

Télécommunications

Département sciences du numérique
Première année

Introduction

Nathalie Thomas, IRIT/ENSEEIHT
Nathalie.Thomas@enseeiht.fr

Télécommunications

Introduction

- 1) Définitions
- 2) Avantages/Inconvénients du numérique
- 3) Eléments d'une chaîne de transmission
- 4) Critères de performance
- 5) Exemple

Télécommunications

Introduction

- 1) Définitions
 - 2) Avantages/Inconvénients du numérique
 - 3) Eléments d'une chaîne de transmission
 - 4) Critères de performance
 - 5) Exemple
-

Quelques définitions

Communication

Action de mettre en relation, en liaison, en contact, des choses.« (Dictionnaire Larousse)

Télécommunication

« Télé »: à distance

« Télécommunications » : Transmission, émission ou réception d'informations par fil, radioélectricité, optique, ou d'autres systèmes électromagnétiques." (Dictionnaire Larousse)

Quelques définitions

Communication

Action de mettre en relation, en liaison, en contact, des choses.» (Dictionnaire Larousse)

Télécommunication

« Télé »: à distance

« Télécommunications » : Transmission, émission ou réception d'informations par fil, radioélectricité, optique, ou d'autres systèmes électromagnétiques." (Dictionnaire Larousse)

Communications analogiques/numériques

- Communications analogiques : Information à transmettre définie à tout instant (temps continu) par des valeurs réelles
- Communications numériques : Information à transmettre définie à des instants discrets par un nombre fini de valeurs (quantification)
- Communications analogiques et numériques : le signal transmis est analogique.

Quelques définitions

Communication

Action de mettre en relation, en liaison, en contact, des choses.» (Dictionnaire Larousse)

Télécommunication

« Télé »: à distance

« Télécommunications » : Transmission, émission ou réception d'informations par fil, radioélectricité, optique, ou d'autres systèmes électromagnétiques." (Dictionnaire Larousse)

Communications analogiques/numériques

- Communications analogiques : Information à transmettre définie à tout instant (temps continu) par des valeurs réelles
- Communications numériques : Information à transmettre définie à des instants discrets par un nombre fini de valeurs (quantification)
- Communications analogiques et numériques : le signal transmis est analogique.

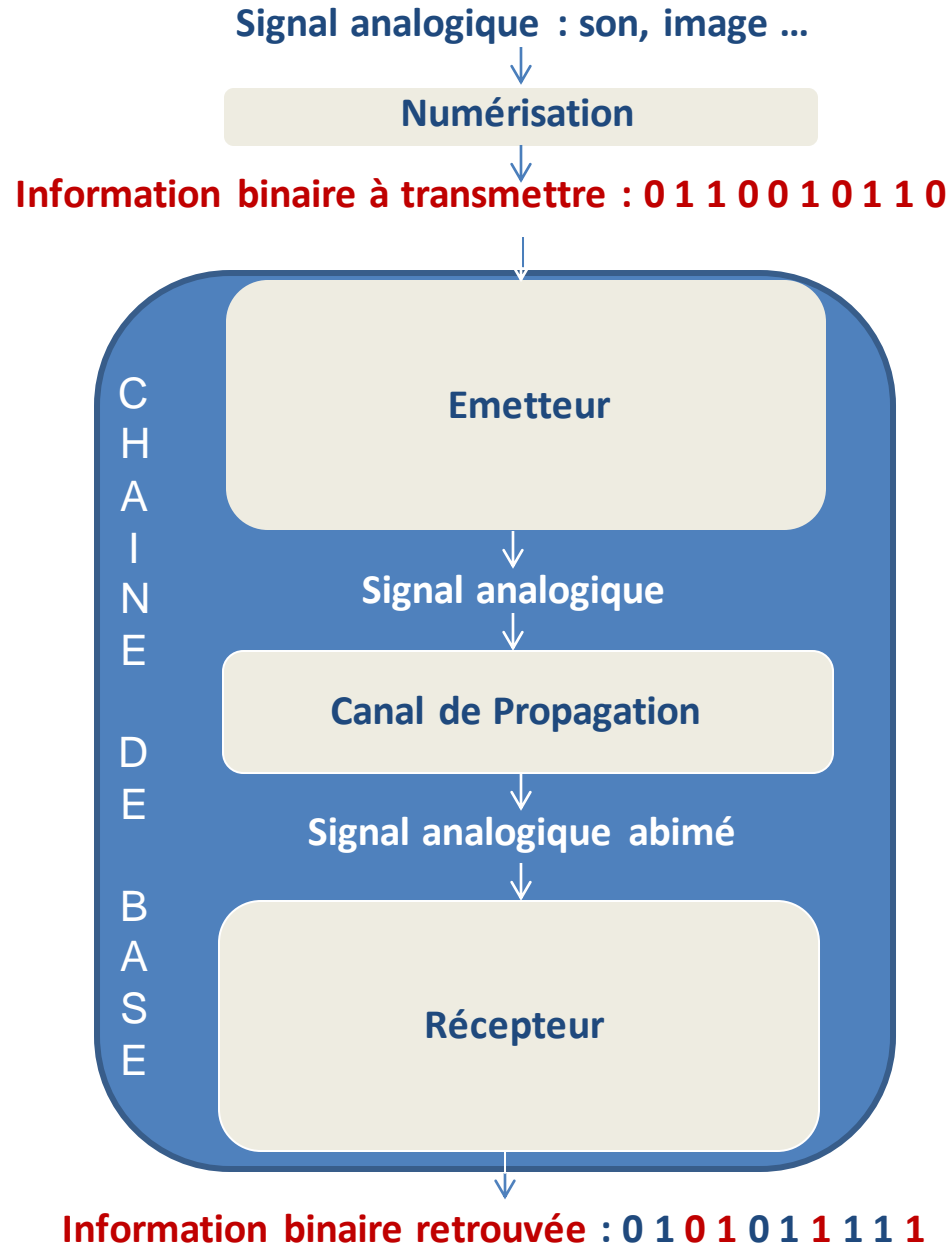
Objectifs de la « couche physique » d'un système de communication numérique

La « **couche physique** » d'un système de télécommunication a pour rôle de transformer l'information binaire à transmettre en un signal capable de traverser le support physique, ou canal de propagation, reliant l'émetteur et le récepteur. Elle est également chargée de retrouver l'information binaire à partir du signal reçu.

Transmettre « vite » => notion de **débit binaire**
et « bien » => notion de **taux d'erreur binaire** } **Prix à payer ?**
sous certaines contraintes <= **canal de propagation.**

Débits et taux d'erreur binaires souhaités fonction de l'application considérée.

Chaîne de communication **numérique**



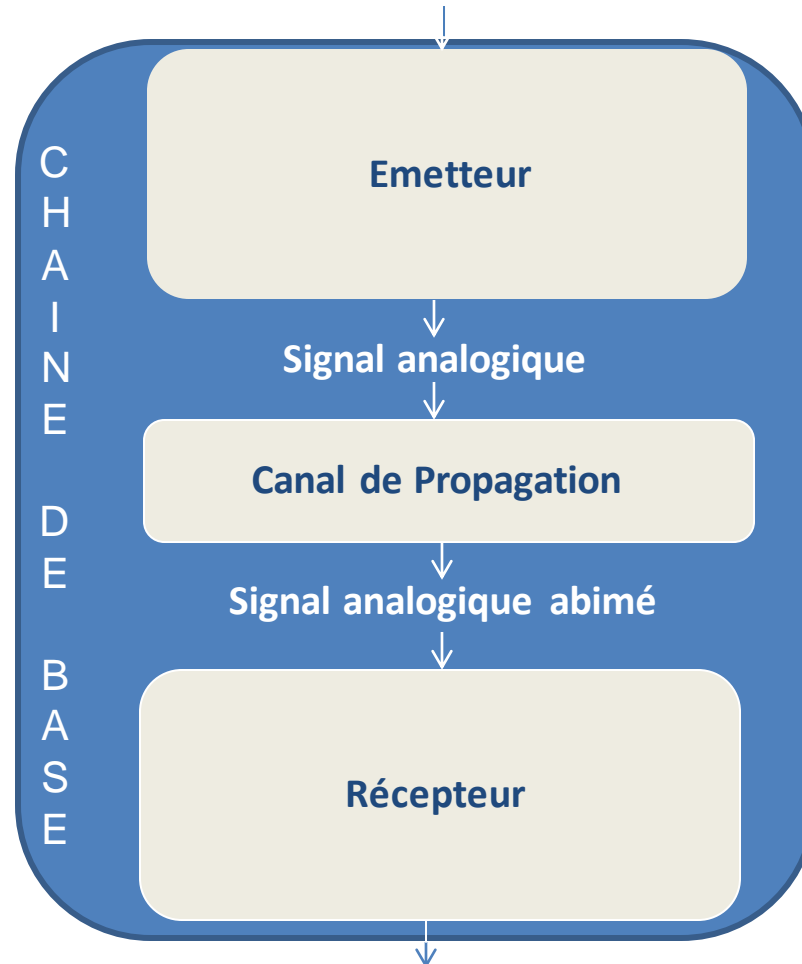
Chaîne de communication **numérique**

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

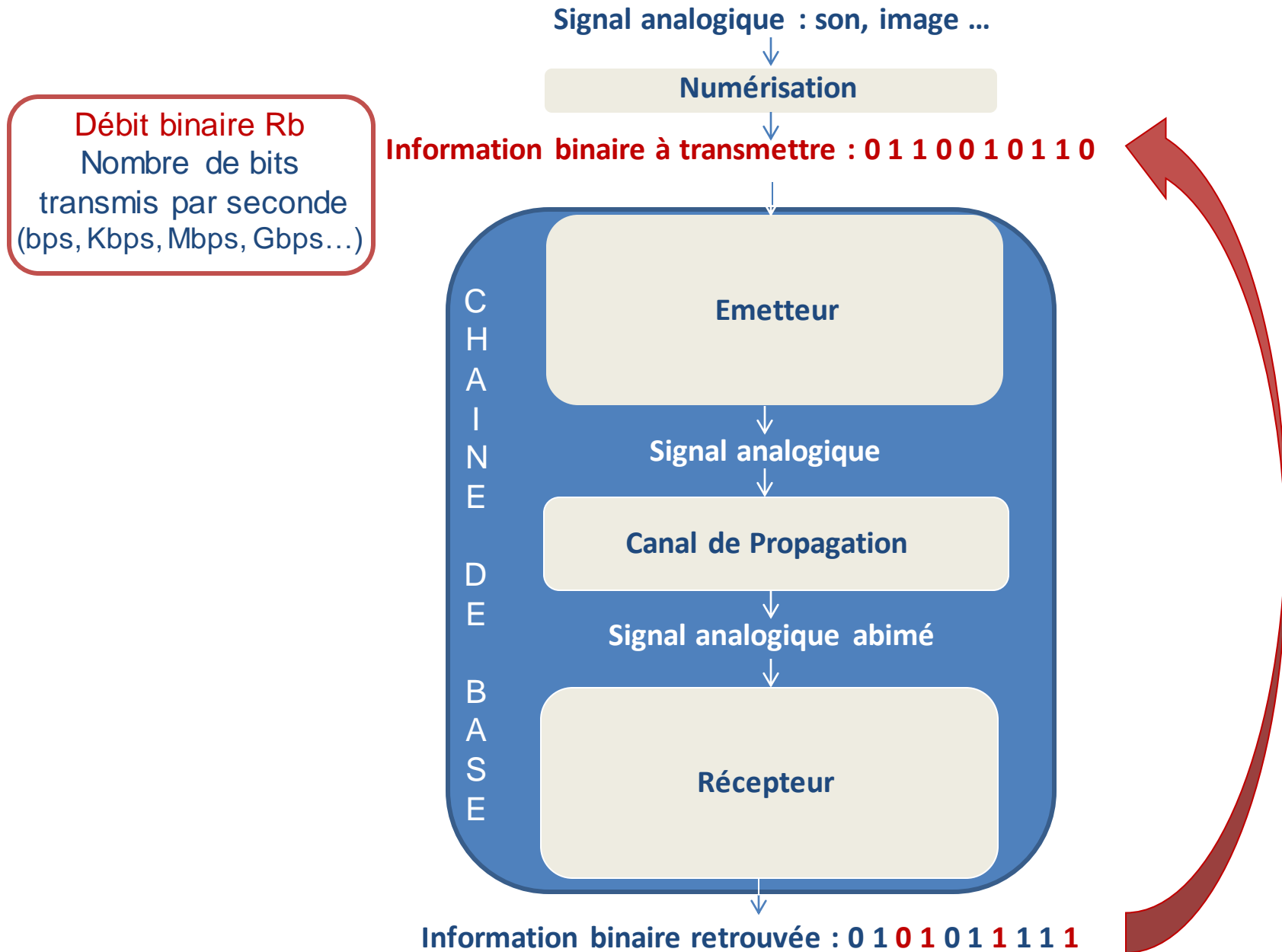
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Débit binaire R_b
Nombre de bits
transmis par seconde
(bps, Kbps, Mbps, Gbps...)



Information binaire retrouvée : 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1

Chaîne de communication **numérique**



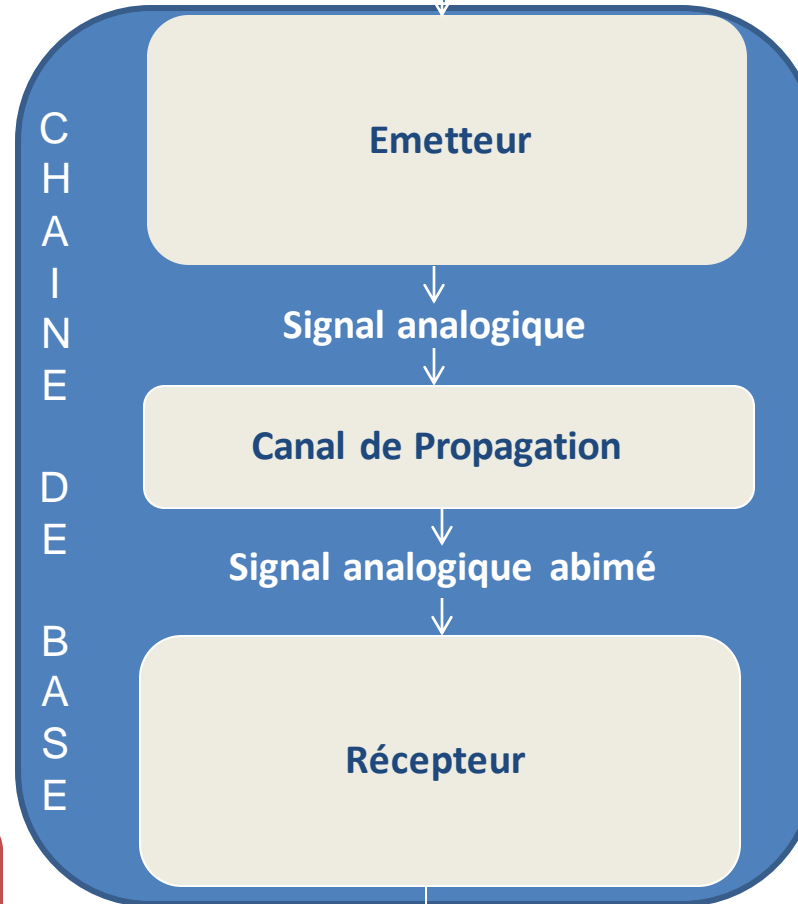
Chaîne de communication **numérique**

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Débit binaire R_b
Nombre de bits
transmis par seconde
(bps, Kbps, Mbps, Gbps...)



Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

Taux d'erreur binaire (TEB) :

$$\text{TEB} = \frac{\text{Nombre de bits reçus erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

Information binaire retrouvée : 0 1 **0** 1 0 1 **1** 1 1 **1**

Chaîne de communication **numérique**

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Débit binaire R_b
Nombre de bits
transmis par seconde
(bps, Kbps, Mbps, Gbps...)

Exemple DVB :
 $TEB < 10^{-10}$,
 $R_b : 30 \text{ à } 40 \text{ Mbps}$

C
H
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

Emetteur

Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

Exemple:

0	1	1	0	0	1	0	1	1	0
😊	😊	😞	😞	😊	😊	😞	😊	😊	😞
0	1	0	1	0	1	1	1	1	1

$TEB = 4/10$

Taux d'erreur binaire (TEB) :

$TEB = \frac{\text{Nombre de bits reçus erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$

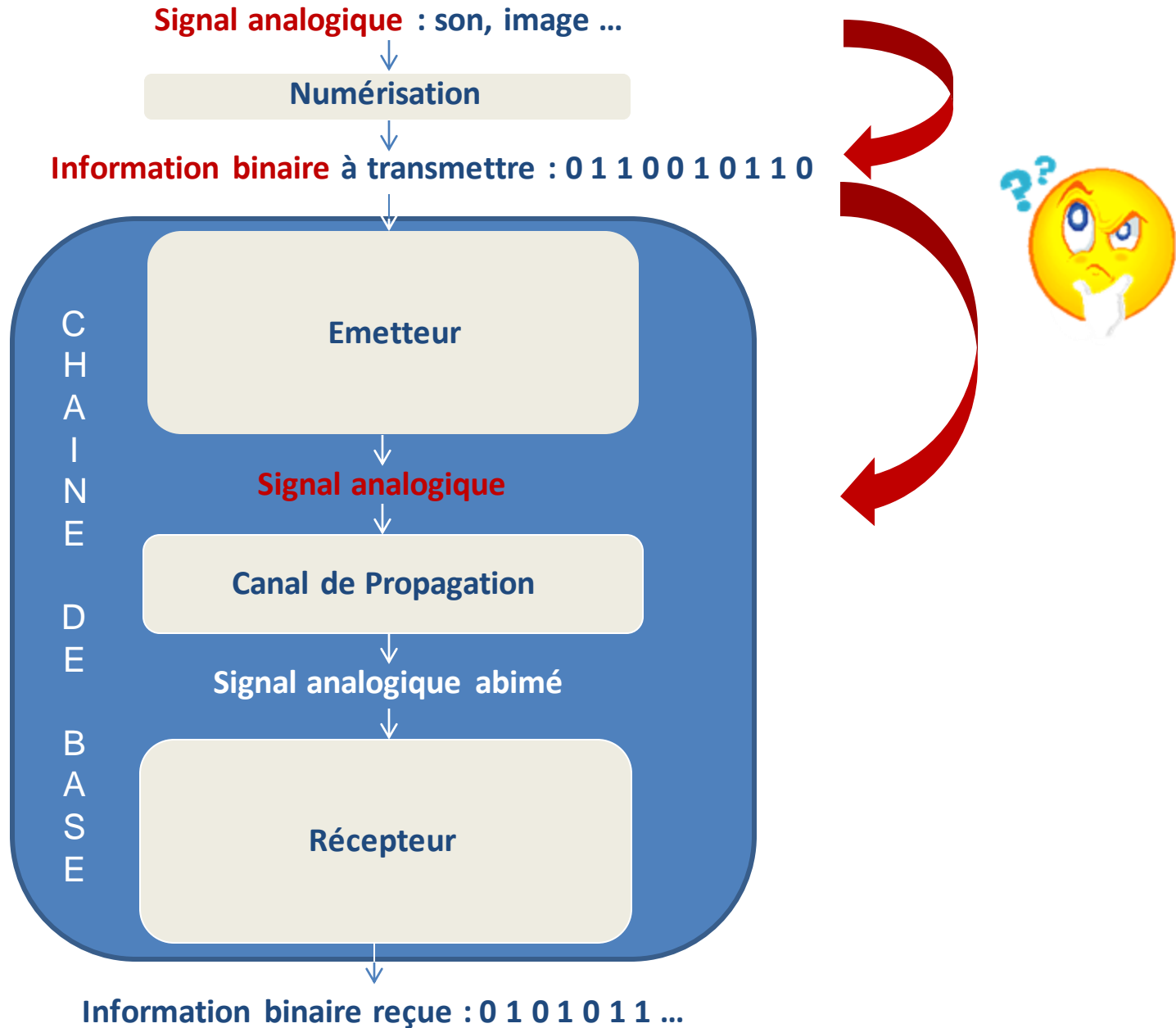
Information binaire retrouvée : 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1

Télécommunications

Introduction

- 1) Définitions
 - 2) Avantages/Inconvénients du numérique
 - 3) Canal de propagation
 - 4) Eléments d'une chaîne de transmission
 - 5) Critères de performance
 - 6) Exemple
-

Chaine de communication **numérique** : avantages, inconvénients



Chaîne de communication **numérique** : avantages, inconvénients

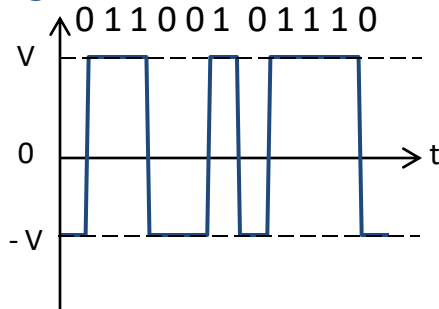
Signal analogique : son, image ...

Numérisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

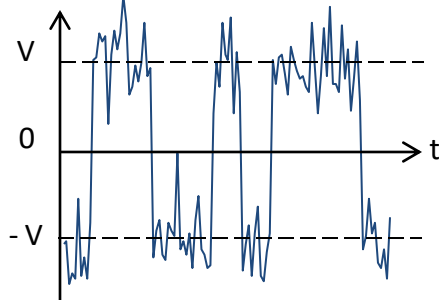
Exemple :

Signal transmis :

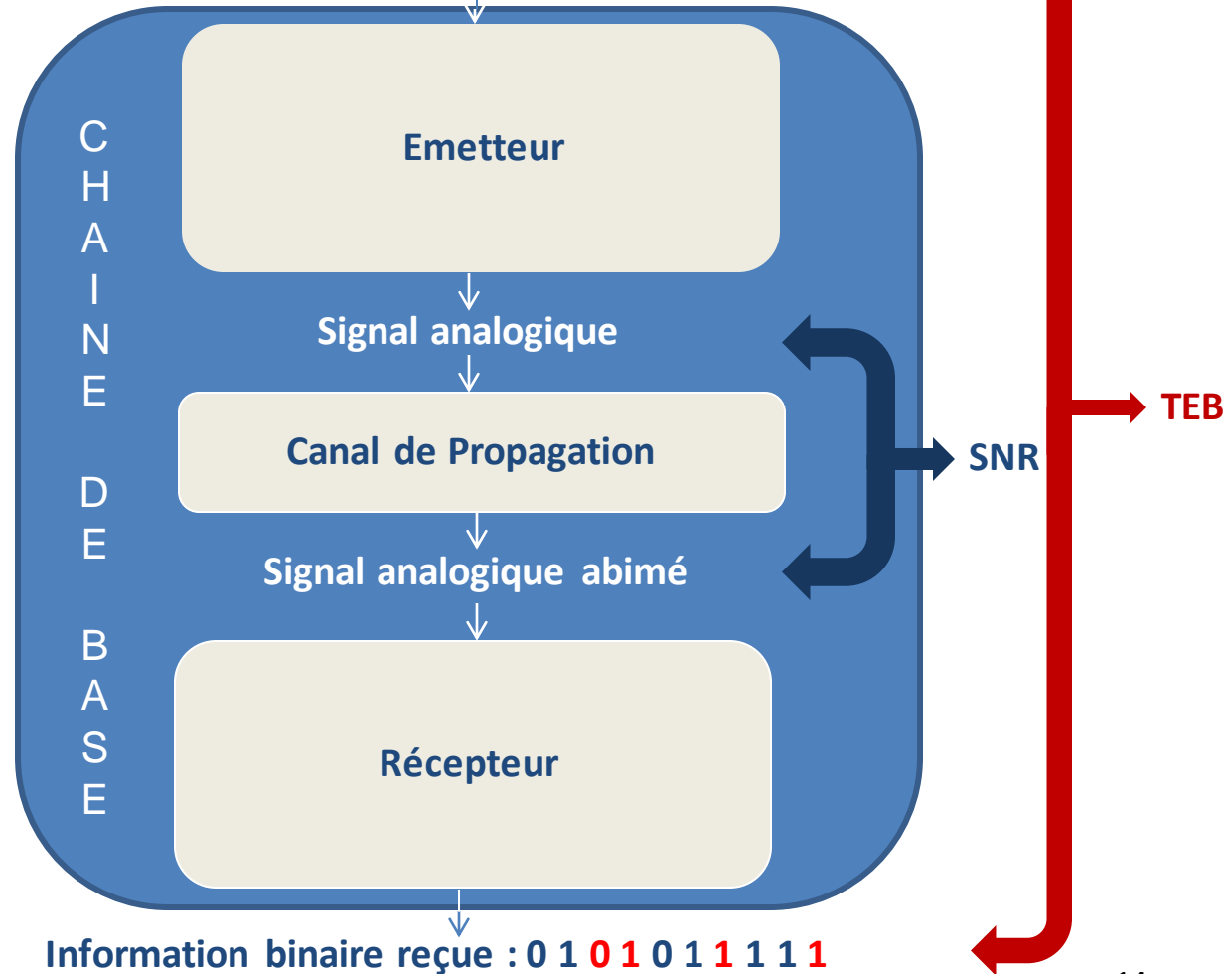
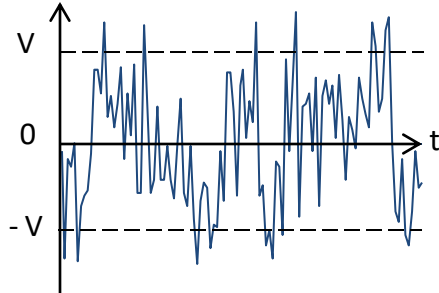


Signal reçu :

SNR = 10 dB :



SNR = 0 dB :



Chaîne de communication **numérique** : avantages, inconvénients

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1

Emetteur

Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...



La qualité de la transmission est améliorée :

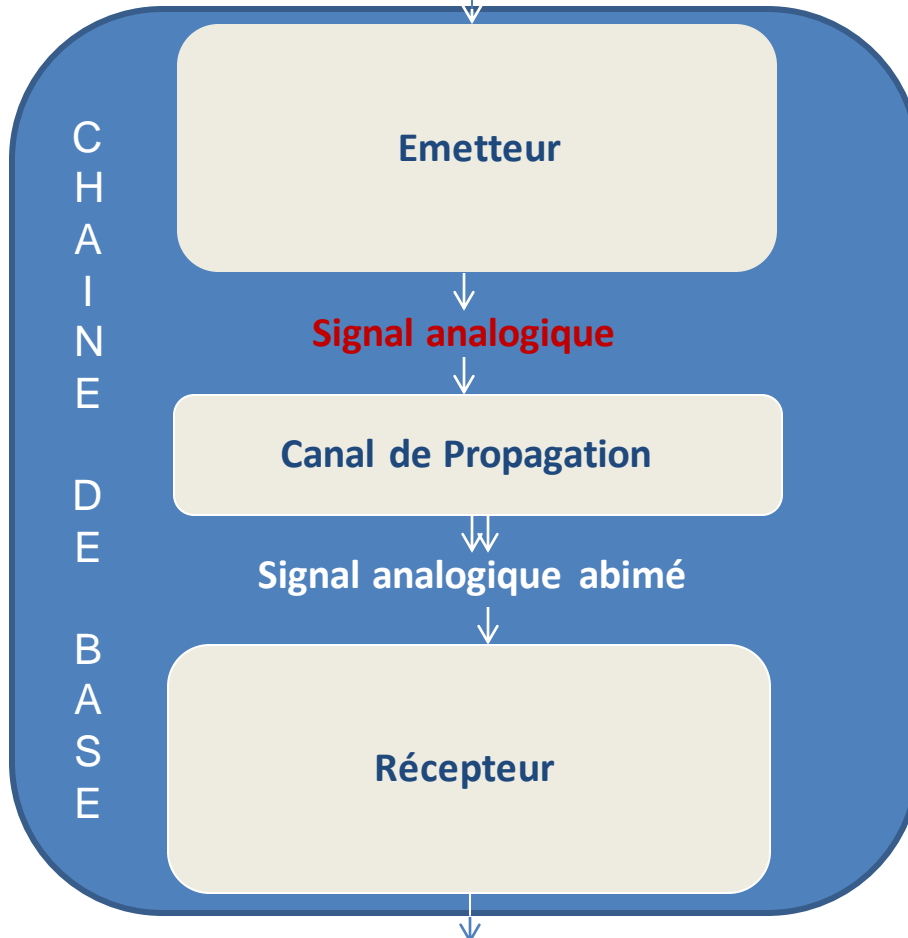
Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.

Chaine de communication **numérique** : avantages, inconvénients

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1



Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...



La qualité de la transmission est améliorée :

Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.



Prix à payer : la bande occupée augmente lorsqu'on numérise les signaux

Exemple : numérisation de la téléphonie :

$$B_{\text{analogique}} = 3.4 \text{ kHz}$$

$$B_{\text{numérique}} \sim 64 \text{ kHz} \text{ (Fe=8kHz, nb=8 bits)}$$

Heureusement il y a le codage source !

Chaine de communication **numérique** : avantages, inconvénients

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1

Emetteur

Signal analogique

Canal de Propagation

Signal analogique abimé

Récepteur

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...



La qualité de la transmission est améliorée :

Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.



De nouvelles fonctions peuvent être utilisées,

telles que le codage canal qui permet de diminuer le taux d'erreur binaire sans augmenter la puissance d'émission.



Prix à payer : la bande occupée augmente lorsqu'on numérise les signaux

Exemple : numérisation de la téléphonie :

$$B_{\text{analogique}} = 3.1 \text{ kHz}$$

$$B_{\text{numérique}} \sim 64 \text{ kHz (Fe=8kHz, nb=8 bits)}$$

Heureusement il y a le codage source !

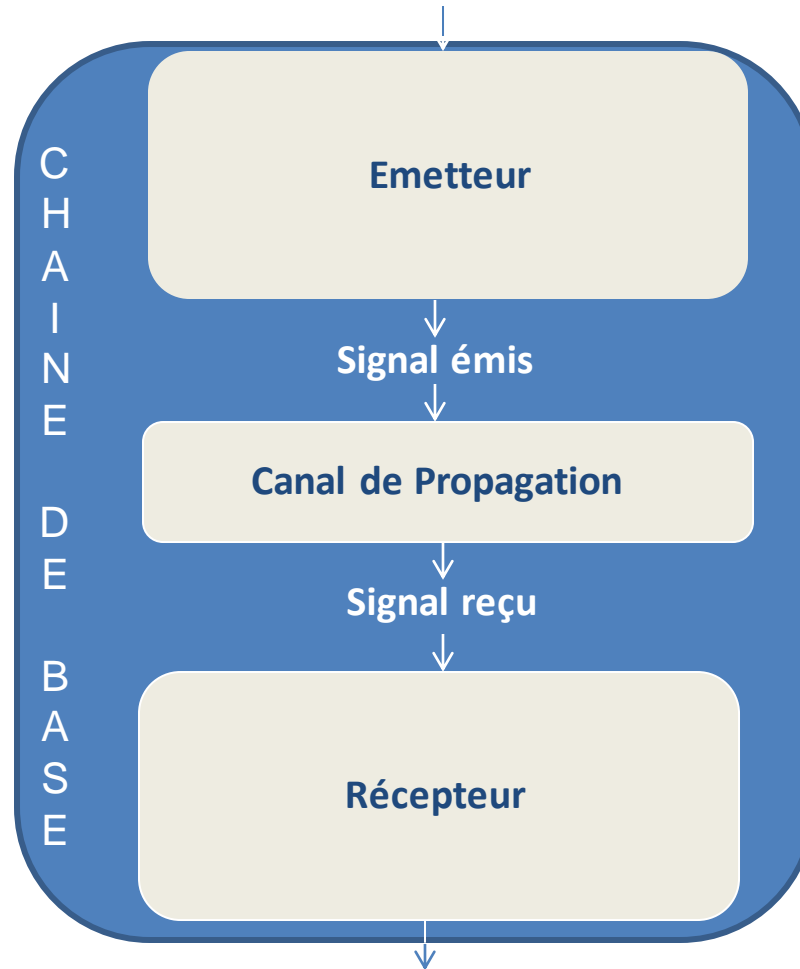
Télécommunications

Introduction

- 1) Définitions
- 2) Avantages/Inconvénients du numérique
- 3) **Éléments d'une chaîne de transmission**
- 4) Critères de performance
- 5) Exemple

Chaîne de communication numérique

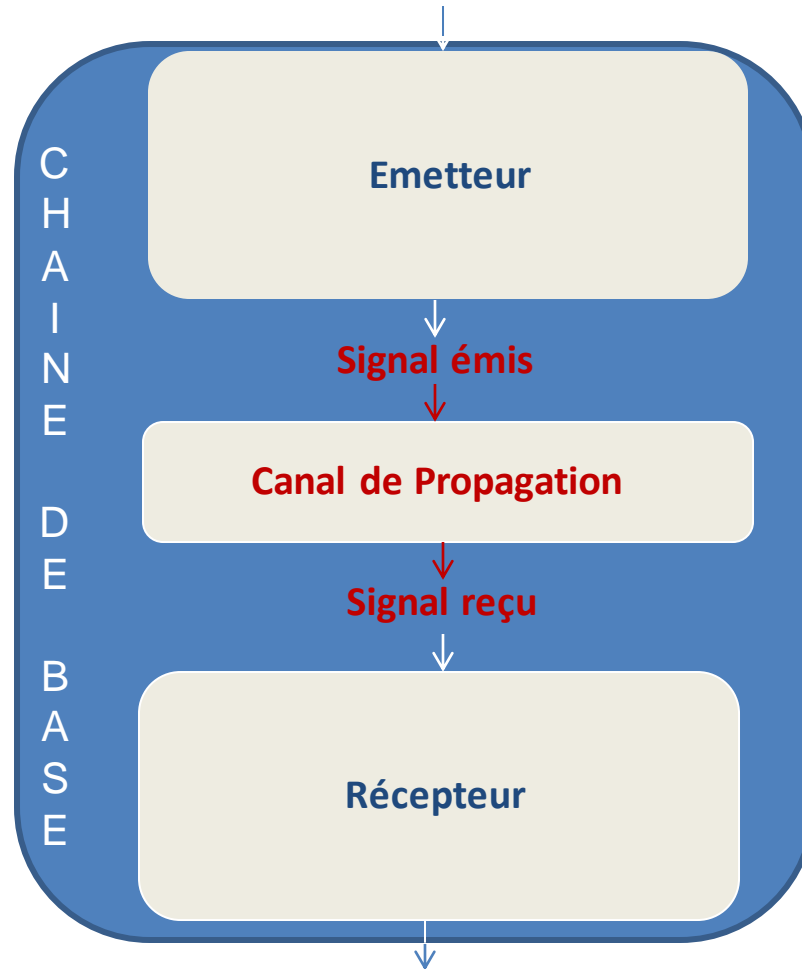
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



Information binaire reçue : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Chaine de communication numérique : le canal de propagation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



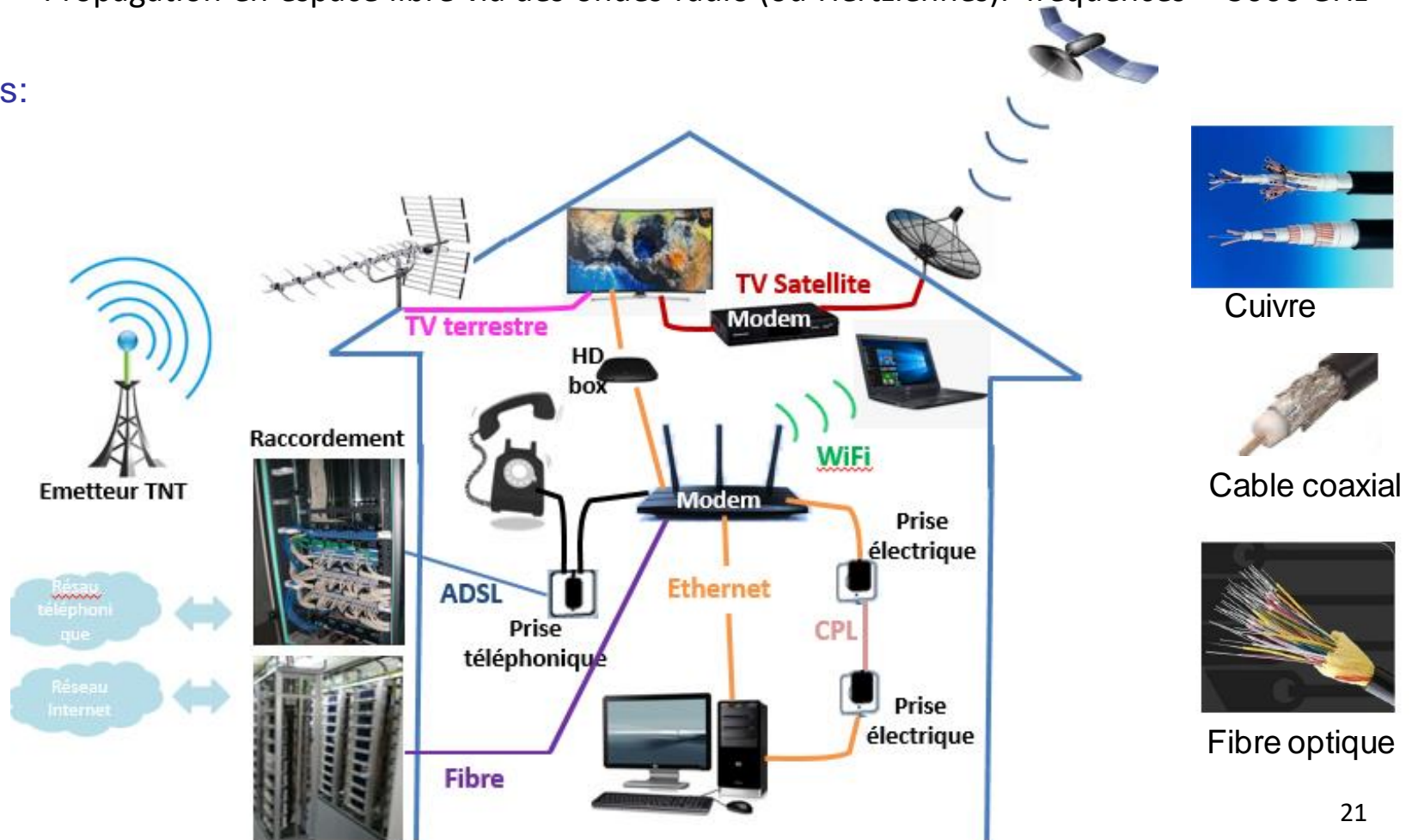
Information binaire reçue : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Chaine de communication numérique : le canal de propagation

Lien physique entre l'émetteur et le récepteur

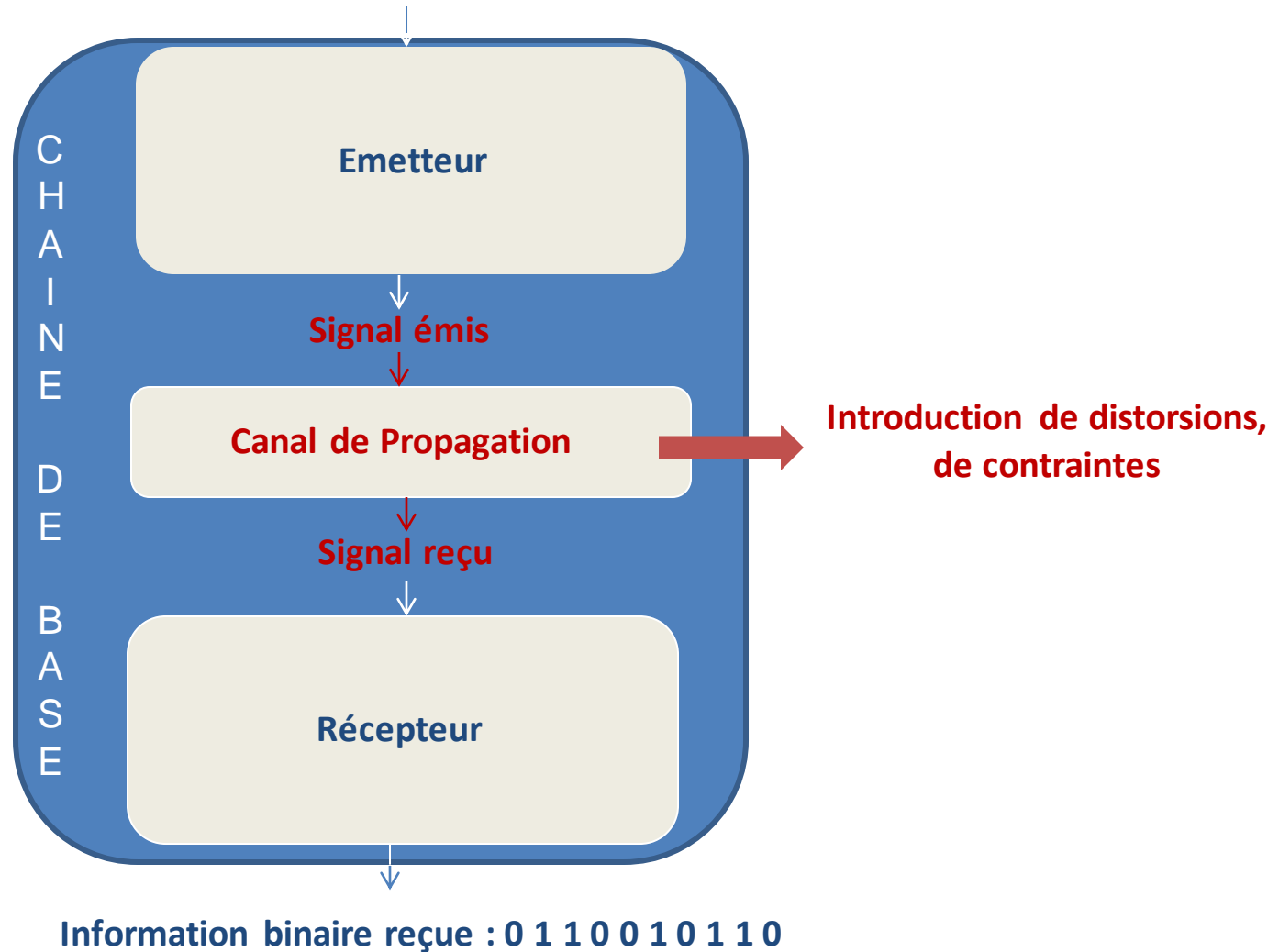
- **Transmissions filaires** : modems xDSL, fibre optique, TV par câble, CPL...
⇒ Propagation sur du cuivre, câble coaxial, fibre optique via des signaux électriques ou lumineux
- **Transmissions sans fil** : WiFi, TV terrestre, transmissions satellite, téléphonie mobile (GSM, 3G, 4G) ...
⇒ Propagation en espace libre via des ondes radio (ou Hertzienne): fréquences < 3000 GHz

- Exemples:



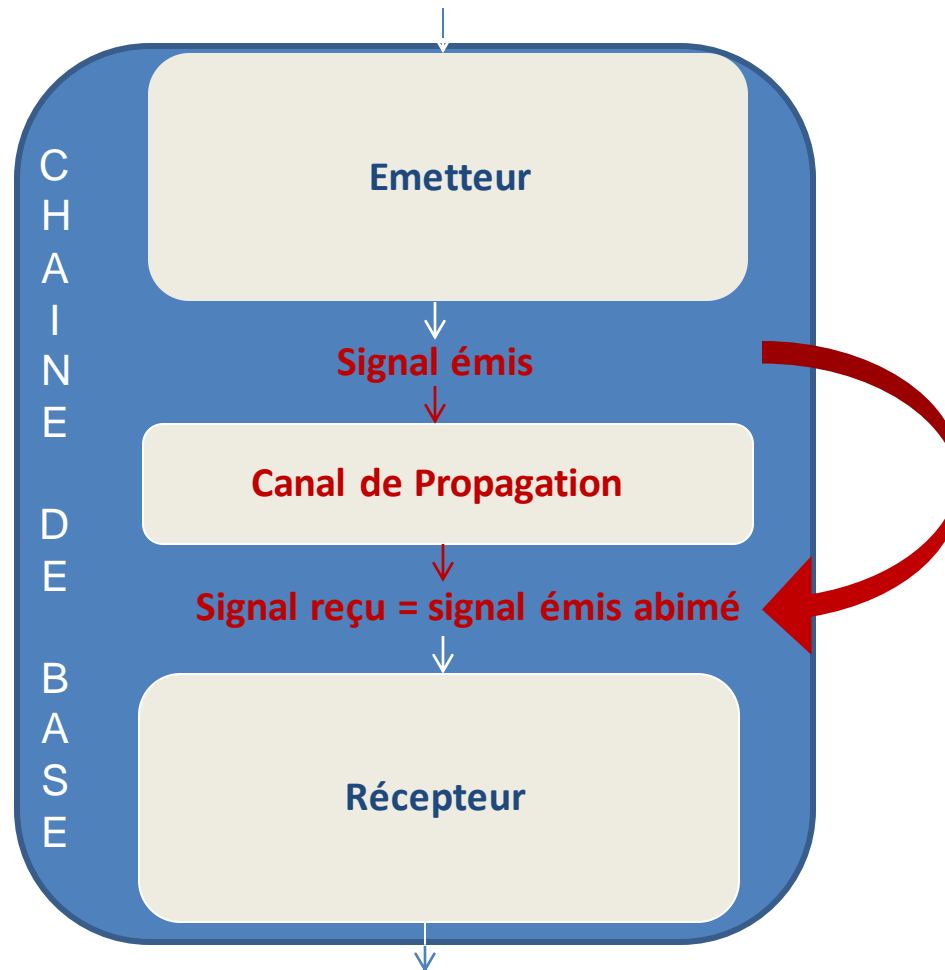
Chaine de communication numérique : le canal de propagation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



Chaine de communication numérique : le canal de propagation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



Information binaire reçue : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Le canal de propagation

Atténuation du signal transmis

Exemple : Effet de l'atténuation par absorption, diffusion dues aux gaz atmosphériques, aux nuages, à la pluie.
(transmission satellite fixe de type DVB-S)



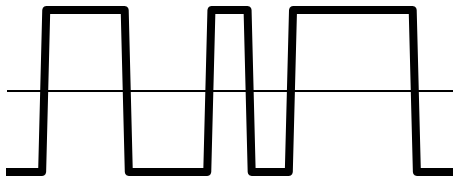
Canal de propagation

Introduction d'un bruit

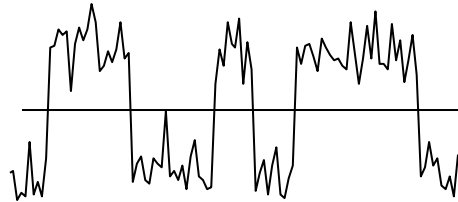
- Bruit externe = signaux reçus en plus du signal utile.
- Bruit interne = dispositifs électroniques dans le récepteur.

Exemples de distorsions dues au bruit

Signal transmis de type NRZ



Signal bruité, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \text{ dB}$



Signal bruité, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 0 \text{ dB}$

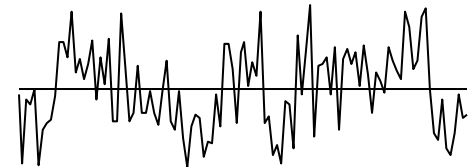


Image transmise

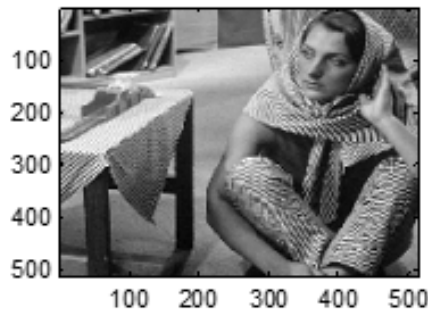


Image reçue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \text{ dB}$

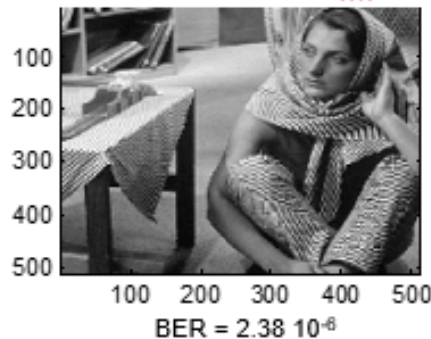
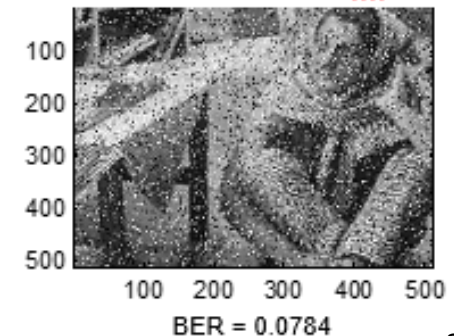


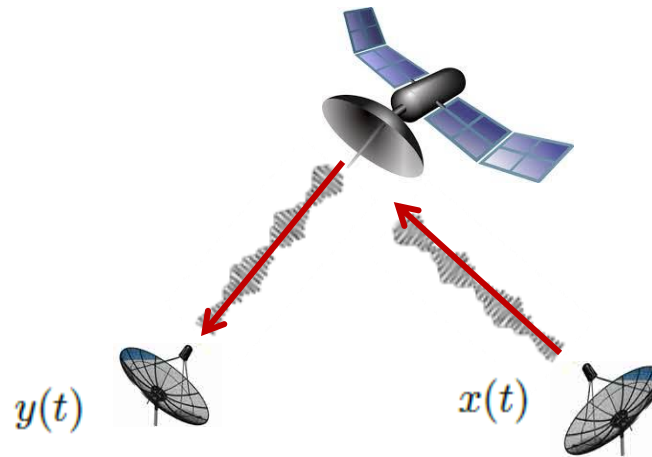
Image reçue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 0 \text{ dB}$



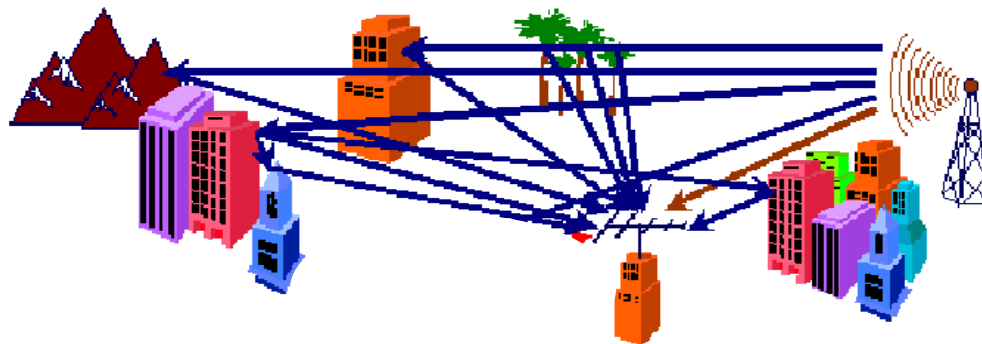
Canal de propagation

Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

- Seulement la ligne de vue directe entre émetteur et récepteur (un seul trajet)



- Plusieurs trajets entre émetteur et récepteur (canal « multi-trajets »)



Canal de propagation

Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

Exemples de distorsions dues au multi-trajet entre l'émetteur et le récepteur

Image émise :

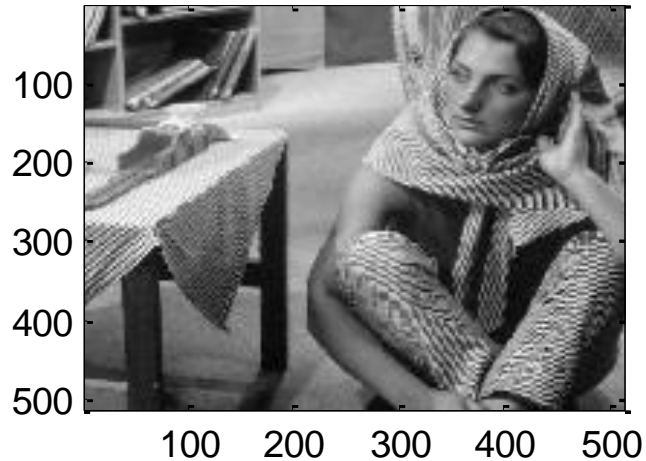
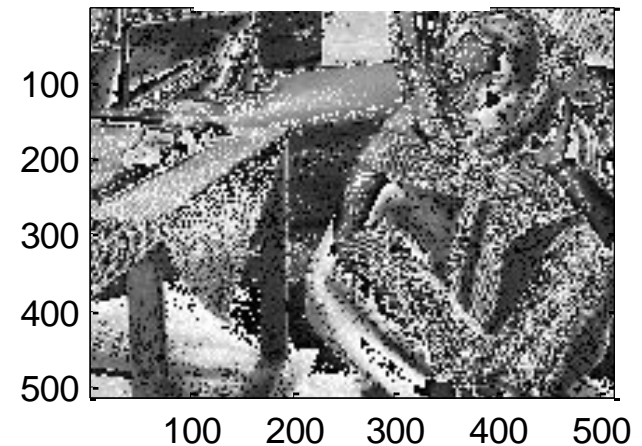


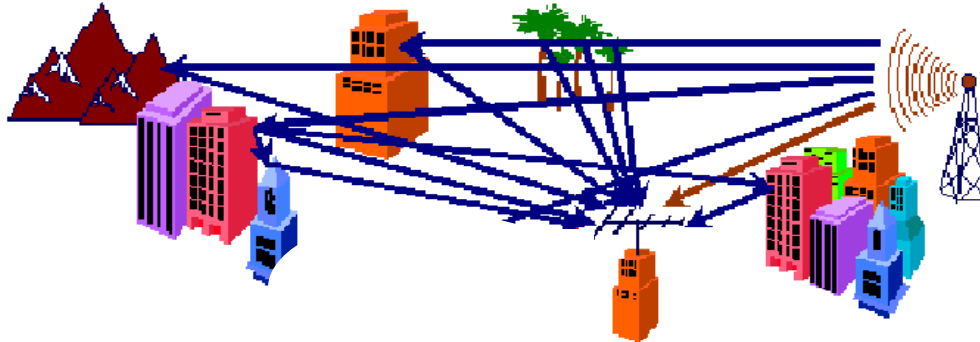
Image recue :



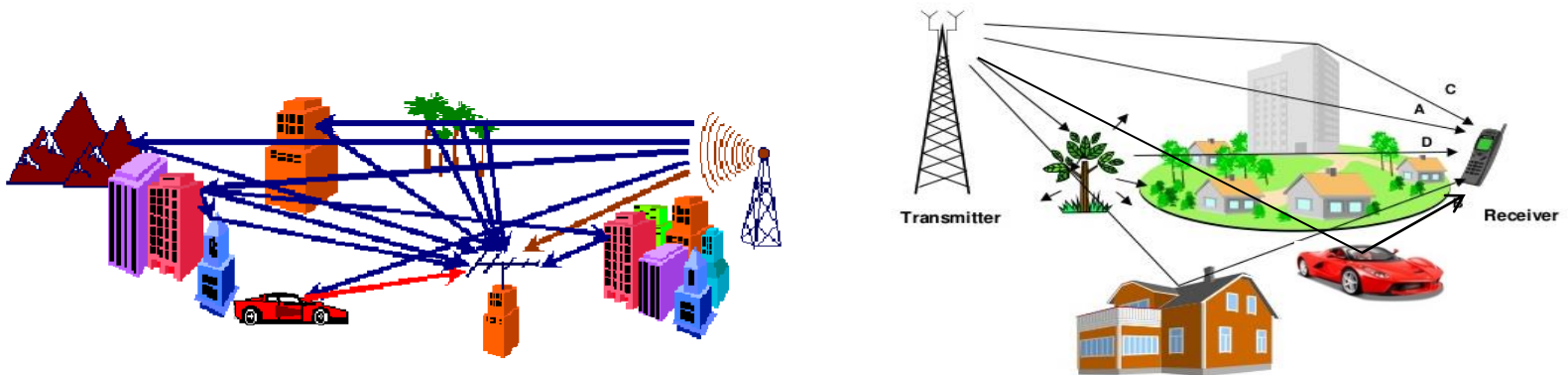
Canal de propagation

Canal stationnaire ou non stationnaire

Transmission fixe



Transmission mobile



Le canal de propagation

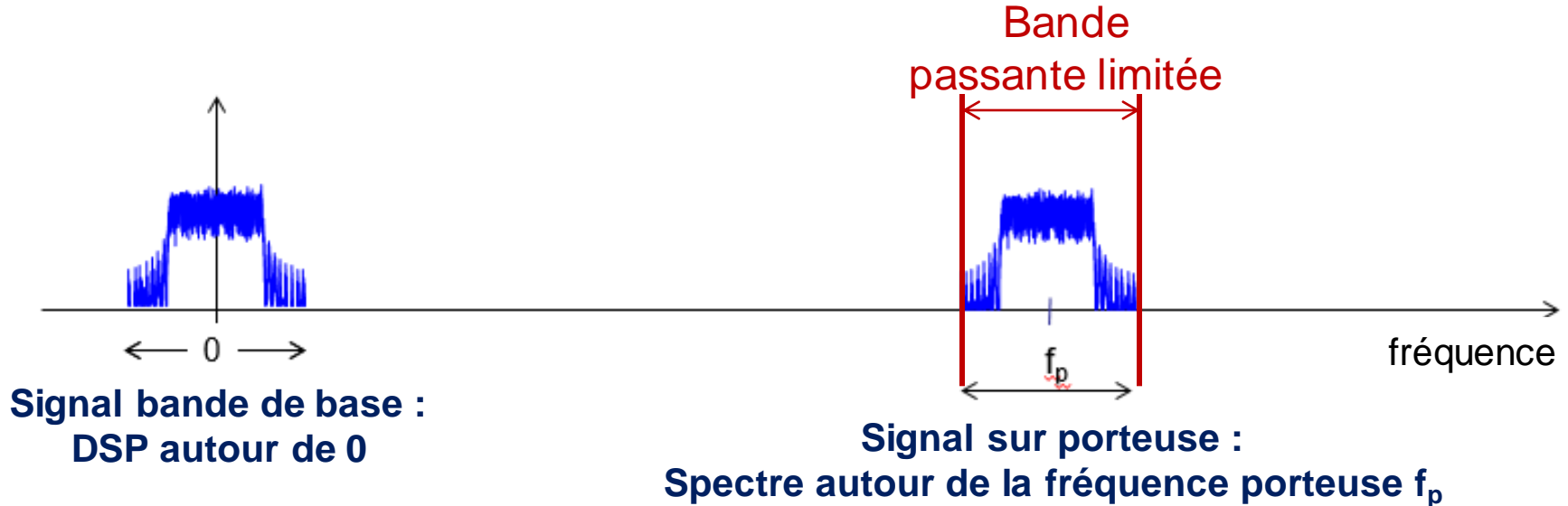
Bande passante limitée

Transmission en bande de base ou sur fréquence porteuse

Exemple d'une liaison satellite fixe (transmission DVB-S)

Propagation dans les bandes

L : 1.4-1.6 GHz, C : 4-6 GHz, Ku : 10.7-12.45 GHz and Ka : 20-30 GHz



Si **transposition de fréquence** :
Transmission sur fréquence porteuse

Le canal de propagation

Canal de propagation partagé

– Régulation des fréquences

- **Selon les pays par des instances de régulation ou le ministère chargé des TIC ⁽¹⁾**

Exemple en France : ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques), ANRT (Agence Nationale de Régulation des Fréquences), CSA (Conseil Supérieur de l'Audiovisuel))

- **Collaborations entre états, au niveau mondial : Union Internationale des Télécommunications**

→ Chargée de la réglementation et de la planification des télécommunications dans le monde
→ 193 états membres et 700 membres associés du secteur des TIC.
→ Instance au sein de laquelle les Etats et le secteur privé se coordonnent

- **Définition de bandes libres d'accès (sans licence, réglementation de la PIRE)**

→ Industrielle Scientifique et Médicale (ISM) : (902-928 MHz, 2.400-2.4835 GHz)
→ Unlicensed National Information Infrastructure (UNII) : 5.15-5.25 GHz, 5.25-5.35 GHz
→ UNII-3/ISM : 5.725-5.850 GHz

⁽¹⁾ : Technologies de l'Information et de la Communication (télécommunications, internet, informatique, industrie de l'audiovisuel)

Le canal de propagation

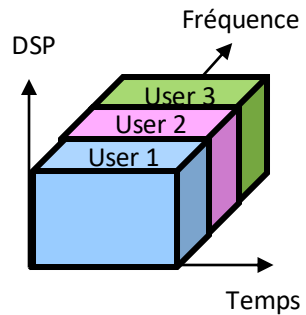
Canal de propagation partagé

– Méthodes de multiplexage

Exemples

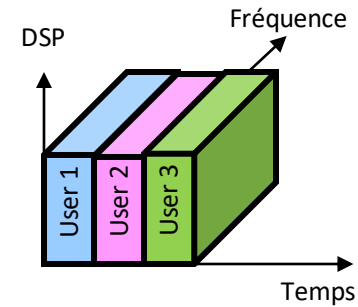
FDM

(Frequency Division Multiplexing)



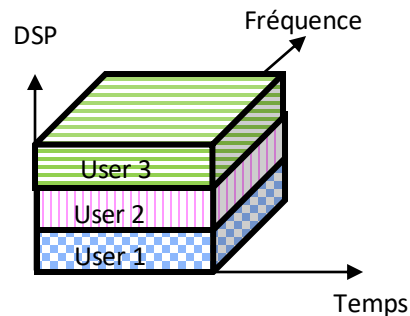
TDM

(Time Division Multiplexing)



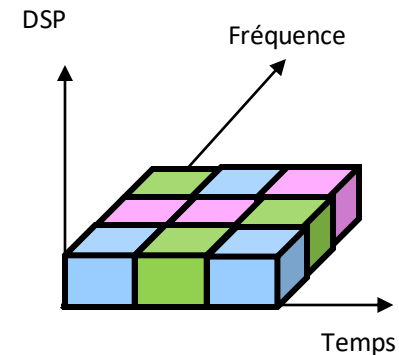
CDM

(Code Division Multiplexing)



MF-TDM

(Multi Frequency - Time Division Multiplexing)

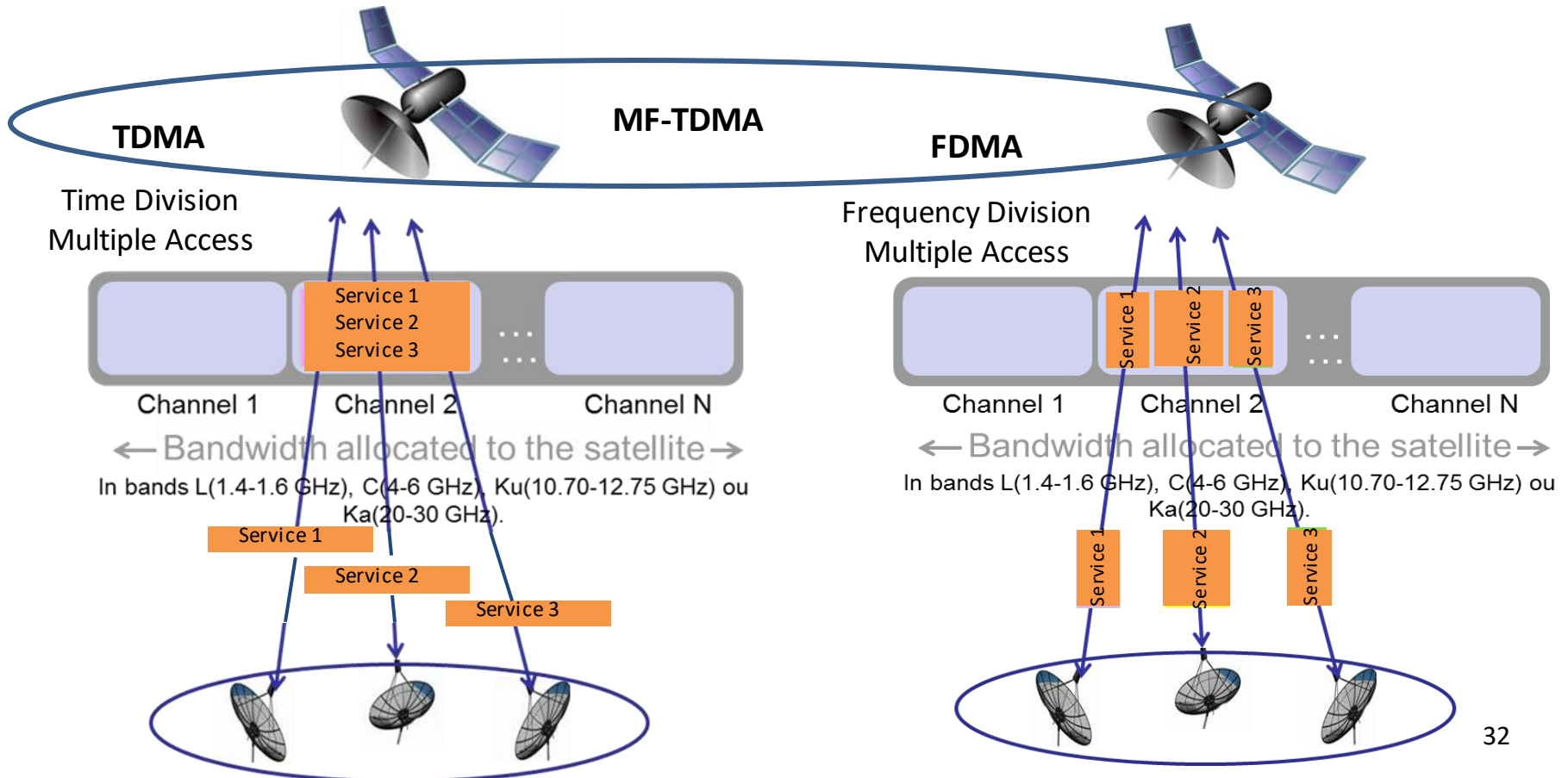


Le canal de propagation

Canal de propagation partagé

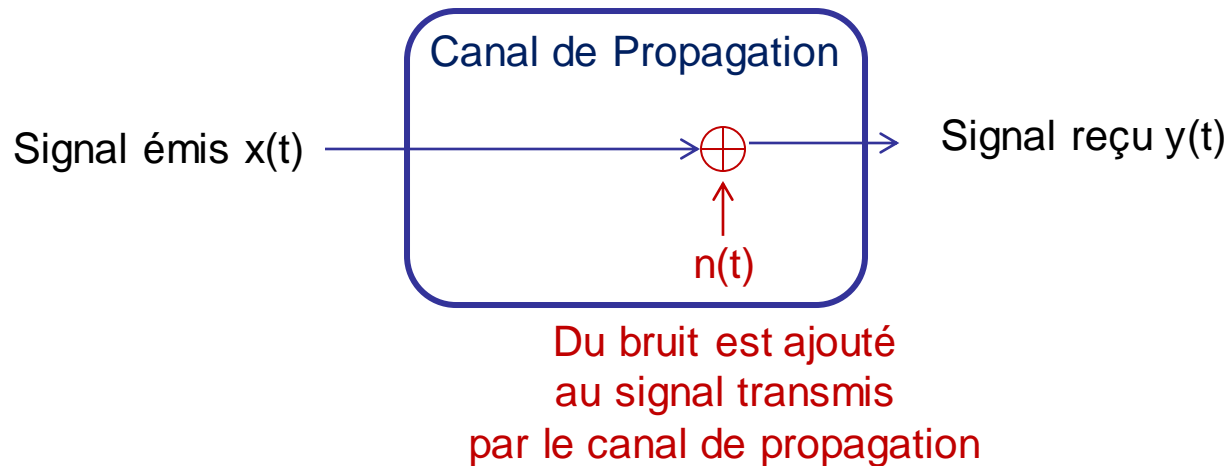
Exemple d'une liaison satellite fixe (DVB-S)

- **Régulation globale des fréquences** : Union Internationale des Télécommunication (UIT)
- **Méthodes de multiplexage couramment utilisées** : TDMA, FDMA et MF-TDMA



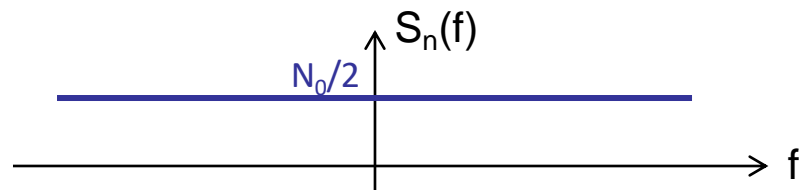
Le canal de propagation

Modélisation du canal de propagation



→ Bruit **blanc**, de DSP = $N_0/2$ quelle que soit la fréquence, avec $N_0 = k(T_e + T_i)$

- k = constante de Boltzmann
- T_e = température de bruit externe
- T_i = température de bruit interne



→ Bruit **Gaussien**, de puissance σ^2

→ **Ajouté** en amont du récepteur, en supposant ensuite ses composants idéaux,

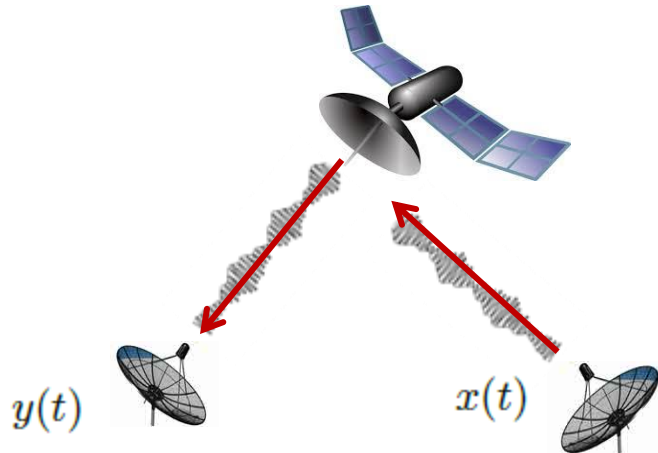
→ Une mesure de dégradation : le rapport signal sur bruit (SNR : Signal to Noise Ratio)

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log \frac{P_{\text{useful signal}}}{P_{\text{noise}}}$$

Le canal de propagation

Modélisation du canal de propagation

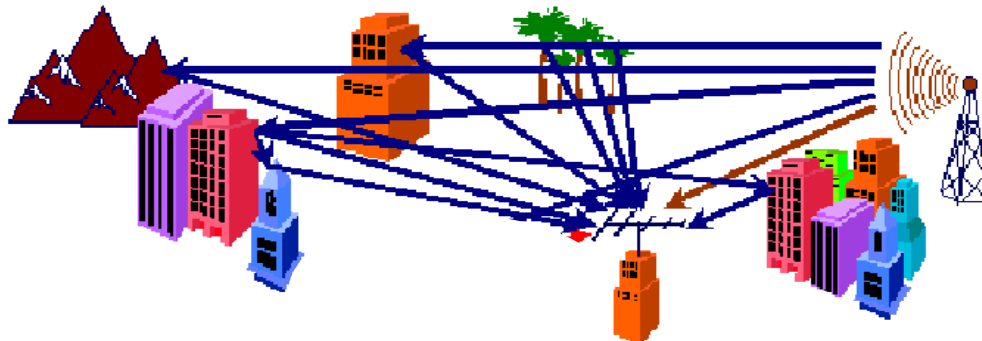
- Seulement la ligne de vue directe entre émetteur et récepteur (un seul trajet)



Atténuation et retard introduits par le canal

$$y(t) = \alpha x(t - \tau) + n(t) = \alpha \delta(t - \tau) * x(t) + n(t)$$

- Plusieurs trajets entre émetteur et récepteur (canal « multi-trajets »)

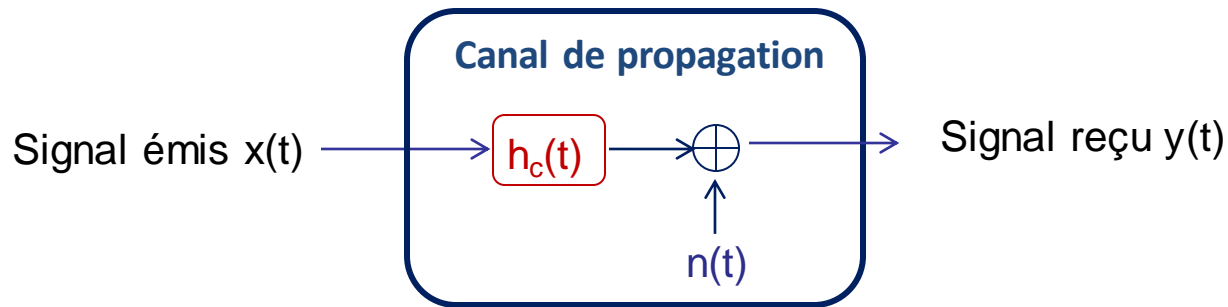


Plusieurs atténuations et retards introduits par le canal

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k x(t - \tau_k) + n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \delta(t - \tau_k) * x(t) + n(t)$$

Le canal de propagation

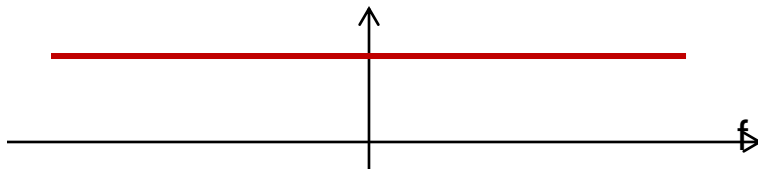
Modélisation du canal de propagation



Filtrage du signal émis et Ajout de bruit

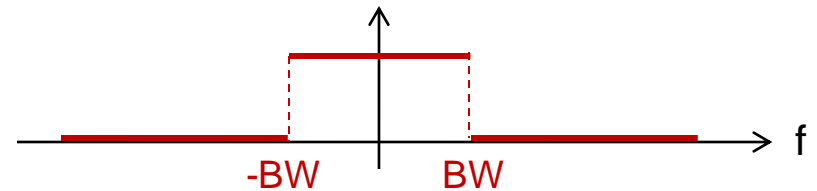
Canal AWGN

$|H_c(f)|$



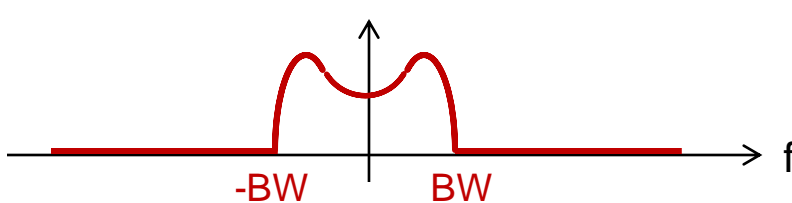
Canal AWGN à bande passante limitée
(transmission bande de base)

$|H_c(f)|$



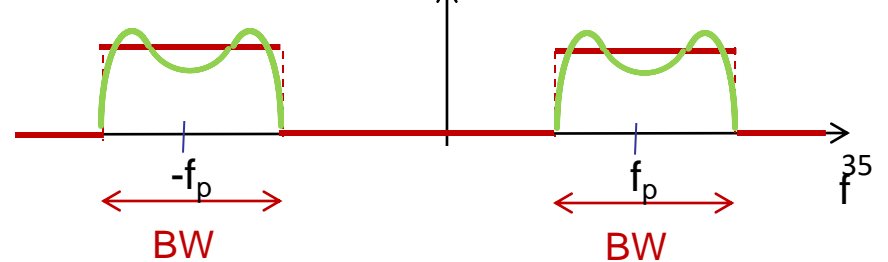
Canal sélectif en fréquence (stationnaire)

$|H_c(f)|$



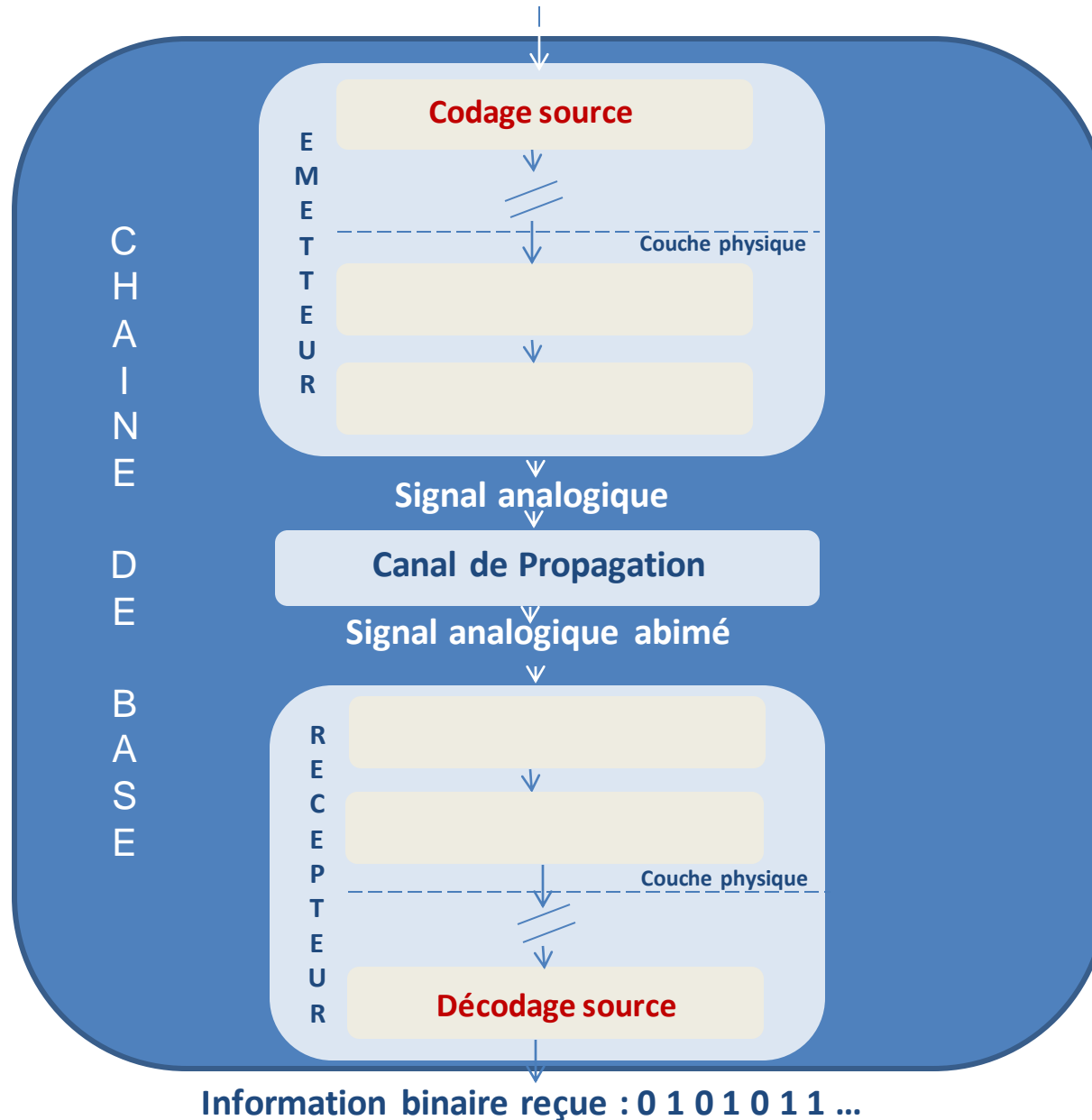
Canal AWGN ou sélectif en fréquence à bande passante limitée
(transmission sur porteuse)

$|H_c(f)|$



Le codage source

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



Exemple de codage source

Message à transmettre : AABACADBAA

Avec les probabilités d'apparition suivantes :

Lettre :	A	B	C	D
Probabilité:	0.6	0.2	0.1	0.1

Codage binaire naturel :

4 caractères différents = > 2 bits par caractère ($2^2=4$)

Lettre :	A	B	C	D
Code :	00	01	11	10

20 bits pour transmettre le message : 00001000110001100000

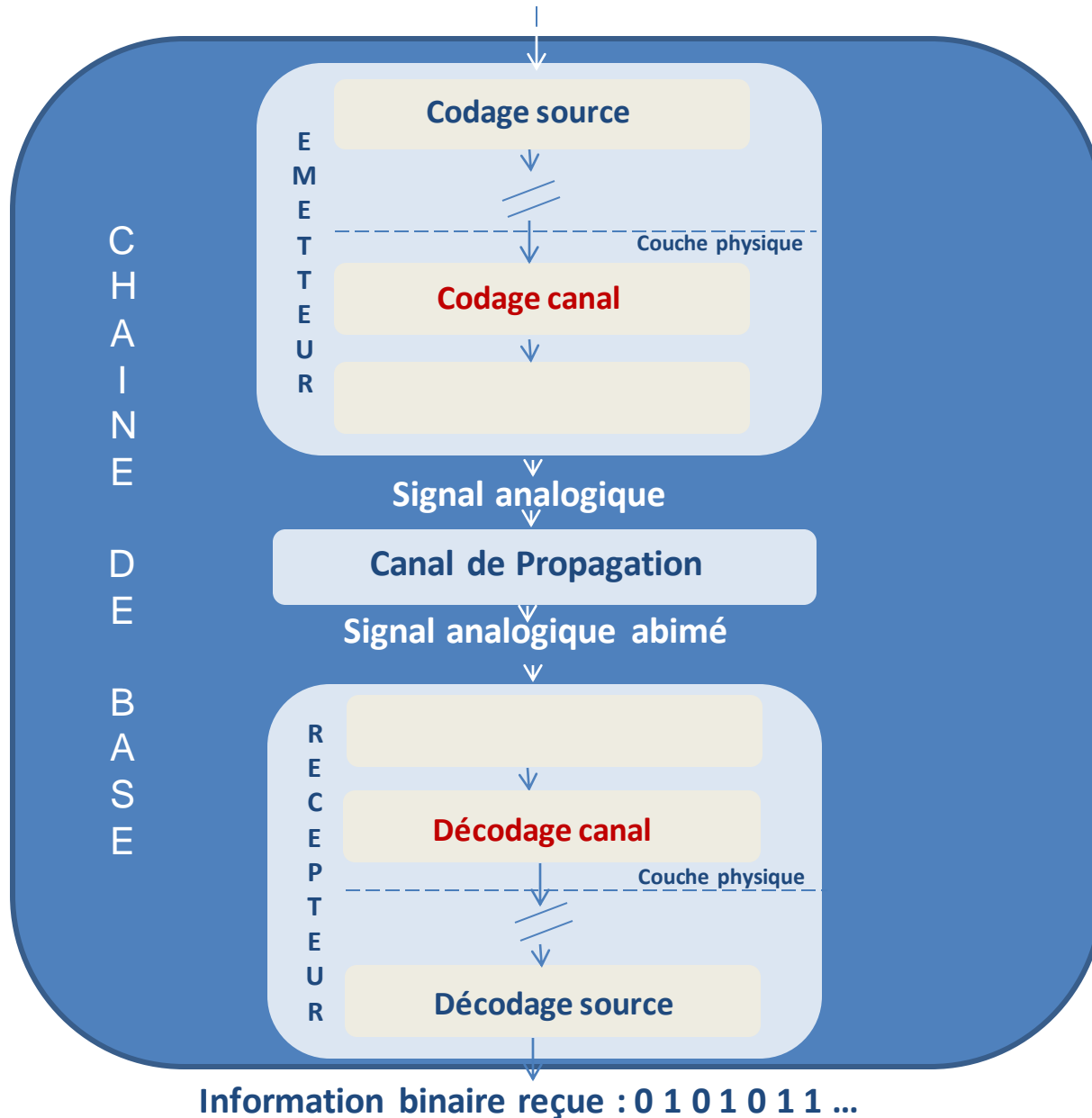
Code plus intelligent (base du code de Huffman présent dans le format jpeg):

Lettre :	A	B	C	D
Code :	0	10	110	111

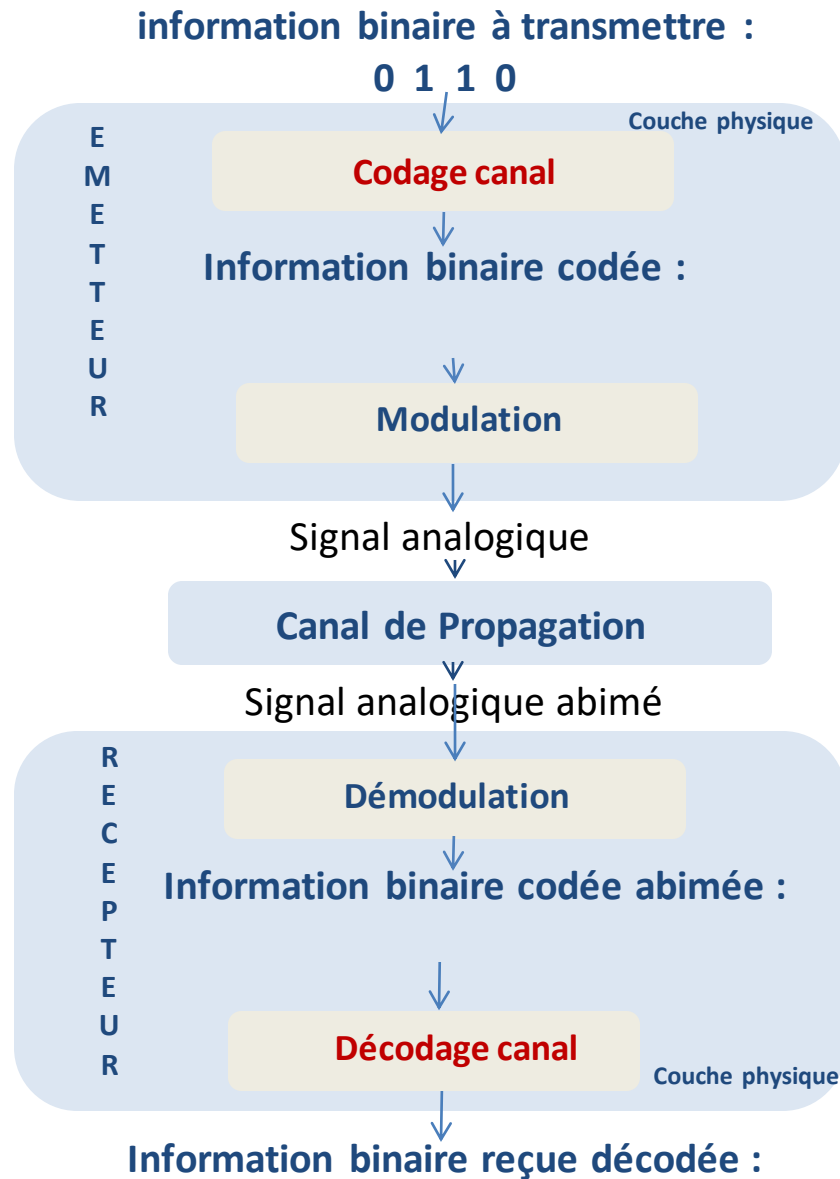
16 bits pour transmettre le message : 0010011001111000

Le codage canal

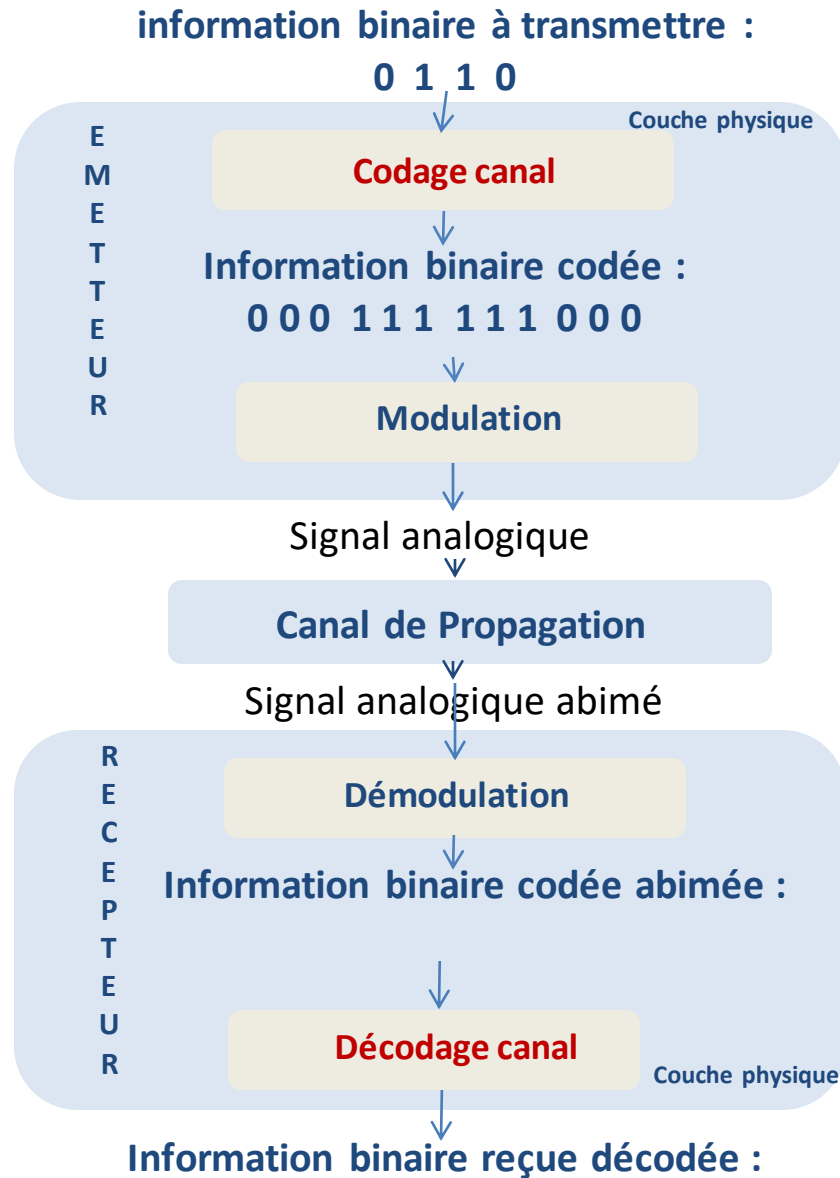
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



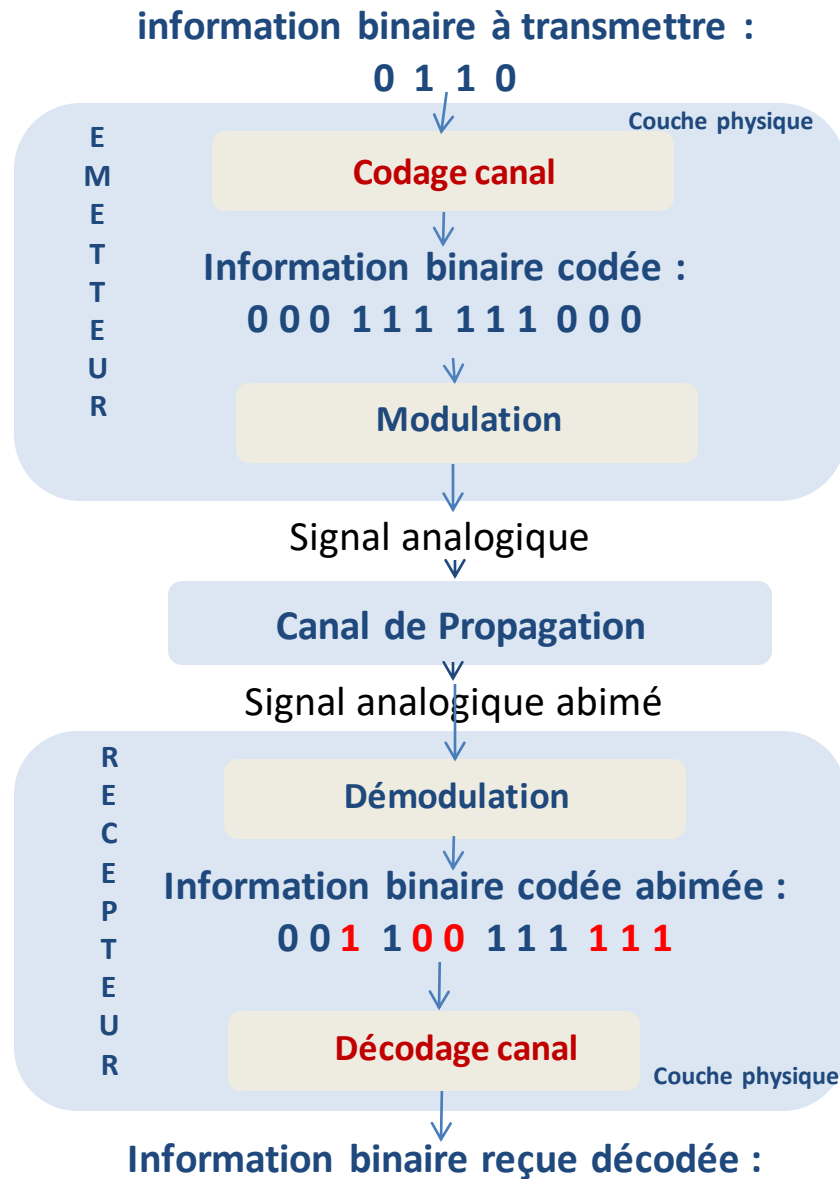
Exemple de codage canal



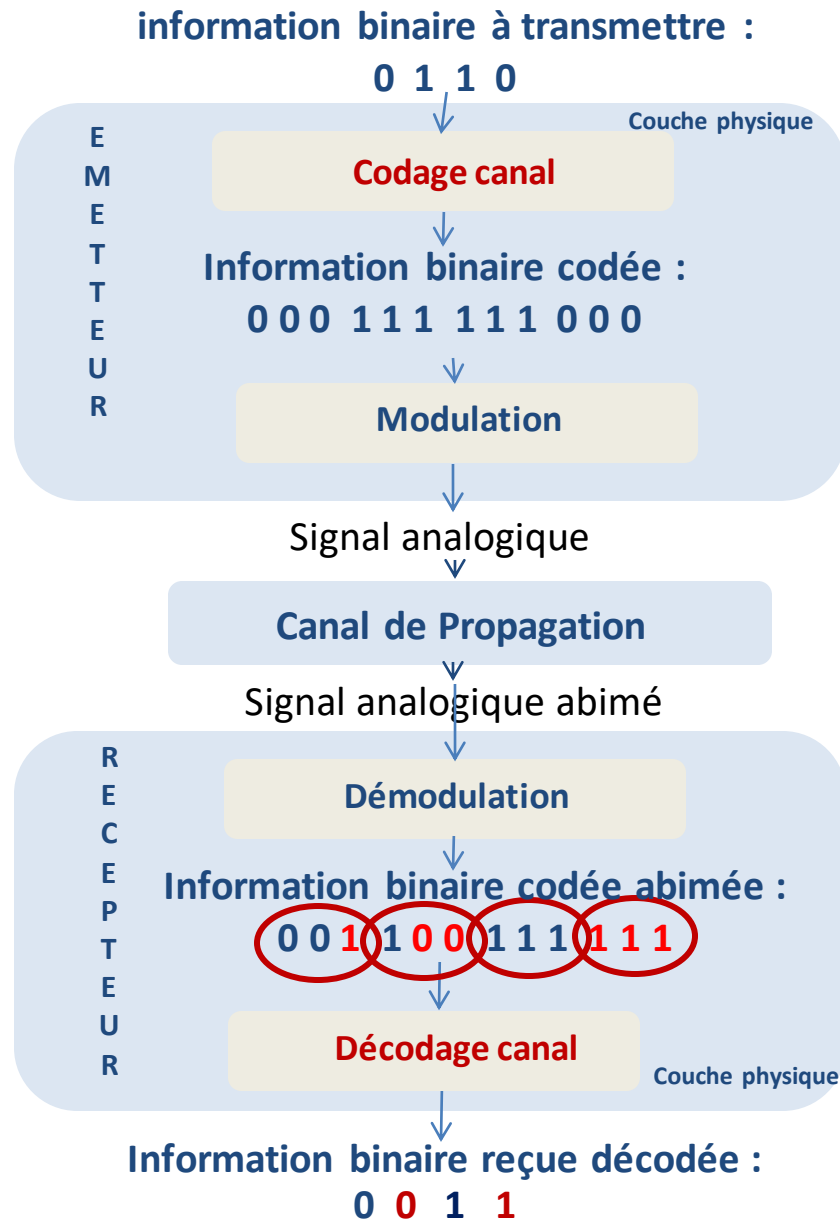
Exemple de codage canal



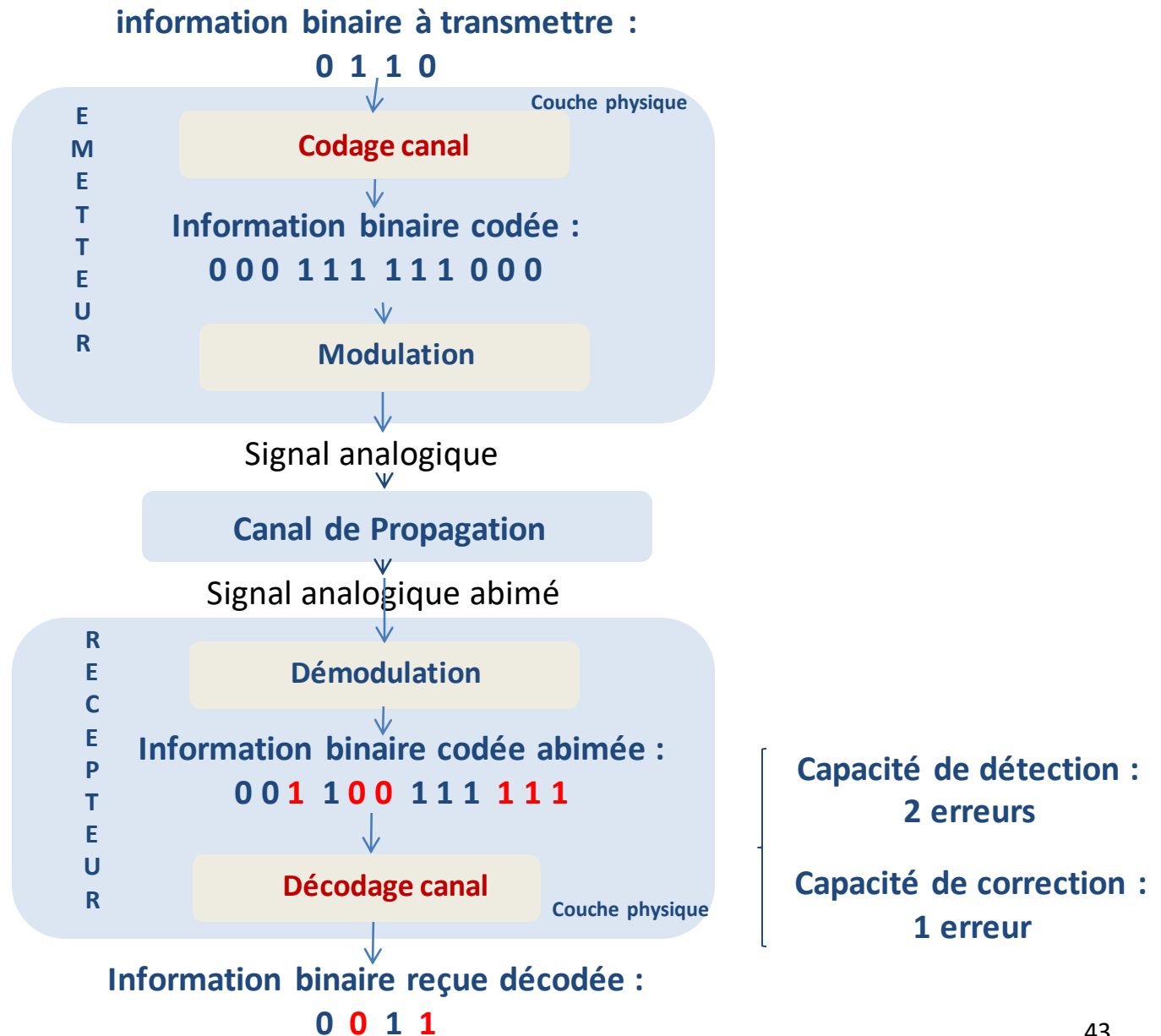
Exemple de codage canal



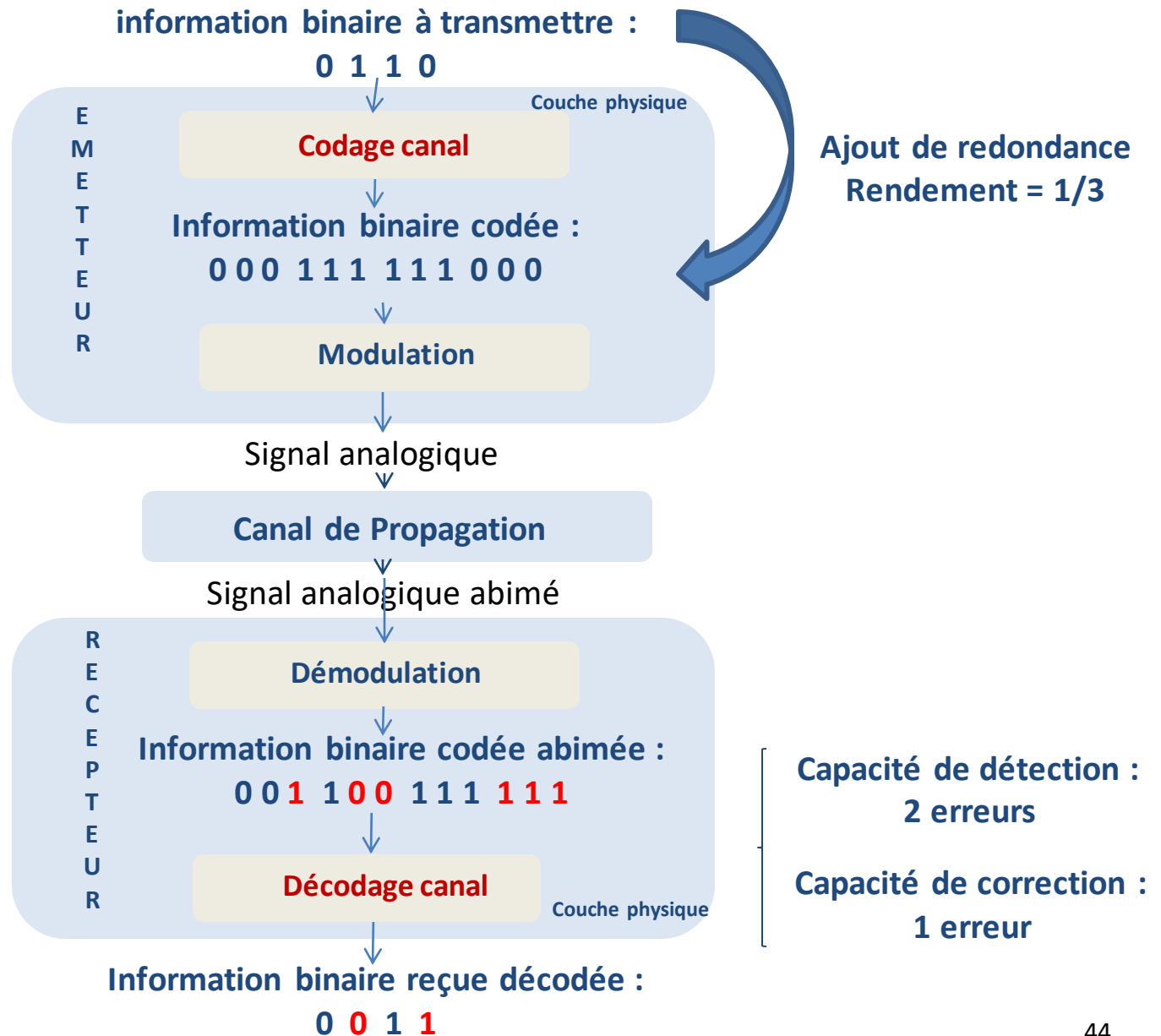
Exemple de codage canal



Exemple de codage canal

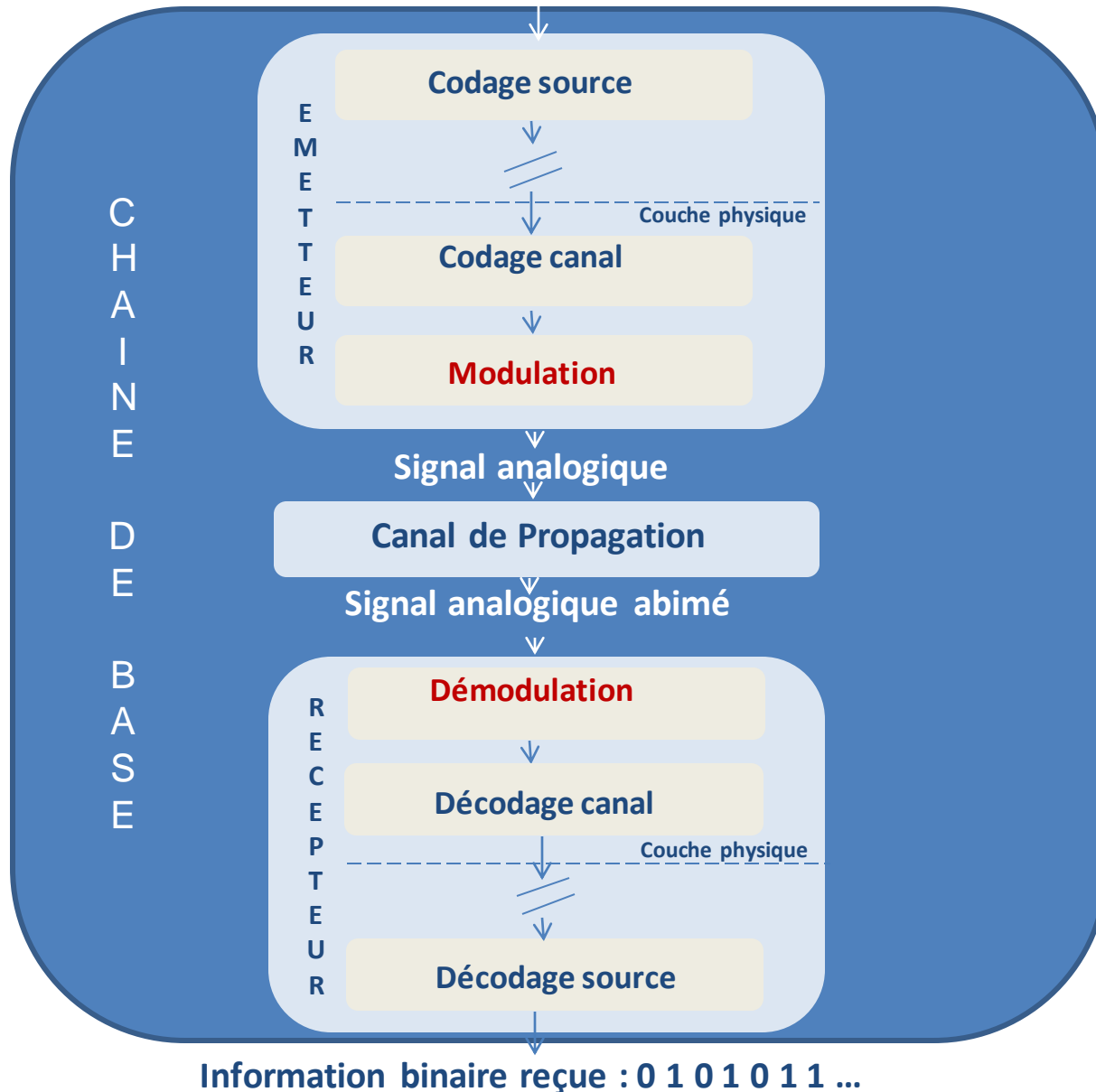


Exemple de codage canal



La modulation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



Exemple de Modulation bande de base

Information binaire à transmettre :

0 1 1 0

Codage canal

Information binaire codée :

0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0

Modulation

Signal numérique

CNA

Signal analogique

E
M
E
T
T
E
U
R

Information binaire reçue :

0 0 1 1 TEB=2/4

Décodage canal

Information binaire codée abimée :

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

Démodulation

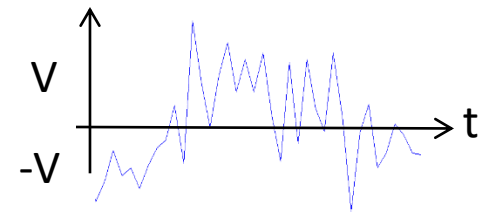
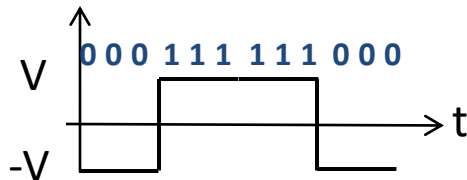
Signal numérique abimé

CAN

Signal analogique abimé

R
E
C
E
P
T
E
U
R

Exemple : signal NRZ

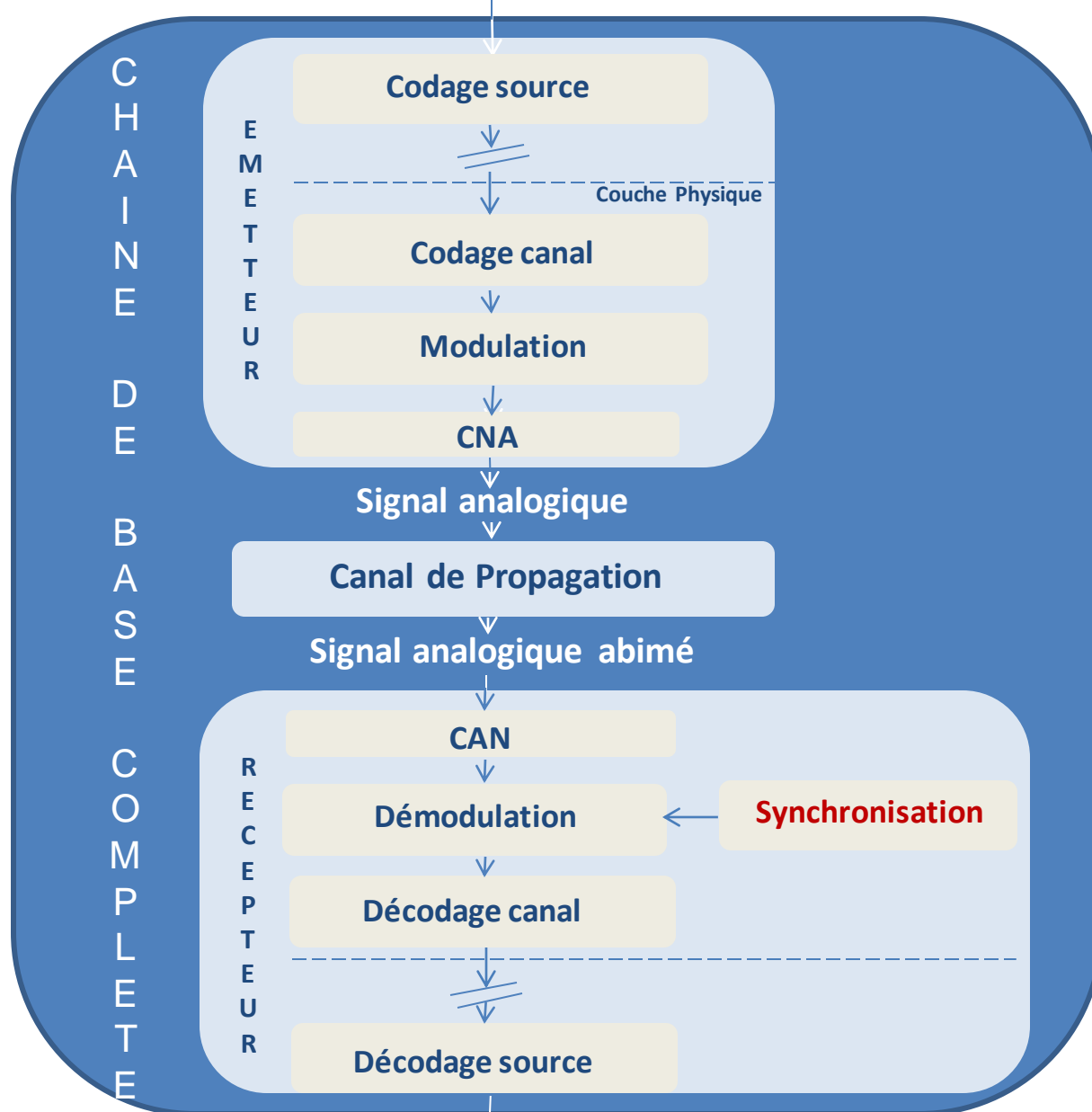


SNR=0 dB

Canal de Propagation

La synchronisation

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

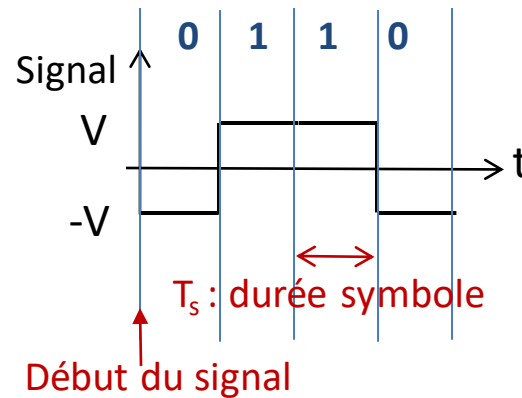


Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

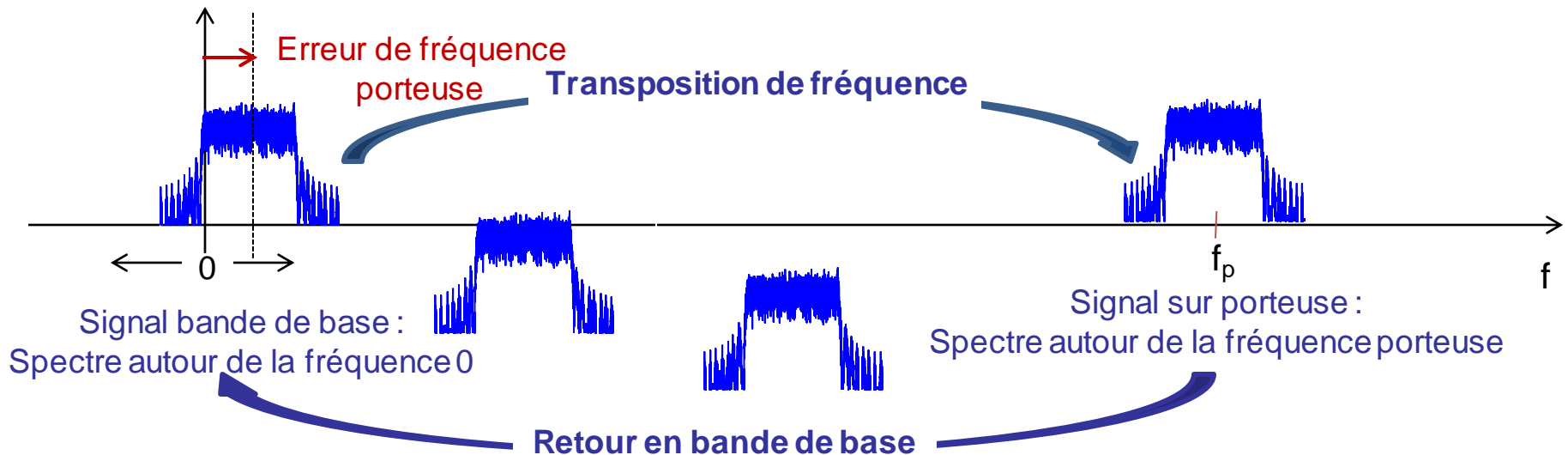
Synchronisation sur l'horloge (« en temps ») et sur la porteuse (« en fréquence »)

- Sur l'horloge

Information binaire à transmettre :



- Sur la porteuse (pour les transmissions sur fréquence porteuse)



Télécommunications

Introduction

- 1) Définitions
 - 2) Avantages/Inconvénients du numérique
 - 3) Eléments d'une chaîne de transmission
 - 4) Critères de performance
 - 5) Exemple
-

Chaine de communication numérique : efficacité spectrale

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

→ Débit binaire R_b
souhaité

C
H
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

E
M
E
T
T
E
U
R

Codage source



Couche Physique

Codage canal



Modulation



CNA

Signal émis



Canal de transmission



Signal reçu = signal émis abimé

CAN



Démodulation

Synchronisation



Décodage canal

Couche Physique



Décodage source

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

Chaîne de communication numérique : efficacité spectrale

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

Débit binaire R_b
souhaité

C
H
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

Codage source

E
M
E
T
T
E
U
R

Couche Physique

Codage canal

Modulation

CNA

Signal émis

Canal de transmission

Signal reçu = signal émis abimé

CAN

R
E
C
E
P
T
E
U
R

Démodulation

Synchronisation

Décodage canal

Couche Physique

Décodage source

Bande de transmission B
nécessaire

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

Chaîne de communication numérique : efficacité spectrale

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

Débit binaire R_b
souhaité

CH
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

E
M
E
T
T
E
U
R

Codage source



Couche Physique

Codage canal



Modulation



CNA

Signal émis

Canal de transmission

Signal reçu = signal émis abimé

CAN



Démodulation

Synchronisation



Décodage canal

Couche Physique



Décodage source

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

Bande de transmission B
nécessaire

Efficacité spectrale :
Bande B nécessaire pour passer le
débit R_b souhaité

Chaine de communication numérique : **Efficacité en puissance**

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

C
H
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

E
M
E
T
T
E
U
R

Codage source



Couche Physique

Codage canal



Modulation



CNA



Signal analogique



Canal de transmission



Signal analogique abimé



CAN



Démodulation

Synchronisation



Décodage canal

Couche Physique



Décodage source

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

Taux d'erreur binaire
(TEB) souhaité

Chaine de communication numérique : **Efficacité en puissance**

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

C
H
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

E
M
E
T
T
E
U
R

Codage source



Couche Physique

Codage canal



Modulation



CNA



Signal analogique



Canal de transmission



Signal analogique abimé

CAN



Démodulation

Synchronisation



Décodage canal

Couche Physique



Décodage source

Information binaire reçue : 0 1 **0 1** 0 1 **1** ...

SNR nécessaire
à l'entrée du récepteur

Taux d'erreur binaire
(TEB) souhaité

Chaine de communication numérique : **Efficacité en puissance**

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

CH
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

E
M
E
T
T
E
U
R

Codage source



Couche Physique

Codage canal



Modulation



CNA



Signal analogique



Canal de transmission



Signal analogique abimé

CAN



Démodulation

Synchronisation



Décodage canal

Couche Physique



Décodage source

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

SNR nécessaire
à l'entrée du récepteur

Efficacité en puissance :
SNR par bit nécessaire à l'entrée
du récepteur pour atteindre le TEB
souhaité

Taux d'erreur binaire
(TEB) souhaité

Chaine de communication numérique : **critères de performance**

Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...

Débit binaire R_b
souhaité

CH
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
E

Codage source

E
M
E
T
T
E
U
R

Couche Physique

Codage canal

Modulation

CNA

Signal analogique

Canal de transmission

Signal analogique abimé

CAN

Démodulation

Synchronisation

Décodage canal

Couche Physique

Décodage source

R
E
C
E
P
T
E
U
R

Efficacité spectrale :
Bande B nécessaire pour passer le
débit R_b souhaité

Bande de transmission B
nécessaire

SNR nécessaire
à l'entrée du récepteur

Efficacité en puissance :
SNR par bit nécessaire à l'entrée
du récepteur pour atteindre le TEB
souhaité

Taux d'erreur binaire
(TEB)

Information binaire reçue : 0 1 0 1 0 1 1 ...

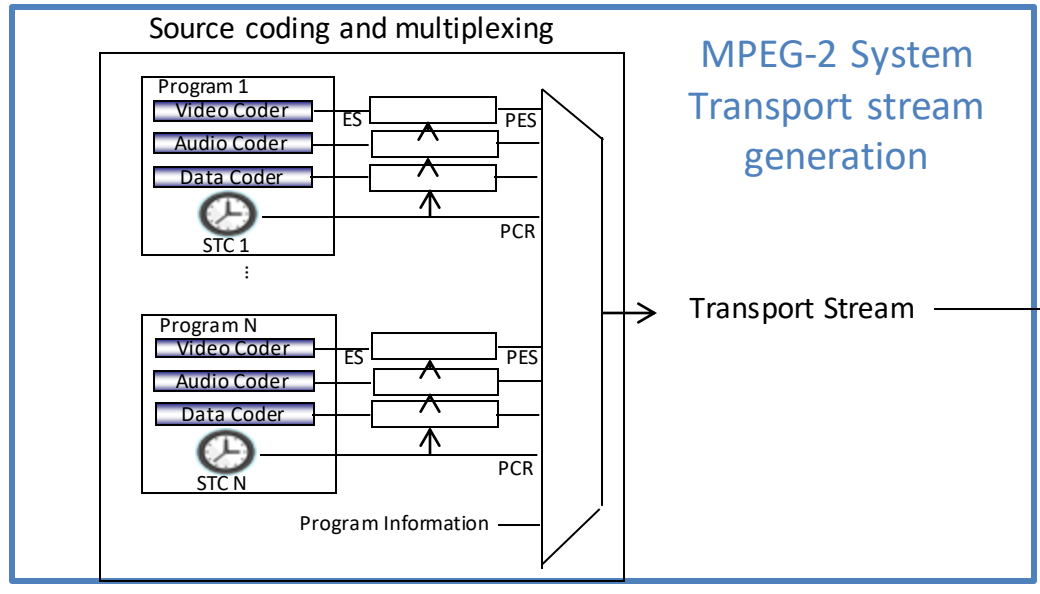
Télécommunications

Introduction

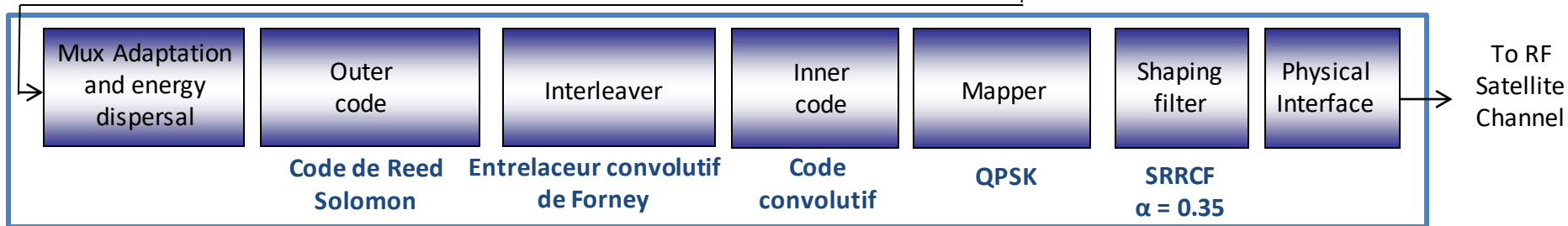
- 1) Définitions
- 2) Avantages/Inconvénients du numérique
- 3) Eléments d'une chaîne de transmission
- 4) Critères de performance
- 5) Exemple

Transmission multi média par satellite (Digital Video Broadcasting : DVB-S)

Couche Physique



Couche Physique



Codage canal

Modulation
(transmission sur fréquence porteuse)

Transmission multi média par satellite (Digital Video Broadcasting : DVB-S)

Couche Physique

Table D.1: Example of System performance over 33 MHz transponder

Bit Rate R_u (after MUX) [Mbit/s]	Bit Rate R'_u (after RS) [Mbit/s]	Symbol Rate [Mbaud]	Convolut. Inner Code Rate	RS Outer Code Rate	C/N (33 MHz) [dB]
23,754	25,776	25,776	1/2	188/204	4,1
31,672	34,368	25,776	2/3	188/204	5,8
35,631	38,664	25,776	3/4	188/204	6,8
39,590	42,960	25,776	5/6	188/204	7,8
41,570	45,108	25,776	7/8	188/204	8,4

Transmission « Quasi Error Free » (QEF) :
 $TEB < 10^{-10}$

Références

- M. Joindot, A. Glavieux, « Introduction aux communications numériques », Dunod
- J.C. Bic, D. Duponteil, J.C.Imbeaux, « Eléments de communications numériques », Dunod

- J. G. Proakis, « Digital Communications », Mac Graw Hill Book Cie
- Lindsay and Simon, « Telecommunications system engineering », Prentice Hall

- J.J. Spilker, « Digital communication by satellite », Prentice Hall
- Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services, norme ETSI EN 300 421.
- Digital Video Broadcasting (DVB): User guidelines for the second generation system for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2), norme ETSI EN 102 376.