

Signalisation, codage, contrôle d'erreurs

- Objectifs:
 - Comprendre les mécanismes utilisés pour transmettre des informations sur un support physique
 - Comprendre la nécessité de regrouper les informations sous la forme de trames
 - Connaître les principes de détection et de correction d'erreurs
- Plan
 - Présentation « culturelle » des mécanismes de transmission
 - Débit, codage, signalisation
 - Notion de trame et détection/correction d'erreur

Bibliographie et sources

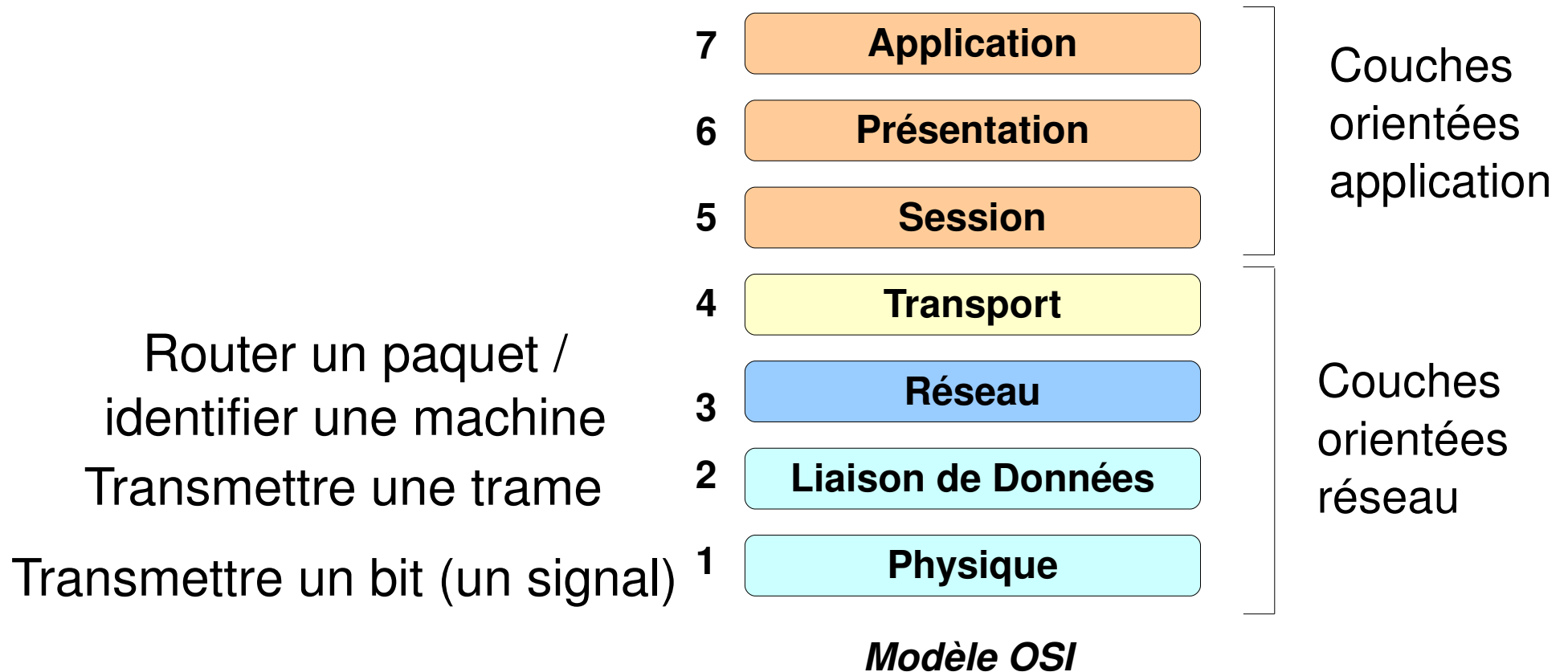
- **Les cours de Stéphane Lohier** <http://igm.univ-mlv.fr/~lohier>
- **CCNA ICND1 et CCENT**, 2^o ed., Wendell Odom Pearson Education 2007.
- **Réseaux**, 4^{ème} éd. Andrew Tanenbaum, Pearson Education 2003.
- **Analyse structurée des réseaux**. Kurose & Ross, Pearson Education 2003.
- **Java et Internet** Roussel, Duris, Bedon et Forax. Vuibert 2002.
- **Les réseaux**, 3^{ème} éd. Guy Pujolle, Eyrolles 2000.
- **Interconnections**, 2nd ed. Radia Perlman. Addison Wesley 2000.
- **Réseaux haut débits**. T 1. 2^{ème} éd. D Kofman et M. Gagnaire, Dunod 1999.
- **Guide Pratique des Réseaux Ethernet**. Charles Spurgeon, Vuibert 1998.
- **Les réseaux locaux virtuels**. Gilbert Held, InterEditions 1998.
- **Gigabit Networking**. Craig Partridge. Addison Wesley 1994.

Faire communiquer des machines

- Disposer d'un **support** de communication **commun**
 - Câble, fibre optique, onde hertzienne...
- Deux modes de communication possibles
 - **Point à point**
 - Beaucoup de liaisons pour inter-connecter un ensemble de machines
 - Pour chaque liaison, l'émetteur et le récepteur sont implicites
 - **Diffusion**
 - Un seul support peut être partagé par beaucoup de machines
 - Nécessité d'identifier l'émetteur et le récepteur
 - Nécessité de gérer l'accès au support
- **Communiquer** = transmettre et recevoir des données

Le modèle en 7 couches de l'OSI

- *Open System Interconnection (OSI)*
International Standardisation Organisation (ISO)

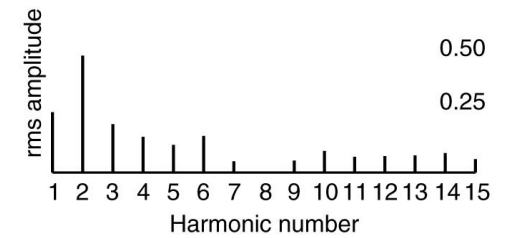
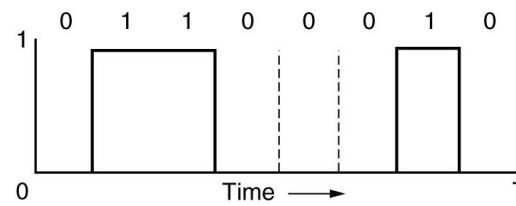


Émettre des bits - Couche 1 : Physique

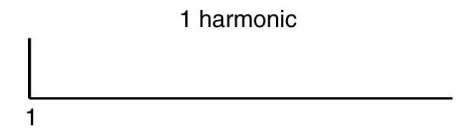
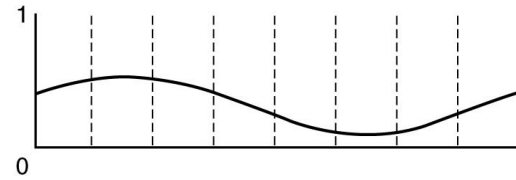
- Sur les ordinateurs, les données sont binaires (0 et 1)
 - Sur les câbles électriques ce sont des **signaux**
 - Même principe sur les fibres optiques ou les ondes hertziennes
- Transmission d'information sur un câble électrique
 - Variation de courant, de tension, fonction périodique
 - **Série de Fourier** (début XIX^{ème} siècle)
 - Décomposition d'un signal en série de fonctions sinus et cosinus
 - Coefficients représentent les amplitudes des harmoniques
 - La transmission des harmoniques subit des déformations (distorsions)
 - Plage de fréquences acceptables pour transmission: **bande passante**
 - Dépend du support. Exemple: 1 MHz pour câble téléphonique sur de courtes distances, mais les opérateurs introduisent des filtres pour la limiter à 3100 Hz pour les utilisateurs (entre 300 Hz et 3400 Hz)

Signal numérique et harmoniques

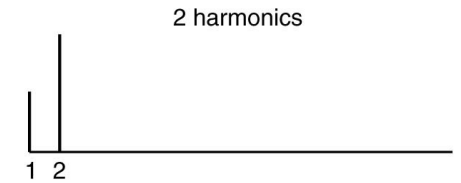
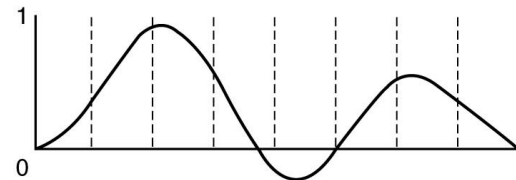
- Exemple: transmission de 01100010
- Correspond à des harmoniques
- La qualité du signal dépend du nombre d'harmoniques transmises
- Approximation du signal
- Débit de transmission binaire limité par la bande passante



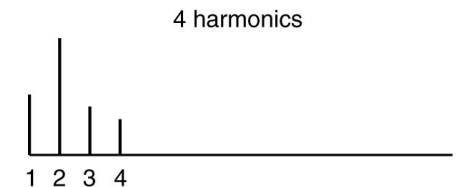
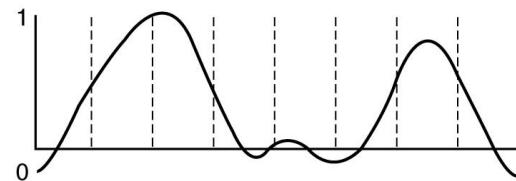
(a)



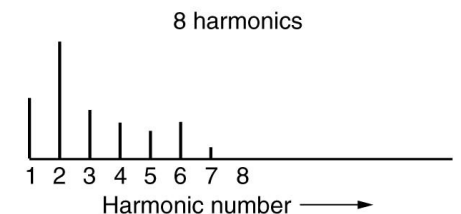
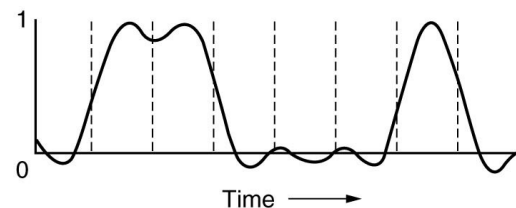
(b)



(c)



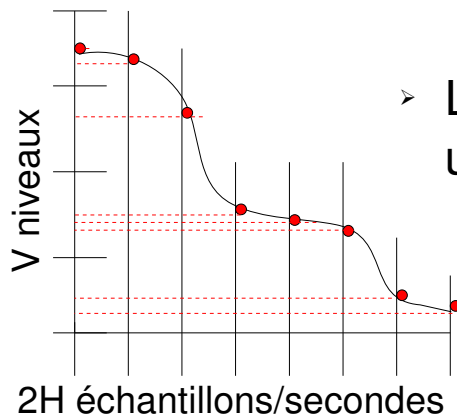
(d)



(e)

Débit maximal d'un canal de transmission

- Nyquist (canal parfait, sans bruit)
 - Un signal émis en dessous d'une fréquence H peut être reconstitué avec un échantillonnage équivalent à 2H par seconde.



- Ex: fréquences audibles par l'oreille humaine peuvent aller jusqu'à 20kHz
 - On doit échantillonner à 40kHz un signal pour un CD audio (44,1kHz)
- Le débit binaire transmissible dépend du nombre de niveaux significatifs utilisés (V):

$$\text{débit binaire} = 2H \log_2 V \text{ bit/s}$$

- Ex: Il faut 1411200 bits/s pour un échantillonnage audio sur 16 bits ($V=2^{16}$) stéréo
 - Dans le cas de transmission de bits (signal binaire à deux niveaux) sur un canal à 3400Hz, on peut obtenir 6800bits/s.
- Rapport Signal/Bruit dans un signal reçu
 - exprimé en **Décibels (dB)**, unité logarithmique: quand S/B croît exponentiellement, le débit en décibels croît linéairement.

$$(S/B)_{db} = 10 \log_{10} (S/B)_{bits/s}$$

Théorème de Shannon

- **Débit** binaire **maximal** (théorique) dans un canal bruité
 - De bande passante F
 - De rapport signal sur bruit S/B

Exprimé en linéaire,
pas en dB!

$$D_{\text{bits/s}} = F_{\text{Hz}} \log_2 (1 + S/B)$$

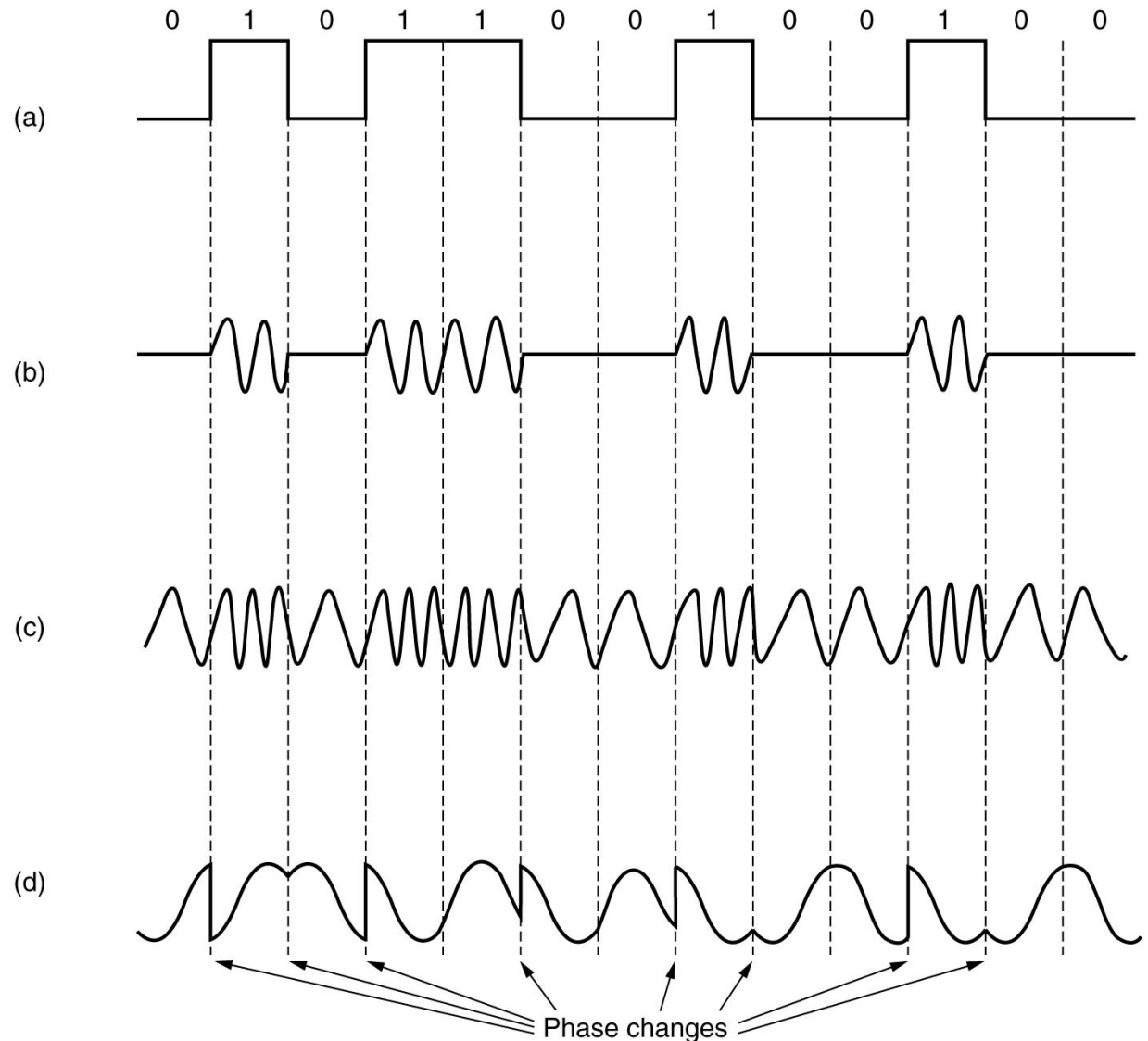
- **Exemple:**
 - Ligne téléphonique classique, bande passante de 3000 Hz, rapport signal bruit de 30 dB
 - Ne pourra jamais transmettre à un débit supérieur à 30000 bit/s, quels que soient le nombre de niveaux utilisés ou la fréquence d'échantillonnage

Bande de base LAN ou porteuse modem

- Les signaux numériques (rectangulaires) possèdent un large spectre de fréquences
 - Très sensibles à l'atténuation et à la déformation
- Sur les LAN, on les utilise
 - Codage en "**bande de base**" sur coaxial, paire torsadée courte ou fibre optique
- Sur le réseau téléphonique commuté (RTC) on module
 - Utilisation d'un signal analogique sinusoïdal (**porteuse**) dont l'amplitude, la fréquence et la phase peuvent être modulées
 - **Modem** (**mod**ulateur-**dém**odulateur) entre l'ordinateur (numérique) et le système téléphonique (analogique)

Rapidité de modulation *versus* débit

- Nombre de modulation par seconde = **bauds**
- Exemple: modems 2400 bauds
 - Si 0 Volt pour 0 et 1 Volt pour 1, alors débit binaire 2400 bit/s
 - Si les symboles sont 0, 1, 2, 3 Volts, alors chaque symbole représente 2 bits: débit binaire 4800 bit/s
- Modems utilisent la combinaison de plusieurs modulations.
Ex: 14bit/symbole à 2400bauds = 33600bit/s + compress.



Copyright A. Tanenbaum, Pearson Education, 2003

Différentes techniques de modulation

- Modulation à saut de phase: *Phase Key Shifting* (PSK)
- Chaque code correspondant à plusieurs bits est transmis pendant un état de phase et un saut ($\pm n$ degrés) est effectué pour passer à l'état suivant.

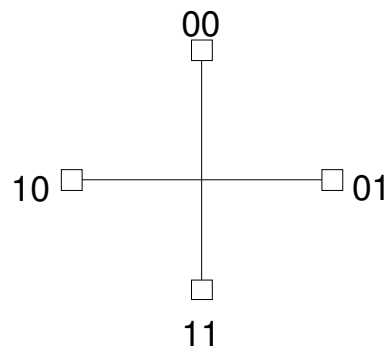
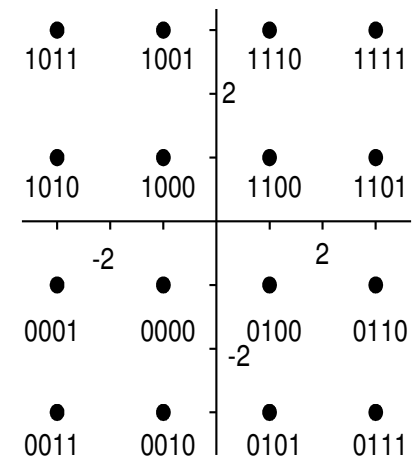
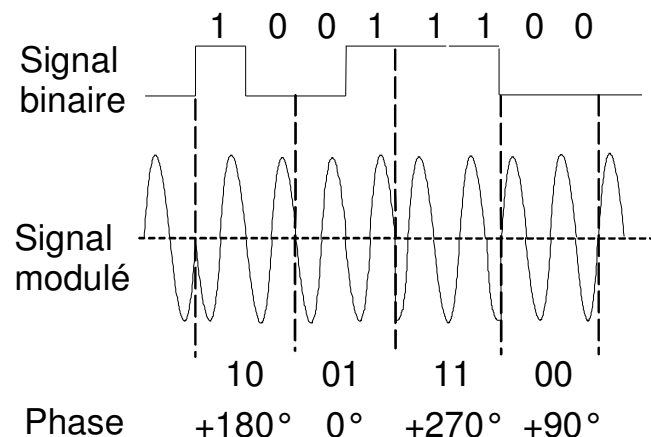


Diagramme spatial



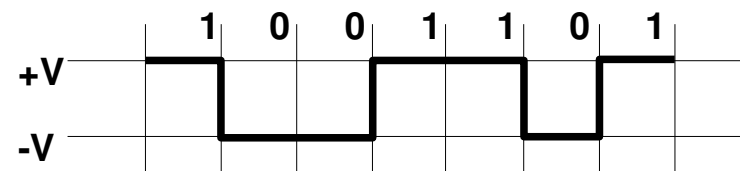
- On peut coupler avec de la modulation d'amplitude (PSK + AM)
QAM : Quadrature Amplitude Modulation

Codage Manchester

- Sur les LAN, bande de base + dérive d'horloge

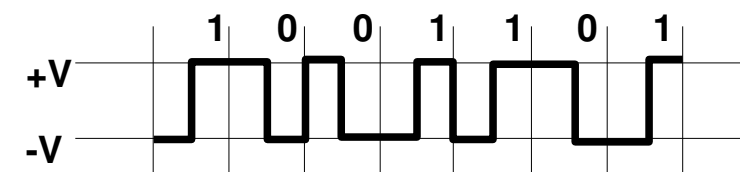
- Codage unipolaire sans retour à zéro (NRZ)

- Machine (horloge)



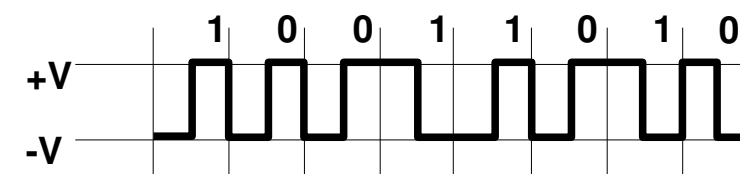
- Codage **Manchester** (simple)

- Inclus le signal d'horloge
 - $\frac{1}{2}$ temps bit à l'inverse de la valeur
 - $\frac{1}{2}$ temps bit à la valeur.



- Codage **Manchester différentiel**

- Bit 0 = Changement de polarité
 - Bit 1 = Polarité du début temps bit identique à précédente
 - Le sens des fils n'a plus d'importance.



Erreurs de transmission

- Elles existent et existeront encore:
 - Bruit **thermique**: agitation des électrons (cuivre)
=> bruit large spectre. Cf. rapport Signal/Bruit dans le Théorème de Shannon.
 - Bruit **impulsif**: étincelles rupture (relais), surtensions
=>impulsions avec des périodes de 10ms.
 - **Amplitude**, **vitesse**, **propagation** et **phase** des signaux dépendent de leur fréquence.
 - **Diaphonie**: proximité physique de deux lignes.
- Etc.

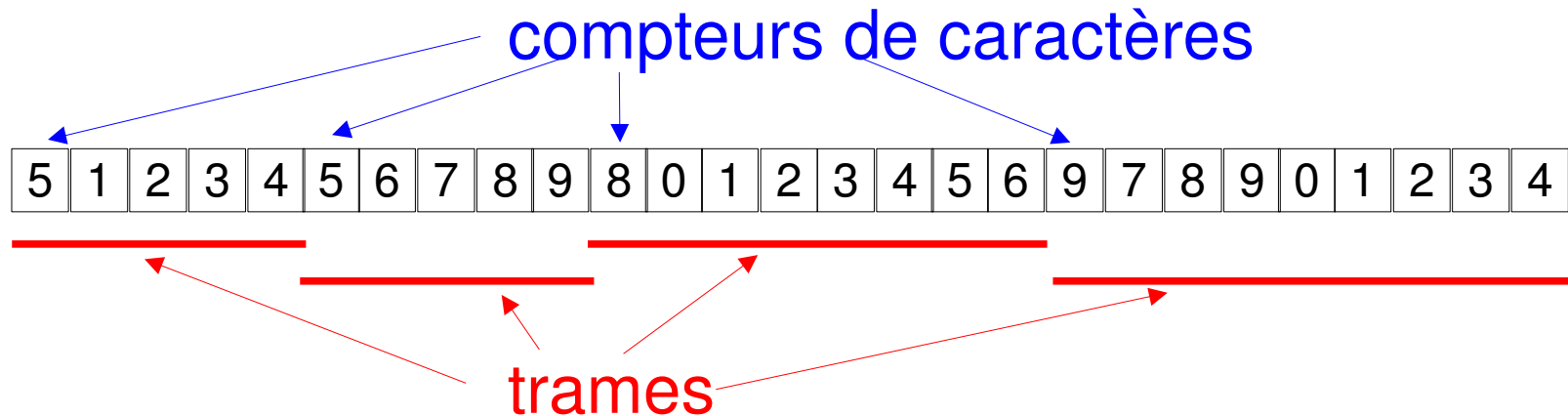
Émettre des trames

Couche 2 : Liaison de Données

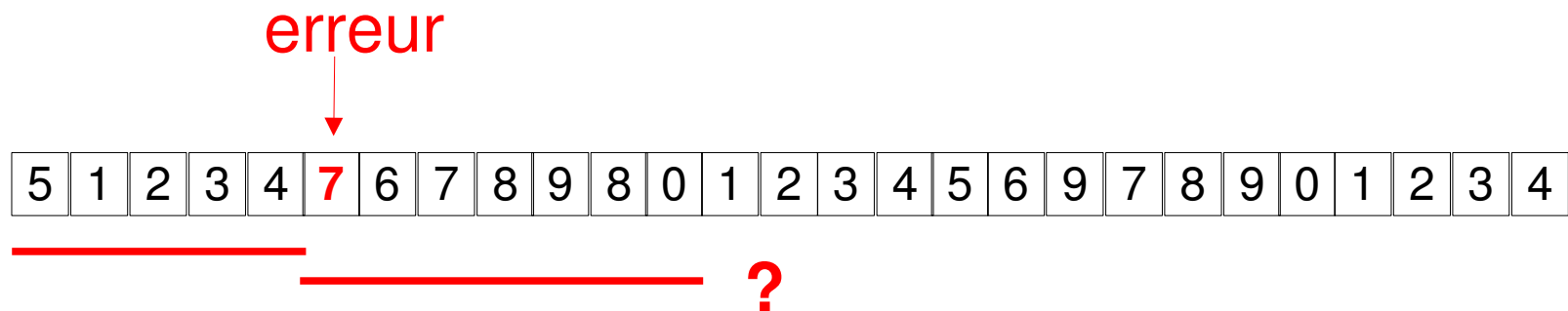
- Si on est capable d'émettre des bits d'une machine à une autre, des **erreurs** peuvent survenir pendant la transmission
 - Nécessité de pouvoir limiter l'effet de ces erreurs
 - Objectif: découper le "train" de bits à émettre (flot de données) en morceaux délimités, i.e. en **trames** (terme spécifique couche 2).
 - Différentes manières d'effectuer ce découpage:
 - Compter les caractères;
 - Utiliser des caractères de début et de fin (caractères de transparence);
 - Utiliser des fanions de début et de fin (bits de transparence);
 - Violier le codage utilisé dans la couche physique
 - ...

Comptage de caractères (naïf)

- Chaîne à transmettre



- En cas d'erreur: perte de synchronisation



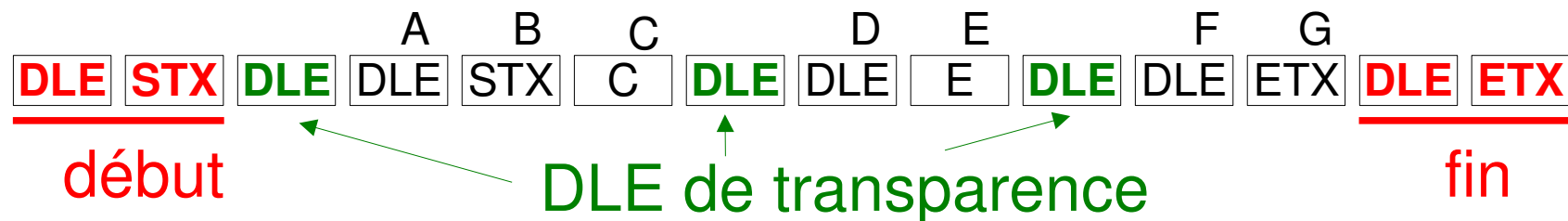
- Bonne idée: trames de longueur fixe! Mais pas toujours efficace

Caractères de transparence (chaînes, ppp)

- Données envoyées par la Couche Réseau (émetteur)



- Ajout par la Couche Liaison de Données



- Données remises à la Couche Réseau (destinataire)



Bits de transparence (ppp orienté bit)

- Train de bits à envoyer

011011111111111111111110010



- Ajout des bits de transparence et des fanions

01111110 011011111111111111111110010 01111110

début

bits de transparence

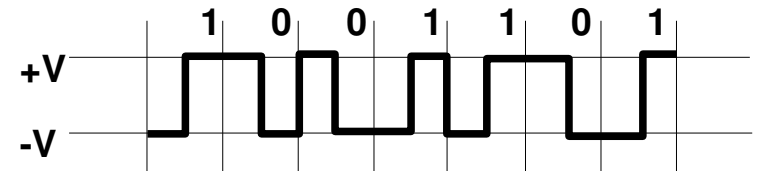
fin

- Retrait des bits de transparence et des fanions

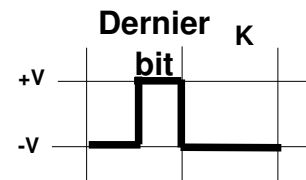
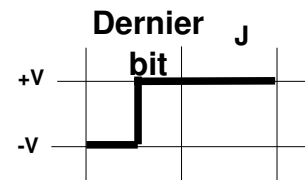
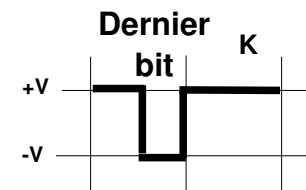
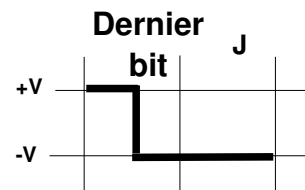
011011111111111111111110010

Violation du codage (fddi)

- Codage Manchester (simple)
 - Inclut le signal d'horloge
 - $\frac{1}{2}$ temps bit à l'inverse de la valeur
 - + $\frac{1}{2}$ temps bit à la valeur.



- Des violations du codage peuvent être utilisées pour délimiter les trames. Exemple: les symboles J et K.



Erreurs

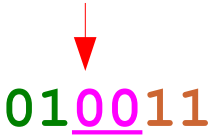
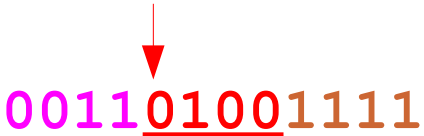
- Taux d'erreurs moyen: **simples** ou par **paquets**?
- Codes **correcteurs** (beaucoup de redondance):
 - Être capable de reconstituer les données originales
 - Retransmission onéreuse voir impossible
- Codes **détecteurs** (juste un peu de redondance):
 - Être seulement capable de détecter, pas corriger
 - Retransmission aisée, sur-coût de transmission gênant
- **Distance de Hamming** entre deux mots: XOR
 - nombre de bits différents entre 2 mots du code
= nombre de bits à 1 dans le résultat du XOR
Ex: $10001001 \wedge 10110001$ i.e. 3

```
10001001
10110001
-----
00111000
```

Quelle technique pour détecter/corriger?

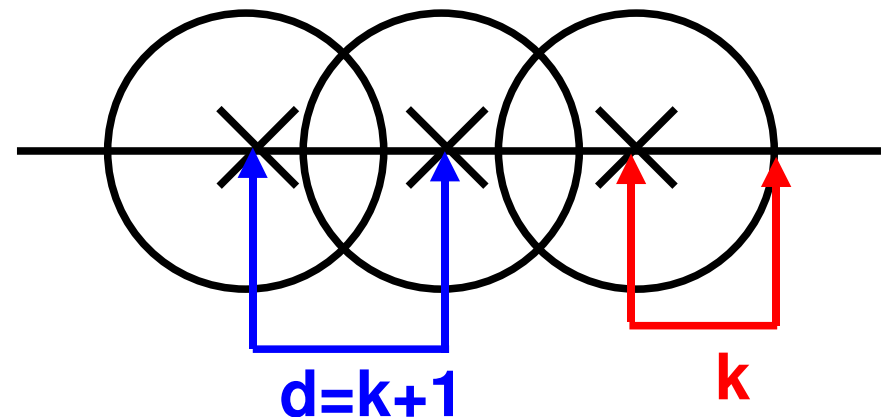
- Il va falloir « **ajouter** » de l'information (**redondance**)
- Intuitivement, il faut encore plus de redondance pour corriger que pour détecter.
- Exemple: **bit de parité**
 - Ajouter un **bit de contrôle** tel que la **somme** des bits soit **paire**
 - **00110101101011**
 - Si 1 erreur lors de la transmission, la parité n'est plus assurée
 - Mais si 2 erreurs, parité assurée
 - Permet de ne détecter que les erreurs simples (et toutes impaires)
 - Ne permet pas de corriger

Une idée des « codes » détecteurs

- Un **code** est un ensemble de **mots** sur un **alphabet**, ici $\{0,1\}$
- Exemple: transmettre 1 base aminée parmi A, C, G, T
 - Supposons qu'on représente $A=00$, $C=01$, $G=10$, $T=11$, alors mon code est: $\{00, 01, 10, 11\}$: code optimal en binaire
 - $CGT = 011011$ Si la transmission subit 1 erreur

 $01\underline{00}11 = CAT$ Alors impossible de détecter!
 - Redondance d'information: $A=0000$, $C=0011$, $G=1100$, $T=1111$
le code est: $\{0000, 0011, 1100, 1111\}$ (coût double!)
 - $CGT = 001111001111$

 $0011\underline{0100}1111 = A?T$ On sait détecter l'erreur
 - On ne sait pas la corriger: ? était-il un G un ou un A ?

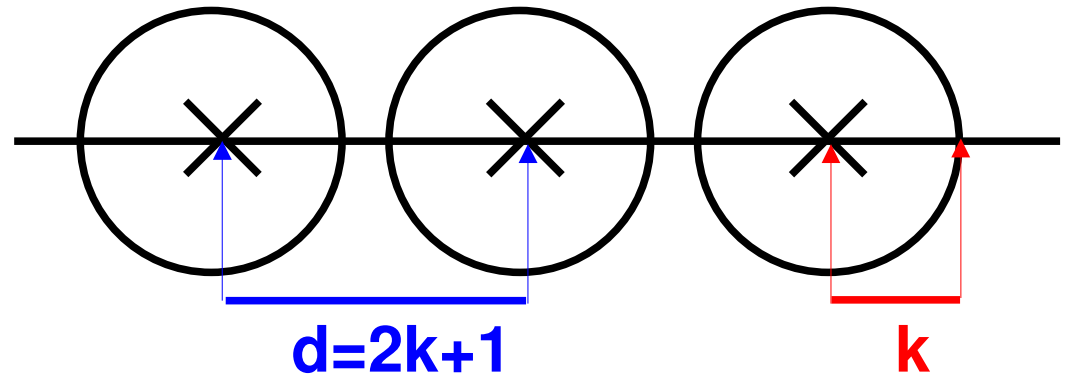
Détecter

- Trame: longueur n bits = m données + r contrôle
 - L'ensemble des n bits est un **mot du code**
- La distance de Hamming **d'un code** est d si d erreurs suffisent pour passer d'un mot du code à un autre mot du code
- 2^m combinaisons de bits de données mais seule une partie de ces 2^n combinaisons sont des mots corrects du code
- Détecter k erreurs nécessite une distance de Hamming de **$d=k+1$** .



Corriger

- Pour corriger k erreurs, il faut que la distance de Hamming soit d'au moins $d=2k+1$



- Le nombre minimal de bits de contrôle r permettant de corriger **une** erreur (où qu'elle soit) doit vérifier:

$$(m+r+1) \leq 2^r$$

- Comme on connaît m , on peut trouver r .

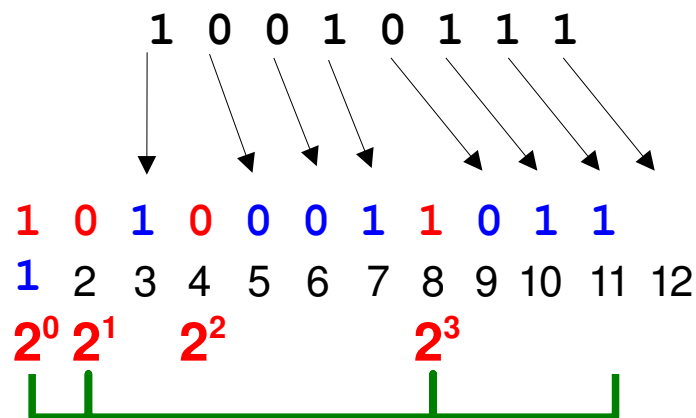
Code de Hamming

- Permet d'atteindre la limite théorique. (1950)

- Bits de données (initiaux)

- Les bits aux **puissances de 2** sont les bits de **contrôle**.

Les **autres** sont les bits de **données**.



- Chaque bit de donnée est **contrôlé** par les bits de contrôle qui entrent en compte dans sa *décomposition en somme de puissances de 2*.

- Ex: le bit 11=8+2+1 est vérifié par les bits **8, 2 et 1**.

- La position des bits de contrôle est arbitraire

- Ici, présentés « à leur place » mais on peut les placer ailleurs

Code de Hamming (suite)

- Vérification de la parité des bits de contrôle:
 - Les positions de ceux qui sont faux sont cumulées et donnent la **position du bit erroné**.
- Correction de paquets d'erreurs de longueur k

H:	1001000	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
a:	1100001	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
m:	1101101	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
m:	1101101	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
i:	1101001	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1
n:	1101110	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0
g:	1100111	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1

$K=7$

- kr bits de contrôle pour corriger un seul paquet d'erreurs d'au plus k bits sur un bloc de km bits de données.

Les codes polynomiaux

- Code de Redondance Cyclique (CRC): utilisé en **Ethernet**
- Arithmétique polynomiale modulo 2 + théorie algébrique
 - pas de retenue; addition = soustraction = XOR
 - Générateur $G(x)$ de degré r (suite de bits = coef. Polynôme)
 - On divise $x^r.M(x)$ par $G(x)$ modulo 2 (reste $R(x)$)
 - On transmet le résultat $T(x) = x^r.M(x) - R(x)$
 - A réception, on divise la trame reçue par $G(X)$
 - Si reste nul alors transmission OK,
 - Si erreur, le récepteur reçoit $T(x)+E(x)$
 - Reste non nul: $(T(x)+E(x))/G(x)=E(x)/G(x)$
 - Si $G(x)=(x+1).G'(x)$ alors les trames ayant un nombre impair d'erreurs seront détectées... plein d'autres bonnes propriétés...

Un exemple de calcul de CRC

- À émettre: 1101011011; générateur $G(x)$: 10011
 - Ou encore $x^4 \cdot (x^9 + x^8 + x^6 + x^4 + x^3 + x^1 + x^0)$ divisé par $x^4 + x^1 + x^0$

$$\begin{array}{r}
 1101011011\boxed{0000} \quad | \quad 10011 \\
 \underline{10011} \\
 10011 \\
 \underline{10011} \\
 00001 \\
 \underline{00000} \\
 00010 \\
 \dots \\
 \boxed{1110}
 \end{array}$$

- Trame émise: 1101011011**1110**

Plus facile à la main: division polynomiale

- $x^9+x^8+x^6+x^4+x^3+x+1$ multiplié par x^4 (degré du poly. générateur), le tout divisé par le polynôme générateur

$$\begin{array}{r} \cancel{x^{13}} + \cancel{x^{12}} + \cancel{x^{10}} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 \\ \underline{\cancel{x^{13}} + \cancel{x^{10}} + \cancel{x^9}} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \cancel{x^{12}} + \cancel{x^9} + \cancel{x^8} + x^7 + x^5 + x^4 \\ \underline{\cancel{x^{12}} + \cancel{x^9} + \cancel{x^8}} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \cancel{x^7} + \cancel{x^5} + \cancel{x^4} \\ \underline{\cancel{x^7} + \cancel{x^4} + \cancel{x^3}} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} \cancel{x^5} + \cancel{x^3} \\ \underline{\cancel{x^5} + \cancel{x^2} + \cancel{x}} \end{array}$$

$x^3 + x^2 + x$, soit

1 1 1 0

$$\begin{array}{r} x^4 + x + 1 \\ \hline \end{array}$$

$$x^9 + x^8 + x^3 + x$$

La prochaine fois

- L'accès au réseau: Couche 2
 - Gestion de l'accès au médium
 - CSMA/CD (Ethernet)
 - CSMA/CA (WiFi)
- Ethernet comme exemple privilégié
 - Format des trames
 - Principe d'accès et de gestion des collisions
 - Supports admis
 - Domaines de collisions et équipements
 - Évolution vers Ethernet commuté