

Faculté Polytechnique

Communications analogiques et numériques

Partie I - Introduction aux télécommunications

Version 1.0.

veronique.moeyaert@umons.ac.be

sébastien.bette@umons.ac.be

Formation des IG en télécommunications

- 1^{er} Master Informatique & Gestion
 - **Les deux cours sont dans la même UE MAIS deux examens distincts en juin**
 - **Communications Analogiques et Numériques**
 - 2 ECTS (18h cours et exercices + 2 labos)
 - Titulaire : V. Moeyaert
 - Co-titulaire : S. Bette
 - Exercice coté durant le quadrimestre + examen oral en session
 - **Réseaux Informatiques (en commun avec les BAB3 Elec)**
 - 4 ECTS
 - Titulaire : S.Bette

Introduction – Table des matières

- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

Introduction – Table des matières

- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

Définition de l'UIT (Union Internationale des Télécommunications)

- UIT = ITU = International Telecommunications Unions
- Télécommunications = « Toute transmission, émission ou réception de signes, de signaux, d'écrits ou d'images, de sons ou de renseignements de toute nature par fil, radioélectricité, optique ou autres systèmes électromagnétiques. »
- Racines mixtes : préfixe grec 'tele', signifiant **loin**, et du latin 'communicare', signifiant **partager**.
- Le mot 'télécommunication' a été utilisé pour la première fois en 1904 par Edouard Estaunié, dans son 'Traité pratique de télécommunication électrique', pour désigner les multiples réseaux créés tout au long du 19^{ème} siècle pour assurer la diffusion des signaux écrits et sonores.



Edouard Estaunié,
directeur de l'École
de 1901 à 1910

Un mot nouveau :
« télécommunication »

« J'ai dû ajouter un mot nouveau à un glossaire déjà trop riche au gré de nombreux électriciens. J'espère qu'on voudra bien me le pardonner. Les mots naissent dans les sciences neuves, comme les plantes au printemps. Il faudra s'y résigner, et il n'y a que demi-mal, puisque l'été qui doit suivre se chargera d'élaguer les mauvaises pousses. »

Edouard Estaunié
Traité pratique de télécommunication
électrique

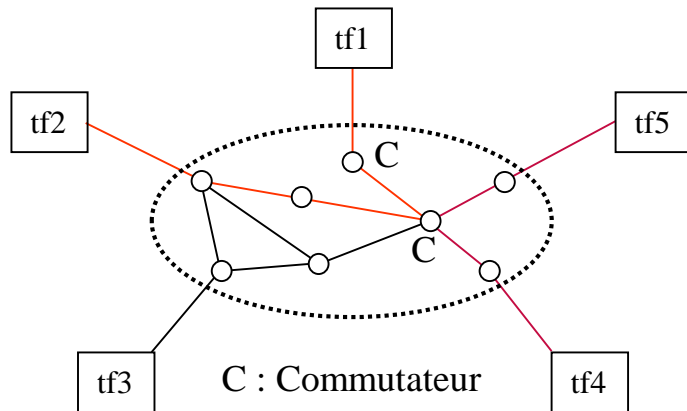
<http://www.telecom-paristech.fr/telecom-paristech/ecole/histoire-ecole/1888-lecole-professionnelle-des-postes-et-telegraphes.html>

Définition

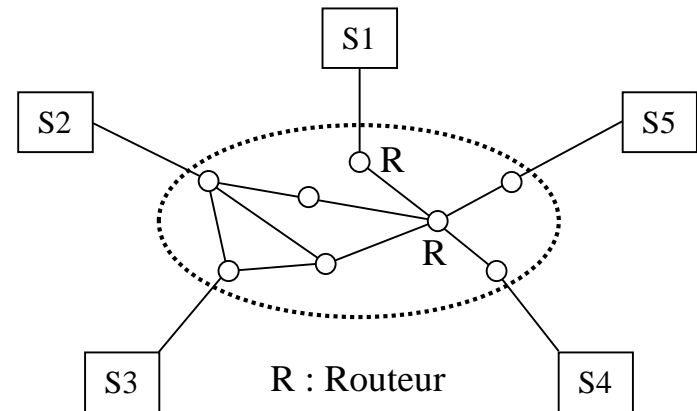
Les télécommunications au sens large comprennent l'ensemble des moyens techniques nécessaires à l'acheminement aussi fidèle et fiable que possible d'informations entre deux points a priori quelconques, à une distance quelconque, avec des coûts raisonnables.

- **moyens techniques** : infrastructure permettant de satisfaire le besoin de communication inhérent à tout être humain
- **informations** : parole, musique, images fixes ou mobiles, textes, données, ...
- **fidélité** : transmission sans pertes et sans altérations → transparence malgré les inévitables imperfections et perturbations
- **fiabilité** : service disponible en toute circonstance malgré des pannes partielles imprévisibles et inévitables
- **deux points quelconques** : réseau à **commutation** (→ création de liaisons temporaires à la demande)
- **distance quelconque** : problème de **transmission** (→ relais intermédiaires)
- **coûts raisonnables** : compromis entre coûts et qualité

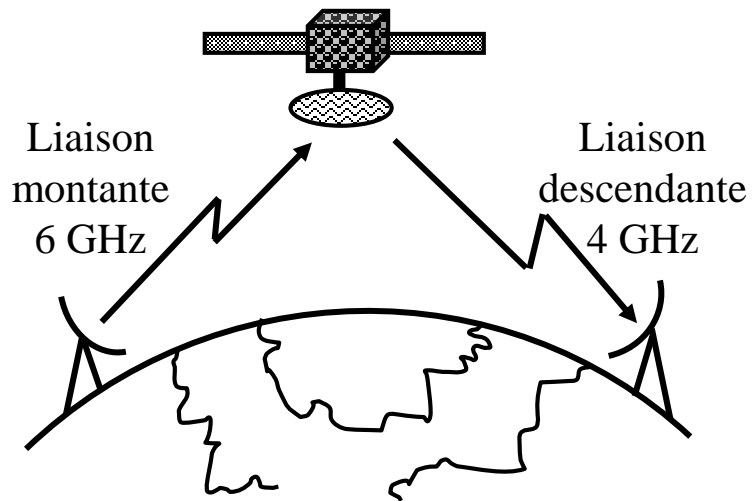
Exemples



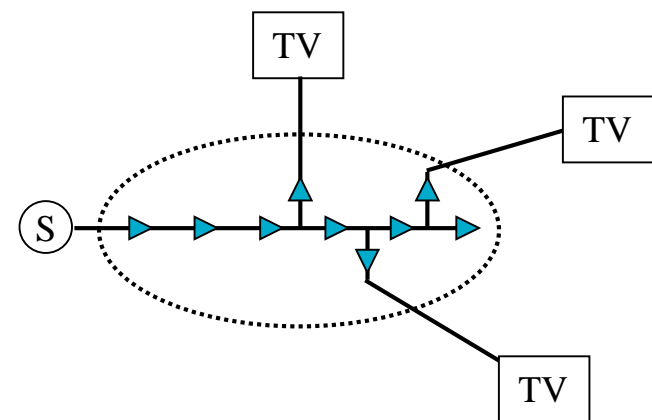
Réseau téléphonique



Réseau Internet



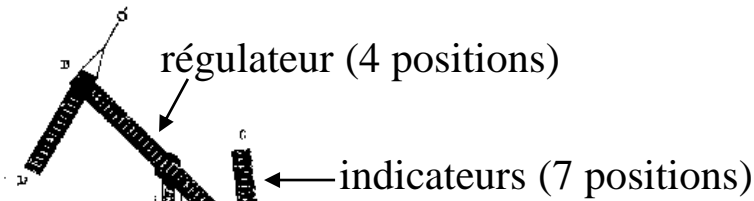
Liaison satellite



Réseau Télédistribution

Quelques dates (1)

- 1793 : Télégraphie optique de Claude Chappe



Sigaux CHAPPE

1	↗	24	↖	47	↗	70	↖↗↖
2	↘	25	↖	48	↗↗↗	71	↖↗↖↗
3	↙	26	↖	49	↗↗↗↗	72	↖↗↖↗↖
4	↘	27	↖	50	↗↗↗↗↗	73	↖↗↖↗↖↗
5	↙	28	↖	51	↗↗↗↗↗↗	74	↖↗↖↗↖↗↖
6	↘	29	↖	52	↗↗↗↗↗↗↗	75	↖↗↖↗↖↗↖↗
7	↙	30	↖	53	↗↗↗↗↗↗↗↗	76	↖↗↖↗↖↗↖↗↖
8	↘	31	↖	54	↗↗↗↗↗↗↗↗↗	77	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
9	↙	32	↖	55	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	78	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
10	↘	33	↖	56	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	79	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
11	↙	34	↖	57	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	80	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
12	↘	35	↖	58	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	81	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
13	↙	36	↖	59	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	82	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
14	↘	37	↖	60	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	83	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
15	↙	38	↖	61	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	84	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
16	↘	39	↖	62	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	85	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
17	↙	40	↖	63	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	86	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
18	↘	41	↖	64	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	87	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↖
19	↙	42	↖	65	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	88	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
20	↘	43	↖	66	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	89	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
21	↙	44	↖	67	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	90	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗
22	↘	45	↖	68	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	91	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖
23	↙	46	↖	69	↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗↗	92	↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖↗↖

Sémaphore



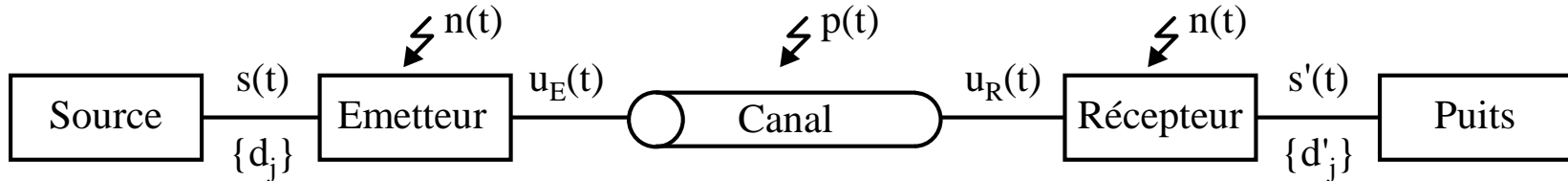
Quelques dates (2)

- 1837 : Télégraphie électrique (Samuel MORSE)
 - 1858 : Premier câble unifilaire à travers l'Atlantique
 - 1876 : Début du téléphone (Graham BELL)
 - 1889 : Commutation téléphonique automatique (Almon STOWGER)
 - 1901 : Télégraphie par ondes d'Angleterre à Terre-Neuve (Guglielmo MARCONI – Bologne)
 - 1907 : Invention de la triode
 - 1948 : Invention du transistor
 - 1956 : Premier câble transatlantique téléphonique (51 répéteurs – câble coaxial – TAT-1)
 - 1965 : Premier satellite géostationnaire : Early Bird (Intelsat I)
 - 1975 : Premières liaisons expérimentales par fibres optiques (45 Mbit/s)
 - 1988 : Premier câble transatlantique optique (TAT-8)
 - 1993 : Premiers réseaux de GSM
- [Pères fondateurs de la TSF -EBU.pdf](#)

Introduction – Table des matières

- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

Schéma de principe d'une liaison de télécommunications



Source : une source est :

- continue si elle exprime des nuances d'une infinie subtilité. L'information produite est **analogique**
- discrète si elle produit de l'information à partir d'un nombre fini n de caractères qui, par leurs combinaisons, forment des messages. L'information produite est **numérique**.

Canal de transmission

L'énergie (et donc l'information) est transportée par une onde électromagnétique. On distingue :

les lignes (propagation guidée)

- paire symétrique
- paire coaxiale
- fibre optique

les transmissions par ondes

- radiodiffusion : rayonnement omnidirectionnel
- faisceau hertzien : rayonnement plus ou moins étroitement dirigé

Les canaux utilisés en télécommunications présentent les défauts suivants :

- ils atténuent et déforment les signaux
- ils introduisent des perturbations
- ils sont chers et doivent être utilisés aussi économiquement que possible

Emetteur : transpose l'information sur un signal $u_E(t)$, toujours analogique, adapté au canal de transmission

Récepteur : extrait, de manière optimale, l'information à partir du signal reçu $u_R(t)$

Transformée de Fourier

Tout signal à énergie finie $s(t)$ possède une transformée de Fourier qui est une fonction $S(f)$, généralement **complexe**, de la variable f (fréquence).

$S(f)$ est définie par la relation :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt = |S(f)| e^{j\theta(f)}$$

La transformation inverse s'écrit :

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df$$

Notation : $s(t) \leftrightarrow S(f)$

Interprétation physique : Si $s(t)$ est réel $\rightarrow S(-f) = S^*(f)$

$$\begin{aligned} s(t) &= \int_{-\infty}^0 S(f) e^{j2\pi ft} df + \int_0^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df = \int_0^{\infty} [S(f) e^{j2\pi ft} + S(-f) e^{-j2\pi ft}] df \\ &= \int_0^{\infty} 2 \operatorname{Re} \{ S(f) e^{j2\pi ft} \} df = \int_0^{\infty} 2 \operatorname{Re} \{ |S(f)| e^{j(2\pi ft + \theta(f))} \} df = 2 \int_0^{\infty} |S(f)| \cos(2\pi ft + \theta(f)) df \end{aligned}$$

Représentation spectrale

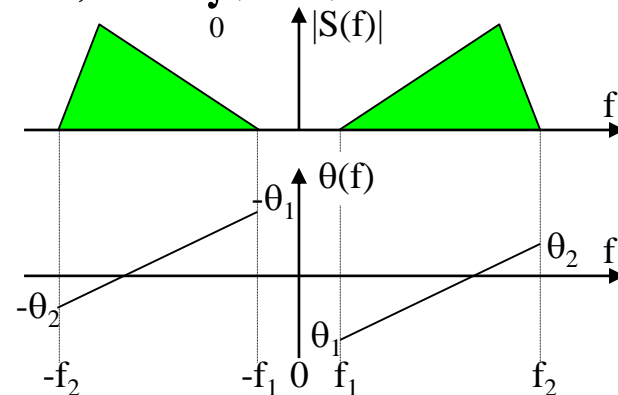
$|S(f)|$: spectre d'amplitude

$\theta(f)$: spectre de phase

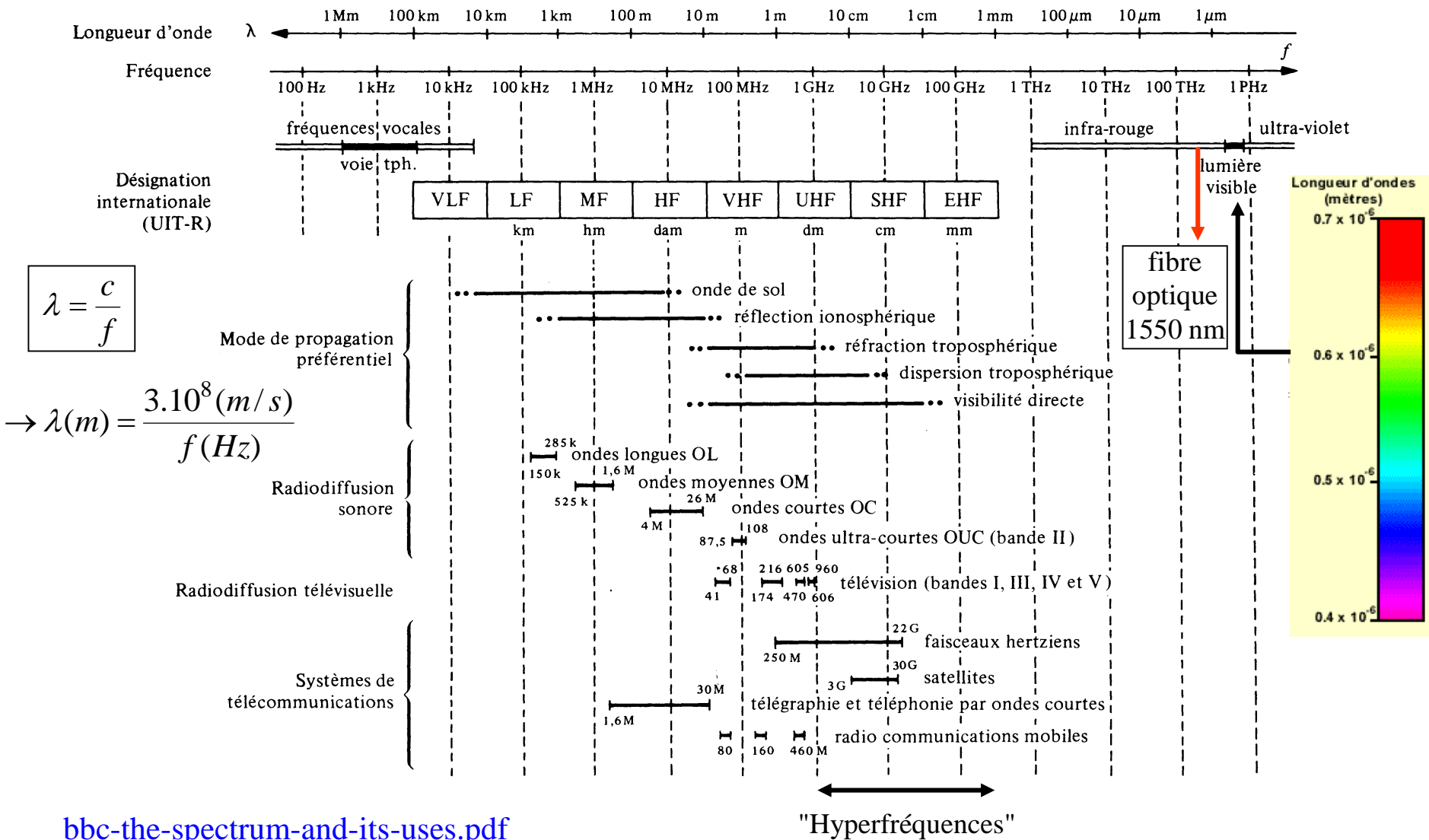
Pour $s(t)$ réel,

$|S(f)| = |S(-f)|$ (fonction paire)

$\theta(f) = -\theta(-f)$ (fonction impaire)

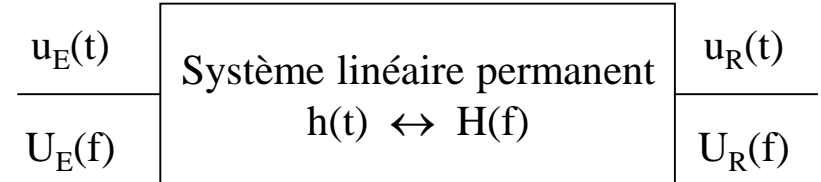


Spectre électromagnétique



bbc-the-spectrum-and-its-uses.pdf

Canal de transmission idéal



$h(t)$: réponse impulsionnelle du système

$H(f)$: fonction de transfert $H(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)}$

Relations :

$$u_R(t) = u_E(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_E(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

$$U_R(f) = U_E(f) \cdot H(f)$$

Transmission sans distorsion : $u_R(t) = A u_E(t - t_d)$

$$U_R(f) = A U_E(f) e^{-j2\pi f t_d} = U_E(f) H(f)$$

Une transmission sans déformation implique :

$$|H(f)| = A = \text{constante}$$

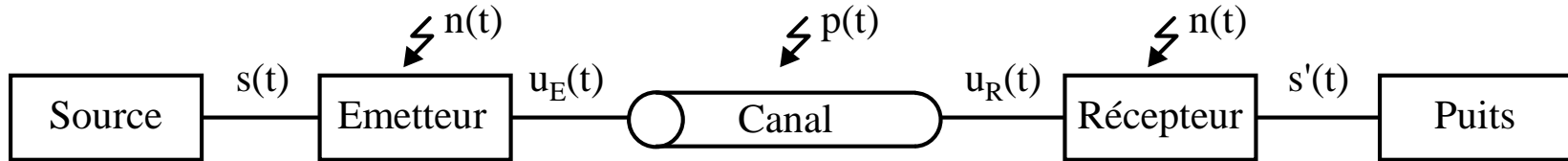
$$\theta(f) = -2\pi f t_d \rightarrow \text{délai de groupe } \tau_g = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(f)}{df} = t_d = \text{constante} \quad \text{pour } \forall f \text{ où } |U_E(f)| \neq 0$$

Sinon, distorsion d'amplitude et/ou de phase

Introduction – Table des matières

- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

Transmission analogique

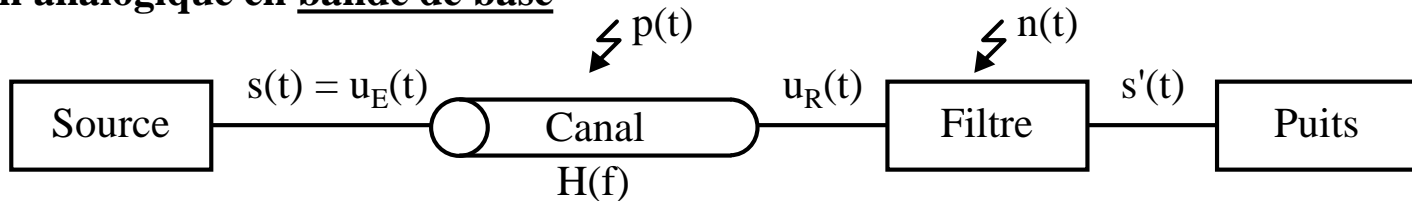


Objectif

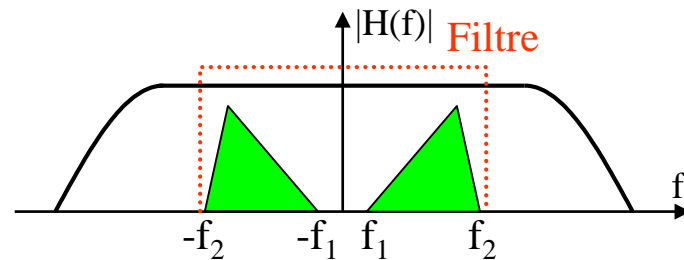
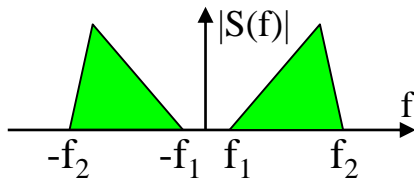
transmission entre la source et le puits d'une **information analogique** $s(t)$

- qualité de la liaison :
- $s'(t) \approx A \cdot s(t-t_d)$
 - rapport signal/bruit (S/B) maximum

Transmission analogique en bande de base

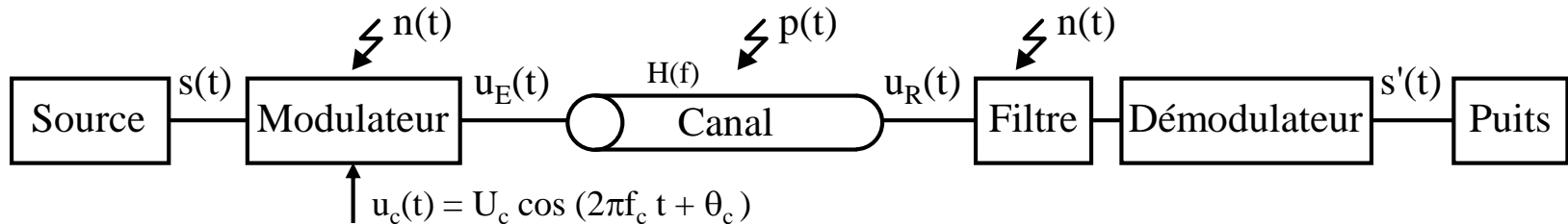


Signal en bande de base

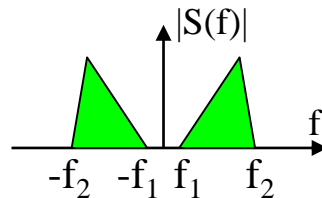


Exemple : accès au réseau téléphonique fixe

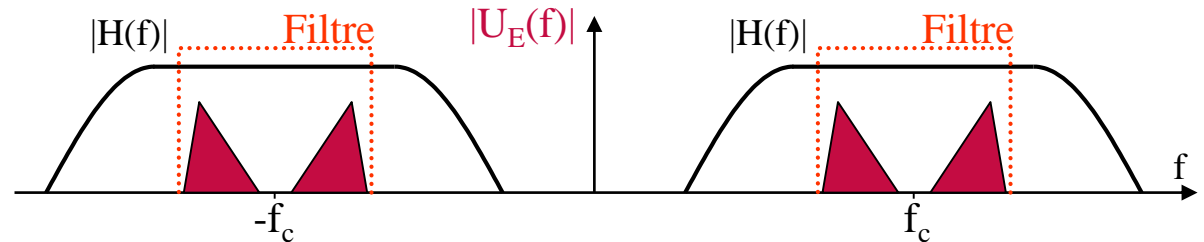
Transmission analogique avec modulation



Signal en bande de base



Signal à spectre passe-bande



Modulation : Une modulation est un procédé qui consiste à transposer l'information portée par un signal à spectre passe-bas $s(t)$, appelé **signal modulant**, vers un signal à spectre passe-bande $u_E(t)$, appelé **signal modulé**, pour s'adapter aux contraintes du canal de transmission. Pour ce faire, le signal modulant modifie les caractéristiques d'un signal auxiliaire $u_c(t)$, appelé **porteuse**. $u_c(t)$ est généralement un signal sinusoïdal.

Suivant le paramètre utilisé, on distingue les modulations

- d'amplitude : AM (Amplitude Modulation)
- d'angle : FM (Frequency Modulation) **OU** PM (Phase Modulation)

Exemples : émetteurs de radiodiffusion AM à Wavre (RTBF)

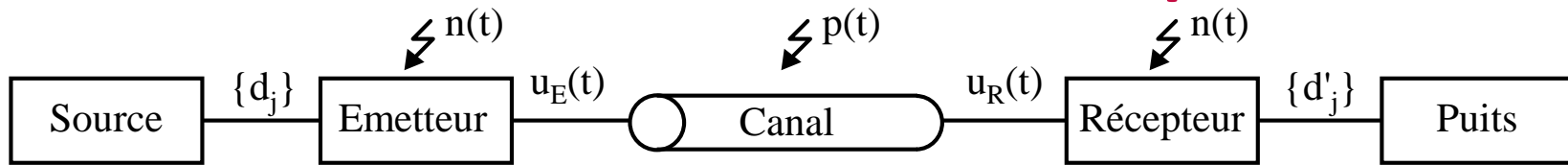




Introduction – Table des matières

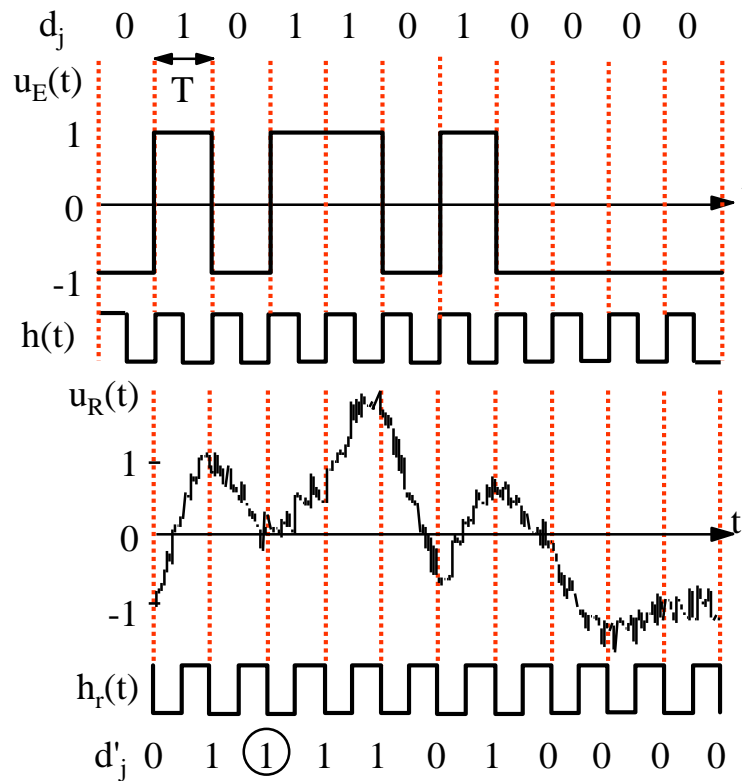
- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

Transmission numérique



Objectif

transmission entre la source et le puits d'une **information discrète** $\{d_j\}$ → taux d'erreur BER minimum
(Métrique de qualité)

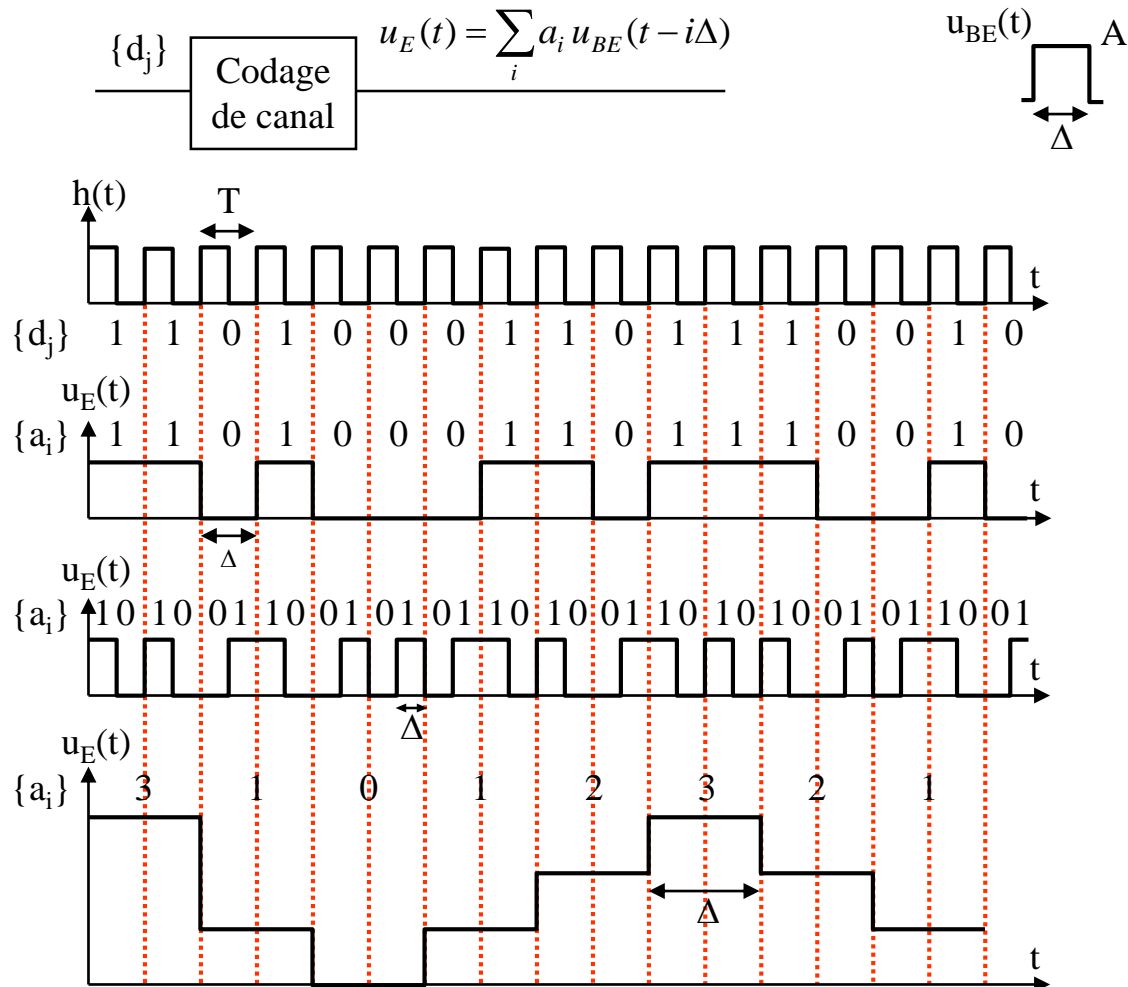


**Transmission
Synchrone (nécessité d'une
Horloge)**

← **Régénération de l'information**

Débit binaire de la source : $D(\text{bit/s}) = 1/T(\text{s})$

Rapidité de modulation



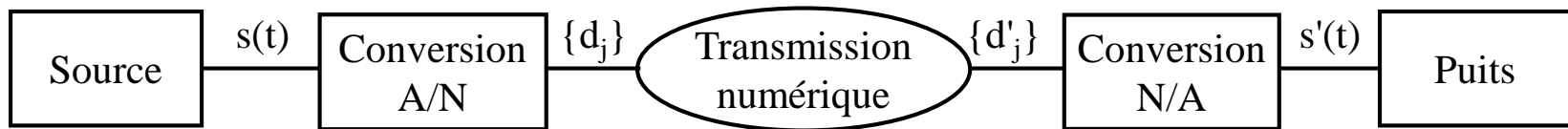
$\{d_j\}$: suite de bits (durée T)
 $\{a_i\}$: suite de symboles (durée Δ)
 n : nombre de valeurs possibles par symbole

Rapidité de modulation (Nombre de symboles/s) : **R (baud) = $1/\Delta$ (s)**

$$D(\text{bit/s}) = R (\text{baud}) \cdot N (\text{bit/symbole}) \rightarrow \text{si } N \geq 1, \quad D = R \cdot \log_2 n$$

Transmission numérique d'un signal analogique

Les signaux porteurs d'informations sont très souvent de type analogique (amplitude et temps continus). On peut les transmettre, sous forme numérique, moyennant une conversion A/N à l'émission. A la réception, une conversion inverse (N/A) restitue le signal analogique



Intérêt :

- économique
- chaîne de transmission unifiée

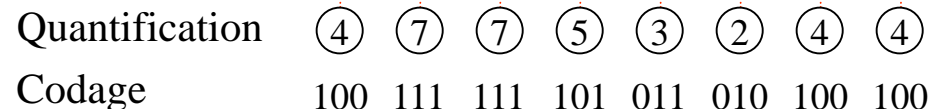
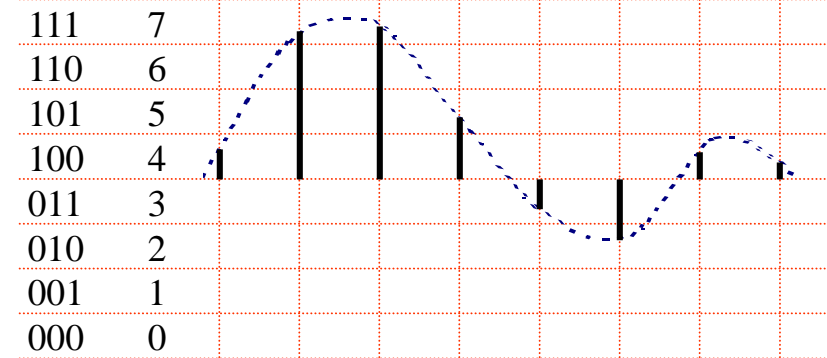
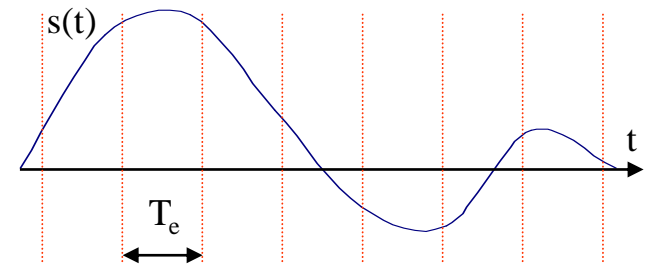
Conversion A/N : principe

- un échantillonnage à la fréquence $f_e = 1/T_e$
- une quantification à n niveaux discrets
- un codage

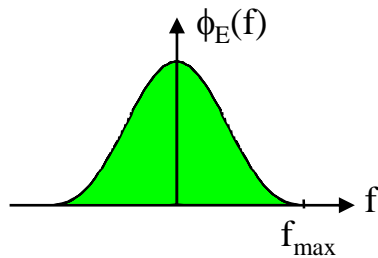
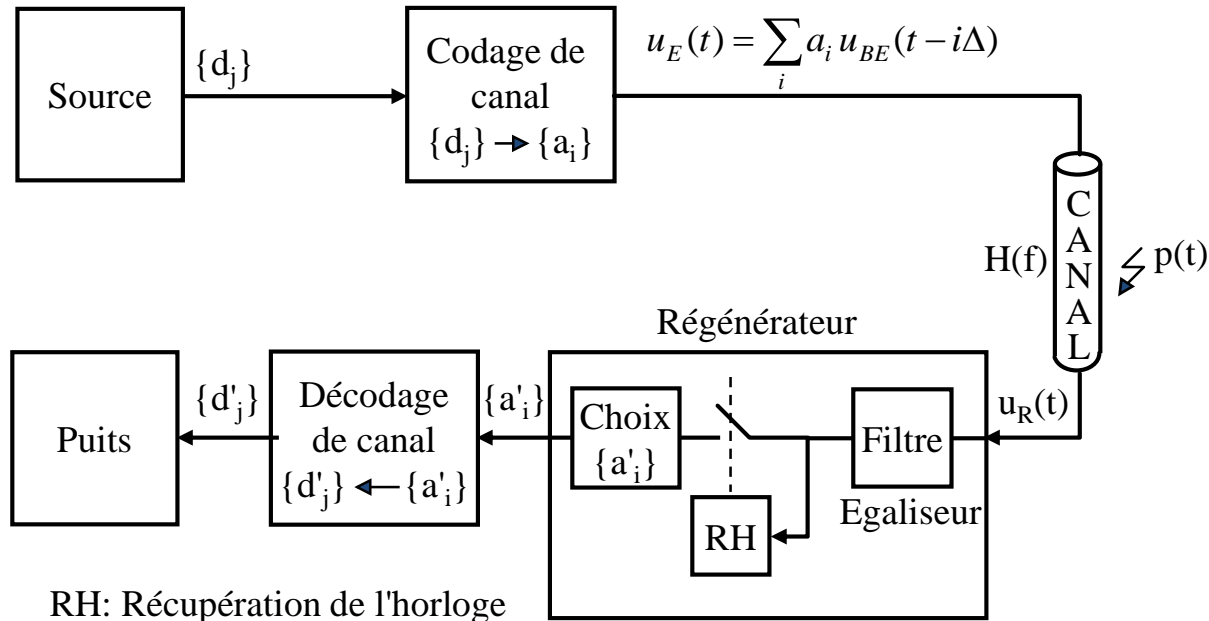
Exemple : Signal téléphonique

- $f_e = 8000 \text{ Hz}$ ($\rightarrow T_e = 125 \mu\text{s}$)
- une quantification à 256 niveaux $\rightarrow 8 \text{ bits}$
- débit binaire $D = f_e \cdot \log_2 n = 64 \text{ kbit/s}$

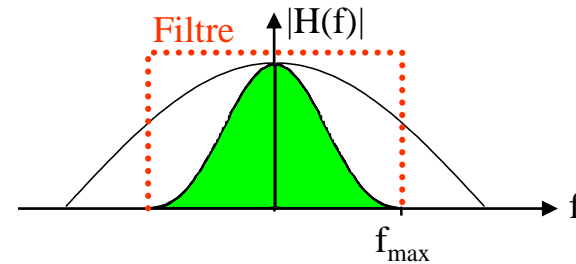
Echantillonnage



Transmission numérique en bande de base



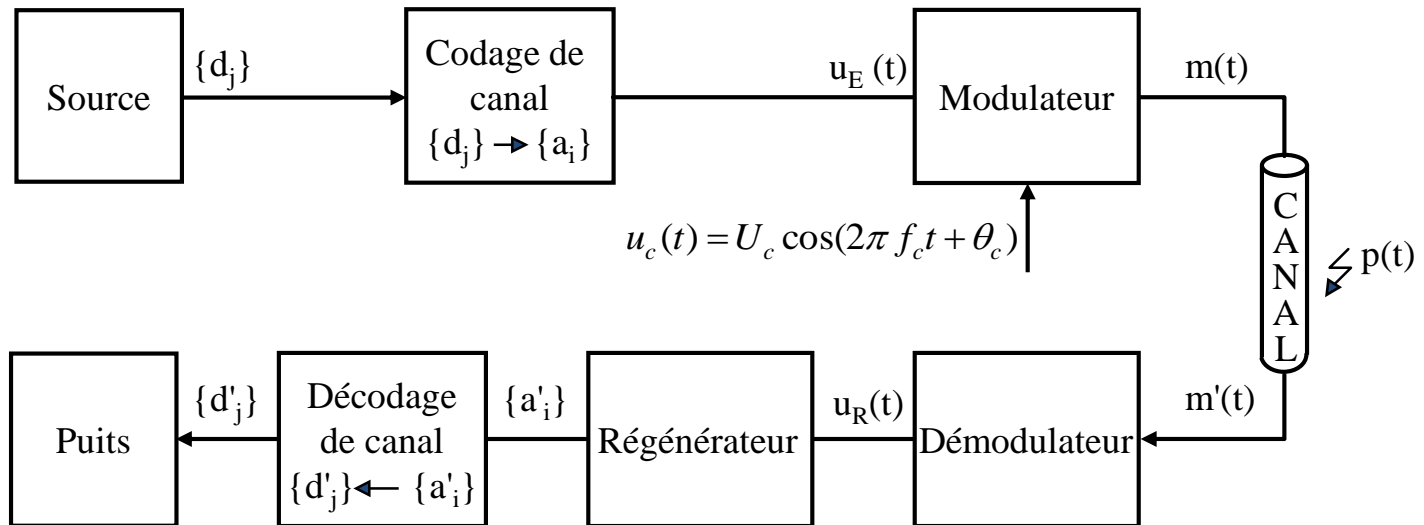
f_{\max} = fonction (R)



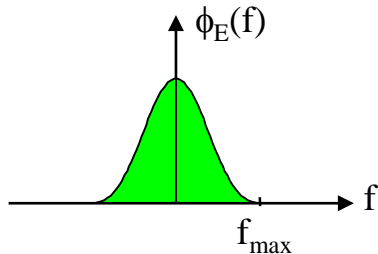
$\phi_E(f)$ est la **densité spectrale de puissance** du signal $u_E(t)$.

La puissance moyenne totale de $u_E(t)$ vaut :
$$P_t = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_E(f) df$$

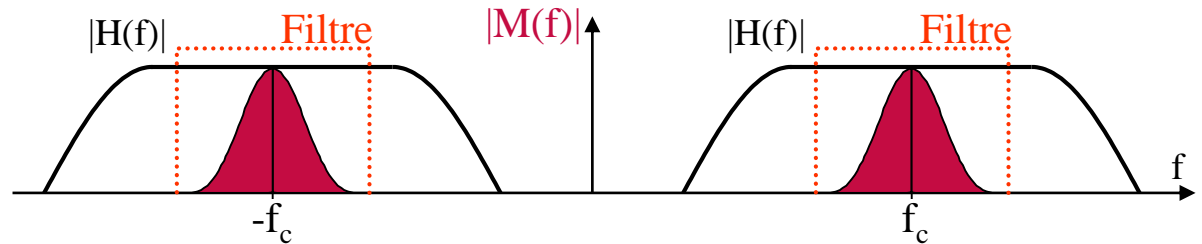
Transmission numérique avec modulation



Signal en bande de base



Signal à spectre passe-bande



Pour s'adapter aux contraintes du canal de transmission, on fait appel à une **modulation**.

Suivant le ou les paramètre(s) utilisé(s) de la porteuse, on distingue les **modulations analogiques**

- discrètes** :
- ASK (Amplitude Shift Keying)
 - PSK (Phase Shift Keying)
 - FSK (Frequency Shift Keying)
 - QAM (Quadrature Amplitude Modulation)





Tour Reyers : principalement
émission/réception satellites et
faisceaux hertziens → relais pour
radios FM

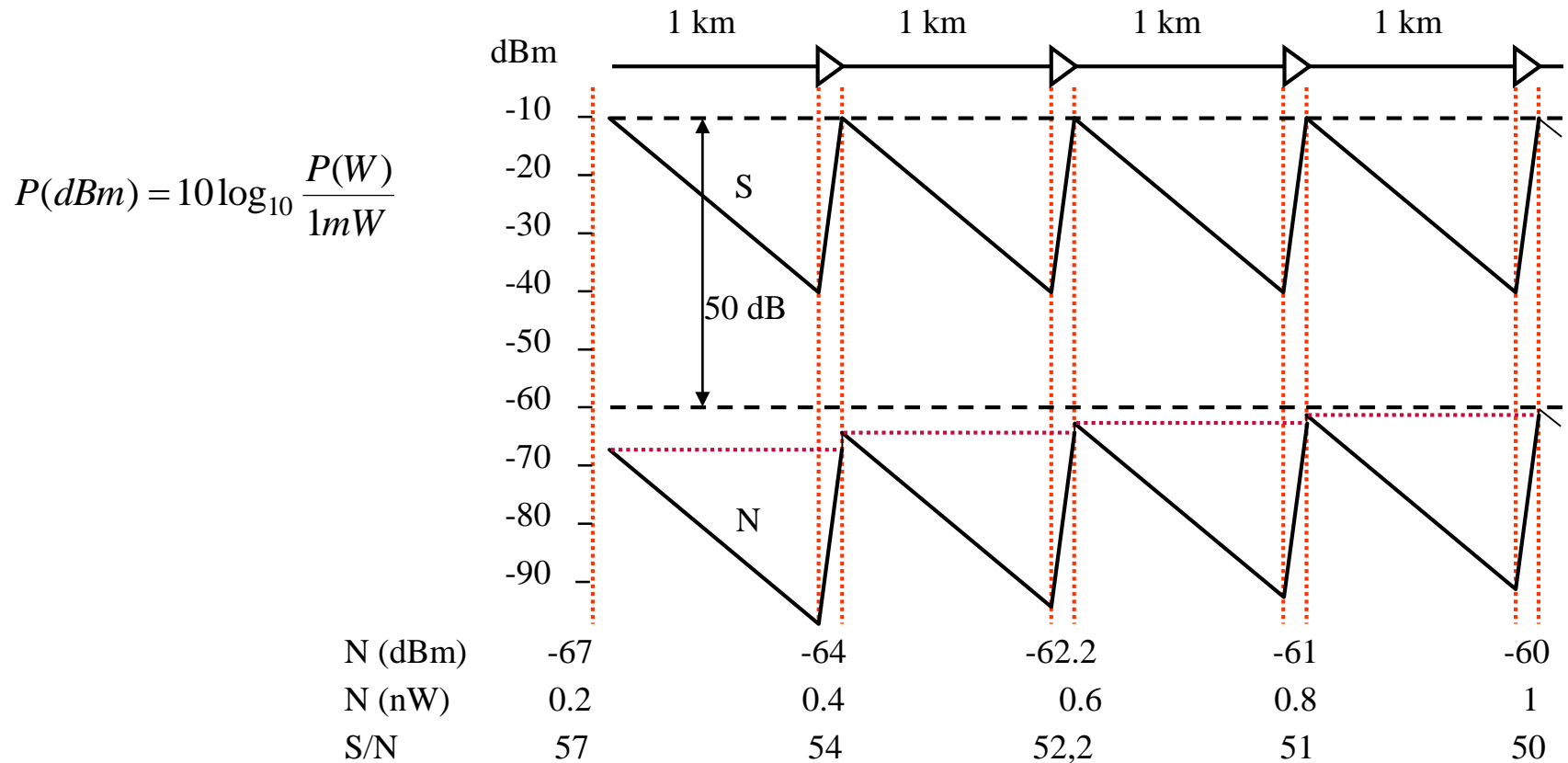
Relais vers la **tour des finances** pour
DVB-T (= télévision numérique terrestre
TNT)

Introduction – Table des matières

- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

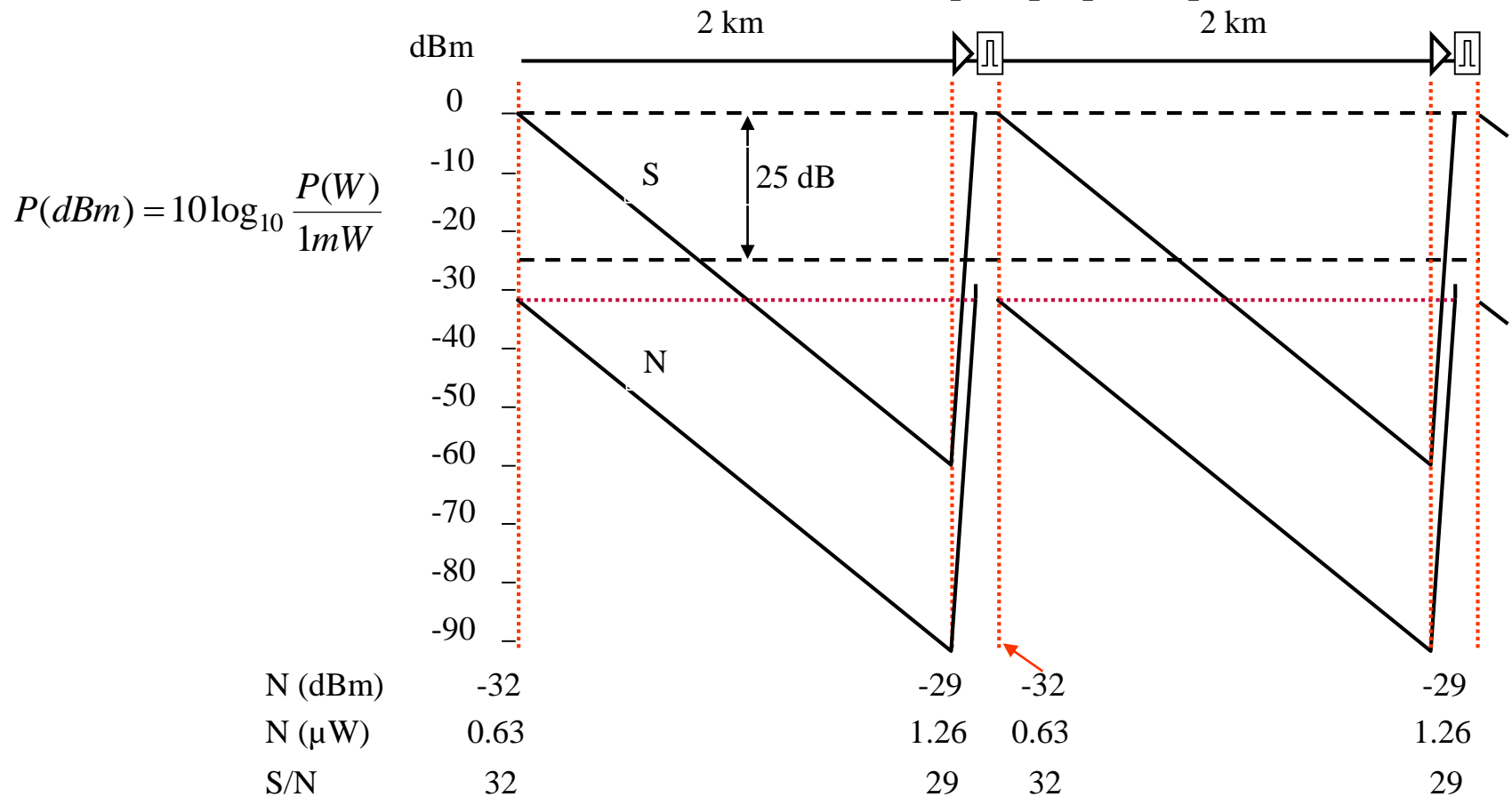
Liaisons sur des longues distances

TRANSMISSION ANALOGIQUE : partie coaxiale d'un réseau de télédistribution



Liaisons sur des longues distances

TRANSMISSION NUMERIQUE : transmission transatlantique optique (répéteur sous-marins)

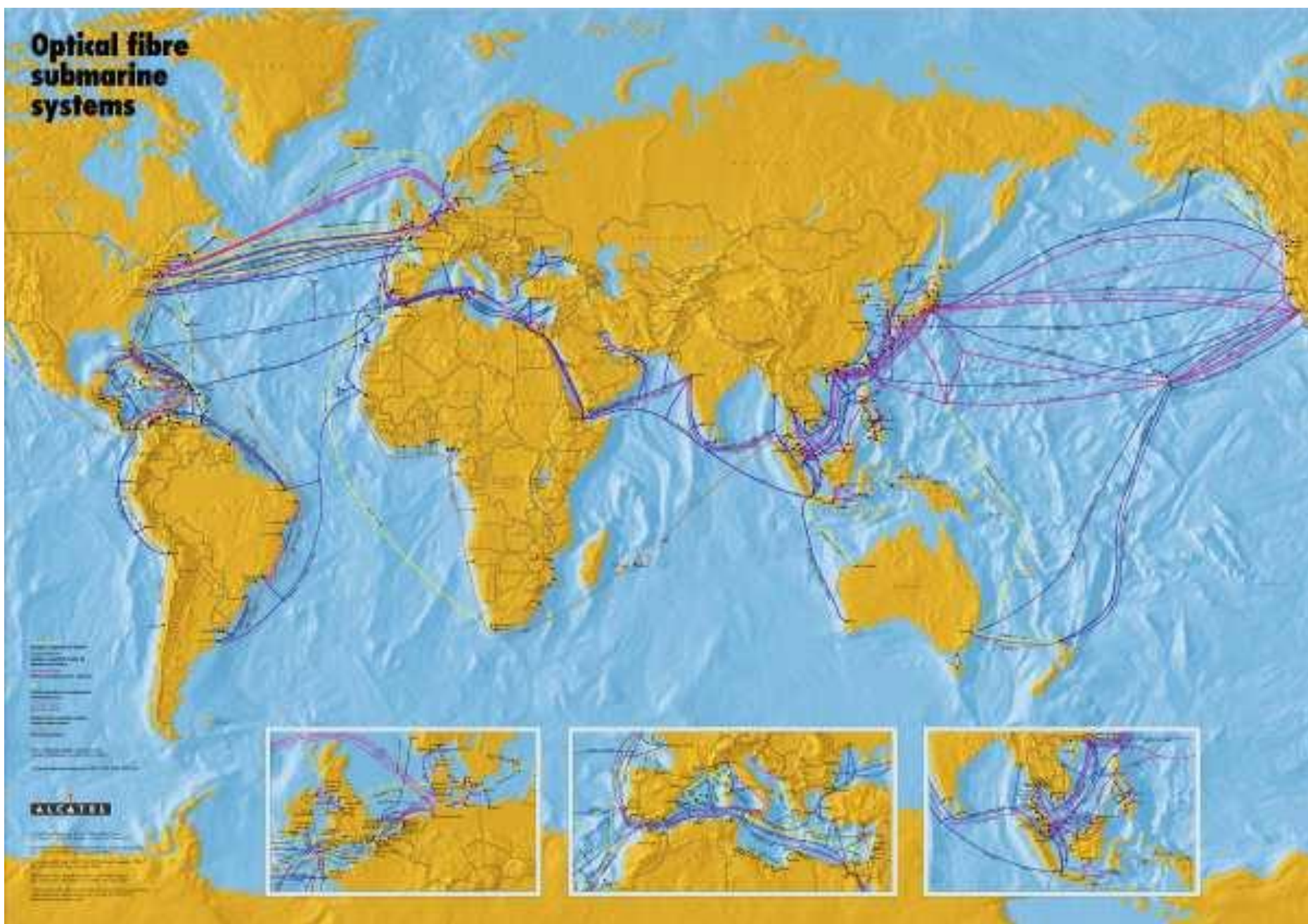


Immersion d'un répéteur



<http://www.soue.org.uk/souenews/issue5/submarinecables.html>

Optical fibre submarine systems



TAT

http://en.wikipedia.org/wiki/Transatlantic_telephone_cable

Cable Name	Date(s) in service	Type	Initial No. of channels	Final No. of channels	Western end	Eastern end
TAT-1	1956-1978	Galvanic	36	48	Newfoundland	Scotland
TAT-2	1959-1982	Galvanic	48	72	Newfoundland	France
TAT-3	1963-1986	Galvanic	138	276	New Jersey	England
TAT-4	1965-1987	Galvanic	138	345	New Jersey	France
TAT-5	1970-1993	Galvanic	845	2112	Rhode Island	Spain
TAT-6	1976-1994	Galvanic	4,000	10,000	Rhode Island	France
TAT-7	1978-1994	Galvanic	4,000	10,500	New Jersey	England
TAT-8*	1988-2002	Fiber-optic	40,000	-	USA	France
TAT-9	1992-2004	Fiber-optic	80,000	-	USA	Spain
TAT-10	1992-2003	Fiber-optic	2 x 565 Mbit/s	-	USA	Germany
TAT-11	1993-2003	Fiber-optic	2 x 565 Mbit/s	-	USA	France
TAT-12/13	1996-	Fiber-optic	12 x 2.5 Gbit/s	-	USA x 2	GB, FR
TAT-14	2000-	Fiber-optic	64 x 10 Gbit/s	-	USA x 2	GB, FR, NL, D, DK
CANTAT-1	1961-1986	Galvanic	80	-	Newfoundland	Scotland
CANTAT-2	1974-1992	Galvanic	1,840	-	Nova Scotia	England
CANTAT-3	1994-	Fiber-optic	2 x 2.5 Gbit/s		Nova Scotia	Europe
PTAT-1	1989-	Fiber-optic	3 x 140 Mbit/s?		US- Bermuda	Ireland -UK

* first [fiber optic](#) cable.

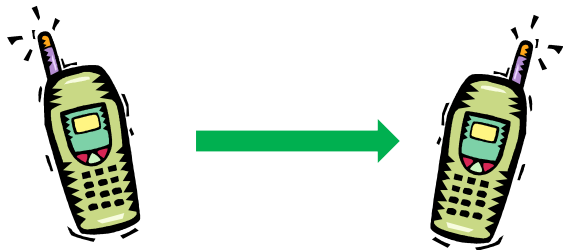
Introduction – Table des matières

- 1- Définitions
- 2- Schéma de principe d'une liaison de télécommunications
- 3- Transmission analogique
- 4- Transmission numérique
- 5- Liaisons sur des longues distances
- 6- Multiplexage et ordonnancement temporel des communications

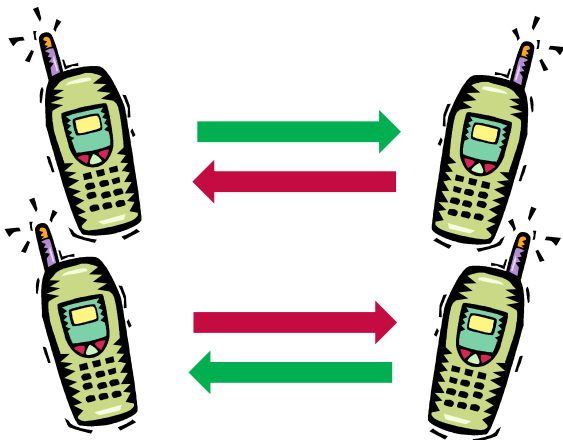
Modes de fonctionnement des modems :

Simplex/Duplex

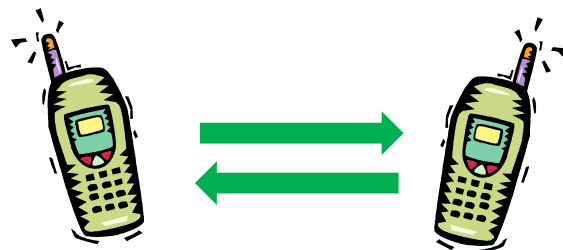
Qualificatif de la méthode d'utilisation d'un canal de communication



- **SIMPLEX** : canal unidirectionnel transportant l'information dans un seul sens.
Par exemple, une station FM qui émet et une radio qui reçoit.



- **HALF-DUPLEX** : canal permettant de transmettre l'information dans les deux sens, mais pas en même temps (= communication à l'alternat). Utilisée par exemple par les talkie-walkie



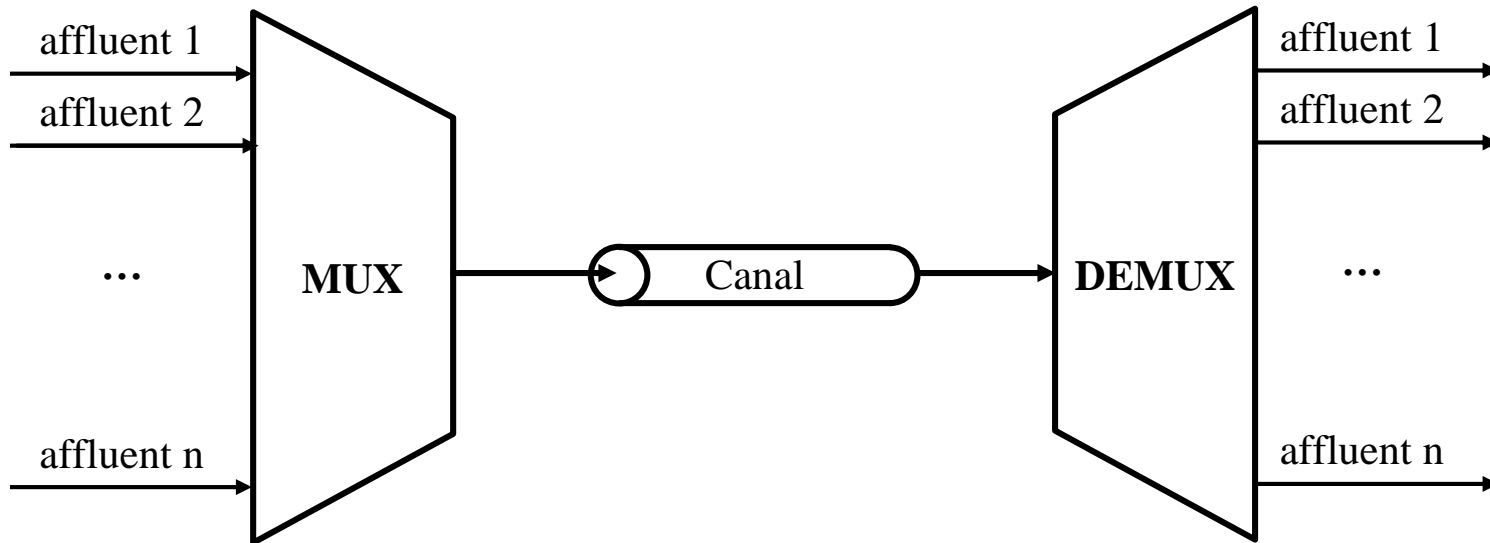
- **DUPLEX (= 2 SIMPLEX)** : canal permettant de transporter l'information simultanément dans les deux sens → canal partagé.
Par exemple : une communication téléphonique.

Principe du multiplexage

Objectif : exploiter, au maximum, les capacités des canaux de transmission

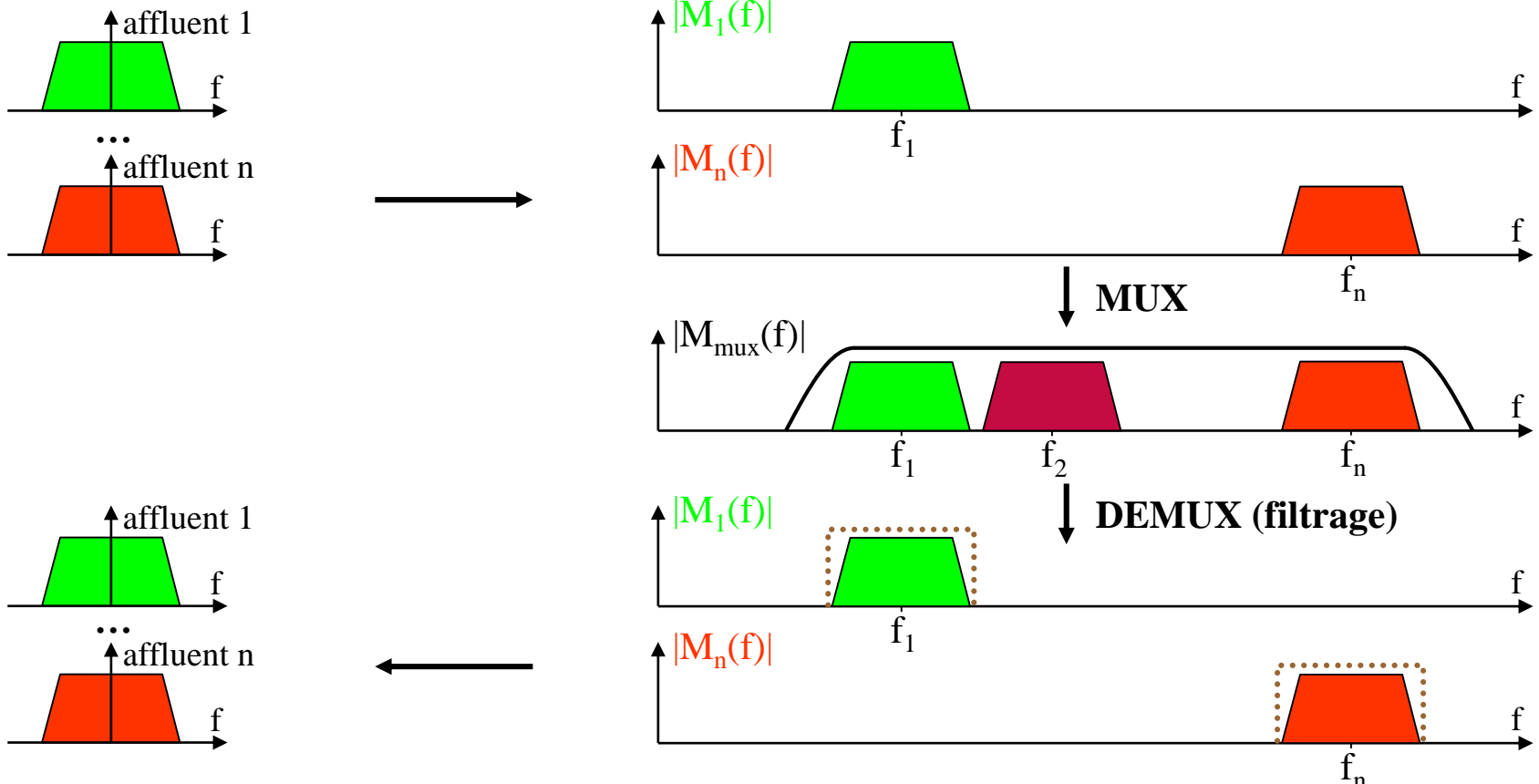
Principe : regrouper plusieurs affluents de manière à les transmettre **simultanément** sur un même canal de transmission sans qu'ils se mélangent ni se perturbent mutuellement.

A la réception, un démultiplexeur sépare les différents affluents



Multiplexage Fréquentiel (FDM)

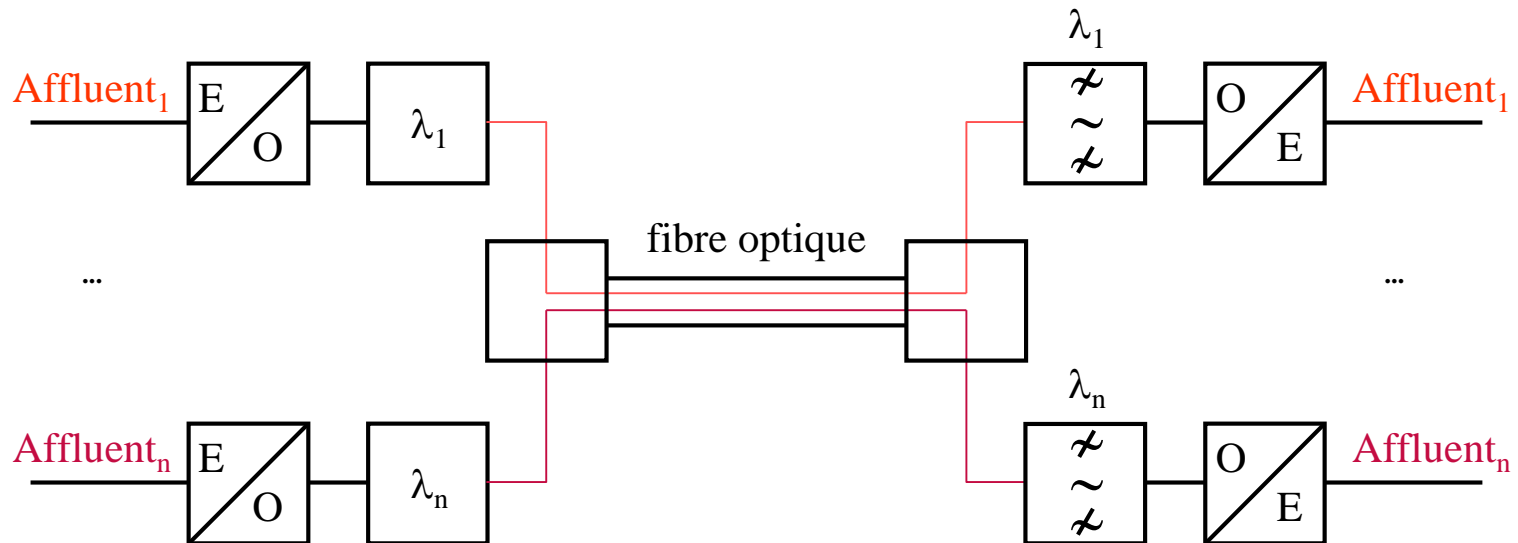
Principe : Les n affluents sont répartis sur l'axe fréquentiel et disposent chacun d'une bande individuelle de fréquences décalée par rapport à celles de ses voisins.



Le multiplexage FDM consiste donc en une juxtaposition fréquentielle des affluents alors que leurs signaux sont superposés dans le temps. Exemples : radiodiffusion, télédistribution

Multiplexage WDM

Principe : Sur une liaison optique, le multiplexage WDM consiste à utiliser simultanément plusieurs longueurs d'onde sur une même fibre optique, chaque affluent étant transmis sur une longueur d'onde différente.



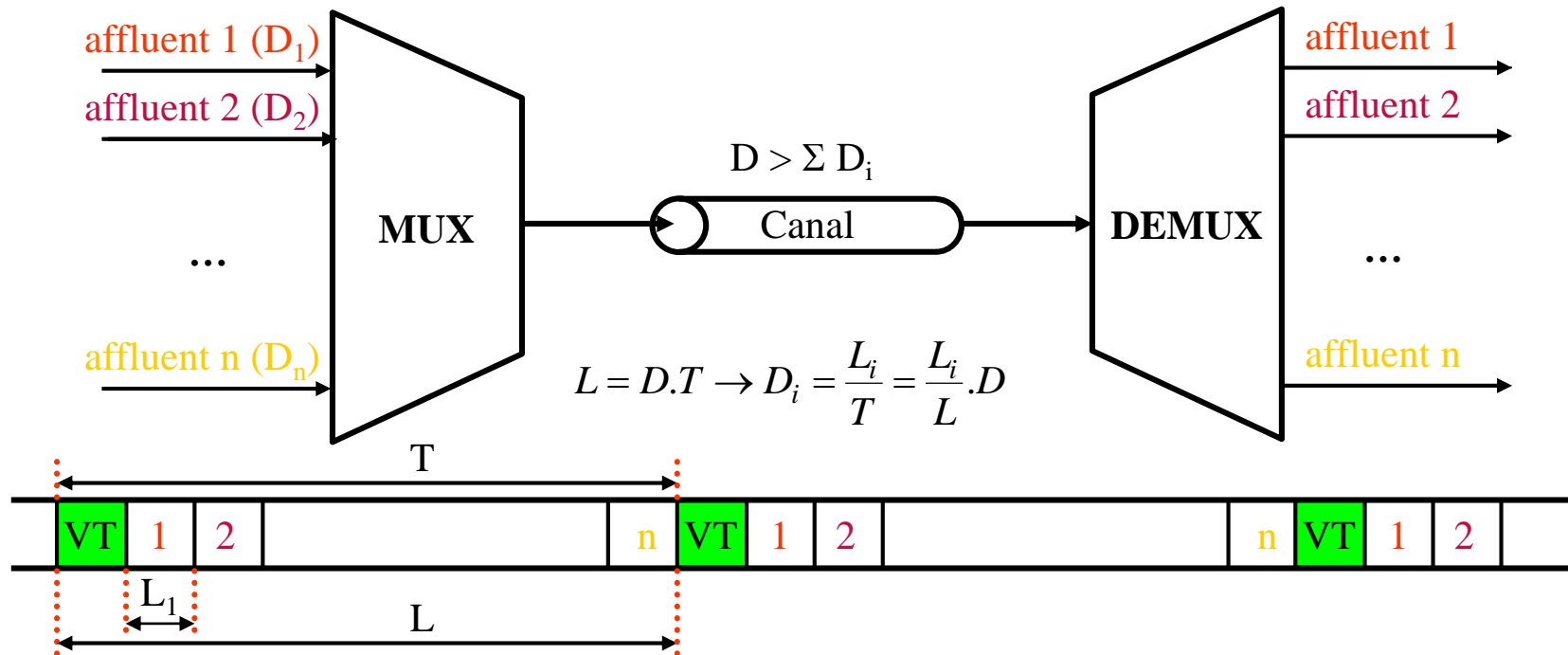
Performances actuelles

nombre de longueurs d'onde : 40-160

$\lambda_{\text{nom}} = 1550 \text{ nm}$; $\Delta f = 50 \text{ GHz} \rightarrow \Delta \lambda = 0,4 \text{ nm}$

Multiplexage Temporel

Principe : Les données associées aux n affluents **synchrones** sont réparties dans le temps à l'intérieur d'une trame de durée T



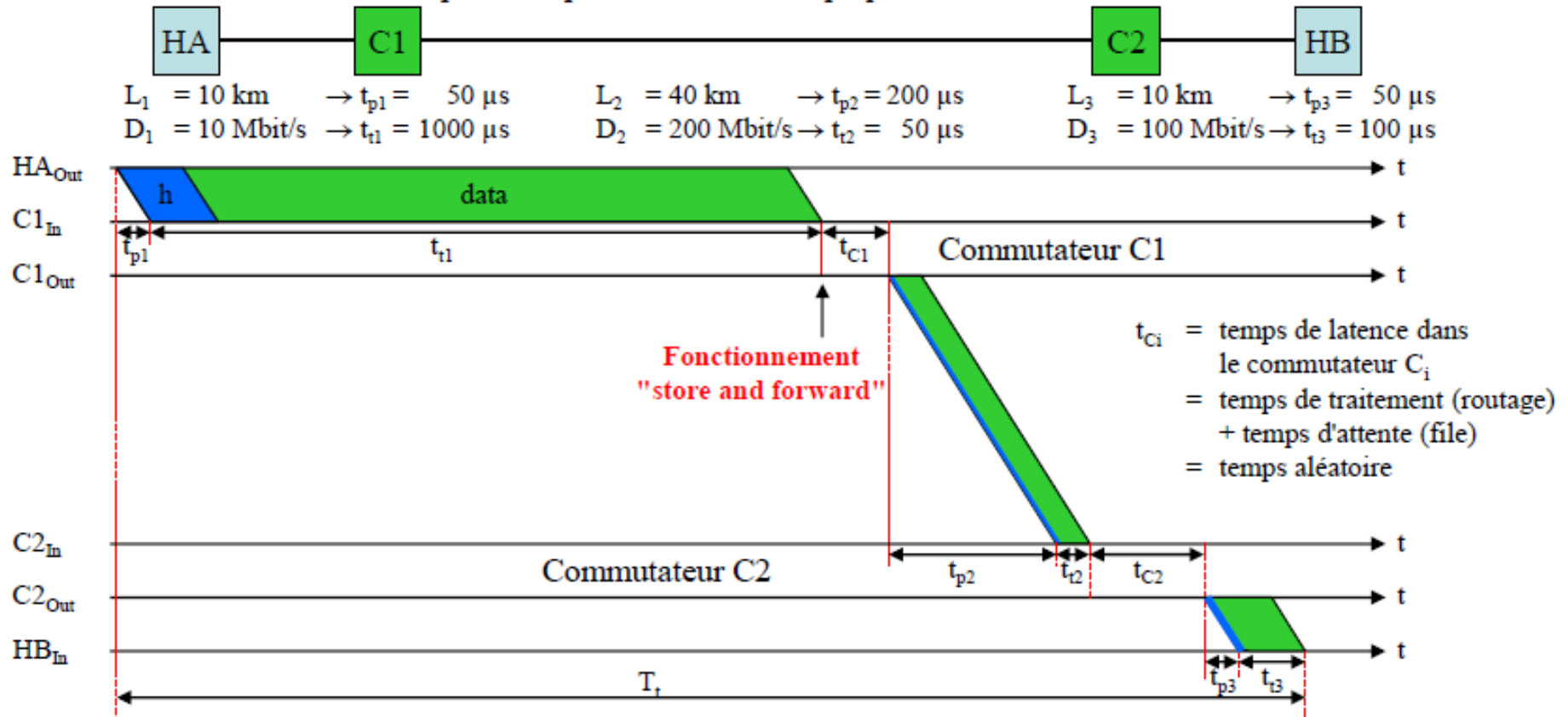
Le multiplexage TDM consiste donc en une juxtaposition dans le temps des affluents, leurs spectres étant superposés dans le domaine fréquentiel. Il y a dualité entre les multiplexages FDM et TDM mais le multiplexage temporel exige un point de repère dans le cycle de la trame. Le récepteur doit se synchroniser en fréquence et en phase sur le **motif de verrouillage de trame** répété périodiquement.

Exemple : réseau téléphonique ($T = 125 \mu s$; $L_i = 8$ bits $\rightarrow D_i = 64$ kbit/s)

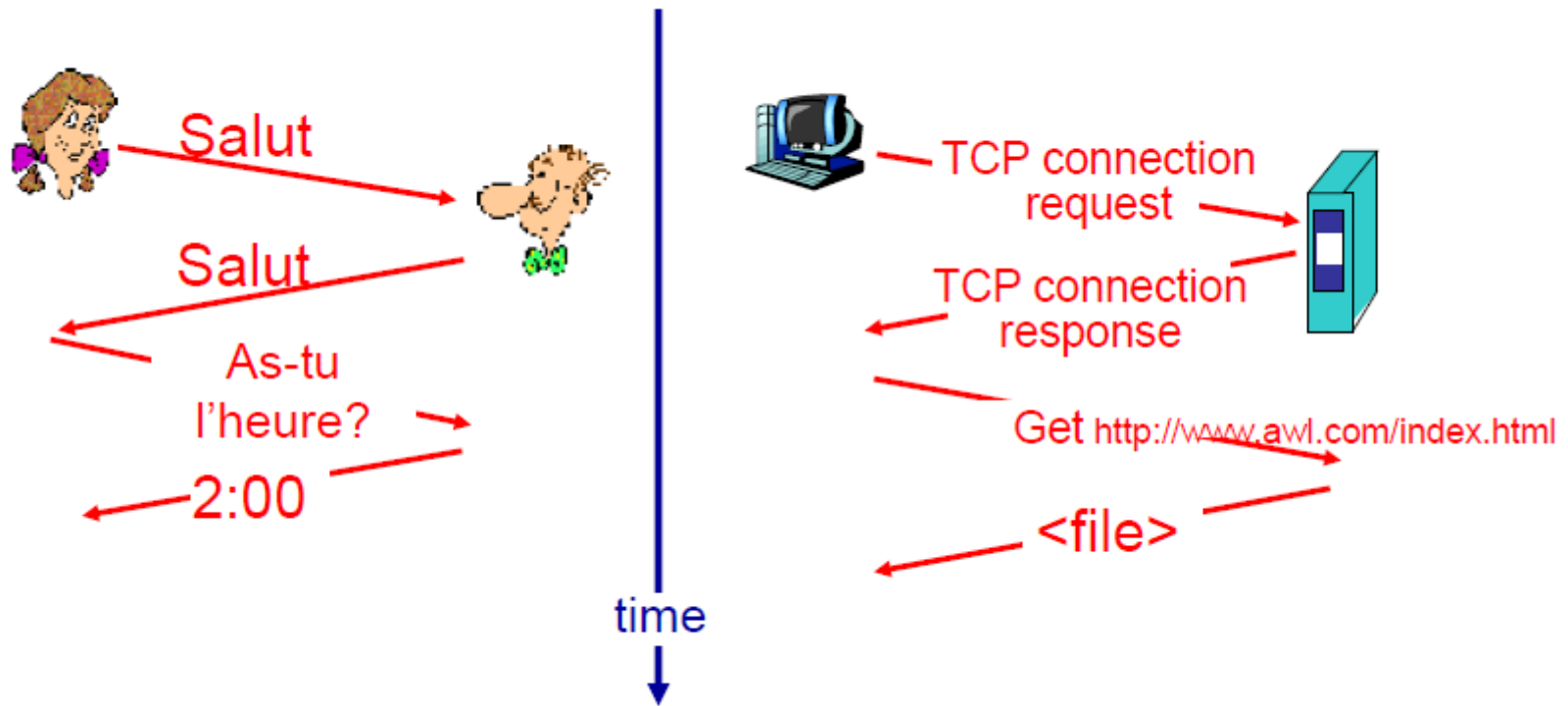
Datagramme et ordonnancement temporel d'une communication

Cas d'un réseau à commutation de paquets

Exemple : Temps de transfert d'un paquet de $N = 10\ 000$ bits

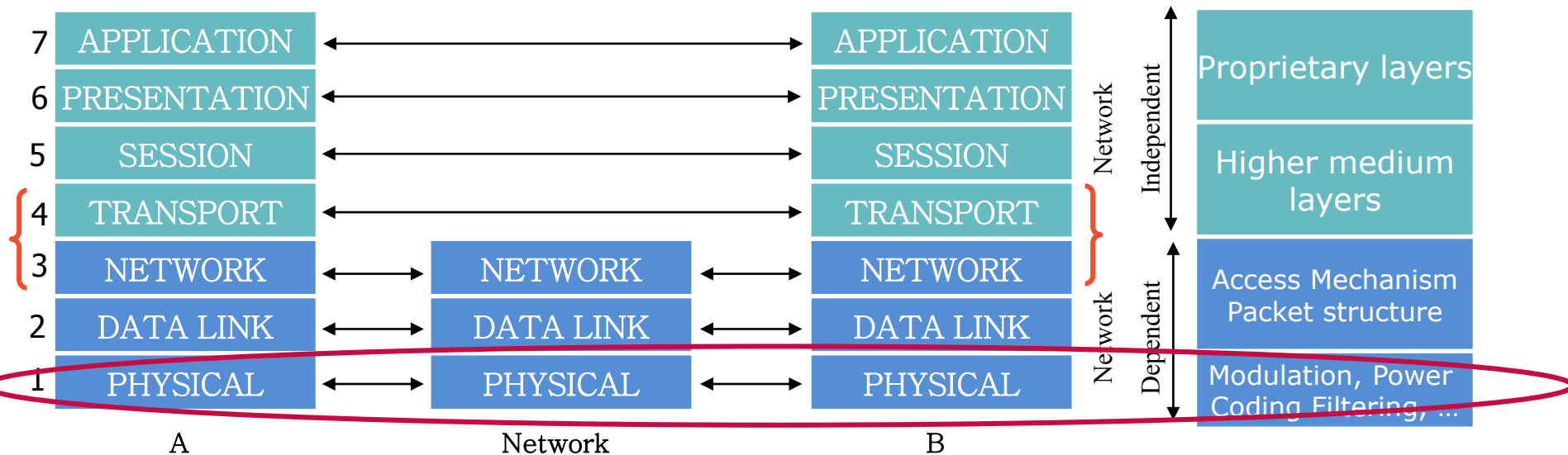


Organisation des communications - protocole



[Prof. S. Bette – Réseaux Informatiques]

Modèle de reference OSI (*Open Systems Interconnection*) pour la représentation en 7 couches d'une communication de bout-en-bout



- Ce cours = couche physique (PHY) uniquement = établissement d'une liaison point-à-point!
- Cours de 'Réseaux Informatiques' (Prof. S. Bette) pour les couches 2, 3 & 4.