
Introduction aux Télécommunications

Introduction

- 1) Objectifs de l'UE**
 - 2) Définitions**
 - 3) Canal de propagation : impact, modélisation**
 - 4) Éléments d'une chaîne de communication numérique**
 - 5) Critères de performance**
-

Nathalie Thomas

IRIT/ENSEEIHT
Nathalie.Thomas@enseeiht.fr

« Télécommunications »

= couche physique des systèmes de communications numériques

Objectifs :

→ Donner un premier aperçu des enjeux, problèmes à résoudre au niveau de la « couche physique » des systèmes communicants.

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.

→ Présenter les enseignements en communications numériques abordés dans les parcours de 2A liés aux systèmes de télécommunications.

Les parcours réseaux et télécom

→ **De la couche physique des systèmes de communication numériques :**

- Modélisation du canal de propagation
- Modulation/Démodulation
- Codage correcteur d'erreur (« codage canal ») et compression (« codage source »)
- Synchronisation émetteur/récepteur
- Accès multiple au canal de transmission
- Systèmes multi-antennes (MIMO)

→ **Du réseau :**

- Equipements : commutateurs, routeurs ...
- Règles (protocoles) de transmissions
- Routage des informations
- Internet et interconnexion de réseaux
- Qualité de service (QoS)

Les parcours réseaux et télécom

→ Des systèmes :

- Systèmes de communication terrestres filaires : xDSL, Ethernet, fibre optique
- Systèmes de communication terrestres sans fil et mobiles : WiFi, Bluetooth, 2G à 5G, TNT...
- Réseaux de capteurs et objets connectés (IoT et IoE) : surveillance, diagnostic, maintenance pour la santé, l'environnement, la ville, l'industrie...
- Systèmes de communications spatiales et véhiculaire (aéronautiques, drones, véhicules autonomes/connectés)

→ Des outils, de l'ingénierie :

- Mathématiques (optimisation, graphes, estimation/détection, traitement du signal, apprentissage ...)
- Informatique (Conception et programmation avancées)
- Sécurité (sécurité informatique, sécurité des réseaux)
- Architecture (récepteurs)

Exemples d'entreprises du domaine

→ Grands groupes :

- Opérateurs de télécom (Orange, Bouygues télécoms,...) et sous-traitants (Vinci Energies/Axians,...)
- Airbus (Aircraft, Defence & Space,...)
- Thales (Thales Alenia Space, Thales Comm, Thales Avionics,...) Modulation/Démodulation
- CNES
- Constructeurs (Nokia, Huawei, ...)
- Société de conseil et de service (Capgemini, Atos, Sopra Steria...)

→ PME/ETI : Forsk (projet 2A), Noveltis, Sigfox, Silicom (projet 3A)...

Ouvrages en français

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

Ouvrages en anglais

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

Exemple : le DVB-S

- 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.

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

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**

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

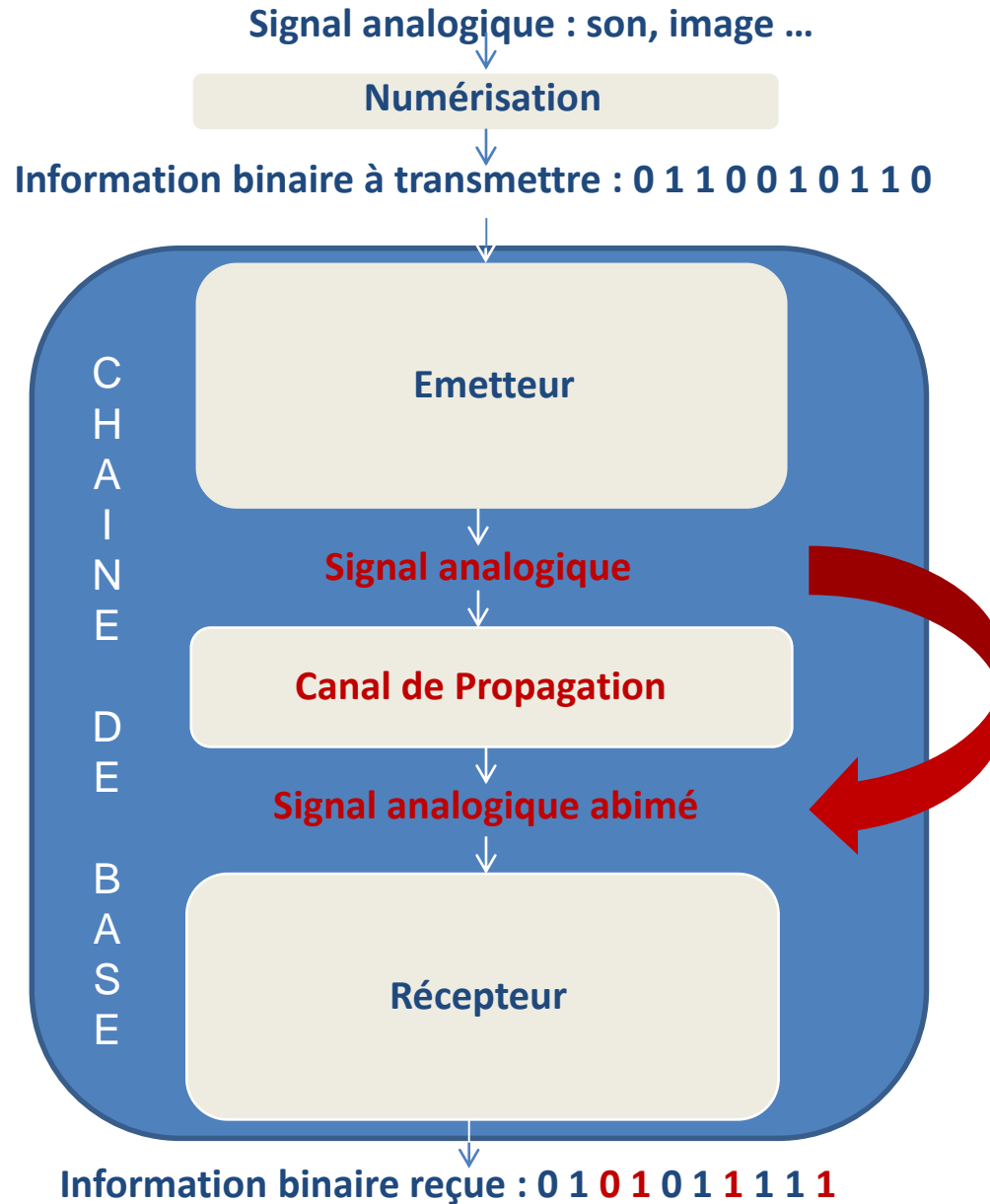
$TEB = 4/10$

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

Taux d'erreur binaire (TEB) :

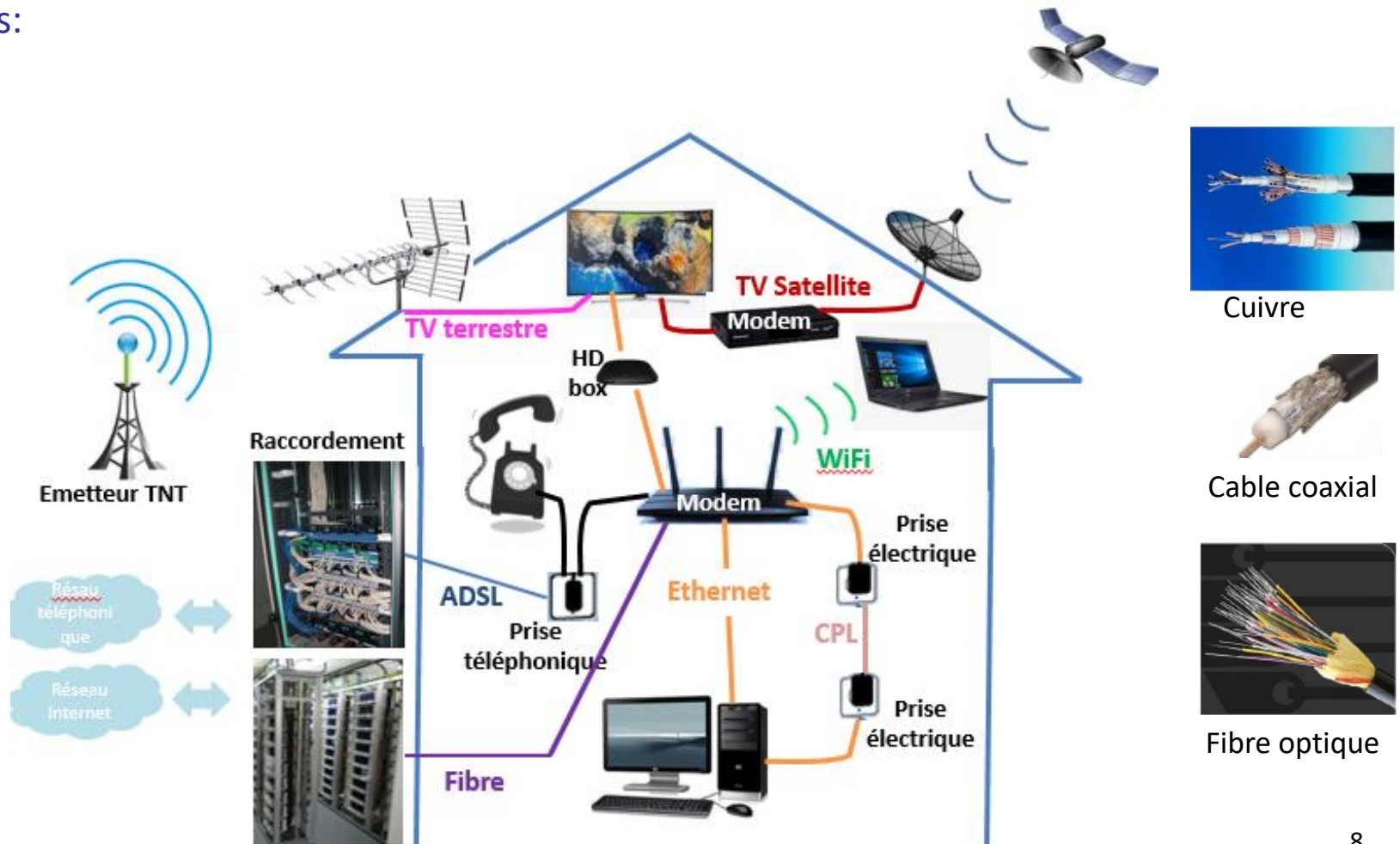
$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits reçus erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}}$$

Chaine de **communication** numérique



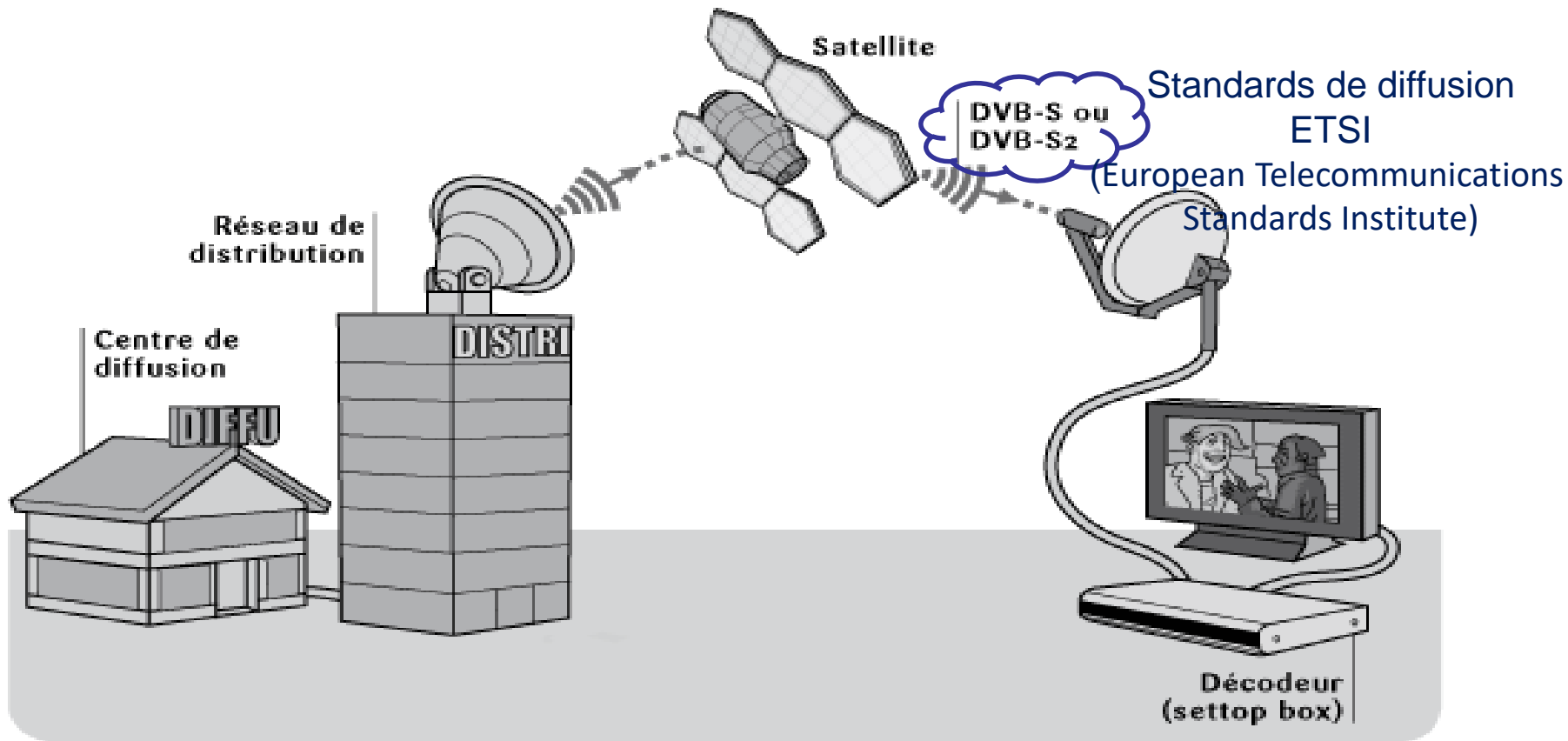
Canal de propagation

- **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 Hertziennes): frequences < 3000 GHz
- **Exemples:**



Canal de propagation

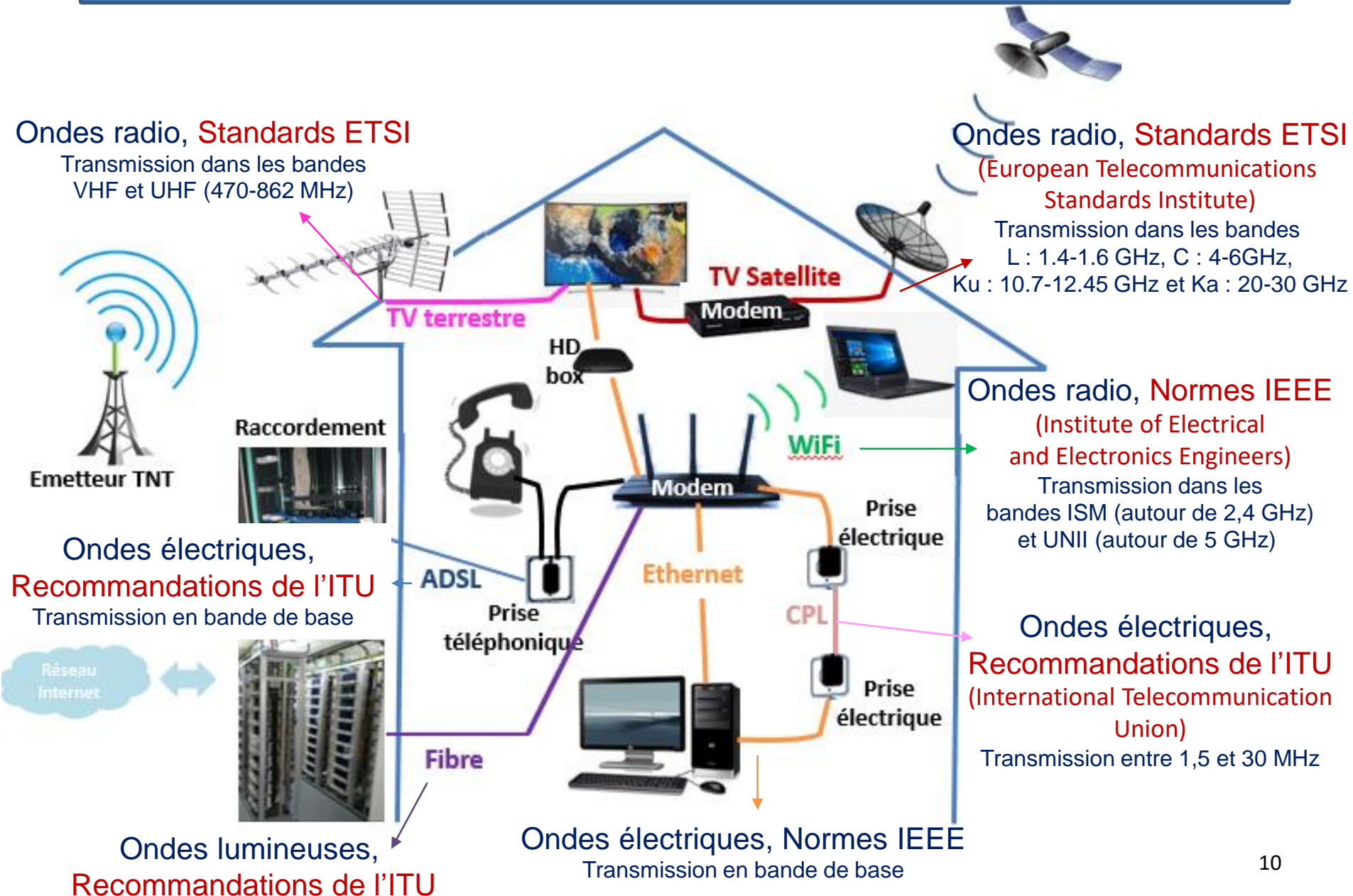
Exemple d'une liaison satellite fixe (transmission DVB-S)



- Propagation **sans fil** utilisant des **ondes radio** (ou ondes Hertzienne, fréquences inférieures à 3000 GHz),
- Bande de transmission : **L : 1.4-1.6 GHz, C : 4-6GHz, Ku : 10.7-12.45 GHz et Ka : 20-30 GHz**

Canal de propagation

Standards – recommandations - normes de télécommunications



Canal de propagation : **Distorsions/contraintes**

- **Atténuation du signal émis** : absorption, diffusion due aux gaz et aux molécules d'eau dans l'atmosphère, aux nuages, à la pluie, effet de peau dans les paires torsadées de cuivre.
- **Transmission en bande de base ou sur fréquence porteuse,**
- **Canal de propagation partagé**
 - méthodes de multiplexage, organismes de régulation
- **Bruit**
 - Bruit externe = signaux reçus en plus du signal utile.
 - Bruit interne = dispositifs électroniques dans le récepteur.
- **Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur**
 - canal non sélectif ou sélectif en fréquence,
- **Bande passante limitée.**
- **Communication fixe ou mobile**
 - canal stationnaire ou non stationnaire (sélectivité temporelle)

Canal de propagation

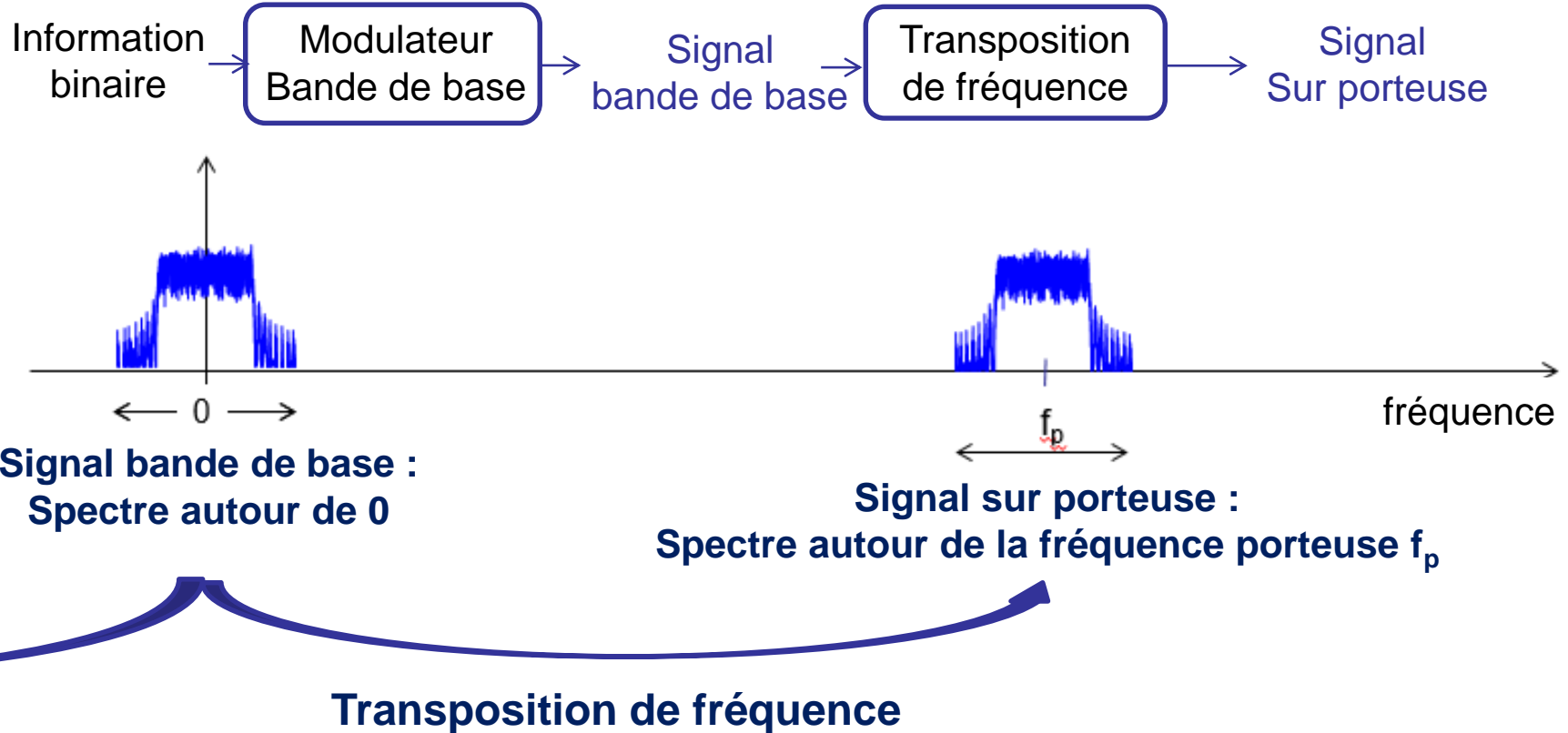
Exemple d'une liaison satellite fixe (transmission DVB-S)

Effet de l'atténuation par absorption, diffusion due aux gaz atmosphériques, aux nuages, à la pluie.



Canal de propagation

Transmission en bande de base ou sur 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

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

Exemples :

- en France : ARCEP (Autorité de Régulation des Communications Electroniques), ANRT (Agence Nationale de Régulation des Fréquences), CSA (Conseil Supérieur de l'Audiovisuel)
- Aux Etats-Unis : FCC (Federal Communications Commission)
- Au Japon : MIC (Ministry of Internal Affairs and Communications)

- Collaborations entre états

Exemples :

- ORECE : Organe des Régulateurs Européens des Communications Electroniques
- NARUC : National Association of Regulatory Utility Commissioners (regulators of individual states) aux Etats-Unis
- ARTAC : Association des Régulateurs de Télécommunications de l'Afrique Centrale

- Au niveau mondial : Union Internationale des Télécommunications (UIT ou ITU)

- 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

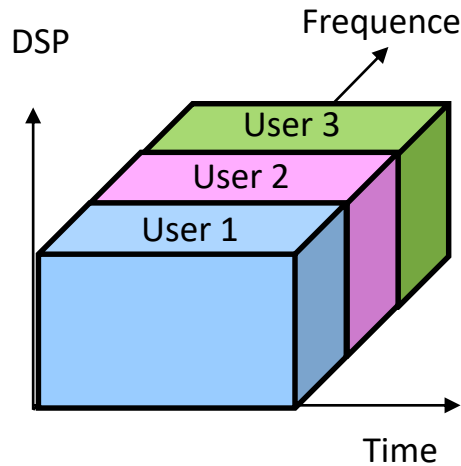
⁽¹⁾ : Technologies de l'Information et de la Communication (télécommunications, internet, informatique, industrie de l'audiovisuel)

Canal de propagation partagé : **Méthodes de multiplexage**

→ Exemples

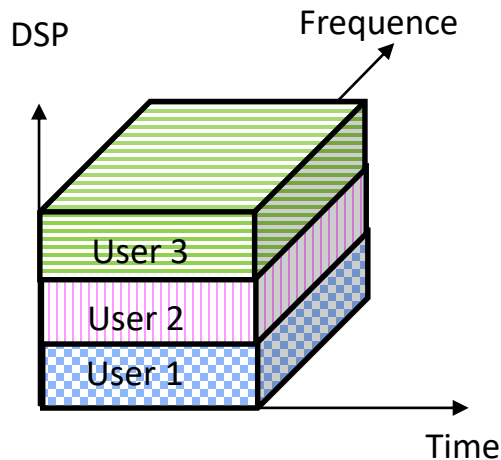
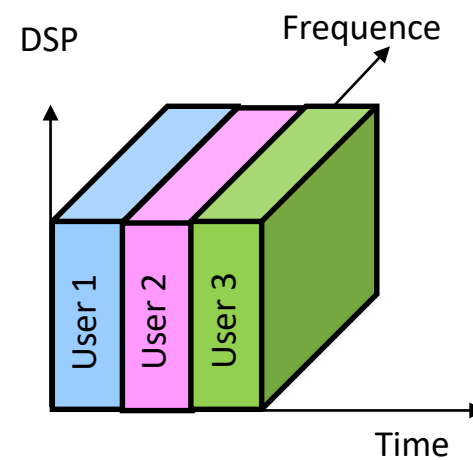
FDM

(Frequency Division Multiplexing)



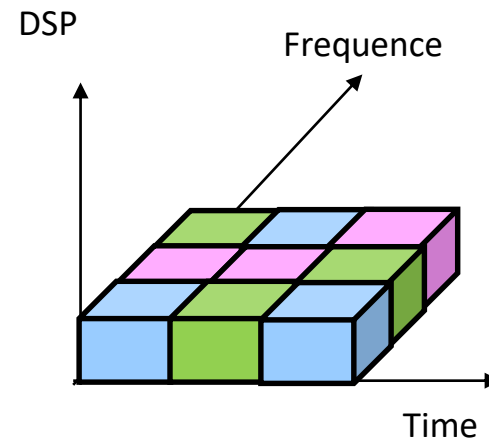
TDM

(Time Division Multiplexing)



CDM

(Code Division Multiplexing)



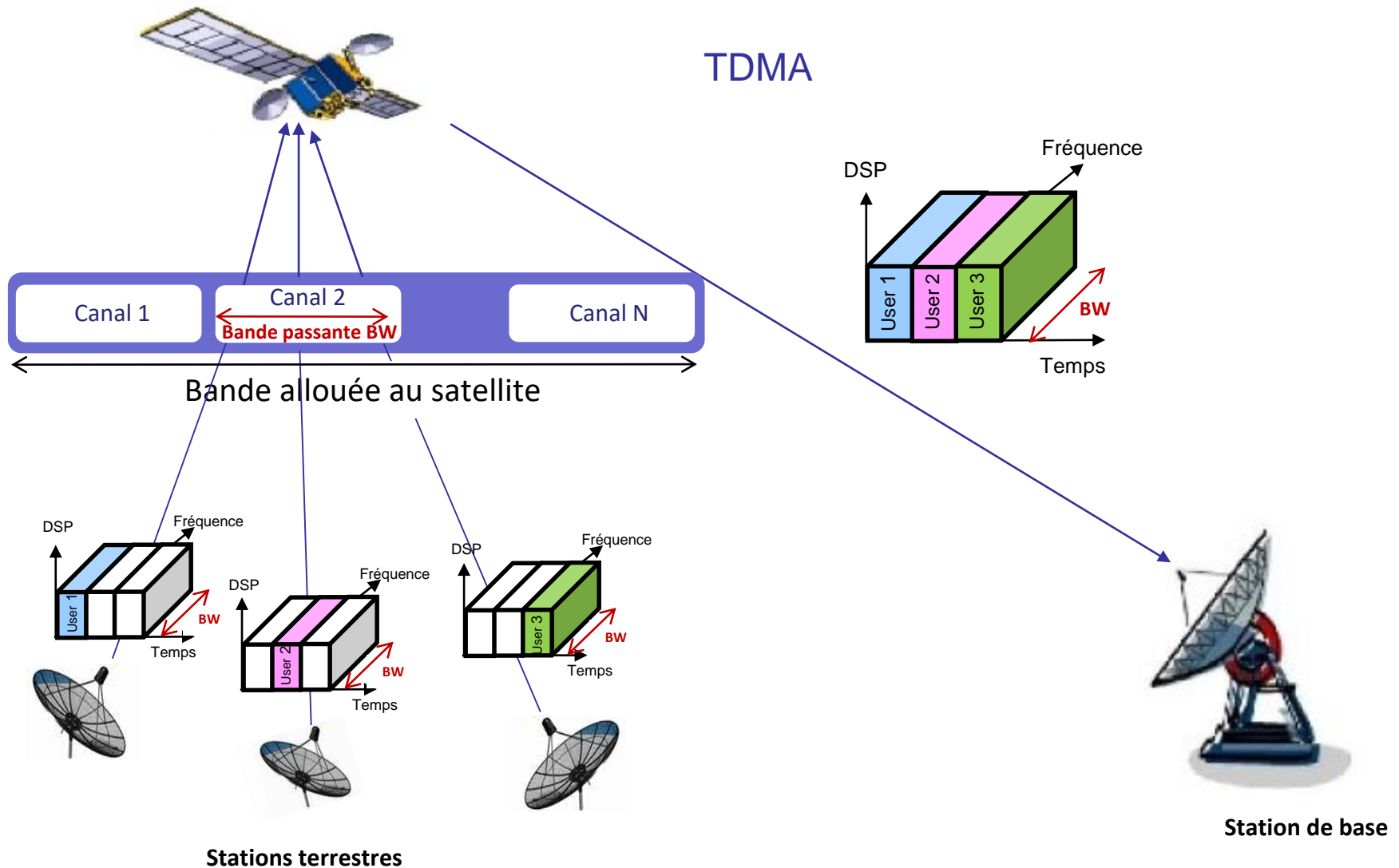
MF-TDM

(Multi Frequency - Time Division Multiplexing) 15

Canal de propagation partagé

Exemple d'une liaison satellite fixe

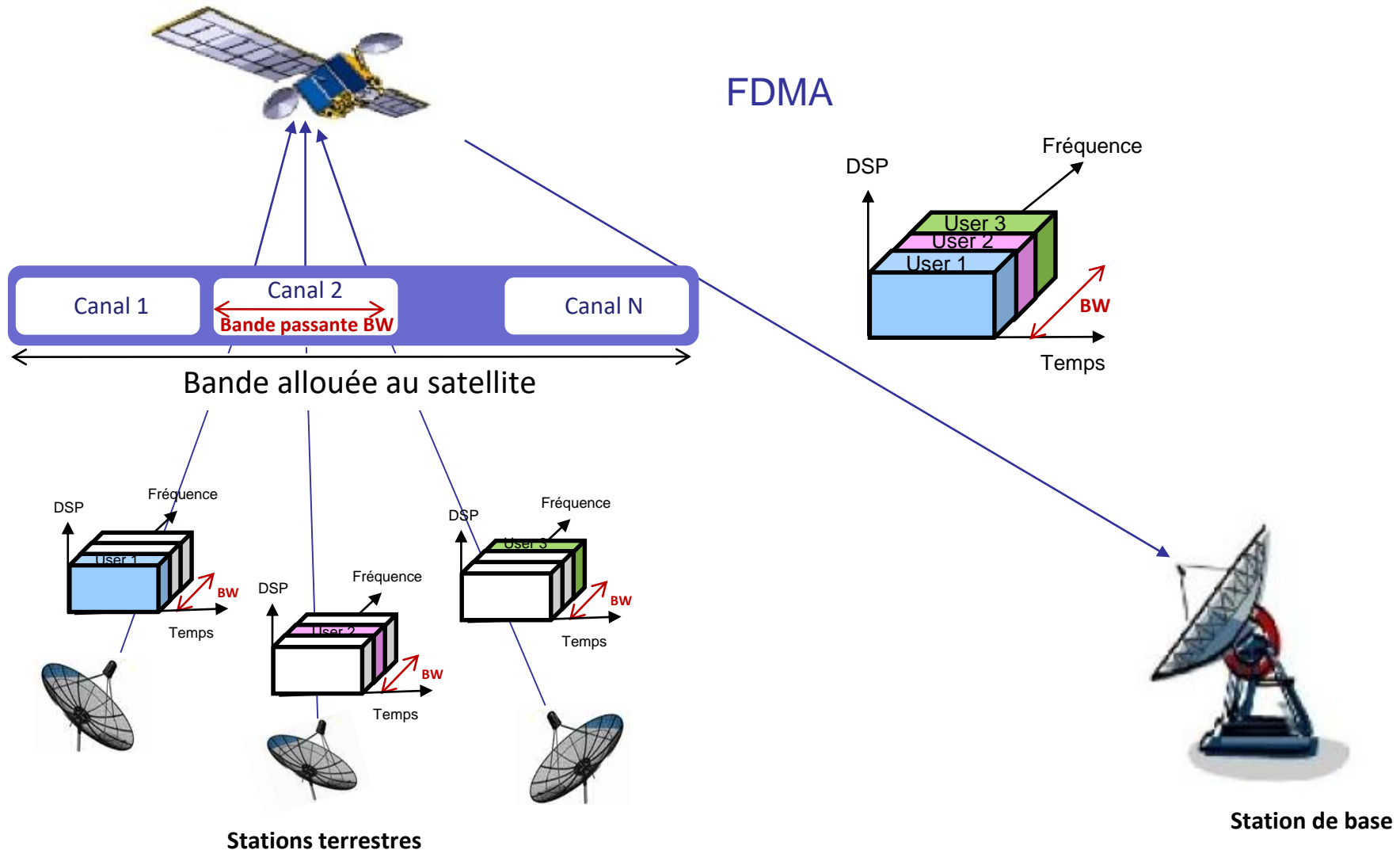
- Régulation globale des fréquences : Union Internationale des Télécommunication (UIT)
- Méthodes de multiplexage couramment utilisées : TDMA, FDMA et MF-TDMA



Canal de propagation partagé

Exemple d'une liaison satellite fixe

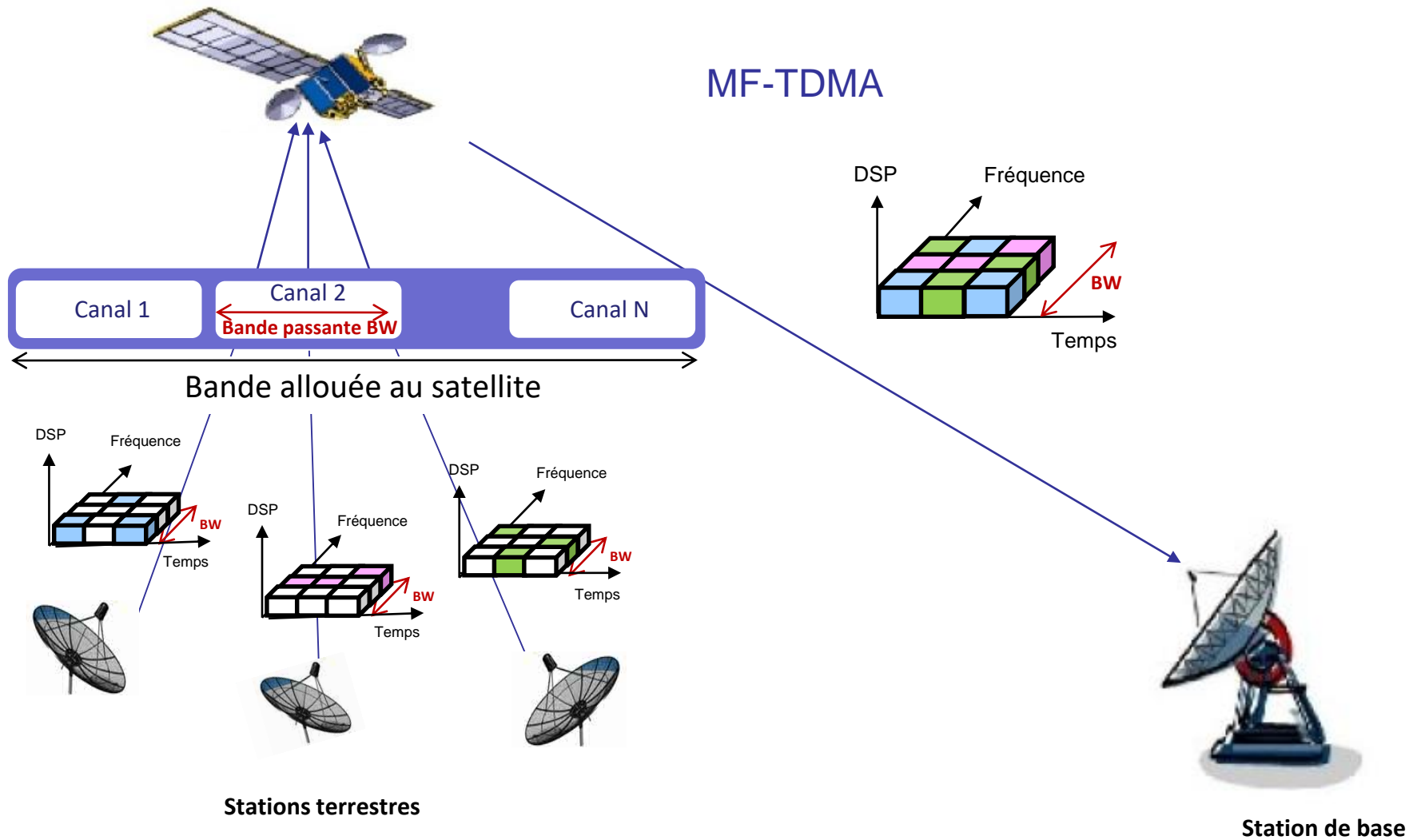
- Régulation globale des fréquences : Union Internationale des Télécommunication (UIT)
- Méthodes de multiplexage couramment utilisées : TDMA, FDMA et MF-TDMA



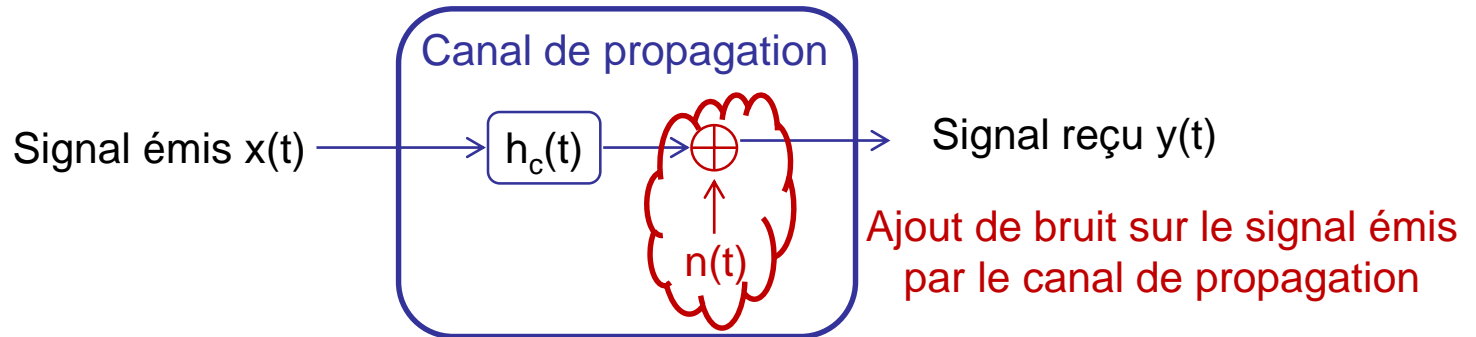
Canal de propagation partagé

Exemple d'une liaison satellite fixe

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



Canal de propagation : **Bruit additif**



- Caractéristiques du bruit ajouté :

→ 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)

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log \frac{P_{\text{signal utile}}}{P_{\text{bruit}}}$$

Canal de propagation

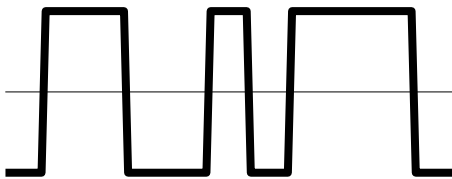
Exemple d'une liaison satellite fixe

→ Bruit additif :

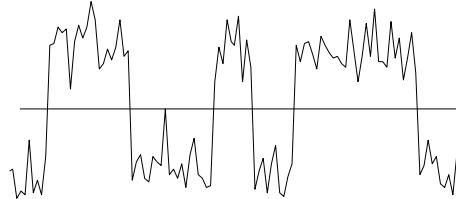
- Autres signaux reçus par l'antenne en plus du signal utile :
 - Venant de sources naturelles : atmosphère (orage, foudre, tonnerre), terre, ciel (soleil, voie lactée)
 - Venant de sources artificielles : activité humaine.
- Dispositifs électroniques dans le récepteur : amplificateurs, antennes, etc.

→ Exemples d'imperfections introduites

Signal transmis de type NRZ



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



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

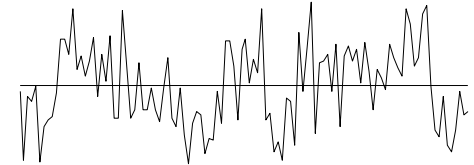


Image transmise

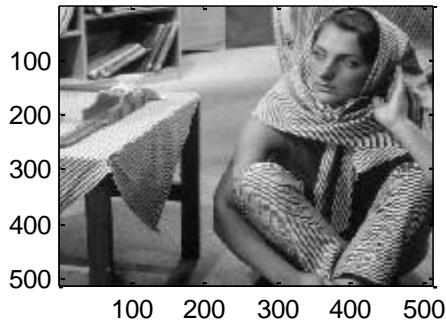


Image reçue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \text{ dB}$

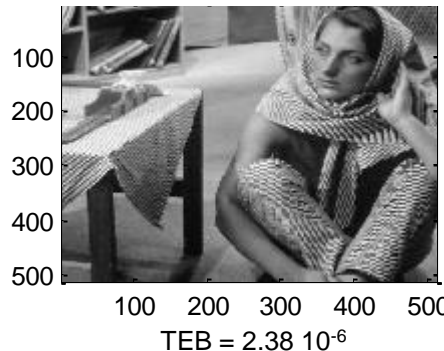
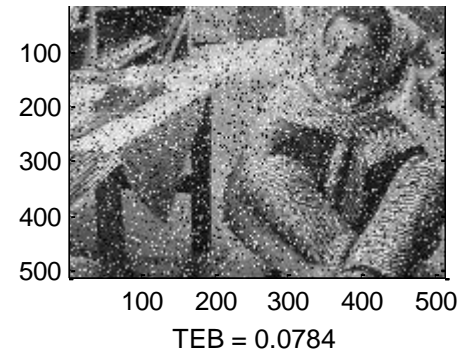


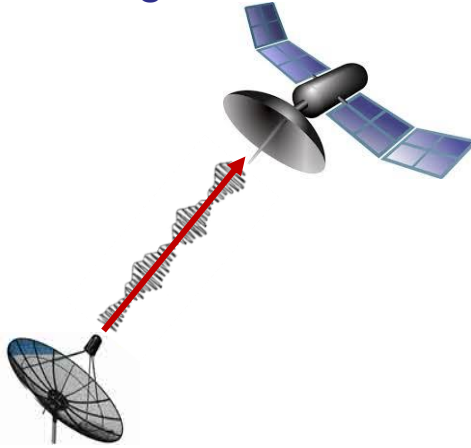
Image reçue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 0 \text{ dB}$



Canal de propagation

Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

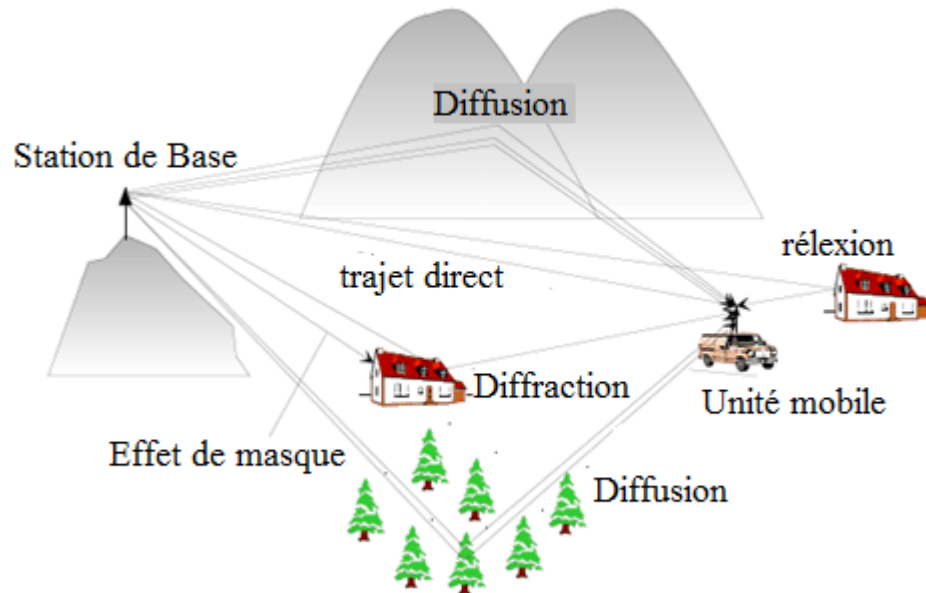
- Seulement la ligne de vue directe entre émetteur et récepteur (un seul trajet)



Atténuation et retard introduits par le canal

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

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



Plusieurs atténuations et retards introduits par le canal

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

Canal de propagation

Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

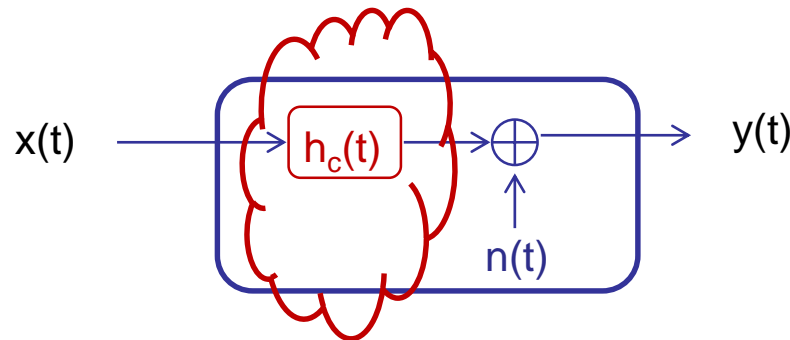
- Seulement la ligne de vue directe entre émetteur et récepteur

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

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

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

- Modélisation du canal de propagation

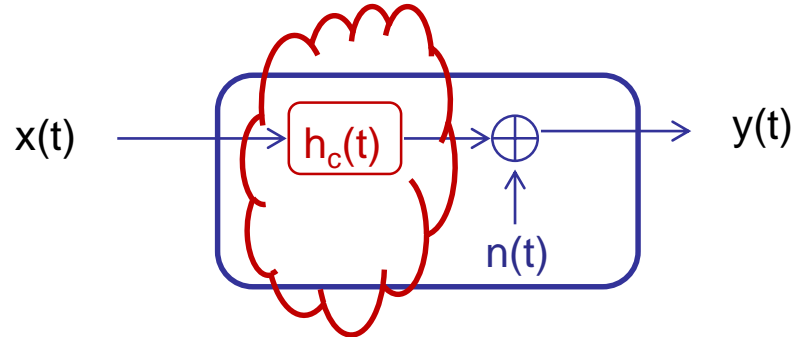


Filtrage du signal émis
par le canal de propagation

Canal de propagation

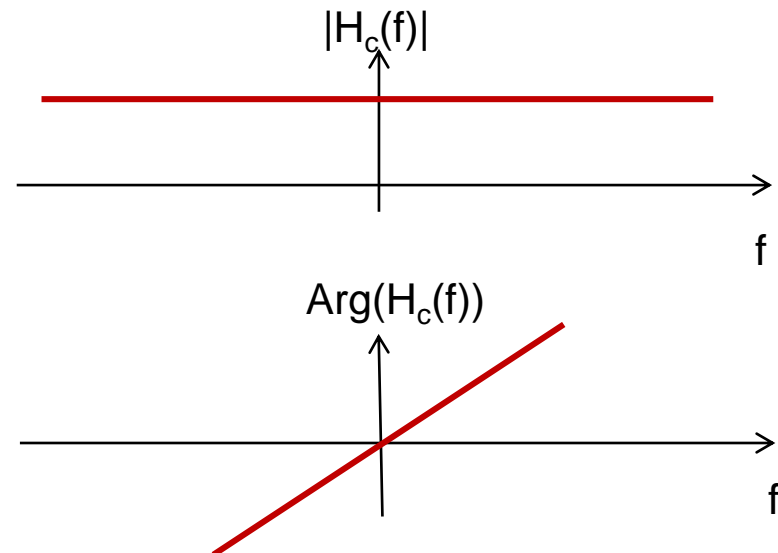
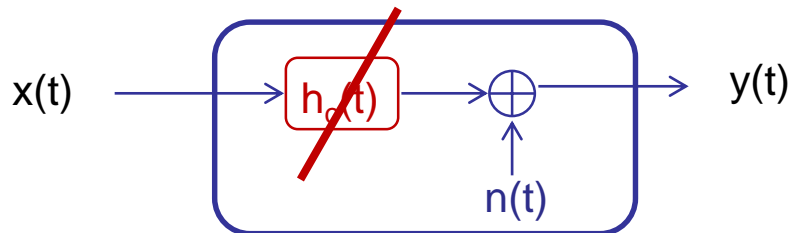
Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

- Modélisation du canal de propagation



Filtrage du signal émis
par le canal de propagation

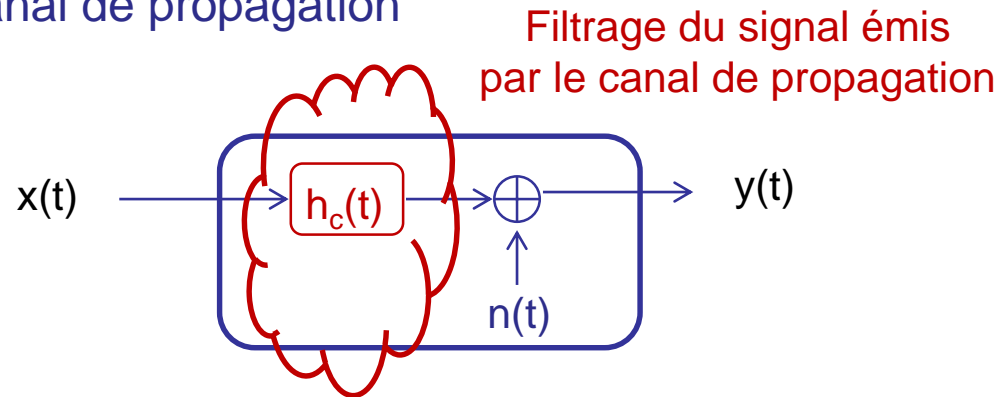
- Canal AWGN (Additive White Gaussian Noise)



Canal de propagation

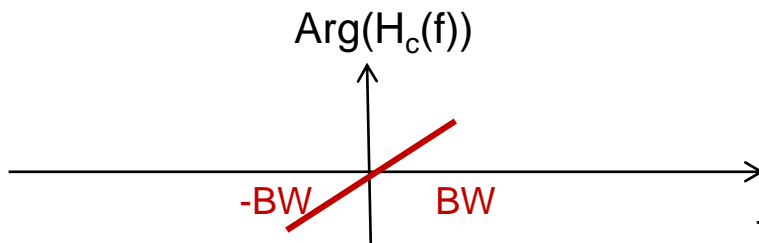
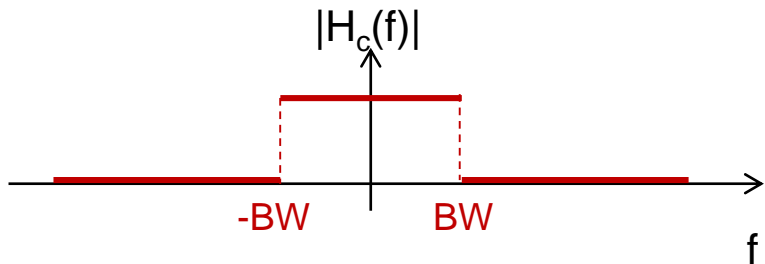
Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

- Modélisation du canal de propagation

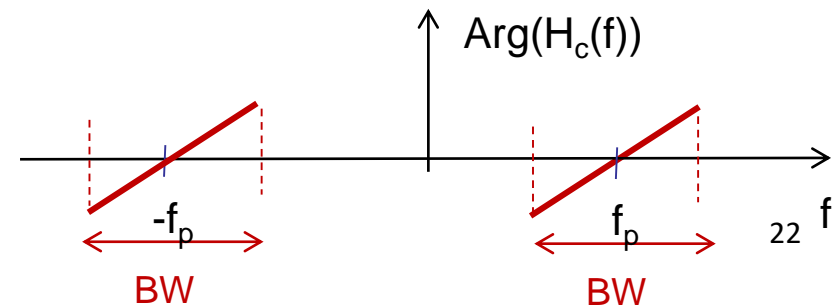
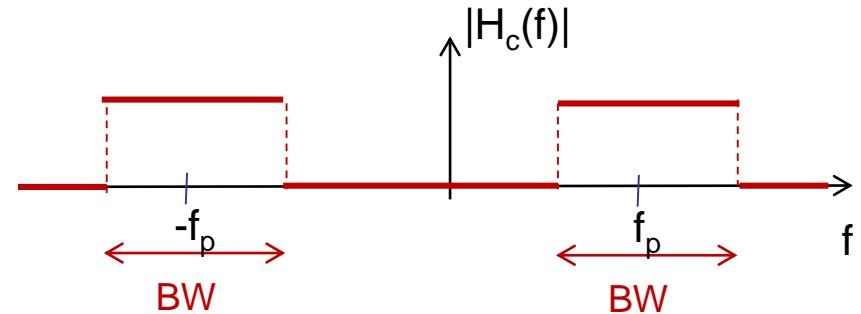


- Canal AWGN à bande passante limitée BW

Transmission en bande de base :

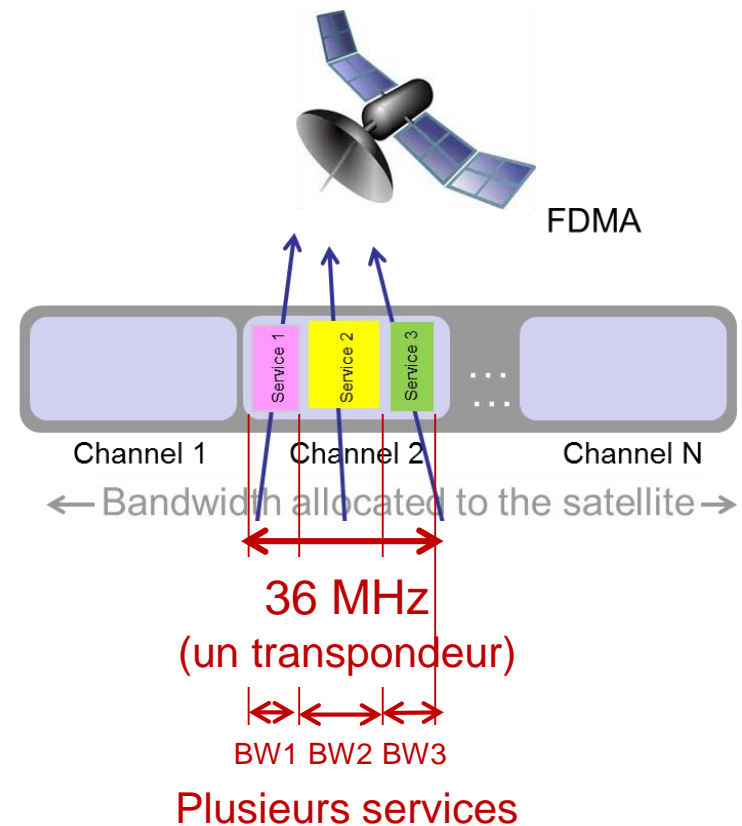
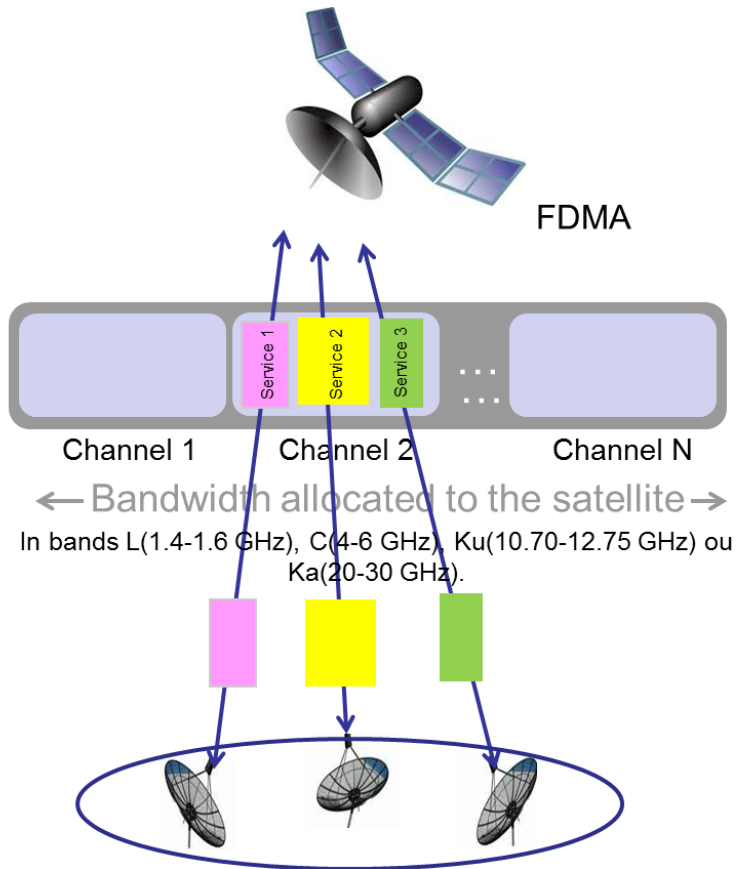


Transmission sur porteuse :



Canal de propagation

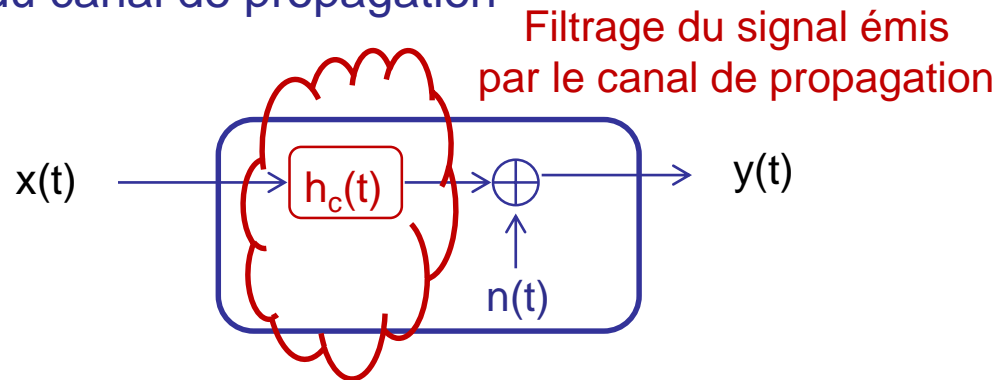
Exemple de canal AWGN à bande limitée : liaison satellite fixe (DVB-S)



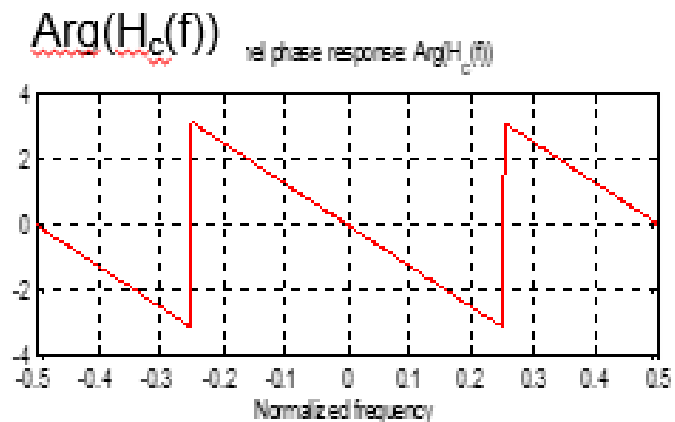
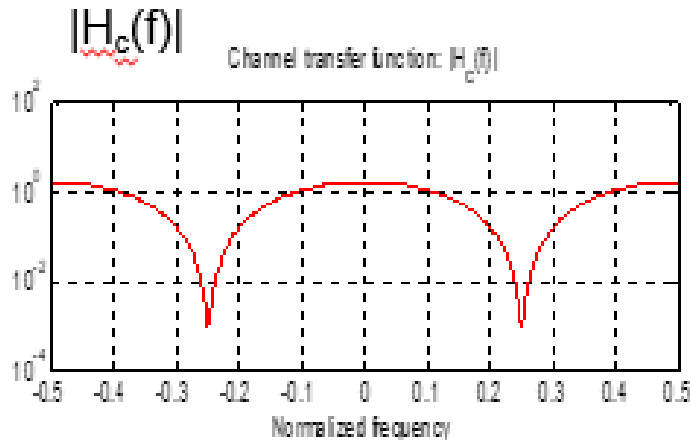
Canal de propagation

Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

- Modélisation du canal de propagation



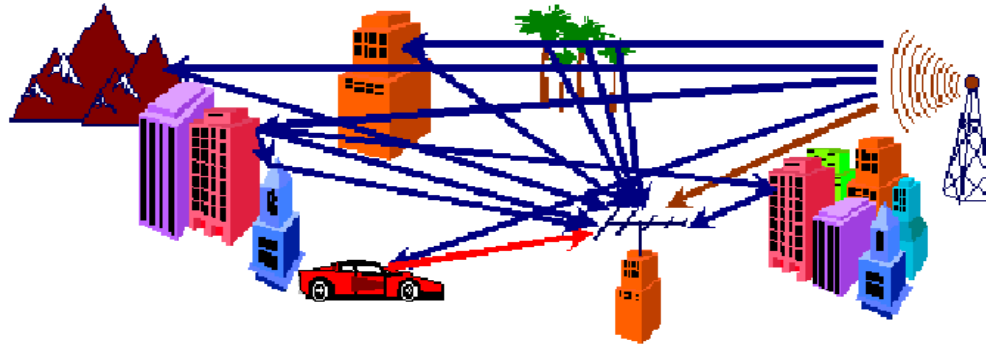
- Canal sélectif en fréquence



→ Notion de « bande de cohérence du canal » : bande de fréquence maximale sur laquelle le canal peut être considéré comme « plat »

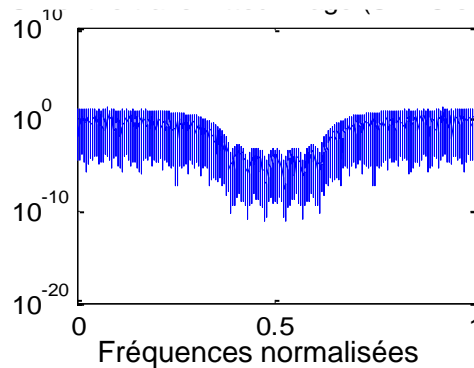
Canal de propagation

Exemple de canal sélectif en fréquence : transmission TNT (DVB-T)



- Exemple de distorsions introduites par un canal sélectif en fréquence

DSP du signal émis :



DSP du signal reçu :

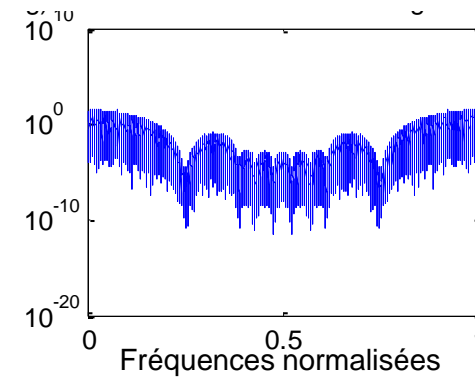


Image transmise :

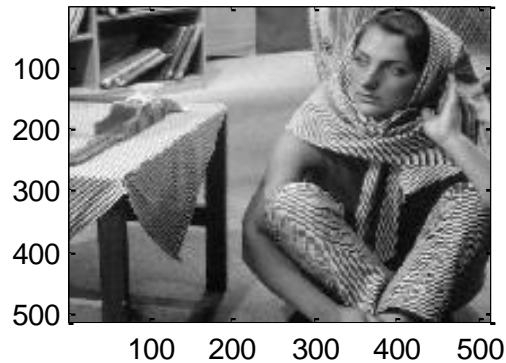
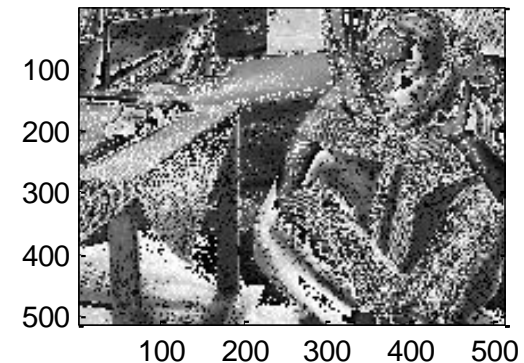


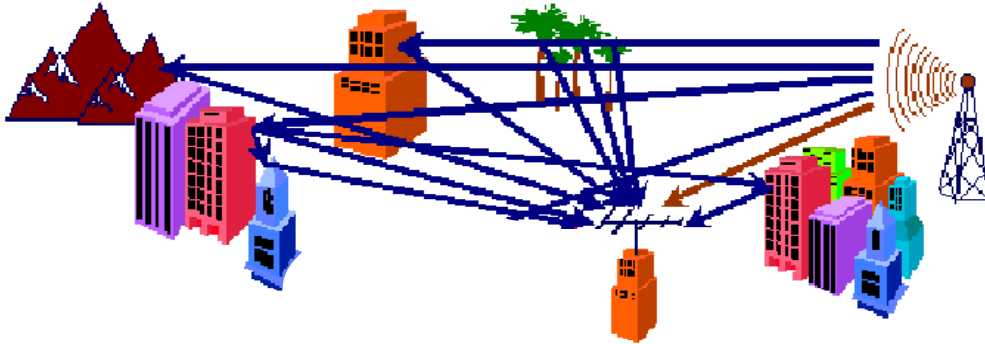
Image reçue



Canal de propagation

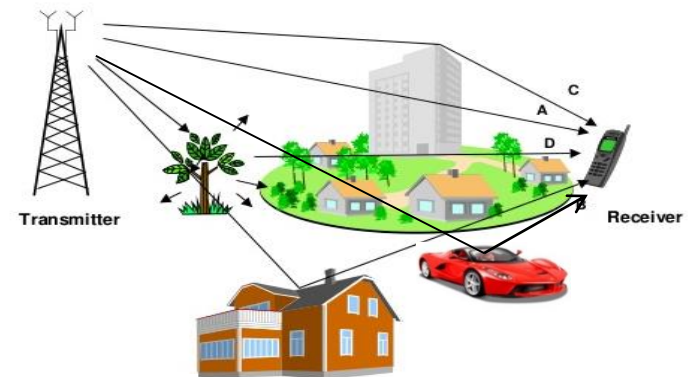
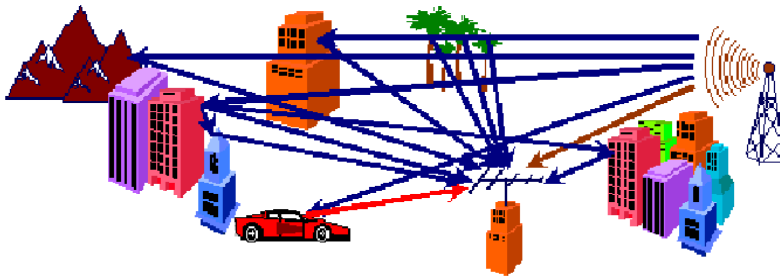
Communication fixe ou mobile

- Communication fixe



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

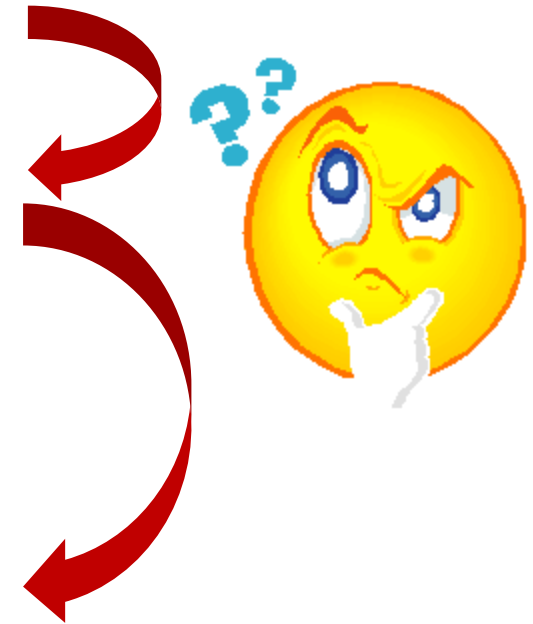
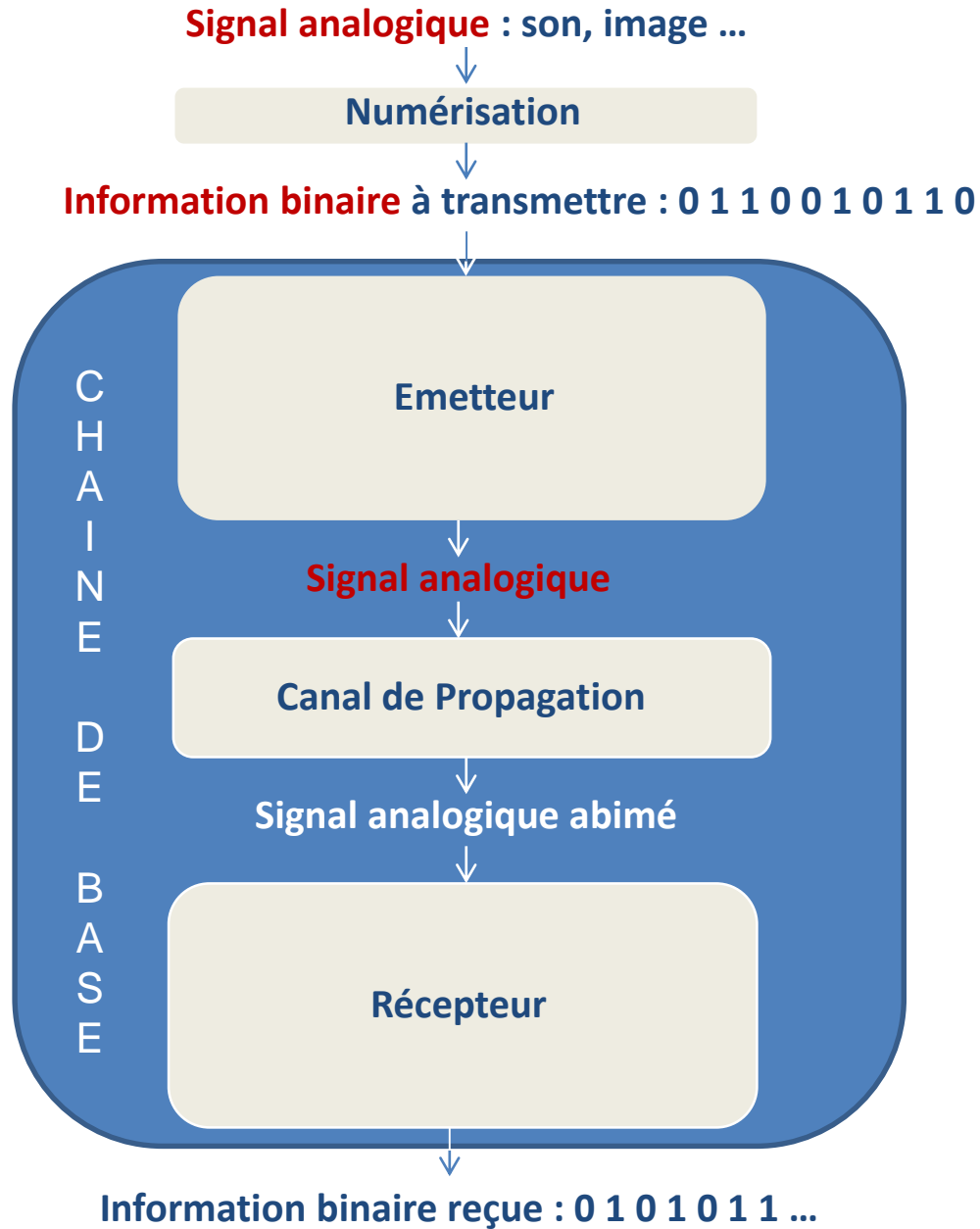
- Communication mobile



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

→ Notion de « temps de cohérence du canal » : durée sur laquelle la réponse impulsionnelle du canal peut être considérée comme invariante (canal stationnaire)

Chaine de communication numérique



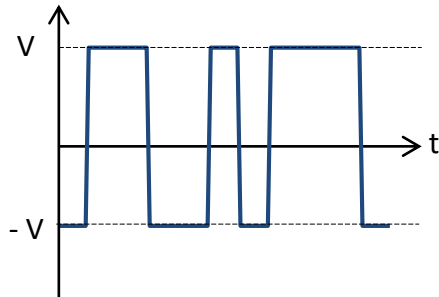
Chaîne de communication numérique

Signal analogique : son, image ...

Numérisation

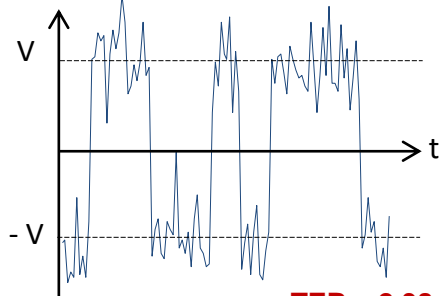
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0

Exemple :
Signal analogique :



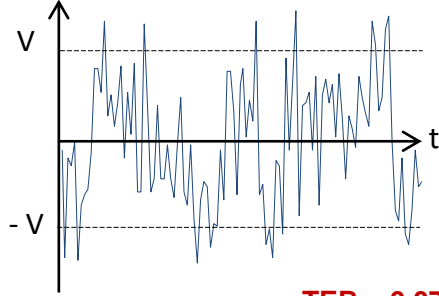
Signal analogique bruité :

SNR = 10 dB :

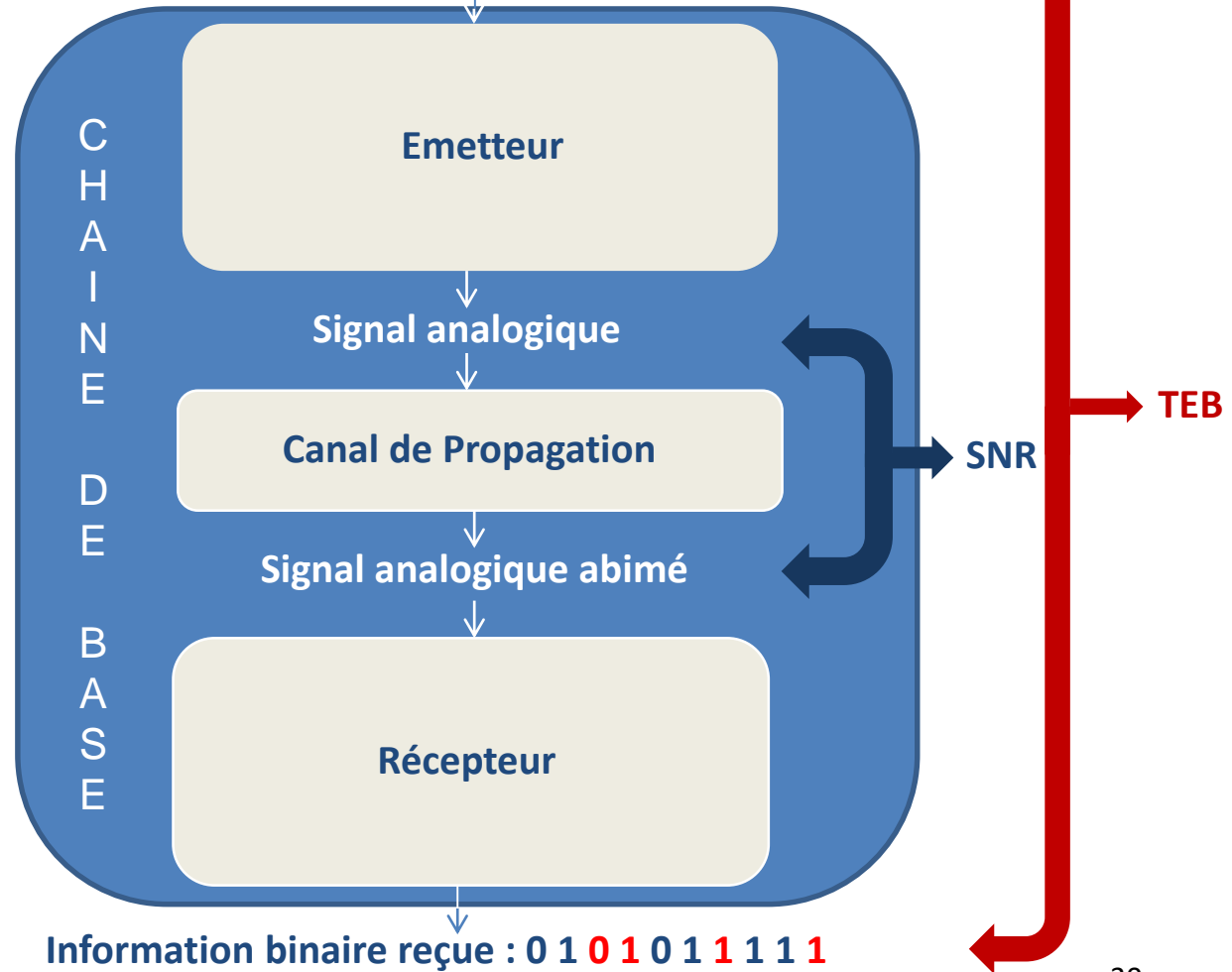


$TEB = 2.38 \cdot 10^{-6}$

SNR = 0 dB :



$TEB = 0.0784$



Chaîne de communication numérique

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 :

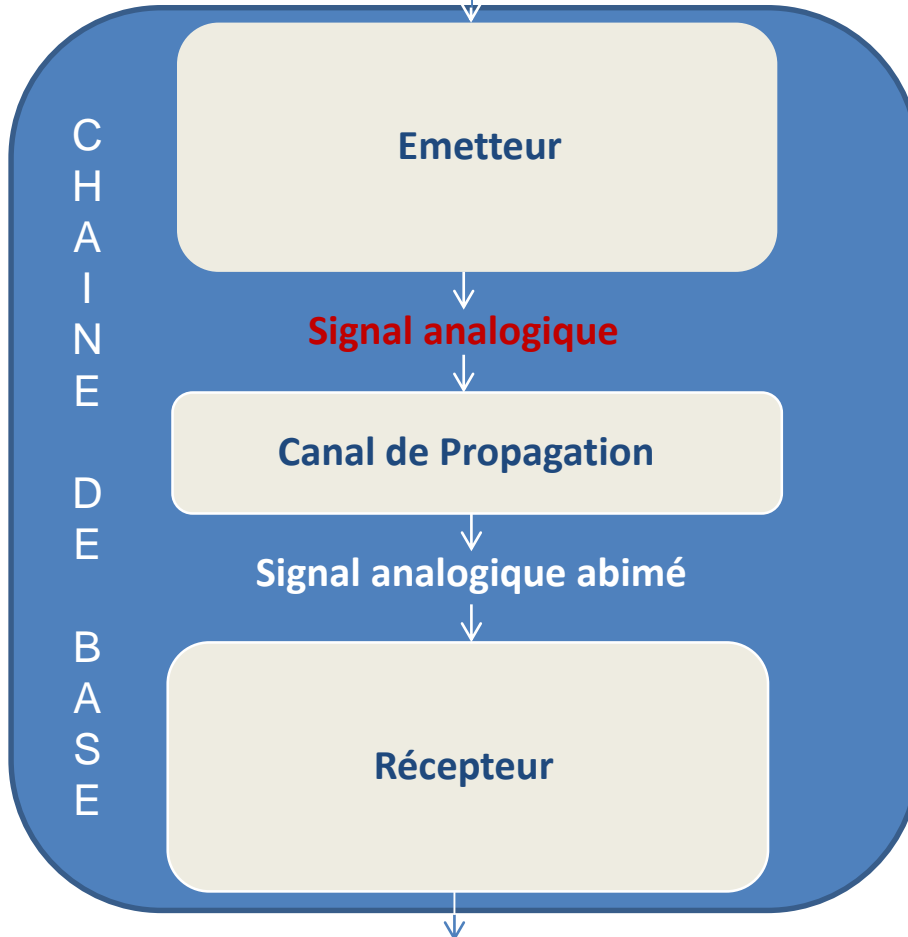
Le critère de qualité d'une transmission numérique est le taux d'erreur binaire, qui peut être très bas même en présence de bruit sur le canal. Bien sûr le taux d'erreur binaire est fonction du SNR.

Chaîne de communication numérique

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 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 :

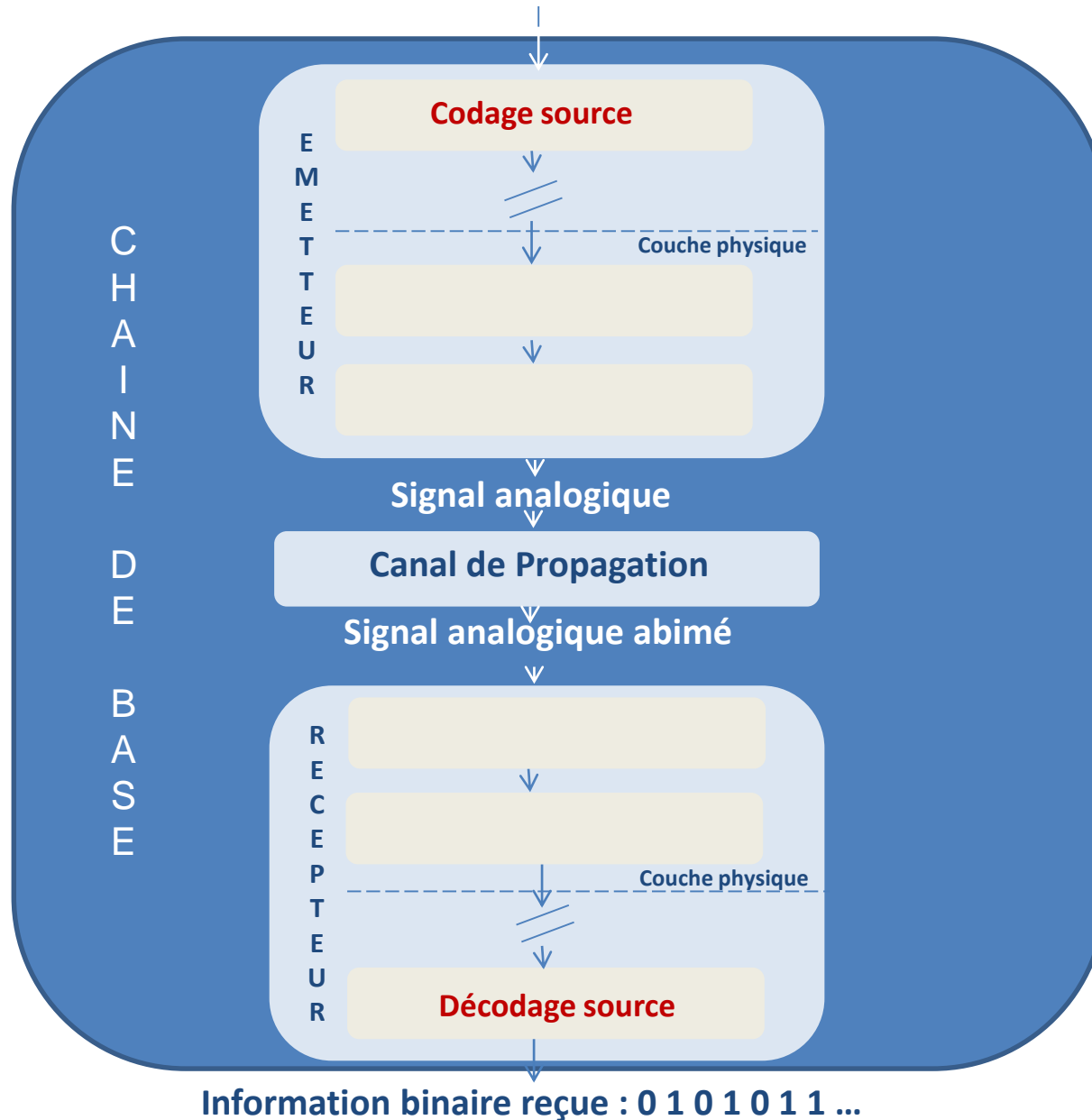
$$B_{\text{analogique}} = 3.1 \text{ kHz}$$

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

Heureusement il y a le codage source !

Chaîne de communication numérique : **codage source**

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



Exemple de codage source : codage de Huffman

Message à transmettre : EMMENE MOI A LA MER

Codage binaire naturel :

9 caractères différents = > 4 bits par caractère ($2^4=16$)

E	M	Espace	A	N	I	O	R	L
4/19	4/19	4/19	2/19	1/19	1/19	1/19	1/19	1/19
0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000

$19 \times 4 = 76$ bits à envoyer, exemple avec une transmission 2G (9,6 kbps) : 0,79 ms

Codage plus intelligent (Huffman) :

E	M	Espace	A	N	I	O	R	L
4/19	4/19	4/19	2/19	1/19	1/19	1/19	1/19	1/19
01	10	11	0000	0011	00100	00101	00010	00011

$12 \times 2 + 3 \times 4 + 4 \times 5 = 56$ bits à envoyer, exemple avec une transmission 2G (9,6 kbps) : 0,58 ms

Gain : 26,32 %

Chaîne de communication numérique

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 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

Heureusement il y a le codage source !

Chaine de communication numérique

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 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.

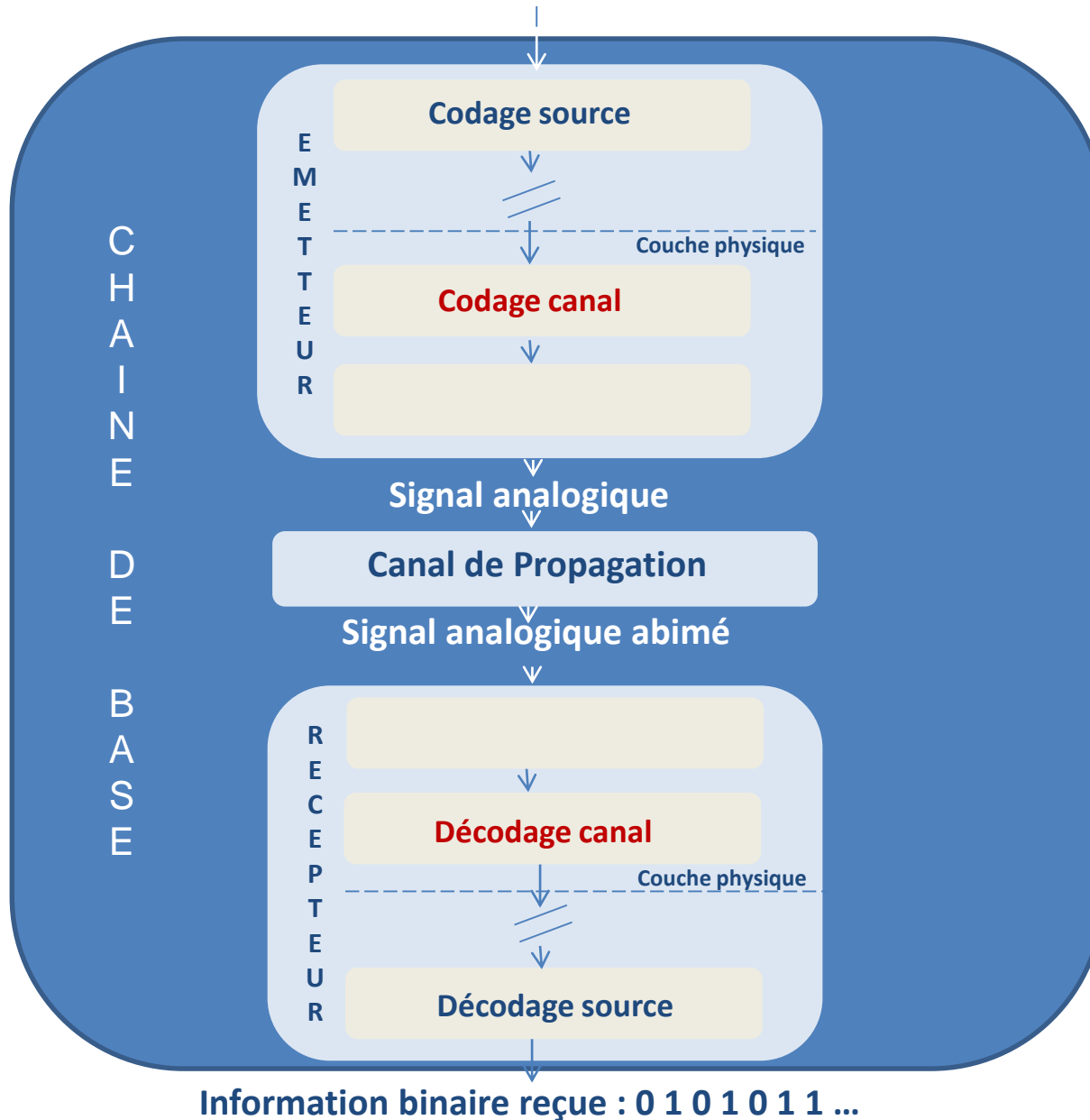


Prix à payer : la bande occupée augmente lorsqu'on numérise les signaux

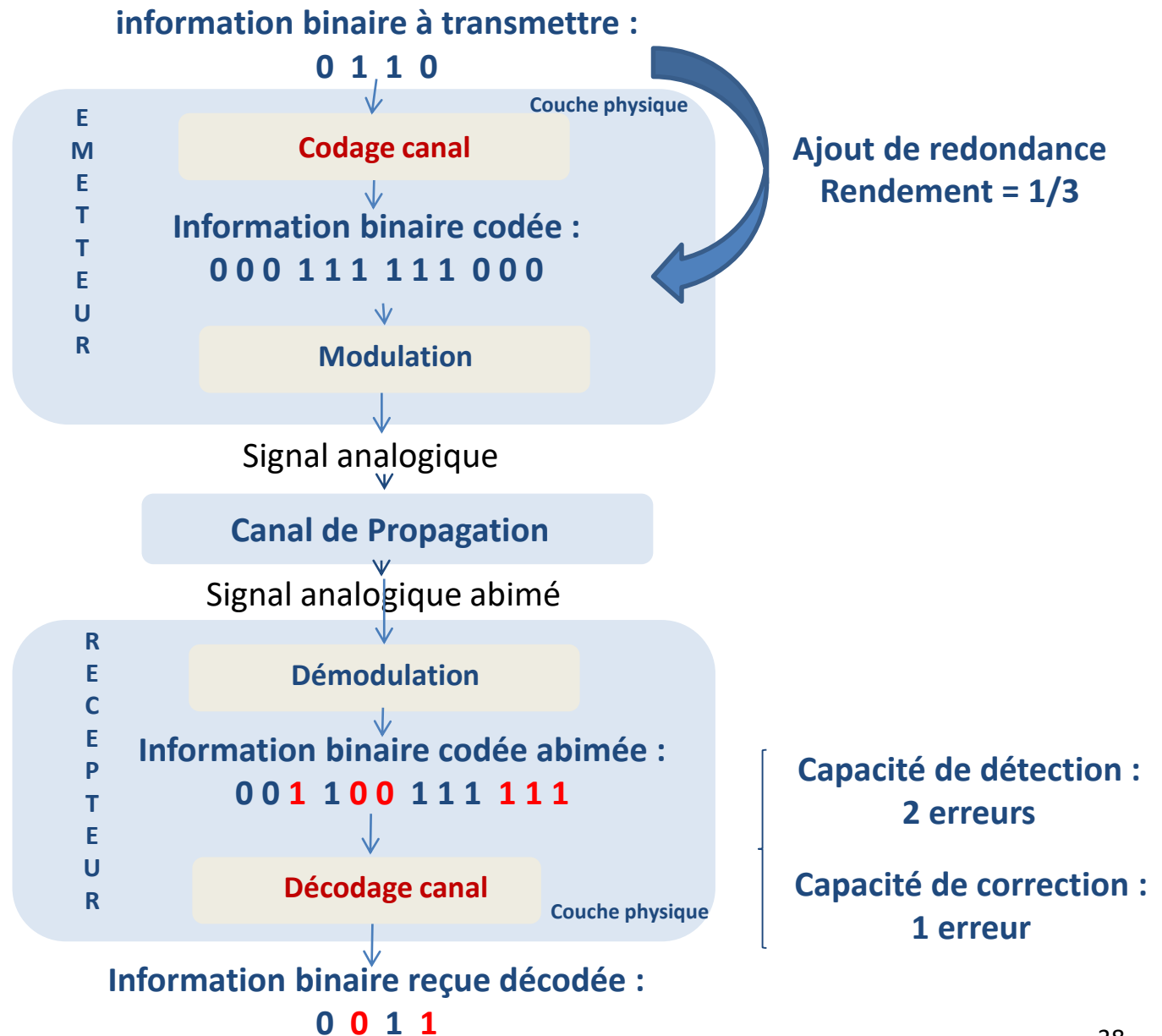
Heureusement il y a le codage source !

Chaine de communication numérique : **codage canal**

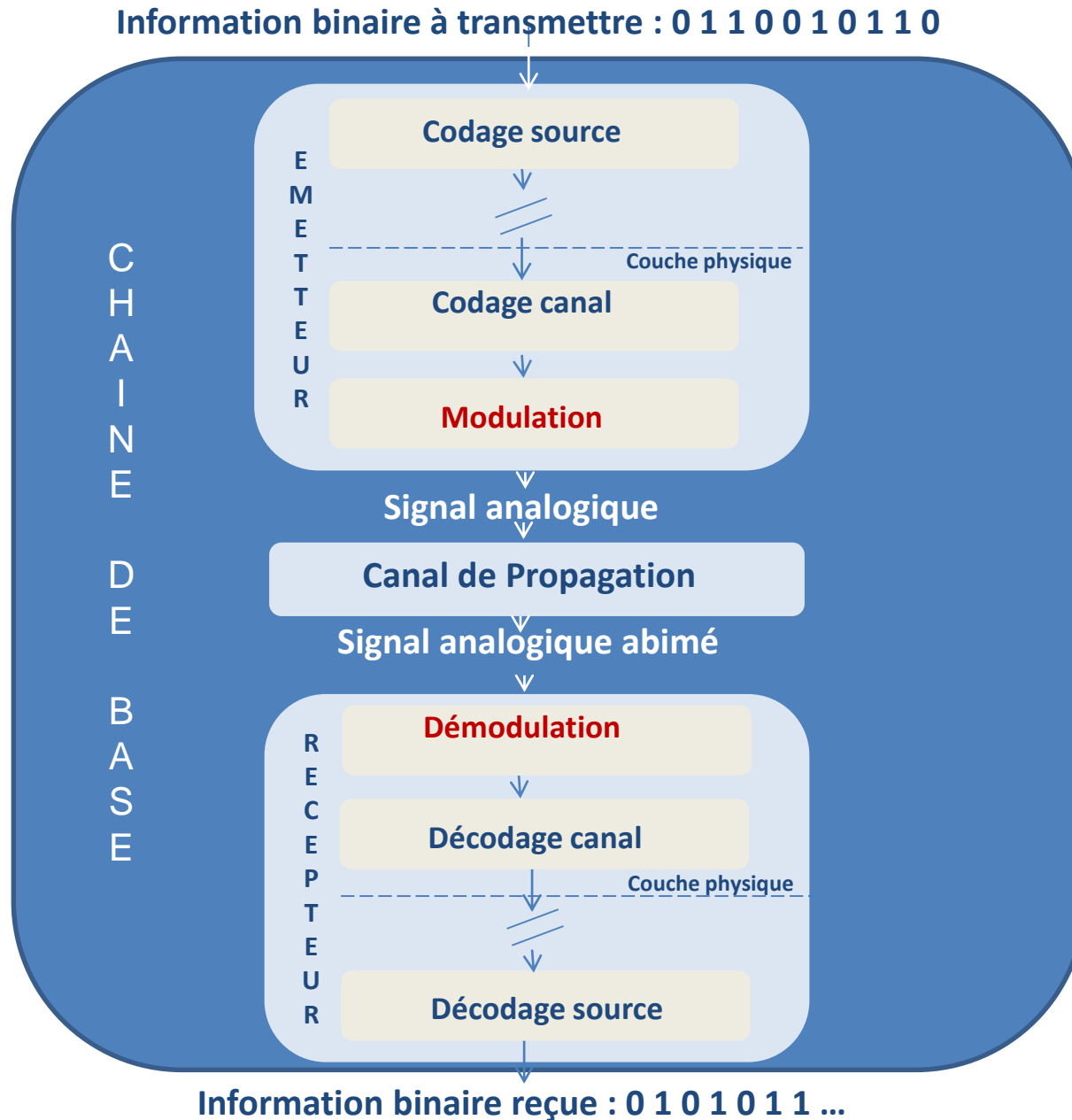
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 1 1 0



Exemple de codage canal



Chaîne de communication numérique : modulation



Exemple de Modulation Numérique

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
Bande de base

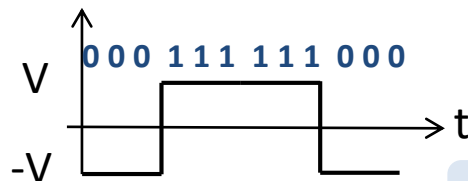
(Transposition
de fréquence)

Signal numérique

Convertisseur analogique numérique

Signal analogique

Exemple : signal NRZ



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

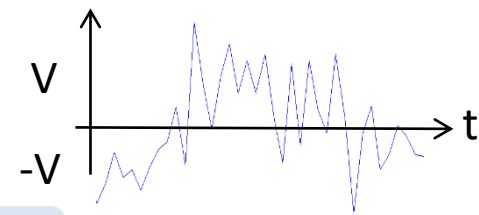
Démodulation
Bande de base

(Retour en
bande de base)

Signal numérique abimé

Convertisseur numérique analogique

Signal analogique abimé

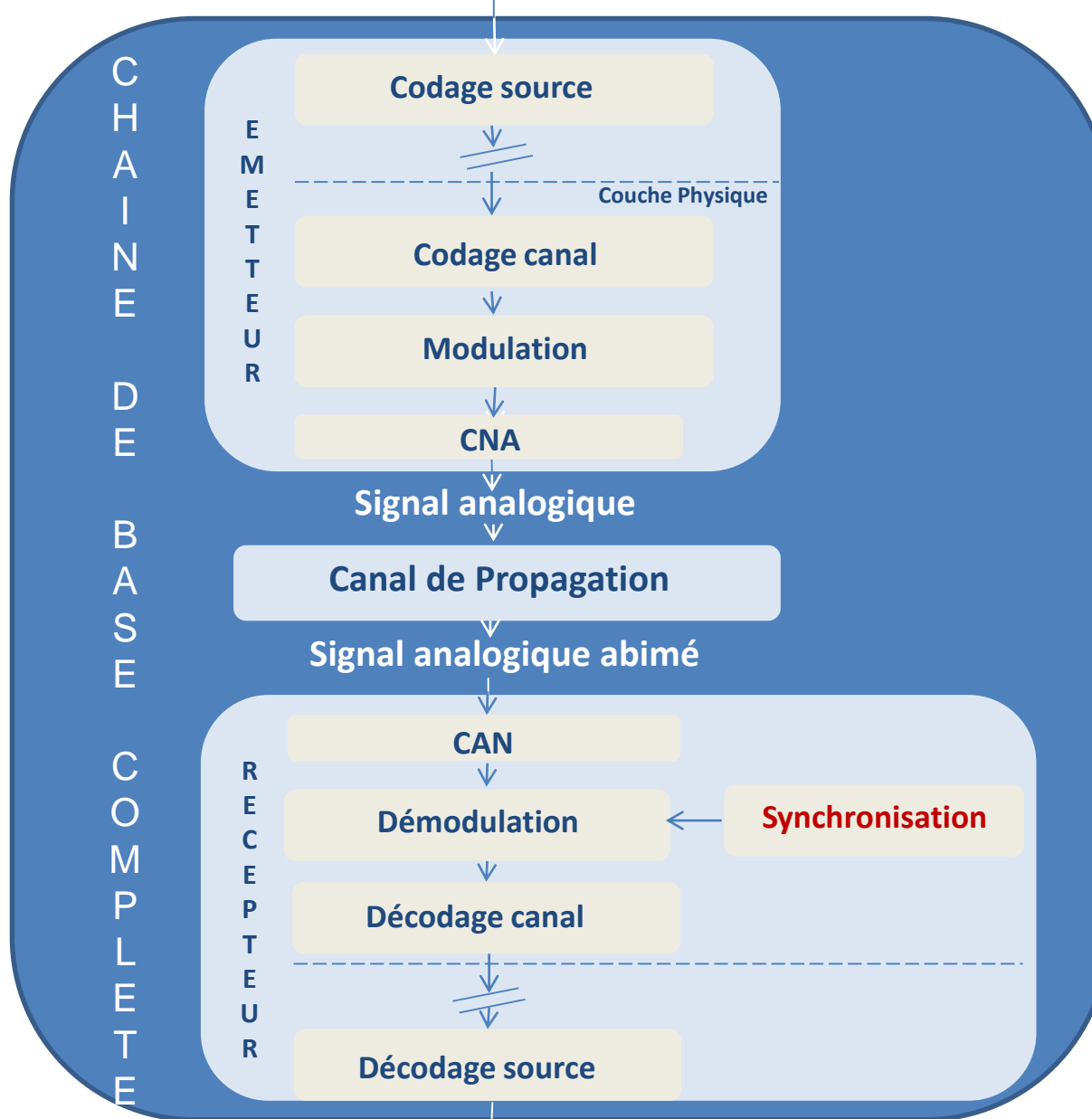


SNR=0 dB

Canal de Propagation

Chaine de communication numérique : **synchronisation**

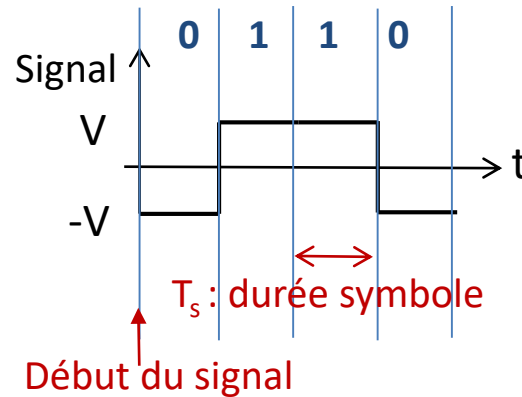
Information binaire à transmettre : 0 1 1 0 0 1 0 ...



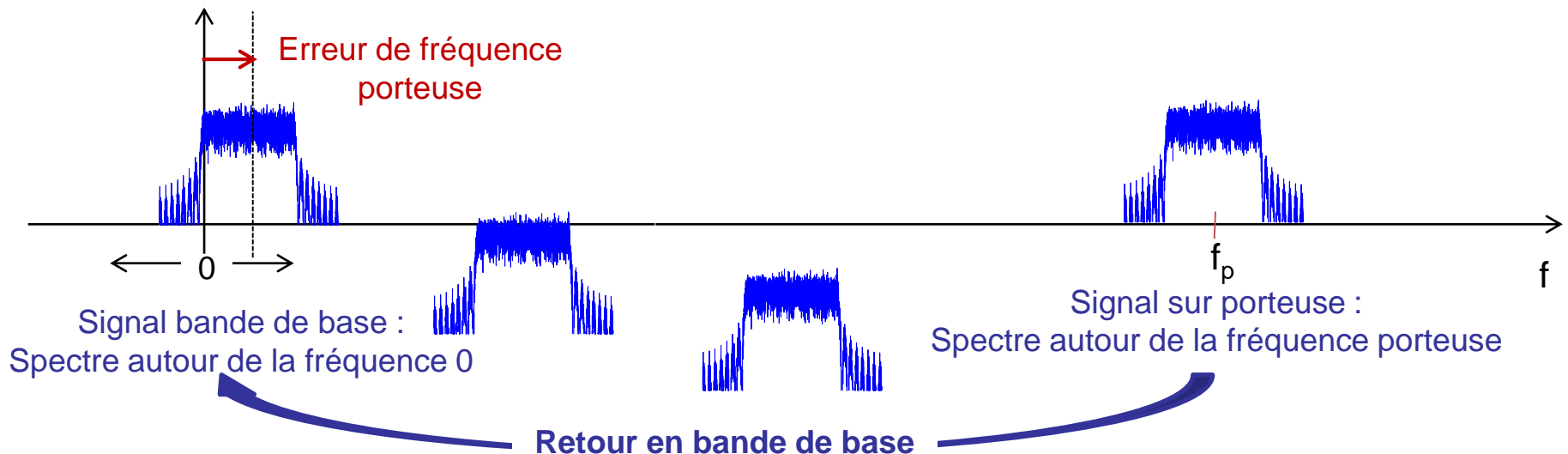
Synchronisation sur l'horloge (« en temps ») et sur la porteuse (« en fréquence »)

- Sur l'horloge

Information binaire à transmettre :



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



Chaine de communication numérique : critères de performance

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

Débit binaire R_b

CH
A
I
N
E

D
E

B
A
S
E

C
O
M
P
L
E
T
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

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

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)

Chaîne de communication numérique : **exemple**

La chaîne de transmission
est conçue pour :

- Transmettre un certain **débit binaire R_b**
= nombre de bits à transmettre par seconde

Cela va nécessiter :

- Une certaine **bande passante** dans le canal de transmission.

R_b
 B
 SNR
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

DVB-S : diffusion de contenu multi-média par satellite

Transmission QEF (Quasi Error Free transmission):

$$TEB < 10^{-10}$$

- Obtenir un certain **Taux d'erreur Binaire (TEB)**

$$TEB = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} < 1$$

- Un certain **SNR** à l'entrée du récepteur
=> une certaine puissance d'émission.

QUESTION

Le codage canal permet :

- ☐ A De lutter contre le bruit introduit par le canal de propagation sans augmenter la puissance d'émission du signal,
- ☐ B D'augmenter la puissance d'émission du signal pour obtenir un meilleur TEB,
- ☐ C De gagner en bande occupée par le signal à transmettre,
- ☐ D D'augmenter l'efficacité en puissance de la transmission.

QUESTION

Le codage source permet :

- ☐ A De lutter contre le bruit en ajoutant de la redondance à l'information binaire à transmettre,
- ☐ B De gagner en efficacité spectrale,
- ☐ C De gagner en efficacité en puissance.

QUESTION

Parmi les opérations suivantes laquelle/lesquelles est/sont obligatoire(s) dans un modulateur numérique :

- ☐ A Transporter le spectre du signal sur une fréquence plus élevée appelée fréquence porteuse,
- ☐ B Transformer l'information binaire à transporter en un signal capable de se propager sur le canal,
- ☐ C Utiliser un cosinus porteur pour transmettre l'information binaire.