

Introduction aux télécommunications

**Département sciences du numérique
Première année**

Séquence 2

- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation

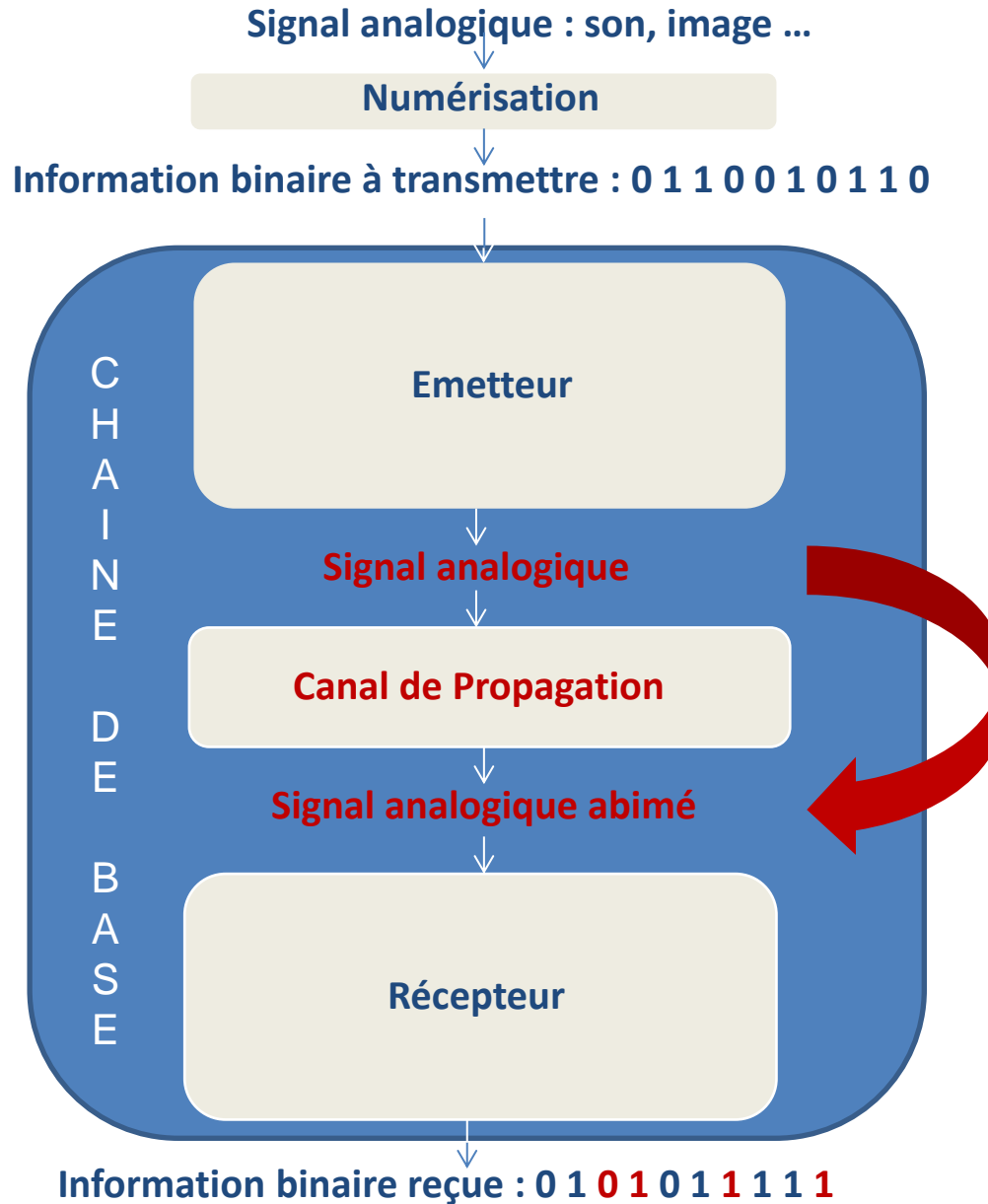
Introduction aux télécommunications

Département sciences du numérique
Première année

Séquence 2

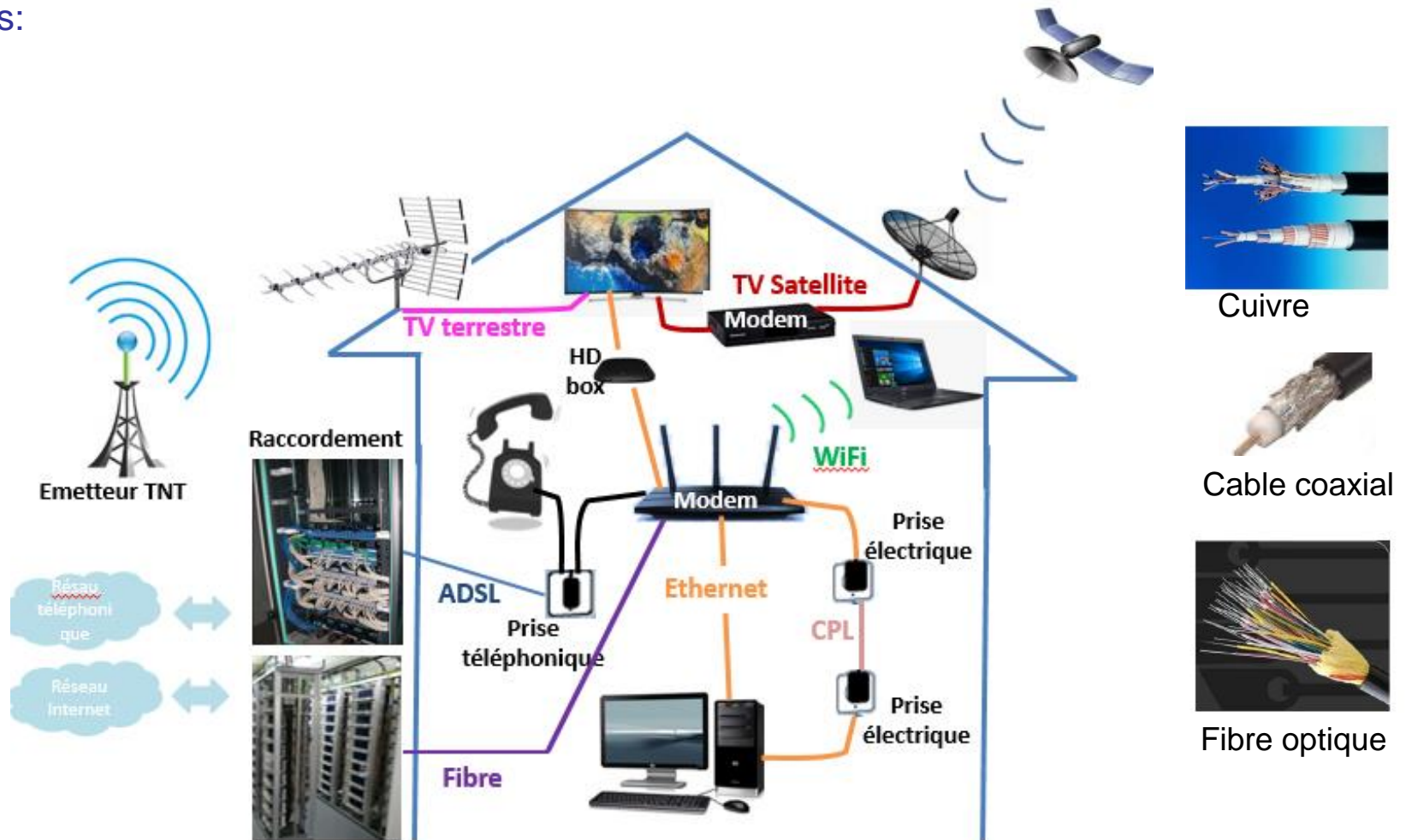
- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation

Chaine de communication numérique : **le canal de propagation**



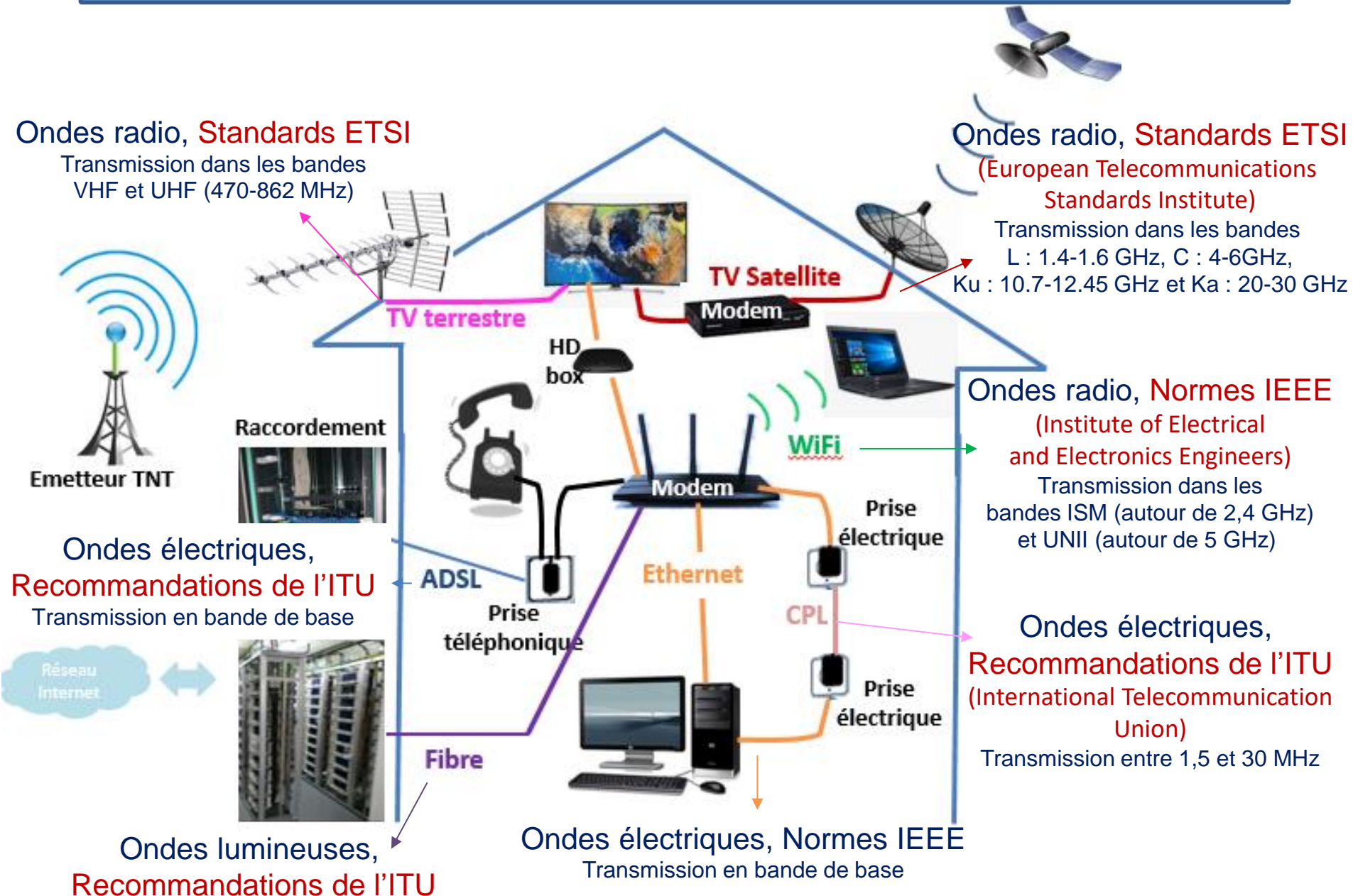
Le canal de propagation : **lien physique entre l'émetteur et le récepteur**

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



Le canal de propagation

Standards – recommandations - normes de télécommunications



Le canal de propagation

Distorsions et contraintes introduites

- Distorsions :

- Atténuation du signal transmis
- Bruit
 - Bruit externe = signaux reçus en plus du signal utile.
 - Bruit interne = dispositifs électroniques dans le récepteur.
- Sélectivité en temps et en fréquence
 - Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur
=> canal non sélectif ou sélectif en fréquence

- Contraintes :

- Bande passante limitée
- Transmission bande base ou sur fréquence porteuse
- Canal de propagation partagé
 - Méthodes de multiplexage, organismes de régulation.
- Transmission fixe ou mobile
 - => canal stationnaire ou non stationnaire

Le canal de propagation

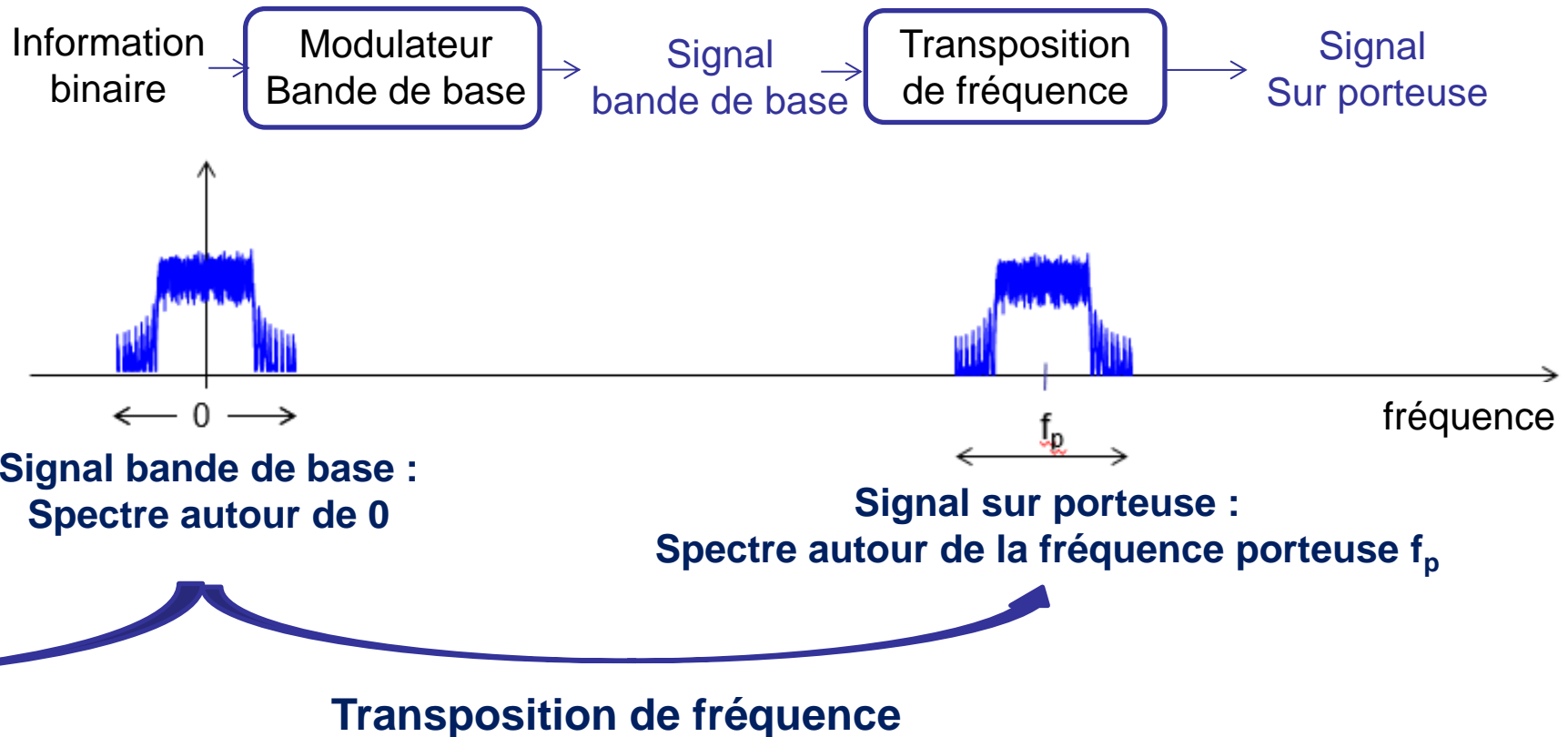
Atténuation du signal transmis

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



Le 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

Canal de propagation partagé

Régulation des fréquences

- 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) :
 - attribue et gère les ressources en fréquences et en numérotation aux différents opérateurs (ressources dites "rares" car naturellement limitées, pour mener à bien leurs activités)
 - intervient lors de différends entre opérateurs en matière d'accès au réseau (conditions techniques et tarifaires).
 - sanctionne les opérateurs qui ne remplissent pas leurs obligations
- ANRT (Agence Nationale de Régulation des Fréquences)
 - assure la planification, la gestion et le contrôle de l'utilisation, y compris privative, du domaine public du spectre des fréquences radioélectrique
 - coordonne l'implantation sur le territoire national des stations radioélectriques afin d'assurer la meilleure utilisation des sites disponible
 - veille au respect des valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques.
- CSA (Conseil Supérieur de l'Audiovisuel) :
 - Gère et attribue les fréquences pour les communications audiovisuelles

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

Canal de propagation partagé

Régulation des fréquences

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

Exemples :

- 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)

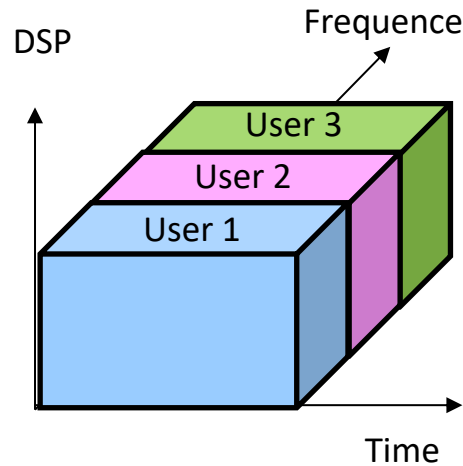
Canal de propagation partagé

Méthodes de multiplexage

Exemples

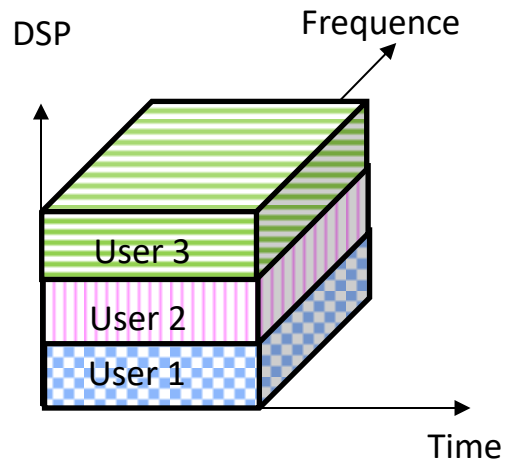
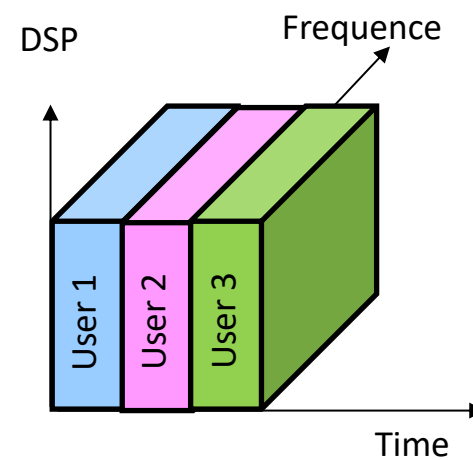
FDM

(Frequency Division Multiplexing)



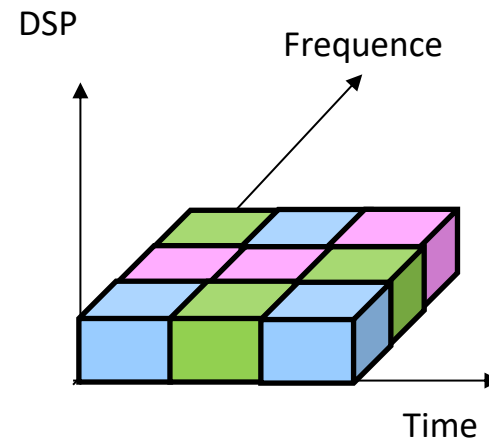
TDM

(Time Division Multiplexing)



CDM

(Code Division Multiplexing)



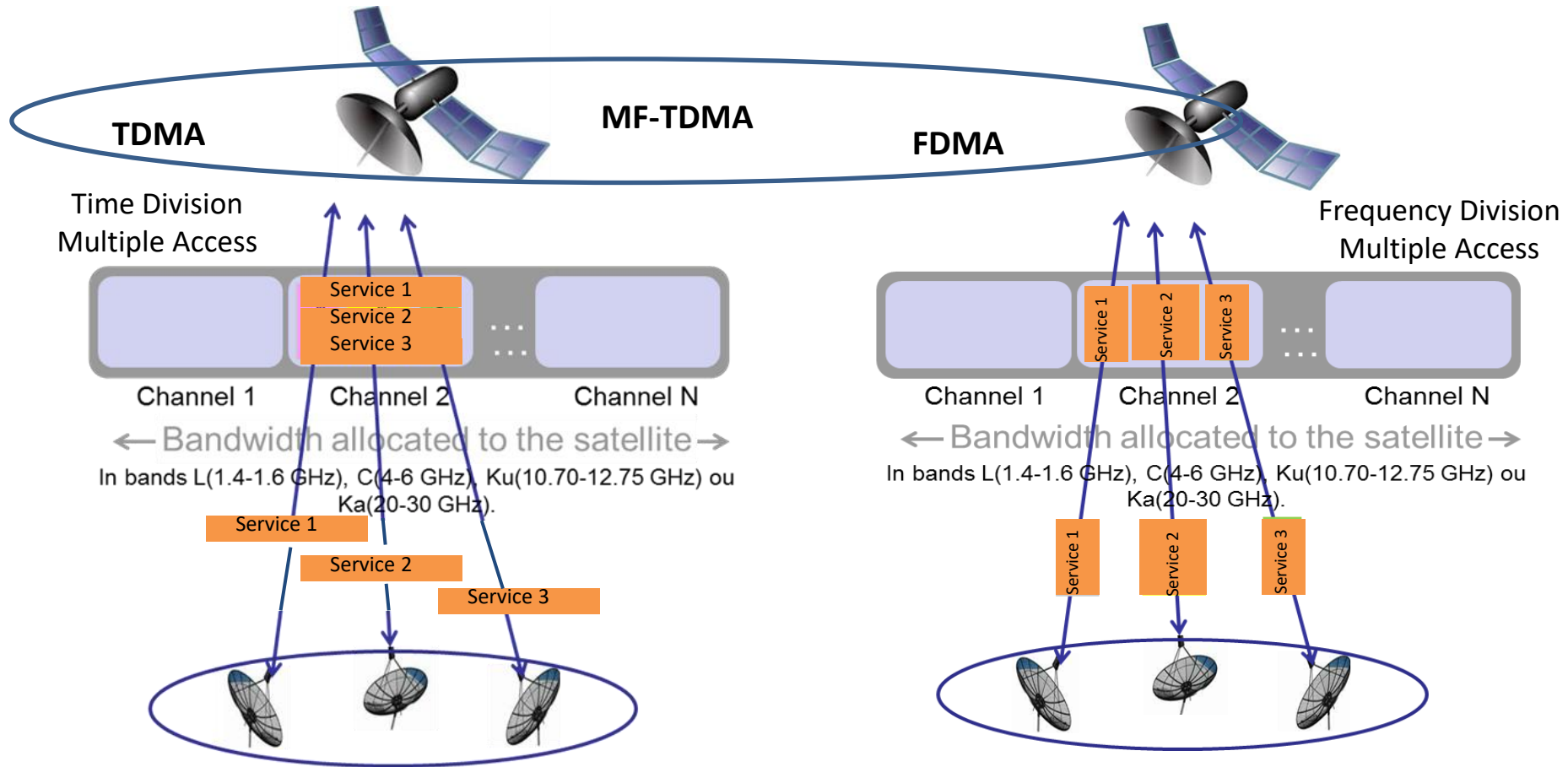
MF-TDM

(Multi Frequency - Time Division Multiplexing)

Canal de propagation partagé

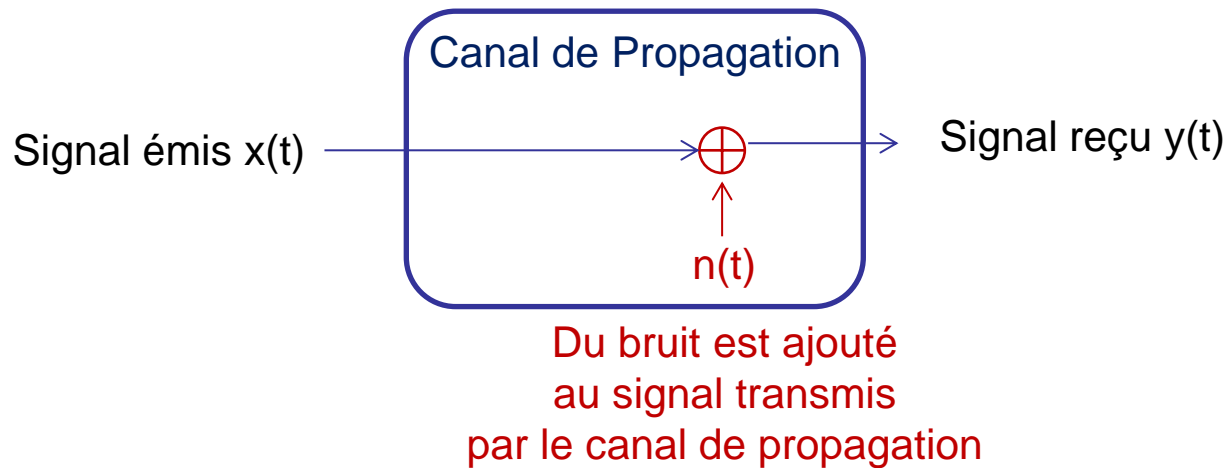
Exemple d'une liaison satellite fixe (DVB-S)

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



Canal de propagation

Introduction d'un bruit



- 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)

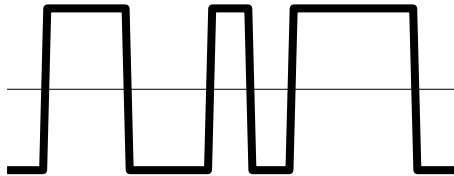
$$SNR_{dB} = 10 \log \frac{P_{\text{useful signal}}}{P_{\text{noise}}}$$

Canal de propagation

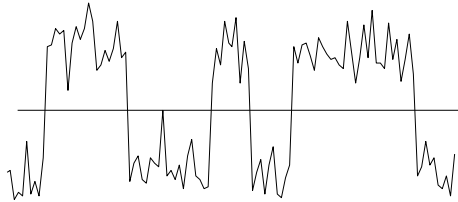
Introduction d'un bruit

Exemples de distorsions dues au bruit

Signal transmis de type NRZ



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



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

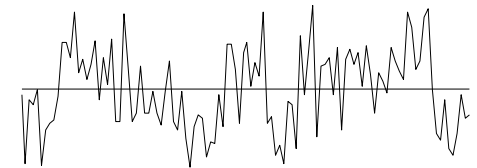


Image transmise

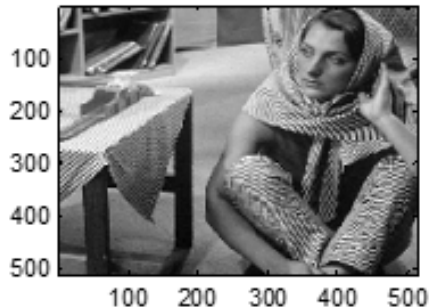


Image recue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \text{ dB}$

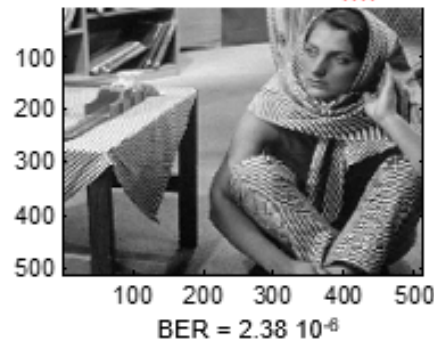
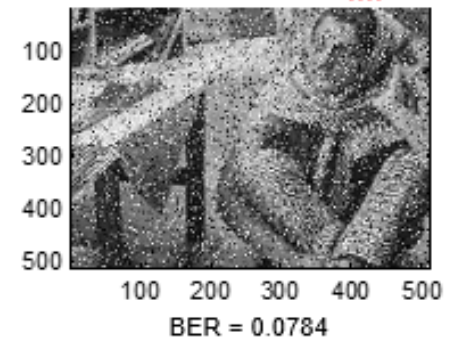


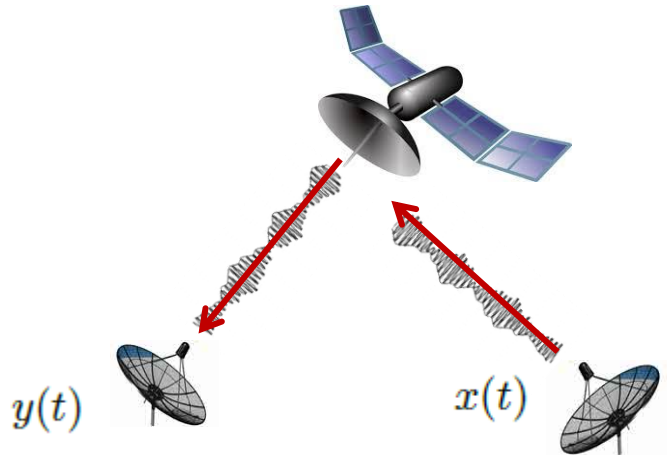
Image recue, $\text{SNR}_{\text{dB}} = 0 \text{ dB}$



Canal de propagation

Un ou plusieurs trajets entre l'émetteur et le récepteur

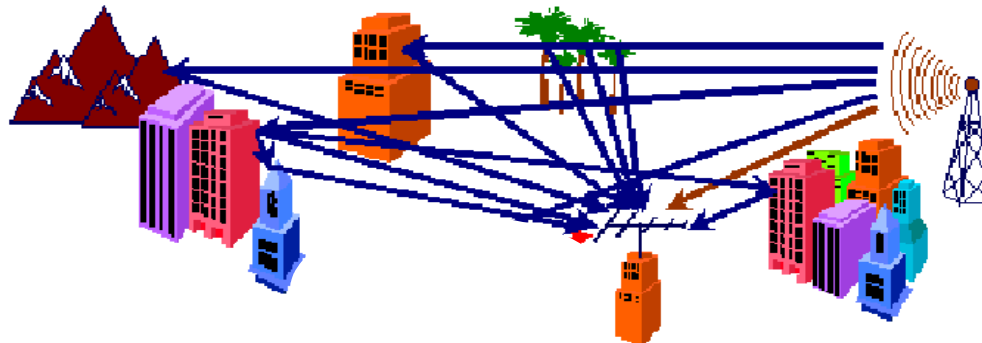
- Seulement la ligne de vue directe entre émetteur et récepteur (un seul trajet)



Atténuation et retard introduits par le canal

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

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

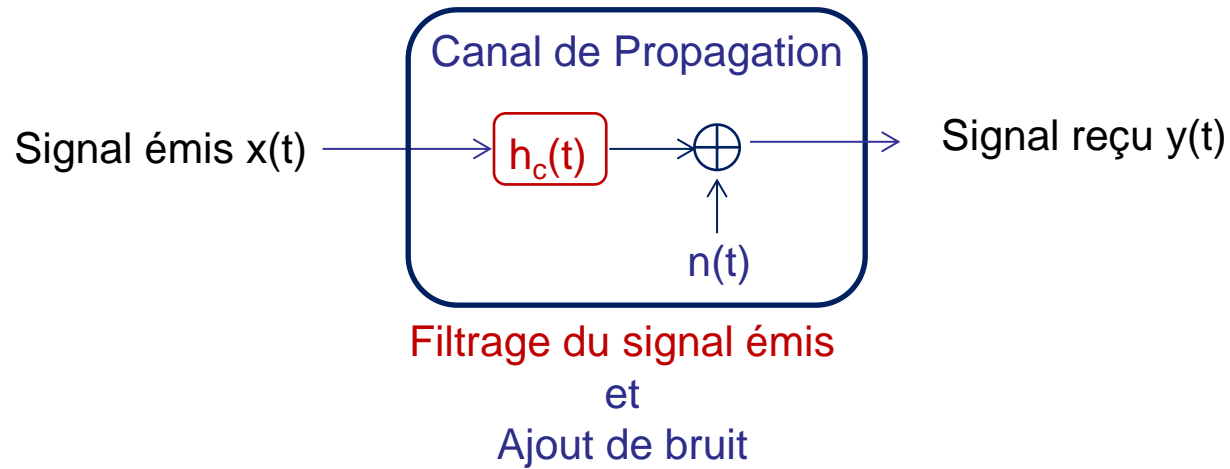


Plusieurs atténuations et retards introduits par le canal

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

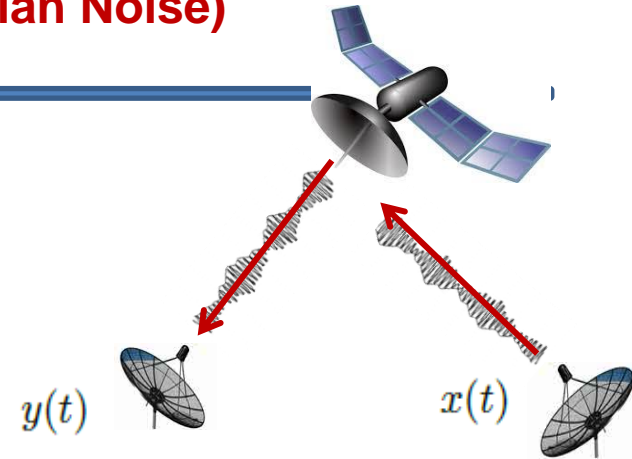
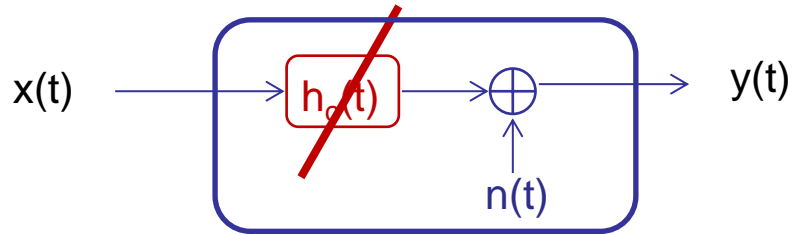
Canal de propagation

Modélisation

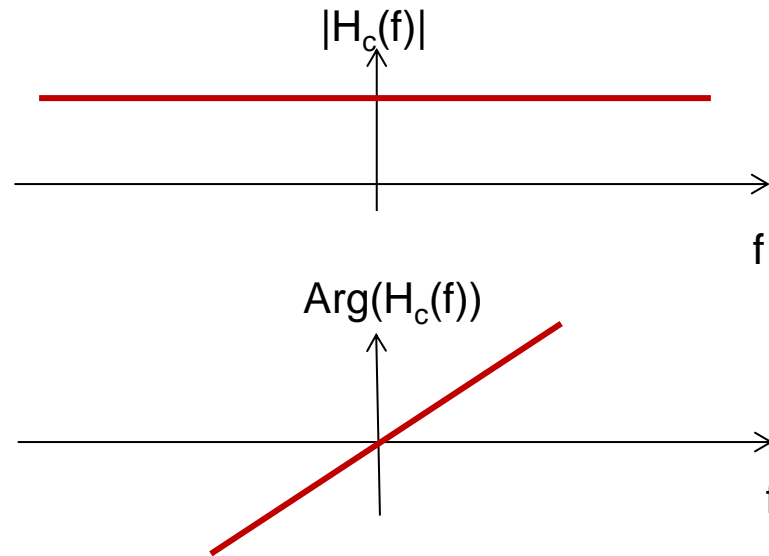


Canal de propagation

Canal AWGN (Additive White Gaussian Noise)

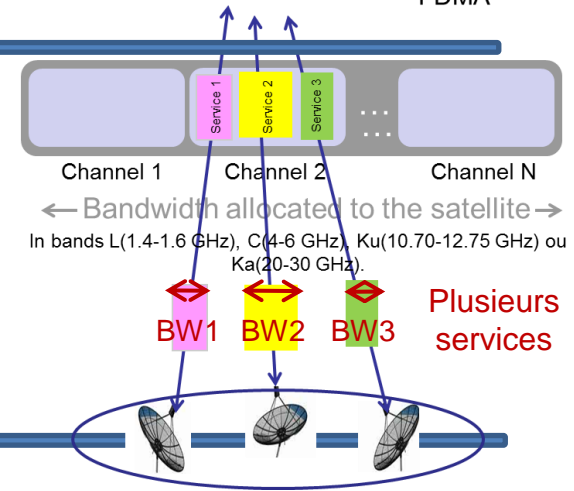
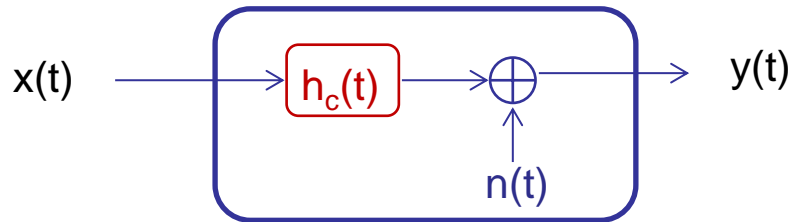


$$h_c(t) = \alpha \delta(t - \tau) \xrightarrow{FT} H_c(f) = \alpha e^{-j2\pi f\tau}$$

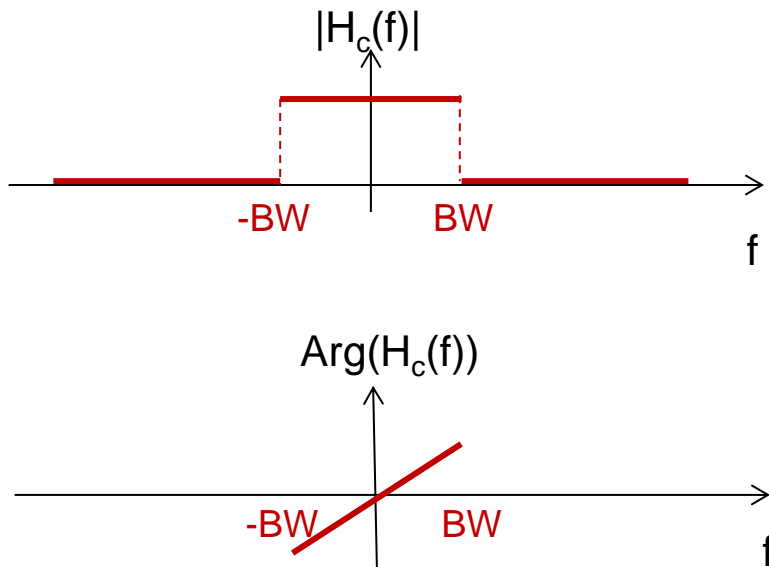


Canal de propagation

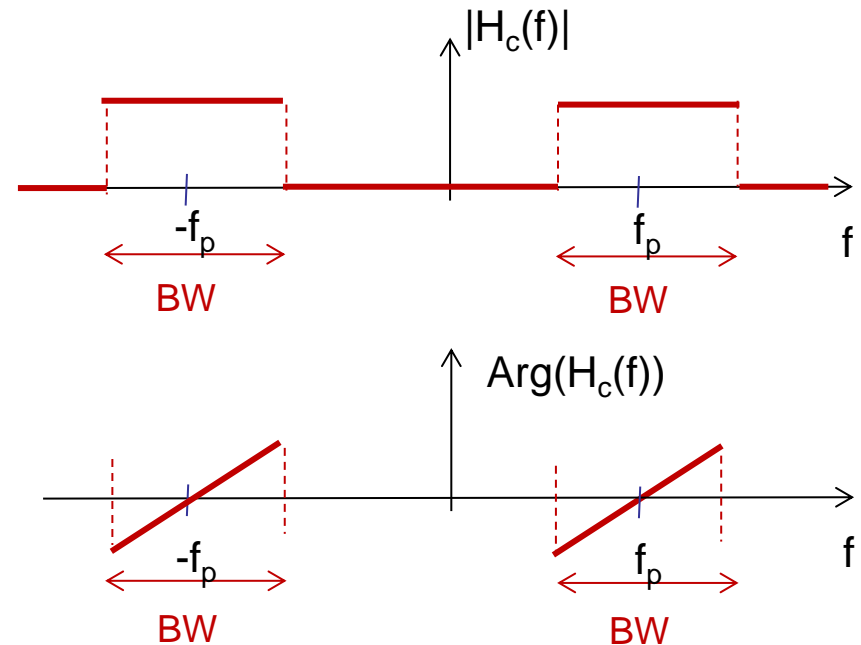
Canal AWGN à bande passante limitée



Transmission bande de base :

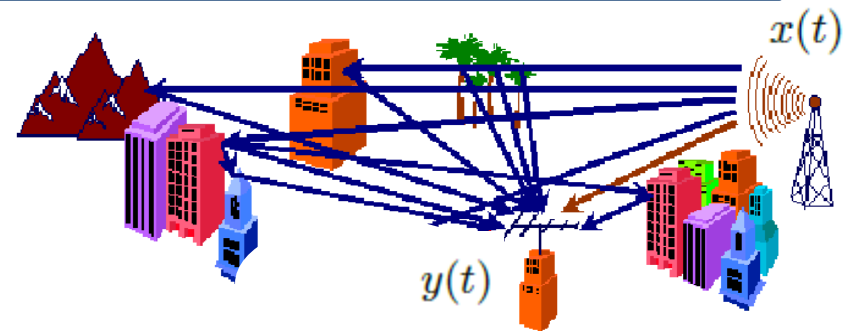
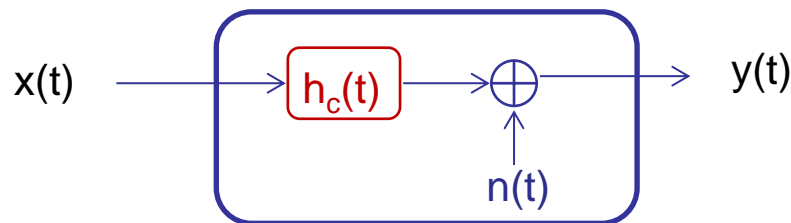


Transmission sur porteuse :

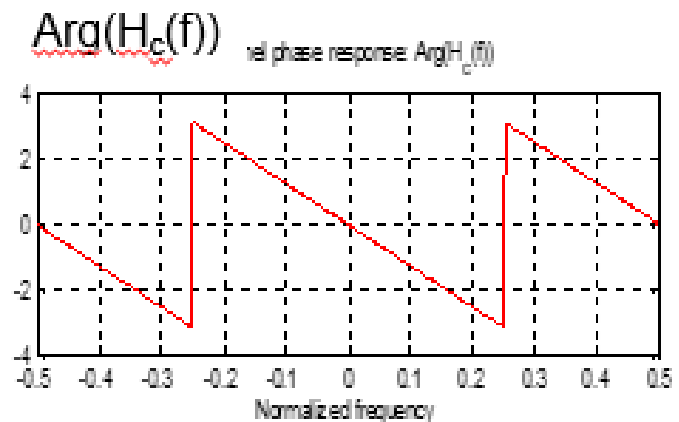
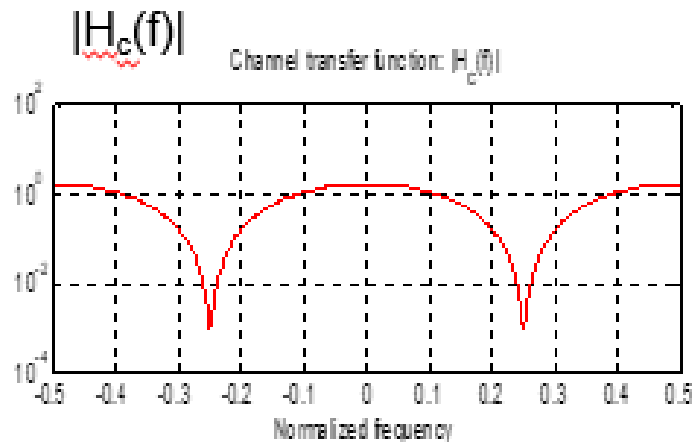


Canal de propagation

Canal sélectif en fréquence



$$h_c(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k) \xrightarrow{FT} H_c(f) = \sum_k \alpha_k e^{-j2\pi f \tau_k}$$



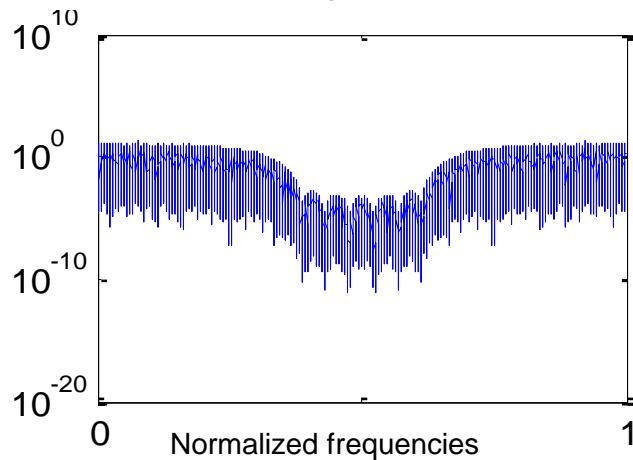
→ Notion de « bande de cohérence du canal » : bande de fréquence maximale sur laquelle le canal peut être considéré comme « plat »

Canal de propagation

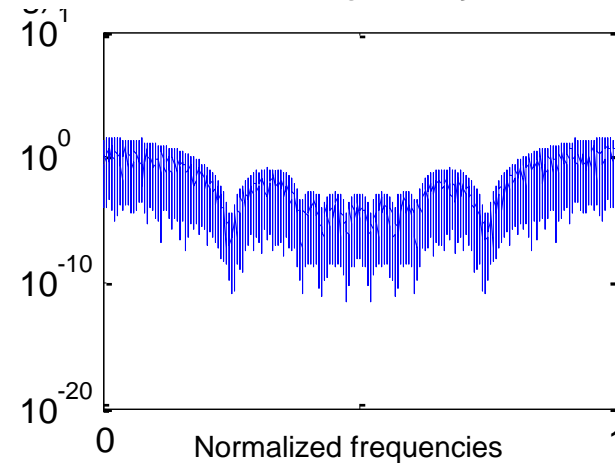
Canal sélectif en fréquence

Exemple de distorsions introduites par un canal sélectif en fréquences

DSP du signal transmis



DSP du signal reçu



Transmitted image:

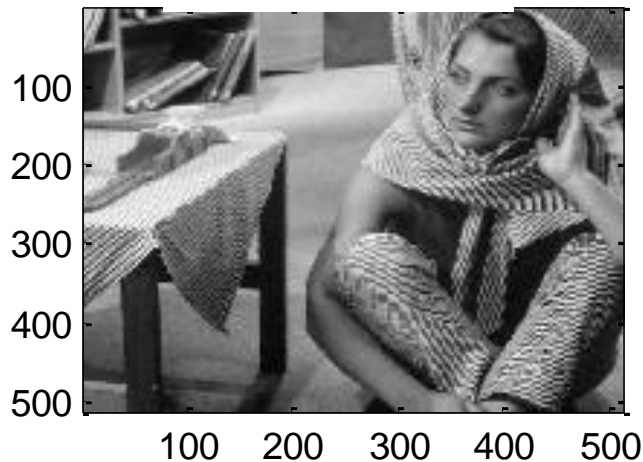
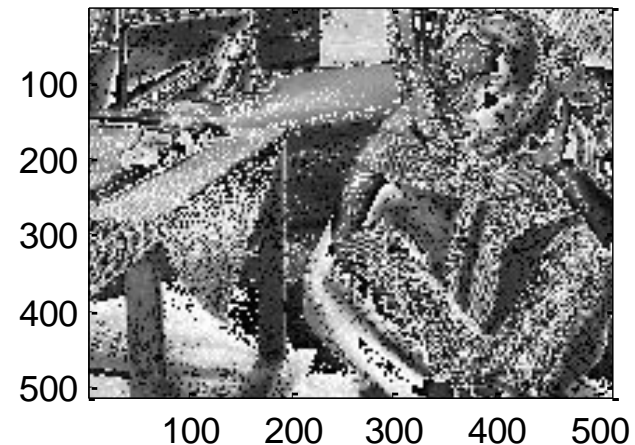


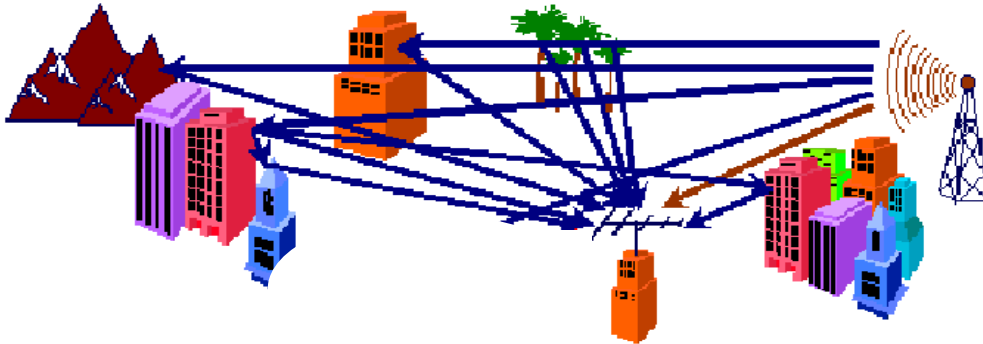
Image recue :



Canal de propagation

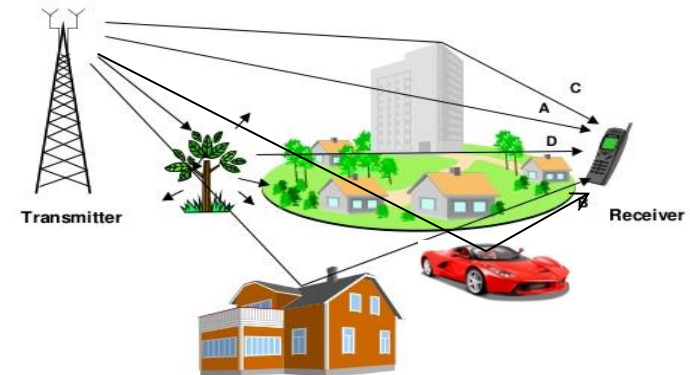
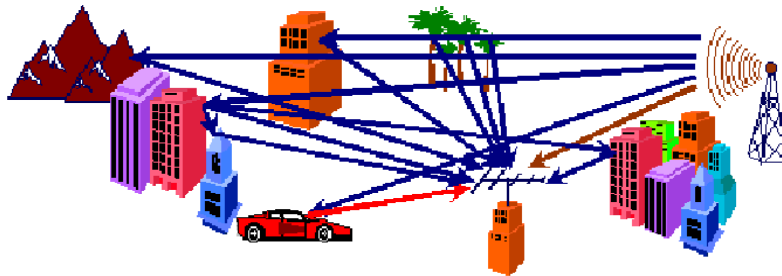
Stationnaire ou non stationnaire

Transmission fixe



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

Transmission 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)

Introduction aux télécommunications

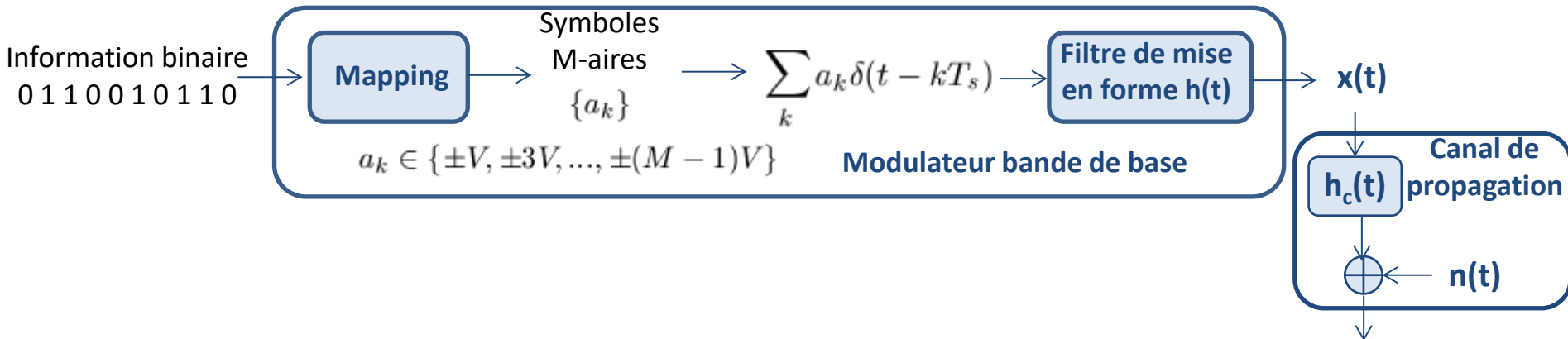
Département sciences du numérique
Première année

Séquence 2

- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation

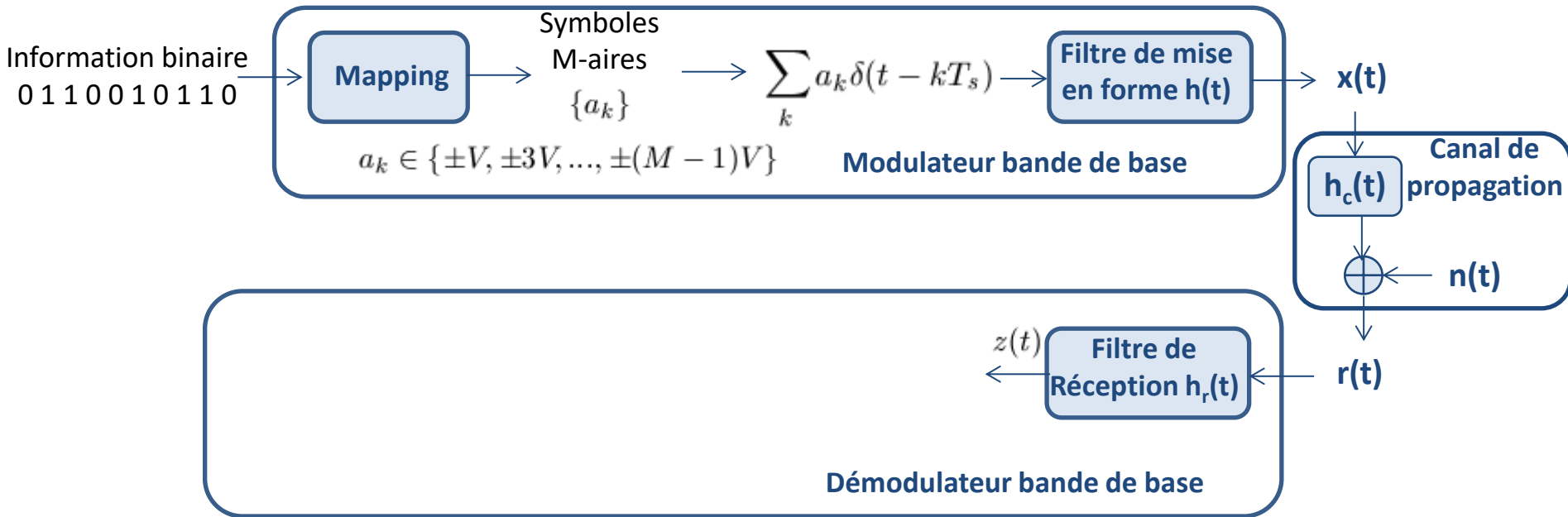
Problème de l'interférence entre symboles

Modulateur bande base - Canal de propagation



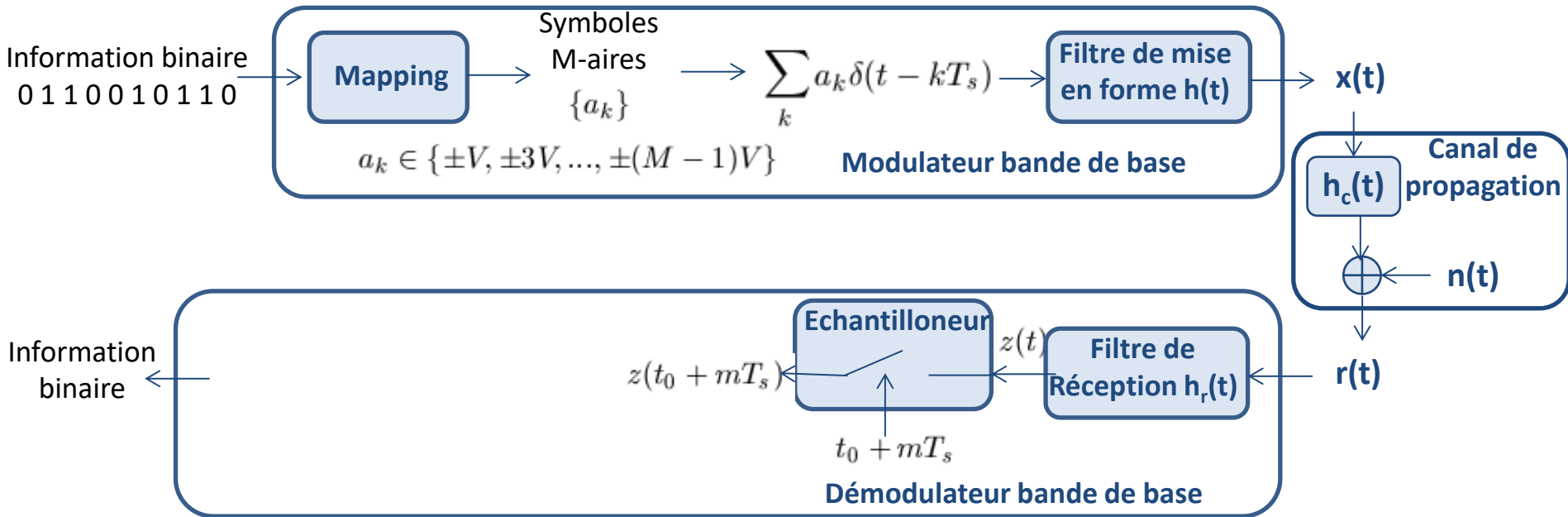
Problème de l'interférence entre symboles

Mise en place du démodulateur bande de base



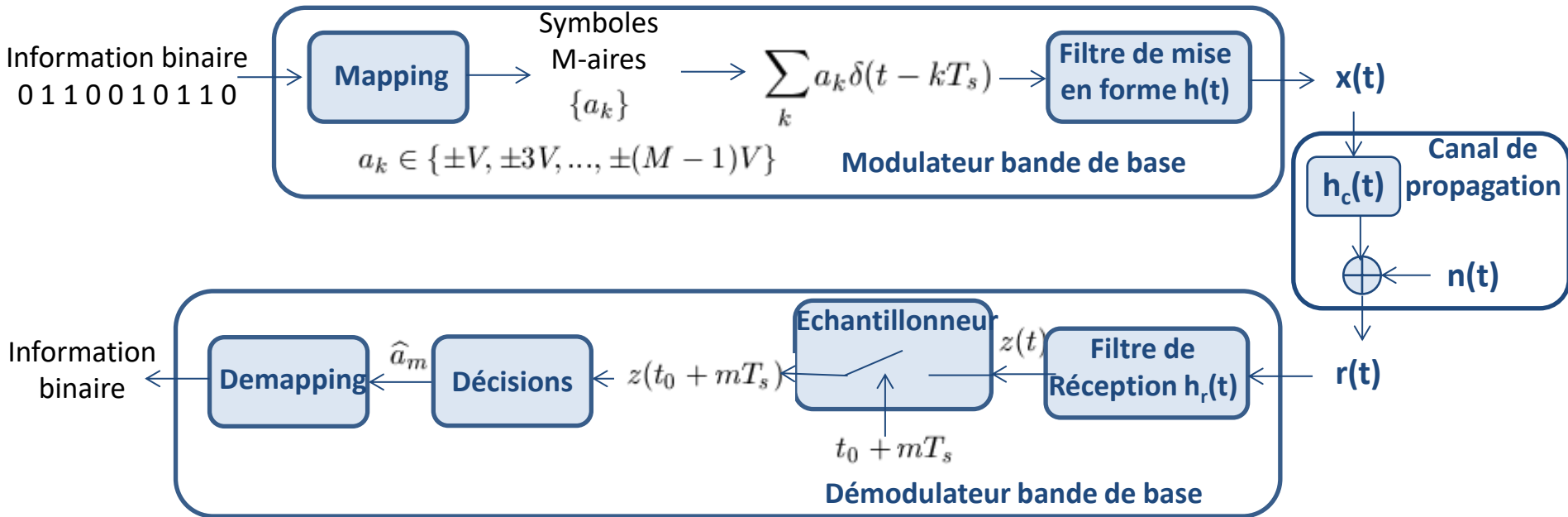
Problème de l'interférence entre symboles

Mise en place du démodulateur bande de base



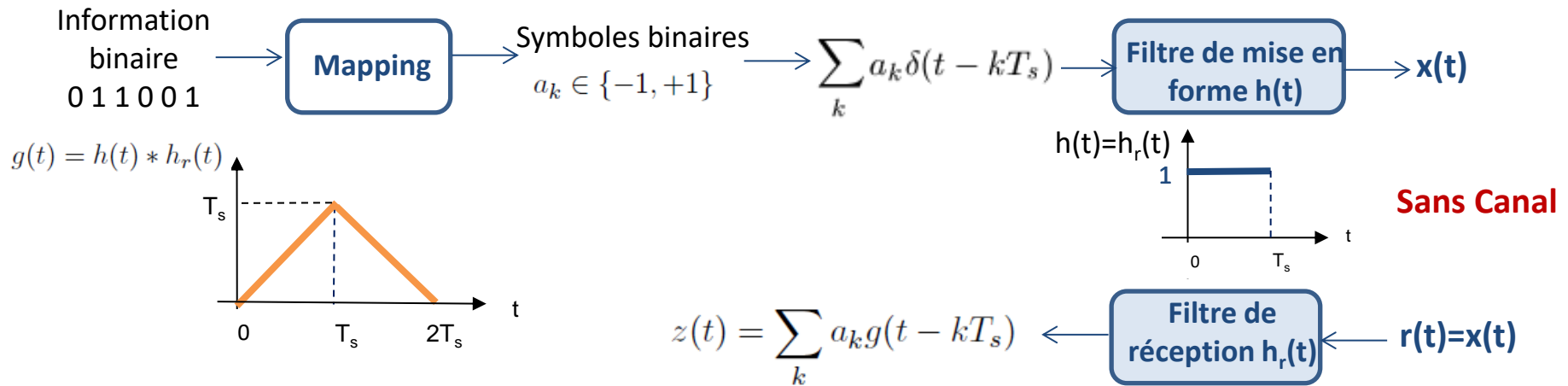
Problème de l'interférence entre symboles

Mise en place du démodulateur bande de base



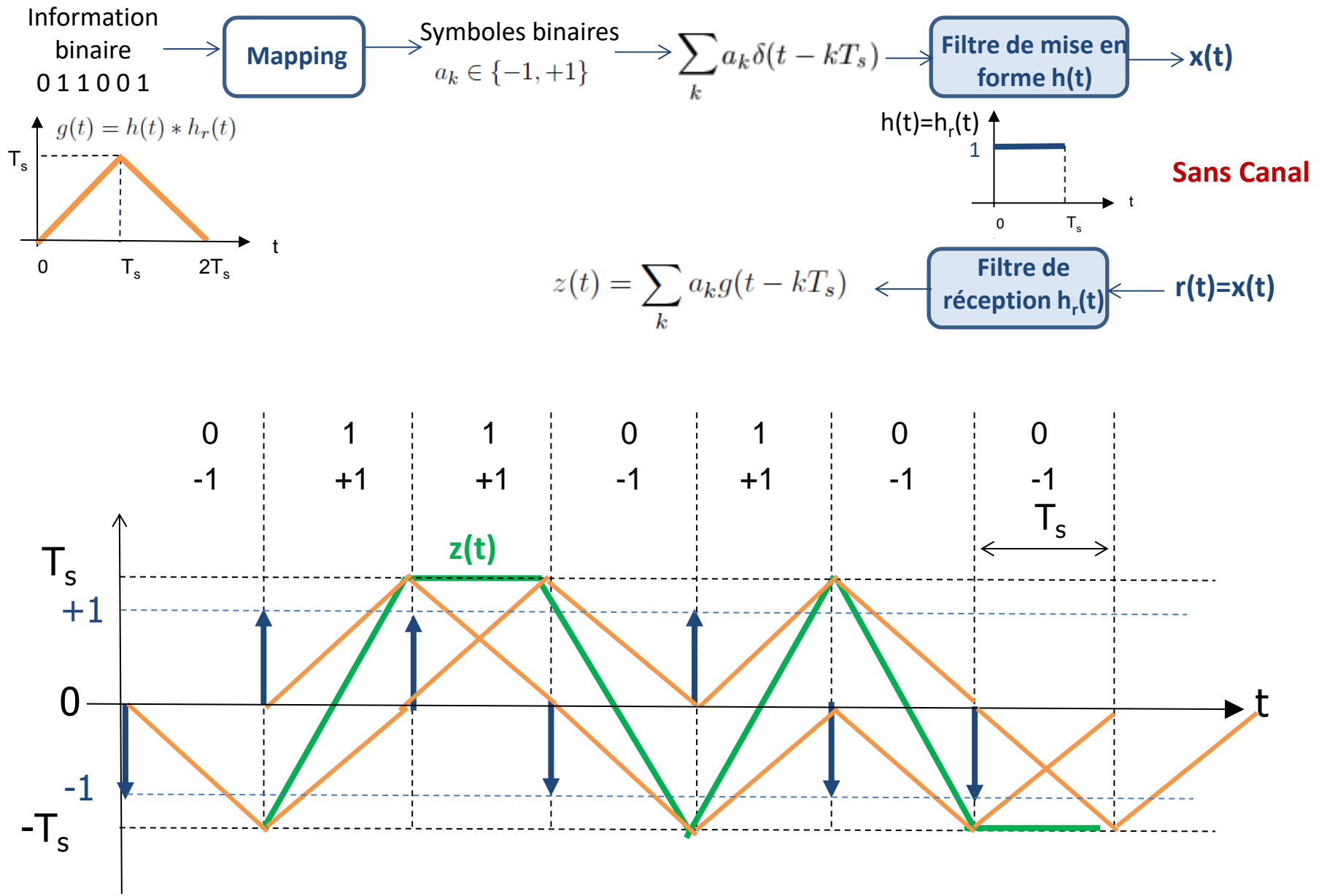
Problème de l'interférence entre symboles

Exemple sans canal – Tracé de $z(t)$



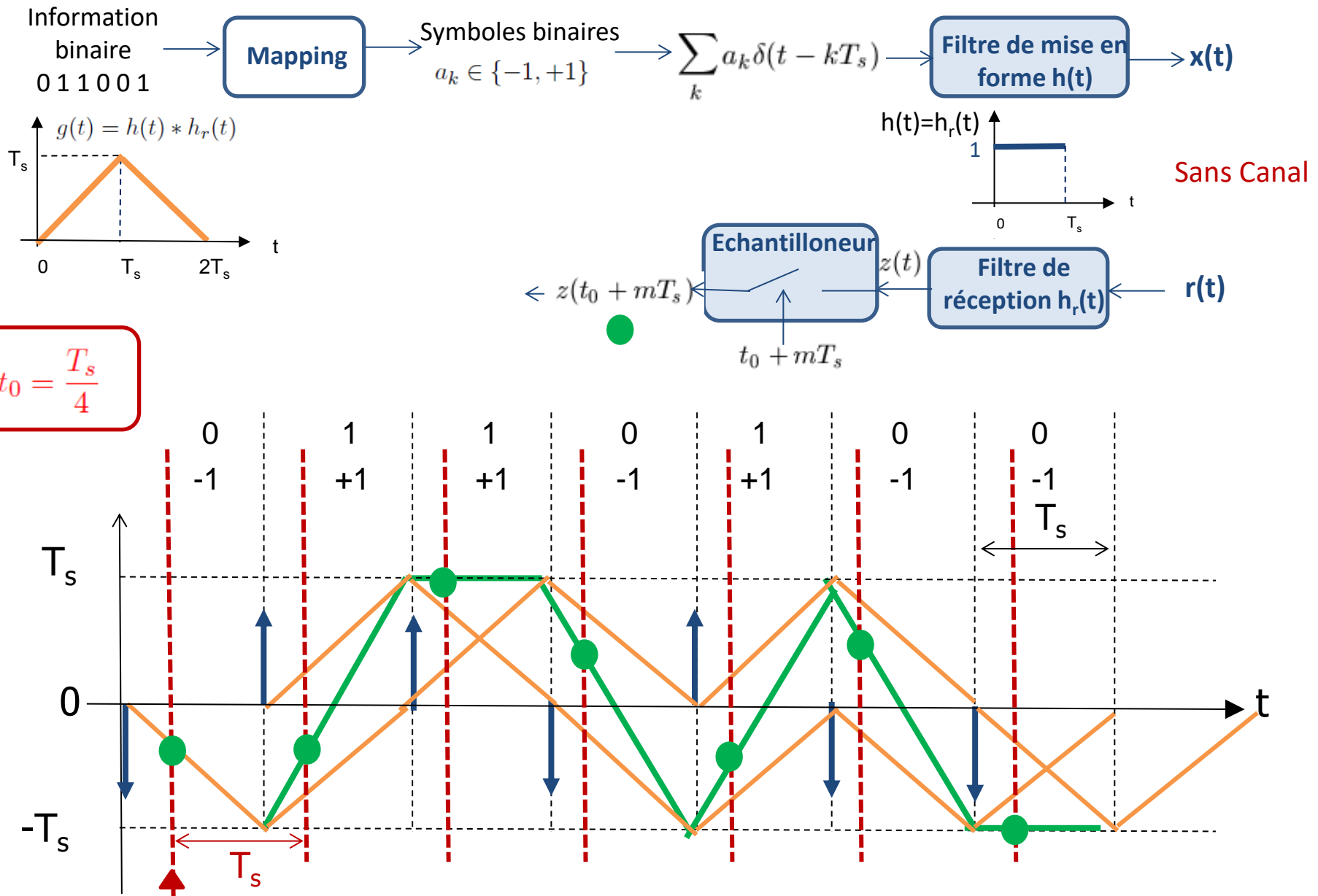
Le problème de l'interférence entre symboles

Exemple sans canal – Tracé de $z(t)$

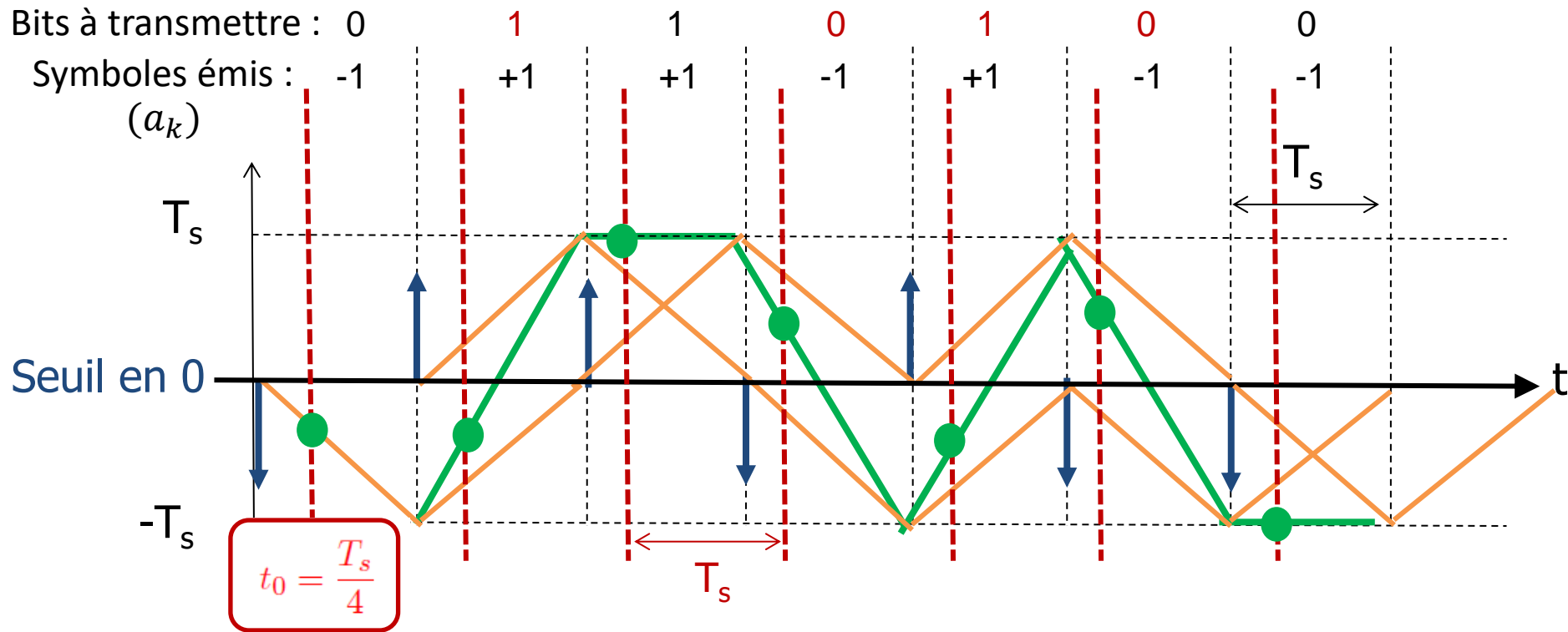


Le problème de l'interférence entre symboles

Exemple sans canal – Echantillonnage



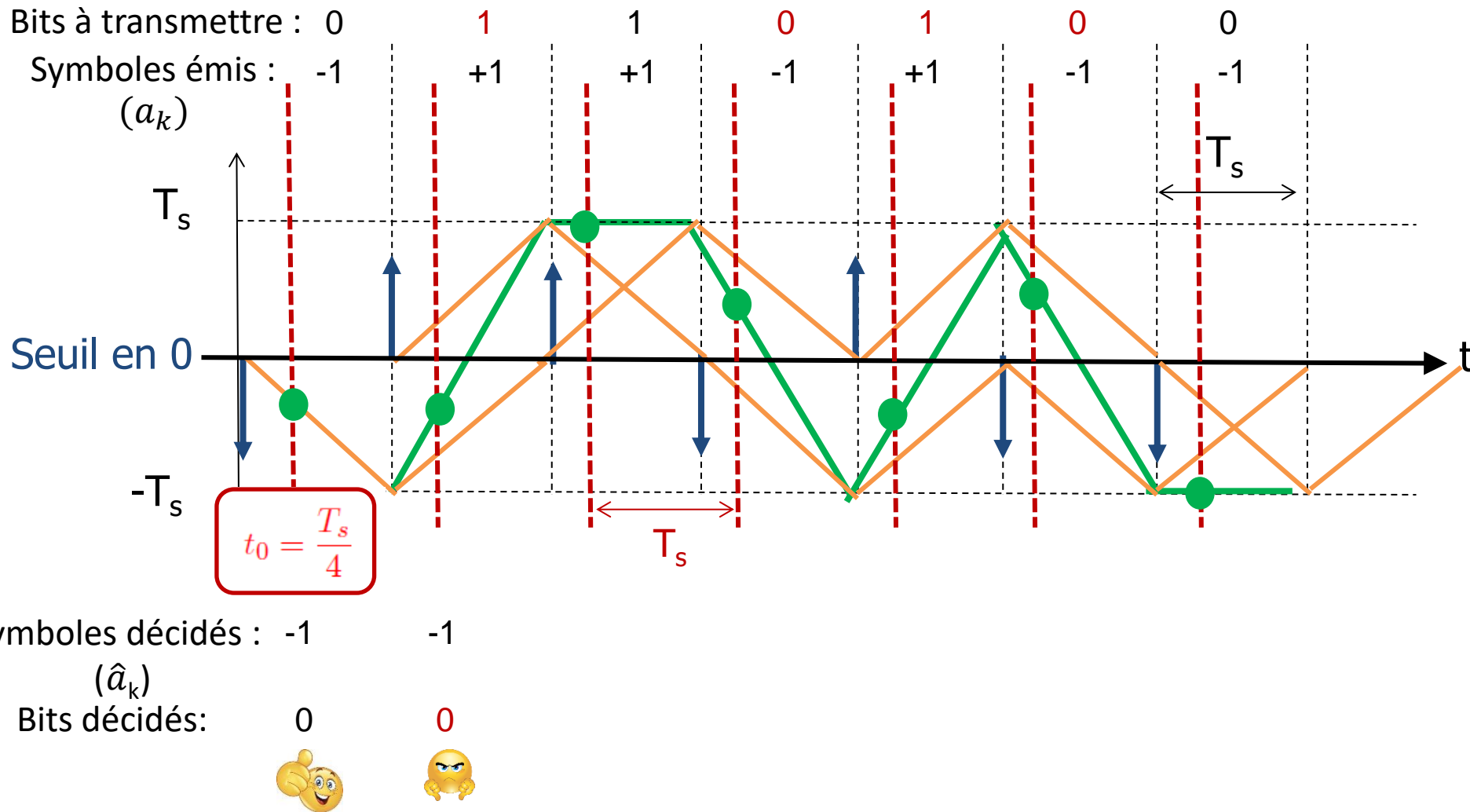
Exemple sans canal – Décisions



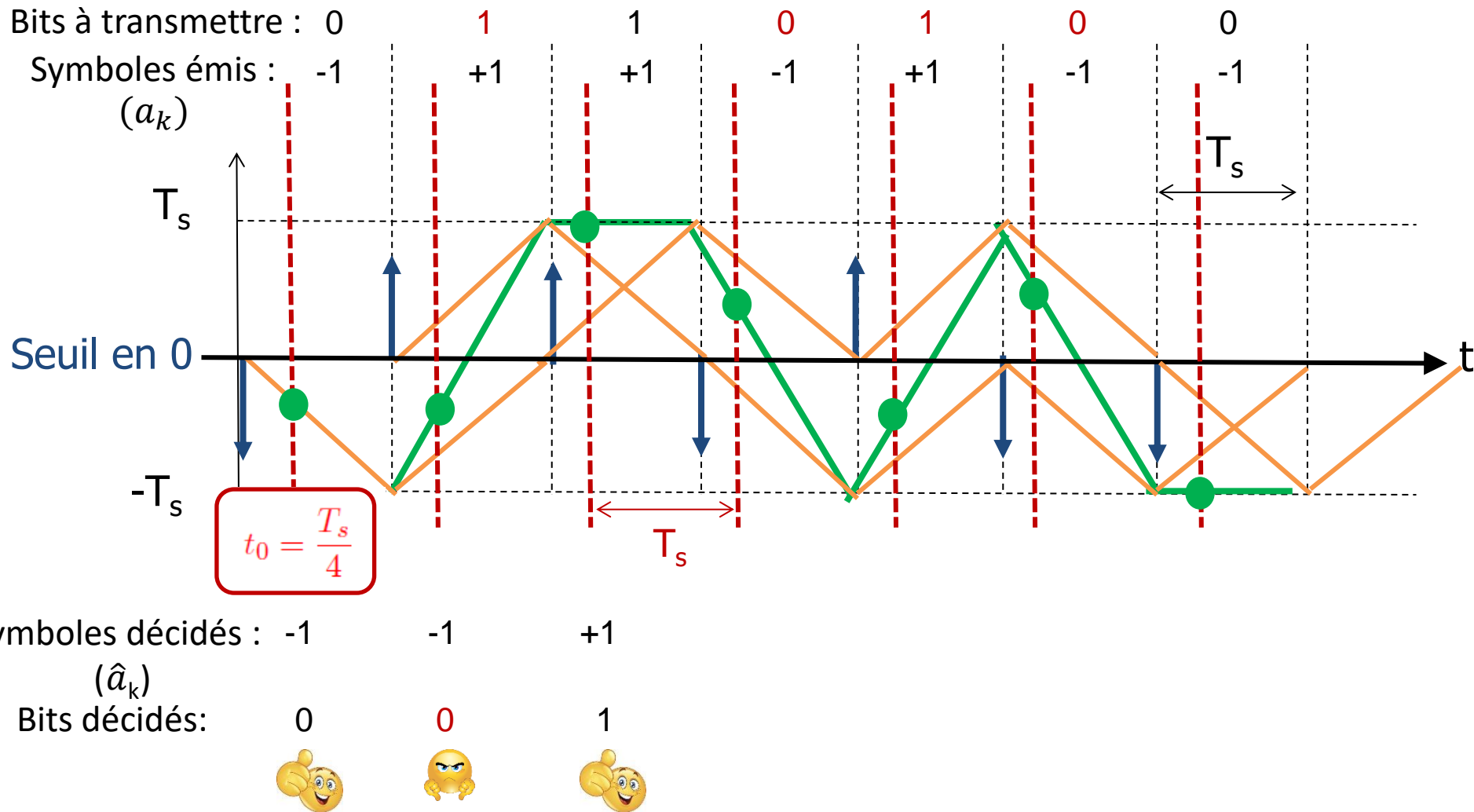
Symboles décidés : -1
 (\hat{a}_k)
 Bits décidés: 0



Exemple sans canal – Décisions



Exemple sans canal – Décisions



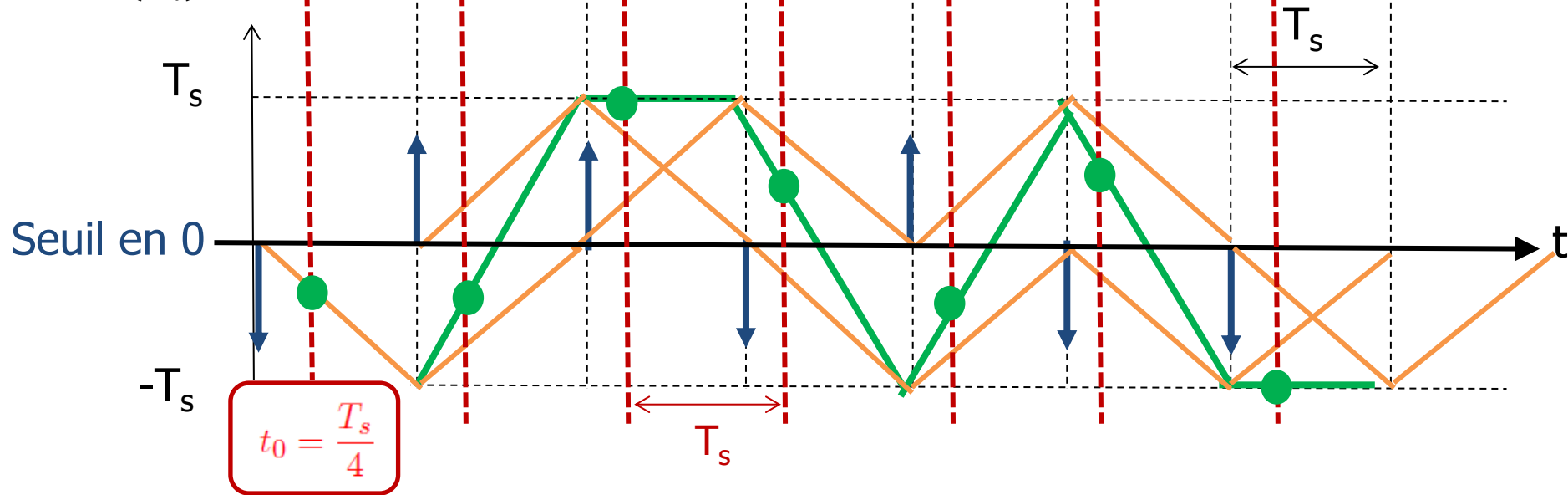
Le problème de l'interférence entre symboles

Exemple sans canal – Décisions

Bits à transmettre : 0

Symboles émis : -1

(a_k)



Symboles décidés : -1

-1

+1

+1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

0

1

1



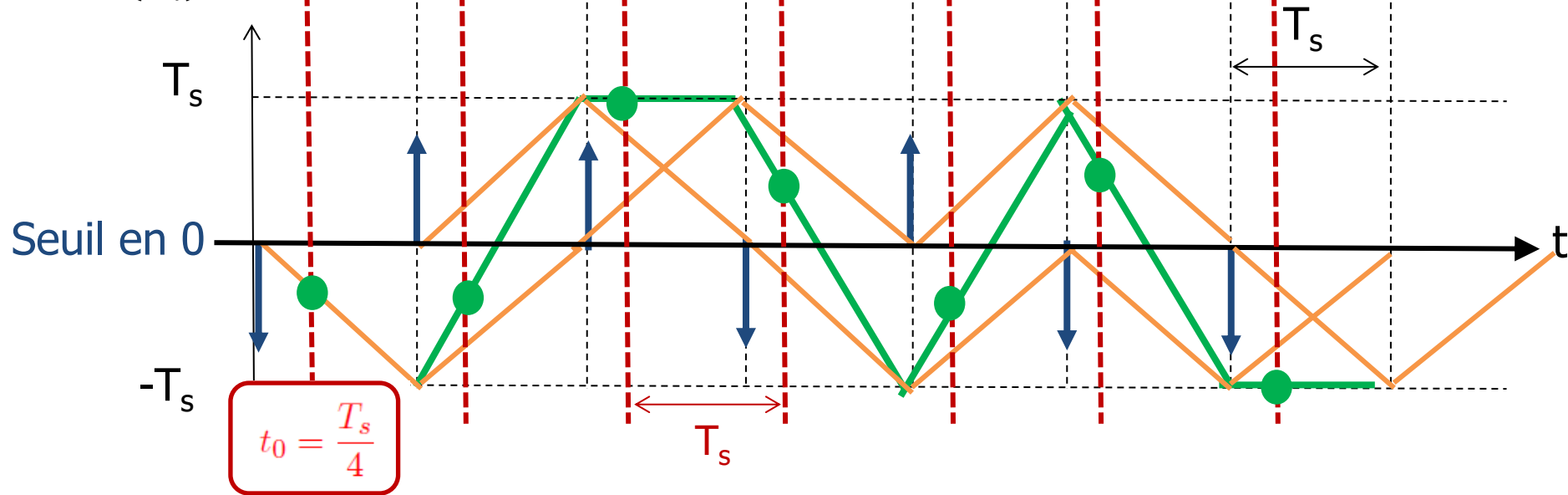
Le problème de l'interférence entre symboles

Exemple sans canal – Décisions

Bits à transmettre : 0

Symboles émis : -1

(a_k)



Symboles décidés : -1

-1

+1

+1

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

0

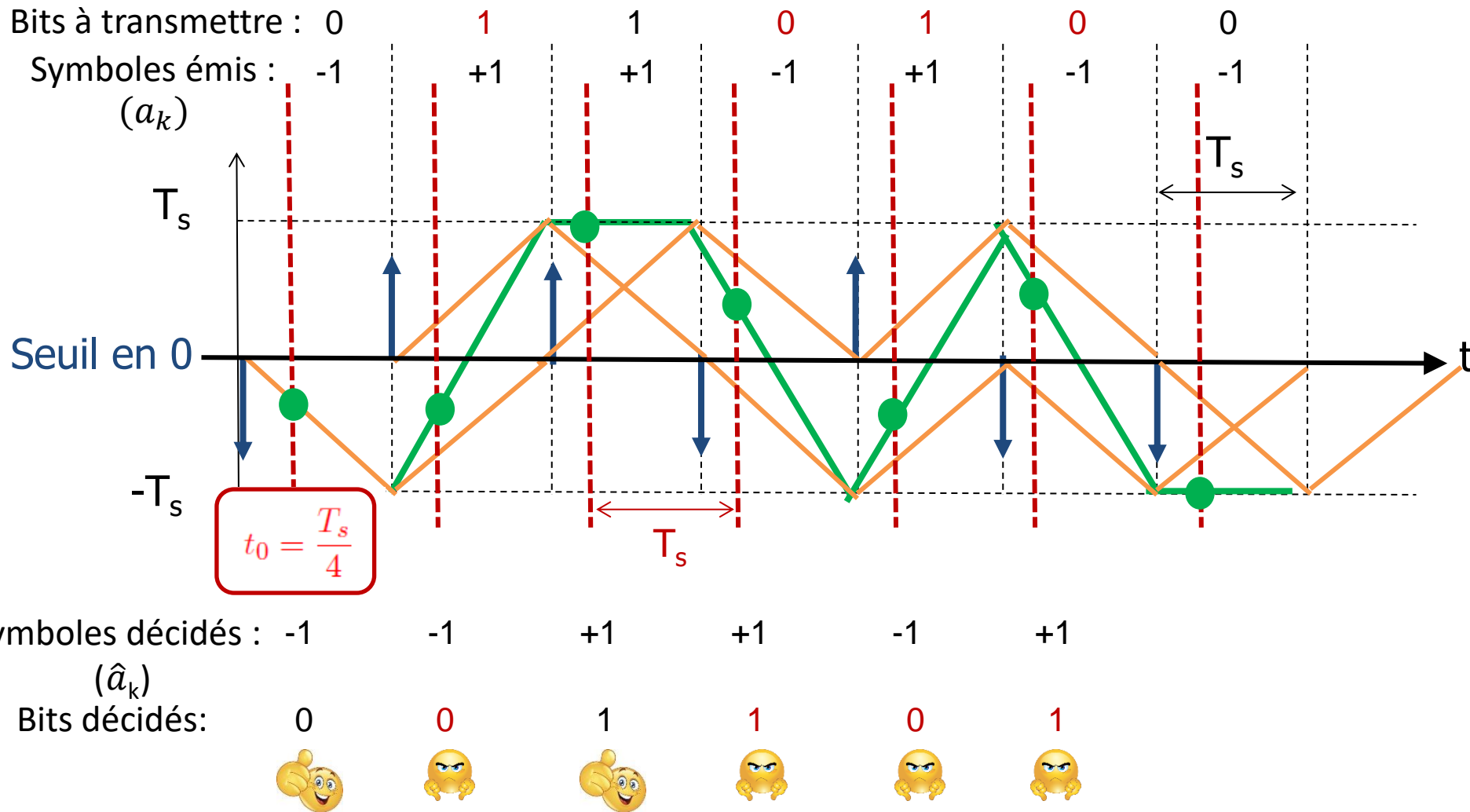
1

1

0



Exemple sans canal – Décisions



Le problème de l'interférence entre symboles

Exemple sans canal – Décisions

Bits à transmettre : 0

1

1

0

1

0

0

Symboles émis : -1

+1

+1

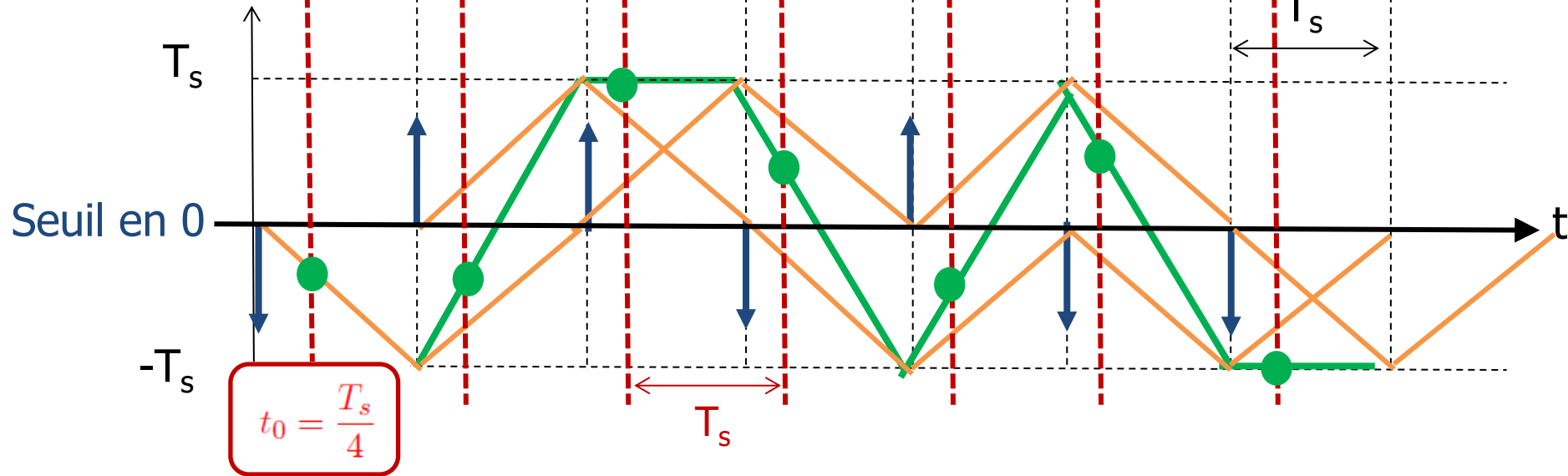
-1

+1

-1

-1

(a_k)



Symboles décidés : -1

-1

+1

+1

-1

+1

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

0

1

1

0

1

0



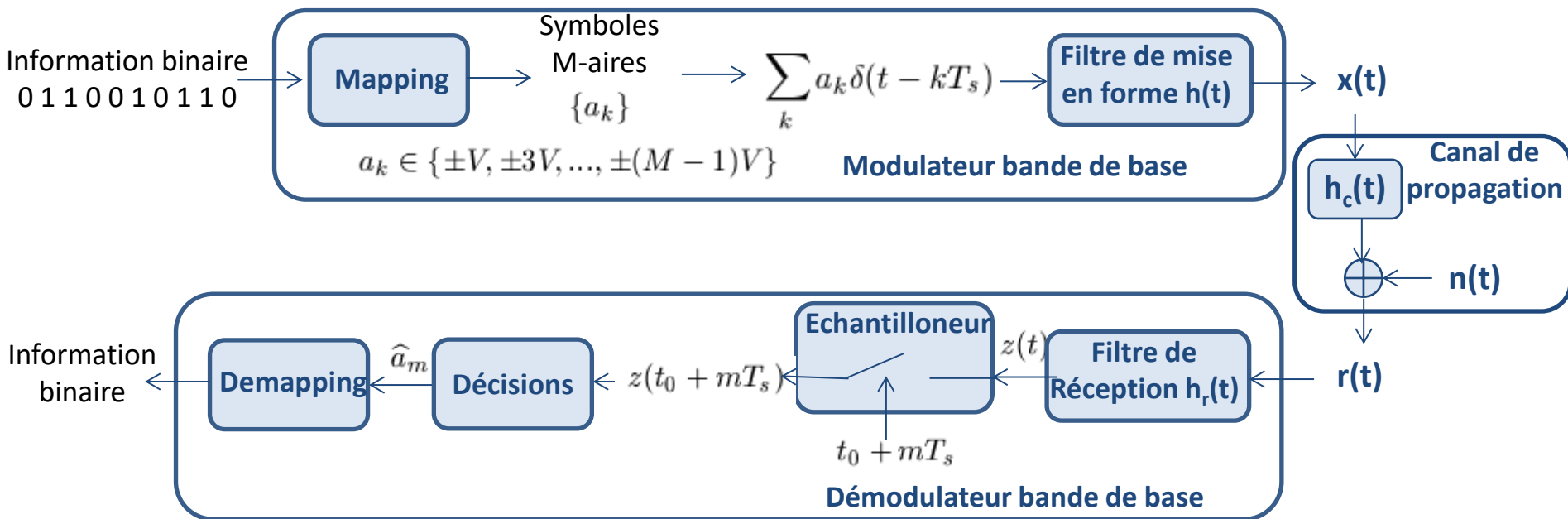
Introduction aux télécommunications

Département sciences du numérique
Première année

Séquence 2

- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation

Critère de Nyquist dans le domaine temporel



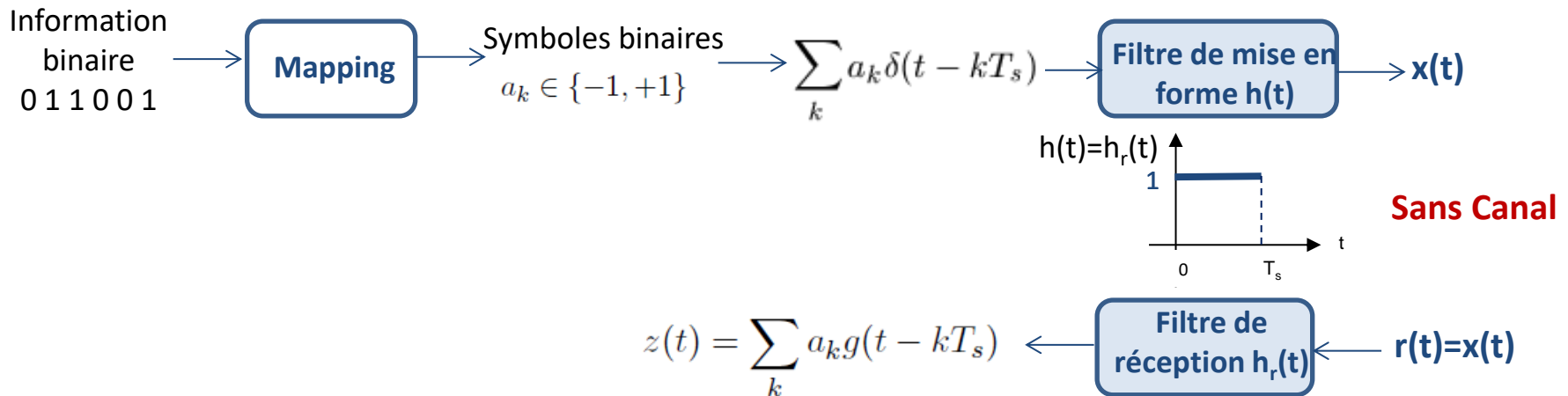
$$z(t_0 + mT_s) = \underbrace{a_m g(t_0)}_{\text{Terme utile}} + \underbrace{\sum_{k \neq m} a_k g(t_0 + (m - k)T_s)}_{\text{ISI (Inter Symbol Interference)}} + \underbrace{w(t_0 + mT_s)}_{\text{Bruit (filtré et échantillonné)}}$$

$$g(t) = h(t) * h_c(t) * h_r(t)$$

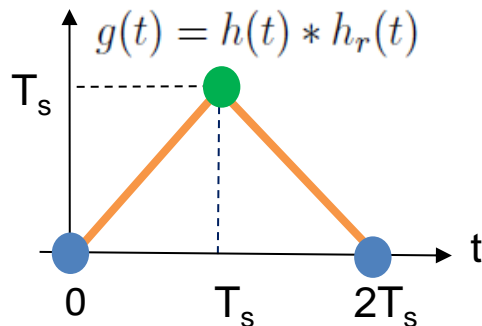
$$\text{ISI} = 0 \iff \begin{cases} g(t_0) \neq 0 \\ g(t_0 + pT_s) = 0 \text{ for } p \in \mathbb{Z}^* \end{cases} \quad \text{Critère de Nyquist}$$

Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple



$$ISI = 0 \iff \begin{cases} g(t_0) \neq 0 \\ g(t_0 + pT_s) = 0 \text{ for } p \in \mathbb{Z}^* \end{cases} \quad \text{Critère de Nyquist}$$



Le critère de Nyquist est satisfait pour $t_0 = T_s$

$$\begin{aligned} g(t_0) &= T_s \\ g(t_0 + T_s) &= g(2T_s) = 0 \\ g(t_0 - T_s) &= g(0) = 0 \end{aligned}$$

Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0

1

1

0

1

0

0

Symboles émis : -1

+1

+1

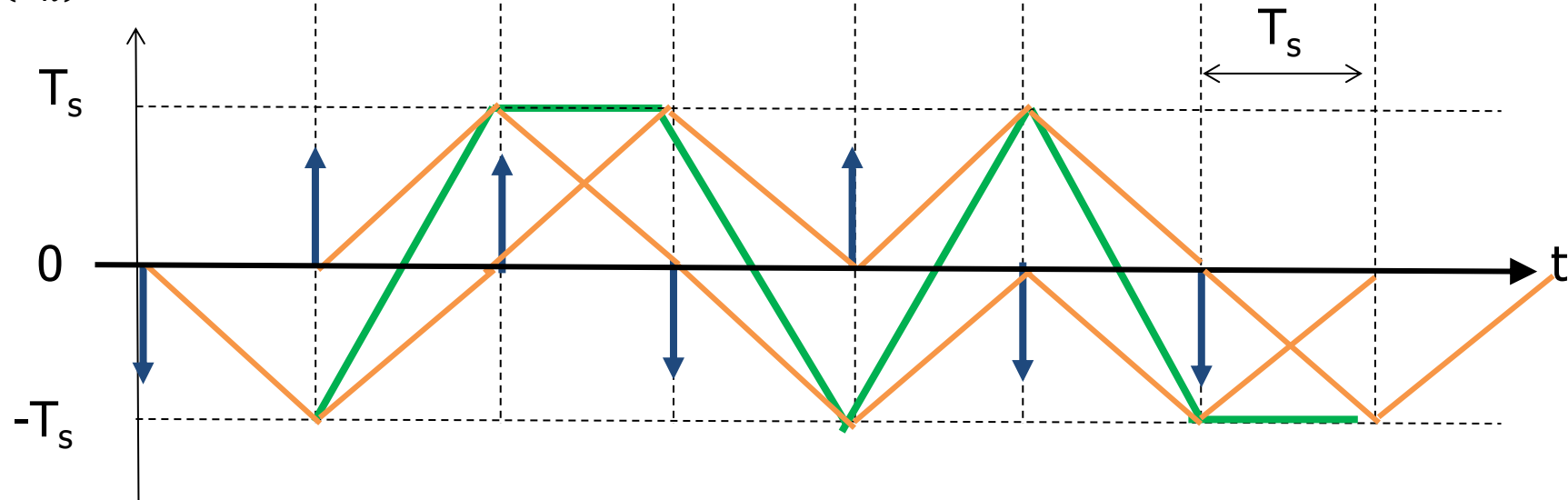
-1

+1

-1

-1

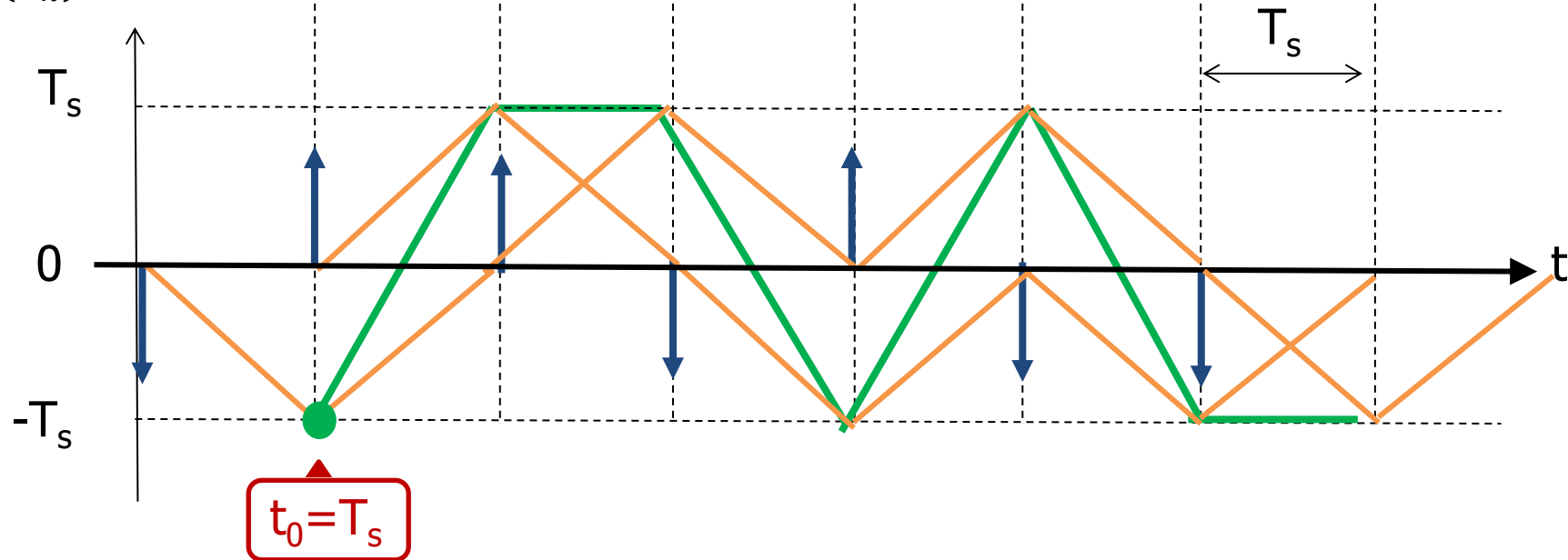
(a_k)



Example

Bits à transmettre : 0

Symboles émis : -1

$$(a_k)$$


Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0

1

1

0

1

0

0

Symboles émis : -1

+1

+1

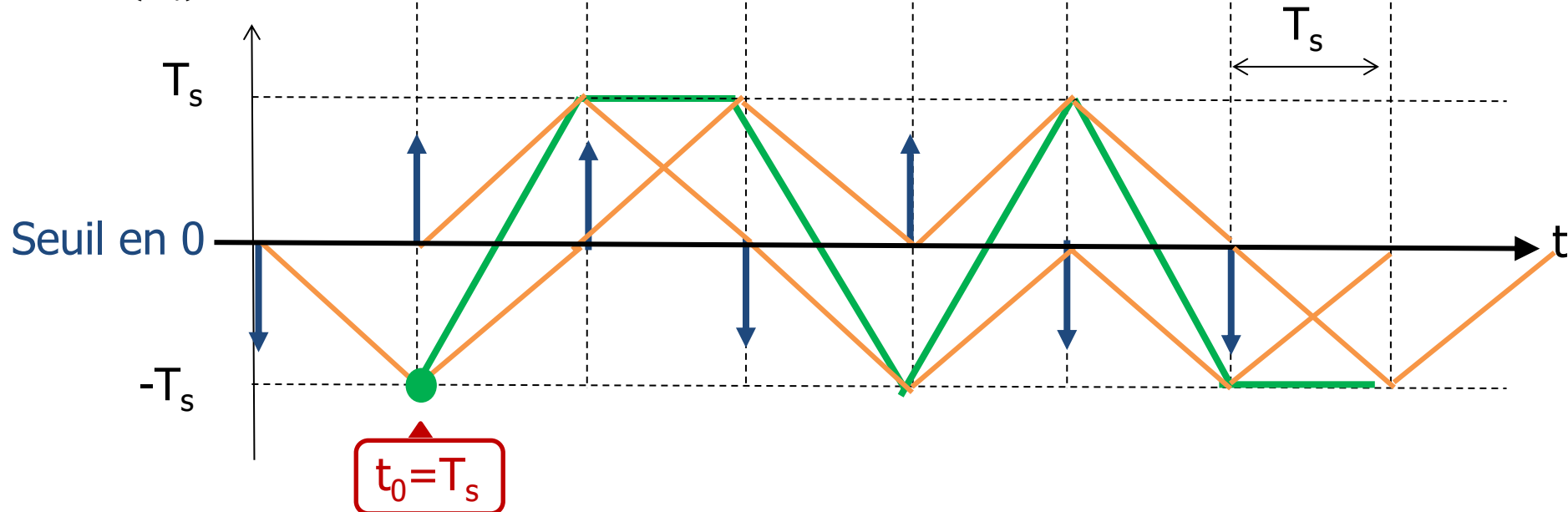
-1

+1

-1

-1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0



Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0

1

1

0

1

0

0

Symboles émis : -1

+1

+1

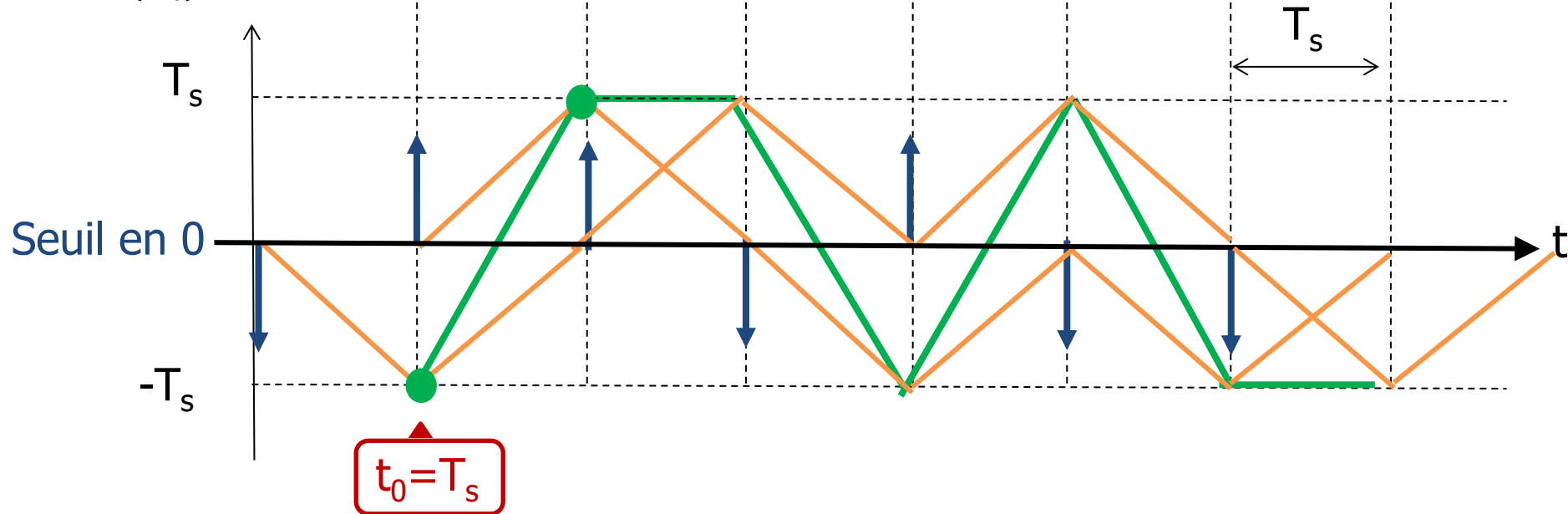
-1

+1

-1

-1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

+1

(\hat{a}_k)

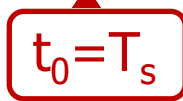
Bits décidés:

0

1



Example



Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0

1

1

0

1

0

0

Symboles émis : -1

+1

+1

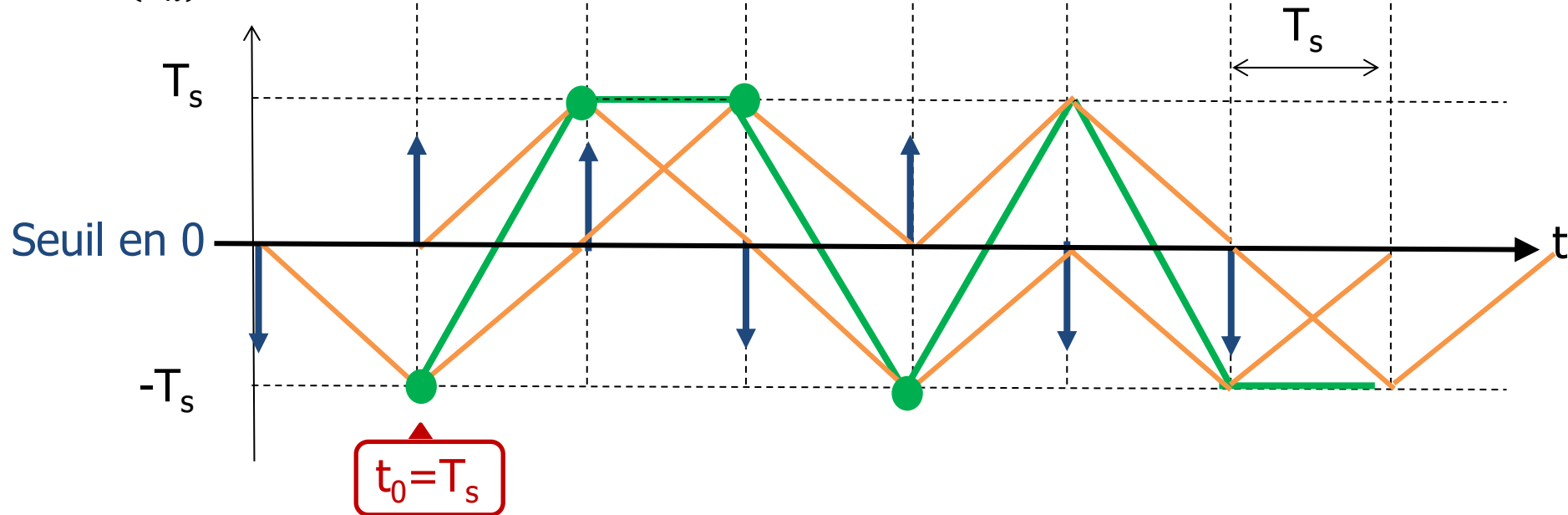
-1

+1

-1

-1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

+1

+1

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

1

1

0



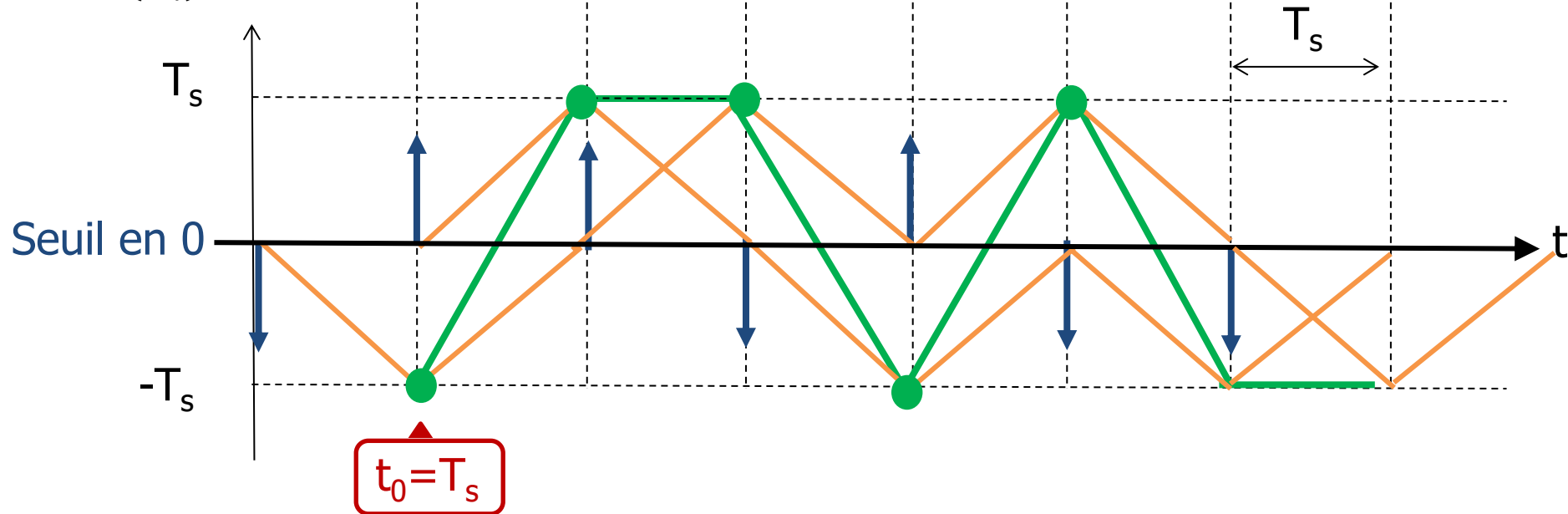
Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0 1 1 0 1 0 0

Symboles émis : -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

+1

+1

-1

+1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

1

1

0

1



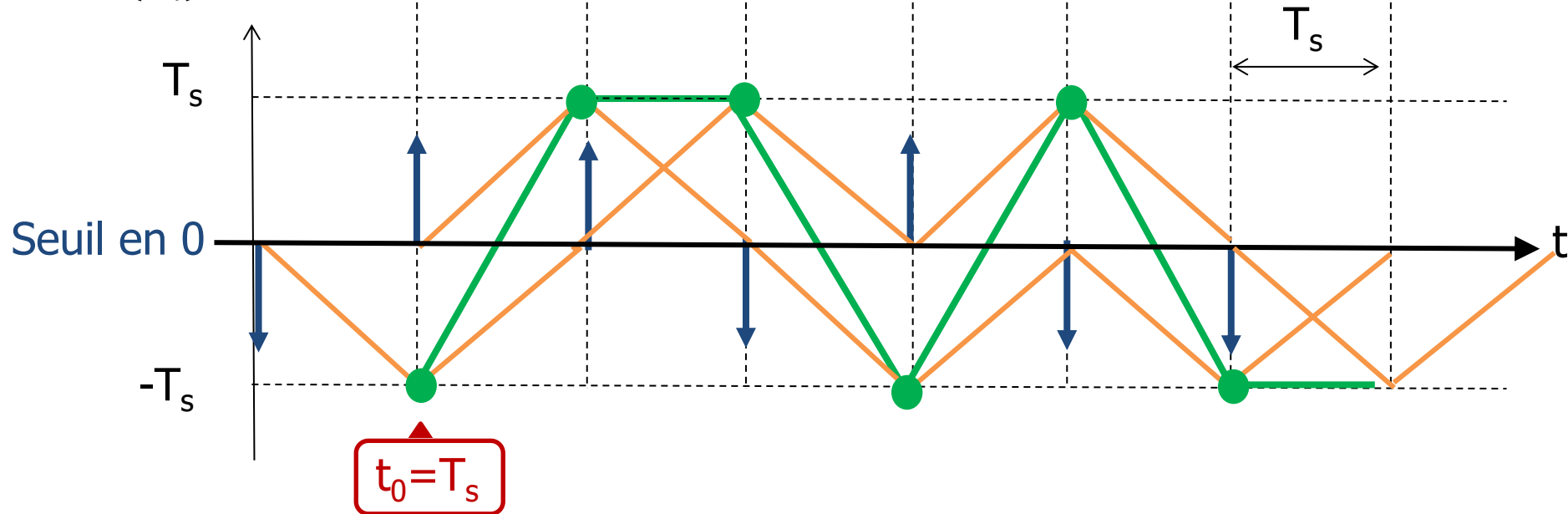
Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0 1 1 0 1 0 0

Symboles émis : -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

+1

+1

-1

+1

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

1

1

0

1

0



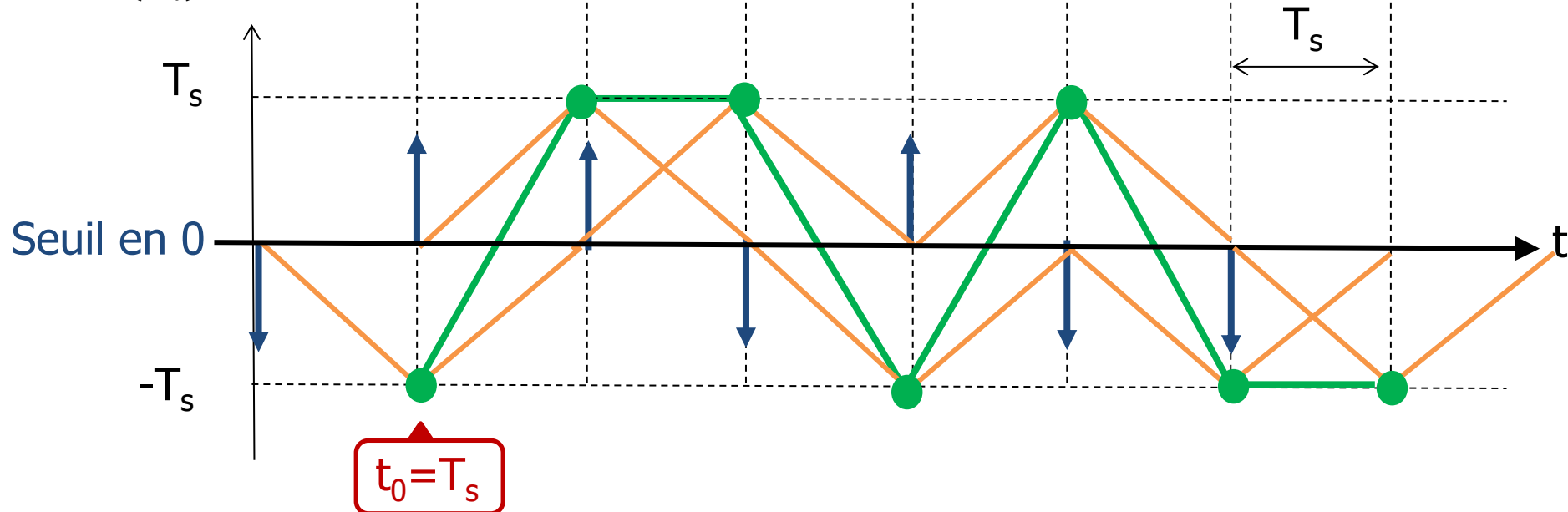
Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0 1 1 0 1 0 0

Symboles émis : -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

+1

+1

-1

+1

-1

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

1

1

0

1

0

0



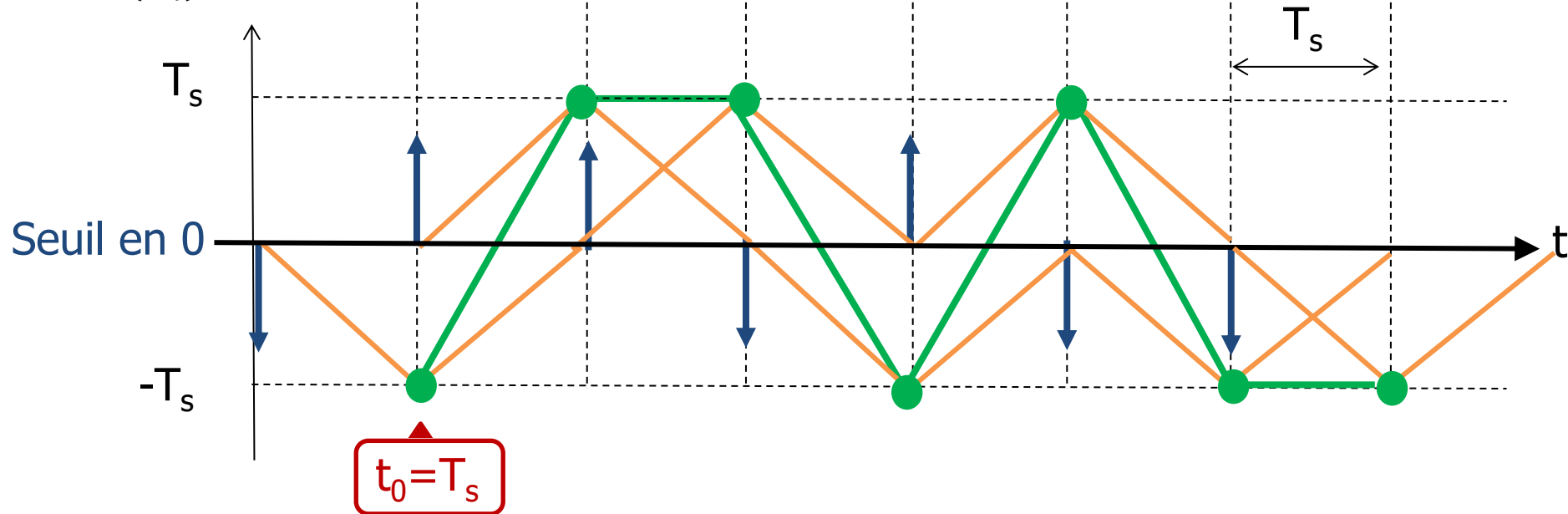
Critère de Nyquist dans le domaine temporel

Exemple

Bits à transmettre : 0 1 1 0 1 0 0

Symboles émis : -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1

(a_k)



Symboles décidés :

-1

+1

+1

-1

+1

-1

-1

(\hat{a}_k)

Bits décidés:

0

1

1

0

1

0

0



TEB=0

Introduction aux télécommunications

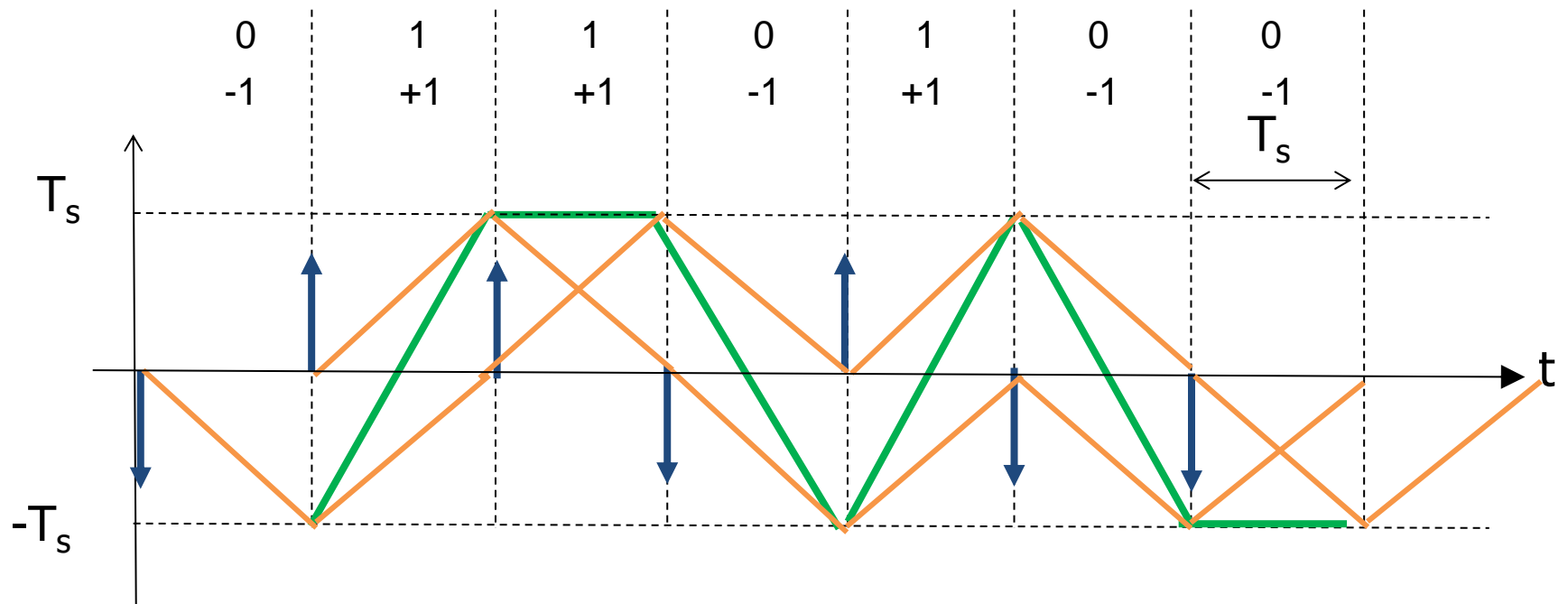
Département sciences du numérique
Première année

Séquence 2

- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation

Diagramme de l'oeil

Exemple



Introduction aux télécommunications

Département sciences du numérique
Première année

Séquence 2

- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation

Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel

$$z(t_0 + mT_s) = \underbrace{a_m g(t_0)}_{\text{Terme utile}} + \underbrace{\sum_{k \neq m} a_k g(t_0 + (m - k)T_s)}_{\text{ISI (Inter Symbol Interference)}} + \underbrace{w(t_0 + mT_s)}_{\text{Bruit (filtré et échantillonné)}}$$

$g(t) = h(t) * h_c(t) * h_r(t)$

$$\text{ISI} = 0 \iff \begin{cases} g(t_0) \neq 0 \\ g(t_0 + pT_s) = 0 \text{ for } p \in \mathbb{Z}^* \end{cases}$$

Critère de Nyquist (domaine temporel)



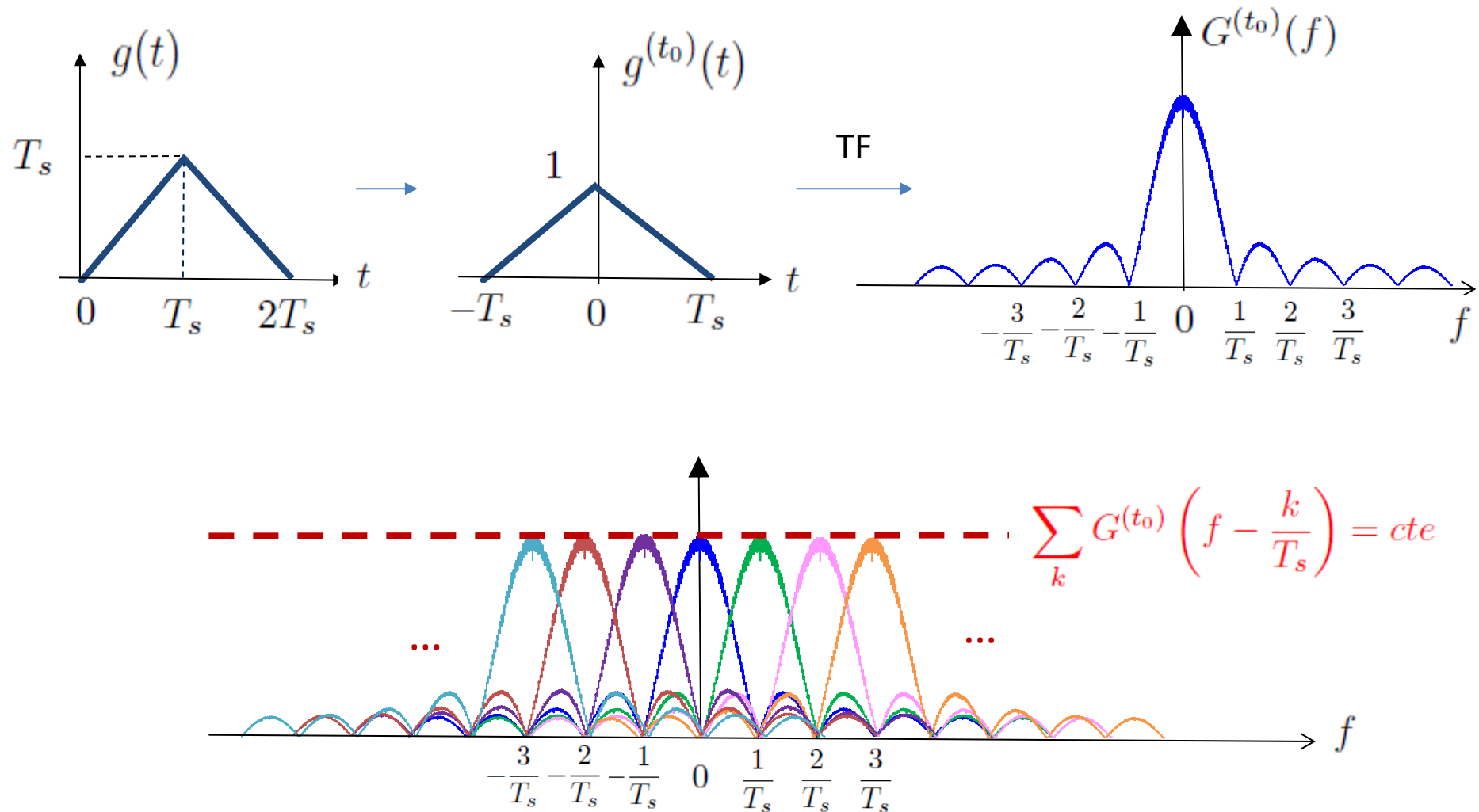
TF

$$\sum_k G^{(t_0)} \left(f - \frac{k}{T_s} \right) = cte \quad \text{avec} \quad G^{t_0}(f) = FT \left[\frac{g(t + t_0)}{g(t_0)} \right]$$

Critère de Nyquist (domaine fréquentiel)

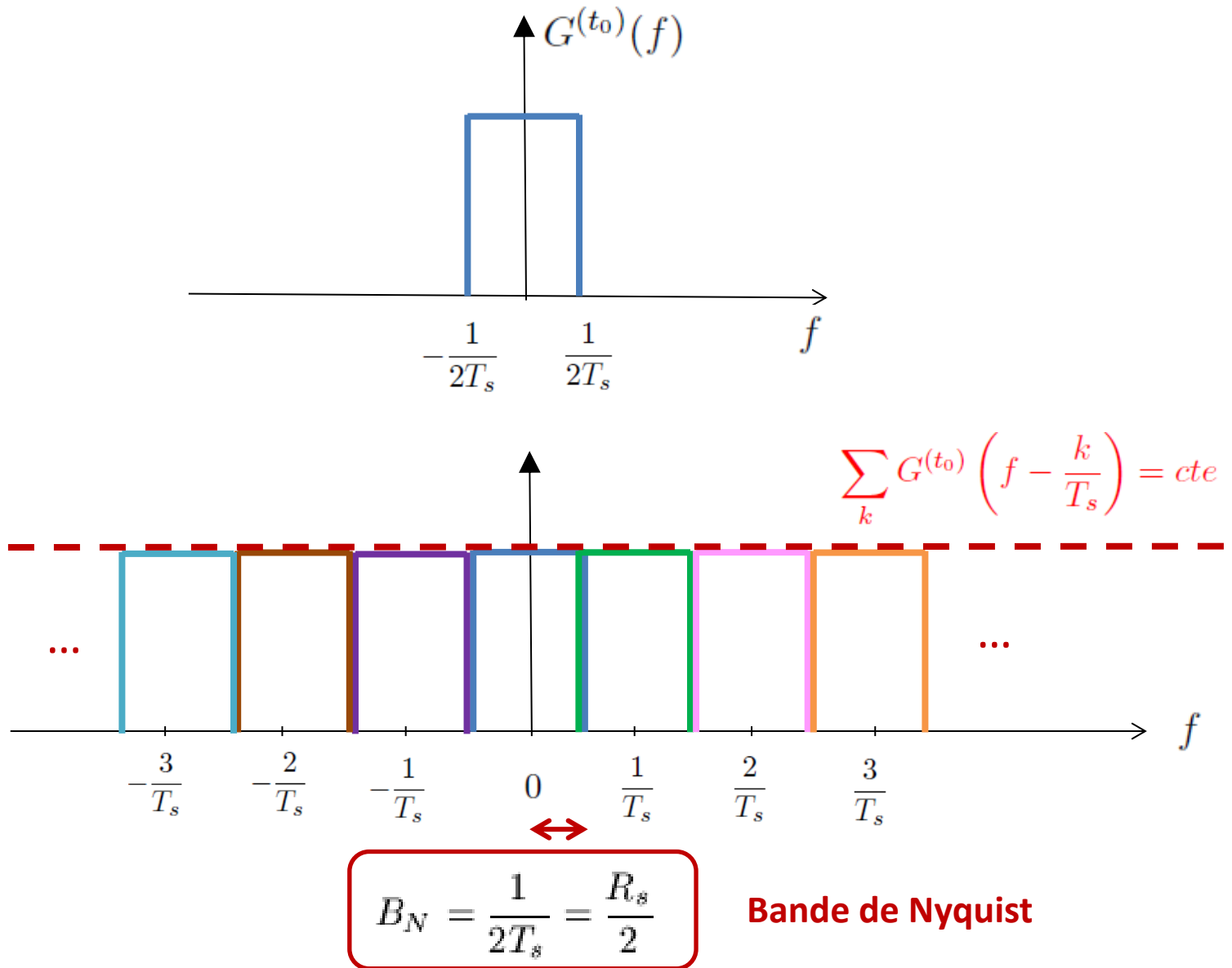
Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel

Exemple 1



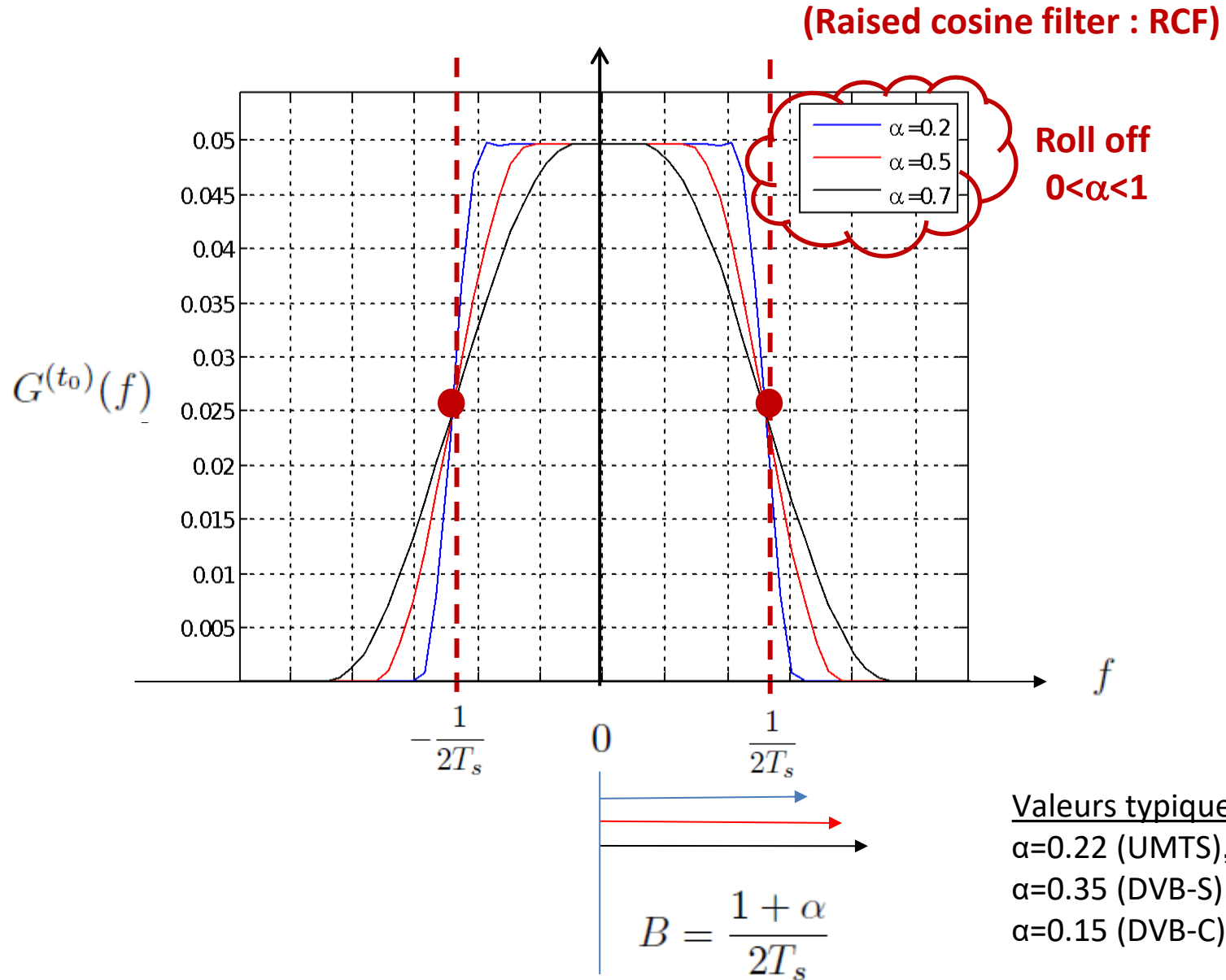
Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel

Exemple 2 – Bande de Nyquist



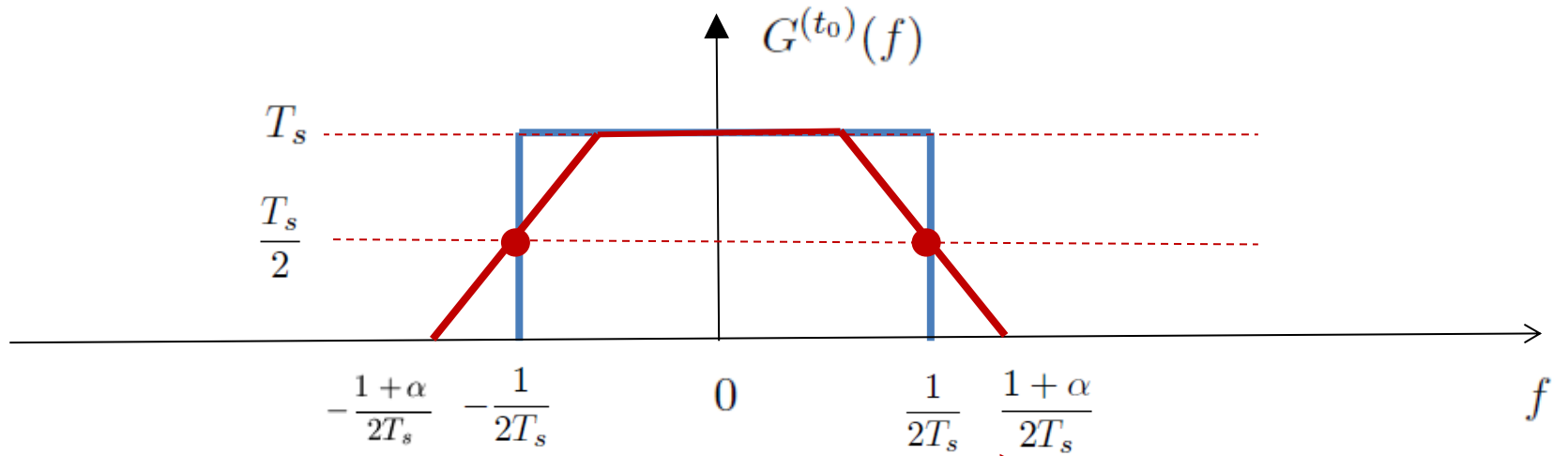
Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel

Exemple 3 : filtre en cosinus surélevé

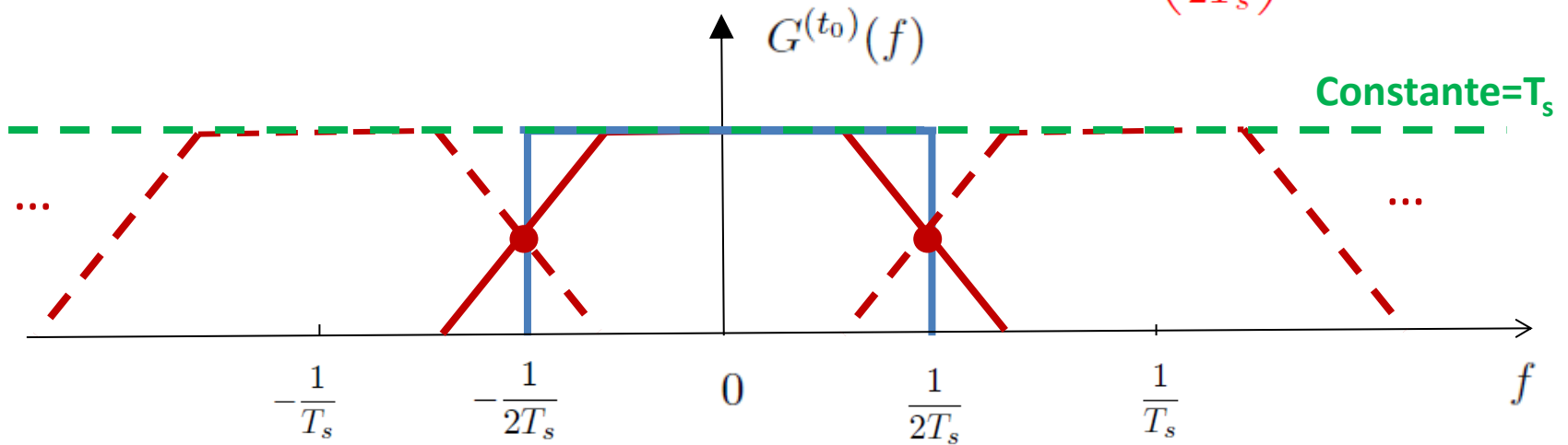


Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel

Exemple 3 : filtre en cosinus surélevé



Extension de bande $\left(\frac{\alpha}{2T_s}\right)$



Introduction aux télécommunications

Département sciences du numérique
Première année

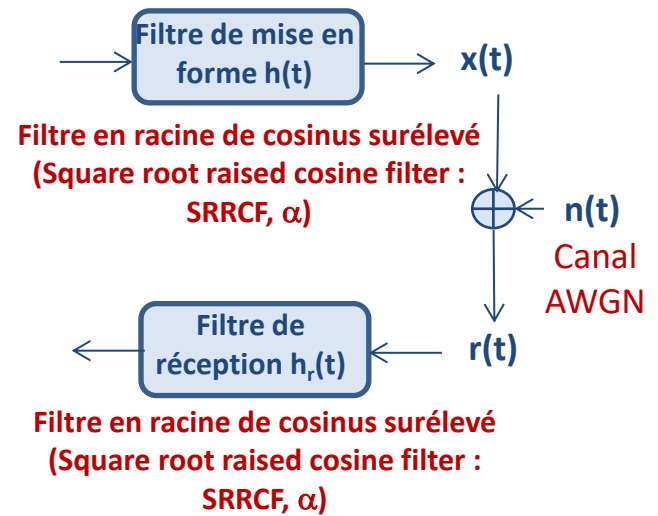
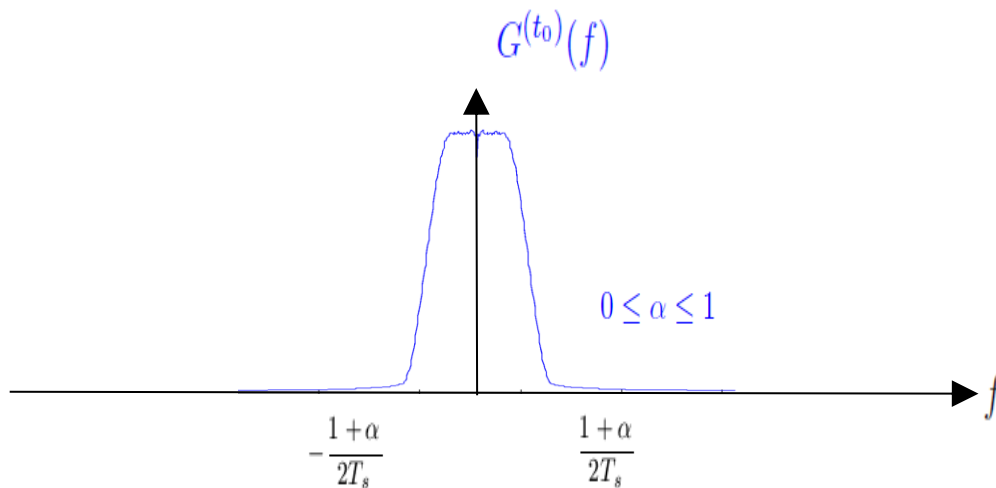
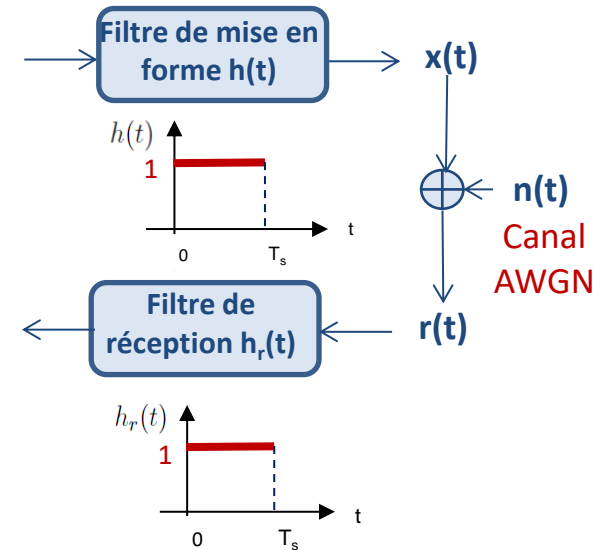
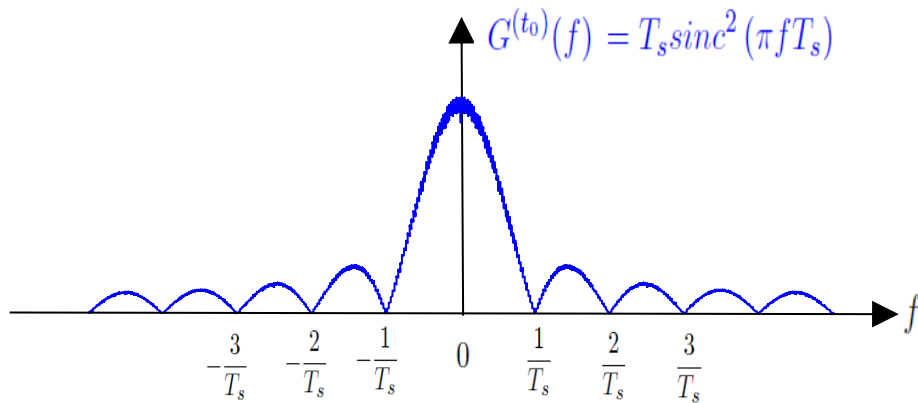
Séquence 2

- 1- Le canal de propagation et sa modélisation,
- 2- Problème de l'interférence entre symboles,
- 3- Critère de Nyquist dans le domaine temporel,
- 4- Diagramme de l'œil,
- 5- Critère de Nyquist dans le domaine fréquentiel,
- 6- Impact du canal de propagation.

Impact du canal de propagation

Canal AWGN

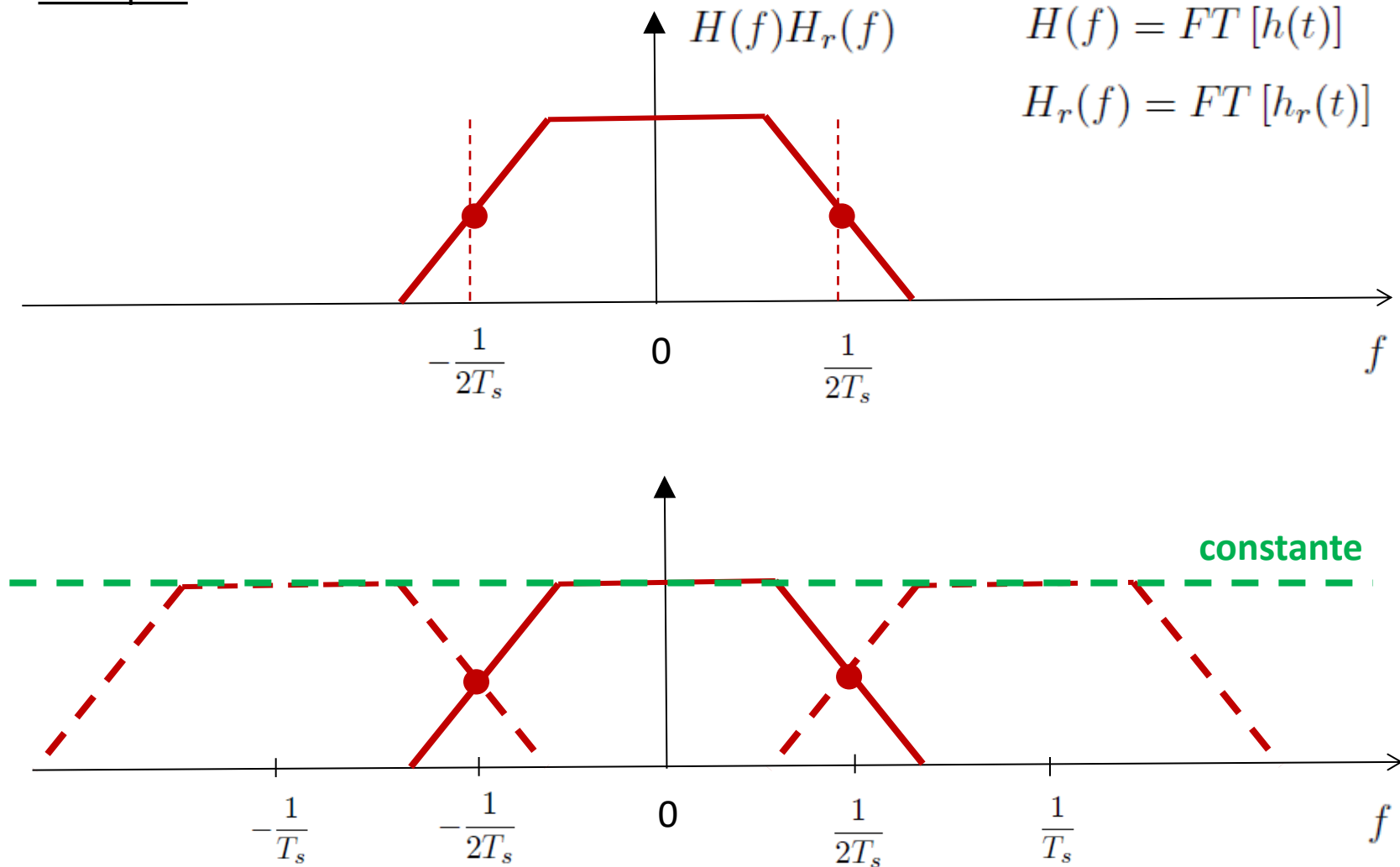
Deux cas où $G^{(t_0)}(f)$ respecte le critère de Nyquist



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

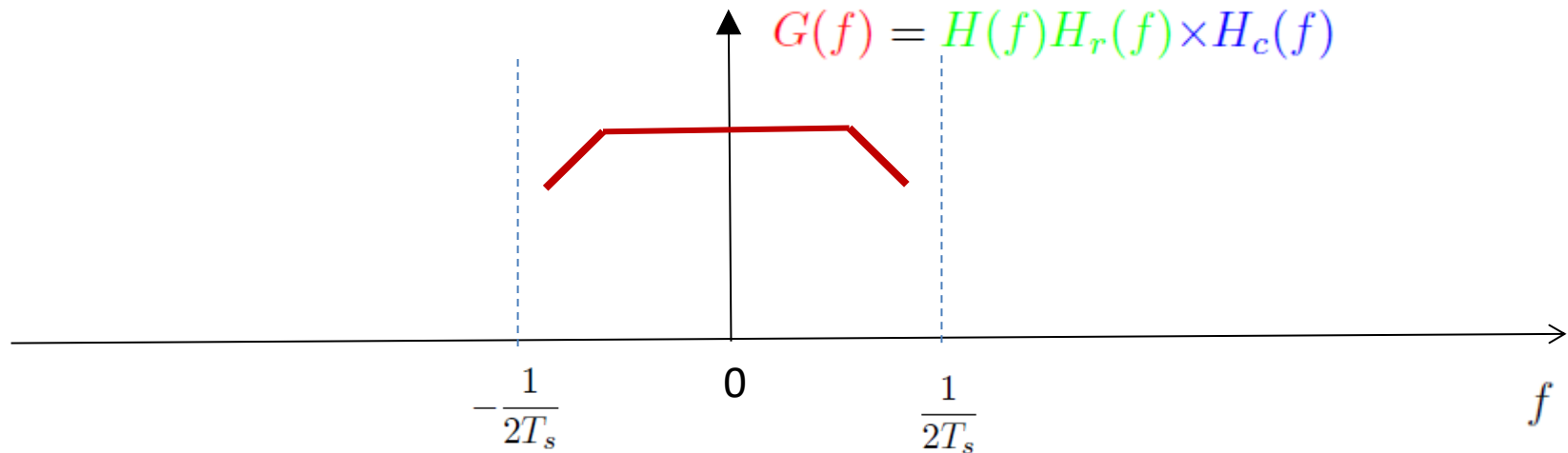
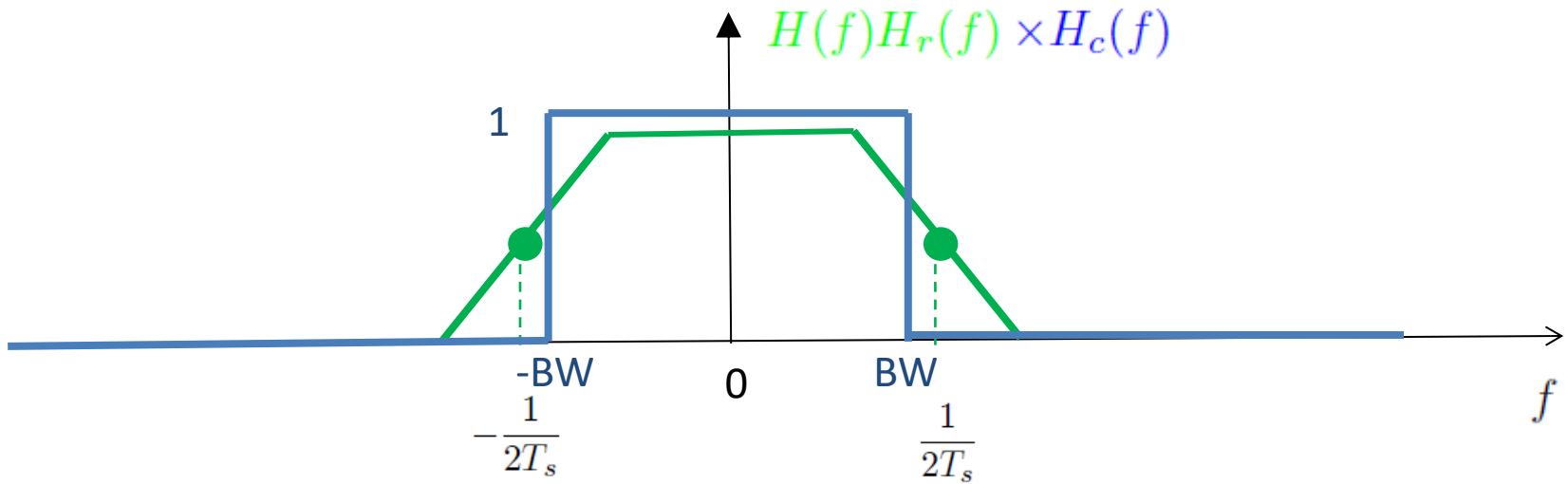
Exemple:



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

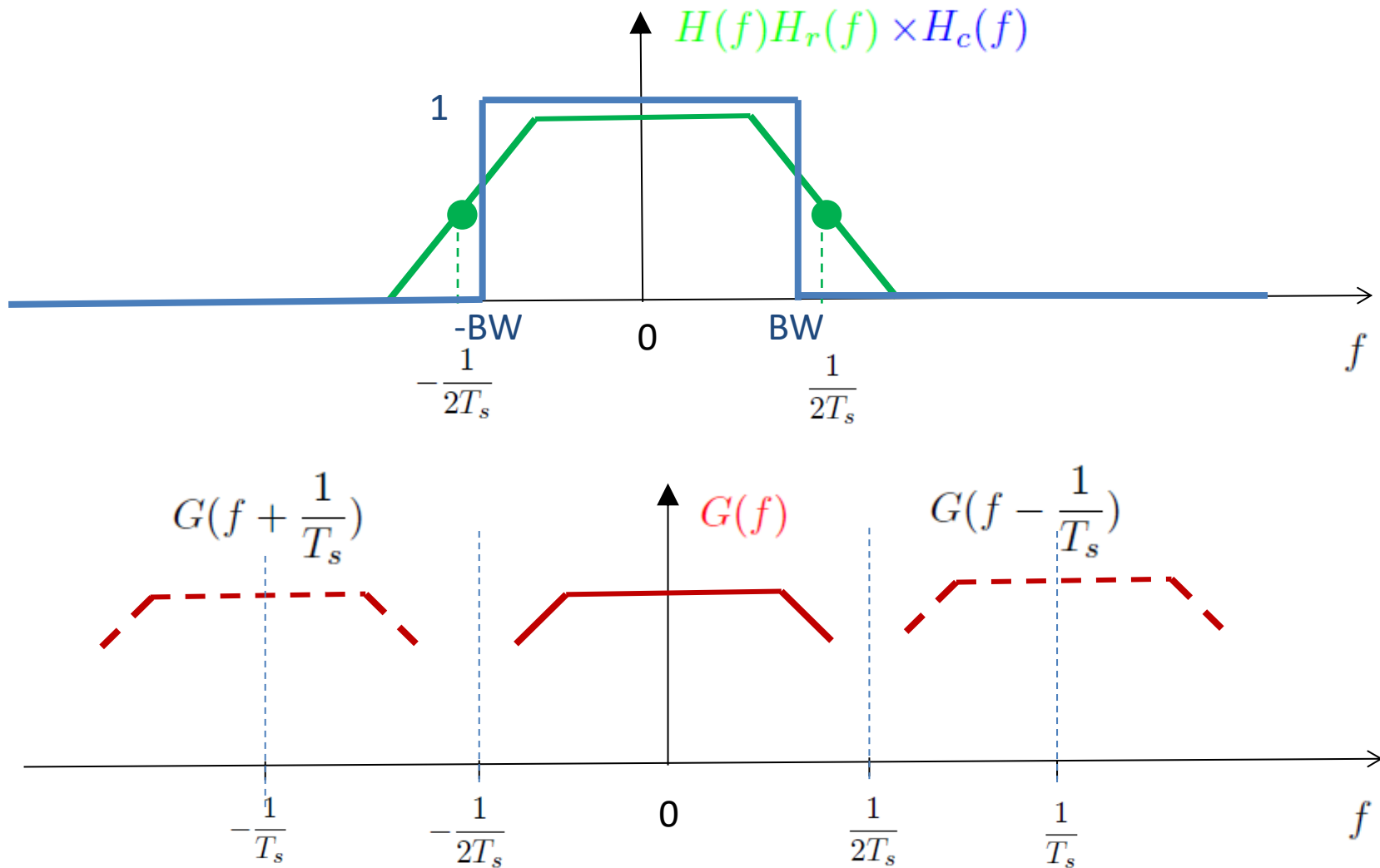
Exemple:



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

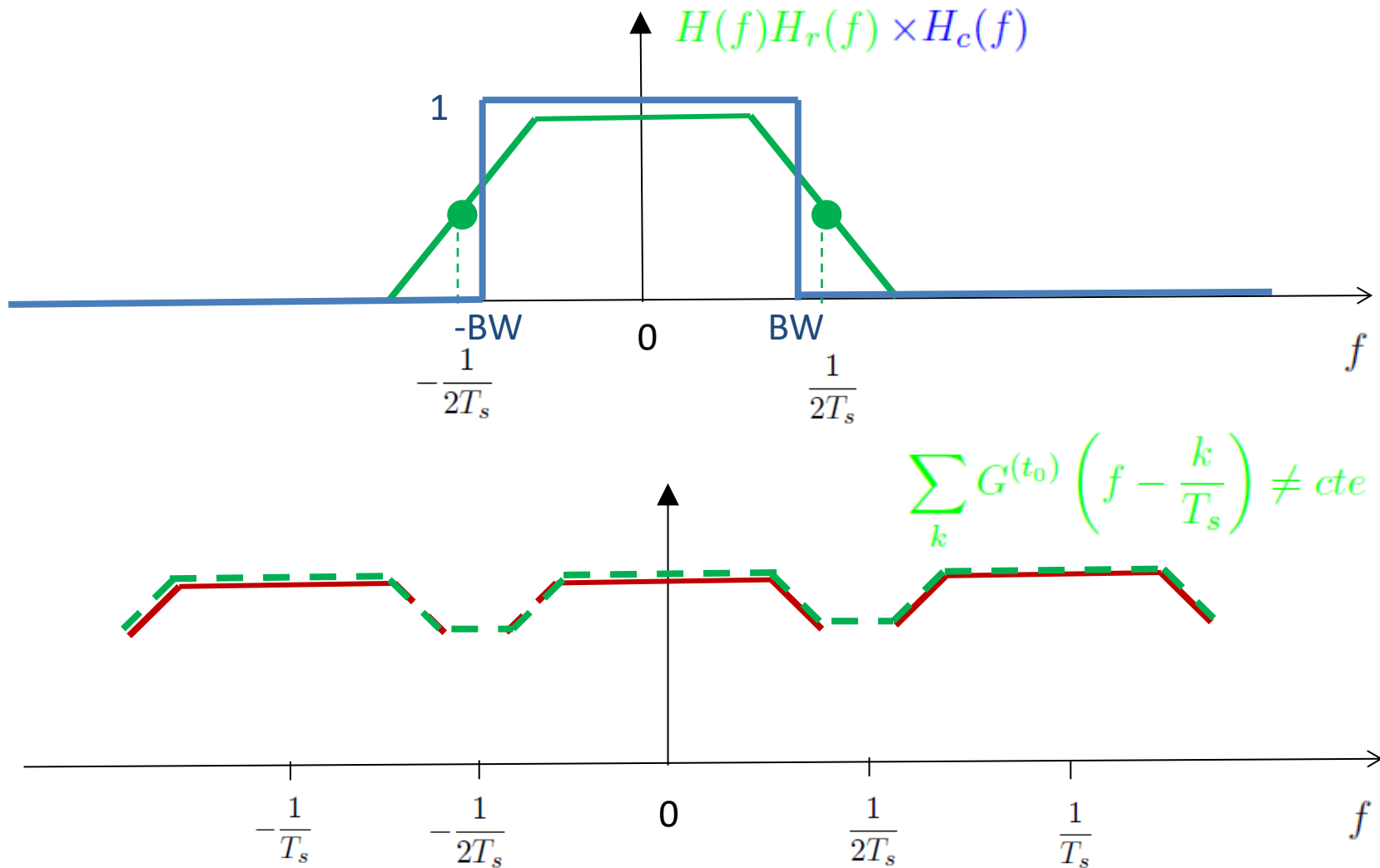
Exemple:



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

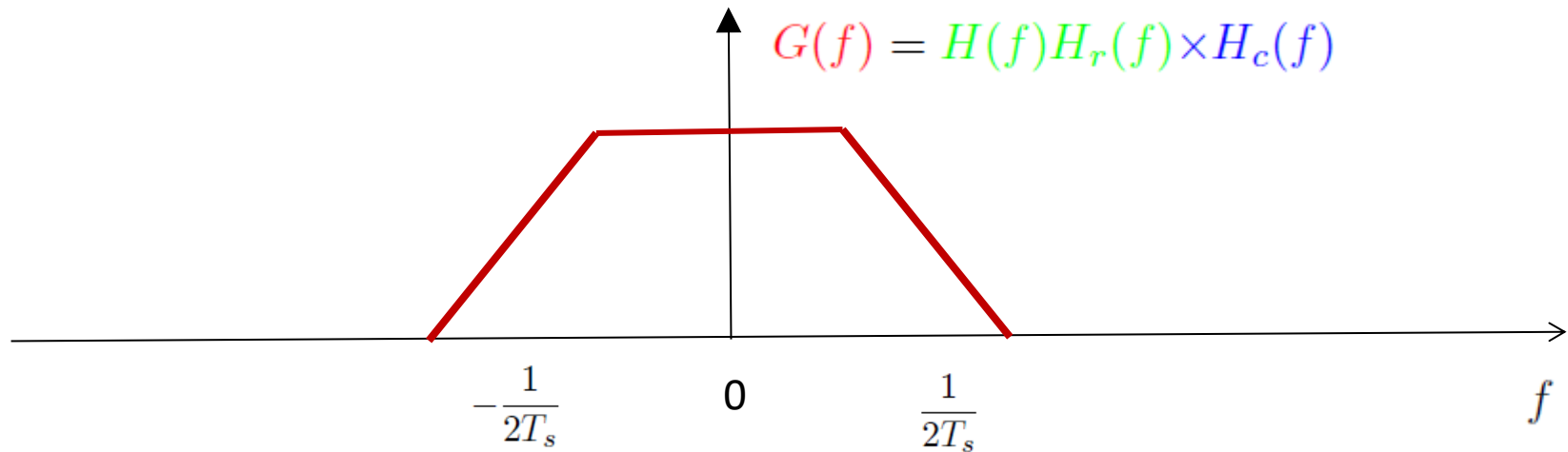
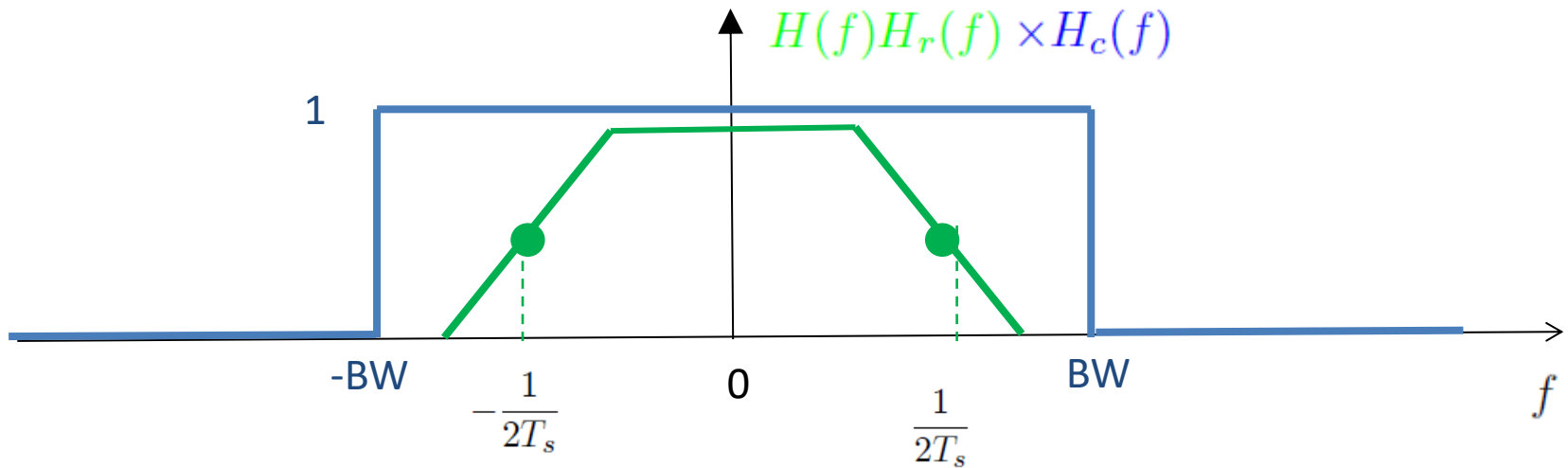
Exemple:



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

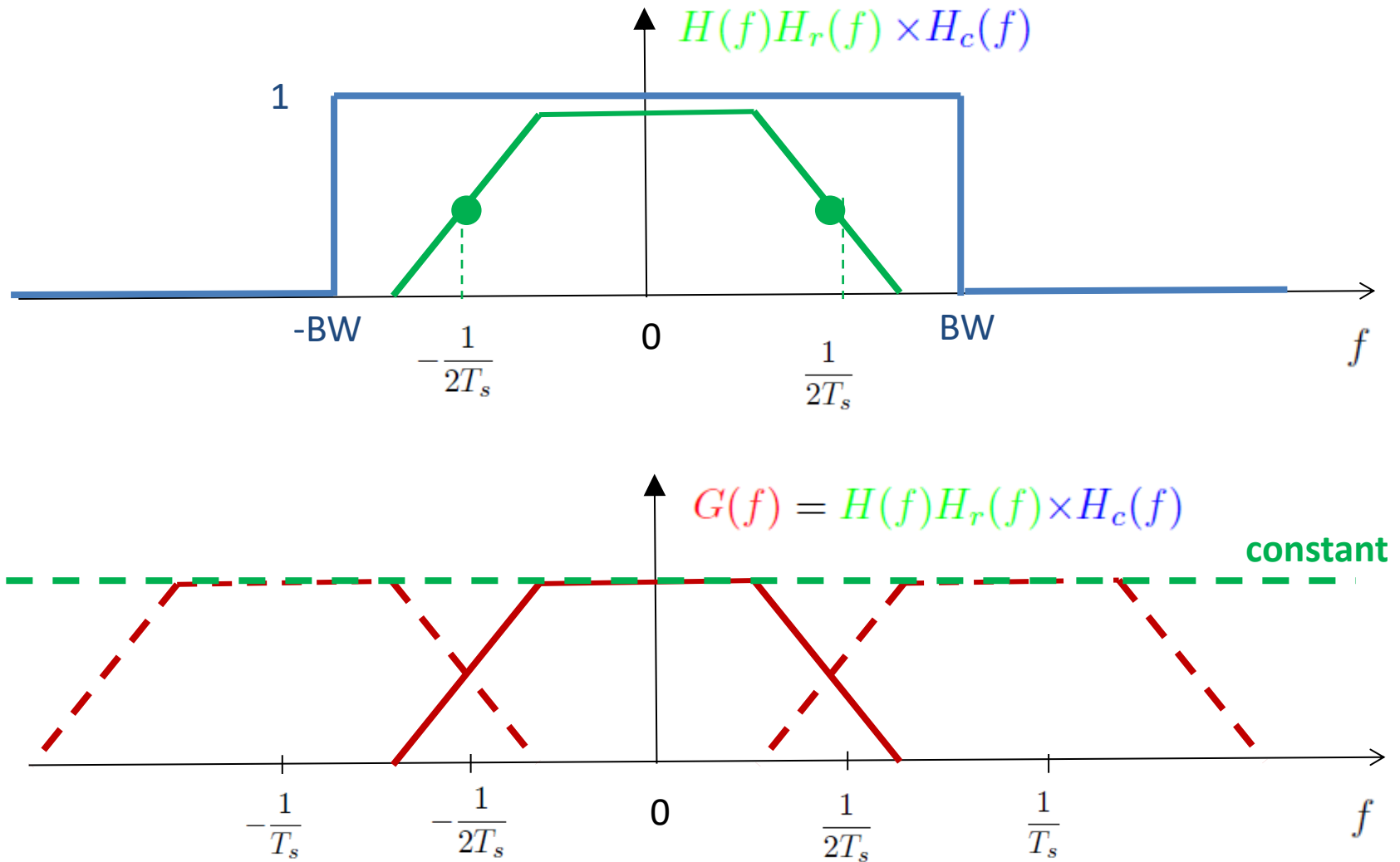
Exemple:



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

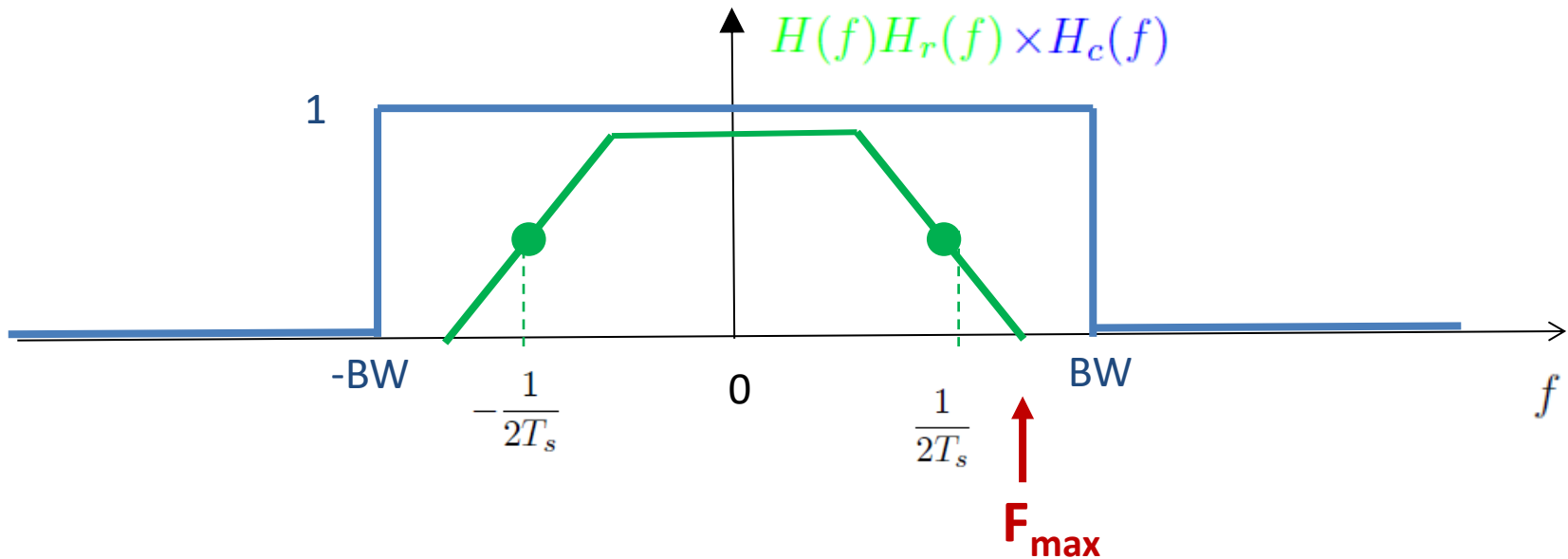
Exemple:



Impact du canal de propagation

Canal AWGN à bande limitée

Exemple:



Si $BW > F_{\max}$ un canal AWGN à bande limitée BW
Permet de continuer à respecter le critère de Nyquist

Mais, comme $F_{\max} = kR_s$, alors $R_s < \frac{BW}{k}$ pour continuer à respecter le critère de Nyquist

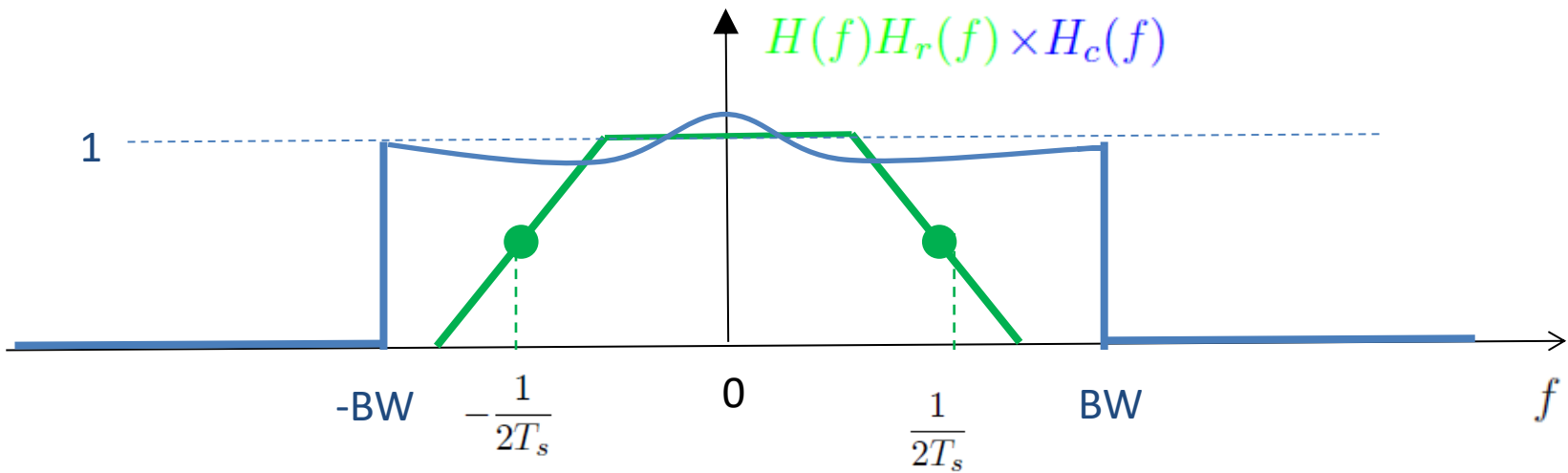
Le débit symbole permettant de vérifier le critère de Nyquist est limité

Dépend des filtres de la chaîne.

Impact du canal de propagation

Canal sélectif en fréquences

Exemple :



- Le critère de Nyquist n'est plus vérifié
- D'autres méthodes doivent être utilisées : égalisation, ofdm ... (voir en 2A)

