

# Traitement du signal & Techniques de transmission

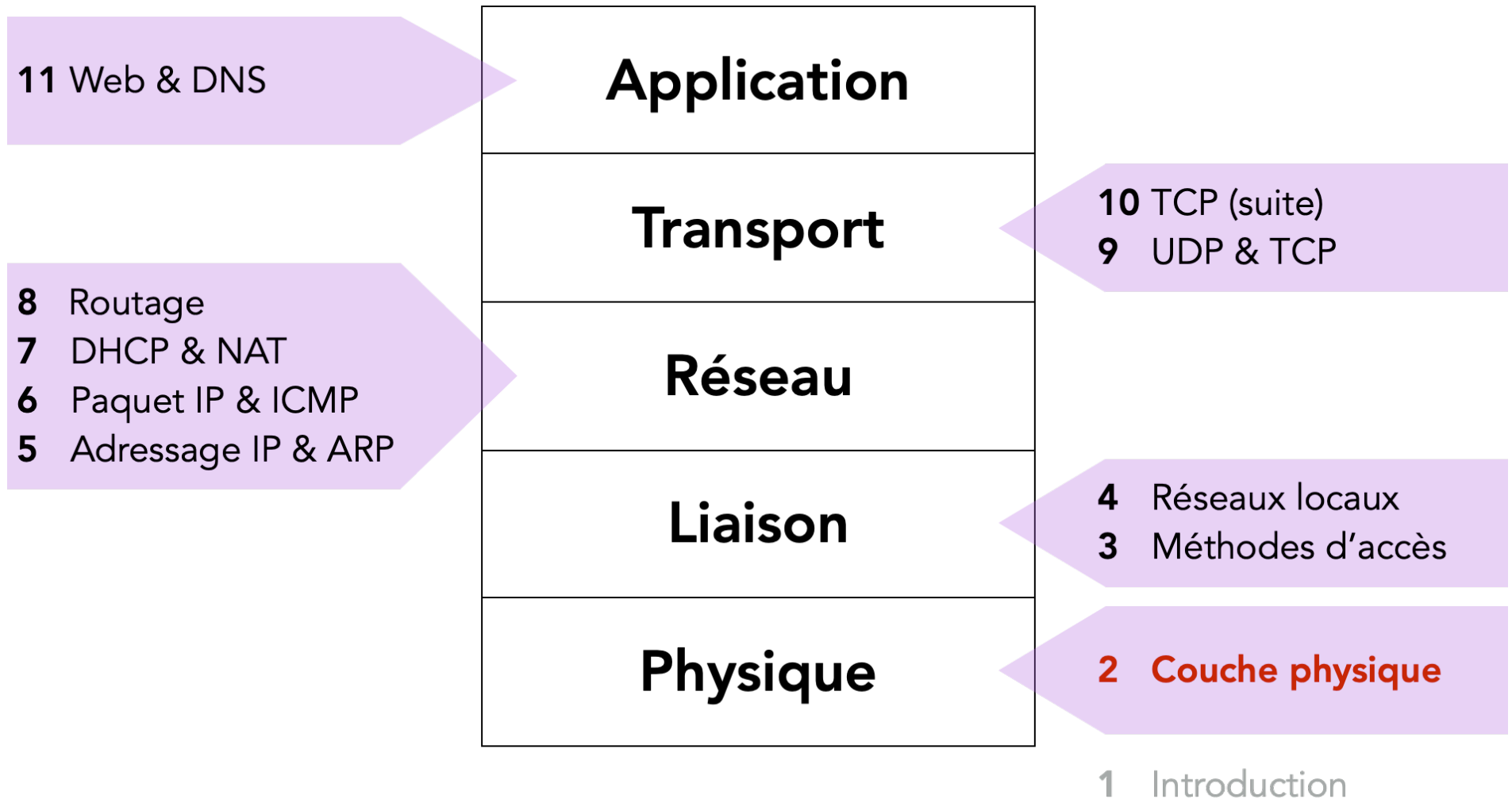
UE LU3IN033 Réseaux  
2023-2024

Bruno Baynat

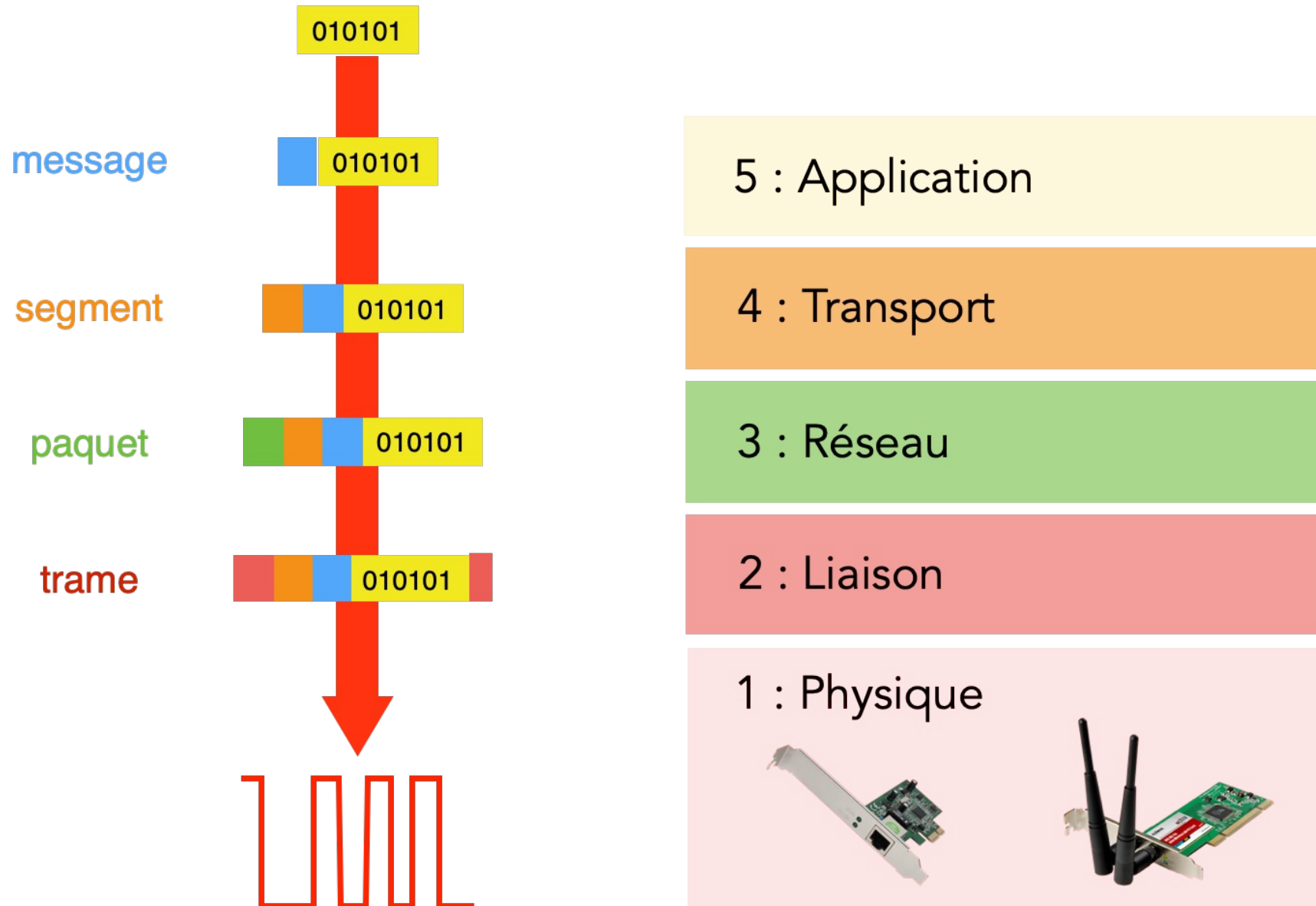
[Bruno.Baynat@sorbonne-universite.fr](mailto:Bruno.Baynat@sorbonne-universite.fr)



# Programme de l'UE LU3IN033



# Couche Physique



# Plan du cours

- Onde électromagnétique
- Décomposition en séries de Fourier d'un signal
  - domaine temporel / fréquentiel
  - support spectral d'un signal
- Support de transmission
  - bande passante du support
  - capacité d'un canal bruité : loi de Shannon
- Techniques de transmission
  - en Bande de Base
  - sur fréquence porteuse
- Contrôle d'erreur
- Code détecteur d'erreurs
  - Vertical Redundancy Control (VRC)
  - Longitudinal Redundancy Control (LRC)
  - Cyclic Redundancy Control (CRC)

# Traitement du signal



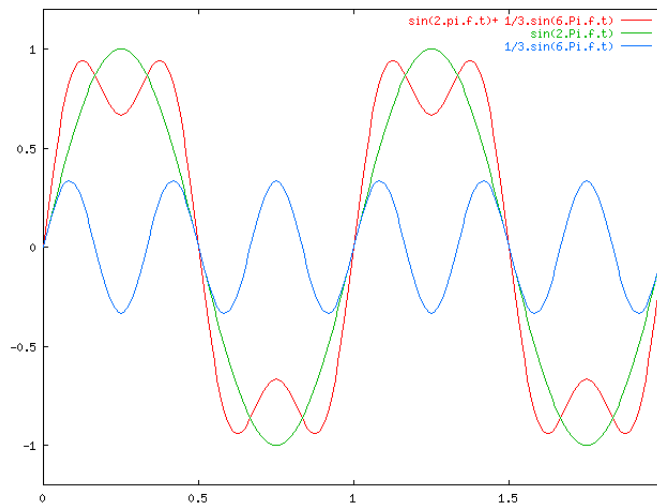
# Onde électromagnétique

- La transmission de données sur un support physique se fait par propagation d'un phénomène vibratoire
- Il en résulte un signal ondulatoire dépendant de la grandeur physique que l'on fait varier
  - Onde électrique : tension ou intensité
  - Onde électromagnétique : champs électrique ou magnétique couplé (lumière, onde radio)
- Forme la plus simple :  $s(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$ 
  - Amplitude  $A$
  - Fréquence  $f_0$  (période  $T = 1/f_0$ )
  - Phase  $\varphi$

# Onde électromagnétique

- En pratique, un signal électromagnétique est constitué de plusieurs composantes sinusoïdales

$$s(t) = \sin(2\pi f_0 t) + \frac{1}{3} \sin(2\pi(3f_0)t)$$



$\sin(2\pi f_0 t)$

$\frac{1}{3} \sin(2\pi(3f_0)t)$

$s(t)$

# Décomposition en séries de Fourier

- Toute fonction périodique  $g(t)$  de période  $T$  peut se décomposer en une somme (infinie) de fonctions sinus et cosinus

$$g(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi n f_0 t)$$

- $f_0$  est la **fréquence fondamentale** :  $f_0 = 1/T$
- $a_n$  et  $b_n$  sont les **amplitudes** cosinus et sinus de la  **$n^{\text{ème}}$  harmonique**
- $c_0$  est la **composante continue** du signal

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi n f_0 t) dt$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt$$

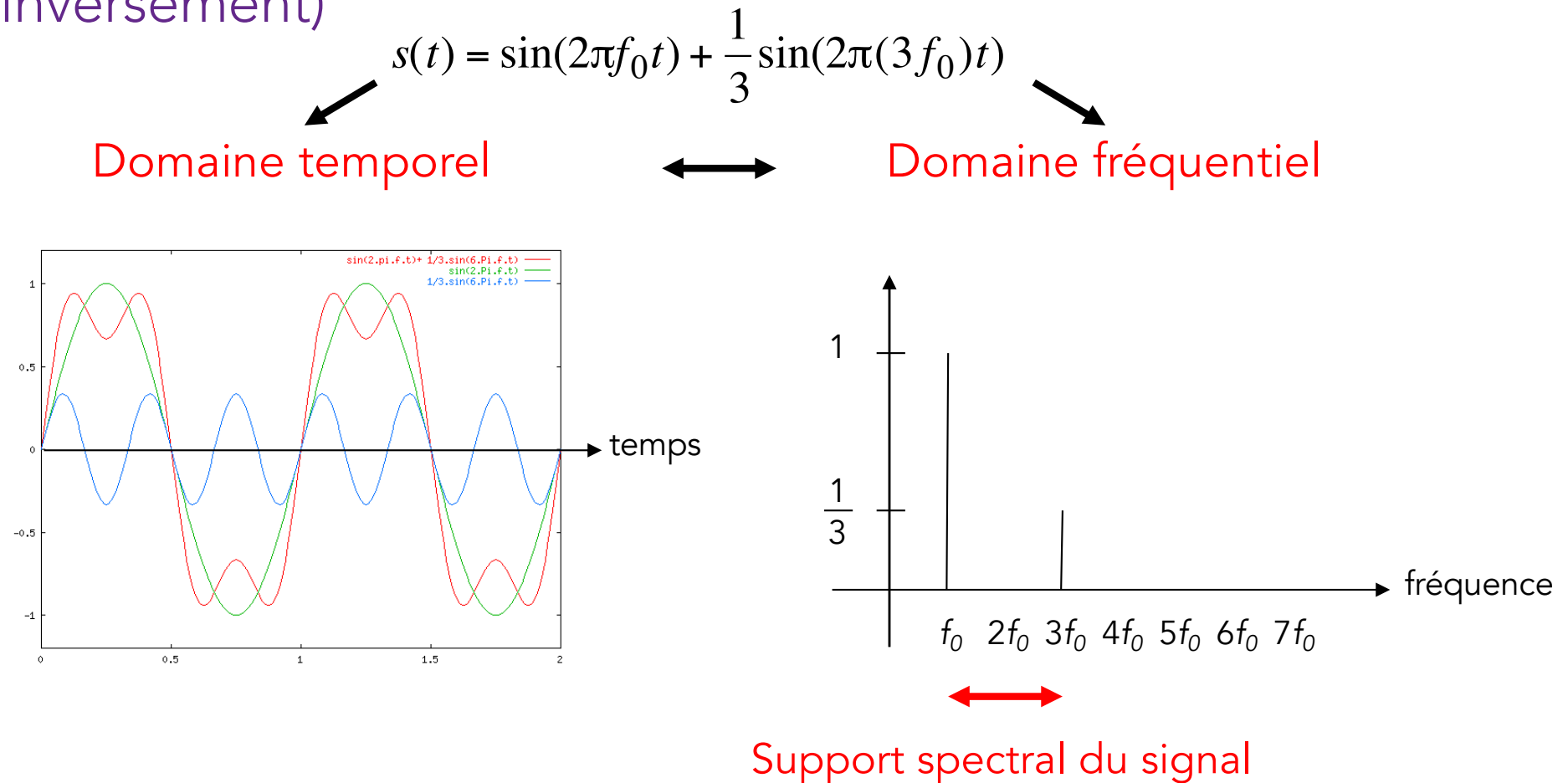


# Spectre fréquentiel

- Le spectre fréquentiel associé à une fonction périodique  $g(t)$  est un **spectre de raies**
- Chaque raie correspond à la fréquence d'un **harmonique** de la décomposition en série de Fourier de  $g(t)$
- On définit trois types de spectres fréquents
  - **Spectre d'amplitude** : la hauteur de la  $n^{\text{ème}}$  raie est  $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$
  - **Spectre de puissance** : la hauteur de la  $n^{\text{ème}}$  raie est  $(a_n^2 + b_n^2)/2$
  - **Spectre de phase** : la hauteur de la  $n^{\text{ème}}$  raie est  $\varphi_n = \arg(a_n - jb_n)$
- Les spectres permettent d'identifier les composantes prépondérantes d'un signal
  - Plus une raie est haute, plus l'harmonique correspondante a de l'importance dans le signal

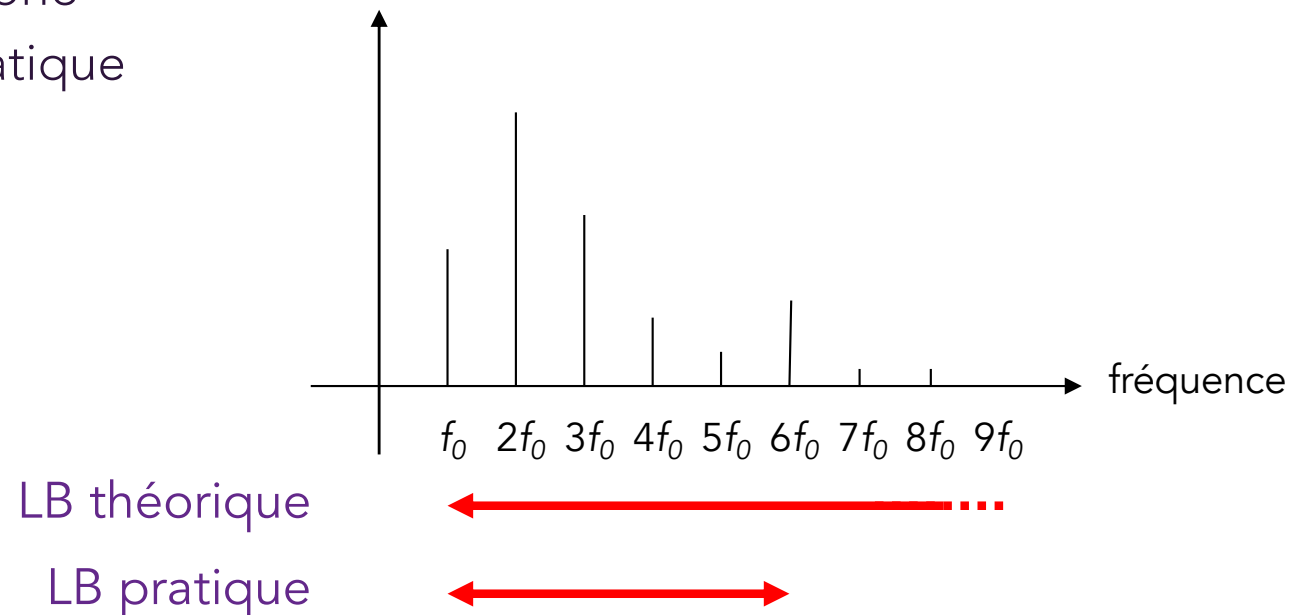
# Domaine temporel / fréquentiel

- La décomposition en série de Fourier permet de « basculer » du domaine temporel au domaine fréquentiel (et inversement)

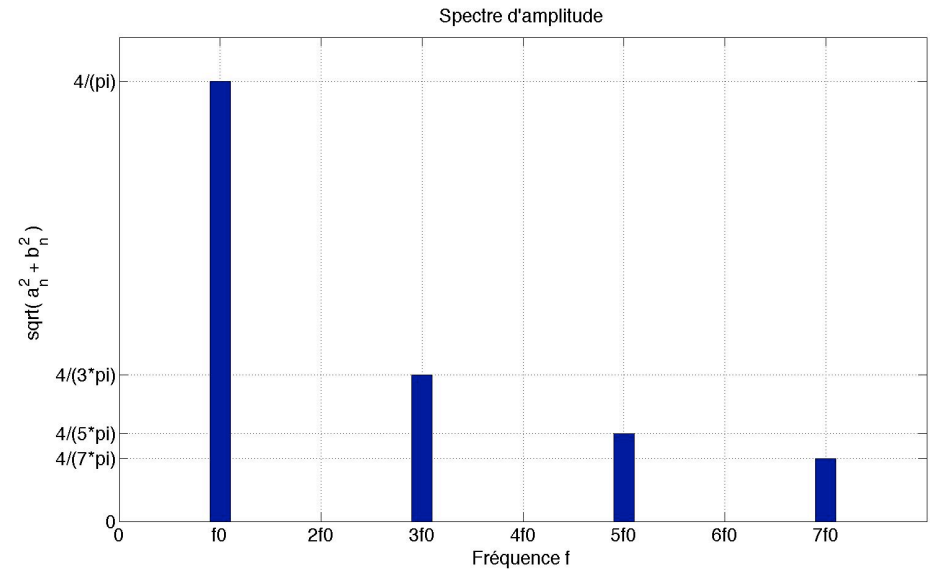
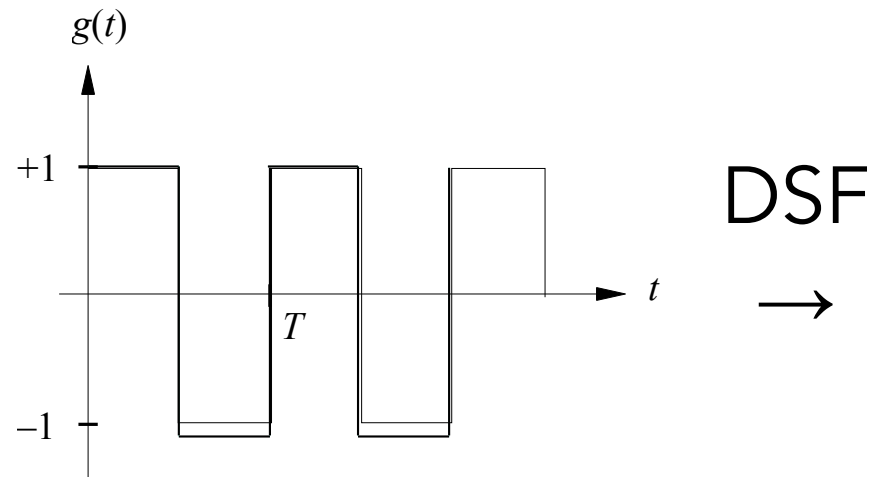


# Support spectral d'un signal

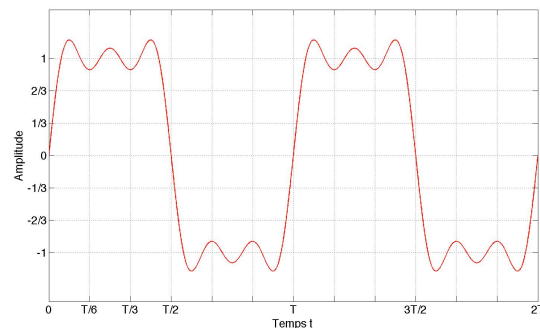
- Le **support spectral** d'un signal est définie comme l'ensemble
  - des fréquences non nulles, en théorie
  - des fréquences significatives, en pratique
- La **largeur de bande (LB)** d'un signal est définie comme la largeur du support spectral
- La largeur de bande d'un signal est généralement
  - infinie en théorie
  - limitée en pratique



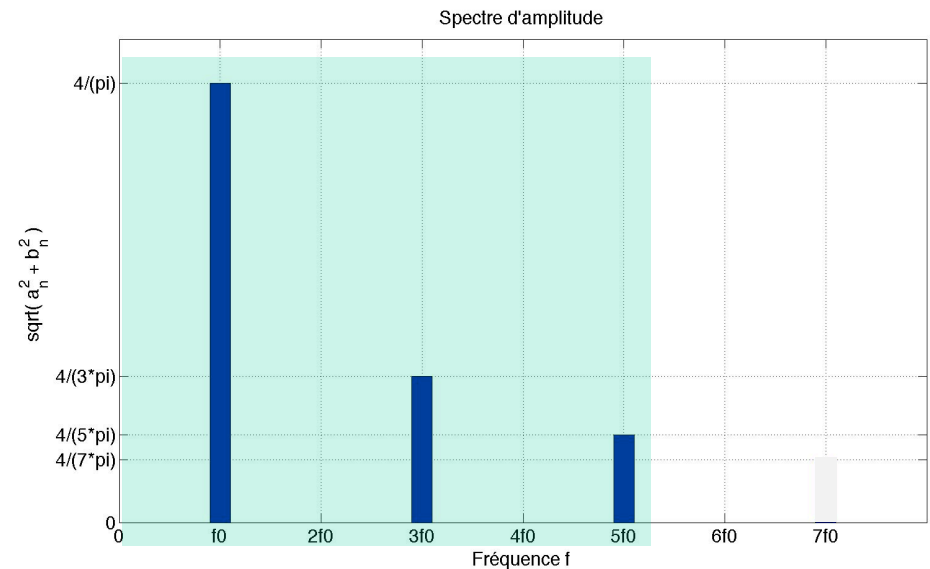
# Largeur de bande d'un signal



- Filtre passe-bas
  - 5 premières harmoniques

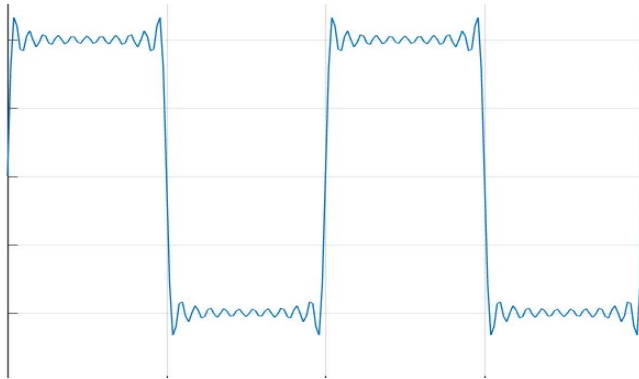


Filtre  
←



# Largeur de bande d'un signal

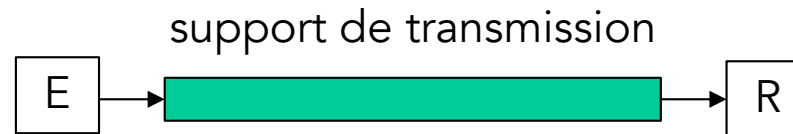
- Filtre passe-bas
  - 21 premières harmoniques



- <https://www.geogebra.org/m/tT6UvD6k>
- Conclusions
  - Si on limite la LB d'un signal en « coupant » certaines harmoniques, on déforme le signal
  - Plus on coupe d'harmoniques dans le signal plus on le déforme

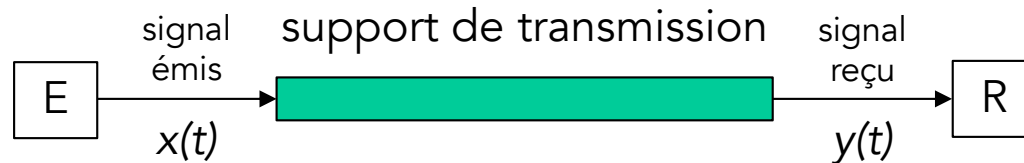
# Support de transmission

- Milieu permettant d'acheminer le signal porteur d'information entre un émetteur et un récepteur

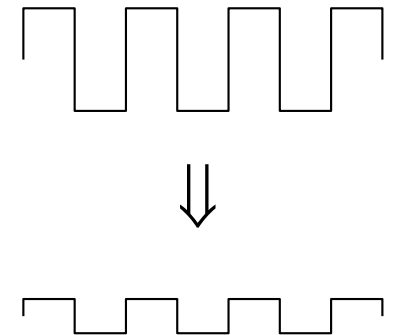


- Différents types
  - Supports électriques
    - paire torsadée, câble coaxial
  - Supports optiques
    - fibre
  - Supports aériens
    - sans fil

# Support de transmission



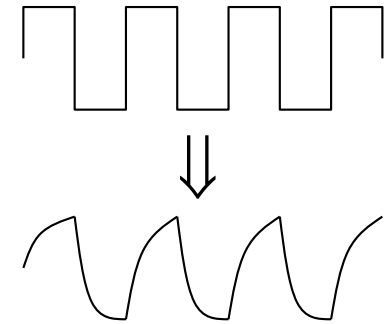
- Cas idéal :  $y(t) = x(t)$
- En pratique...
  - Atténuation du signal
    - Perte d'énergie que subit le signal lorsqu'il se propage → l'amplitude de  $y(t)$  est inférieure à celle de  $x(t)$
    - La puissance du signal décroît de façon logarithmique lorsque la distance augmente → l'atténuation est mesurée en dB/km
    - Pour pallier le problème d'atténuation : utilisation d'amplificateurs ou de répéteurs



# Support de transmission

## – Distorsion de phase

- Toutes les fréquences du signal ne voyagent pas à la même vitesse → **déformation** du signal



## – Bruits

- Lors de sa propagation sur une ligne, le signal est perturbé par des signaux parasites aléatoires en provenance de sources autres que l'émetteur

### ▪ Bruit blanc

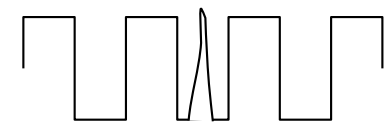
- Bruit d'agitation thermique permanent dont la puissance est uniformément répartie dans la bande de fréquences utilisée, généralement de faible amplitude et de moyenne nulle
- Mesuré par un « **rapport Signal/Bruit** » en dB (décibels)



$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N}\right)$$

### ▪ Bruit impulsif

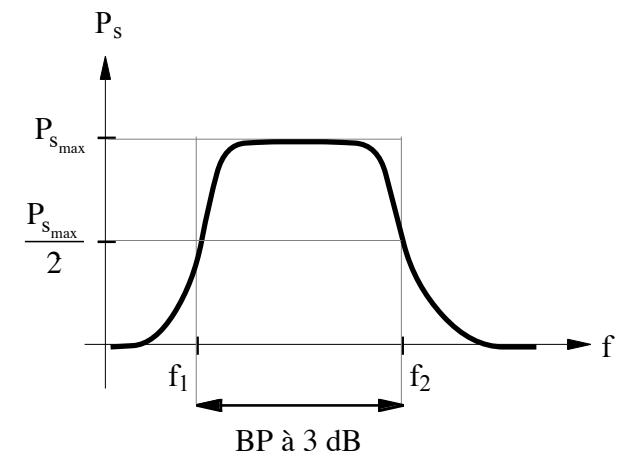
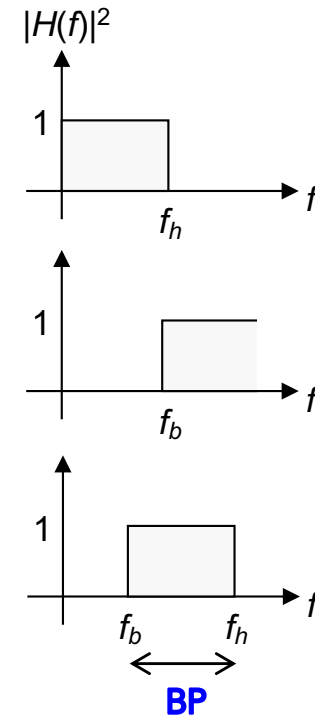
- Petits pics de forte intensité et de faible durée, dus par exemple à des interférences électriques





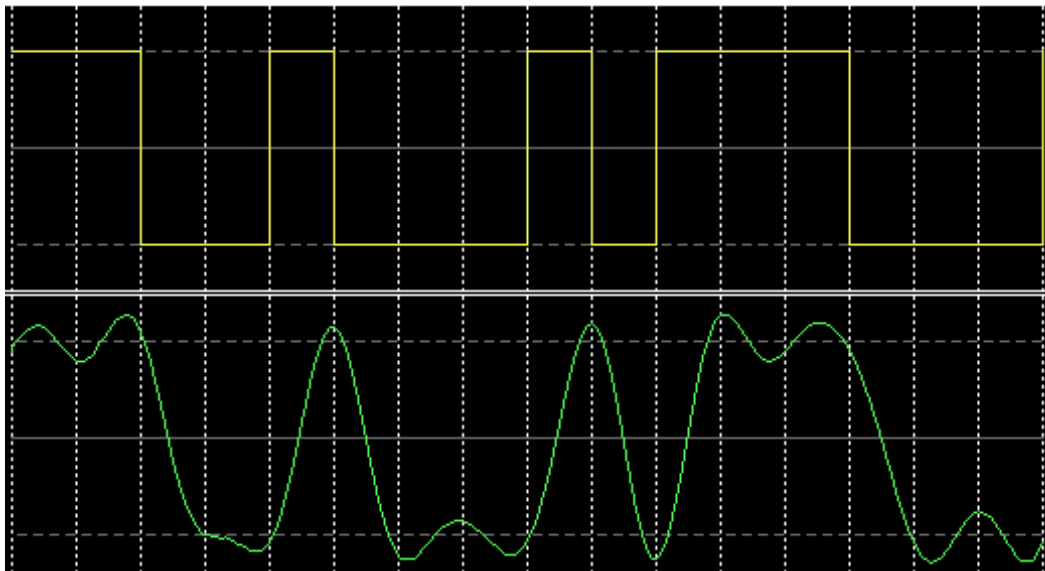
# Bande passante du support

- Bande passante théorique
  - Filtre « passe-bas »
  - Filtre « passe-haut »
  - Filtre « passe-bande »
- BP « à 3 dB »
  - Intervalle de fréquences  $[f_1, f_2]$  tel que la puissance du signal de sortie est au pire égale à la moitié de la puissance maximale



# Bande passante du support

- La BP du support limite le nombre d'harmoniques du signal reçu et déforme donc le signal



Signal BdB émis

Signal reçu après  
passage dans un canal  
de transmission ayant  
une BP limitée

- Il existe donc un lien étroit entre BP du support et faisabilité de la transmission

# Capacité théorique d'un canal bruité

- Loi de Shannon

- Fournit le débit binaire maximum auquel on peut théoriquement transmettre sans erreur sur un canal de transmission à bande passante limitée et sujet à du bruit

- Hypothèse

- Canal modélisé par un filtre passe-bande de BP  $B$  (Herz)
    - $P_S/P_B$  : rapport signal sur bruit du canal (en valeur nominale)

- Loi de Shannon :  $C = B \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$

- Limite théorique absolue sur le débit binaire :  $D_b \leq C$

# Techniques de transmission

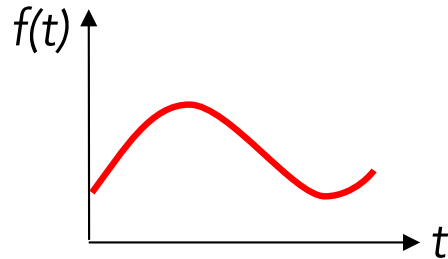


# Techniques de transmission

- Les supports de communication ne sont pas parfaits
    - atténuation, distortion, bruits, ...
    - coupures de fréquences
  - Les défauts du support impactent la transmission
    - limitation du débit de transmission
- **Il faut adapter les techniques de transmission aux caractéristiques du support**

# Message numérique vs. analogique

- Message
  - données que l'utilisateur souhaite transmettre
- Message analogique
  - fonction  $f(t)$  continue et à temps continu
  - ex : voix, vidéo, données collectées par des capteurs



- Message numérique
  - suite d'éléments d'information tirés d'un ensemble fini de valeurs discrètes (alphabet)
  - ex : texte, entiers, bits

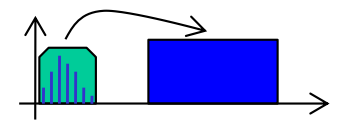
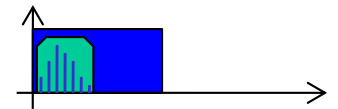
000001010100011111010101

# Signal numérique vs. analogique

- Signal
  - représentation physique du message à transmettre
  - sous la forme d'une onde électrique (tension, courant) ou électromagnétique (champs électrique, magnétique)
- Signal analogique
  - signal représentant un message analogique
- Signal numérique
  - signal résultant de la mise en forme d'un message numérique
  - sous la forme d'une **succession de formes d'ondes** (éléments de signal)
    - d'un signal multi-niveaux de forme « carrée », appelé signal numérique en bande de base (BdB)
    - du signal résultant de la modulation d'une onde porteuse par un signal numérique en bande de base

# Transmission

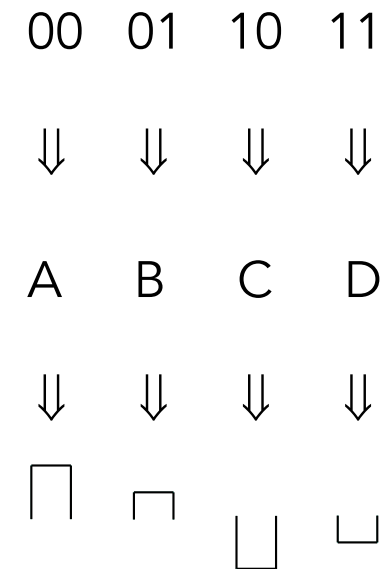
- Transmission
  - opération qui consiste à transporter le signal d'une machine vers une autre, sur un support donné
- Transmission analogique / numérique
  - transmission d'un signal analogique / numérique
- Transmission en bande de base
  - sur un canal de type passe-bas (de BP  $[0, f_2]$ )
  - techniques de codage en ligne
  - utilisée dans les LANs
- Transmission sur fréquence porteuse
  - sur un canal de type passe-bande (de BP  $[f_1, f_2]$ )
  - nécessité de transposer le spectre du signal : opération de modulation
  - utilisée dans les WANs





# Transmission numérique en Bande de Base

- Utilise un **codage en ligne**
  - Codage binaire à M-aire
    - transforme la suite d'éléments binaires du message numérique à émettre en une suite de **symboles**
    - la **valence** M du codage correspond au nombre de symboles différents
  - Codage M-aire à signal
    - associe une **forme d'onde** (ou **élément de signal**) à chaque symbole
- De nombreux codages existent
  - NRZ / NRZI
  - Manchester / Manchester différentiel
  - Miller
  - Bipolaires / BDHn
  - Etc.

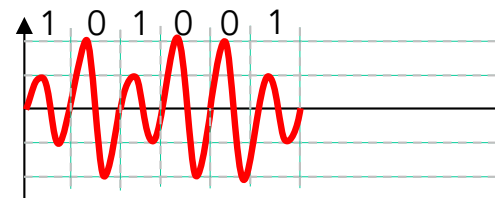


# Transmission numérique sur fréquence porteuse

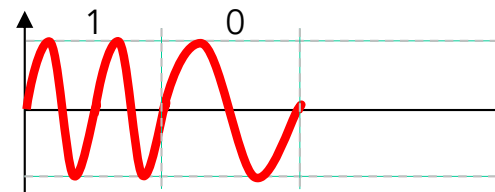
- Modulation
  - réalisée en modifiant une des caractéristiques (amplitude, phase, fréquence instantanée) d'une onde porteuse sinusoïdale

- Trois types élémentaires de modulation

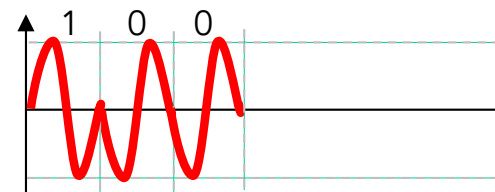
- Modulation d'amplitude



- Modulation de fréquence



- Modulation de phase



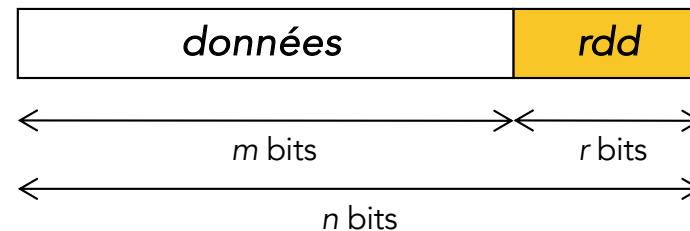
# Contrôle d'erreur



# Contrôle d'erreur

- Basé sur la redondance

- Utilisation d'informations de **redondance** pour détecter et/ou corriger les erreurs de transmission
- Pour  **$m$  bits de données** on ajoute  **$r$  bits de redondance**
- Une unité de  $n = m + r$  bits contenant des données et un champs de contrôle s'appelle un  **$mot\ de\ code$**



- Les bits de redondance se calculent directement à partir des bits de données  
→  **$2^m$  mots de code légaux** <  **$2^n$  mots de code possibles**

- Distance de Hamming

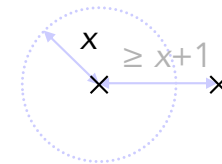
- Entre deux mots de codes → nombre de bits qui diffèrent entre les deux mots de codes
- Du code → distance de Hamming minimale entre deux mots de code légaux quelconques

# Contrôle d'erreur

- Détection / Correction d'erreur

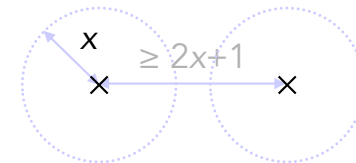
- Codes détecteurs d'erreurs

- La réception d'un **mot de code illégal** (non autorisé) permet de détecter la présence d'une (ou plusieurs) erreur(s) dans le mot de code
    - Pour pouvoir détecter  $x$  erreurs dans un mot de code la distance de Hamming du code doit au moins être égale à  $x + 1$
    - Détection d'erreur → **Retransmission**



- Codes correcteurs d'erreurs

- L'information de redondance permet de corriger les erreurs du mot de code
    - Pour pouvoir corriger  $x$  erreurs dans un mot de code la distance de Hamming du code doit au moins être égale à  $2x + 1$



# Codes détecteur d'erreur

- Les plus utilisés car nécessitent moins de redondance
- Exemples de codes détecteurs d'erreur
  - Codes basés sur la parité
    - VRC (*Vertical Redundancy Checking*)
    - LRC (*Longitudinal Redundancy Checking*)
  - Codes Polynomiaux
    - CRC (*Cyclic Redundancy Checking*)

# Vertical Redundancy Control

- L'unité à protéger est le caractère ( $m = 7$ )
- On ajoute un bit de redondance ( $r = 1$ ) appelé *bit de parité* ou VRC
- **Parité paire** : le nombre total de bits à 1 du mot de code est pair

0	1	0	1	1	0	0	1
---	---	---	---	---	---	---	---

- **Parité impaire** : le nombre total de bits à 1 du mot de code est impair

0	1	0	1	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

- Distance de Hamming = 2
  - ➔ Permet de détecter 1 erreur par caractère

# Longitudinal Redundancy Control

- Les unités à protéger sont des blocs de  $k \times n$  bits
  - $k-1$  premières lignes constituées d'un mot de  $n-1$  bits de données et d'1 bit de parité (paire ou impaire)
  - La dernière ligne est un mot de contrôle de  $n$  bits
- Exemple en parité paire :

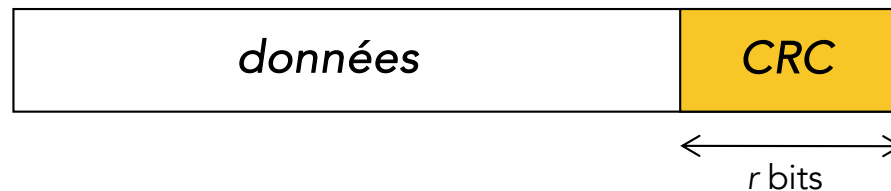
0	1	0	1	1	0	0	1
1	1	0	1	0	0	0	1
0	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1	1	0

- Distance de Hamming = 4
  - ➔ Permet de détecter jusqu'à 3 erreurs par bloc
  - ➔ Permet de corriger 1 erreur par bloc



# Cyclic Redundancy Control

- Hypothèses : Emetteur et Récepteur utilisent le même *polynôme générateur  $G(x)$*  de degré  $r$
- Basé sur
  - l'arithmétique modulo 2
    - $1 + 1 = 0$
    - $1 - 1 = 0$
    - $0 + 1 = 1$
    - $0 - 1 = 1$
  - la division polynomiale
- Ajoute à la suite de bits à émettre  $r$  bits de redondance



# Cyclic Redundancy Control

- En émission

- Constituer  $M(x)$  le polynôme associé à la suite de bits à transmettre
- Multiplier  $M(x)$  par  $x^r$  où  $r$  est le degré de  $G(x)$
- Calculer  $R(x)$  le reste de la division (modulo 2) de  $M(x).x^r$  par  $G(x)$  :  

$$M(x).x^r = G(x).Q(x) + R(x)$$
- Transmettre la suite de bits associée au polynôme  $T(x)$  :  

$$T(x) = M(x).x^r - R(x) = M(x).x^r + R(x)$$
  - ➔  $r$  derniers bits : bits de contrôle

- Exemple

- Polynôme générateur :  $G(x) = x^2 + 1$
- Suite de bits à émettre : 1 1 0 1
- Polynôme associé :  $M(x) = x^3 + x^2 + 1$
- Que l'on multiplie par  $x^2$  :  $x^5 + x^4 + x^2$
- On effectue la division par  $G(x)$  :
- $R(x) = x$

➔ On transmet : 1 1 0 1 1 0

$  \begin{array}{r}  x^5 + x^4 + x^2 \\  x^5 + x^3 \\  \hline  x^4 + x^3 + x^2 \\  x^4 + x^2 \\  \hline  x^3 \\  x^3 + x \\  \hline  x  \end{array}  $	$  \begin{array}{r}  x^2 + 1 \\  \hline  x^3 + x^2 + x  \end{array}  $
--	--

# Cyclic Redundancy Control

- En réception

- Constituer  $T'(x)$  le polynôme associé à la suite de bits reçus
- Calculer  $R'(x)$  le reste de la division (modulo 2) de  $T'(x)$  par  $G(x)$  :  

$$T'(x) = G(x).Q'(x) + R'(x)$$

- Si  $R'(x) \neq 0$  alors erreur(s) de transmission

Sinon il y a une très forte probabilité pour que la trame soit exempte d'erreur (possibilité d'erreurs résiduelles)

- Exemple

- Hypothèse : erreur sur le deuxième bit
- Suite de bits reçus : 1 0 0 1 1 0
- Polynôme associé :  $T'(x) = x^5 + x^2 + x$
- On effectue la division par  $G(x)$  :
- $R(x) \neq 0 \rightarrow$  Erreur !

$$\begin{array}{r|l}
 \begin{array}{r}
 x^5 + x^2 + x \\
 \underline{x^5 + x^3} \\
 x^3 + x^2 + x \\
 \underline{x^3 + x} \\
 x^2 \\
 \underline{x^2 + 1} \\
 1
 \end{array}
 &
 \begin{array}{r}
 x^2 + 1 \\
 \hline
 x^3 + x + 1
 \end{array}
 \end{array}$$

# Cyclic Redundancy Control

- Exemples de polynômes générateurs
  - CRC-12 :  $x^{12} + x^{11} + x^3 + x^2 + x^1 + 1$ 
    - Utilisé pour les caractères codés sur 6 bits
  - CCR CCITT V.41 (HDLC) :  $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$   
CRC-16 :  $x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$ 
    - Utilisés pour des caractères codés sur 8 bits
  - CRC-32 (Ethernet) :  
 $x^{32} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$

# Conclusions

- Un signal est caractérisé par son spectre fréquentiel
  - Décomposition en séries de Fourier (ou Transformée de Fourier)
  - Couper des raies dans le spectre a pour effet de déformer le signal
- Un support de transmission est caractérisé par sa bande passante
  - En coupant les fréquences des signaux qui le traversent, le support déforme le signal reçu (par rapport au signal émis)
  - Si la déformation est trop importante, la transmission est impossible
- Les techniques de transmission adaptent le signal aux caractéristiques du support
  - Codage en ligne
  - Modulation
- Les techniques de transmission ne suffisent pas à assurer que les communications se déroulent sans erreur
  - Nécessité de mettre en place des techniques de protection contre les erreurs

# A faire

- Cours 2
  - à relire attentivement
- Devoir 2 sur Moodle
  - date de rendu : dimanche 17 septembre
- TP 1
  - lire le document « Introduction à Wireshark » sur Moodle