI



25

RÔLE DES 7 COUCHES

Couche physique

- Responsable de la transmission des *bits* sur un circuit de communication
 - spécification des connecteurs
 - détermination des caractéristiques électriques des circuits
 - définition des procédures d'utilisation des connexions physiques

Couche liaison de données

- Responsable de la transmission fiable de *trames* sur une connexion physique
 - contrôle de flux
 - contrôle d'erreur

Couche réseau

- Responsable du transfert de données à travers le réseau
 - adressage
 - routage
 - contrôle de congestion

Couche transport

- Responsable du transfert de bout-en-bout, avec fiabilité et efficacité
 - contrôle de flux
 - reprise sur erreur
 - optimisation

26

RÔLE DES 7 COUCHES

Couche session

- responsable des mécanismes nécessaires à la gestion d'une session
 - organisation du dialogue
 - synchronisation du dialogue
 - établissement et libération d'une session

Couche présentation

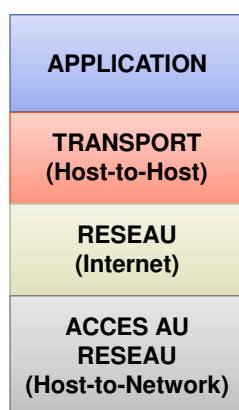
- responsable de la représentation des données échangées entre applications
 - traduction des données
 - compression
 - cryptage

Couche application

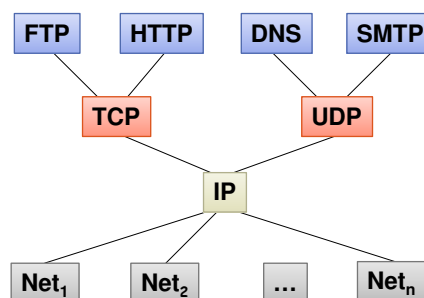
- fournir à l'utilisateur des services pour réaliser une application répartie et pour accéder à l'environnement OSI

27

L'ARCHITECTURE TCP/IP



architecture
à 4 niveaux



graphe (simplifié)
des protocoles TCP/IP

28

ORGANISATION DU COURS

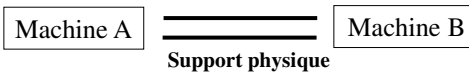
- A. Introduction
- B. Codage et transmission**
- C. Correction des erreurs
- D. Liaison de données
- E. Réseaux locaux
- F. Protocole réseau IP
- G. Protocoles de transport

29

INTRODUCTION

But

- Télécommunication : communiquer à distance
- Envoyer de l'information binaire d'un équipement à un autre via un support physique de transmission
- Comment faire ?
 - S'adapter aux contraintes du support
 - Fils métalliques, Atmosphère, Fibre optique,...
 - Bande limitée
 - Bruit
 - Représentation des signaux



30

LES SUPPORTS DE TRANSMISSION

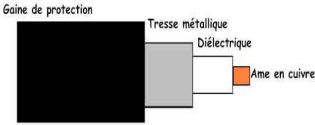
Véhiculent le signal

Deux catégories

- Avec guide physique de transmission
 - Ondes électriques
 - Câbles électriques (métalliques, coaxiaux, ...)
 - Ondes lumineuses
 - Fibre optique
- Sans guide physique de transmission (wireless)
 - Ondes électromagnétiques
 - Faisceaux hertziens
 - Ondes lumineuses
 - Signaux lumineux, laser, ...

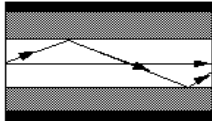
31

LES SUPPORTS DE TRANSMISSION

Support	Caractéristiques physiques	Performances
Paire torsadée 	- deux fils torsadés en forme spirale placés dans un isolant (polyéthylène) - blindé (câble Bull), non blindé (tél)	- Débits selon catégorie: jusqu'à 1Gbits - Portée sans régénération : 100 à 250 m - Immunité aux bruits médiocre
Câble coaxial 	- 2 conducteurs cylindriques, séparés par un isolant - rapport entre Φ des conducteurs = 3,6	• Portée sans régénération : 3 qk kilomètres selon type • Bonne immunité aux bruits • Bande passante : 5 kHz à 450 MHz

32

LES SUPPORTS DE TRANSMISSION

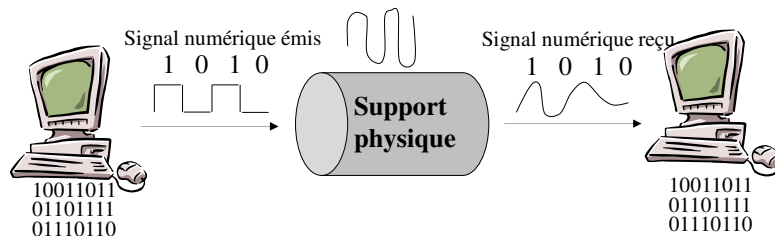
Support	Caractéristiques physiques	Performances
Fibre optique 	-impulsions lumineuses, émises par des diodes laser microscopiques (traduction électrique/optique) - Réception : photodétecteurs - Composée de fibres (verre ou plastique), chacune entourée d'un revêtement (propriété de diffraction) pour garder le faisceau à l'intérieur	-débit jusqu'à plusieurs dizaines de Gbit/s -Portée jusqu'à 10000 km -Insensible aux perturbations électromagnétiques -Pbm: coûteuse, fragile, traduction électrique/optique pas très rapide
Ondes hertziennes	-Ondes radio : 3kHz-4GHz, radio (LF, MF, ...), Cellulaires (GSM) -Transmission satellite Géostationnaire, constellations - infrarouge, laser (directionnelles)	- débit : jusqu'à des centaines de Mbit/s - portée : dépend des antennes, des fréquences, ... - blocage, atténuation (fréquence) -Directivité! -Sécurité : besoin de techniques de cryptage

33

PROBLÉMATIQUE

Traitement d'éléments binaires

Support véhicule un signal électromagnétique ou lumineux



Adapter les données au support

- Sérialisation/désérialisation des données
- Codage/décodage

34

SIGNAUX NUMÉRIQUES ET ANALOGIQUES

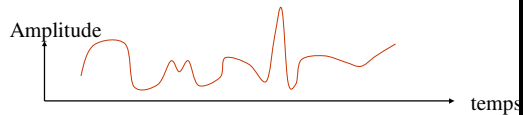
Le codage

- transformer le message en signal

Le signal

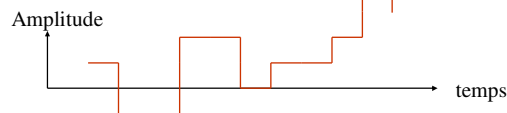
- **Analogique**

- Onde électromagnétique variant de façon continue
- Espace de valeurs continues, espace temps continu
- Exemple données analogiques : voix, vidéo,...



- **Numérique**

- Séquence d'impulsions de voltage
- Espace de valeurs discrètes, espace temps discret
- Exemple données numériques : texte, entiers,...



35

SIGNAUX NUMÉRIQUES ET ANALOGIQUES

Transmission

- Nature du traitement appliqué au signal

Transmission analogique

- Ne se soucie pas du contenu du signal (voix, données num. (modem))
- Atténuation après une certaine distance
 - Amplificateurs : retransmettre les signaux à leur puissance originale
 - Mais : amplification des bruits aussi!
 - Cascades d'amplificateurs : signal de + en + distordu
 - Si analogique : voix, certaines distorsion tolérées
 - Si numérique : introduction d'erreurs

Transmission numérique

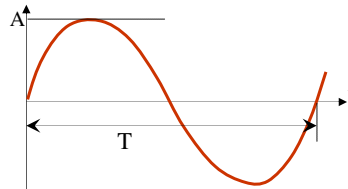
- Tiens compte du contenu du signal
- Utilisation de répéteurs : reçoit le signal numérique et reconstitue la séquence num.
- **Avantages du numérique**
 - Facilité de stockage, de traitement et de restitution
 - Compression en éliminant la redondance
 - Intégration (multimédia)
 - Qualité de la transmission : faible taux d'erreur en numérique (répéteur/ampli)
 - Coût des composants de + en + faible

36

SIGNAL : CARACTÉRISTIQUES

- Un signal fondamental est une sinusoïde
- Tout signal peut être exprimé comme une combinaison de sinusoïdes
- Caractéristiques d'un signal périodique

$$a(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$



- Fréquence f : vitesse d'oscillation
 - $f = 1/T$, où T est la période du signal
- Vitesse de propagation v :
 - dans le vide (vitesse de la lumière) = 300 000 km/s
 - Câble coaxial : 200 000 km/s
 - Longueur d'onde = distance parcourue pendant une période T : $\lambda = vT = v / f$
- Phase : décalage du signal. ϕ est la phase initiale
- Amplitude : $a(t)$ amplitude à l'instant t , A est l'amplitude maximale

37

LES SUPPORTS DE COMMUNICATION

Perturbations du signal

- Atténuation, distorsion du signal, bruit

Atténuation (Affaiblissement)

- La puissance du signal décroît avec la distance : réduction de l'amplitude du signal
- S'exprime par le rapport des puissances entrée/sortie de la ligne de transmission :
 - P_e : puissance du signal émis
 - P_s : puissance du signal reçu

$$A_r(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_e}$$

Distorsion du signal (en phase)

- Le temps de propagation n'est pas identique pour toutes les fréquences

Bruit

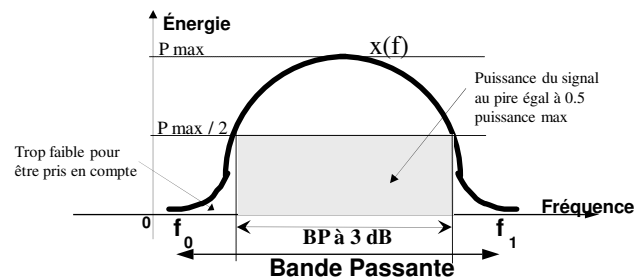
- Tout signal non désiré (processus aléatoire) qui s'introduit sur le canal de transmission (SNR).

38

LE SUPPORT DE TRANSMISSION

La BANDE PASSANTE

- Bande passante = filtre
 - Exemples : l'atmosphère élimine les UV, les oreilles reçoivent 15 à 15000 Hz
 - C'est l'intervalle de fréquences que laisse passer le support
 - C'est une caractéristique physique du support



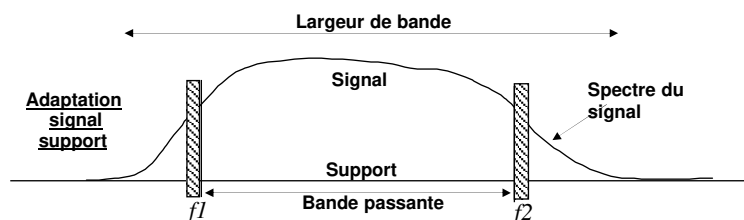
- Le signal (somme de sinusoïde) est +ou- déformé après passage dans un support

39

ADAPTATION

Adaptation des signaux au support

- Média ou support de communication
 - Caractéristiques
 - Bande passante
 - Filtre
- Signaux représentant les infos
 - Codage
 - Largeur de bande
 - Spectre



40

LA TRANSMISSION : LES CARACTÉRISTIQUES

Vitesse de transmission

- Débit binaire en bit/s
 - nombre de bits transmis en 1 seconde

Temps de transmission t_t

- Temps nécessaire pour que le message soit envoyé (totalement) sur la ligne. Il dépend du débit du canal.

$$t_t = \frac{\text{Nombre de bits à émettre}}{\text{Capacité (débit) du canal}}$$

- Exemple :

Temps de transmission d'un message de 10 000 bits sur un réseau Ethernet à 10 Mbit/s

$$t_t = 10000 / 10 \cdot 10^6 = 1 \text{ ms}$$

41

LA TRANSMISSION : LES CARACTÉRISTIQUES

Temps de propagation t_p

- Transfert non instantané
- Temps nécessaire au signal pour parcourir le support d'un point à l'autre de la liaison
- Il dépend de
 - La nature du support
 - La distance
 - La fréquence du signal
- Exemple
 - Vitesse de propagation du signal :
 - dans le vide (vitesse de la lumière) = 300 000 km/s
 - Câble coaxial : 200 000 km/s
 - Temps de propagation : satellite (250 ms aller-retour), câble coaxial (5 µs/km)

Temps de transfert t_r

- Temps nécessaire pour que le message émis à travers le réseau soit reçu complètement par l'équipement terminal récepteur.
- C'est le temps entre l'émission du 1er bit d'un message et la réception de son dernier bit

$$t_r = t_t + t_p$$

42

TRANSMISSION : LA CAPACITÉ DE TRANSFERT

La rapidité de Modulation R :

C'est le nombre maximum de symboles transmis par seconde
C'est la vitesse à laquelle les changements de niveaux du signal s'effectuent

$$R = 1 / \Delta \text{ bauds}$$

- Δ est l'intervalle pour coder un mot du signal (en sec). C'est la durée d'un état du signal, R est exprimé en bauds

Le débit binaire D :

C'est la vitesse de transmission des données. C'est le nombre maximum de symboles binaires transmis par seconde

$$D = 1 / T \text{ bit/s}$$

- T est l'intervalle de temps pour la transmission d'un bit, D est exprimé en bit/s

D exprimé en fonction de R :

$$D = R * r = R * \log_2 q$$

- q est la valence, le nombre de niveaux du signal
- r est le nombre de bits par symbole

43

LA TRANSMISSION : LE DÉBIT

Loi de Nyquist

- Le signal n'est affecté d'aucun bruit

$$D_{\max} = 2B \log_2(q) \text{ bits/seconde}$$

B est la bande passante du support
q est la valence (nombre de niveaux du signal)

Théorème de Shannon:

- Débit théorique maximal d'un canal avec bruit

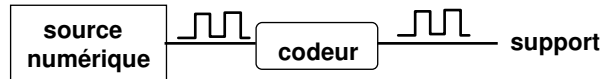
$$D_{\max} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_N} \right) \text{ bits/seconde}$$

B est la bande passante du support
 P_s/P_N est le rapport Signal sur Bruit
S/N est le rapport Signal sur Bruit exprimé en dB ($S/N = 10 \log_{10} (P_s / P_N)$ dB).

44

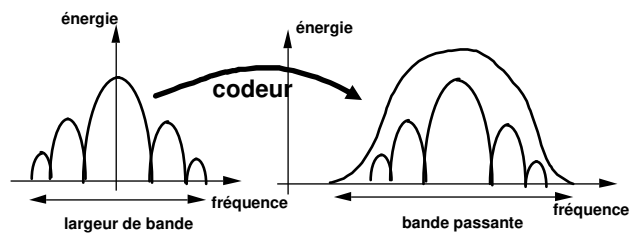
TYPES DE TRANSMISSIONS

1/ Numérique – Numérique



Transmission en bande de base (BDB)

- Signaux numériques sur le support
- Adaptation par codage
 - Codes à 2 niveaux $(-a, +a)$, codes à 3 niveaux $(-a, 0, +a)$



45

BDB : CODAGE À 2 NIVEAUX

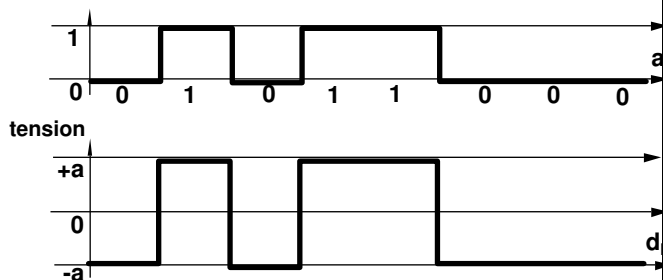
Le code NRZ (No Return to Zero)

Le signal binaire est simplement transposé en tension (pas de valeurs nulles).

CODAGE

$a_i = 0 \rightarrow d_k = -a$

$a_i = 1 \rightarrow d_k = +a$



Caractéristiques :

- bonne résistance au bruit ($q=2$)
- signal continu (longue suite)
- pb perte de synchronisation des horloges

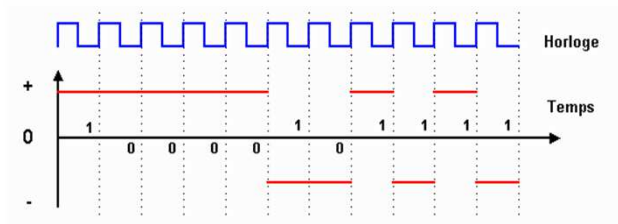
46

BDB : CODAGE À 2 NIVEAUX

Le code NRZI (No Return to Zero, Invert on ones)

Utilisation : Fast Ethernet, FDDI

Codage : on produit une transition du signal pour chaque 1, pas de transition pour les 0.



Caractéristiques :

- signal sans transition si de longues suites de 0

47

BDB : CODAGE À 2 NIVEAUX

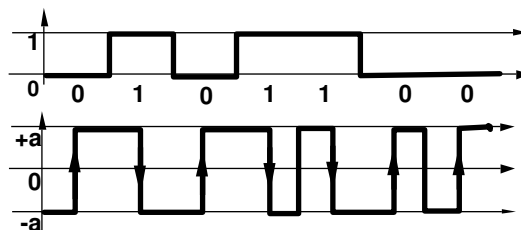
Le code BIPHASE ou MANCHESTER

Utilisation : Ethernet

Principe : l'idée de base est de provoquer une transition du signal pour chaque bit transmis.

CODAGE

$a_i = 0 \rightarrow d_k = -a$
 $a_i = 1 \rightarrow d_k = +a$



Caractéristiques :

- admet de longues séquences
- pb de repérage de fils (inversion, réception complémentaire à l'émission)

48

BDB : CODAGE À 2 NIVEAUX

Le code BIPHASE différentiel ou MANCHESTER différentiel

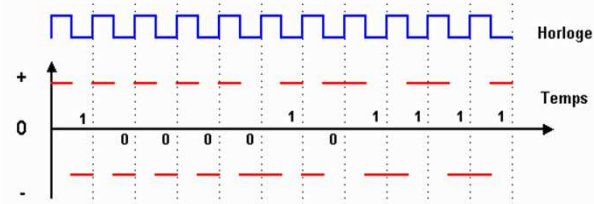
Utilisation : Token Ring

Principe : c'est la présence ou l'absence de transition au début de l'intervalle du signal d'horloge qui réalise le codage

CODAGE

$a_i = 0 \rightarrow d_k = d_{k-1}$ transition à $\Delta/2$

$a_i = 1 \rightarrow d_k \neq d_{k-1}$ transition à $\Delta/2$



Caractéristiques :

- mêmes caractéristiques que Manchester sauf qu'il n'y a plus de pb de repérage de fils

49

BDB : CODAGE À 3 NIVEAUX

Le code BIPOLAIRE simple

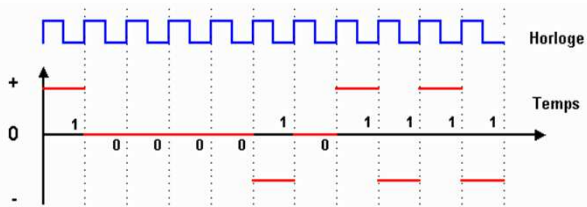
Principe : Les 0 sont représentés par des potentiels nuls, les 1 par +V et -V en alternance.

CODAGE

$a_i = 0 \rightarrow d_k = 0$

$a_i = 1 \rightarrow d_k = +a$ si précédent $a_i=1$ & $d_k = -a$

$d_k = -a$ si précédent $a_i=1$ & $d_k = +a$



Caractéristiques :

- problème des longues séquences de 0 (perte de synchronisation)

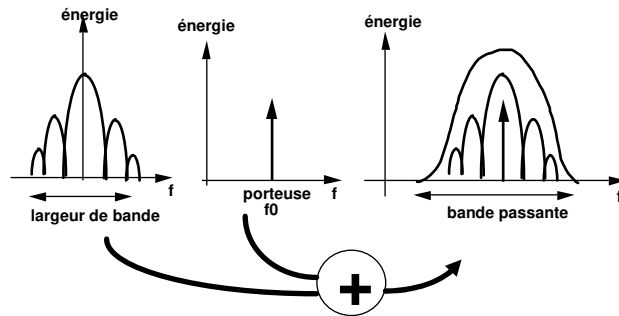
50

TYPES DE TRANSMISSIONS

1/ Numérique – Analogique

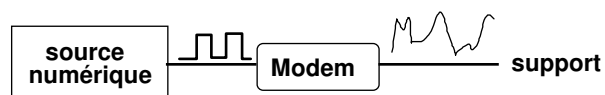


Transmission par **modulation d'une onde porteuse**



51

MODULATION D'UNE ONDE PORTEUSE



Le signal employé est de type analogique

On code le signal numérique à l'aide d'une onde porteuse de fréquence f (supérieure à celle du signal de données) caractérisée par

$$S_p(t) = A \cos(2\pi f_p t + \Phi_p)$$

Amplitude

Fréquence de la porteuse

Phase de la porteuse

La modulation s'effectue en faisant varier l'un ou l'autre de ces paramètres

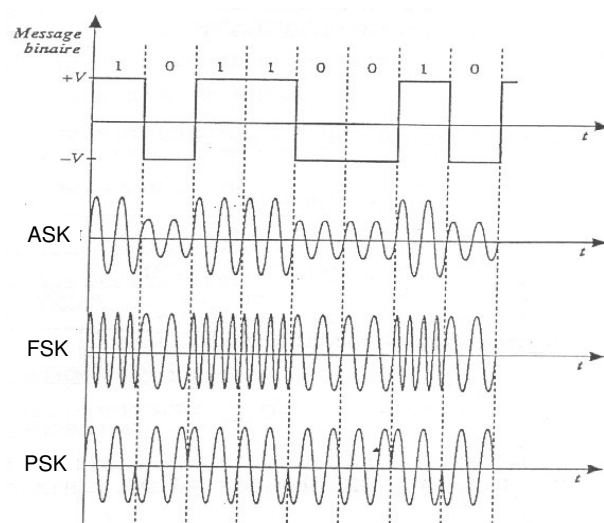
52

MODULATION D'UNE ONDE PORTEUSE

- **ASK : Amplitude-Shift Keying**
 - Faire varier A (amplitude)
 - Technique électroniquement simple mais sensible au bruit
- **FSK : Frequency-Shift Keying**
 - Faire varier la fréquence f
- **PSK : Phase-Shift Keying**
 - Faire varier ϕ
 - Exp : BPSK (Quadrature Phase-Shift Keing), QPSK (Quadrature Phase-Shift Keing)

53

EXEMPLE MODULATION : ASK, FSK, PSK



54

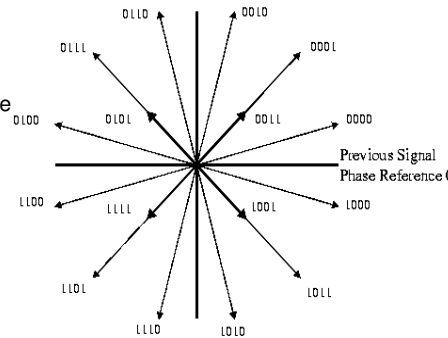
COMBINAISONS DE MODULATIONS

Les communications modernes utilisent des combinaisons de ASK, FSK, PSK pour atteindre de plus hauts débits

Exemple :

QAM (Quadrature Amplitude Modulation)

- Mélange de QPSK et de modulation d'amplitude
- 8-QAM : code 3 bits de données par baud
- 16-QAM : code 4 bits de données par baud
 - Exp : modem standard V32 (9600bps)



55

MODULATION NUMÉRIQUE : CONCLUSION

Modulation d'Amplitude (ASK)

- Très simple à réaliser
- Faible résistance au bruit (pour un nombre d'états > 2)

Modulation de Fréquence (FSK)

- Si le nombre d'états est > 2 alors il y a augmentation de la largeur de la bande

Modulation de Phase (PSK)

- Actuellement, la plus employée pour la transmission des signaux numériques sur les circuits téléphoniques.
- Pour minimiser la probabilité d'erreur, les états de phase sont répartis régulièrement dans l'intervalle $[0, 2\pi]$.
- Possibilité d'obtenir des vitesses de transmission plus élevées qu'en FSK (en utilisant des codes binaires de 2,3 bits ou plus sans augmentation de la largeur de bande du signal transmis).

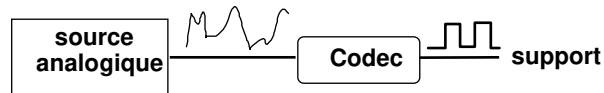
Choix !

- Dépend de : sensibilité au bruit, bande passante disponible, complexité de mise en œuvre

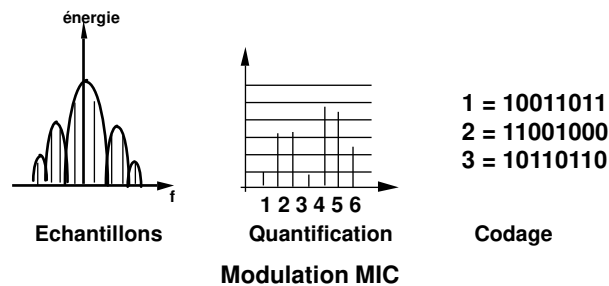
56

TYPES DE TRANSMISSIONS

1/ Analogique– Numérique



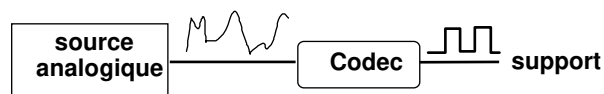
Transmission MIC : **Modulation par Impulsion et Codage** ou PCM (Pulse Coding Modulation)



57

TYPES DE TRANSMISSIONS

1/ Analogique– Numérique



Transmission MIC : **Modulation par Impulsion et Codage** ou PCM (Pulse Coding Modulation)

- Intérêt ?
La numérisation!
 - Traitement sur des données non informatiques (voix, images, sons)
 - Stockage unique (messagerie vocale)
 - Intégration des données (document multimédia)
 - Multiplexage

58

LA NUMÉRISATION

• 3 étapes

➤ Échantillonnage

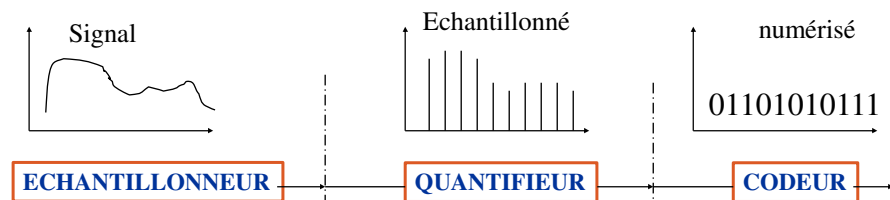
- Passage d'un espace de temps continu à un espace de temps discret
- Pas d'échantillonnage

➤ Quantification

- Passage d'un espace de valeurs continues à un espace de valeurs discrètes
- Introduit des erreurs de quantification qui sont d'autant plus importantes que le niveau de quantification est faible et que le pas de quantification est grand

➤ Codage

- Chaque niveau quantifié de valeurs est codé de façon binaire
- $q = 2^n$ (q = nombre de niveaux de quantification, n = nombre de bits pour coder toutes les valeurs)



59

LA NUMÉRISATION : L'ÉCHANTILLONNAGE

But

- Transformer une fonction $f(t)$ à temps et valeurs continus en une fonction $f(i\Delta)$ à temps discret et à valeurs continues
- Prélever la valeur d'un signal analogique pendant un certain intervalle de temps Δ et de manière périodique (T_e).

Instants d'échantillonnage

- La période Δ d'échantillonnage ne peut être quelconque

Théorème de SHANNON (théorème d'échantillonnage)

- Si W est la fréquence la plus élevée contenue dans le spectre $f(v)$ du signal $f(t)$, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à $2W$

$$f_e \geq 2W$$

f_e étant la fréquence d'échantillonnage

Exemple : un signal avec $F_{\max} = 20 \text{ KHz}$ est échantillonné à $F_e \geq 40 \text{ KHz}$.

60

LA NUMÉRISATION : LE CODAGE

Exemple : cas de la numérisation de la voix téléphonique

- La bande passante d'une ligne téléphonique est de 300 à 3400 Hz
- Soit une largeur de bande de 3100 Hz
- Un échantillonnage correct (sans perte de qualité) doit se faire à au moins 6800 Hz, la normalisation a « arrondi » à une valeur de 8000 Hz (un échantillon prélevé toutes les 125µs)
- L'échelle de quantification comporte 256 niveaux, chaque échantillon est codé sur 8 bits
- Ce qui donne un débit de $8000 * 8 = 64$ Kbit/s : c'est le débit minimum pour pouvoir acheminer de la voix téléphonique numérisée

61

CONCLUSION

- Adaptation des techniques de transmission aux caractéristiques du support de communication
- Plusieurs types de codes existent (NRZ, biphase, bipolaire, etc.)
 - chacun possédant certaines des caractéristiques voulues mais pas toutes !
- Les techniques de transmission ne suffisent pas à assurer le déroulement des communications sans erreurs.

Besoin de techniques de protection contre les erreurs

62

ORGANISATION DU COURS

- A. Introduction
- B. Codage et transmission
- C. Correction des erreurs**
- D. Liaison de données
- E. Réseaux locaux
- F. Protocole réseau IP
- G. Protocoles de transport

63

PLAN

- La protection contre les erreurs
- Construction d'un code
- Les codes simples par blocs
- Le codes CRC

64

INTRODUCTION

La couche liaison

- Envoi des données

Constat

- Le signal peut subir des déformations et altérations par :
 - Bruit
 - Affaiblissement
 - Synchronisation horloge
- Erreur d'interprétation!

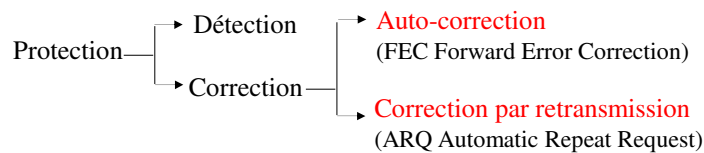
Taux d'erreur

- Le nombre moyen de bits transmis en erreur divisé par le nombre total de bits transmis
 - Exp : ligne téléphonique 10^{-5} , câble coaxial 10^{-7} - 10^{-8} , fibre optique 10^{-10} - 10^{-12}

Taux d'erreur résiduel

- Erreurs qui restent après correction

Mécanismes



65

LA DÉTECTION ET LA CORRECTION

Détection : comment faire

- Ajout d'informations aux données à transmettre
 - Bits de redondance ou bits de contrôle
- Cette info est aussi sujette à altération
- Aucune technique n'est fiable à 100%!
- Exemple
 - La technique de détection par répétition
 - Le message codé est un double exemplaire du message initial
 - Erreur : si différence
 - Attention : certaines erreurs sont non détectables!

Correction

- Après détection, la redondance permet de corriger
- Exemple de la de détection par répétition (triple exemplaire)
 - Supposition : message initial correspond aux deux exemplaires qui sont identiques
 - Certaines erreurs détectées et non corrigibles (1 erreur diff sur au moins 2 exemplaires)
 - Certaines sont détectées et mal corrigées (1 même erreur sur 2 exemplaires)

66

LES CODES DE PROTECTION CONTRE LES ERREURS

2 grandes catégories de codes

- **Codes en blocs (linéaires, cycliques ou non)**
 - Le codage/décodage d'un bloc dépend uniquement des info de ce bloc
- **Codes en treillis (convolutifs, récurrents ou non)**
 - Le codage/décodage d'un bloc dépend des informations des autres blocs (précédemment transmis)

Application informatiques

- Codage par blocs (plus simple et moins de délai)

Codage par blocs

- Codes simples
- Codes linéaires
- Codes cycliques
- Codes polynomiaux

67

DÉFINITIONS : CONSTRUCTION D'UN CODE

Soit $U = u_1, u_2, \dots, u_k$ une donnée de k bits

$$U \xrightarrow{f} M = m_1, m_2, \dots, m_n \quad (n > k)$$

M est appelé **mot de code**. Code (k, n)

n est appelé **longueur** du code, k est la longueur initiale du mot

f : fonction simple (rajout de $n-k$ bits) ou complexe

Le code introduit une redondance

- Il est **systématique** si les k premiers bits du bloc codé sont égaux aux bits du bloc initial
- Les r ($r=n-k$) derniers bits forment le champ de contrôle d'erreur.
- Le **rendement** d'un code (k, n) est : $R = k/n$

68

DÉFINITIONS : CONSTRUCTION D'UN CODE

$$U \xrightarrow{f} M = m_1, m_2, \dots, m_n \ (n > k)$$

L'ensemble des mots de code est l'ensemble des valeurs possibles de M (il est très $< 2^n$)

On détecte une erreur si on reçoit une chaîne qui ne correspond à aucun mot de code

Exemple

- $k=2$, on a donc 4 données possibles (00,01,10,11)
- On considère un code qui transforme ces données en les mots suivants (0000,0011,1100,1111)
- Si en transmettant 0000 on reçoit 0100 on sais que c'est une erreur

69

DÉFINITIONS : POIDS DE HAMMING

Le **poids de Hamming** d'un mot est le nombre de bits à 1 qu'il contient

La **distance de Hamming** entre 2 mots de même longueur est le nbre de positions binaires qui diffèrent entre ces 2 mots

- On l'obtient par le poids de Hamming de la somme binaire des 2 mots

$$d(x,y) = \sum_{i=1}^N (x_i \oplus y_i)$$

La **distance de Hamming** d'un code est la distance minimale entre tous les mots du code

$$d_H = \min_{x,y \text{ des mots du code}} (d(x,y)) \quad \forall x,y \ x \neq y$$

Exp

- Poids de Hamming (00101100) = 3
- Distance de Hamming (00101100,01110000) = 4

70

DÉFINITIONS : CAPACITÉ D'UN CODE

La capacité de détection (resp. de correction) d'un code est définie par les configurations erronées qu'il est capable de détecter (resp. corriger)

Une erreur simple, double ou d'ordre p affecte 1, 2 ou p positions binaires d'un mot

Avec une distance de $d=2k+p$ ($p=0$ ou 1 selon la parité de d) on peut:

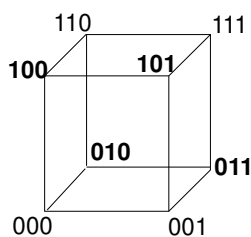
Détecter jusqu'à $d-1$ erreurs

Corriger jusqu'à $k+p-1$ erreurs

- **Exp** : distance=5, capacité de détection ≤ 4 , capacité de correction ≤ 2

71

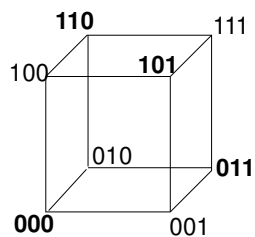
EXEMPLE ILLUSTRATIF



Code 010, 011, 100, 101

$d=1$

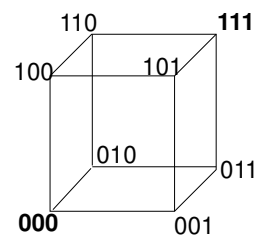
Détection = 0 erreur
Forte proba qu'on ne détecte pas l'erreur
Exp : 100 et on reçoit 101



Code 000, 011, 101, 110

$d=2$

Détection = 1 erreur
Erreur est toujours détectée
exp : 000 on reçoit 100, 010, 001
correction = 0



Code 000, 111

$d=3$

(transmission de moins de données
2 bits de contrôle par bit de donnée
détection jusqu'à 2 erreurs
correction 1 erreur

72

PARAMÈTRES D'UN CODE

Taux d'erreur brut $\tau = \frac{\text{nombre de messages faux}}{\text{nombre total de messages}}$

Efficacité d'un code $e = \frac{\text{nombre de messages reconnus faux}}{\text{nombre total de messages faux}}$

Taux d'erreur global résiduel

$$q = \frac{\text{nombre de messages finalement faux (erreur non détectée, non corrigée)}}{\text{nombre total de messages}}$$

Rendement d'un code $r = \frac{\text{nombre de bits utiles reçus}}{\text{nombre de bits envoyés}}$

73

EXEMPLES DE CODES SIMPLES PAR BLOCS

Le contrôle de parité

VRC (Vertical Redundancy Checking) : code de parité

- Parité paire (impaire) : le poids de Hamming des mots de code est pair (impair)
- C'est un code systématique (k,k+1) dans lequel un bit (le bit de parité) est ajouté au mot initial
- Exemple
 - Transmission de caractère ASCII (sur 7 bits)

Caractère	code ASCII	mot codé (parité paire)	mot codé (parité impaire)
A	1010001	1010001 1	10100010
E	0110101	0110101 0	01101011
V	1000001	1000001 0	10000011

- Ce code est capable de détecter les erreurs en nombre impair. Il ne détecte pas les erreurs en nombre pair
- Ce code ne permet pas de corriger les erreurs! Seulement de les détecter!

74

EXEMPLES DE CODES SIMPLES PAR BLOCS

Parité longitudinale

- LRC (Longitudinal Redundancy Checking)

Parité croisée : longitudinale et transversale

- Association d'un double codage de la parité
 - LRC et VRC
 - Principe : disposer les données sous forme matricielle ($k=x.y$). Appliquer la parité paire sur les lignes et les colonnes. On obtient une matrice $(x+1,y+1)$.
 - Exp

VRC	01101001
	11001100
	00100010
LRC	10000111

- Le rendement est faible : $x.y/(x+1)(y+1)$
- Le délai de codage/décodage est important : il faut recevoir tout le bloc
- On ne détecte que les erreurs sur un nombre impair de bits

75

LES CODES POLYNOMIAUX OU CRC

Codes à redondance cyclique CRC (Cyclic Redundancy Checks)

- Très utilisés dans les réseaux de communication (Ethernet, FDDI, ...)
- Un mot de n bits $\rightarrow$ polynôme de degré $n-1$
 - Exp : 11011 est transformé en polynôme $x^4 \oplus x^3 \oplus x^1 \oplus 1$
- Les données sont transmises par blocs de n bits
 - A chaque bloc correspond un polynôme $M(x)$ de degré $n-1$
- L'émetteur et le récepteur choisissent un polynôme dit **polynôme générateur** de degré g inférieur à n
 - Ce polynôme sera utilisé pendant toute la durée de la transmission
 - Le degré du polynôme définit la longueur du champ de contrôle
 - Exp de polynômes générateurs normalisés par UIT-T :
 - HDLC-LAPB : CRC-16 : $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
- Il existe alors deux méthodes pour émettre des données U (de taille n) de A vers B :
 - Codage par multiplication, décodage par division
 - Codage par division, décodage par division

76

LES CODES À REDONDANCE CYCLIQUE CRC

Codage par multiplication, décodage par division

- Considérer U sous forme polynomiale binaire $U(x)$. $U(x)$ est de degré $n-1$
- A calcule $M(x)=U(x)*G(x)$ et l'envoie
- B divise le M reçu par G : $M(x) = U(x).G(x) + s(x)$
- Si $S(x)=0$, il n'y a pas d'erreurs détectées, sinon il y en a.
- $S(x)$ est appelé **syndrome d'erreurs**
- Constat : Calcul rapide de la valeur à envoyer (M) mais les données sont plus difficiles à extraire (Division)

77

LES CODES À REDONDANCE CYCLIQUE CRC

Codage par division, décodage par division

- Considérer U sous forme polynomiale binaire $U(x)$. $U(x)$ est de degré $n-1$
- Multiplier $U(x)$ par x^g . g est le degré de $G(x)$
- Calculer le reste $R(x)$ de la division modulo 2 de $U(x)*x^g$ par $G(x)$.
- Ajouter $R(x)$ à $U(x)*x^g$
- Transmettre la séquence de $n+g$ bits correspondant au polynôme $M(x)= U(x)*x^g +R(x)$
- **Rem** : par construction $M(x)$ est divisible par $G(x)$
- Détection d'erreurs de transmission à la réception
 - Soit $M'(x)$ le polynôme correspondant à la séquence de $n+g$ bits reçus
 - Calculer le reste de la division modulo 2 de $M'(x)$ par $G(x)$
 - Si le reste est nul $\Rightarrow$ pas d'erreur détectée
 - Si le reste est non nul $\Rightarrow$ une erreur de transmission est détectée

78

PROPRIÉTÉ DES CODES POLYNOMIAUX

Un code polynomial détecte toutes les erreurs simples

Un code polynomial qui génère g bits de redondance détecte toutes les rafales d'erreurs de longueur $\leq g$

La probabilité de ne pas détecter les erreurs de longueur $> g$ est très faible

Exemples de codes polynomiaux

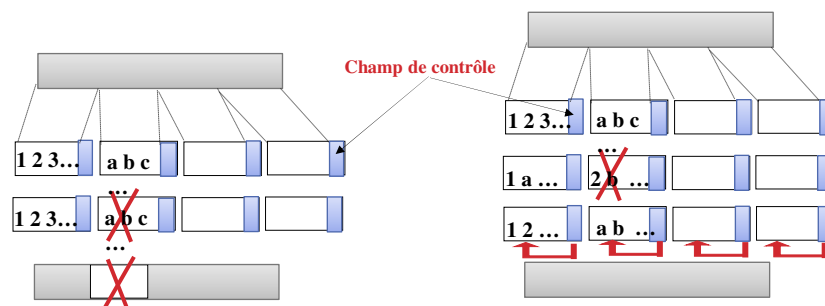
- CRC-12 : générant 12 bits de redondance
 - $G(x) = x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x + 1$
- AVI V41 CCITT : polynôme CRC-CCITT (protocole de liaisons en pt-à-pt dérivés de HDLC)
 - $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
- CRC-IEEE 802 : polynôme générant 32 bits de redondance (Ethernet, Boucle IBM FDDI)
 - $G(x) = x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

79

AUTRES TECHNIQUES DE CORRECTION D'ERREURS

Entrelacement

- Répartir les bits consécutifs des blocs formant le message à transmettre dans des paquets différents
- Résultat
 - Un groupe d'erreurs (affectant un paquet) affectera uniquement qlq bits dans plusieurs blocs
 - La technique de protection contre les erreurs appliquée aux blocs peut corriger indépendamment les erreurs dans chaque bloc



80

CONTRÔLE D'ERREURS PAR RETRANSMISSION

Principe

- Dès détection d'une erreur, le récepteur demande à l'émetteur de retransmettre une nouvelle fois le message (codé)
- Cette correction est préférée dans les réseaux à
 - taux de perte faible, délai de retransmission tolérable (surcoût plus faible)

Fonctionnement

- L'émetteur E conserve une copie des données qu'il envoie
- Le récepteur R détecte les erreurs grâce au champ de contrôle d'erreurs dans les paquets de données
- R informe E de la bonne ou mauvaise réception en retournant un paquet spécifique
 - **Acquittement** positif (resp. négatif) appelé ACK (resp. NACK)
- Si E reçoit un NACK alors retransmission du paquet erroné
- Sinon transmission du prochain paquet

81

CONCLUSION

Mécanismes de protection contre les erreurs

- Détection
- Autocorrection
- Retransmission

Amélioration de la fiabilité de la transmission mais :

- Certaines erreurs peuvent ne pas être détectées
- Certaines erreurs ne peuvent pas être corrigées
- Certaines erreurs peuvent être mal corrigées

Ces mécanismes sont présents au sein de nombreuses couches dont

- Liaison de données (Ethernet, HDLC, FDDI,...)
- Réseau (IP,...)
- Transport (TCP, UDP, ...)

82

ORGANISATION DU COURS

- A. Introduction
- B. Codage et transmission
- C. Correction des erreurs
- D. Liaison de données**
- E. Réseaux locaux
- F. Protocole réseau IP
- G. Protocoles de transport

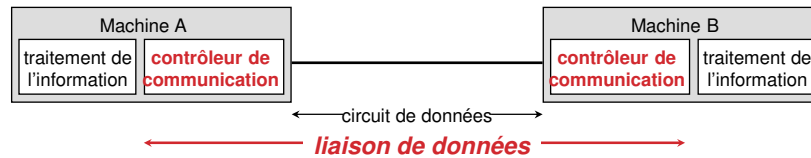
83

PLAN

- Rôle de la liaison de données
- Mécanismes de communication
- Un exemple de protocole liaison : HDLC
- Conclusion

84

LA LIAISON DE DONNÉES



Le circuit de données permet d'émettre et/ou de recevoir des **bits** en série avec :

- Un débit, un délai, un taux d'erreur

La liaison de données a pour rôle de **fiabiliser** le transfert d'information (structurée en **trames**) entre 2 contrôleurs de communication

Fiabilité :

- pas d'erreur
- pas de perte
- pas de déséquencelement
- pas de duplication

Les fonctions de la liaison de données sont réalisées par une carte spécifique appelée contrôleur de communication (exp : carte HDLC, Ethernet,...)

85

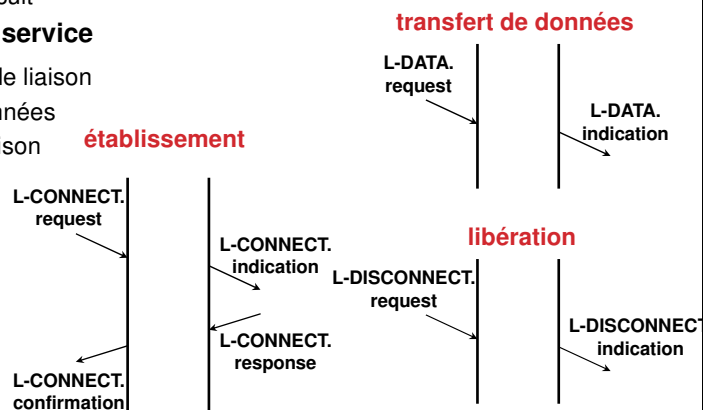
LA LIAISON DE DONNÉES

Services rendus par la liaison de données

- les utilisateurs doivent avoir l'illusion d'un canal de transmission fiable exempté d'erreurs de transmission
- les utilisateurs doivent pouvoir établir et libérer logiquement une liaison au dessus d'un circuit

3 éléments de service

- établissement de liaison
- transfert de données
- libération de liaison



86

LES PROTOCOLES DE LIAISON DE DONNÉES

- Un **protocole** de liaison de données : un *ensemble de règles* permettant de gérer la liaison
 - règles de *codage*
 - règles de *structuration*
 - règles d'*échange*
- Le protocole met en œuvre un certain nombre de *mécanismes de communication*
 - Définition et délimitation des trames
 - Contrôle de flux
 - Contrôle d'erreur
 - Temporisateurs, ...

87

PLAN

Rôle de la liaison de données

Mécanisme de communication

Un exemple de protocole liaison : HDLC

Conclusion

88

DÉLIMITATION DE TRAMES

Notion de trame

- Les protocoles de liaisons de données manipulent des blocs d'éléments binaires appelés trames
- La trame est l'unité de base que gère le protocole de liaison de données (L-PDU)
- La trame transporte les données de l'utilisateur et des informations de contrôle
- Elle est de longueur variable mais bornée (trame HDLC...) ou fixe (cellule ATM)

Délimitation de trame

- **Problème**
 - le récepteur doit savoir quand commence une trame et quand elle finit
- **Solution**
 - une trame doit commencer par un marqueur de début de trame et se finir par un marqueur de fin de trame
 - **Fanion** de début/fin de trame



89

DÉLIMITATION DE TRAMES

Délimiteur de fin : fanion

- Exp : suite particulière de bits (01111110 en HDLC) ou des séquences non utilisées pour coder les données binaires (symboles J, K en Token Ring)

Avantages du découpage en trames

- Si erreur, n'envoyer qu'une partie du message
- Partage d'un lien : meilleure répartition entre les sources
- Taille tampon limitée

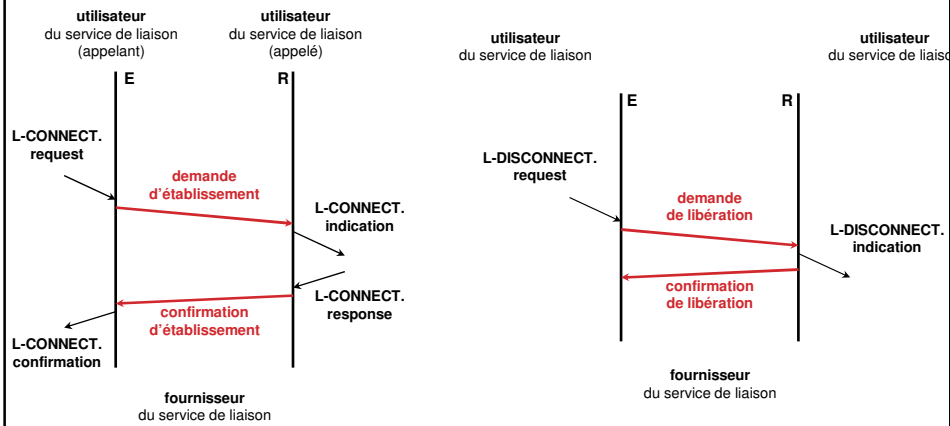
Quelques remarques...

- Le délai de transmission est énorme si le fichier est transmis sans être segmenté
- Plus la longueur de la trame est grande, plus la probabilité qu'elle soit correcte est petite

90

ÉTABLISSEMENT/LIBÉRATION DE LA LIAISON

Le circuit de données est préalablement établi entre E et R
Echange de données Puis libération de la liaison



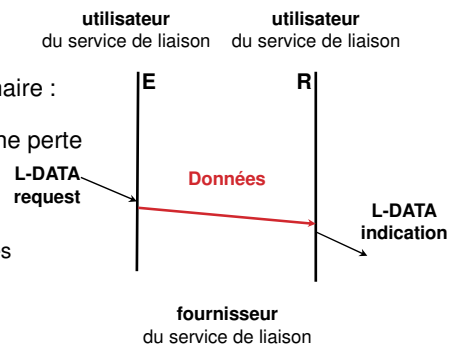
➡ Envoi d'une trame de **demande d'établissement/ libération** et d'une trame de **confirmation d'établissement/ libération**

91

TRANSFERT DE DONNÉES

Plusieurs problèmes peuvent survenir

- **Corruption** des trames
 - Transformation de la suite binaire : erreurs de transmission
 - La corruption se traduit par une perte (le récepteur la détruit)
- **Perte** de trames
 - Panne :
 - rupture du circuit de données
 - panne d'un des ETTD
 - panne d'un des ETCD
 - Congestion
 - Non-reconnaissance de la trame, exp : corruption du délimiteur
- **Quelles sont les solutions ?**



92

LE CONTRÔLE DE FLUX

- Comment savoir si le récepteur peut accepter de nouvelles données? → **le contrôle de flux**
- **Problème**
 - Le rythme d'envoi de l'émetteur est supérieur au rythme de traitement du récepteur (engorgement du récepteur)
- **Solution**
 - Nécessité de contrôler le rythme d'émission
 - Envoi de trames spéciales « **prêt à recevoir la suivante** »
 - Protocole « **Send-and-Wait** »
 - Envoyer une trame et attendre de son accusé de réception



93

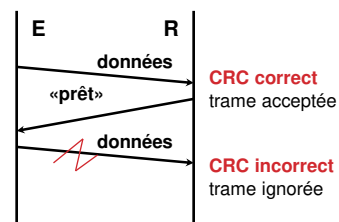
DÉTECTION DES ERREURS

Problème

- Des erreurs de transmission peuvent endommager des données

Solution

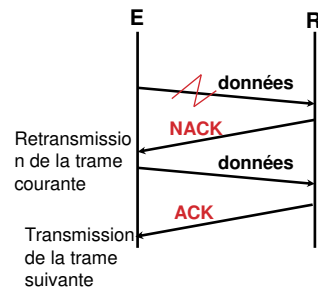
- Information de contrôle permettant de détecter les erreurs de transmission survenues dans une trame
 - Champ de type CRC en fin de trame



94

REPRISE SUR ERREUR

- Problème
 - Que faire quand on reçoit une trame erronée?
- Solution
 - Introduire une trame de contrôle demandant la retransmission de la trame erronée
- Besoin
 - Rétention de copies : garder une copie de toute trame de données émise jusqu'à réception d'un acquittement positif
 - Buffer!
- Trames de contrôle
 - ACK (la suivante)
 - NACK (retransmission)



95

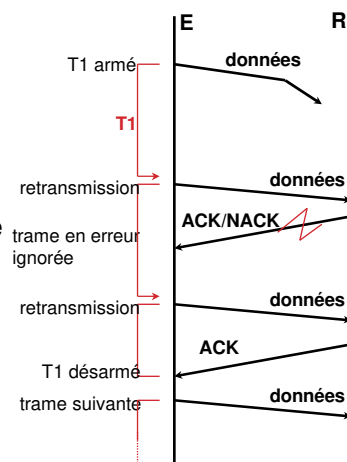
TEMPORISATEUR DE RETRANSMISSION

Problème

- Perte de trames : interblocages
- Exp : perte de données, perte d'accusé, accusé erroné

Solution

- Utiliser un temporisateur limitant l'attente d'une réponse
- **Temporisateur de retransmission T1**
- Si l'émetteur ne reçoit pas d'acquittement avant expiration de T1 : alors retransmission de la trame



96

TEMPORISATEUR DE RETRANSMISSION

Quelle valeur donner à T1?

- Trop grand : reprise tardive
- Trop petit : retransmissions inutiles
- $T=?$

Conséquences...

- Les trames NACK ne sont plus obligatoires, mais elles permettent d'accélérer la reprise
- Nombre maximum de tentatives
 - Problème : en cas d'incident grave sur le circuit de données, retransmission à l'infini
 - Solution : limiter le nombre de retransmissions (N1), libérer éventuellement la liaison

97

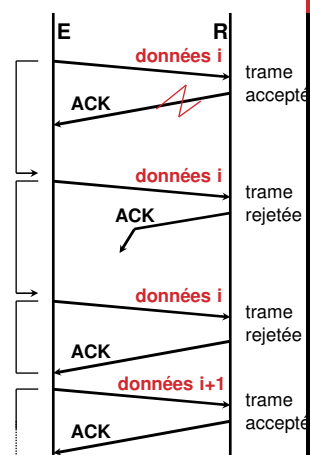
NUMÉROTATION DES TRAMES DE DONNÉES

Problème

- Possibilité de duplication de trames
 - Retransmission suite à un acquittement perdu ou erroné

Solution

- Utiliser un champ de numérotation dans la trame de données
 - Introduire la numérotation pour distinguer deux trames successives différentes
 - A chaque trame est associé un numéro $N(S)$
 - Numérotation modulo m ($= 2^{\text{taille_du_champ_de_numérotation}}$)
 - Introduction d'un compteur $V(S)$ en émission
 - Pour toute nouvelle émission, E place la valeur du compteur dans l'en-tête (champ $N(S)$), émet la trame
 - Pour toute répétition, E émet la trame sans modification de numéro

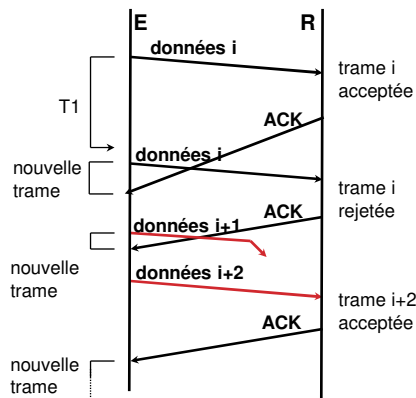


98

NUMÉROTATION DES ACK

Problème

- Expiration du temporisateur avant l'arrivée de l'ACK
- Possibilité de perte de données non récupérables



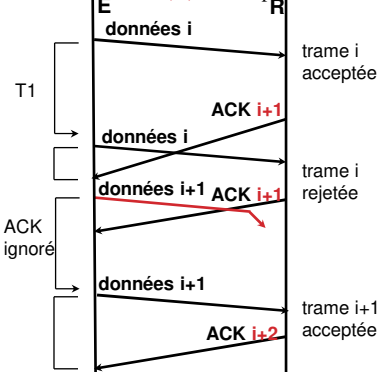
Solution

➤ Les ACK doivent indiquer le numéro de la trame qu'ils acquittent

➤ champ $N(R)$ pour les trames ACK : c'est le numéro de la prochaine trame attendue

➤ Numérotation modulo m

➤ Variable $V(R)$ en réception



99

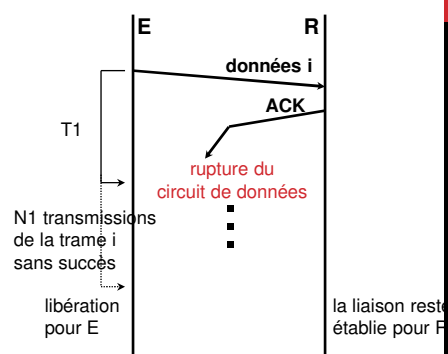
DÉTECTION D'INACTIVITÉ

Problème

Ressources de communication bloquées inutilement

Idée

Utiliser un mécanisme de temporisation limitant la durée d'inactivité de la liaison



🔧 temporisateur de détection d'inactivité /

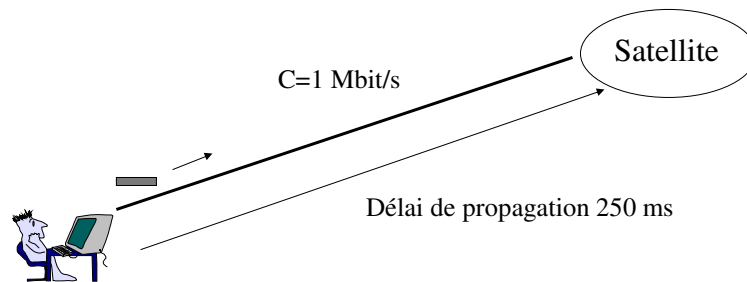
- Dimensionnement
- Envoi de trames pour maintenir une activité

100

PROTOCOLES À FENÊTRE

Notion d'anticipation

- Exemple : communication sur une liaison satellite
- Taille de trame $L=1000$ bits
- Taux d'utilisation de la bande passante?

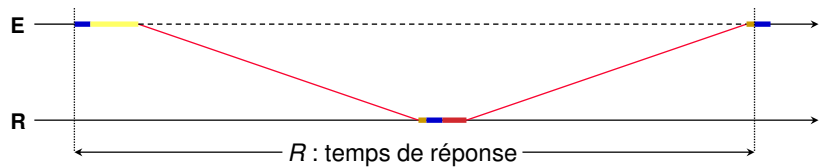


101

PROTOCOLES À FENÊTRE : ANTICIPATION

Problème

mauvaise utilisation du circuit lorsque le temps de propagation est important



T_{te} : temps de traitement en émission
 T_{td} : temps de transmission des données
 T_p : temps de propagation
 T_{tr} : temps de traitement en réception
 T_{ta} : temps de transmission de l'acquittement

102

ANTICIPATION

Soit ρ le taux d'utilisation du canal de transmission

$$\rho = \frac{T_{id}}{R} \Rightarrow \rho \approx \frac{T_{id}}{T_{id} + 2 T_p} \Rightarrow \rho \approx \frac{l}{l + 2 T_p D}$$

Cas d'une liaison satellite

$D = 1 \text{ Mbit/s}$
 $T_p = 250 \text{ ms}$
 $l = 1000 \text{ bits}$

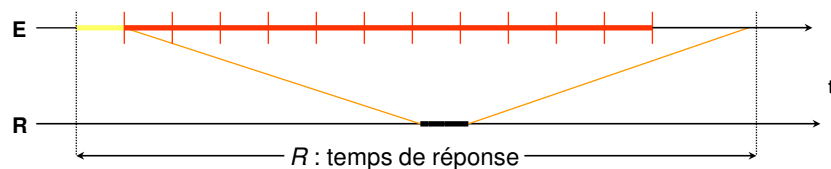
$$\Rightarrow \rho = 0,2\% !!!$$

103

ANTICIPATION

Principe

Pour une meilleure efficacité on autorise l'émetteur à envoyer plusieurs trames consécutives avant de se bloquer en attente d'acquittement



↪ fenêtre d'anticipation de taille W
↪ W est choisi de façon à permettre à l'émetteur d'émettre de façon continue pendant un temps égal au délai de propagation d'Aller/Retour

104

ANTICIPATION

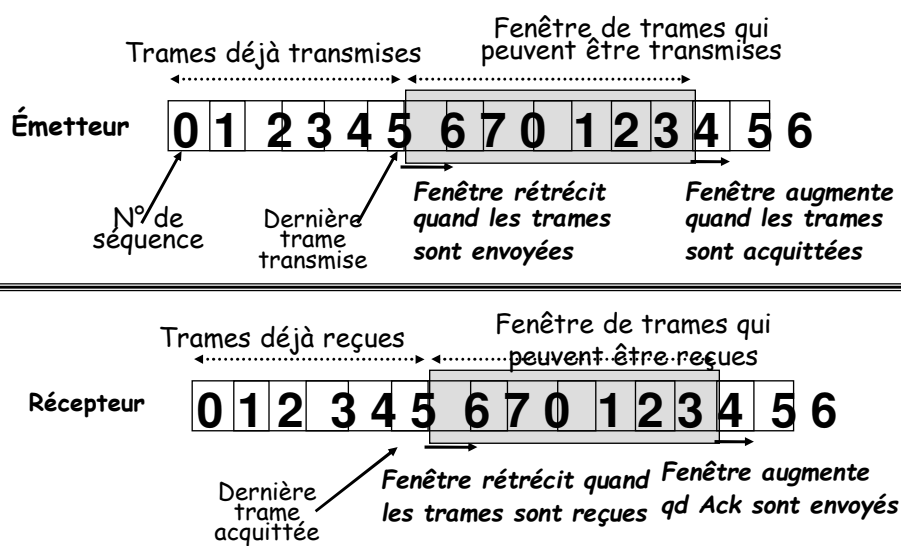
Principe

- la fenêtre est une liste de W numéros de séquence
- l'émetteur est autorisé à envoyer les W trames de données dont le $N(S)$ est tel que :
 $\text{dernier } N(R) \text{ reçu} \leq N(S) \leq \text{dernier } N(R) \text{ reçu} + W - 1$

Notion de fenêtre coulissante

105

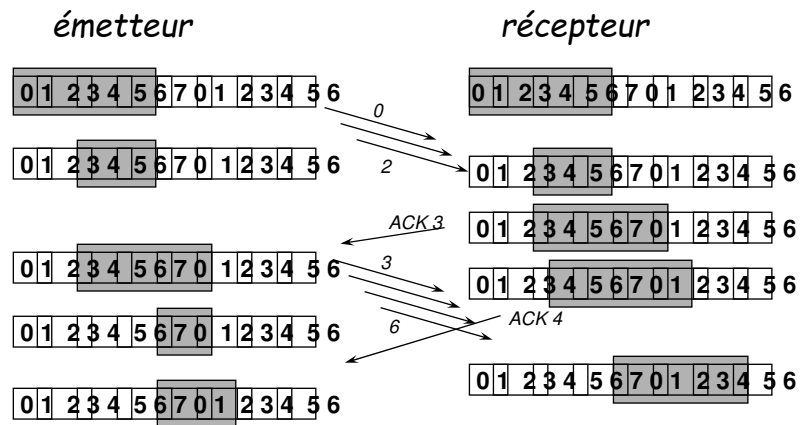
FENÊTRE COULISSANTE



106

FENÊTRE COULISSANTE

Exemple : Cas sans erreur



Remarque

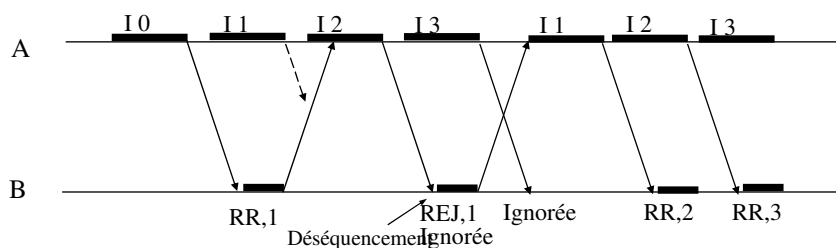
➤ Regroupement d'acquittements : un acquittement acquitte toutes les trames jusqu'au numéro $N(R) - 1$ (dont le $N(S) \leq N(R) - 1$)

107

PROTOCOLES À FENÊTRE

Si erreur

- Technique 1
 - Rejeter toutes les trames qui suivent la trame erronée en n'envoyant pas d'acquittement pour ces trames
 - L'émetteur retransmet toutes les trames à partir de la trame erronée
 - Utilisation de la trame REJ (Reject)
- Go-back-N



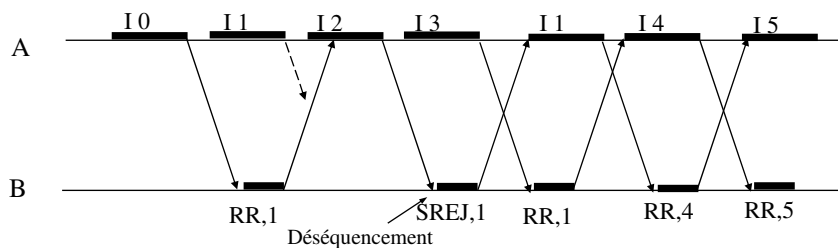
108

PROTOCOLES À FENÊTRE

Technique 2

- Ne rejeter que la trame erronée
- Utilisation de la trame SREJ (Selective Reject)

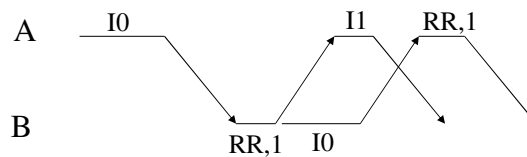
Selective reject



109

PROTOCOLES À FENÊTRE

Dialogue bidirectionnel



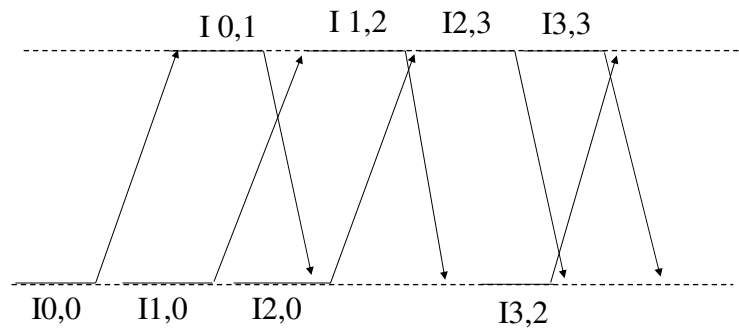
• Piggybacking

- Trames I utilisées à la fois comme des trames d'information et comme trames RR
- Chaque trame I possède deux numéros
- N(S) : numéro de la trame
- N(R) : numéro acquittant les trames émises dans le sens opposé
- Les trames RNR, REJ sont transportées explicitement

110

PROTOCOLES À FENÊTRE

Piggybacking



111

PROTOCOLES À FENÊTRE

Send-and-Wait

- peu efficace

Go-back-N

- le plus utilisé

Selective Reject

- complexe à implanter sans gain flagrant

112

MÉCANISMES : UN BILAN

Trames

- demande d'établissement
- confirmation
- demande de libération
- données
- acquittement positif
- rejet global / sélectif
- stop

Temporisateurs

- retransmission $T1$
- inactivité I

Paramètres

- modulo de la num. m
- nb max de transm. $N1$
- taille de la fenêtre W

 le protocole...

113

PLAN

Rôle de la liaison de données

Mécanisme de communication

Un exemple de protocole liaison : HDLC

Conclusion

114

HISTORIQUE ET NORMES ASSOCIÉES

Développement de SDLC (Synchronous Data Link Communication) par IBM pour SNA (vers 1970)

SDLC a été soumis à l'ISO pour normalisation. Après modification il est devenu HDLC (High-level Data Link Communication)

Le CCITT (UIT) a adopté et modifié HDLC qui est devenu LAP (Linkage Access Protocol) pour le standard de réseau X25

Le CCITT a modifié X25 dont le LAP qui est devenu LAPB (Linkage Access Protocol B ou Balanced)

Une autre version : le LAPD (Linkage Access Protocol on the D channel) défini pour être le protocole liaison sur les canaux D du RNIS

Le standard Internet PPP (Point to Point Protocol) adopte le même format de trames et les mêmes principes

...

115

STRUCTURE DE LA TRAME HDLC

fanion	adresse	contrôle	données	FCS	fanion
8 bits	8 bits	8 bits	<i>n bits (taille variable)</i>	16 bits	8 bits

- Fanion (flag) : '01111110'
 - délimitation de la trame, début et fin
 - synchronisation
 - **mécanisme de transparence** : par insertion d'un '0' après cinq '1' consécutifs dans les données
 - En émission
 - Le mécanisme consiste à insérer dans le corps de la trame un 0 après avoir rencontré 5 bits successifs à 1
 - En réception
 - Le mécanisme consiste à supprimer un 0 après avoir rencontré 5 bits consécutifs à 1
- Adresse
 - identification de la station secondaire impliquée dans l'échange
 - trame de commande : la station secondaire destinataire
 - trame de réponse : la station secondaire émettrice

116

STRUCTURE DE LA TRAME HDLC

fanion	adresse	contrôle	données	FCS	fanion
8 bits	8 bits	8 bits	<i>n bits (taille variable)</i>	16 bits	8 bits

➤ Données

- données de l'utilisateur
- toute trame de longueur inférieure à 6 octets est non valide ($n \geq 0$)

➤ Contrôle

- type de la trame : I, S, U
- numéros de séquence
 - extension à 16 bits en modulo 128

➤ FCS (*Frame Check Sequence*)

- Détection d'erreur : calculé à partir du polynôme V.41 ($x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$)

117

LE CHAMP DE CONTRÔLE

trames I Information

N(R)	P/F	N(S)	0
------	-----	------	---

8 bits

trames S Supervisory

N(R)	P/F	S	S	0	1
------	-----	---	---	---	---

trames U Unnumbered

U	U	U	P/F	U	U	1	1
---	---	---	-----	---	---	---	---

- **N(S)** : numéro de séquence en émission (modulo 8)
- **N(R)** : numéro de seq. de la prochaine trame I attendue (modulo 8), indique la bonne réception des trames jusqu'à (N(R) - 1)
- Si mode étendu, compteurs modulo 128
- **P/F** :
 - Poll : demande de réponse immédiate pour les commandes
 - Final : réponse au bit P ou trame finale (en NRM)
- jusqu'à 4 trames S différentes
- jusqu'à 32 trames U différentes

118

LES TYPES DE TRAMES

• Trames S

- Elles permettent d'acquitter les trames reçues
- Elles indiquent si les récepteurs sont aptes à recevoir de nouvelles trames

Fanion	Adresse	Contrôle				FCS	Fanion
		N(R)	P/F	S	S	0 1	
				0	0	RR	Receive Ready
				0	1	RNR	Receive Not Ready
				1	0	REJ	REJECT
				1	1	SREJ	Selective Reject

• Trames RR (Receive Ready)

- Indique que l'équipement est prêt à recevoir de nouvelles trames
- Le numéro N(R) indique le numéro de la prochaine trame attendue
- Il indique que les trames de numéro N(S) strictement inférieur à N(R) ont été bien reçues

• Trames RNR (Receive Not Ready)

- Indique que l'équipement récepteur n'est pas en mesure de recevoir de nouvelles trames
- N(R) indique le n° de la première trame non acceptée

• Trames REJ (REJECT)

- Indique que l'équipement demande l'arrêt immédiat des transmissions en cours et retransmission des trames à partir de la trame de numéro N(R)

119

LES TYPES DE TRAMES

Les trames U

- Définissent des commandes et réponses pour faire fonctionner la liaison

Fanion	Adresse		Contrôle			FCS		Fanion
U	U	U	P/F	U	U	1	1	
0	0	1	P	1	1	1	1	Commande SABM
0	1	0	P	0	0	1	1	Commande DISC
0	1	1	F	0	0	1	1	Réponse UA
1	0	0	F	0	1	1	1	Réponse FRMR
0	0	0	F	1	1	1	1	Réponse DM

➤ Commande SABM (Set Asynchronous Balanced Mode) (SNRM, SARM)

- Elle permet de mettre la liaison en mode de fonctionnement équilibré (autonome)

➤ Commande DISC (DISConnect)

- Libération de la liaison

➤ Réponse UA (Unnumbered Acknowledgement)

- Elle permet d'acquitter les commandes (SABM, DISC)

➤ Réponse DM (Disconnect Mode)

- Elle indique l'état de déconnexion d'une station.
- Elle est utilisée, en particulier, pour répondre négativement à une initialisation SABM

➤ Réponse FRMR/CMDR (FRaMe / CoMmand Reject)

- Trame non valide

120

CONCLUSION

Relation HDLC – LAPB

- LAP-B n'utilise que le mode ABM
- LAP-B n'utilise que le REJ (pas de SREJ)

HDLC très complet ... et très complexe !

A la base de nombreux protocoles de niveau 2

- LAP-D (RNIS)
- LAP-F (Relayage de Trames)
- LLC (Réseaux locaux)
- PPP (Internet)

121

LE PROTOCOLE PPP

Point to Point Protocol

variante de HDLC

fonctionnalités

- délimitation de trames
- détection d'erreurs
- négociation d'adresses
- authentification
- multi-protocole

↪ champ supplémentaire

- de deux octets
- déterminant le protocole de niveau supérieur
 - 0x0021 : IPv4
 - 0x002B : IPX
 - 0x800F : IPv6
- situé après le champ de contrôle du format HDLC

122

ORGANISATION DU COURS

- A. Introduction
- B. Codage et transmission
- C. Correction des erreurs
- D. Liaison de données

E. Réseaux locaux

- Accès au médium
- Les normes IEEE 802
- IEEE 802.3 CSMA/CD
- IEEE 802.5 Token Ring

- F. Protocole réseau IP
- G. Protocoles de transport

123

INTRODUCTION

Les réseaux locaux (LAN : Local Area Networks)

- Distance < km, Débit > 1 Mbit/s

Particularités

- Gestion autonome
 - Un LAN est un équipement privé d'une entreprise
- Médium partagé
 - Médium unique partagé par toutes les machines

Pourquoi un support partagé?

- Liaisons point à point
 - Pour une connectivité totale, il faut $n(n-1)/2$ liaisons
 - Problème de coût
- Nœud Central
 - Utilisation d'un équipement spécial (commutateur) assurant la communication avec les autres équipements
 - Pour une connectivité totale, il faut $n-1$ liaisons
 - L'équipement central doit être très puissant (goulot d'étranglement)
- Médium commun
 - Pour une connectivité totale, il faut un seul câble

124

INTRODUCTION

Conséquences du médium partagé

- Diffusion
 - Un message est diffusé à toutes les stations au lieu de sa seule destination
- Problème d'accès au support
 - Mise en œuvre de mécanismes de contrôle d'accès au médium pour contrôler les demandes d'accès simultanées
 - Les réseaux locaux diffèrent dans leur manière de gérer les accès
- Confidentialité
 - Toutes les stations ont la possibilité de capturer l'information, ce qui met en péril la confidentialité de l'information

125

MODÈLE ARCHITECTURAL

Les couches

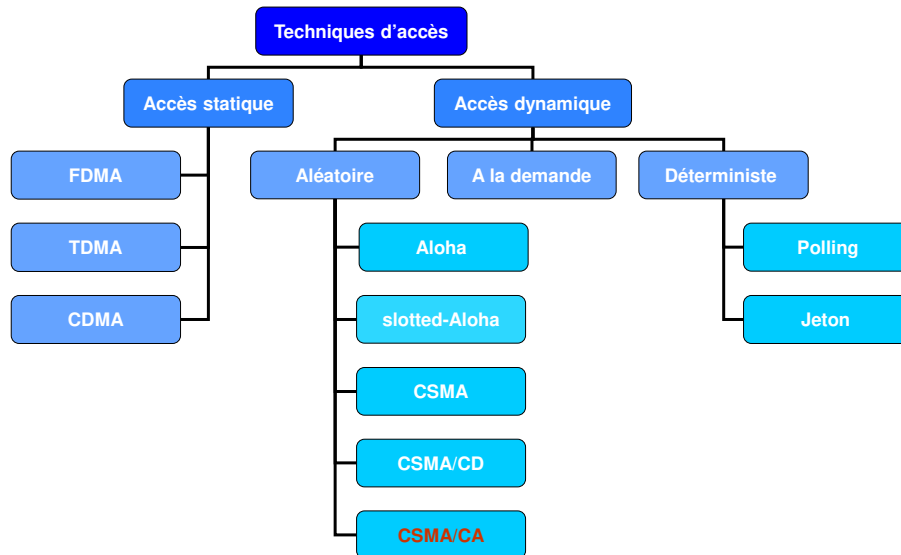
- Le rôle des réseaux locaux est d'assurer une liaison entre deux stations
- Leurs fonctionnalités sont limitées aux couches 1 et 2 du modèle OSI (couche physique et couche liaison)

Couche liaison

- Le modèle OSI considère une liaison point-à-point
- Un LAN doit résoudre le problème d'accès avant l'établissement d'une liaison
 - La couche liaison est divisée en deux sous-couches
 - La sous-couche MAC : Partage équitable du support entre tous les utilisateurs
 - La sous-couche LLC : Gestion des communications entre les stations et interface avec la couche "Réseaux"

126

PRINCIPALES TECHNIQUES D'ACCÈS



127

ACCÈS AU MÉDIUM

Allocation Statique

- TDMA (Time Division Multiple Access)
 - Découper le temps en intervalles réguliers
 - Chaque intervalle est affecté périodiquement à une station
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
 - Découper la bande passante en sous-bandes
 - Chaque sous-bande est affectée à une station
- Inconvénients
 - Manque d'efficacité
 - Matérialisation du partage ²

128

ACCÈS AU MÉDIUM

Allocation dynamique

- Accès aléatoire
 - Accès direct au support
 - Une station active tente sa chance en émettant sur le support
 - Problème de collision (détection et résolution de collision)
- Accès déterministe
 - Un mécanisme de décision pour élire une seule station parmi celles qui sont actives

129

ACCÈS ALÉATOIRE

ALOHA pur (pure Aloha)

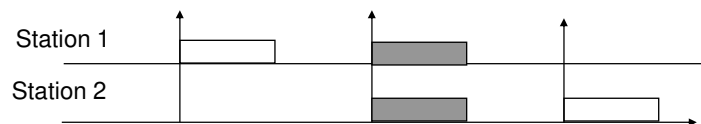
- Principe
 - Chaque station émet sa trame quand elle devient active, sans vérifier l'état du médium
 - En cas de collision chaque station concernée se retire pendant une durée aléatoire, puis retransmet son message
 - La collision est détectée si aucun acquittement n'est reçu au-delà d'un certain temps
- Inconvénients
 - Taux d'utilisation du canal = 18%

130

ACCÈS ALÉATOIRE

ALOHA discrétisé (slotted Aloha)

- Principe
 - Diviser le temps en slots constants
 - N'autoriser les émissions qu'au début du slot
 - Il n'y a pas de collision ou il y a collision complète sur le message
- Synchronisation globale
- Taux d'utilisation du canal 36%



131

ACCÈS ALÉATOIRE

Accès aléatoire avec écoute de la porteuse

- Ecoute du canal avant toute émission

CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

- Lorsqu'une station veut émettre, elle écoute
- Si personne d'autre n'émet (canal libre), elle émet
- Si une autre station émet (canal occupé), elle attend

CSMA 0-persistent

- Si le canal est libre, la station émet
- Sinon, elle se retire pour une durée aléatoire avant de se remettre à l'écoute du canal

CSMA 1-persistent

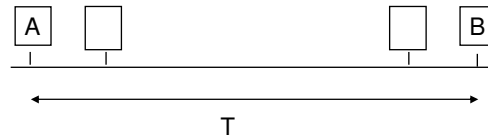
- Si le canal est libre, la station émet
- Sinon, elle attend jusqu'à la libération du canal pour émettre

132

ACCÈS ALÉATOIRE

CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- CSMA non suffisant
 - Délai de propagation
 - Deux stations distantes sur le réseau détectent le canal libre et émettent simultanément
 - Temps entre le moment où le premier élément binaire est transmis par une station et celui où il est reçu par une autre station



133

ACCÈS ALÉATOIRE

CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- Constat : Continuer à émettre après collision diminue le taux d'utilisation
- Donc : Continuer à écouter le canal pendant la transmission de la trame
- Détection de Collisions : détection d'inférences
- Collision : superposition de signaux
- Nécessité de technique de codage performantes permettant de reconnaître une superposition de signaux
- En cas de collision
 - arrêter l'émission
 - Retransmettre après un délai aléatoire

134

ACCÈS ALÉATOIRE

CSMA-CD (CSMA with Collision Detection)

- Zone d'incertitude
 - Si t_0 : instant d'émission du premier bit de la trame
 - L'émetteur n'est fixé sur le sort de la trame qu'au bout de (au plus tard)
:
$$2 * T_p = TC$$
$$TC : \text{Tranche canal}$$
 - $t_0 + TC = \text{zone d'incertitude}$
- Imposer une taille minimale de trame

135

ACCÈS DÉTERMINISTE

Polling

- Définir une unité centrale pour gérer l'accès au médium
- Cette unité invite les stations à émettre selon un ordre préétabli
- La fiabilité du réseau dépend de l'unité centrale

Anneau à jeton

- Contrôle d'accès distribué
- Utilisation d'une trame particulière : le jeton
- Seul le détenteur du jeton peut émettre
- Le jeton passe d'une station à une autre selon un ordre prédéterminé

136

LES NORMES IEEE 802

Normalisation

- Organismes
 - IEEE : Institute of Electrical and Electronical Engineers (US)
 - ECMA : European Computer Manufactures Association (Europe)
- Travaux du Comité 802
 - Le médium de transmission sera un support partagé (diffusion de messages)
 - Pas de commutateur centralisé!
 - La couverture géographique sera de l'ordre de 1 à 2 km
 - Le débit sera supérieur à 1 Mbit/s
 - Communication en mode sans connexion

137

LES NORMES IEEE 802

Normes

- Série des normes : IEEE 802.x
 - La norme 802.2 définit la couche LLC
 - La norme 802.3 définit les couches MAC et Physique des réseaux CSMA-CD
 - La norme 802.4 définit les couches MAC et Physique des réseaux Token-bus
 - La norme 802.5 définit les couches MAC et Physique des réseaux Token-Ring

138

L'ADRESSAGE

L'adressage

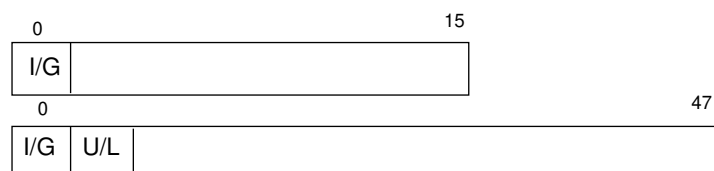
- Permet à une station de reconnaître les messages qui lui sont destinés
- Mécanisme
 - Chaque station reçoit un identificateur (une adresse)
 - Si une station A veut émettre des trames à une station B, elle doit mettre l'adresse de B dans chaque trame
 - Chaque station examine toutes les trames qui passent et capture celles qui portent son adresse
- Les adresses IEEE 802
 - Dans l'en-tête de chaque trame on définit (DA, SA)
 - SA : Source Address : identifie l'émetteur
 - DA : Destination Address : identifie le(s) destinataire(s)

139

L'ADRESSAGE

Adresses IEEE 802

- Deux formats
 - Un format court sur 16 bits
 - Un format long sur 48 bits



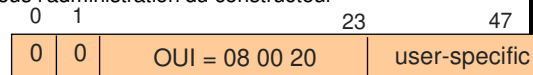
- Adresse individuelle I/G=I=0
- Adresse de groupe I/G=G=1
- Adresse locale : U/L=L=1
- Adresse universelle : U/L=U=0

140

L'ADRESSAGE

Adresses IEEE 802.3

- Adresses universelles
 - Définies et gérées par un seul organisme mondial (IEEE) dont le but est de garantir l'unicité de chaque adresse universelle
 - Comment?
 - Diviser l'adresse en deux parties de 24 bits
 - La partie de faible poids représente le OUI (Organizationally Unique Identifier) affecté par l'IEEE à un constructeur de cartes
 - La deuxième partie est sous l'administration du constructeur



- Syntaxe des adresses
 - Représenter chaque octet sous forme hexadécimale
 - 08:00:20:09:E3:D3 ou 08-00-20-09-E3-D8 ou 08002009E3D3
 - Adresses plates
 - Flat address
 - Pas d'information sur l'organisation du réseau

080009	HP
08005A	IBM
080020	SUN
080038	BULL

141

IEEE 802.3 CSMA-CD

Extension du CSMA/CD

- Taille minimale des trames de 64 octets
 - $2 \cdot T_{\max} = TC = 51.2 \mu s$
- Résolution de collision
 - En cas de collision, les stations impliquées deviennent inactives pendant un temps aléatoire t /
 $0 \leq t < X_b$
 - X_b calculée selon l'algorithme BEB (Binary Exponential Backoff)
- L'algorithme BEB
 - X_b à la première collision est égal à la tranche canal TC
 - Doubler X_b à chaque tentative manquée d'émission
 - Après la 10^{ème} tentative, cette borne est maintenue constante
 - Après 16 tentatives manquées, l'émission est abandonnée

142

IEEE 802.3 CSMA-CD - BEB

- A chaque collision on double l'espace de tirage pour réduire la probabilité de collision
 - Soit 0 et 1 deux choix
 - La station1 tire 0, la station2 tire 0, les deux stations commencent à émettre juste après la collision
 - La station1 tire 0, la station2 tire 1, la station1 commence à émettre juste après la collision, la station2 après une TC
 - La station1 tire 1, la station2 tire 0, la station1 émet après une TC et la station2 juste après la collision
 - La station1 tire 1, la station 2 tire 1, les deux stations émettent après une TC
 - Deux collisions
 - En doublant l'espace de tirage (4 choix), on réduit à 1/4 la probabilité de collision

143

IEEE 802.3 CSMA-CD

Format de la trame (au niveau MAC)

DA	SA	Longueur	Données + bourrage	FCS
----	----	----------	--------------------	-----

DA : Adresse destination
l'émetteur

6 octets

Longueur :

- Longueur effective des données dans
taille
le champ Données
- Permet au récepteur de distinguer entre
les données utiles de ce qui est bourrage

Données :

- Reçues de la couche supérieure
- Taille max = 1500 octets

SA: Adresse de

6 octets

Bourrage :

- Pour atteindre la
minimale requise (64 octets)

FCS :

- 4 octets
- Détection d'erreurs

144

ETHERNET

Différences entre Ethernet et la norme IEEE 802.3

- Une trame Ethernet diffère d'une trame IEEE 802.3 par le champ longueur
- Pour Ethernet : ce champ contient l'identificateur du protocole de niveau supérieur (au lieu de la longueur de données)
- La couche LLC (IEEE 802.3) n'existe pas, l'aiguillage vers les couches supérieures est directement fait au niveau MAC
- Les bits de bourrage introduits au niveau MAC ne sont pas supprimés au niveau MAC : violation du fonctionnement de l'architecture en couches (OSI)
- Le protocole de niveau trois doit contenir un moyen pour éliminer les octets de bourrage s'ils existent

145

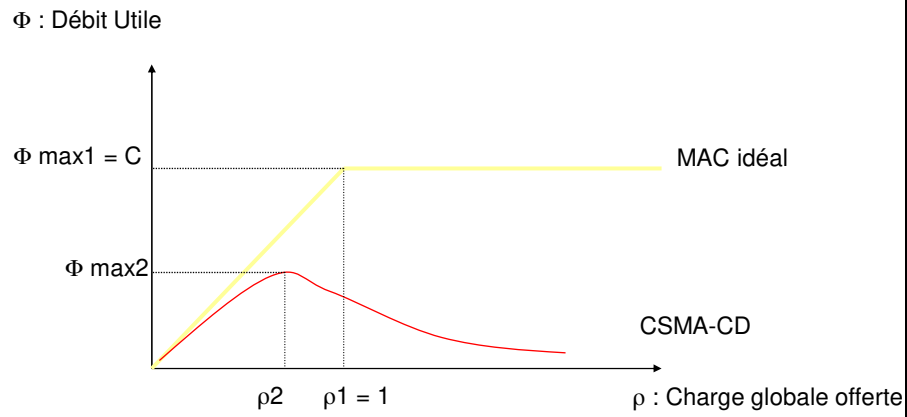
ETHERNET - PERFORMANCE

Critères de performance

- Efficacité
 - Rapport du débit utile maximum sur la capacité du support de transmission
 - Le débit utile : débit engendré par la transmission de trames n'ayant pas subis de collisions
- Délai d'accès
 - Le délai moyen d'accès par trame au support de transmission

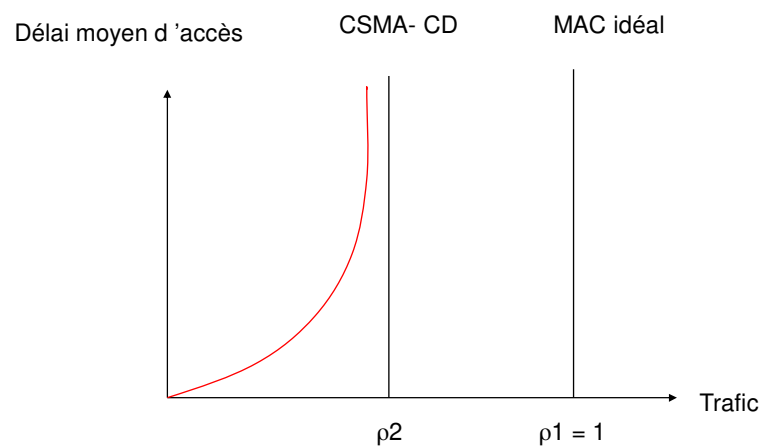
146

ETHERNET - EFFICACITÉ



147

ETHERNET - DÉLAIS D'ACCÈS



148

ETHERNET - PERFORMANCE

Conclusion

- CSMA-CD permet d'avoir un délai d'accès très faible à faible charge
- A forte charge, les collisions peuvent se produire
 - BEB n'élimine pas les risques de collisions répétitives et peut conduire à l'abandon de la trame
 - A forte charge, risque de paralysie du réseau
- Protocole peu adapté aux communications ayant des contraintes temporelles

149

ETHERNET

Caractéristiques physiques

- Câble coaxial ou paire torsadée
- La désignation du câblage utilise la convention X-Y-Z où
 - X désigne le débit en Mbit/s
 - Y désigne le mode de transmission
 - Y= BASE : transmission en bande de base
 - Y= BROAD : transmission en transposition de fréquence
 - Z désigne l'étendue maximale
 - Z = multiple de 100m pour un câble coaxial
 - Z = T pour une paire torsadée, F pour fibre optique
- Exemples :
 - Câble jaune : 10BASE5
 - Câble noir : 10BASE2
 - Paire torsadée : 10BASET, 100BASET

150

PRINCIPALES ÉVOLUTIONS D'ETHERNET

- **Fast Ethernet 100 Base T (1995)**
 - C'est la dénomination de l'extension à 100Mbit/s du réseau Ethernet 10Mbit/s. Même méthode d'accès.
 - L'augmentation du débit ne résulte que d'une vitesse accrue de l'électronique des cartes
- **Ethernet Commuté**
 - Technique de commutation de trames : commutateur
 - Un bus Ethernet peut être directement connecté sur chacun des ports du commutateur de trames
 - Si une station parle à une autre station du même bus, pas de sortie du bus, sinon sollicitation du commutateur; les collisions des transactions internes n'affectent pas les autres stations.
 - Fonctionnement :
 - Le commutateur lit la trame sur le port en entrée et la recopie sur le port de sortie en fonction de l'adresse destination de la trame (table de commutation)
 - Un commutateur dispose de mémoires tampon au cas où plusieurs trames en entrée veulent accéder simultanément au même port de sortie
- **Gigabit Ethernet (1998)**
 - Cuivre ou fibre
 - Fusion d'Ethernet IEEE802.3 et de Fiber Channel ANSI X3/T1
 - TC = 512 ns
- **10 Gigabit Ethernet (10GbE) depuis 2003**
 - CSMA/CD, cuivre ou fibre
- **100 Gigabit Ethernet (100GbE) vers 2010**

151

ETHERNET ALIMENTÉ

PoE (Power over Ethernet)

But : Alimenter tous les équipements actifs du réseau par un câble Ethernet

Portée limitée à 100 m

IEEE 802.3af

- Utilisation de deux paires torsadées non utilisées

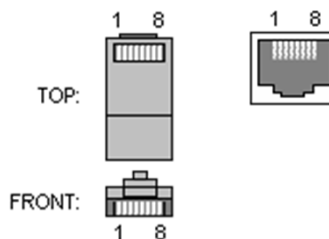
Spécifications

- Fonctionne sur câblage existant
- 350 milliamps de courant
- Puissance max 12.95 watts
- IP phones et wireless LAN access points consomment 3.5 à 10 watts.

IEEE 802.3at

- Puissance max : 30W

No PIN	Description	Couleur
1	TX +	Blanc/Orange
2	TX -	Orange
3	RX +	Blanc/Vert
4		Bleue
5		Blanc/Bleue
6	RX -	Vert
7		Blanc/Marron
8		Marron



152