ETE5-CNUM1 – Communications analogiques et canaux de propagation

Séance 1 – Communiquer par radio : porteuse, spectre, bande passante

Romain Tajan

ENSEIRB-MATMECA – Bordeaux INP
Laboratoire IMS, groupe Signal et Image

Télécommunications 1re année – 2026–2027

Organisation du cours (8 × 1h20)

S1	**Communiquer par radio** : porteuse, spectre, bande passante
S2	Canal de propagation (1) : **espace libre**, bilan de liaison
S3	Canal de propagation (2) : **trajets multiples**, Doppler, cohérence
S4	Signaux passe-bande : **enveloppe complexe**, I/Q, canal équivalent
S5	**Architectures** d'émission et de réception
S6	Modulations d'**amplitude** : AM, ...
S7	Modulations **angulaires** : PM, FM, ...
S8	Démodulation angulaire, **effet du canal**, synthèse

Fil rouge : on part du **canal** (ce que la physique impose), on en déduit **comment construire** l'émetteur et le récepteur, puis **comment moduler**.

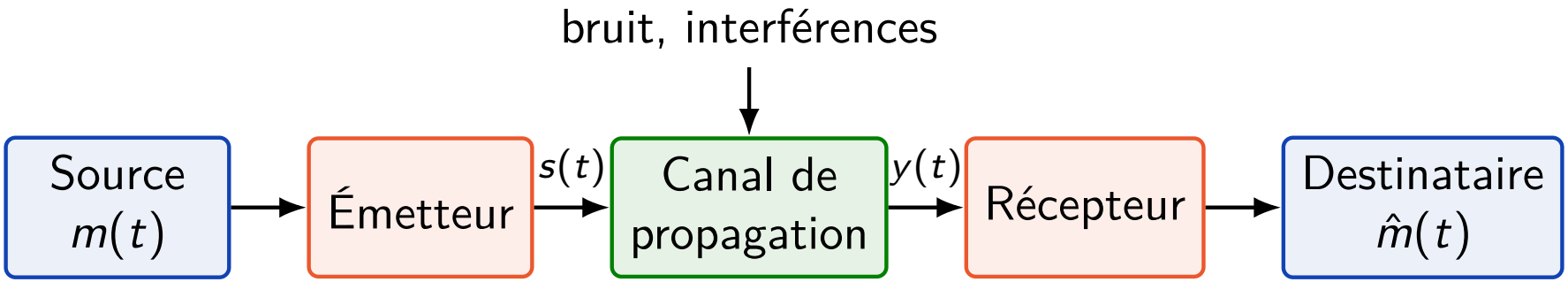
Prérequis : transformée de Fourier, convolution, systèmes linéaires invariants.

Plan

1. Le problème de la communication radio
   - Le schéma de communication
   - Pourquoi moduler ?
2. Fréquence, spectre et bande passante
3. Partage du spectre et unités
4. Exercices

Le problème posé

Transmettre un **message** $m(t)$ (voix, musique, mesure...) d'un point A à un point B, **sans fil**, en présence d'autres utilisateurs et de bruit.



- **Objectif** : $\hat{m}(t) \approx m(t)$ (à un gain et un retard près).
- **Émetteur** : met le message sous une forme **adaptée au canal**.
- **Canal** : tout ce qui est entre l'émetteur et le récepteur (antennes, air, obstacles...) – on **ne le choisit pas**, on le **subit**.
- **Récepteur** : extrait $m(t)$ de $y(t)$, malgré le canal et le bruit.

Quelques dates

1865 Maxwell prédit les ondes électromagnétiques

1887 Hertz les met en évidence expérimentalement

1901 Marconi : première liaison radio transatlantique

1918 Armstrong : récepteur **superhétérodyne** (séance 5)

1920 débuts de la radiodiffusion en modulation d'**amplitude**

1933 Armstrong : modulation de **fréquence**

1948 Shannon/Weaver - Définition formelle pour les transmissions sans perte

1973 premier appel depuis un téléphone mobile

Les principes de ce cours ont **plus d'un siècle**... et restent au cœur des systèmes actuels (Wi-Fi, 4G/5G, GNSS) : seuls le message (devenu numérique) et la réalisation (silicium) ont changé.

Pourquoi moduler ?

Pourquoi ne pas émettre directement la voix, qui occupe environ $[80\,\mathrm{Hz}, 14\,\mathrm{kHz}]$?
Trois obstacles :

1. **Taille des antennes** : une antenne efficace mesure de l'ordre de $\lambda/2$ avec $\lambda = c/f$.

$$f = 7\,\mathrm{kHz} \;\Rightarrow\; \lambda = 43\,\mathrm{km} \;\Rightarrow\; \text{antenne de } 22\,\mathrm{km}\ !$$

Pourquoi moduler ?

Pourquoi ne pas émettre directement la voix, qui occupe environ $[80\,\mathrm{Hz}, 14\,\mathrm{kHz}]$?
Trois obstacles :

1. **Taille des antennes** : une antenne efficace mesure de l'ordre de $\lambda/2$ avec $\lambda = c/f$.

$$f = 7\,\mathrm{kHz} \;\Rightarrow\; \lambda = 43\,\mathrm{km} \;\Rightarrow\; \text{antenne de } 22\,\mathrm{km}\ !$$

2. **Partage du milieu** : tous les émetteurs occuperaient la **même bande** de fréquences $\Rightarrow$ interférences, un seul utilisateur possible.

Pourquoi moduler ?

Pourquoi ne pas émettre directement la voix, qui occupe environ $[80\,\mathrm{Hz}, 14\,\mathrm{kHz}]$?
Trois obstacles :

1. **Taille des antennes** : une antenne efficace mesure de l'ordre de $\lambda/2$ avec $\lambda = c/f$.

$$f = 7\,\mathrm{kHz} \;\Rightarrow\; \lambda = 43\,\mathrm{km} \;\Rightarrow\; \text{antenne de } 22\,\mathrm{km}\ !$$

2. **Partage du milieu** : tous les émetteurs occuperaient la **même bande** de fréquences $\Rightarrow$ interférences, un seul utilisateur possible.

3. **Propagation** : l'atténuation, la portée, la traversée des obstacles dépendent de la fréquence. On veut **choisir** la fréquence adaptée au service.

Pourquoi moduler ?

Pourquoi ne pas émettre directement la voix, qui occupe environ $[80\,\mathrm{Hz}, 14\,\mathrm{kHz}]$?
Trois obstacles :

1. **Taille des antennes** : une antenne efficace mesure de l'ordre de $\lambda/2$ avec $\lambda = c/f$.

$$f = 7\,\mathrm{kHz} \;\Rightarrow\; \lambda = 43\,\mathrm{km} \;\Rightarrow\; \text{antenne de } 22\,\mathrm{km}\ !$$

2. **Partage du milieu** : tous les émetteurs occuperaient la **même bande** de fréquences $\Rightarrow$ interférences, un seul utilisateur possible.

3. **Propagation** : l'atténuation, la portée, la traversée des obstacles dépendent de la fréquence. On veut **choisir** la fréquence adaptée au service.

Idée de la modulation

Déplacer le message autour d'une **fréquence porteuse** f_0 choisie, en modifiant au rythme de $m(t)$ un paramètre (amplitude, phase, fréquence) d'une sinusoïde.

Plan

1 Le problème de la communication radio

2 Fréquence, spectre et bande passante
- ▷ Fréquence et longueur d'onde
- ▷ Spectre d'un signal
- ▷ Bande passante
- ▷ Fréquence porteuse
- ▷ Translation de fréquence

3 Partage du spectre et unités

4 Exercices

Fréquence et longueur d'onde

$$\lambda = \frac{c}{f}, \qquad c \approx 3 \cdot 10^8\,\mathrm{m/s}$$

Service	**Fréquence**	**λ**
Radio « Grandes Ondes » (GO)	$\approx 200\,\mathrm{kHz}$	$1{,}5\,\mathrm{km}$
Radio « Petites Ondes » (PO)	$\approx 1\,\mathrm{MHz}$	$300\,\mathrm{m}$
Radio FM	$87{,}5$–$108\,\mathrm{MHz}$	$\approx 3\,\mathrm{m}$
Aviation civile (AM)	118–$137\,\mathrm{MHz}$	$\approx 2{,}3\,\mathrm{m}$
TNT	470–$694\,\mathrm{MHz}$	$\approx 50\,\mathrm{cm}$
Wi-Fi	$2{,}4\,\mathrm{GHz}$ / $5\,\mathrm{GHz}$	$12{,}5\,\mathrm{cm}$ / $6\,\mathrm{cm}$
5G (bande « cœur »)	$3{,}5\,\mathrm{GHz}$	$8{,}6\,\mathrm{cm}$
Satellite TV	$\approx 12\,\mathrm{GHz}$	$2{,}5\,\mathrm{cm}$

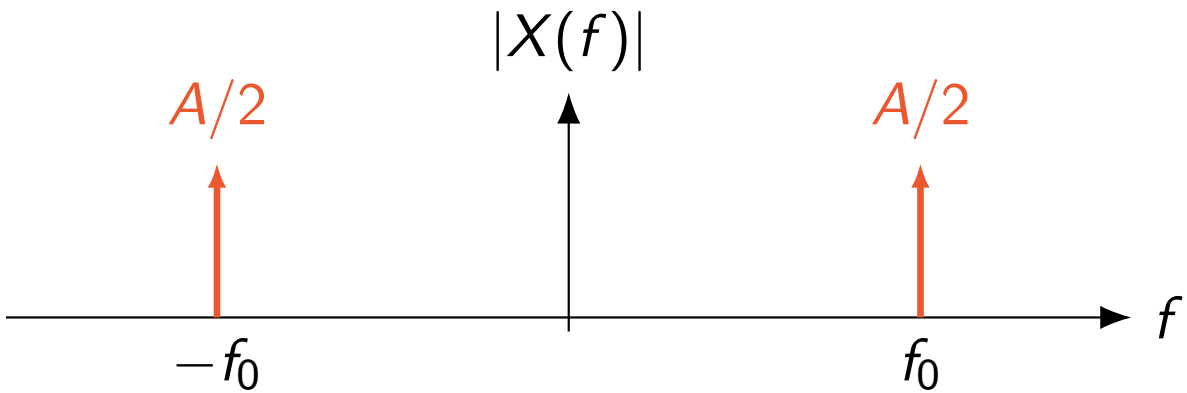
Plus f est élevée, plus les antennes sont petites… et plus l'atténuation en propagation est forte (séance 2).

Rappel : spectre d'un signal réel

$$X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\, \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi ft}\, \mathrm{d}t$$

- $x(t)$ réel $\Rightarrow X(-f) = X^*(f)$: symétrie hermitienne.
- Une sinusoïde = deux raies :

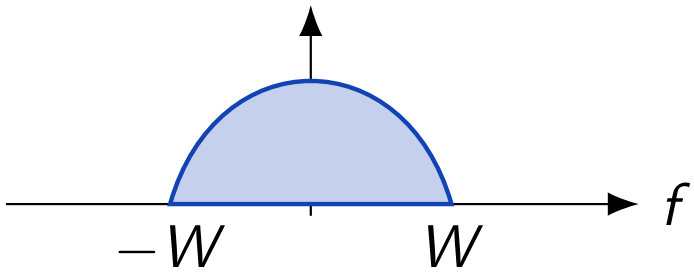
$$A\cos(2\pi f_0 t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \frac{A}{2}\,\delta(f - f_0) + \frac{A}{2}\,\delta(f + f_0)$$



- La **densité spectrale d'énergie** (ou de puissance) $|X(f)|^2$ indique comment l'énergie se répartit en fréquence.

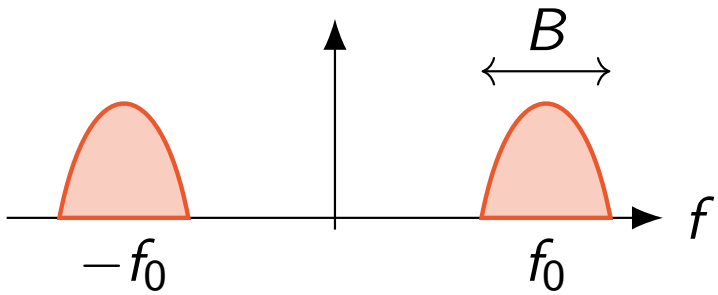
Signal en bande de base, signal passe-bande

Bande de base : spectre concentré autour de $f = 0$, dans $[-W, W]$.



Exemple : le message $m(t)$ (voix, audio).

Passe-bande : spectre concentré autour de $\pm f_0$, de largeur B.



Exemple : le signal émis $s(t)$.

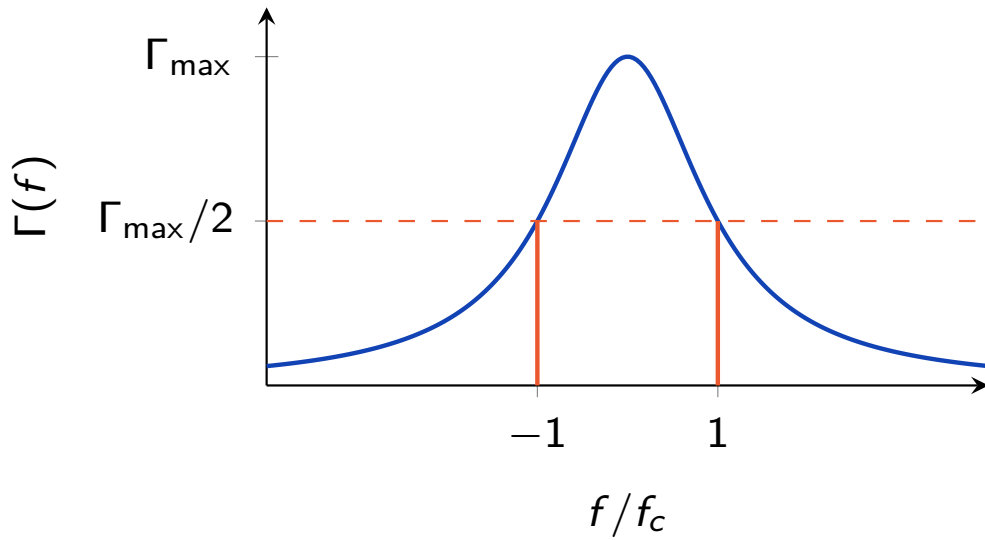
Signal à bande étroite

Un signal passe-bande est dit **à bande étroite** si $B \ll f_0$.
Radio FM : $B \approx 200\,\mathrm{kHz}$, $f_0 \approx 100\,\mathrm{MHz} \Rightarrow B/f_0 = 0{,}2\,\%$.

Qu'est-ce que la « bande passante » ?

Un spectre réel n'est presque jamais nul au-delà d'une fréquence : il faut une **convention**. Pour un signal de densité spectrale $\Gamma(f)$:

- **Bande à support** : $\Gamma(f) = 0$ hors de la bande (idéal).
- **Bande à $-3\,\mathrm{dB}$** : là où $\Gamma(f) \geq \Gamma_{\max}/2$.
- **Bande à $x\,\%$** : contient $x\,\%$ de la puissance (souvent 99 %).



- Pour un **système** (filtre, amplificateur, antenne, canal) : bande de fréquences où le gain $|H(f)|$ reste proche de son maximum (souvent à $-3\,\mathrm{dB}$).
- On parle de bande **unilatérale** (fréquences $f \geq 0$) : pour un signal en bande de base, $B = W$; pour un signal passe-bande, B est la largeur autour de f_0.

Ordres de grandeur de bandes passantes

Signal	Bande
Voix téléphonique	300 Hz–3,4 kHz
Audio haute fidélité	20 Hz–20 kHz
Canal radio AM (PO/GO, Europe)	9 kHz
Canal talkie-walkie (FM bande étroite)	12,5 kHz
Canal radio FM	$\approx$ 200 kHz
Canal TNT	8 MHz
Canal Wi-Fi	20 à 320 MHz

- La bande du **signal modulé** dépend du message **et** de la modulation (séances 6 et 7).
- Le spectre est une **ressource rare** : chaque Hz est attribué et réglementé.

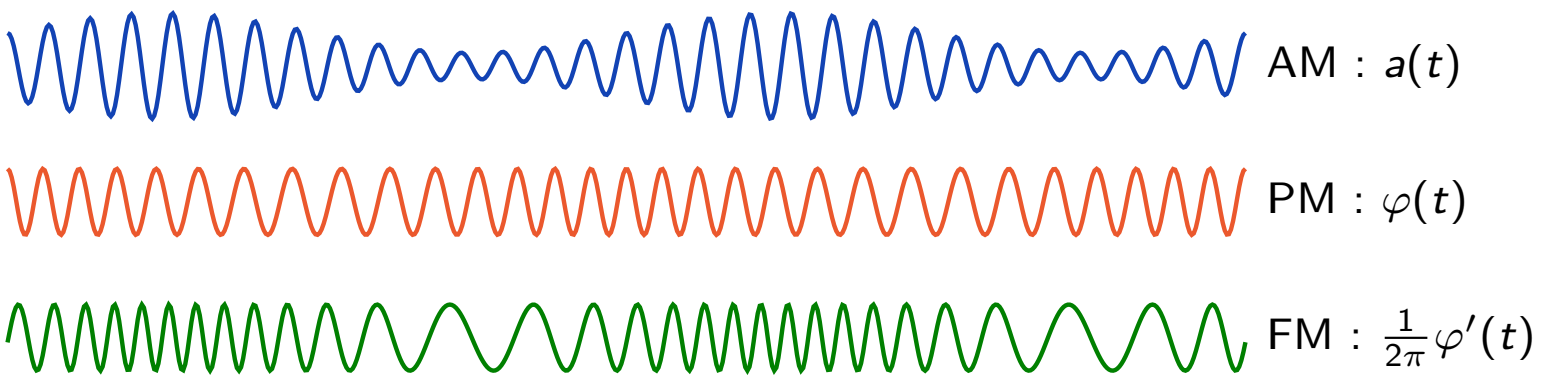
La fréquence porteuse

Porteuse

Sinusoïde de référence $p(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$, f_0 : **fréquence porteuse**.

Moduler = faire varier un de ses paramètres au rythme de $m(t)$:

$$s(t) = a(t) \cos\left(2\pi f_0 t + \varphi(t)\right)$$



La brique de base : la multiplication

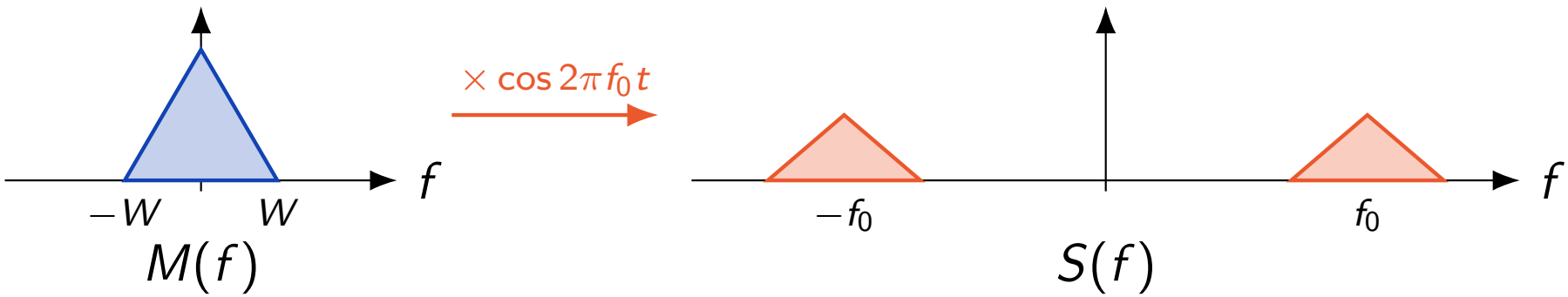
$$\cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2}\big[\cos(a-b) + \cos(a+b)\big]$$

La brique de base : la multiplication

$$\cos a \cdot \cos b = \tfrac{1}{2}\big[\cos(a-b) + \cos(a+b)\big]$$

En fréquence (**théorème de modulation**) :

$$m(t)\cos(2\pi f_0 t) \xrightarrow{\mathcal{F}} \tfrac{1}{2}M(f-f_0) + \tfrac{1}{2}M(f+f_0)$$



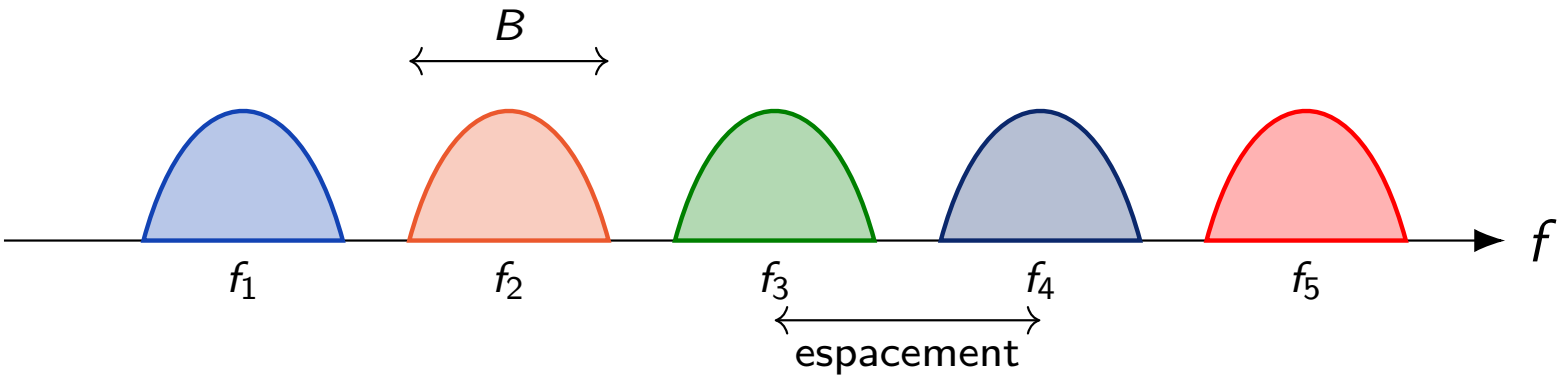
- Multiplier par une sinusoïde **translate** le spectre : c'est l'opération réalisée par un **mélangeur**.
- Elle sert à l'émission (*up-conversion*) **et** à la réception (*down-conversion*).

Plan

1. Le problème de la communication radio
2. Fréquence, spectre et bande passante
3. Partage du spectre et unités
4. Exercices

Multiplexage fréquentiel

Chaque émetteur reçoit une **porteuse** et une **bande** :



- Le récepteur sélectionne **une** station par **filtrage** autour de f_k.
- Régulation : UIT (mondial), ANFR / Arcom / Arcep (France).

Bande UIT	**Fréquences**	**Exemples**
LF / MF	30 kHz – 3 MHz	radio GO / PO
HF	3 – 30 MHz	ondes courtes, radioamateurs
VHF	30 – 300 MHz	radio FM, aviation
UHF	300 MHz – 3 GHz	TNT, 4G, Wi-Fi 2,4 GHz, GNSS
SHF	3 – 30 GHz	5G, Wi-Fi 5/6 GHz, satellite

Les décibels : l'unité des télécoms

Les puissances en jeu couvrent plus de 15 ordres de grandeur $\Rightarrow$ échelle logarithmique.

$$G_{\mathrm{dB}} = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}, \qquad P_{\mathrm{dBm}} = 10 \log_{10} \frac{P}{1\,\mathrm{mW}}$$

P	P_{dBm}	Rapport	dB
$1\,\mathrm{W}$	$30\,\mathrm{dBm}$	$\times 2$	$+3\,\mathrm{dB}$
$1\,\mathrm{mW}$	$0\,\mathrm{dBm}$	$\times 10$	$+10\,\mathrm{dB}$
$1\,\mathrm{pW}$	$-90\,\mathrm{dBm}$	$\times 1/2$	$-3\,\mathrm{dB}$

- Les gains et pertes **s'additionnent** en dB :
  $P^{\text{sortie}}_{\mathrm{dBm}} = P^{\text{entrée}}_{\mathrm{dBm}} + G_1 - L_2 + G_3 \ldots$
- Un téléphone émet $\sim 20\,\mathrm{dBm}$ et reçoit parfois moins de $-100\,\mathrm{dBm}$: **12 ordres de grandeur** perdus dans le canal !

Bilan de la séance

À retenir

- Moduler = translater le message autour d'une **porteuse** f_0 (antennes, partage du spectre, propagation).
- **Bande passante** : largeur de la zone de fréquences occupée par un signal (ou transmise par un système). Plusieurs définitions : préciser laquelle.
- Signal passe-bande **à bande étroite** : $B \ll f_0$.
- Multiplier par $\cos(2\pi f_0 t)$ translate le spectre de $\pm f_0$.
- Puissances en dBm, gains en dB : on additionne.

Prochaine séance : que devient $s(t)$ entre les deux antennes ? $\Rightarrow$ modélisation **déterministe** du canal de propagation.

Plan

1. Le problème de la communication radio
2. Fréquence, spectre et bande passante
3. Partage du spectre et unités
4. Exercices

Exercices

Exercice 1 – Antennes. Une antenne quart d'onde mesure $\lambda/4$. Calculer sa longueur pour $f = 1\,\mathrm{kHz}$, $1\,\mathrm{MHz}$, $100\,\mathrm{MHz}$, $2{,}4\,\mathrm{GHz}$. Conclure.

Exercice 2 – Translation. Soit $m(t) = \cos(2\pi f_m t)$, $f_m = 1\,\mathrm{kHz}$ et $s(t) = m(t)\cos(2\pi f_0 t)$, $f_0 = 1\,\mathrm{MHz}$.

1. Tracer $|M(f)|$ et $|S(f)|$. Quelle est la bande occupée par $s(t)$?
2. On multiplie à nouveau $s(t)$ par $\cos(2\pi f_0 t)$. Tracer le spectre obtenu. Comment retrouver $m(t)$?

Exercices (suite)

Exercice 3 – Définitions de la bande. Un signal a pour densité spectrale $\Gamma(f) = \dfrac{\Gamma_0}{1 + (f/f_c)^2}$.

1. Déterminer la bande (unilatérale) à $-3\,\mathrm{dB}$.
2. Déterminer la bande B_{99} contenant 99 % de la puissance. *Indication* : $\int \frac{\mathrm{d}u}{1+u^2} = \arctan u$.
3. Commenter.

Exercice 4 – Partage. Combien de stations peut-on placer dans la bande FM $[87{,}5;\,108]\,\mathrm{MHz}$ avec un espacement de $200\,\mathrm{kHz}$? Pourquoi, en pratique, deux stations voisines géographiquement ne sont-elles jamais sur des canaux adjacents ?