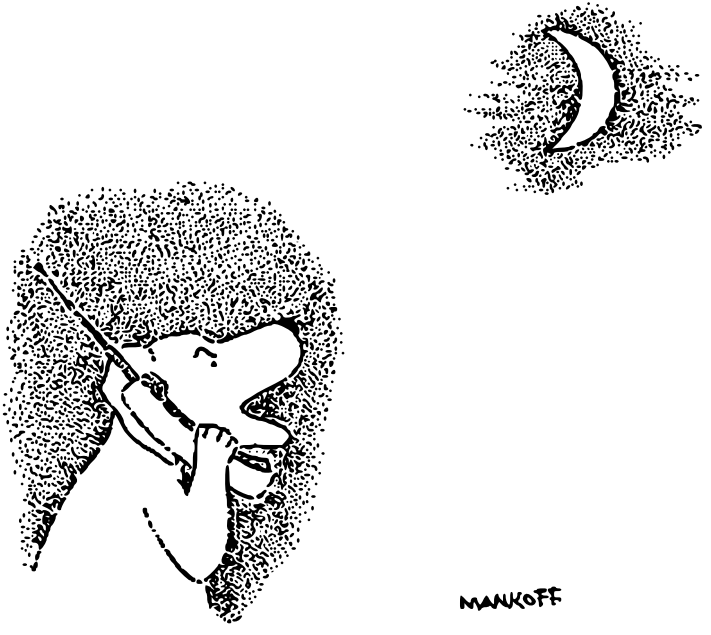
INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES CENTRE VAL DE LOIRE

4A STI



Réseaux sans fil — P-F. Bonnefoi

Version du 23 février 2025

Table des matières

1 Transmission de l'information : Aspects numériques 3
Transmission Parallèle *vs* Série 4
Transmission Synchrone *vs* Asynchrone : le synchrone 5
Codage en «bande de base» et codage numérique 7
Récapitulatif de différents codages numériques 12
Dépasser les limitations du codage numérique 14
2 Pour transmettre de manière analogique 15
Codage par modulation : les détails 16
Passage d'un signal analogique à un signal numérique 22
Les causes de dégradation d'une transmission 28
La «bande passante» : éviter les mauvaises fréquences 30
La capacité d'une ligne de transmission 31
3 Le partage d'accès au support : les solutions physiques 38
4 Réception radio et traitement du signal 55
Réception radio et traitement du signal : le récepteur «*Super Heterodyne*» 57
Récepteur «*super hétérodyne*» et numérique 60
SDR, «*Software Defined Radio*» : le HackRF 61
Transmetteur DCF77, horloge «*radio controlled*», avec Raspberry Pi et circuit résonnant . 80
5 LoRa, «*Long Range*» 108

Transmission de données numériques

La transmission numérique consiste à faire transiter les informations sur le support physique de communication **sous forme de signaux numériques**.

Les informations numériques :

- ne peuvent pas circuler sous forme de 0 et de 1 directement ;
- doivent être **codées** sous forme d'un **signal** possédant deux états.

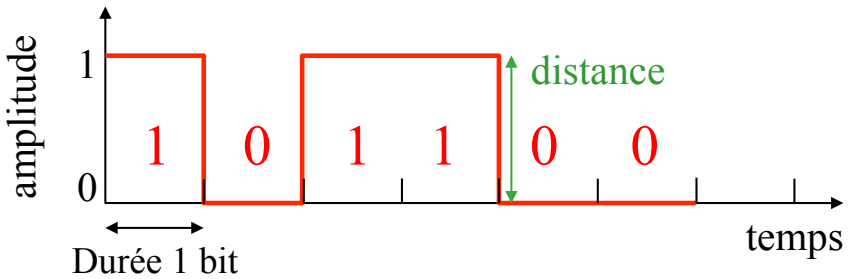
Un signal est une quantité mesurable variant au cours du temps ou dans l'espace.

Exemple :

- deux niveaux de tension par rapport à la masse ;
- la différence de tension entre deux fils ;
- la présence/absence de courant dans un fil ;
- la présence/absence de lumière ;
- *etc.*

La **transformation de l'information binaire sous forme d'un signal** à deux états est réalisée par l'interface.

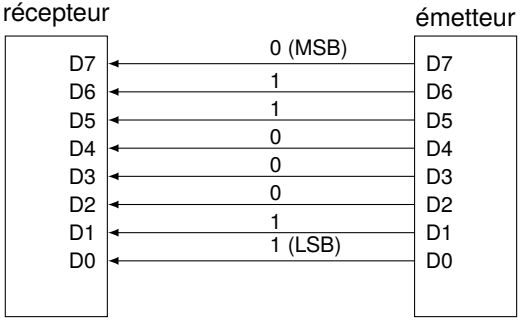
Exemple : bits codés suivant une différence de tension



L'interface réalise le «*codage en bande de base*».

On parlera de «transmission numérique» ou «transmission en bande de base», *baseband*.

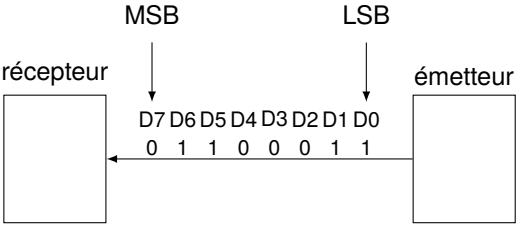
Transmission parallèle



- LSB : «*least significant bit*»
- MSB : «*most significant bit*»

Les bits sont émis **simultanément** sur autant de fils que de nombre de bits utilisé pour le codage.
Ce mode est employé pour les bus internes des ordinateurs (bus 16, 32 ou 64bits) parfois pour la communication vers des périphériques (imprimantes, bus SCSI, bus IDE…).
Exemple : on transmet un octet sur 8 fils, en envoyant en même temps chaque bit sur chaque fil.

Transmission série



Les bits sont transmis **séquentiellement** sur un seul fil.
Dans les réseaux, qu'ils soient locaux ou étendus, c'est la transmission série qui est utilisée.

C'est la **liaison série** qui est la **plus utilisée** (disque dur SATA, USB, ...)

Transmission série sur un seul fil pour une liaison synchrone

- *émetteur*, E, et *récepteur*, R, utilisent une **même base de temps** pour émettre les bits (horloge) ;
- il sont **cadencés** suivant la même horloge ;
- à chaque «top d'horloge», un bit est envoyé et R sait donc «quand» récupérer ce bit.

Le récepteur reçoit de façon continue les informations au rythme auquel l'émetteur les envoie.

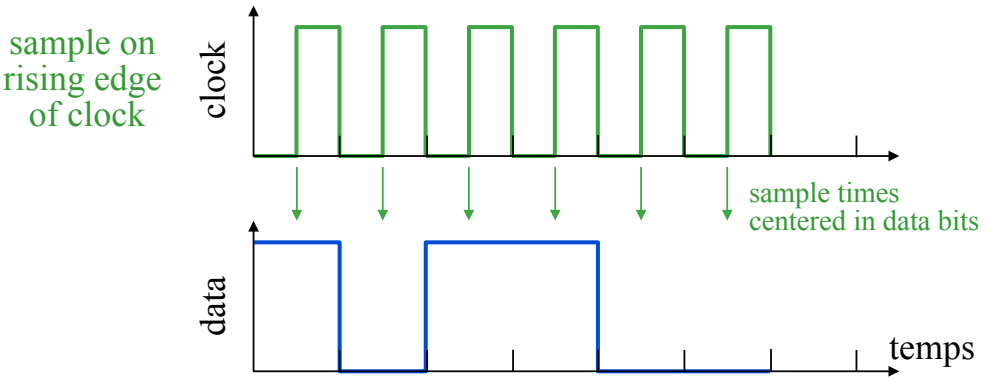
Inconvénient :

▷ la reconnaissance des informations au niveau du récepteur : il peut exister des différences entre les horloges de l'émetteur et du récepteur.

C'est pourquoi chaque envoi de bit doit se faire **sur une durée assez longue** pour que le récepteur la distingue.

Ainsi, la vitesse de transmission **ne peut pas être très élevée** *dans une liaison synchrone sans recourir à du matériel coûteux.*

Transmission série sur deux fils pour une liaison synchrone

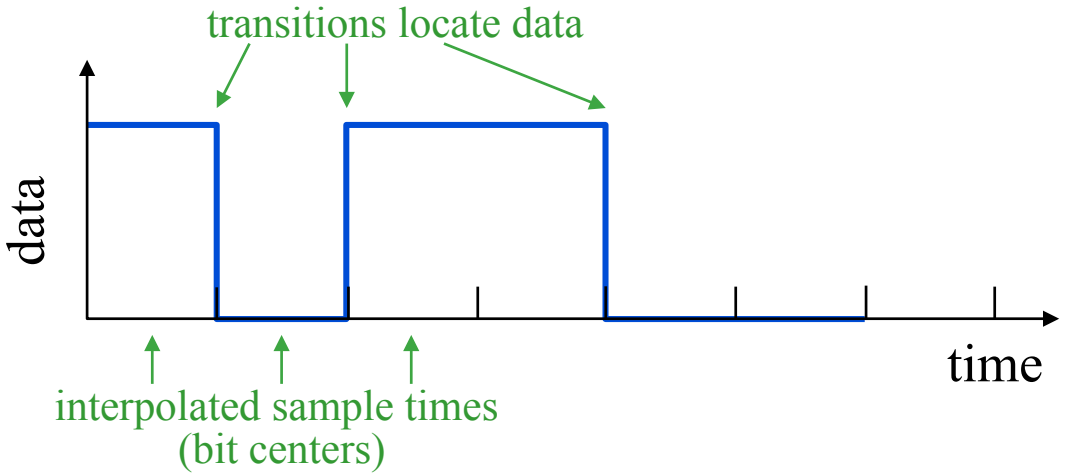


Transmission série sur un seul fil pour une liaison asynchrone

L'émetteur et le récepteur ne sont pas *synchronisés*.

Le récepteur, pour se **synchroniser tout seul** :

- ▷ **connaît le débit** de transmission ;
- ▷ **recherche des transitions** pour se synchroniser et interpoler des mesures d'échantillonnage...
- ▷ **extrait l'horloge** des données :



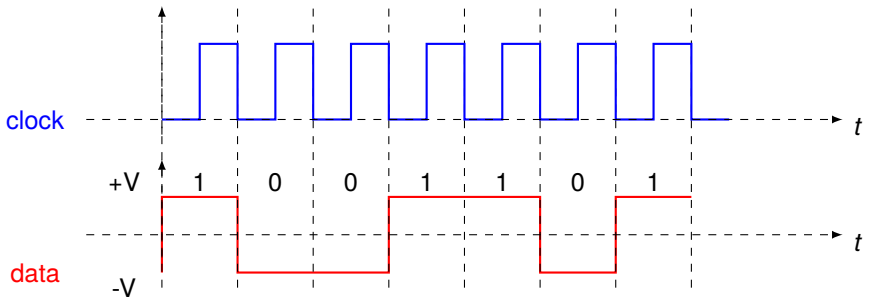
Généralisation des codages

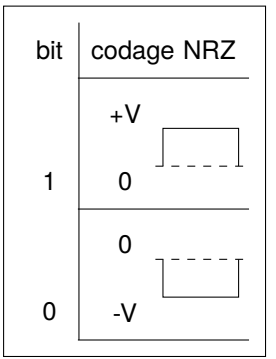
- Chaque variation des **informations transmises** est faite suivant un rythme prédéfinie : les «tics» d'horloge.
- Il est possible de considérer l'horloge comme un *signal* qui varie régulièrement.
- Un codage consiste alors à modifier les **caractéristiques** du signal d'horloge en fonction :
  - des bits à transmettre ;
  - d'une façon de réaliser ces modifications : un codage.

Cette transformation du signal d'horloge : «**codage en bande de base**».

Exemple : pour le code NRZ binaire (non retour à zéro) et un signal d'horloge sur front descendant

Les données sont : `1,0,0,1,1,0,1`



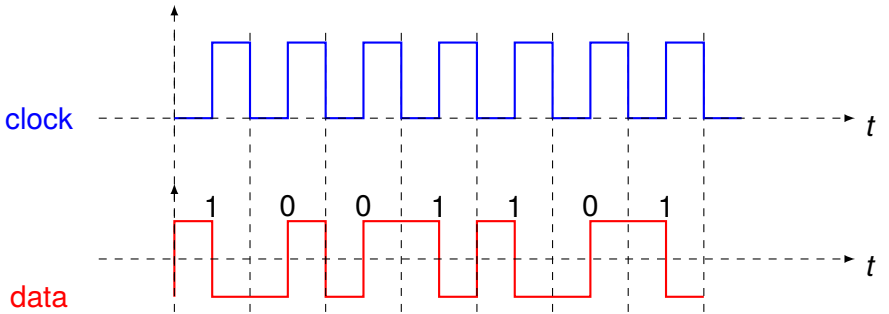


Codage Manchester

Le codage Manchester, également appelé *codage biphase* ou PE (pour *Phase Encode*), introduit une transition au milieu de chaque intervalle.

Il consiste en fait à faire un OU exclusif (XOR) entre le signal et le signal d'horloge, ce qui se traduit par :

- ▷ un **front montant** lorsque le bit est à zéro,
- ▷ un **front descendant** lorsque le bit est à un.



Avantages

- ⋆ le non passage par zéro, rendant possible par le récepteur la détection d'un signal
- ⋆ un «spectre» occupant une large bande (le spectre correspond aux fréquences présentes dans le signal)

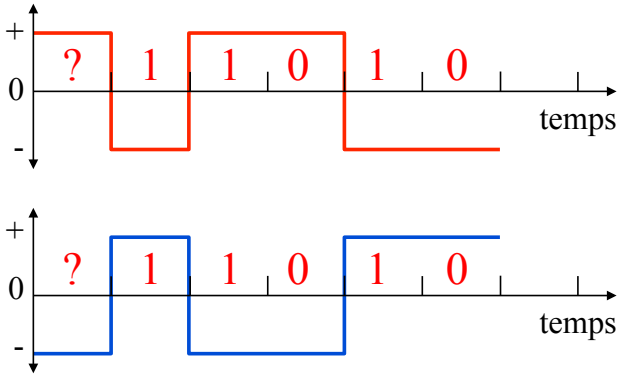
Utilisé dans Ethernet 10Base5, 10Base2, 10BaseT

Codage NRZI, Non-Return to Zero Inverted

Le codage NRZI est sensiblement différent du codage NRZ :

- ▷ lorsque le bit est à 1, le signal change d'état après le top de l'horloge (transition) ;
- ▷ lorsque le bit est à 0, le signal ne subit aucun changement d'état.

Signaux NRZI équivalents



Avantages

- ⋆ la détection de la présence ou non du signal ;
- ⋆ la nécessité d'un faible courant de transmission du signal.

Défaut

La présence d'un courant continu lors d'une suite de zéro, gêne la synchronisation entre émetteur et récepteur.

Notion de symbole

Les informations sont codées sous forme **binaire**, c–à–d sous forme de **séquences** de 0 et de 1.
Il est obligatoire que le même code soit utilisé pour que les informations puissent être échangées.

Une **séquence binaire** peut :

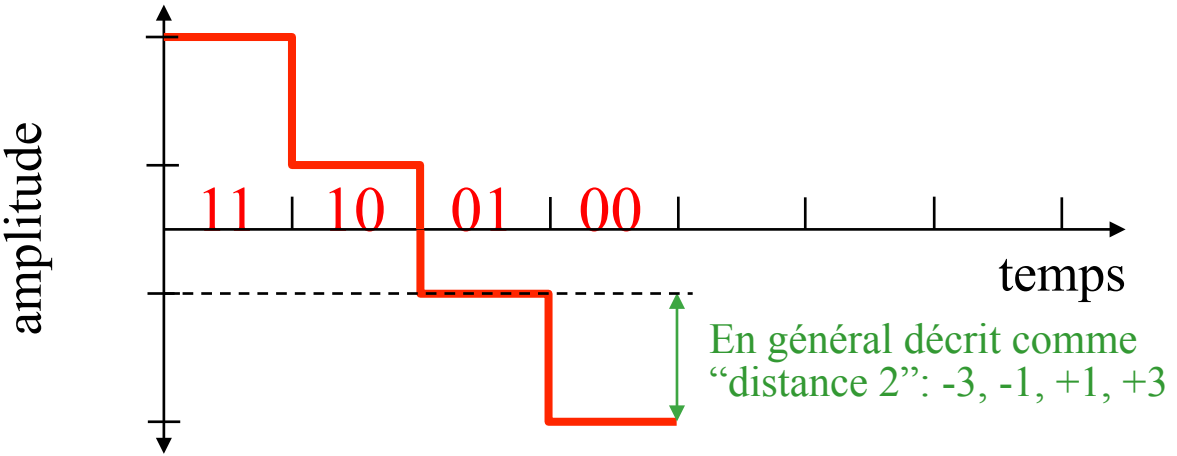
- être regroupée suivant une taille quelconque ;
- être différenciée d'une autre séquence, par la valeur de chacun de ses bits par rapport à son rang dans la séquence : `00100` est différent de `10100` ;
- être interprétée comme un **symbole**…

Le nombre de **séquences binaires différentes** pouvant être créées dépend de la taille maximale de la séquence :
5 bits $\longrightarrow 2^5 = 32$ symboles.

Codage à 4 niveaux : le codage 2B1Q

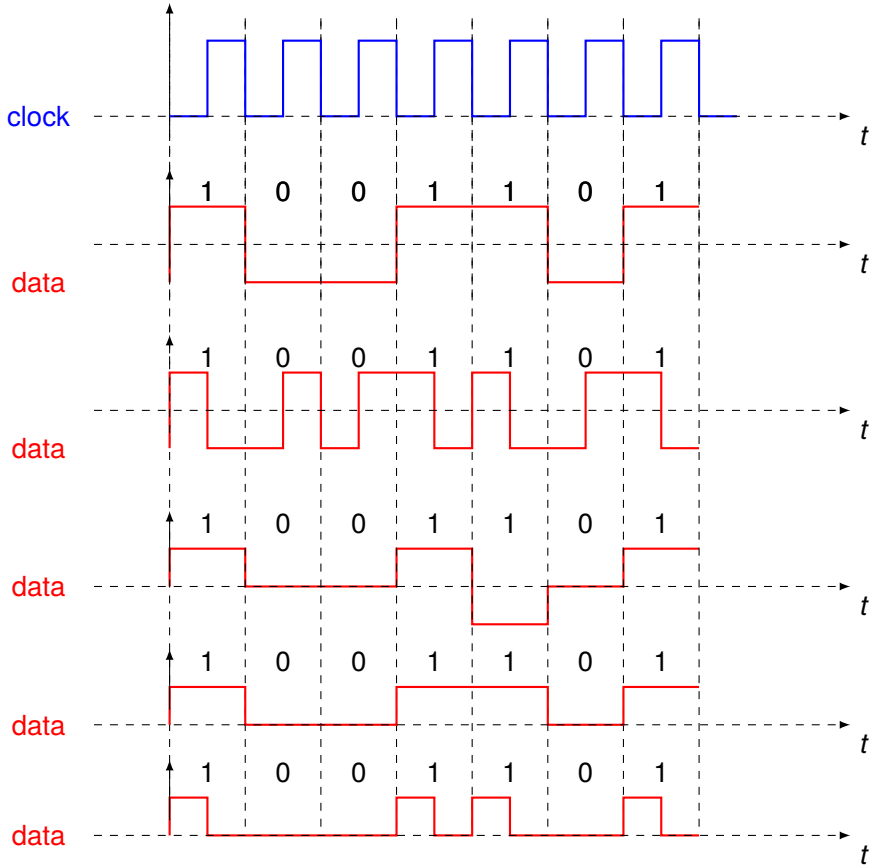
2 bits de données donne 1 «Quaternary», c-à-d un **symbole** sur 4 niveaux :

- la séquence de bits «11» donne $+3$;
- la séquence de bits «10» donne $+1$;
- la séquence de bits «01» donne -1 ;
- la séquence de bits «00» donne -3 ;



Récapitulatif de différents codages numériques

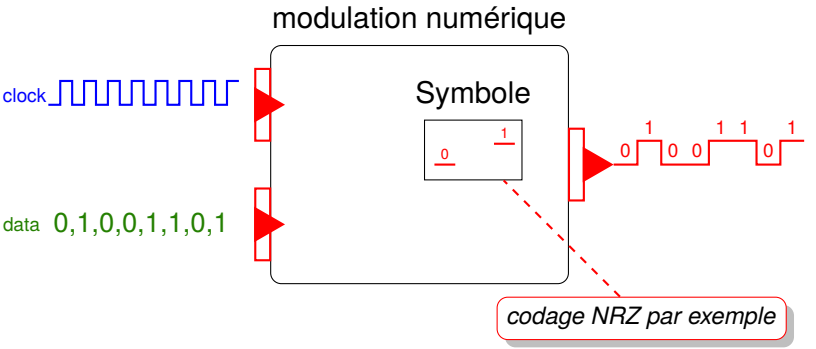
Représentation des 0 et de 1 par variation du voltage du courant



Le codage numérique ou en «bande de base», «*baseband*»

Généralisation du codage

- ▷ des **données binaire** à transmettre ;
- ▷ un **signal d'horloge** qui rythme l'utilisation de chaque bit de données ;
- ▷ un codage où **chaque bit** va être associé à un **symbole** suivant le codage choisi ;



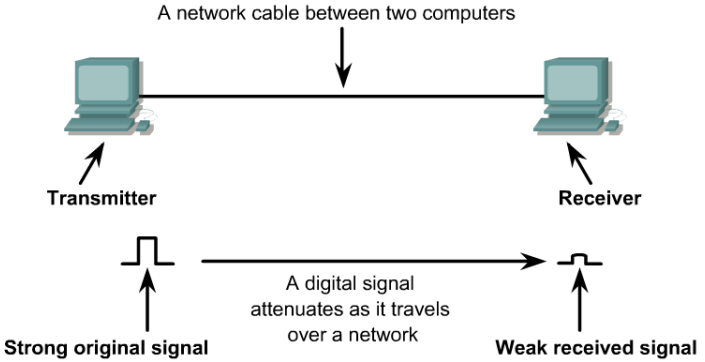
Le débit de sortie du codage dépend du rythme de l'horloge, c-à-d de sa **fréquence**.

Une horloge à $1MHz \Longrightarrow 1Mbps$ pour un «*méga bit par seconde*».

Le codage en bande de base :

- vise à transmettre un signal dans sa «forme» initiale (signal carré) ;
- utilise du courant continu.

Les contraintes physiques des supports de transmission utilisés entraînent une dégradation très rapide du signal transmis :



Lorsque le signal est reçu, il est devenu **très difficile** de reconnaître les éléments de codage et ainsi de retrouver l'information binaire transmise (distortion, affaiblissement, *etc.*).

Pour dépasser les limitations d'un codage en bande de base : utilisation de la «modulation»

On utilise :

▷ un signal analogique avec des transitions douces et continues qui seront moins dégradées ;

▷ d'**autres types de codage** basés sur des modifications des **caractéristiques** de ce signal analogique

Ces codages sont appelés «modulation».

2 Pour transmettre de manière analogique

Moyens, Besoins & Contraintes

- Savoir représenter de l'information de manière analogique pour l'envoyer :
  - **coder une information numérique** sur un signal analogique : **modulation**
- Savoir analyser une information analogique pour en déduire une information numérique :
  - **Échantillonnage**, **Quantification** & **Numérisation** ;
  - **Analyse de Fourier** ;
- En présence de :
  - **Atténuation** ;
  - **Modifications aléatoires** du signal lors de sa transmission ;
  - **limitations physiques** inhérentes au support de transmission ;
- Avec les contraintes :
  - **maximiser** le **débit** ;
  - s'adapter aux **conditions** subies par le **récepteur** ;

Codage par modulation : les détails

La **modulation** consiste à faire varier une des caractéristiques d'un signal purement sinusoïdal.

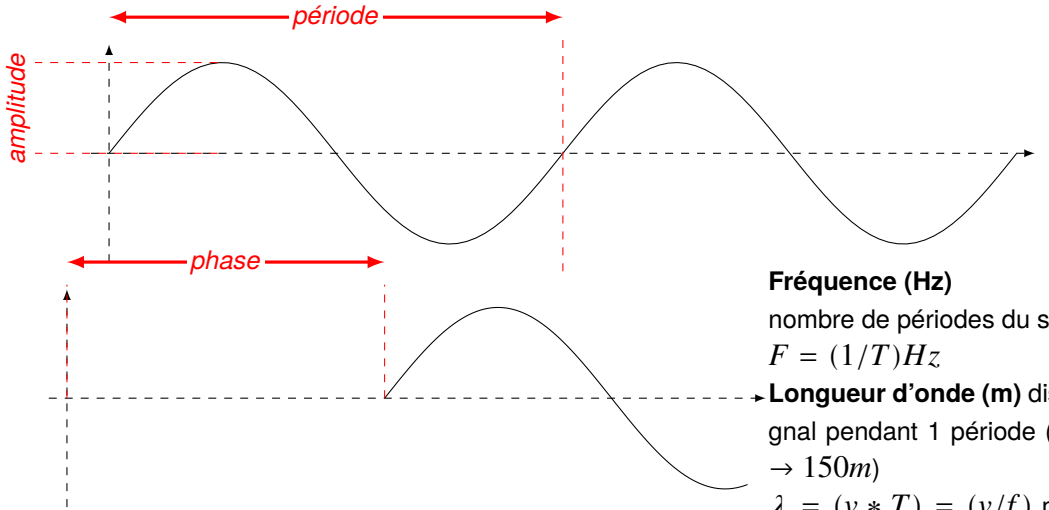
Gain espéré par rapport au codage en bande de base

La fréquence fondamentale de ce signal est beaucoup plus élevée que la fréquence maximale du signal en bande de base (débit des informations binaires à transmettre en fonction de l'horloge).

Conserver et changer

Changer le codage la variation d'un des paramètres se fait en fonction du signal en bande de base (données+horloge), donc seul le codage diffère.
Codage représentation «carrée» → Codage représentation «analogique»

Un signal sinusoïdal est défini par trois paramètres :

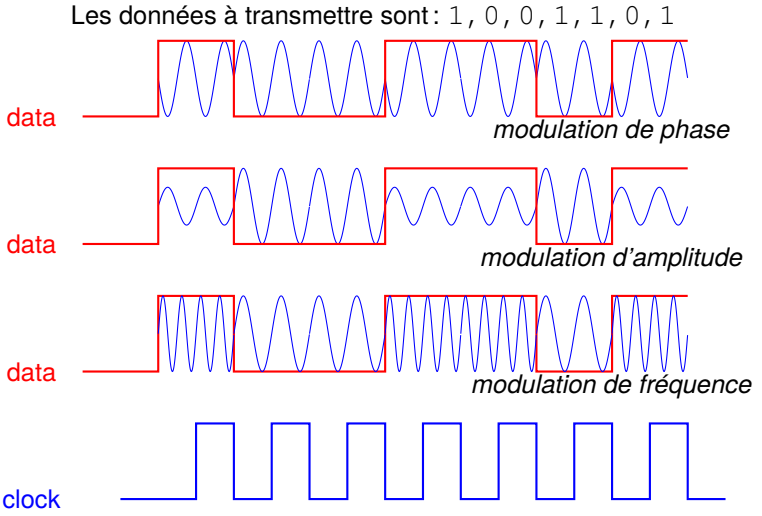


Fréquence (Hz)
nombre de périodes du signal pendant 1 seconde
$F = (1/T)Hz$

Longueur d'onde (m) distance parcourue par le signal pendant 1 période ($1MHz \rightarrow 300m$, $2MHz \rightarrow 150m$)
$\lambda = (v * T) = (v/f)$ mètre avec v, la vitesse de déplacement du signal.

Modulations

- Modulation de **phase** : amplitude et fréquence fixes, phase variable : 0 et $phase$ par exemple ;
- Modulation **d'amplitude** : phase et fréquence fixes, amplitude variable : A_0 et A_1 par exemple ;
- Modulation de **fréquence** : phase et amplitude fixes, fréquence variable : f et $2f$ par exemple ;

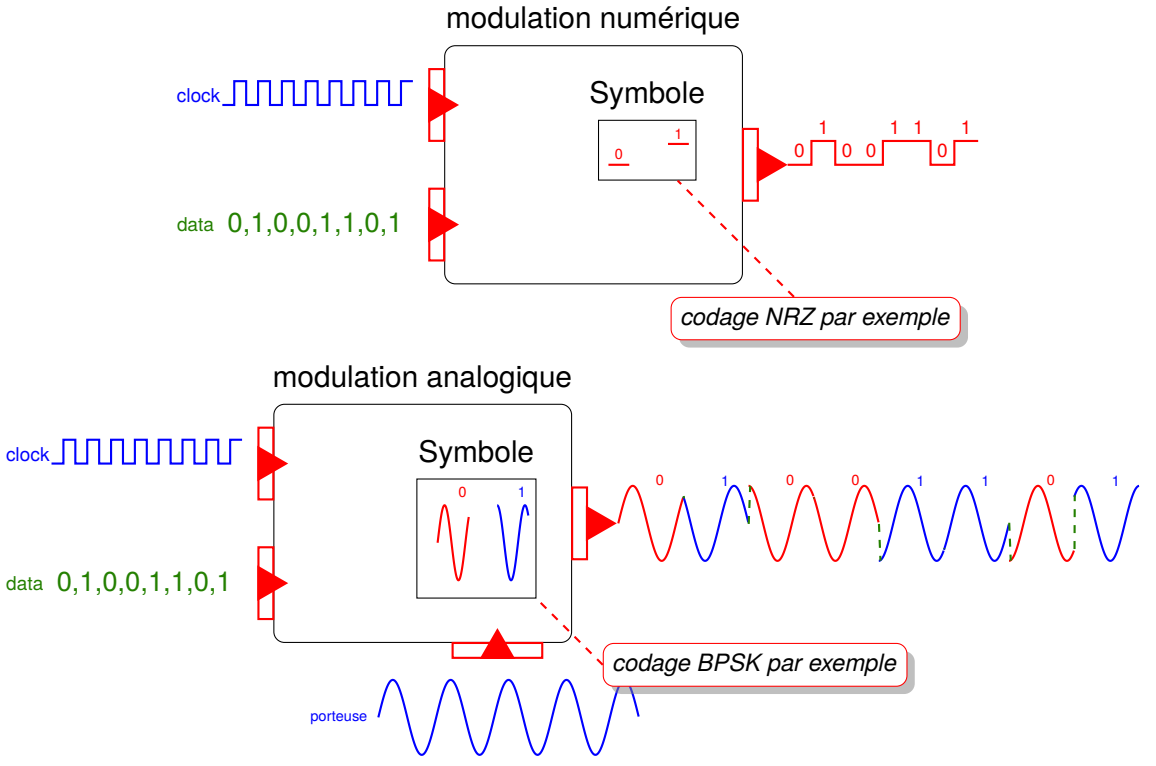


Modulation

La **variation du paramètre** amplitude, phase ou fréquence peut être faite de manière :

- ▷ **continue** ou *analogique* : on parlera de FM, AM, PM pour «*Frequency Modulation*», *etc*
- ▷ **discrète** ou *numérique* : on parlera de FSK, ASK, PSK, pour «*Frequency Shift Keying*», *etc*

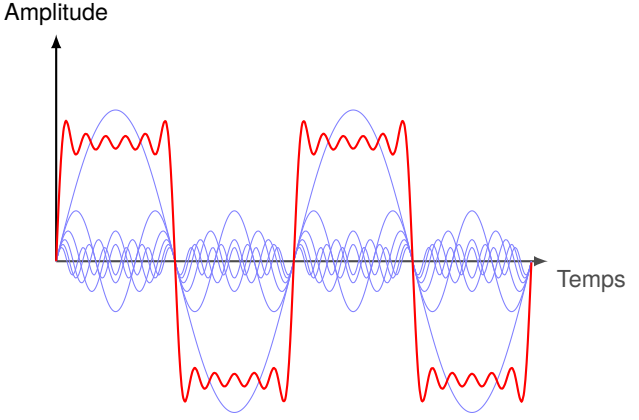
Généralisation du codage



Le **débit** dépend de la **vitesse de modulation**, c-à-d du rythme des transformations réalisées sur la **porteuse**.

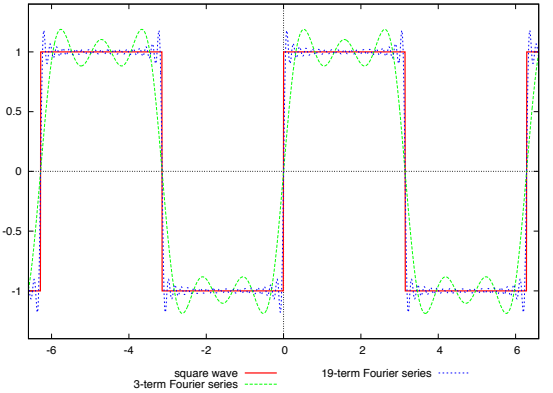
Approximation d'un signal de forme «carré»

Soit la série de Fourier suivante : $s(t) = a_1 cos(f_1 t) + a_2 cos(f_2 t) + a_3 cos(f_3 t) + \ldots$

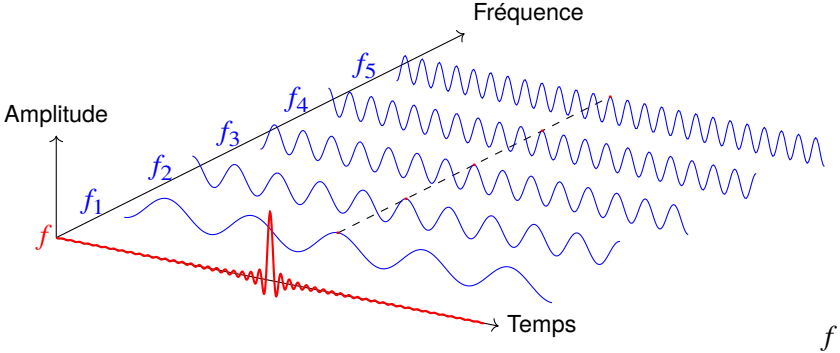


La fonction en rouge est la somme des fonctions en bleu.

Plus on augmente le nombre de termes de la série, meilleure est l'approximation :

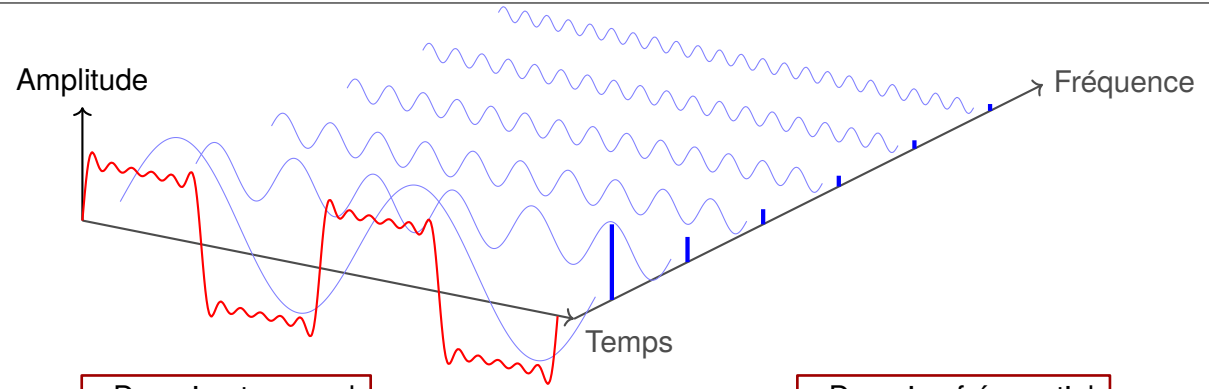


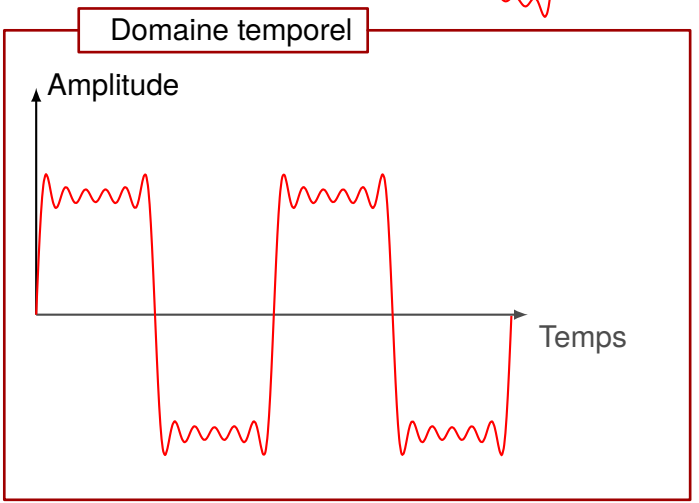
Autre exemple

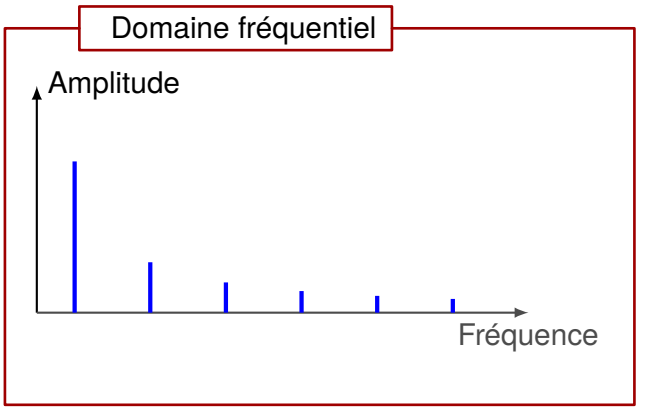


$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$$

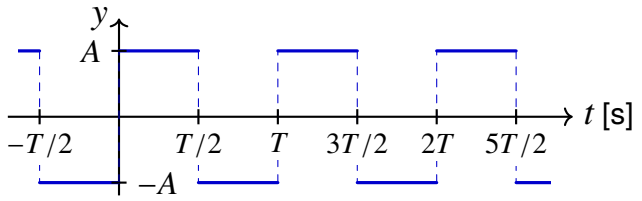
Domaine temporel *vs* Domaine fréquentiel

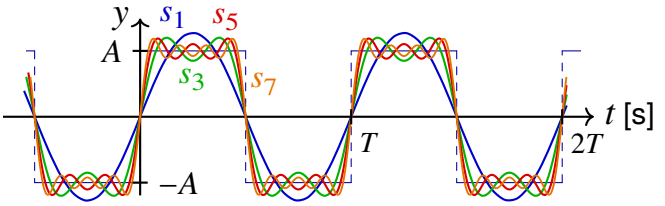


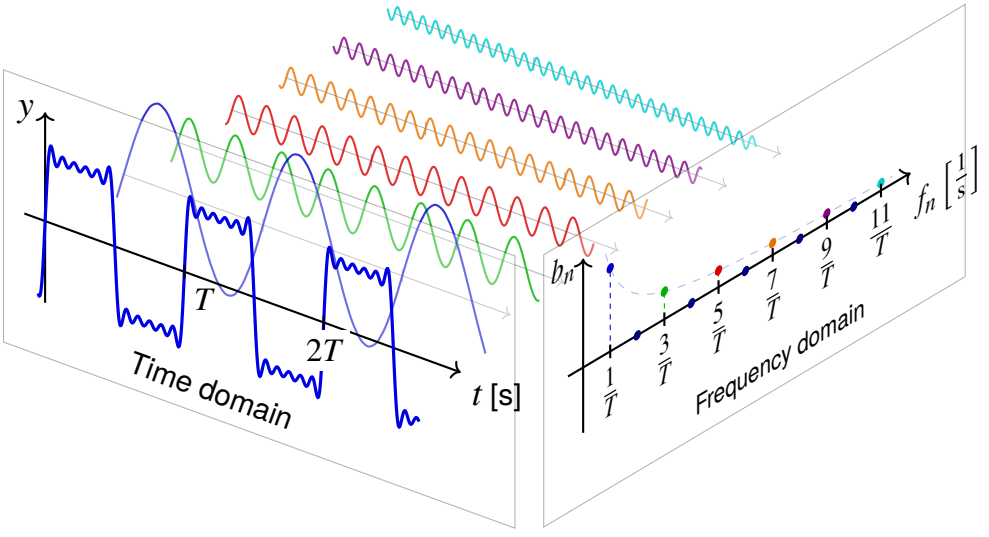




Particularités d'un signal «carré» ou digital







On remarque que les «harmoniques» sont impaires et nombreuses...

Passage d'un signal analogique à un signal numérique

Numérisation

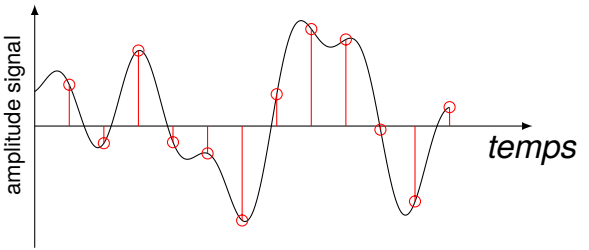
Pour pouvoir être traité dans un ordinateur, un signal analogique doit être **numériser**.

Cette numérisation est réalisée après **quantification** et **échantillonnage** de ce signal.

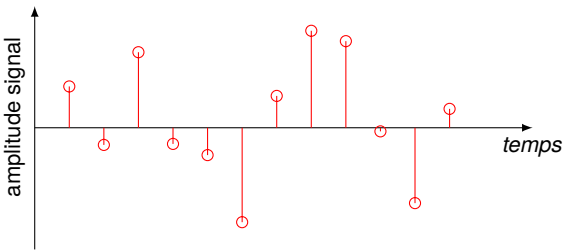
Échantillonnage

Mesurer la valeur du signal continu à des **intervalles de temps régulier**.

Le signal analogique :



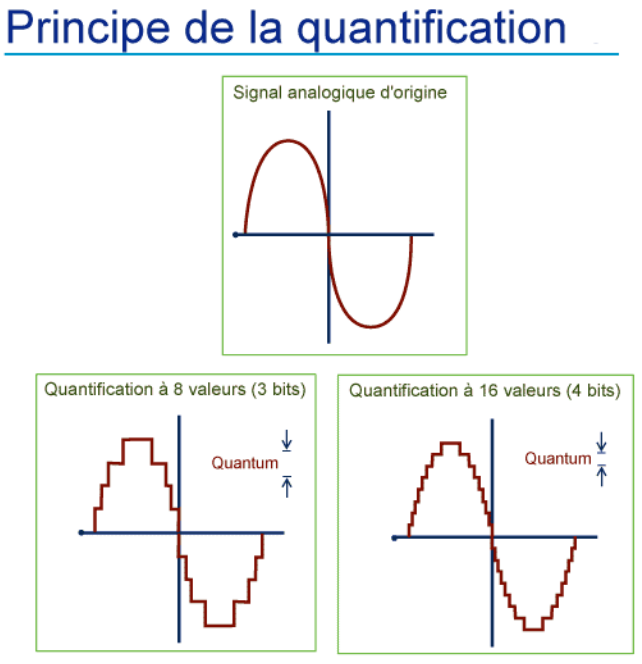
Le signal numérique correspond aux différentes valeurs **discrétes** mesurées à intervalle régulier :

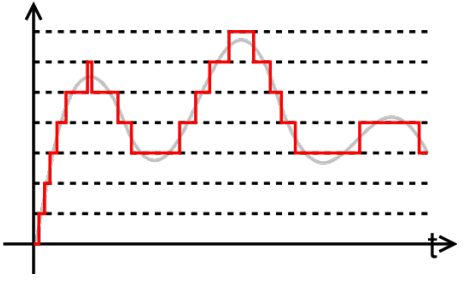


Quantification

Elle consiste à :

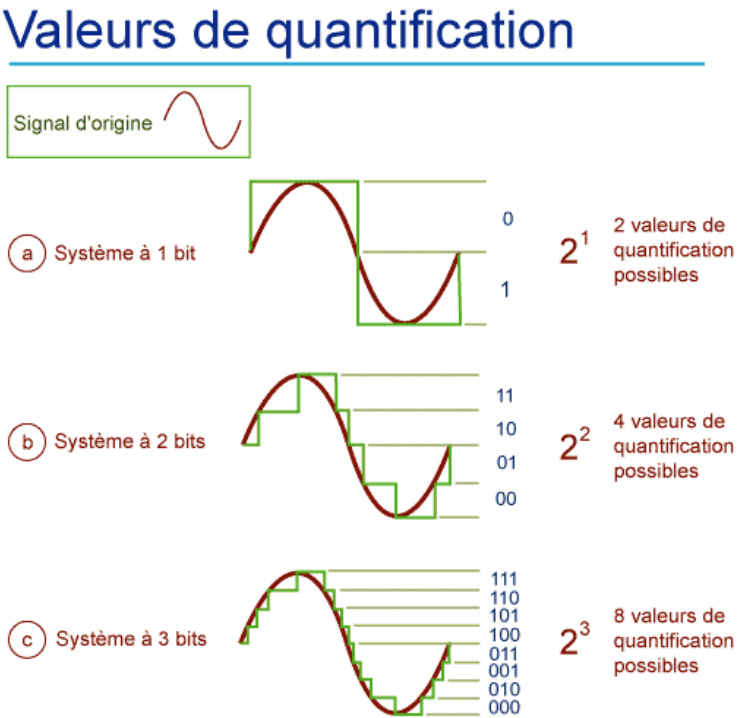
- définir un intervalle de valeurs (par exemple entre -10 et 20)
- choisir le nombre de valeurs pouvant être prises dans cette intervalle (par ex. 4 : $\{-10, 0, 10, 20\}$).





On associe pour chaque valeur du signal continu la valeur quantifiée la plus proche (il y a une perte de précision).

Pour une transmission de données, on s'intéresse à **transmettre des bits d'informations**.
Les différentes **valeurs possibles de quantification** servent à représenter les différentes combinaisons pouvant être prises par ces bits de données.

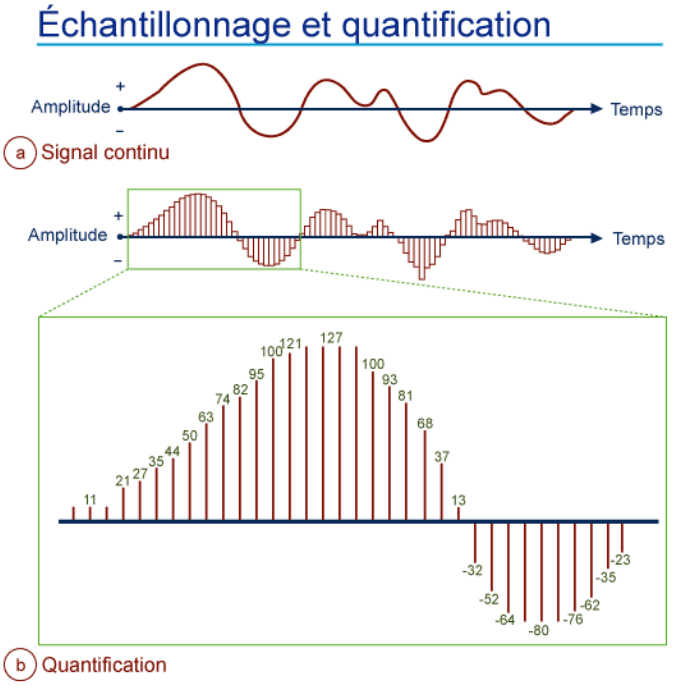


Ce nombre de valeurs est choisi comme une puissance de 2 (par exemple $2^8 = 256$ valeurs possibles).

Numérisation

pour obtenir un signal numérique à partir d'un signal analogique, il faut :

1. quantifier le signal analogique (transformer les valeurs continues en valeurs discrètes),
2. l'échantillonner (prélever des échantillons à des instants réguliers).



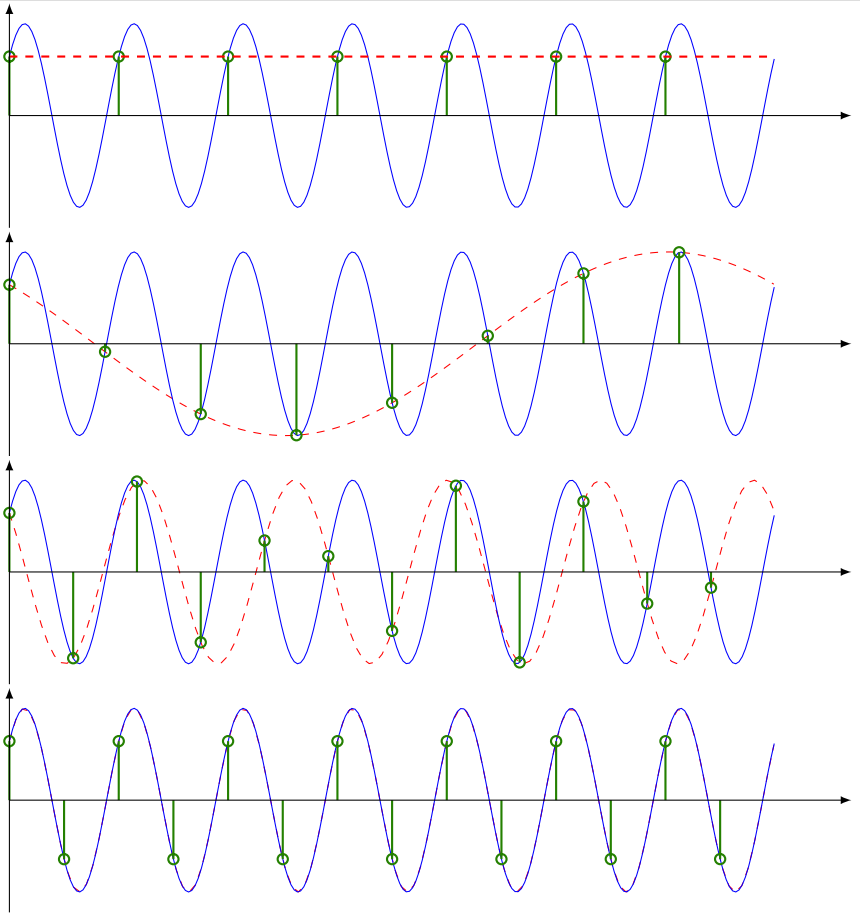
Il faut choisir :

- une fréquence $f = 1/\Delta T$ où ΔT est le temps séparant deux échantillons ;
- n la puissance de 2 pour la quantification (2^n valeurs).

Pour pouvoir reconstituer **correctement** le signal analogique par rapport à sa numérisation, il existe une **contrainte** sur la fréquence d'échantillonnage :

$$freq_echantillonnage > 2 * freq_maximale_analogique$$

Cette propriété est appelée «critère de Nyquist» ou «limite de Nyquist».



$\overline{f_s} = 7Hz$
$\overline{f_{éch}} = 7Hz$

la fréquence du signal reconstruit est nulle

$\overline{f_s} = 7Hz$
$\overline{f_{éch}} = 8Hz$

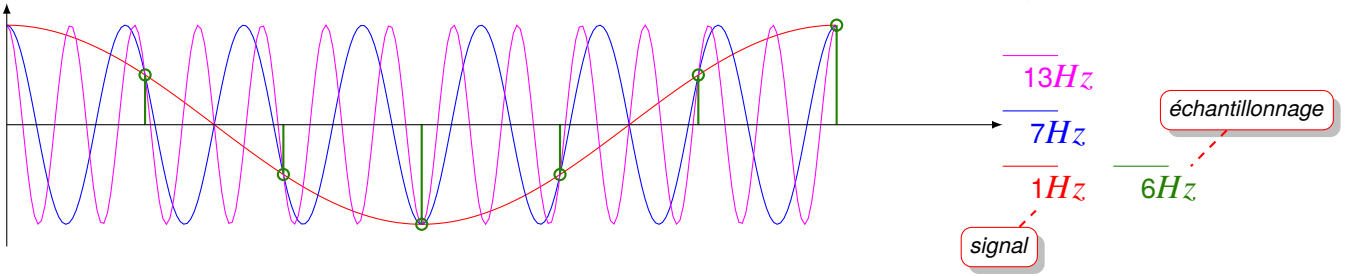
$\overline{f_s} = 7Hz$
$\overline{f_{éch}} = 12Hz$

$\overline{f_s} = 7Hz$
$\overline{f_{éch}} = 14Hz$

le signal est reconstruit

L'aliasing

L'aliasing est l'intrusion d'un signal de haute fréquence dans un signal de basse fréquence.

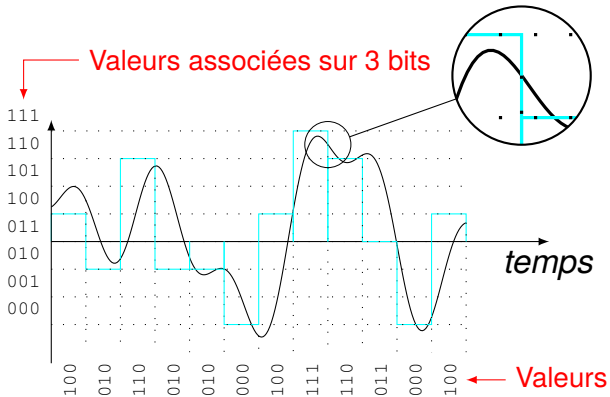


On dit que la fonction originale possède des «*alias*» :

alias : fréquence_originale + n ∗ fréquence_échantillonnage

Ici la fonction à 1hz est numérisée par un échantillonage à 6Hz⟹les fonctions «alias» *sont 7Hz, 13Hz,* etc.

Erreurs dues à la faiblesse de niveaux de quantifications



Ici, on peut hésiter entre deux valeurs possibles de quantification ⟹deux valeurs transmises différentes.

Les causes de dégradation d'une transmission

Perturbations

La transmission de données sur une ligne **ne se fait pas sans pertes.**

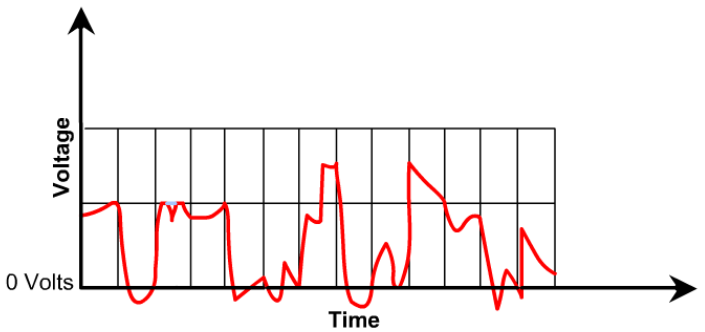
Des **parasites** ou des **dégradations** du signal peuvent apparaître :

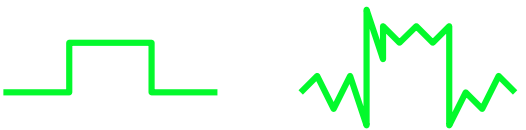
▷ les **parasites**, souvent appelés **bruit**, sont l'ensemble des perturbations modifiant localement la forme du signal.

Deux types de bruit :

⋆ le **bruit blanc** est une **perturbation uniforme du signal**, c-à-d qu'il rajoute au signal une petite amplitude dont la moyenne sur le signal est nulle $\Longrightarrow$ *pas d'énergie !*
Le bruit blanc est caractérisé par un **ratio** appelé «rapport signal/bruit» : pourcentage d'amplitude du signal par rapport au bruit (son unité est le **décibel**).
Celui-ci doit être le plus élevé possible (plus d'information que de bruit) !

⋆ les **bruits impulsifs** sont de petits pics d'intensité provoquant des **erreurs** de transmission.





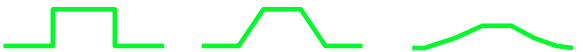
- L'**affaiblissement du signal** : représente la perte de signal en énergie dissipée dans la ligne. L'affaiblissement se traduit par un signal de sortie plus faible que le signal d'entrée :

$$A = 20\log(\frac{\text{Niveau du signal en sortie}}{\text{Niveau du signal en entrée}})dB$$

L'affaiblissement est proportionnel à la **longueur** *de la voie de transmission et à la* **fréquence** *du signal.*



- la **distorsion du signal** caractérise le **déphasage** entre le signal en entrée et le signal en sortie.
- la **dispersion** qui traduit le **décalage des temps** d'arrivée des signaux émis en fonction de leur fréquence.



Importance de la fréquence employée : *l'atténuation et la vitesse de propagation dépendent de la fréquence employée !*

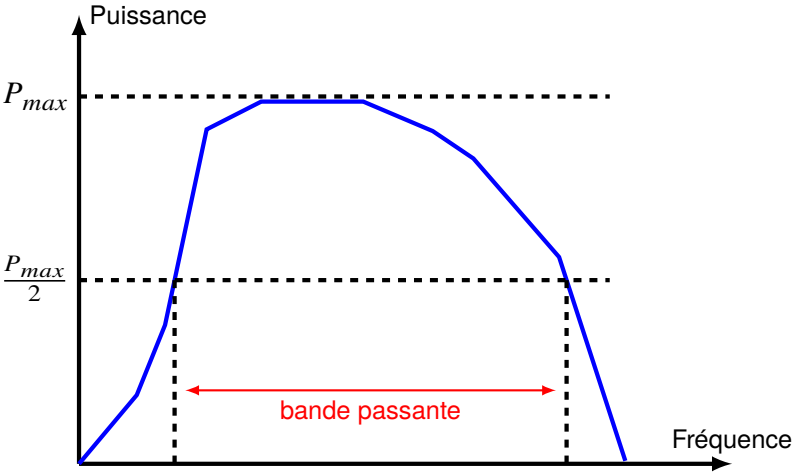
Notion de bande passante

Elle désigne la **différence**, en Hz, entre la plus haute et la plus basse des **fréquences utilisables** sur un support de transmission.

Dans la pratique, ce terme désigne le débit d'une ligne de transmission, calculé en quantité de données susceptibles de transiter dans un laps de temps donné (exprimé en bits par seconde).

Plus la **bande passante est large**, **plus** le volume d'informations qui peut transiter est **important**.

Bande passante :
Largeur de la bande de fréquence pour laquelle la puissance reçue est **supérieure à la puissance émise maximale divisée par deux** $(-3dB)$



Exemples :

- Une ligne de téléphone a une bande passante comprise entre 300 et 3400 Hertz environ pour un taux d'affaiblissement égal à 3db ;
- Paire métallique : $10MHz$, Câble coaxial : GHz, Fibre optique : $100GHz$.

Remarques

D'après la **bande passante**, certaines fréquences ne peuvent être utilisées.
En particulier, les fréquences **les plus hautes**.

Intuitivement, plus la fréquence augmente plus on peut coder d'information.
$\Longrightarrow$ il existe une **borne maximale** pour la quantité d'information que l'on peut encoder !

Cette **borne maximale** :
- dépend du **bruit**, qui dépend de la nature de la ligne de transmission ;
- définit une notion de **capacité** de la ligne de transmission.

La **capacité** d'une ligne de transmission est la **quantité d'informations** (en bits) pouvant être transmis sur la voie en **1 seconde**.

Théorème de Shannon

La capacité se caractérise de la façon suivante :

$$C = W \log_2(1 + \frac{S}{N})$$

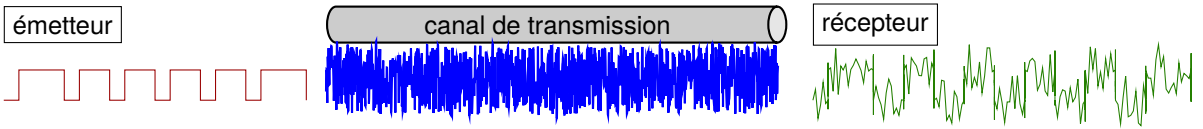
- C capacité (en bits/s) ;
- W largeur de bande (en Hz) ;
- S/N rapport signal sur bruit, «*noise*», de la ligne de transmission.

Récapitulatif : le bruit et la capacité

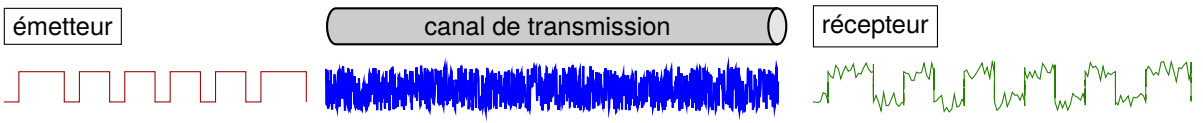
La transmission d'un signal est perturbée par la présence de **bruit**.

Un **bruit inhéren**t au support de transmission : un **bruit blanc gaussien**.

Si le bruit est **très présent** par rapport au signal, il est difficile de retrouver le signal original lors de sa réception :



Si le bruit est **moins présent** par rapport au signal, il est possible de retrouver le signal original lors de sa réception :



Rapport Signal/Bruit, S/B, au niveau du récepteur

$$S/B_{(dB)} = \frac{\text{Puissance du signal reçue par R}}{\text{Puissance du bruit reçue par R}}$$

Capacité maximale d'un canal soumis à un bruit

Théorème de Shannon :

$$C_{(bit/s)} = W_{(Hz)} log_2(1 + \frac{S}{B})$$

où W est la **bande passante**.

Plus sur le décibel

Le décibel ou dB

$$V_{(dB)} = 10 * log_{10}(\frac{P}{P_{réf}})$$

Propriétés :

- ▷ $log_n(1) = 0$
- ▷ $log_n(n^x) = x$
- ▷ $log_n(n) = 1$
- ▷ pour la base 10 : $log_{10}(1) = 0, log_{10}(10) = 1, log_{10}(100) = 2$
- ▷ pour la base 2 : $log_2(1) = 0, log_2(2) = 1, log_4(100) = 2$

Rapports $\frac{P}{P_{réf}}$	décibels
1	0
2	3
4	6
10	10
100	20

Rapports $\frac{P}{P_{réf}}$	décibels
1000	30
2000	33
0,5	-3
0,1	-10
0,01	-20

Pour faciliter les calculs, quelques valeurs à retenir :

$*2$	$+3dB$
$/2$	$-3dB$
$*10$	$+10dB$
$/10$	$-10dB$

Pour faire un calcul :

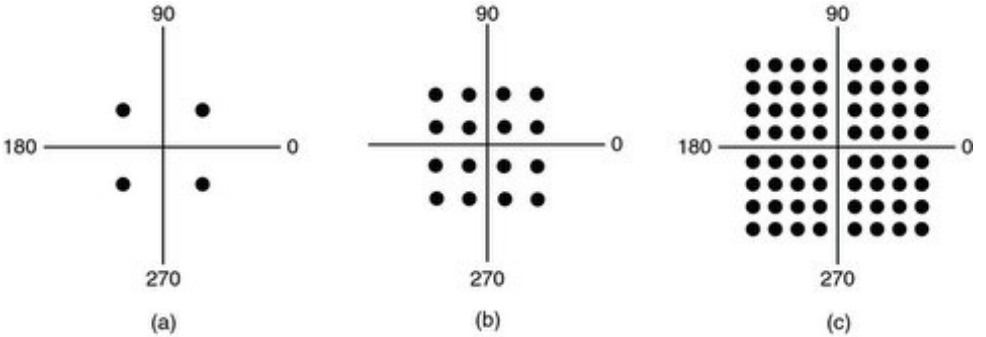
▷ $+16dB \Longrightarrow +10 + 3 + 3 \Longrightarrow *10 * 2 * 2 = *40$, c-à-d la valeur est multipliée par 40 !

Il est possible :

- ▷ d'utiliser plusieurs paramètres pour une même modulation ;
- ▷ de combiner plusieurs types de modélisation simultanément ;
- ▷ de faire les deux !

Exemple :

- ◦ QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying* (a) : 4 états de modulation de phase ou 4 symboles ;
- ◦ QAM, *Quadrature Amplitude Modulation* (b) : 4 états de modulation d'amplitudes et 4 de phases ou 16 symboles ;
- ◦ QAM-64 (c) : 8 états et 8 états ou 64 symboles.



© Pearson Education France

Définition du bauds

C'est le nombre de modulation transmise par seconde, ou de symboles transmis.

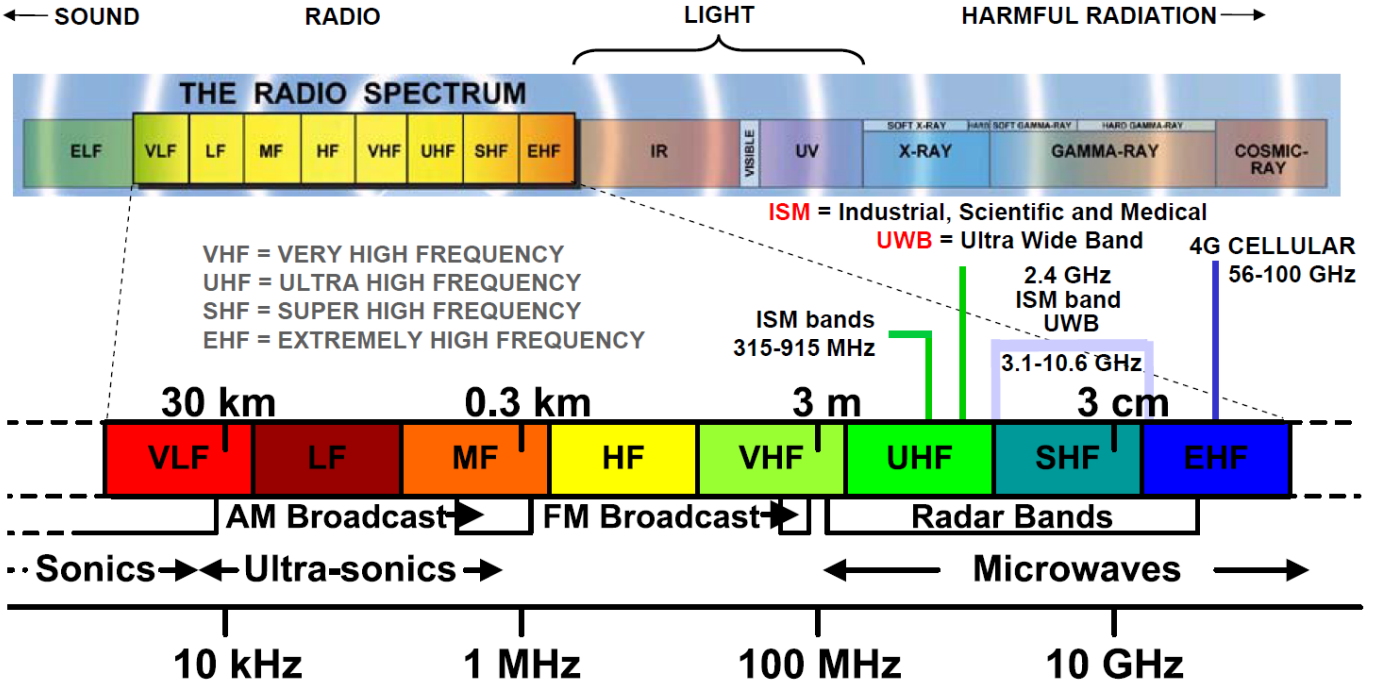
Pour passer au nombre de bits que l'on peut transmettre, on calcule 2^n = nombres de symboles (où n est le nombre de bits).

Et le partage d’accès au lien de communication ?

La répartition des fréquences

L'allocation des fréquences est :

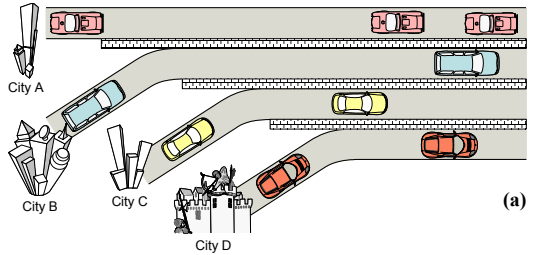
- ▷ relatives aux aspects physiques et propriétés de ces fréquences : son, lumière, radiation ;
- ▷ soumises à régulation des états : allouées aux radios diffusant de la musique, bande ISM, *etc*.



Le multiplexage : partager la capacité du lien entre plusieurs communications

TDM, «*Time Division Mutliplexing*»

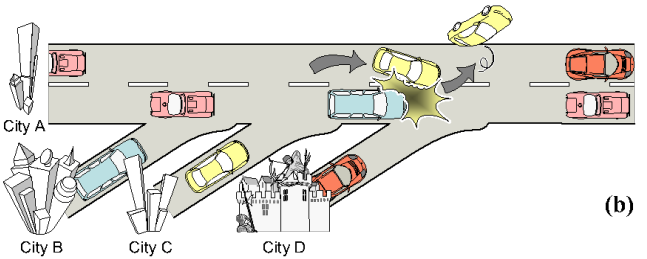
FDM, «*Frequency Division Multiplexing*» :



Le partage du lien de communication est :

- ▷ prévisible : pas de retards dus au mélange de trafic ou de problème si un trafic *traverse* une autre voie ;
- ▷ inefficace : certaines voies peuvent être inoccupées alors que d'autres peuvent être encombrées ;

«*Statistical Multiplexing*»



Le partage du lien de communication est :

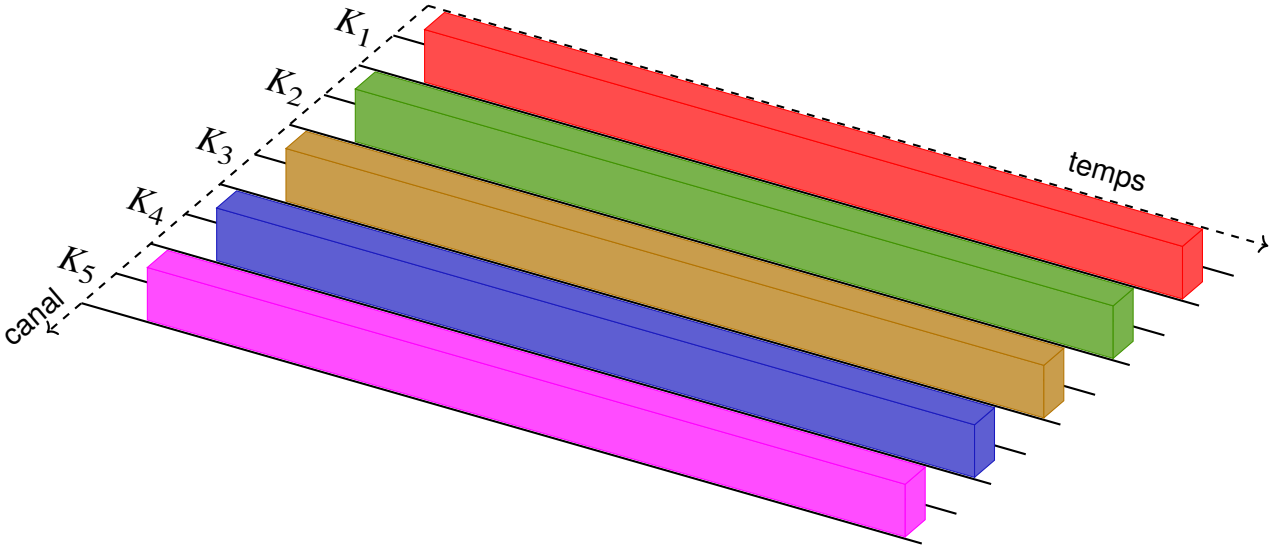
- ▷ efficace : on utilise toute la capacité du lien ;
- ▷ **mais** des retards peuvent survenir et des collisions...

Allocation statique : FDMA, *Frequency Division Multiple Access*

– chaque équipement va utiliser une **fréquence différente** pour communiquer :
  ◇ chaque canal k_i de communication se voit affecté une bande de fréquence ;
  ◇ c'est le cas de : la radio, de la télé, des systèmes cellulaires (WiFi, GSM de 1ère génération, etc.).

Avantages pas de coordination dynamique entre les différents émetteurs ;

Inconvénients
– rigide ;
– **inefficace** si les échanges sont répartis de manière **inégale** et **dynamique**.



Allocation statique : TDMA, *Time Division Multiple Access*

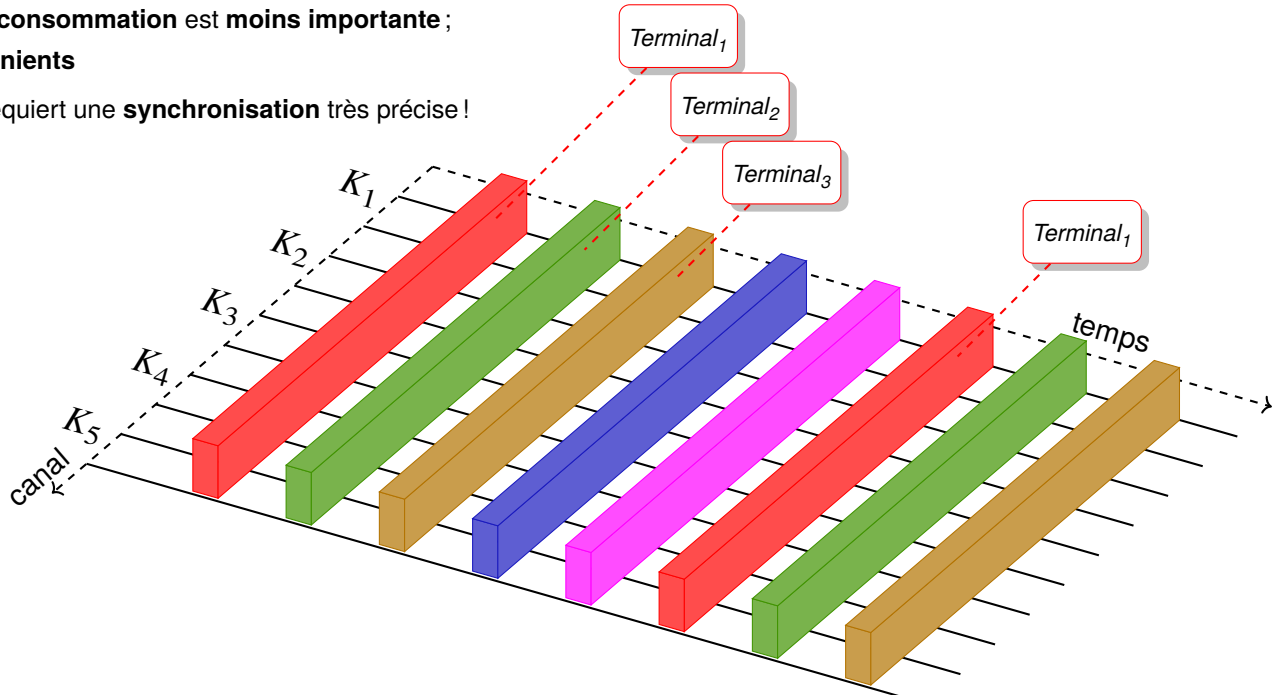
Tous les équipements utilisent la même fréquence, mais pas au même moment.

Avantages

- possible d'affecter **plus de temps** aux émetteurs les **plus actifs** ;
- la capacité des canaux est **supérieure** au FDMA (utilisation de **toute la bande de fréquence**) ;
- la **consommation** est **moins importante** ;

Inconvénients

- Requiert une **synchronisation** très précise !



*Ici, les différentes couleurs correspondent à différents «*slots*» de temps, affectés à différents terminaux.*

Allocation statique : combinaison de TDMA et FDMA

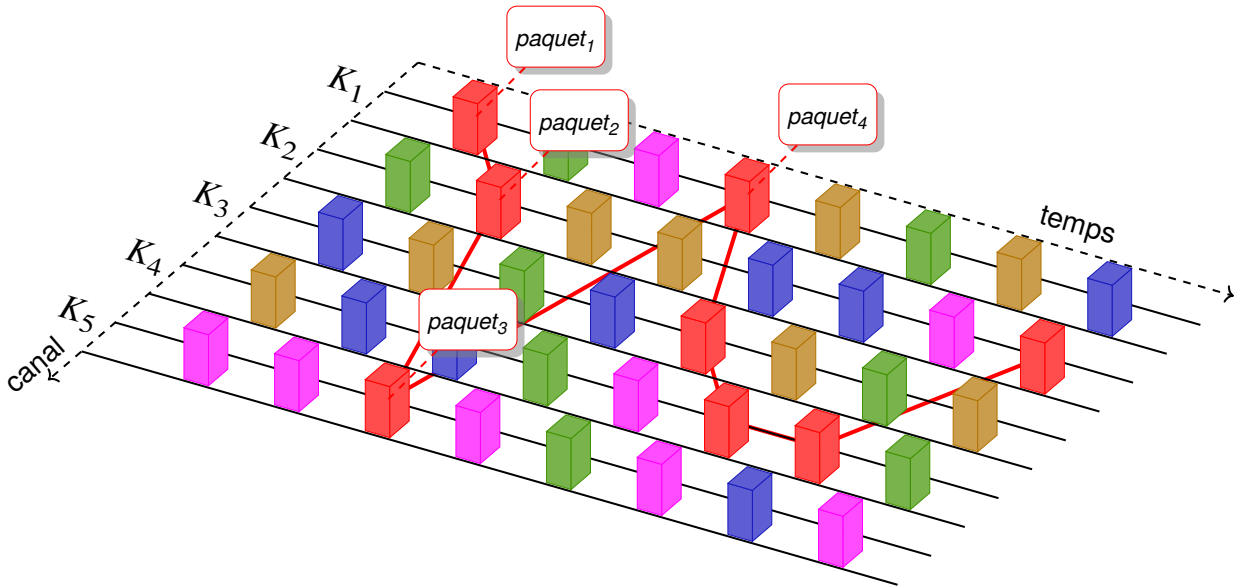
Chaque canal obtient une certaine fréquence pour un certain temps pour l'envoi d'un paquet (exemple : le GSM).

Avantages

- **plus robuste** contre les **interférences** ;
- **plus de capacité** en utilisant une «compression» du temps ;
- une meilleure **protection** contre les écoutes ;

Inconvénients

- les changements de fréquences doivent être **coordonnés**.



Allocation statique : CDMA, *Code Division Multiple Access*

Tous les équipements utilisent la même bande de fréquence, au même moment, mais suivant des «codes» :

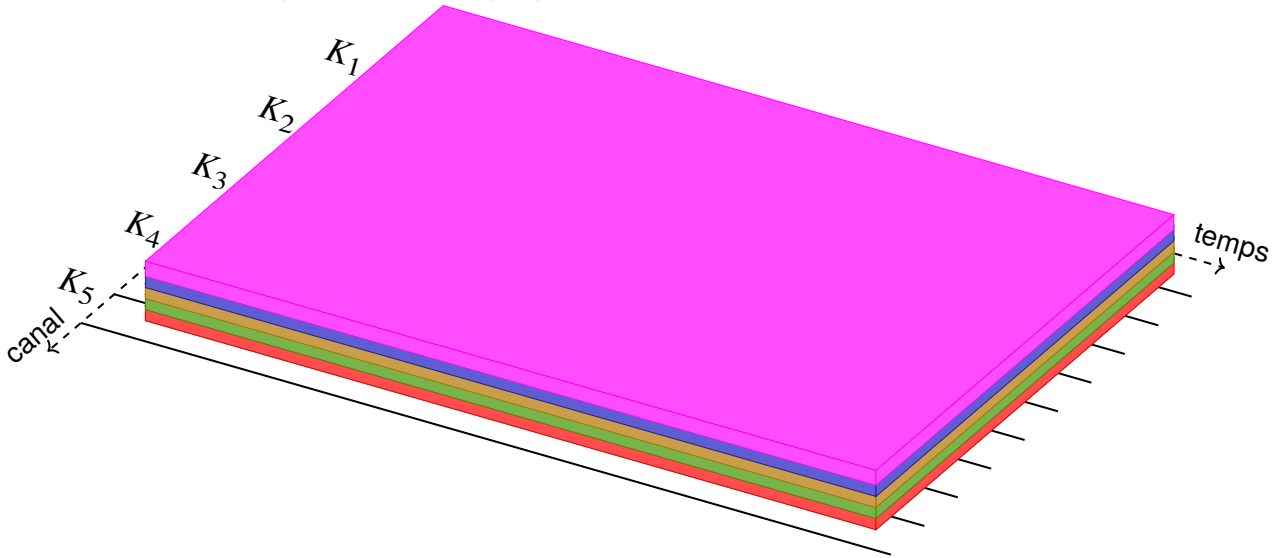
- ▷ chaque canal utilise un «*code*» unique, orthogonal aux autres, (c-à-d sans corrélation) ;
- ▷ tous les canaux utilisent le même **spectre de fréquences** au même moment mais avec un **code différent**.

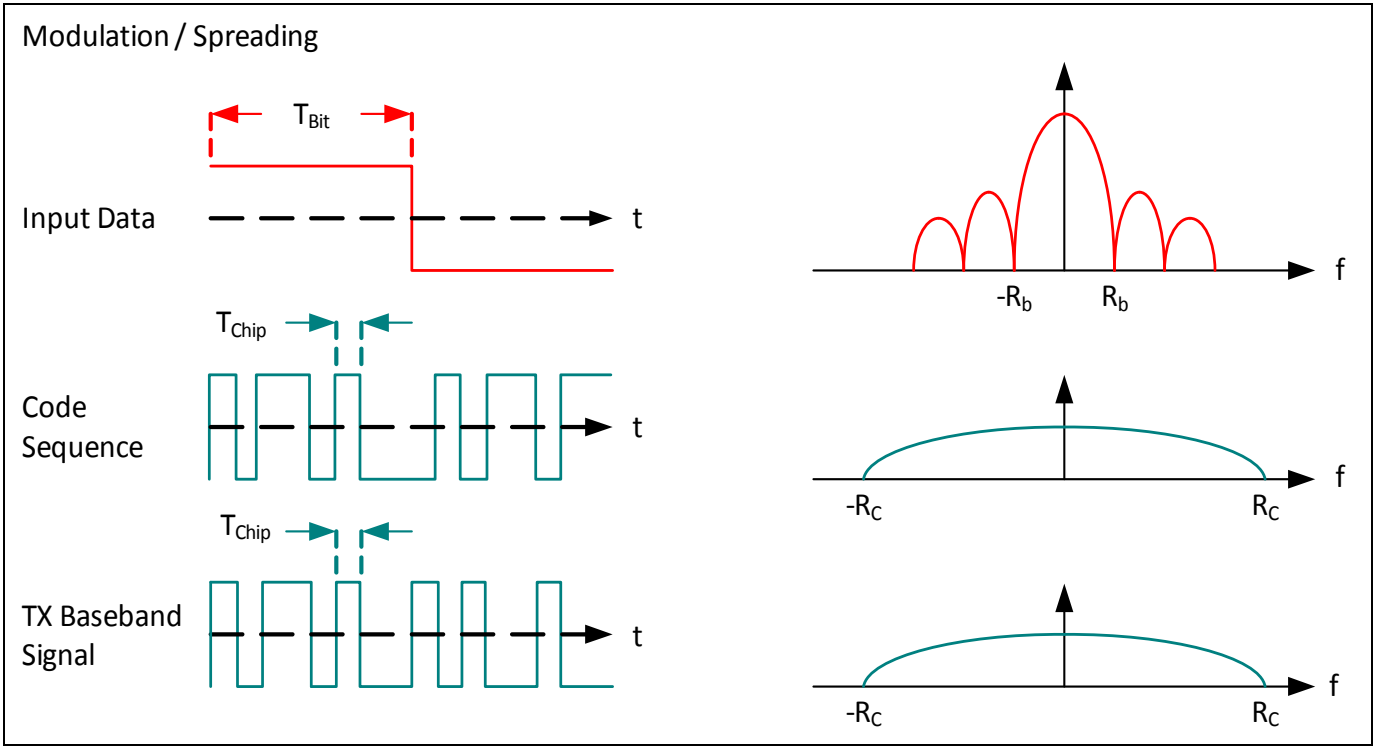
Avantages

- ☐ **bonne utilisation** de la bande passante ;
- ☐ **pas de coordination**/synchronisation entre les canaux ;
- ☐ meilleure **résistance** aux **écoutes** et aux **interférences** ;
- ☐ **plus de capacité** que le TDMA, **moins de consommation**.

Inconvénients

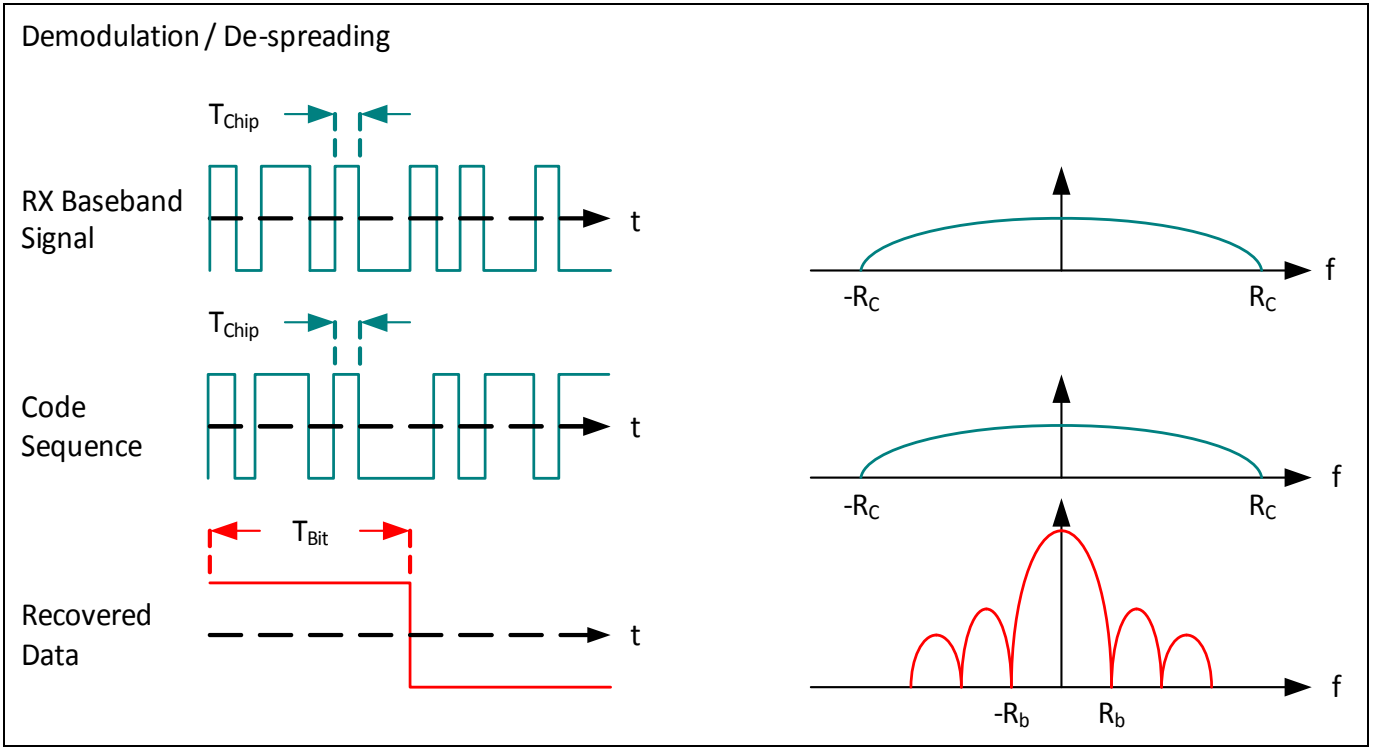
La recomposition du signal est plus **difficile** et **complexe** : utilisation de la technique «d'étalement de spectre» : répartir la communication sur toutes les fréquences, au lieu de quelques unes.





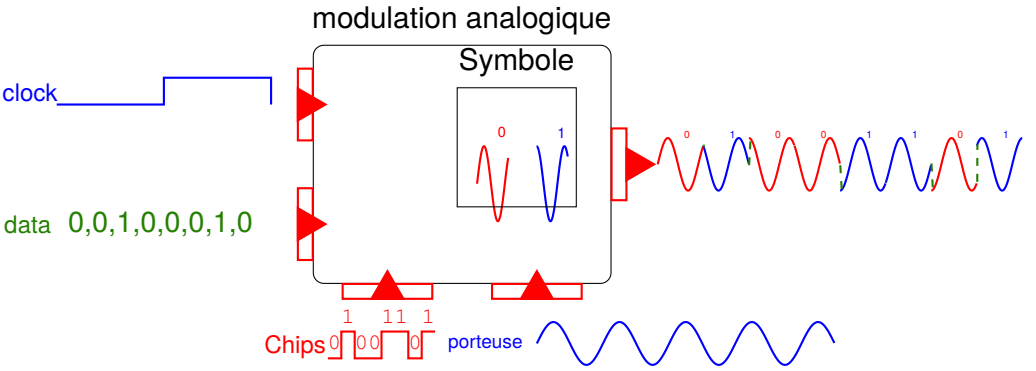
Le «signal binaire» de données est «modulé» par une séquence binaire appelée un «chip» ou «*séquence de code*».

Démodulation par étalement de spectre

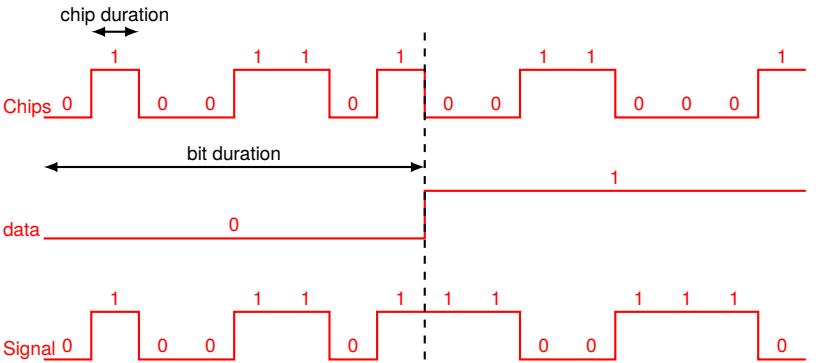


Le «signal binaire» est «démodulé» par la même séquence binaire utilisée lors de la modulation (à la manière d'un «xor»).

La modulation par «*étalement de spectre*»



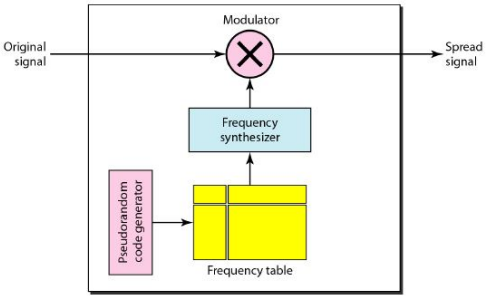
Débit ?

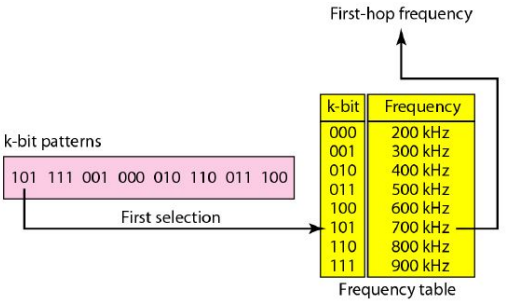


- Le **débit** dépend du rythme des données.
- La **vitesse de modulation** dépend des «*chips*» utilisés : l'accélération dépend de leur **taille**.

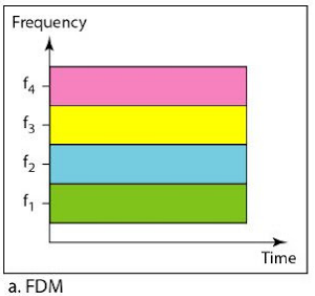
Étalement de spectre ou «*Spread spectrum*»

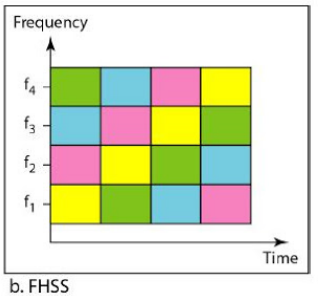
- «*Frequency Hopping Spread Spectrum*» (FHSS) :
  - Saut de fréquence : utilisation de plusieurs fréquences successives pour la porteuse de modulation ;
  - à un moment donné, on utilise une porteuse de fréquence f_i, au moment suivant on utilise une porteuse de fréquence f_j ;

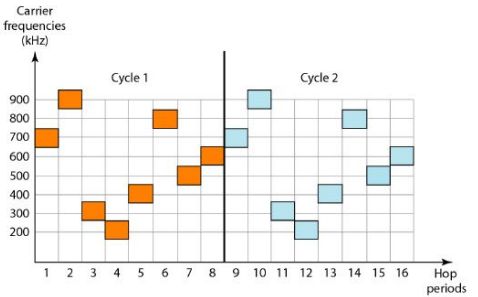




  - Une table de fréquence contient les différentes fréquences f_i ;
  - Un générateur pseudo aléatoire PN, «*Pseudorandom Noise*» (dont la séquence est reproductible mais présente les qualités de l'aléas) crée une séquence «*aléatoire*»de k-bit désignant une fréquence dans la table ;
  - La fréquence f_i désignée par la séquence aléatoire de k-bit est utilisée comme porteuse pour la modulation.

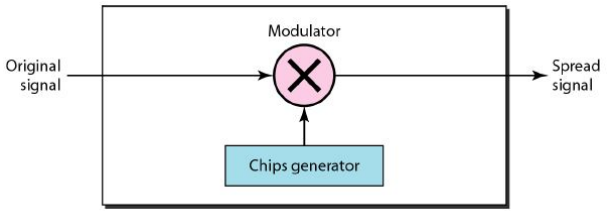


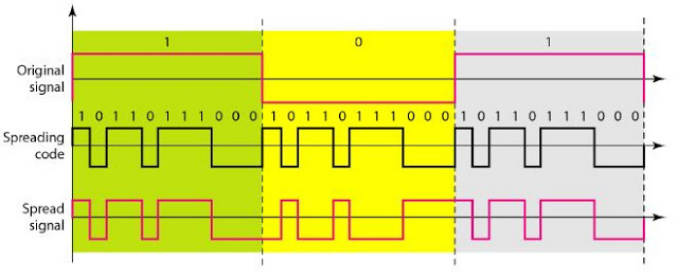




Étalement de spectre ou «*Spread spectrum*»

- «*Direct Sequence Spread Spectrum Synchronous*» (DSSS)





◇ chaque bit de donnée est substitué par un «*chip*», c-à-d une séquence de plusieurs bits.

Exemple en WiFi : la séquence de Barker `10110111000` d'une longueur de 11bits.

⋆ bit 1 $\Longrightarrow$ `10110111000`

⋆ bit 0 $\Longrightarrow$ `01001000111` on inverse les bits.

⋆ si le «*bit rate*» des données initiales est N alors le «*bit rate*» du «*signal étalé*» est de $11 * N$.

$\Longrightarrow$ la fréquence varie pendant la transmission d'un bit de donnée ;

◇ Le signal «*étalé*» **protège contre** :

⋆ **les écoutes non autorisées** : on ne peut pas retrouver les données sans connaitre le code d'étalement, c-à-d les «*chips*».

⋆ **les interférences** : une autre station peut utiliser un **code différent**.

- La **fréquence la plus haute** présente correspond à la moitié du «*chip rate*».

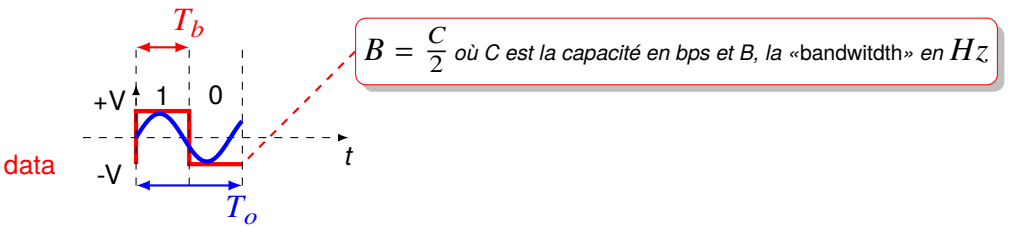
D'après Nyquist :

$C = 2 * B * log_2(M)$

où

- C est la **capacité** du support, c-à-d le débit maximal atteignable sur le support de transmission ;
- B est la «*bandwidth*», c-à-d le bloc de fréquences obtenu par $fréq_{max} - fréq_{min}$;
  Un support de transmission agit comme un filtre : il supprime les fréquences basses et des fréquences hautes par rapport à une «bande passante» *de fréquences.*
- M est le **nombre de symboles**.
  Pour une modulation n'utilisant que deux symboles, $log_2(2) = 1$.

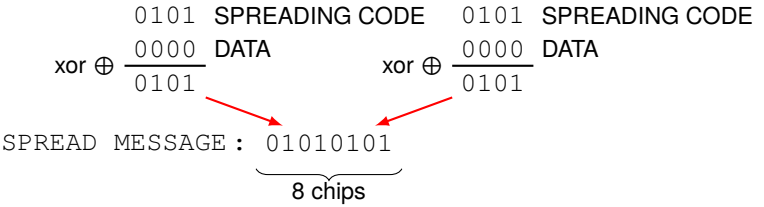
Exemple de rapport entre «*bit rate*» et «*fréquence*» sur la modulation NRZ :



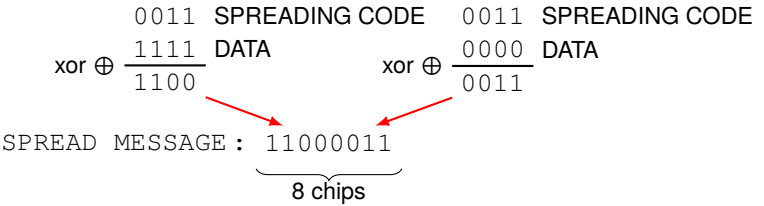
Exemple : le «*chip rate*» est de $1Mbps = 10^6 bps$, soit 1 bit toutes les 1 μs (10^{-6}) alors la fréquence la plus haute est de : $\frac{1000 * 10^3}{2} = 500 * 10^3 = 500kHz$.

CDMA : la notion de code et de «*chips*»

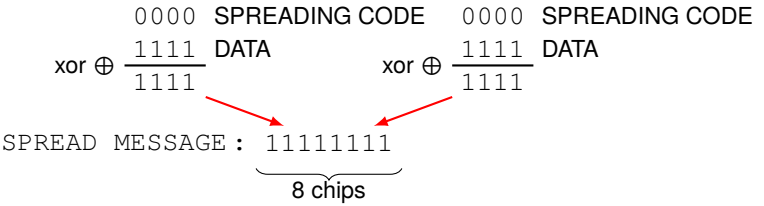
- ▷ Utilisateur 1 :
  - ◇ data : 00, soient 2 bits
  - ◇ spreading code : 0101



- ▷ Utilisateur 2 :
  - ◇ data : 10, soient 2 bits
  - ◇ spreading code : 0011



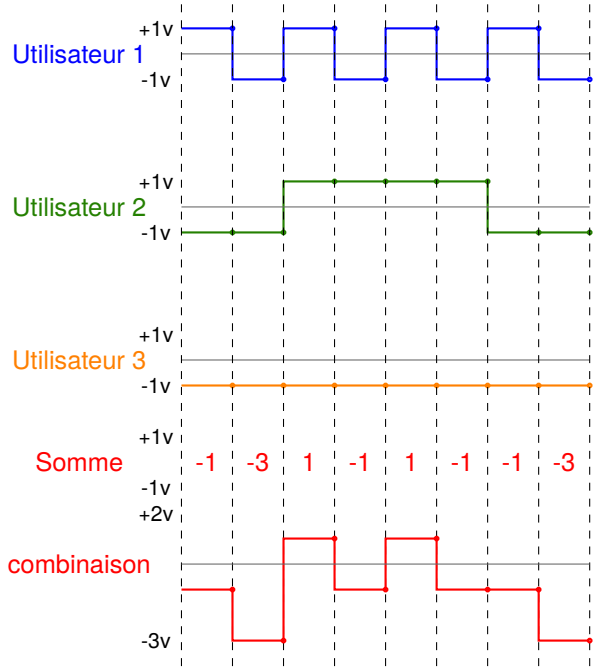
- ▷ Utilisateur 3 :
  - ◇ data : 11, soient 2 bits
  - ◇ spreading code : 0000



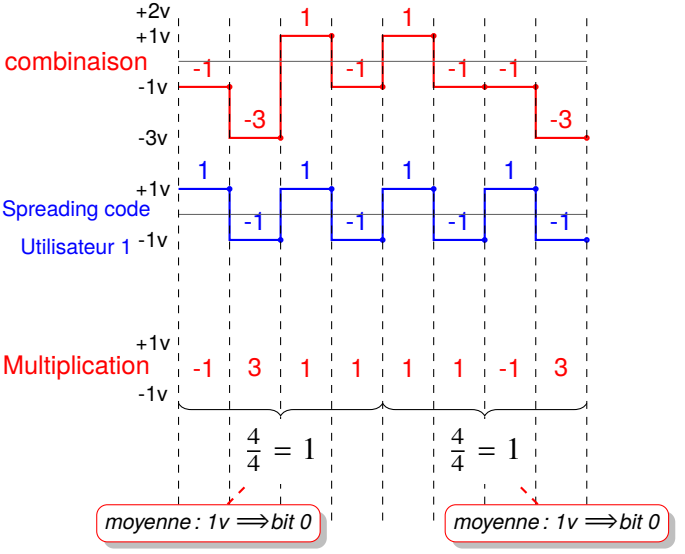
Modulation

- ▷ bit : 0 ⟹ +1v
- ▷ bit : 1 ⟹ -1v

Étalement et Transmission



Réception et recouvrement

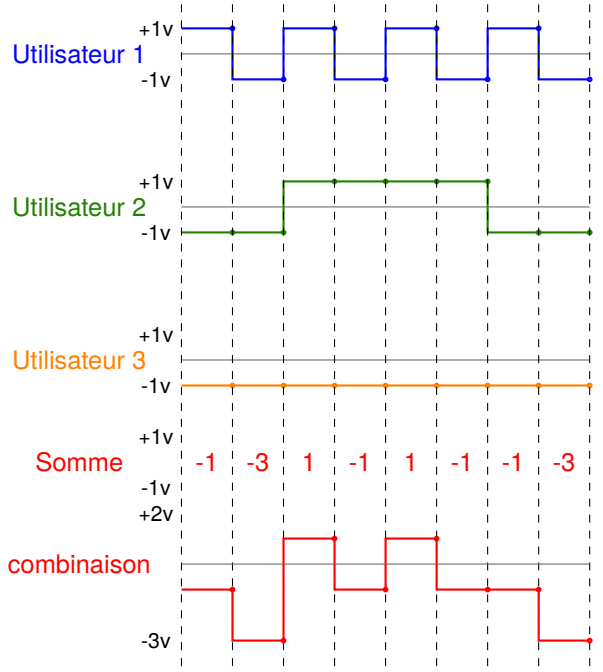


Les données transmises par l'utilisateur 1 sont : 00

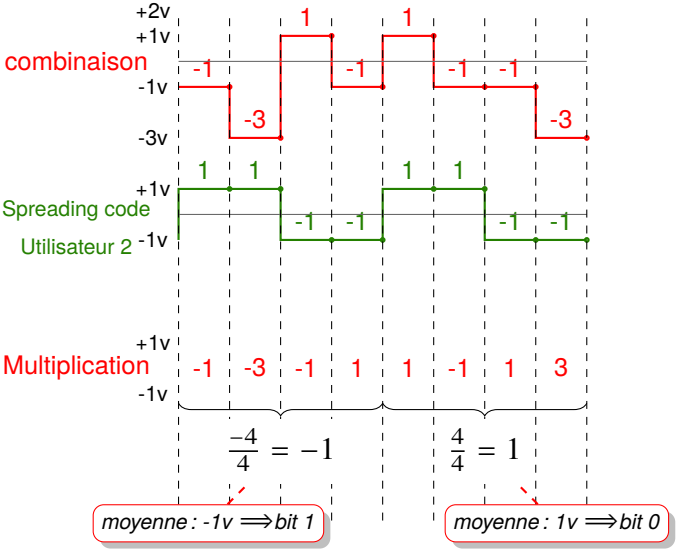
Modulation

- ▷ bit : 0 ⟹ +1v
- ▷ bit : 1 ⟹ -1v

Étalement et Transmission



Réception et recouvrement



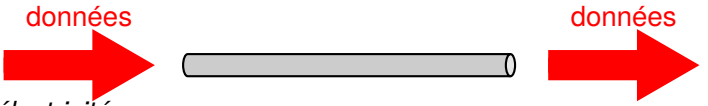
Les données transmises par l'utilisateur 2 sont : 10

Et pour les transmissions sans fil ?

Plan

- ☐ Transmission de l'information par onde électromagnétique ;
- ☐ Réception radio et traitement du signal ;
- ☐ Antenne et transmission ;
- ☐ Puissance d'émission ;
- ☐ Affaiblissement en espace libre ;
- ☐ Introduction du «*Link Budget*» ;
- ☐ Modulation et codage *vs* SNR ;
- ☐ Exemple de calcul du «*link budget*» ;
- ☐ Du côté du récepteur : optimisation du «*link margin*», obstacles et atténuation ;
- ☐ Zone de Fresnel ;
- ☐ Indication de la puissance d'un signal : RSSI et SNR.

- Dans un fil de cuivre, le **signal** en entrée est **récupéré** en sortie :



Le fil de cuivre conduit l'électricité.

- L'air est un **isolant** pour l'électricité :



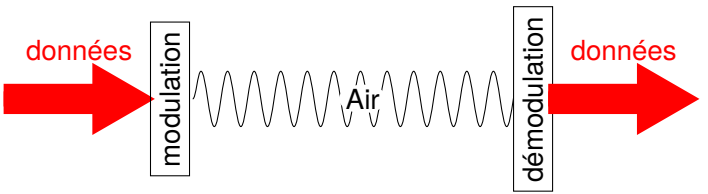
L'air ne conduit pas l'électricité...

- les **ondes électromagnétiques** peuvent être transportées dans l'air sur de longues distances :



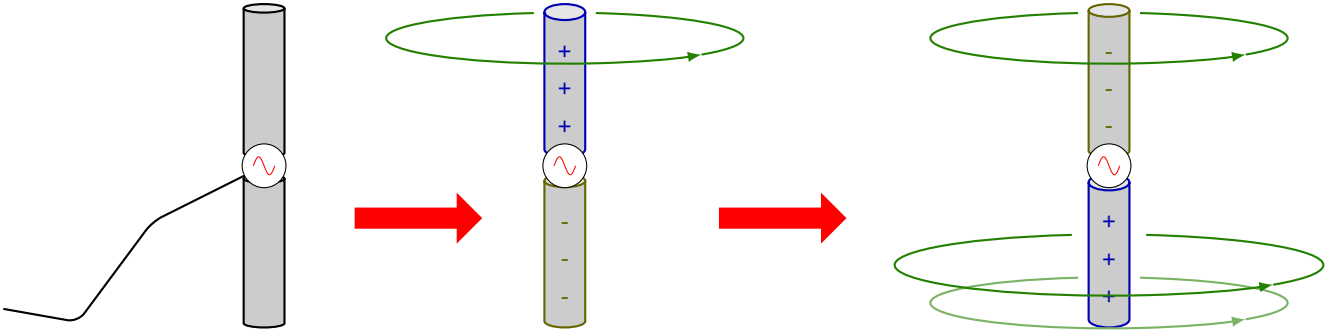
Les données doivent être :

- ▷ «portées» *par l'onde électromagnétique* ⟹ «modulation»
- ▷ *récupérées lors de leur réception* ⟹ «démodulation»

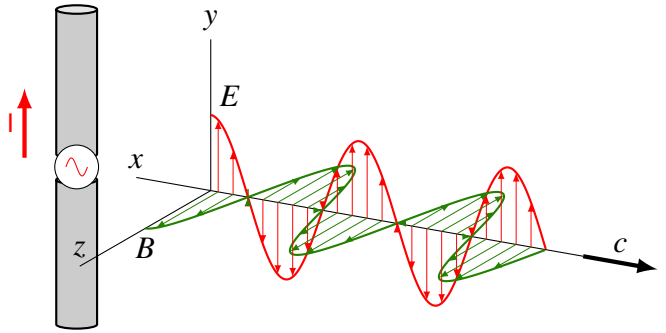


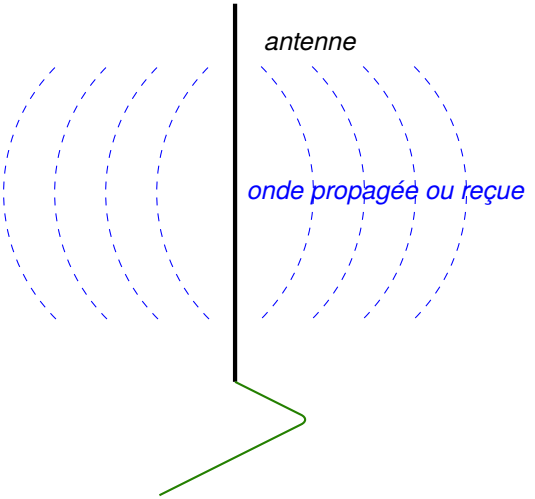
Champs électrique *vs* Champs magnétique

La **variation** d'un courant alternatif dans un **dipole** crée une onde électromagnétique :



Cette variation de champs électrique induit la variation d'un champs électromagnétique et **réciproquement** :



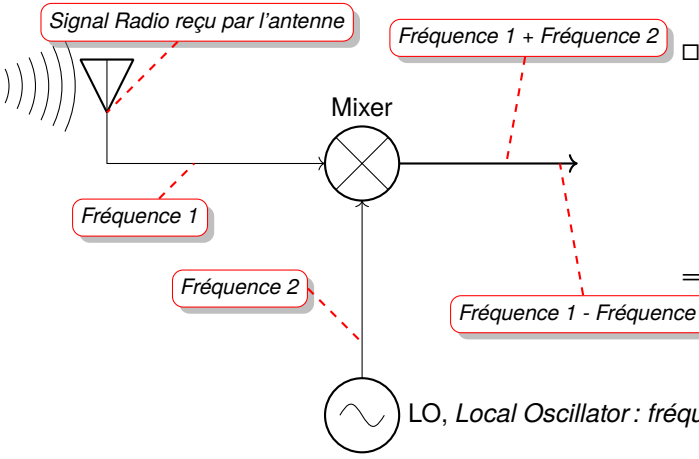


Où :

E	champs électrique
B	champs magnétique (valeurs instantanées)
c	vitesse de la lumière

Traitement du signal hétérodyne

Combiner un signal de **haute** fréquence avec un autre pour produire un signal de **basse** fréquence.



- Création de **nouvelles fréquences** par la combinaison ou le mixage de **deux fréquences** :
  - une fréquence **plus basse** : la *différence* des fréquences ;
  - une fréquence **plus haute** : la *somme* des fréquences ;

  } *Appelées hétérodynes*

⟹ **décalage de la fréquence du signal original !**

- Exemple : **décalage** du signal de 110MHz à 10MHz par mixage avec une fréquence de 100MHz
  ⟹ on travaille sur 10MHz, ce qui est plus facile.

Transmission/Réception

- on choisit une fréquence de transmission adaptée : réglementation, propriétés physiques (FSL, coût de l'électronique, *etc*) ⟹ ce sera la **fréquence support** ou «*porteuse*» ou «*carrier*»
- on choisit une **modulation** adaptée à ce que l'on veut transmettre ;
- on **décale** cette modulation vers la porteuse grâce à l'opération **hétérodyne**.

Exemple : radio AM et FM

- **Transmission** :
  - partage du spectre de fréquence : plusieurs transmetteurs partagent la même bande de fréquences ;

  $\Longrightarrow$ «*Frequency Division Multiplexing*»
- **Réception** :
  - démoduler le signal désiré $\Longrightarrow$ sélectionner la «*station*» ;
  - rejeter les autres signaux transmis simultanément (ignorer les autres stations) ;
- le **signal source** est audio :
  - la voix (discours) ;
  - la musique ;
  - le mélange : musique, voix, chant ;

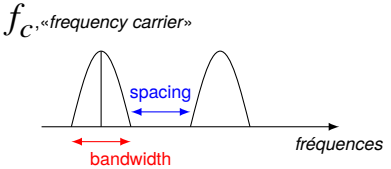
$\Longrightarrow$

	bandwidth
Voix/discours	4kHz
Musique de bonne qualité	15kHz

- bandwidth autorisée pour la **source** ou «*baseband*» :

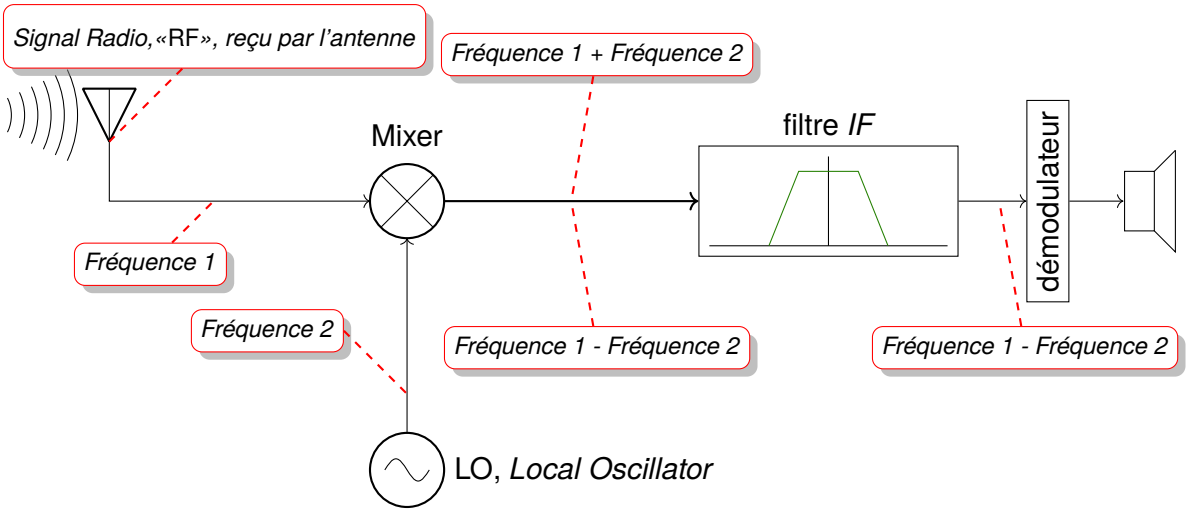
AM baseband	5kHz
FM baseband	15kHz

- bandwidth et «*carrier spacing*» pour la transmission :



	spectrum ranges	bandwidth	Carrier spacing
AM	540kHz-1600kHz	5 à 10kHz	10kHz
FM	88MHz-108MHz	200kHz	200kHz

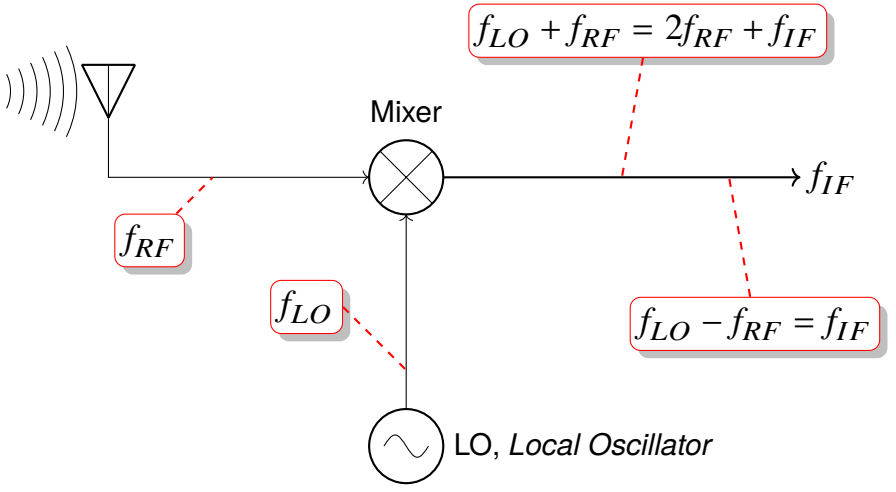
Réception radio et traitement du signal : le récepteur «*Super Heterodyne*»



- RF, «*Radio Frequency*»
  c'est la fréquence de transmission.
- «*IF*», «*Intermediate Frequency*» ;
  C'est la fréquence de travail.
- filtre IF :
  supprime les fréquences indésirables.
- démodulateur ;
- amplificateur audio.

- Deux possibilités :
  - $f_{LO} = f_{RF} + f_{IF}$ injection **par le haut** ;
  - $f_{LO} = f_{RF} - f_{IF}$ injection **par le bas** ;
- dans le cas d'un récepteur radio AM ou FM on utilise une fréquence plus élevée que la fréquence radio désirée :
  $\Longrightarrow f_{LO} = f_{RF} + f_{IF}$

Injection par le haut : on choisit f_{LO} comme $f_{LO} = f_{RF} + f_{IF}$



On obtient : ▷ $f_{LO} - f_{RF} = f_{IF}$, ce que l'on voulait ;

Mais pour une fréquence supérieure f_S égale à $f_{LO} + f_{IF}$ on a :

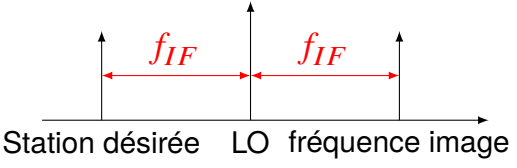
▷ $f_S - f_{LO} = (f_{LO} + f_{IF}) - f_{LO} = f_{IF}$

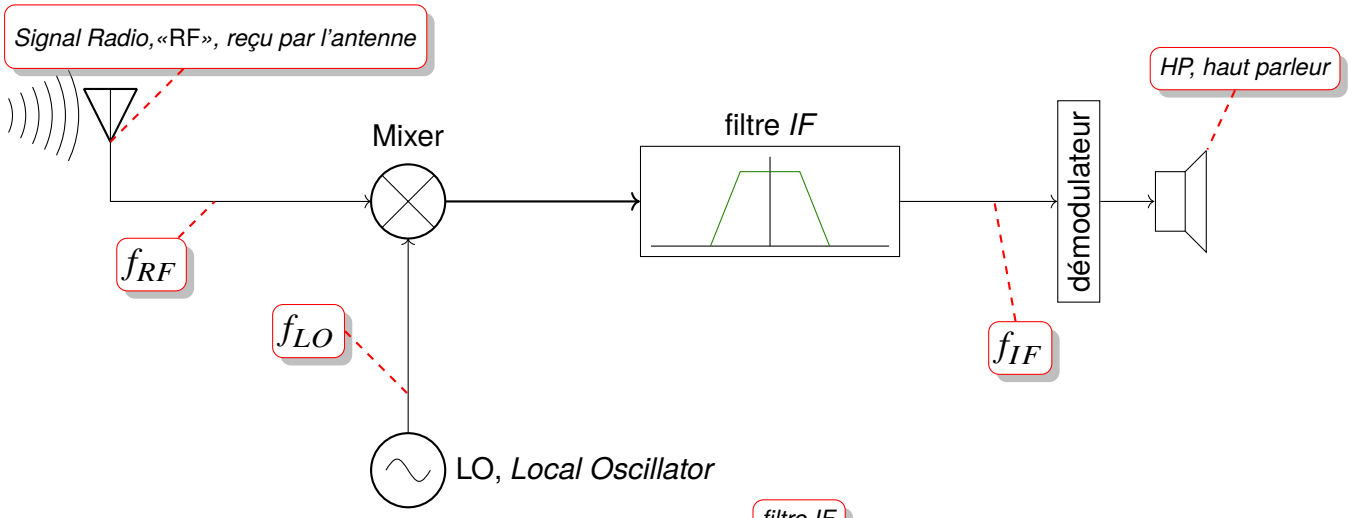
f_S est appelée «*fréquence image*» : $f_i = f_{LO} + f_{IF} = f_{RF} + 2f_{IF}$

⟹ **Deux fréquences en entrée**

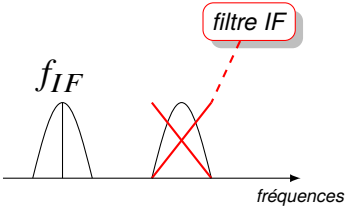
donnent **la même fréquence en sortie !**

⟹ il faut **filtrer** la fréquence image f_i !

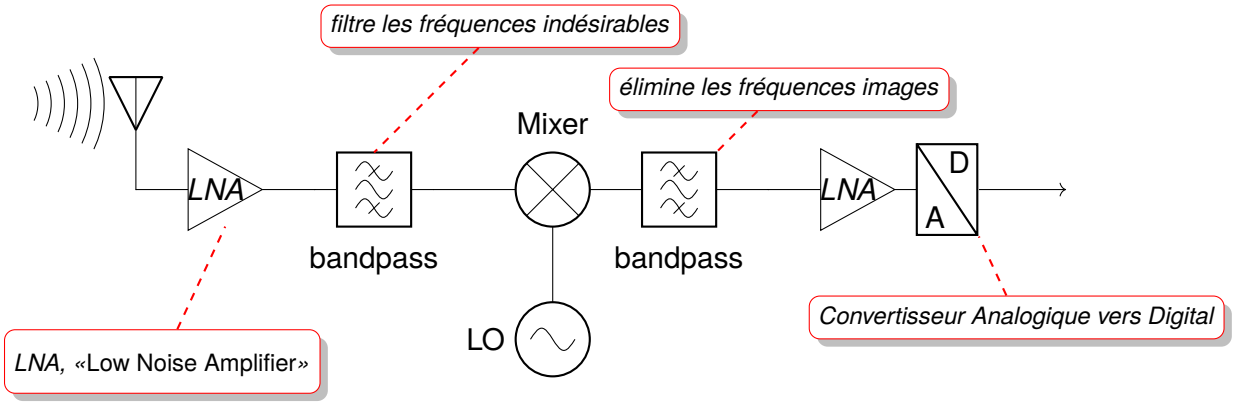




- Suppression de la fréquence image :

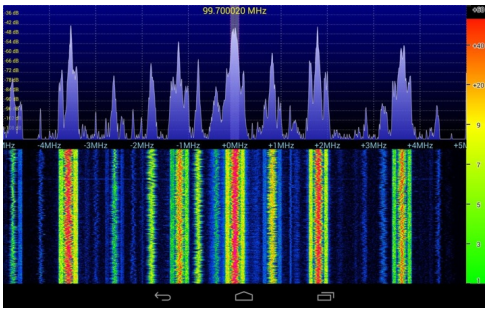


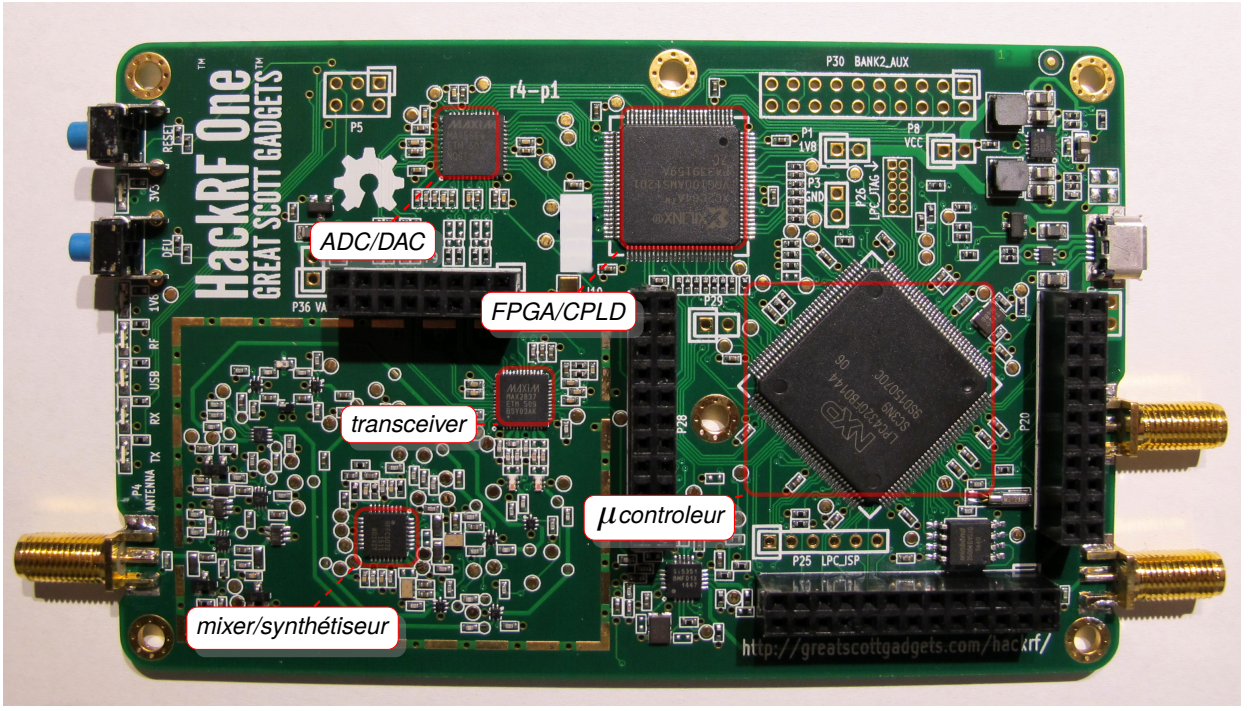
- Démodulation adaptée :
  - AM : $f_{IF} = 455kHz$, filtre réducteur de bande à 10kHz, puis détecteur d'enveloppe ;
  - FM : $f_{IF} = 10,7MHz$, filtre réducteur de bande à 150kHz (les fréquences varient de $\pm$75kHz), puis discriminateur de fréquence.
- sortie audio finale.



La **démodulation** se réalise au travers de l'ADC, le convertisseur Analogique/Numérique qui fournit une «*bandwidth*» en sortie :

- ▷ recevoir **simultanément** plusieurs signaux contenus dans cette bande passante, comme par exemple, recevoir plusieurs stations de radios FM !
- ▷ afficher en temps réel un **spectre de fréquence** et le suivre au cours du temps :
- ▷ utiliser des algorithmes de traitement numérique comme la FFT, «*Fast Fourier Transform*» pour démoduler.





- RF frontend :
  - Synthesizer/Mixer : 30MHz-6GHz ;
  - LowPass Filter : 30MHz-2.3GHz ;
  - ByPass Filter : 2.3GHz-2.7GHz ;
  - HighPass Filter : 2.7GHz-6GHz ;
- Baseband/IF :
  - 2.3GHz-2.7Ghz ;
  - ADC/DAC : 0-22MHz ;

La répartition des fréquences : la bande ISM, «*Industrial, Scientific & Medical*»

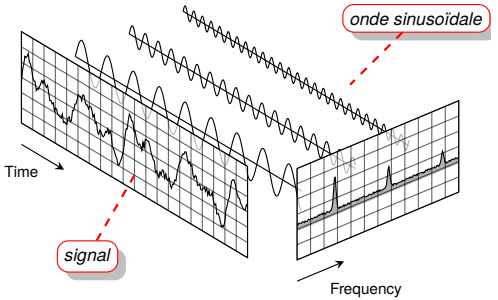
Utilisable de manière libre : sans redevance, ni demande d'allocation, partagée entre les usages.

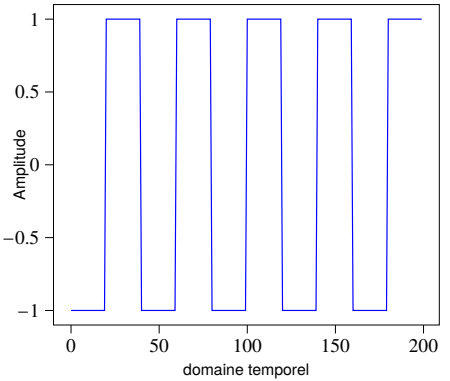
ISM Band	1	2	3	4	5	autres
Frequency Range	26.957 -27.283MHz	40.660 -40.700MHZ	433.050 -434.790MHz	868 -870MHz	2.4 -2.483GHz	5.8GHz 24.250GHz 122.5GHz
Bandwidth	326kHz	40kHz	1,74MHz	2MHz	83MHz	>150MHz
Advantages	Low power consumption	No persistent interference sources, low power consumption	Relatively large bandwidth, good propagation moderate price	Relatively large bandwidth, low occupancy, duty cycle limited to 10% in most of the band	very large bandwidth	very large available bandwidth
Disadvantages	High noise level due to CB radios	bandwidth too small, difficult to make antenna compact	High occupancy in certain areas (radio amateurs, radar)	More expensive than 434MHz	Propagation problems (quasi-line-of-sight), interference from microwaves	Not yet economically viable

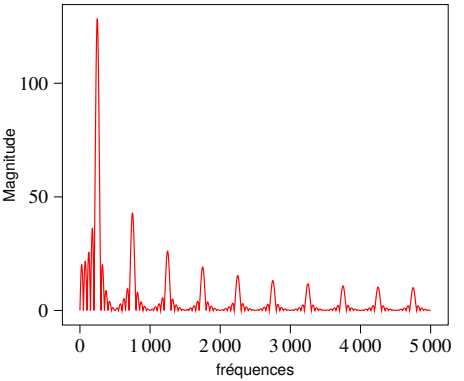
$\Longrightarrow$besoin de limiter la **portée des transmissions** pour autoriser un plus grand nombre d'usagers simultanés répartis géographiquement.

$\Longrightarrow$recherche de techniques de **mutliplexage**.

Domaine temporel *vs* domaine fréquentiel

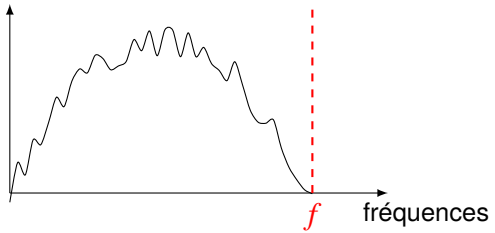






Remarques : Un changement rapide dans le domaine temporel $\Longrightarrow$ nombreuses fréquences.
Un courant continu, DC, «*Direct Current*», a une fréquence de $0Hz$.

Échantillonnage : obtention de valeurs discrètes



D'après Nyquist, la fréquence d'échantillonnage f_s doit être égale à deux fois la fréquence maximale des différentes composantes du signal :

$$f_s > 2B$$

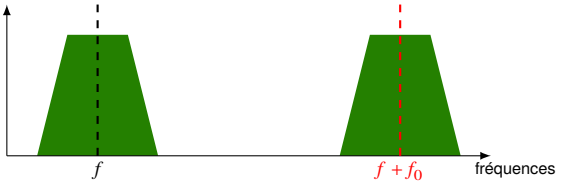
où B est la «*bande passante du signal*», c-à-d les fréquences minimales/maximales présentes.

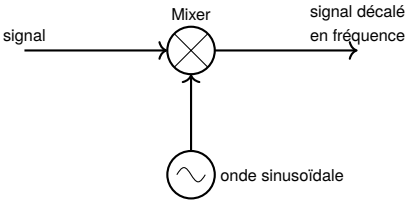
*Pour éviter **l'aliasing** on filtre les fréquences supérieures à* $f_s/2$

Domaine temporel $\xrightarrow{\textit{transformée de Fourier}}$ Domaine fréquentiel

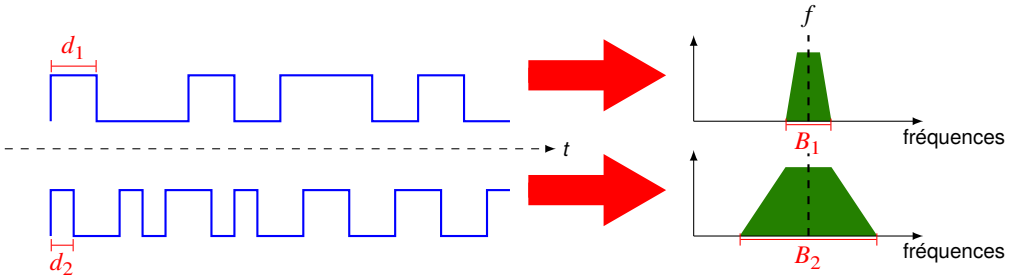
Propriétés :

- **Linéarité** : la somme de deux signaux dans le domaine temporel $\Longrightarrow$ somme des domaines de fréquences associés ;
- **Décalage de fréquence** : si on multiplie un signal par une «*onde sinusoïdale*», ou une «*exponentielle complexe*», de fréquence f_0 alors on décale la fréquence f du signal à $f + f_0$:





- **Changement d'échelle dans le temps**, «*scaling*» : si la **durée de transmission** d'un bit **diminue** d'une durée d_1 à une **durée plus courte** d_2, $\Longrightarrow$ la **bande passante** B_1 utilisée **augmente** vers une **bande passante plus grande** B_2 (variation inverse).

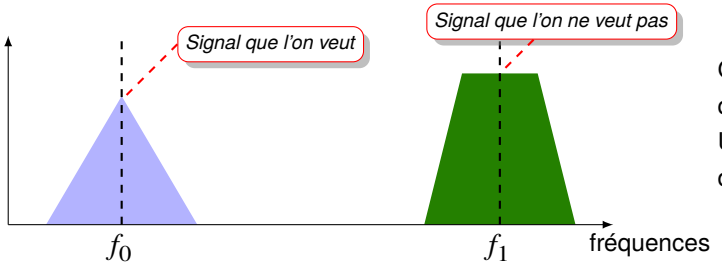


- ▷ **Plus le débit augmente, plus la bande passante utilisée augmente !**
- ▷ La bande passante est **limitée par contrainte légale** : on ne peut pas déborder de la bande passante autorisée.
- ▷ **Le débit maximale utilisable est borné.**

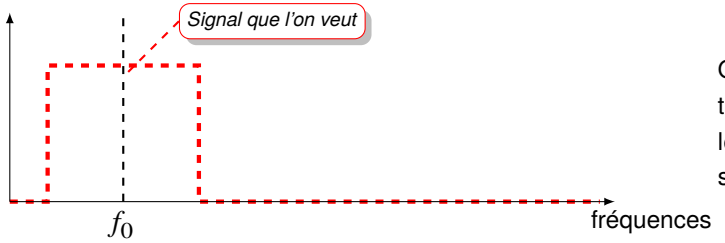
- **Convolution** : opération réalisée sur deux signaux qui produit un troisième signal qui exprime **comment la forme** d'un signal est **modifiée** par l'autre signal$\Longrightarrow$**mélange** ou **moyenne pondérée** des deux.

Application à la création de **filtre** :

Propriétés :



On veut isoler un signal autour de la frequence f_0.
Un signal «*parasite*» est présent autour de la fréquence f_1.



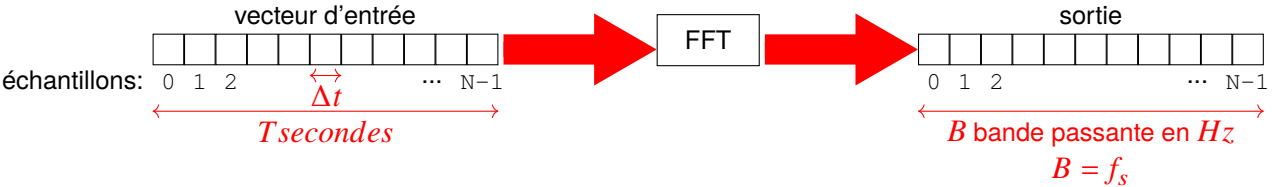
On construit un «*masque*» et on le multiplie par le signal précédent : on réalise le «*produit de convolution*», pour isoler le signal autour de f_0.



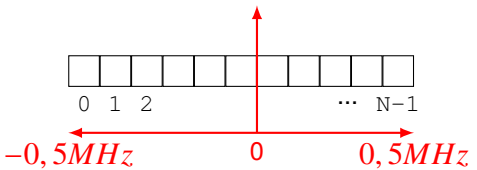
On obtient le signal autour de f_0.

FFT, «*Fast Fourier Transform*», dans le domaine discret

- ▷ on dispose d'un **ensemble d'échantillons** après **numérisation** du signal ;
- ▷ on utilise l'algorithme de la FFT :
  - ◇ en entrée : un tableau d'échantillons ; en sortie : le domaine de fréquence de ces échantillons ;
  - ◇ la taille de la sortie est toujours la même que celle de l'entrée ;
  - ◇ **ATTENTION** :
    - ⋆ la sortie est **toujours** dans le **domaine fréquentiel** ;
    - ⋆ la «*plage*» de fréquences **ne change pas** suivant le **nombre d'échantillons dans le domaine temporel** ;
    - ⋆ si on **ajoute plus d'échantillons** en entrée : ⟹on a une **meilleure résolution** ;
      ⟹on a **plus de calculs à faire** ;
      ⟹**mais on ne voit pas plus de fréquences** !



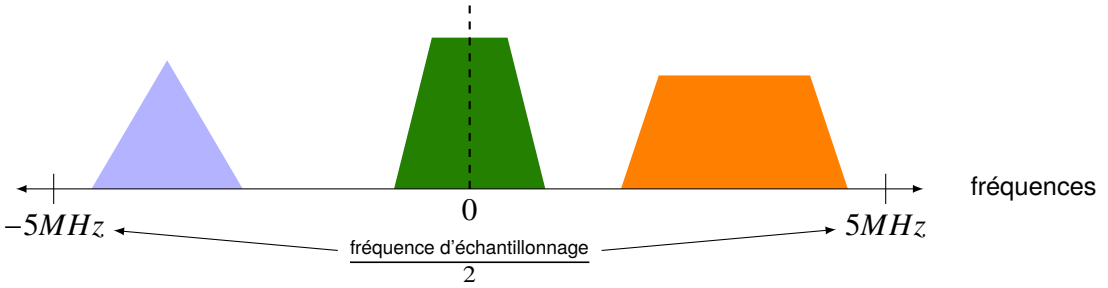
  - ⋆ Si on veut «*voir*» plus de fréquences⟹augmenter la fréquence d'échantillonnage, c-à-d diminuer la période d'échantillonnage Δt
- ▷ Comment **interpréter** la sortie ?
  Exemple : fréquence d'échantillonnage de $1MHz \Longrightarrow$ on **ne peut voir** des fréquences $< 0,5MHz$



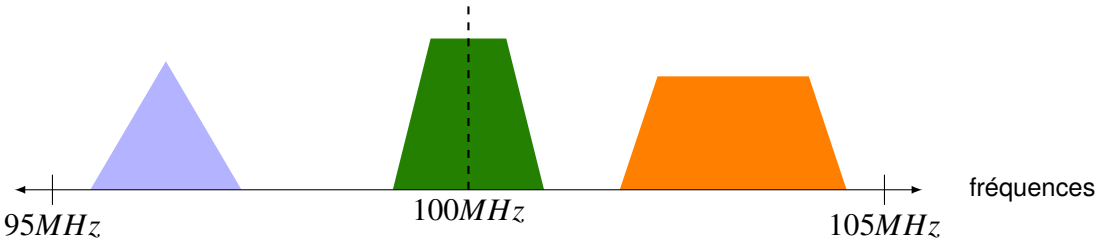
La sortie montre des fréquences de $-f_s/2$ à $f_s/2$, où f_s est la fréquence d'échantillonnage.
$\Longrightarrow$ *des fréquences...**négatives** ?*

Fréquences négatives ?

- ▷ fréquence d'échantillonnage de $10MHz$;
- ▷ fréquence de référence : $100MHz$;
- ▷ l'échantillonnage fournit des valeurs en entrée de la FFT qui donne en sortie :

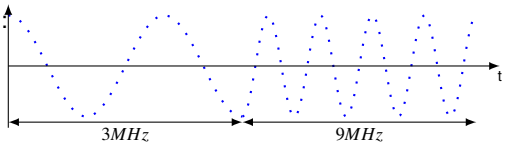


- ▷ ce qui se traduit par le domaine de fréquences centrés sur la fréquence de référence :

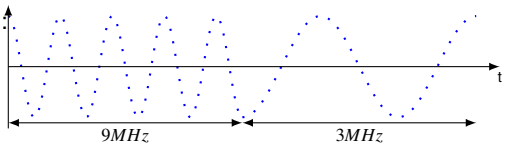


FFT : propriétés

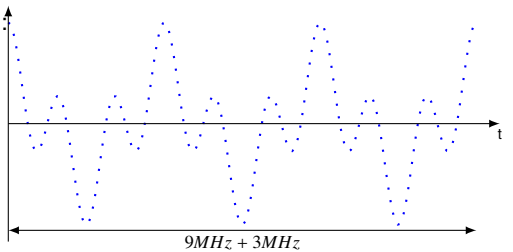
- **but** : signal temporel $\xrightarrow{FFT}$ signal en fréquence ;
- L'ordre dans le domaine temporel n'est pas important :
  - le signal :



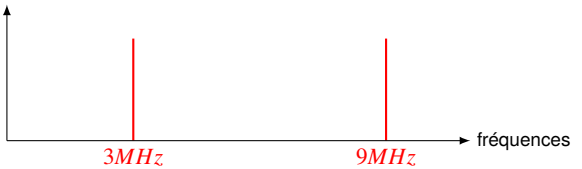
  - le signal :



  - le signal :



  - ces trois signaux donnent le **même domaine de fréquences** :



- au niveau des calculs, la FFT donne :



Le calcul de la FFT donne un tableau de fréquences qu'il faut décaler si on le veut centrer autour de la fréquence zéro, c-à-d le courant continu DC.

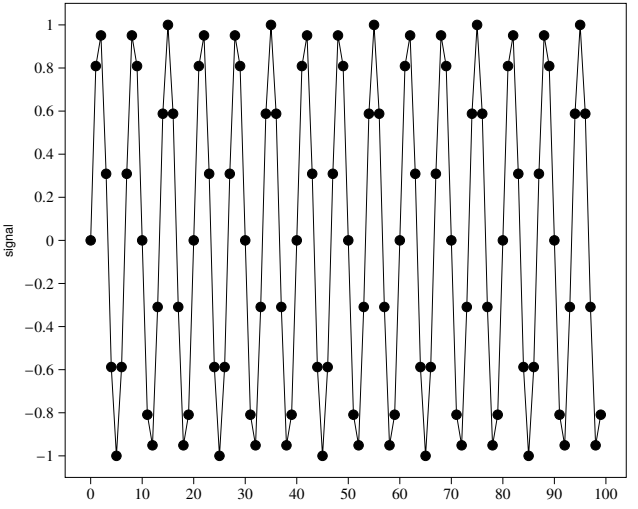
Et en Python ?

```
 1 import numpy as np
 2 import matplotlib.pyplot as plt
 3
 4 t = np.arange(100)
 5 s = np.sin(0.15*2*np.pi*t)
 6 S = np.fft.fftshift(np.fft.fft(s))
 7 S_mag = np.abs(S)
 8 S_phase = np.angle(S)
 9 f = np.arange(-0.5,0.5,1/100.0)
10 plt.figure(0)
11 plt.plot(f, S_mag,'.-')
12 plt.figure(1)
13 plt.plot(f, S_phase,'.-')
14 plt.show()
```

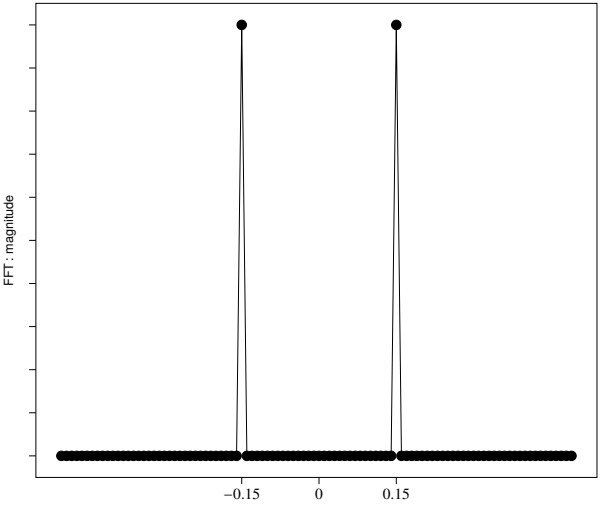
4> un tableau de 100 valeurs ;
5> utilisation d'un signal sinusoïdal de fréquence $0,15$;
6> calcul de la fft et décalage des fréquences ;
7> obtention des fréquences présentes dans le signal
$\Longrightarrow$magnitudes ;

ATTENTION : *Chaque valeur du résultat de la FFT est un* «nombre complexe»*, capable de coder à la fois* ***l'amplitude*** *et la* ***phase****.*

Signal



FFT



FFT : limitations

- La FFT fonctionne sur des signaux **périodiques** : le «*morceau de signal*» en entrée doit être une **période** du signal : *il se répète à l'infini* ;

⟹ le **dernier** échantillon du tableau doit se connecter au **premier** échantillon du tableau ;

⟹ il faut **éviter** des transitions trop brutales :

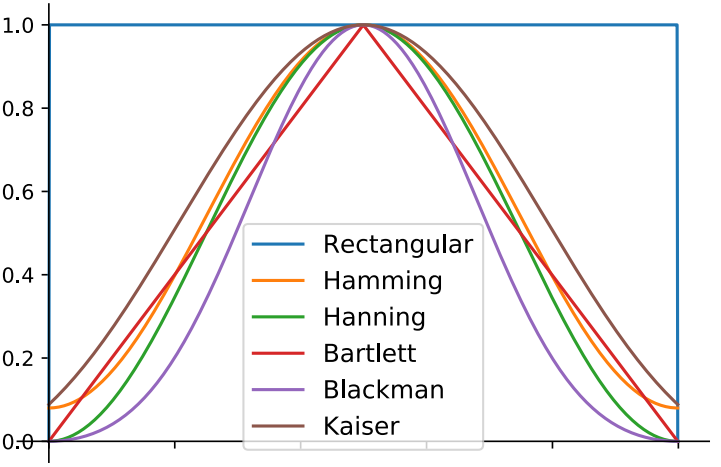
- ◇ une **transition brusque** dans le domaine temporel ⟹ **nombreuses fréquence**s dans le domaine fréquentiel.

⟹ la **première** et la **dernière** valeur du tableau doivent être **égales ou proches** !

On utilise un **mécanisme de fenêtrage** :

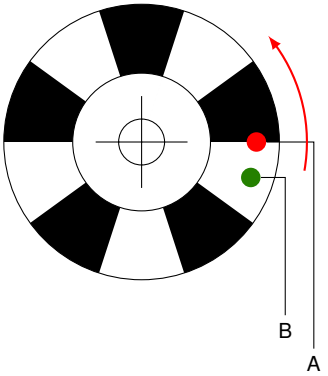
- ▷ on force des valeurs à zéro en début et fin du tableau par **convolution** avec différentes formes de fonctions ;
- ▷ ne pas utiliser de fonction de fenêtrage, revient à utiliser une fenêtre en rectangle qui ne fait rien sur les extrémités du tableau ;
- ▷ la plus courante est celle de Hamming ;

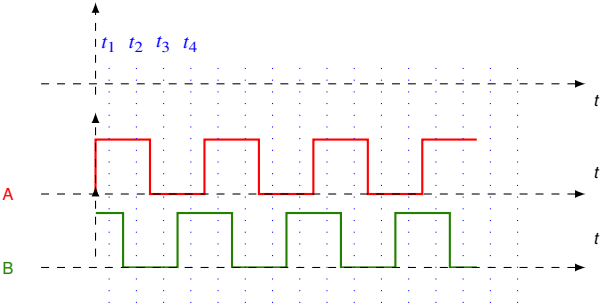
⟹ Il faut appliquer le fenêtrage **avant** la FFT !



- La **taille de tableau** donnant les meilleurs résultats en terme de vitesse de calcul sont des **puissances de 2**.
  Les tailles courantes sont entre 128 et 4096.
  On peut découper le tableau d'**échantillons** en **blocs** sur lesquels on calcule la FFT.
  ⟹ Il n'est **pas nécessaire** de calculer une FFT sur tous les échantillons pour avoir une bonne représentation du signal.
  ⟹ Une FFT de 1024 pour chaque bloc de 100 000 échantillons peut suffire si le signal est **tout le temps présent**.

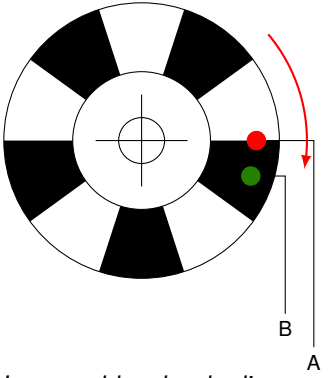
Signaux en quadrature : l'exemple du «*rotary encoder*»

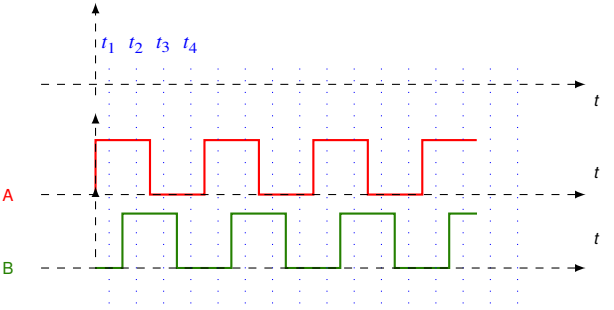




Le signal en sortie de A est «*en retard*» sur le signal en sortie de B.

	A	B
t_1	1	1
t_2	1	0
t_3	0	0
t_4	0	1



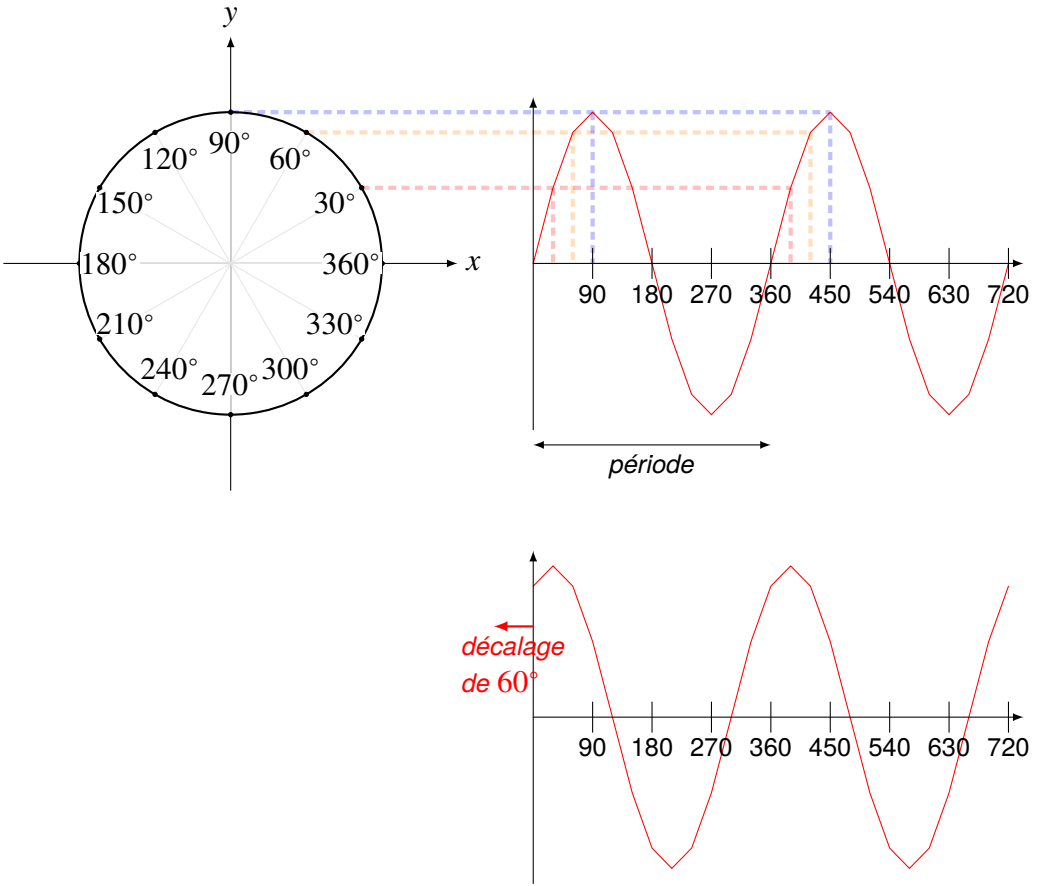


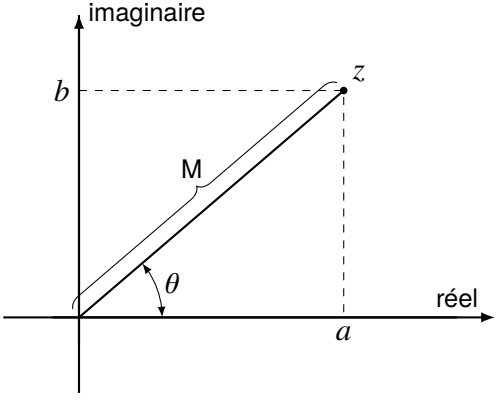
Le signal en sortie de A est «*en avance*» sur le signal en sortie de B.

	A	B
t_1	1	0
t_2	1	1
t_3	0	1
t_4	0	0

La zone blanche du disque est conductrice, la zone noire ne l'est pas.

Sur le schéma les capteurs sont situées à 18º l'un de l'autre en quadrature, c-à-d à $360/5/4 = 18^o$ *l'un de l'autre.*


y
x
90°
120°
60°
150°
30°
180°
360°
210°
330°
240°
270°
300°
90 180 270 360 450 540 630 720
période
décalage
de 60°
90 180 270 360 450 540 630 720



Un nombre complexe, z, est un **point** dans un espace 2D, le «*plan complexe*» :
$z = a + bi$ ou $z = a + bj$ en notation physique (on utilise le j à la place de i, car i est l'intensité électrique).

- ▷ a est la partie réelle ;
- ▷ b la partie imaginaire ;

z est également un vecteur :

- ▷ M est la «*magnitude*», la longueur entre l'origine et le point :
  $M = \sqrt{a^2 + b^2}$
- ▷ θ est la phase, l'angle entre le vecteur et l'axe réel positif :
  $\theta = arctan(\frac{a}{b})$

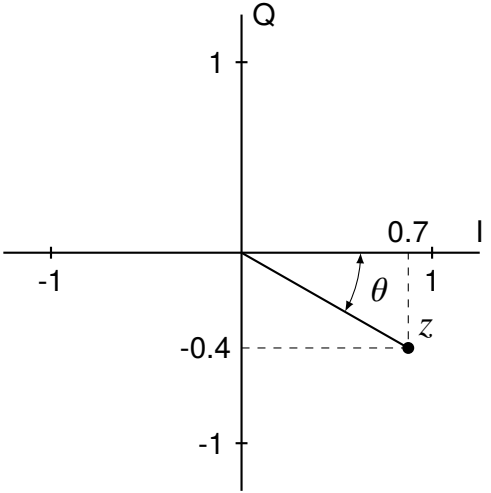
Sous Python, on peut utiliser la bibliothèque «*NumPy*» pour manipuler les nombres complexes.

Exemple :
- ◦ $z = 0,7 - 0,4j$
- ◦ $magnitude = 0.806$
- ◦ $phase = -29,7^o = -0.519 radians$

xterm

```
>>> import numpy as np
>>> z=(0.7-0.4j)
>>> z
(0.7-0.4j)
>>> z.imag
-0.4
>>> z.real
0.7
>>> np.abs(z)
0.8062257748298549
>>> np.angle(z)
-0.519146114246523
```

I, «*In phase*», Q, «*Quadrature*»

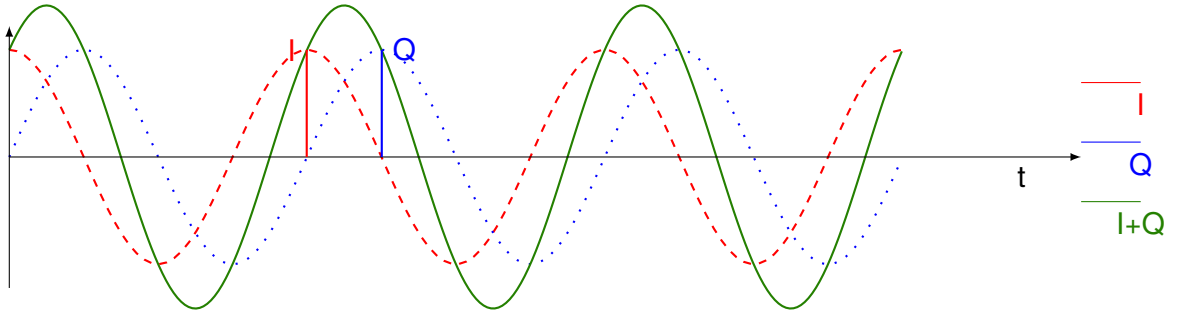


- I est la partie réelle ;
- Q est la partie imaginaire ;
- I et Q : des ondes en «*déphasage*» de 90º :
  - I associé à la fonction *cosinus* ;
  - Q associé à la fonction *sinus* ;
  - équivalence : $\sin(x) = \cos(90° - x)$
- $signal = I\cos(2\pi ft) + Q\sin(2\pi ft)$

Si l'on veut transmettre le signal «*configuré*» par z :

$$\begin{aligned} signal &= I\cos(2\pi ft) + Q\sin(2\pi ft) \\ &= 0,7\cos(2\pi ft) - 0,4\sin(2\pi ft) \\ &= 0,806\cos(2\pi ft - 0,519) \end{aligned}$$

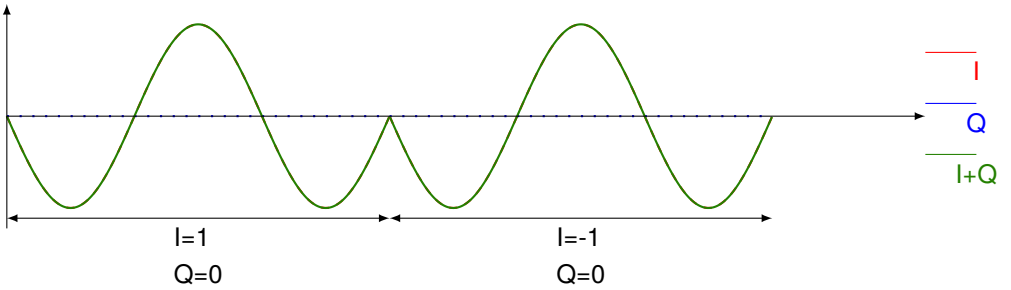
où I et Q sont les amplitudes respective des ondes associées.



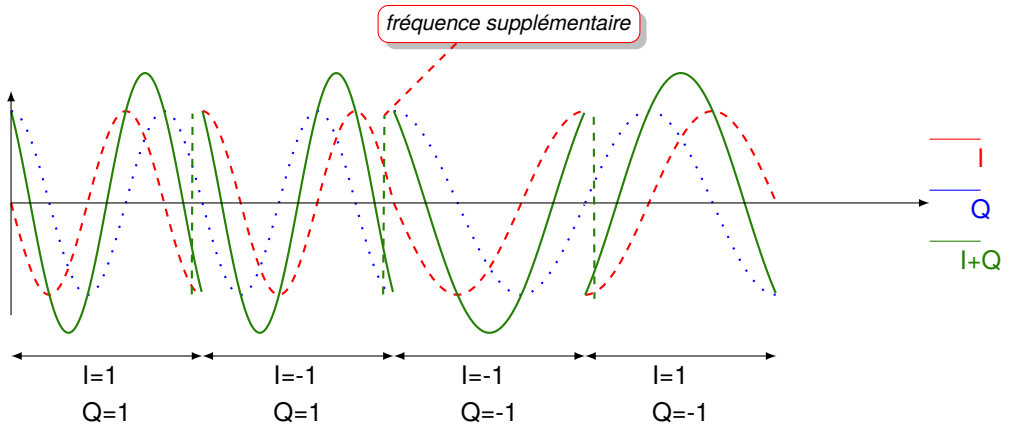
Ici, I et Q sont à 1.

Modulation de Phase

BPSK, «*Binary Phase Shift Keying*» :
- ▷ deux états de phase : 1 bit transmis ;
- ▷ chaque état obtenu par des valeurs distinctes de I, 1 et -1, et 0 pour Q.



QPSK, «*Quadrature Phase Shift Keying*» :
- ▷ quatres états de phase : 2 bits transmis ;
- ▷ chaque état obtenu $(I, Q) = \{(1,1), (-1,1), (-1,-1), (1,-1)\}$



IQ : modulateur universel

- ▷ contrôle de la **phase** et de **l'amplitude** du **signal uniquement** en modifiant **l'amplitude** I et Q ;
- ▷ par exemple : maintenir l'**amplitude constante** et **modifier uniquement la phase** ;

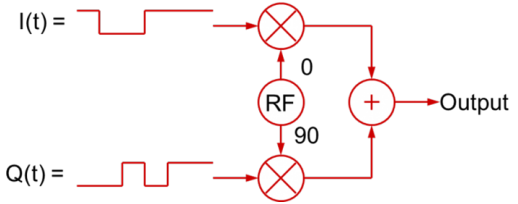
$\Longrightarrow$: on génère de **nouvelles fréquences**, ce qui **augmente la bande passante** utilisée ;

$\Longrightarrow$: si on **augmente le débit** de transmission, on **modifie plus rapidement la phase**, on génère **plus de nouvelles fréquences**, ce qui **augmente la bande passante utilisée** ;

$\Longrightarrow$: **limitation sur le débit !**

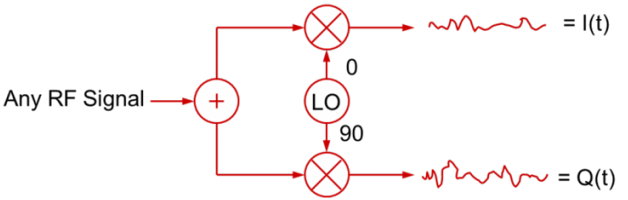
Utilisation de la modulation IQ au niveau de la SDR, «*Software Defined Radio*»

Au niveau de l'émetteur :



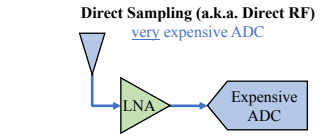
- ▷ on génère une fréquence choisie : RF, modulée par I ;
- ▷ on décale de 90º, modulée par Q ;
- ▷ on fait la somme : signal transmis.

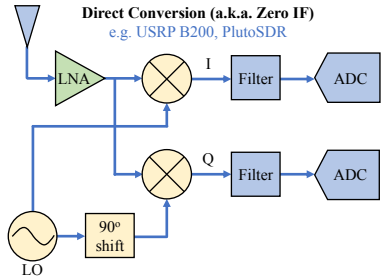
Au niveau du récepteur :

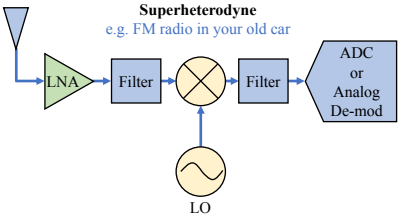


- ▷ on génère une fréquence choisie : LO, que l'on mixe pour isoler I ;
- ▷ on décale de 90º pour isoler Q ;
- ▷ on numérise une valeur de I et une valeur de Q que l'on combine en un complexe $I + Qj$, c-à-d un complexe par échantillon IQ.

  $\Longrightarrow$une SDR capable de d'échantillonner à $2MHz$, fourni deux millions d'échantillons IQ par seconde.

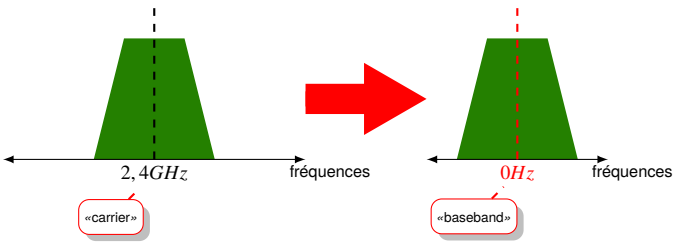






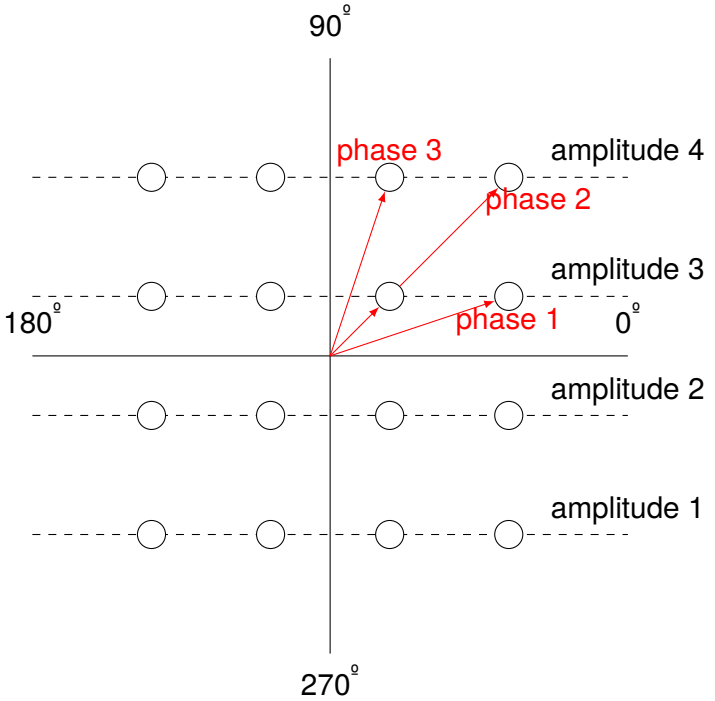
- **Direct Conversion**
  - le signal en réception est «*downconverted*» et décomposé en I et Q.
  - il est appelé également «*Zero IF*», car il n'y a pas de **fréquence intermédiaire**
    $\Longrightarrow$ on est directement en «*baseband*» ;
- **Direct Sampling**
  - l'ADC est si rapide qu'il n'a pas besoin de faire de «*downconversion*» ;
  - il capture tout de $0Hz$ à la moitié de sa capacité d'échantillonnage ;
- **Super heterodyne**
  - on réalise une «*downconversion*» mais pas jusqu'à $0Hz$ mais jusqu'à une fréquence intermédiaire appelée «*IF*».

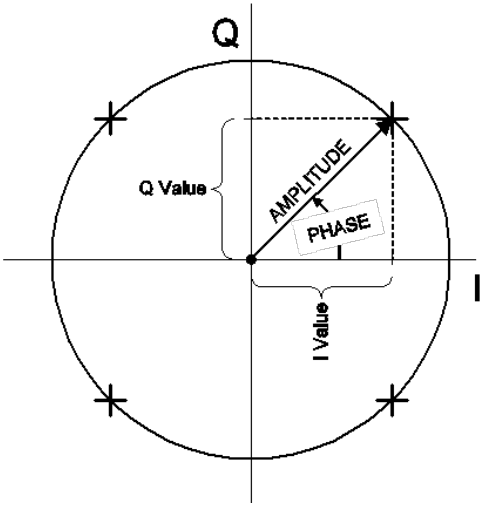
«*Downconversion*» : supprimer la porteuse, «*carrier*», et revenir au signal



- ▷ L'intérêt de revenir en «*baseband*» est de travailler avec un **échantillonnage moins rapide**.
- ▷ La plupart des signaux ont une bande passante entre $100kHz$ et $20MHz$;
- ▷ Le signal en «*baseband*» est en **valeurs complexes** : il correspond à des fréquences **positives** ou **négatives** centrées autour de $0Hz \Longrightarrow$ elles ne sont pas négatives, elles sont **en dessous de la fréquence de la porteuse** ou «*carrier*».

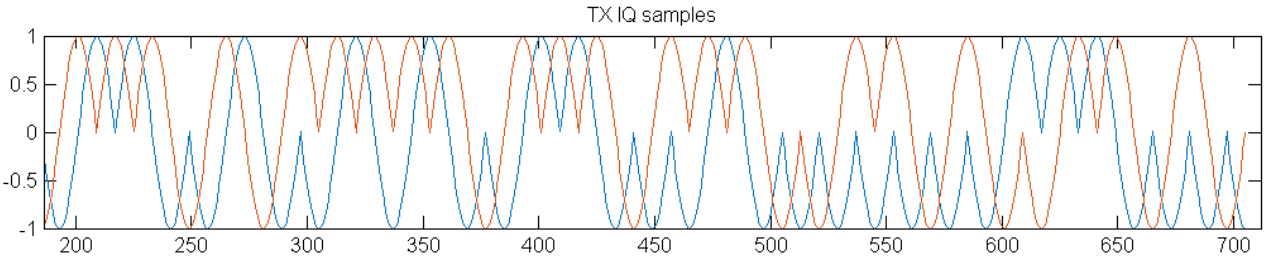
16 QAM exprimé en IQ





FSK modulation

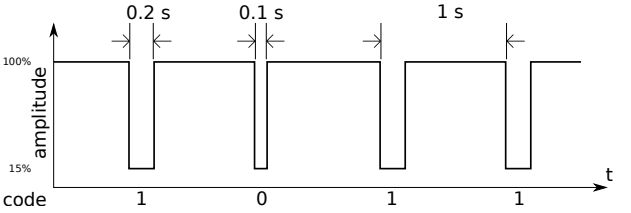
- FSK signal où :
  - f_c est la fréquence de la porteuse ou «*carrier*» ;
  - $f_c + \Delta f$ représente 1 ;
  - $f_c - \Delta f$ représente 1 ;
- on fait varier la phase de I par rapport à Q :
  - un changement de phase positif entre la phase de I par rapport à celle de Q $\Longrightarrow$ fréquence positive $f_c + \Delta f$
  - un changement de phase négatif entre la phase de I par rapport à celle de Q $\Longrightarrow$ fréquence négative $f_c - \Delta f$
- illustration dans le domaine temporel du signal «*baseband*» IQ :



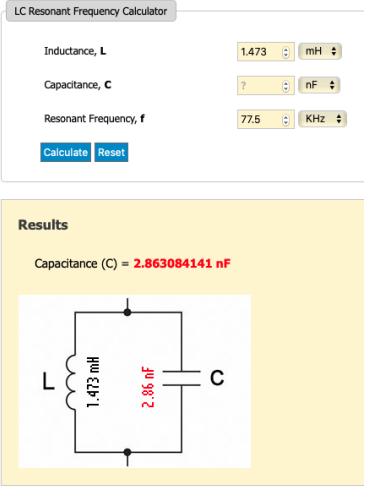
  - I est en bleu ;
  - Q est en orange ;
  - un 1 correspond à un changement de phase de $+\pi/2$;
  - un 0 correspond à un changement de phase de $-\pi/2$;
- pour démoduler on surveille la phase, c-à-d l'angle de $I + jQ$ et son sens de rotation :
  - dans le **sens des aiguilles d'une montre**, changement de phase **négatif** ;
  - changement de phase **positif** sinon.

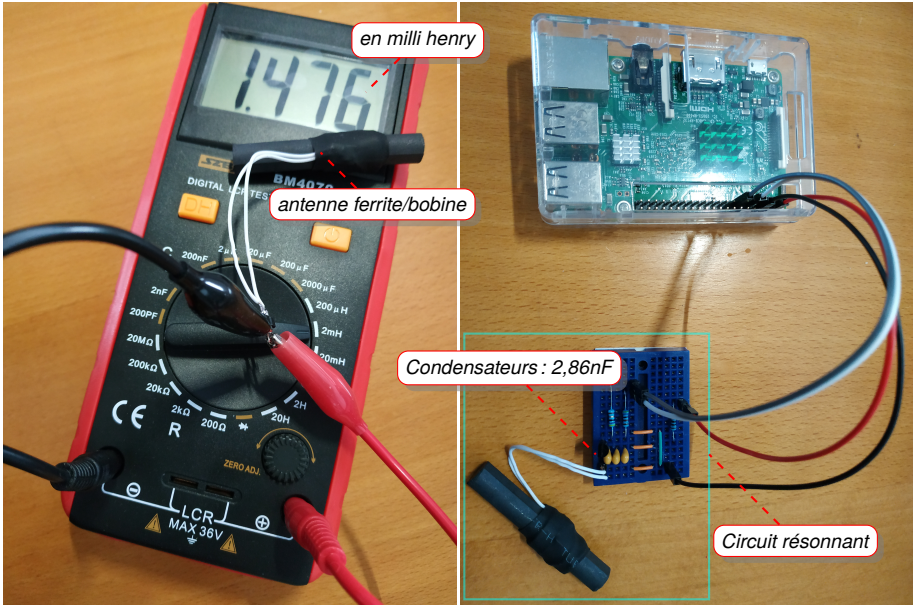
Transmetteur DCF77, horloge «*radio controlled*», avec Raspberry Pi et circuit résonnant

- Transmission sur 77,5KHz, de longueur d'onde de 3,8km ;
- transmis depuis Francfort ;
- modulation : ASK, «*Amplitude Shift Keying*».



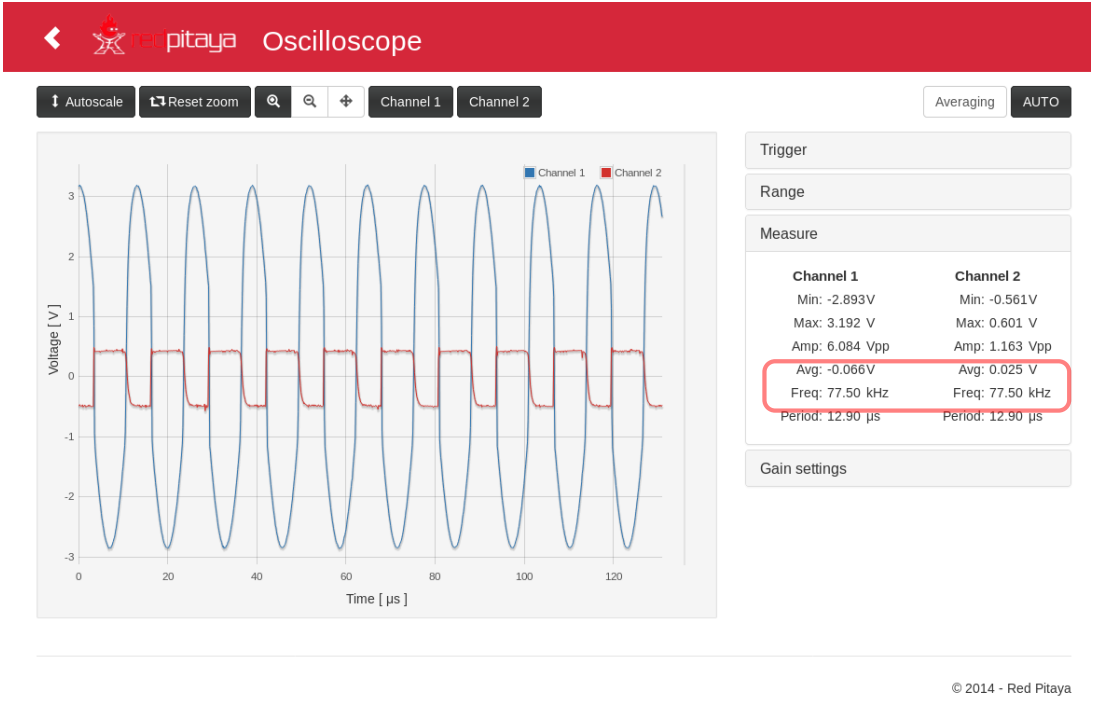
Paramètres bobine/condensateur pour avoir une résonnance à 77,5KHz :





Le Raspberry pi «*module*» le signal en allumant/éteignant avec le transistor le circuit résonnant qui transmet un dignal à 77,5KHz $\Longrightarrow$ transmission de la date et de l'heure. Code dispo à `https://github.com/hzeller/txtempus`

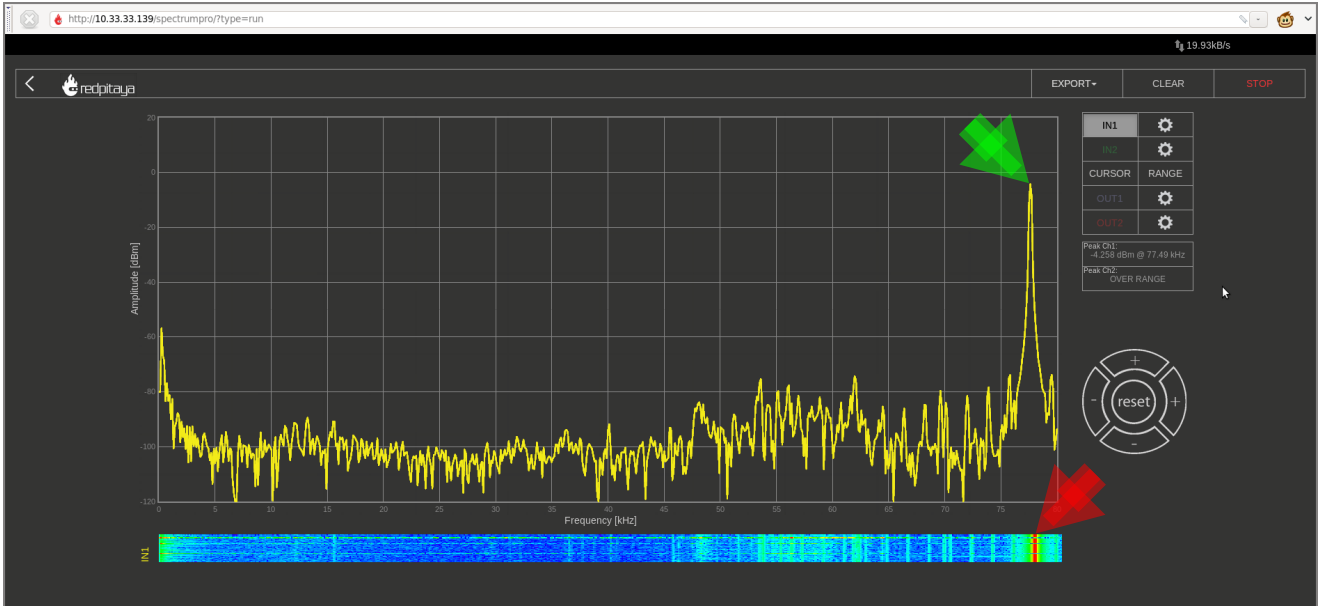
Sur l'oscilloscope



Les deux fréquences observées sont conformes à la théorie : 77,5KHz

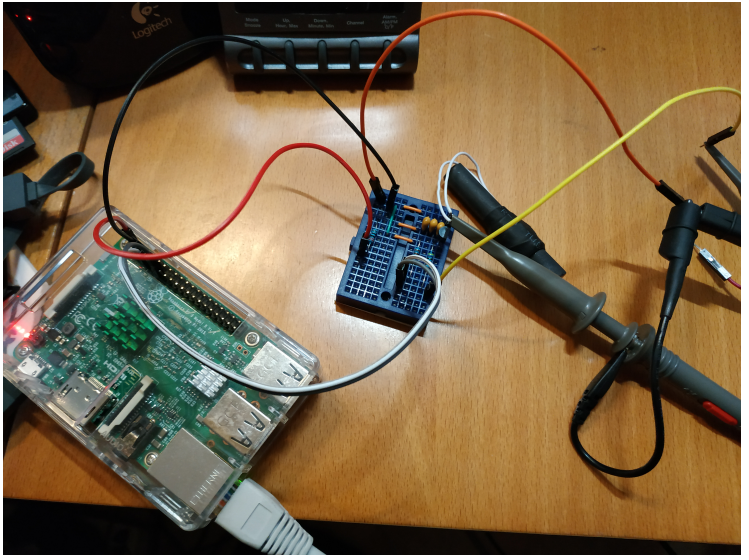
- *courbe bleue* : mesurée à l'antenne ;
- *courbe rouge* : mesurée en sortie du Raspberry Pi.

Au spectromètre



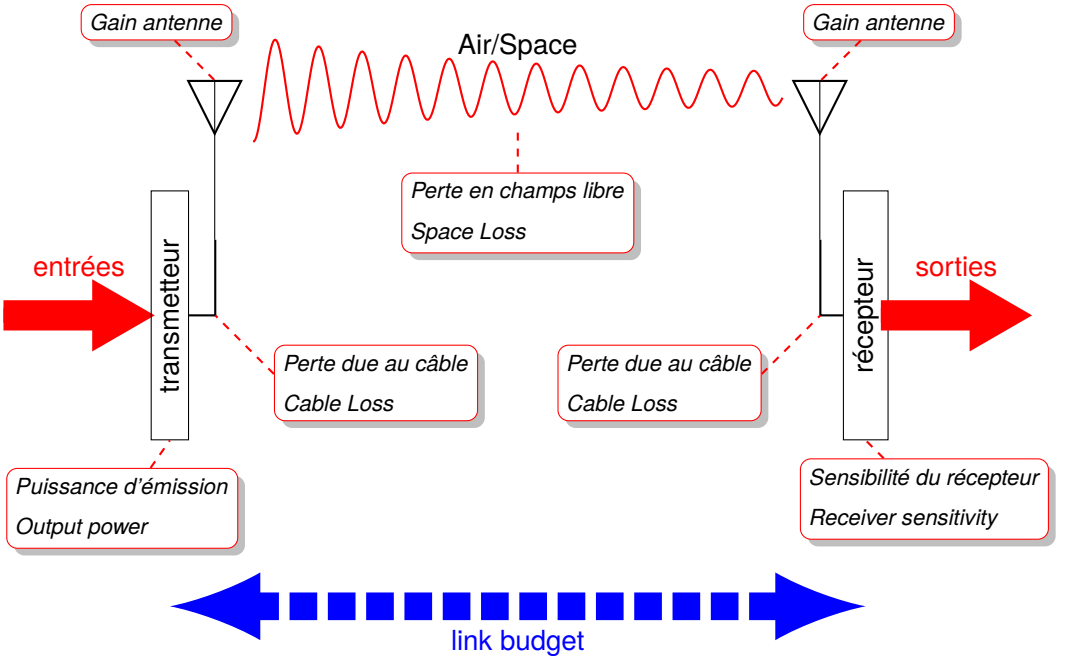
- ▷ *flèche verte* : l'énergie la plus forte est reçue à la fréquence de $77,5kHz$
- ▷ *flèche rouge* : sur la «*waterfall*», l'énergie reçue est indiquée de la couleur bleue (pas d'énergie) à rouge (beaucoup d'énergie);

Le reste correspond au bruit.





L'oscilloscope utilisé est basé sur un FPGA et une carte «*Red Pitaya*».

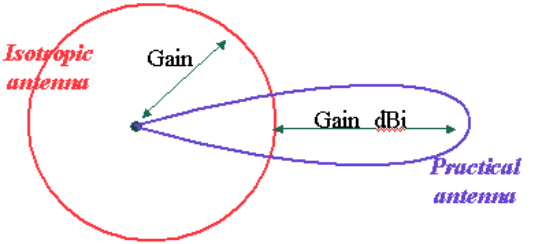


Le «*Link budget*» permet de :

- **mesurer** les différents **paramètres** et **composants** intervenant sur la liaison entre émetteur et récepteur ;
- **déterminer** si une communication est **possible** suivant ces paramètres et composants.

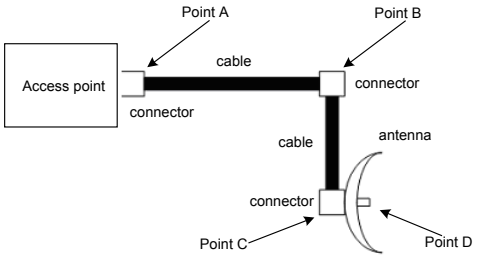
Une antenne **isotrope** est une *antenne théorique* qui rayonne de **manière uniforme** dans **toutes les directions**, c-à-d suivant une sphère et son gain est égal à l'unité.

Une antenne **quelconque** émet *plus dans une direction*, c-à-d qu'elle a un **gain** par rapport à l'antenne isotrope dans cette direction.
Le gain est exprimé en dBi.



La puissance émise au niveau du transmetteur

L'«EIRP», «*effective isotropically radiated power*», ou PIRE, «puissance isotrope rayonnée équivalente» :



	Access Point	Point A	Point B	Point C	Point D
	100 mW	-3 dB	-3 dB	-3 dB	+12 dBi
=	100 mW	÷2	÷2	÷2	(x2 x2 x2 x2)
=	100 mW	÷2	÷2	÷2	x16
=	50 mW		÷2	÷2	x16
=	25 mW			÷2	x16
=	12.5 mW				x16
=	200 mW				

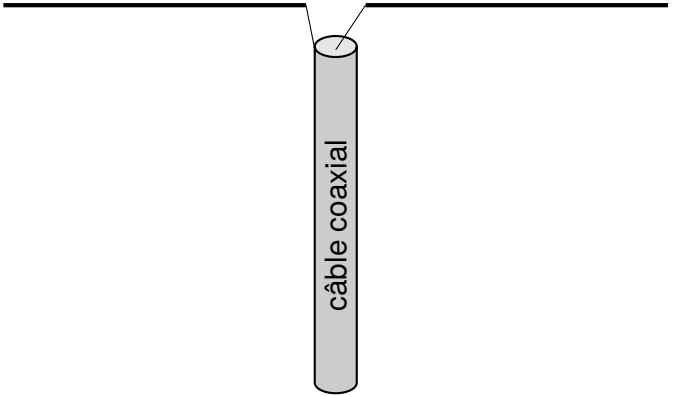
$$EIRP_{[\text{dBm}]} = P_{T_{[\text{dBm}]}} - L_{c\,[\text{dB}]} + G_{a\,[\text{dBi}]}$$

où :

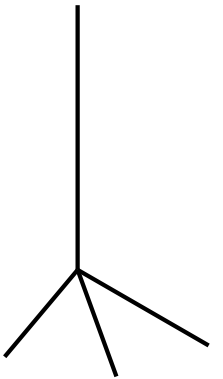
- ▷ P_T est la puissance de transmission ;
- ▷ L_c est la perte, «*loss*», dans les câbles et connecteurs ;
- ▷ G_a est le gain de l'antenne.

Antennes : types et connecteurs

Dipôle



Antenne «*ground plane*»



	SMA	RPSMA
Male		
Female		

SMA	Utilisé partout
RPSMA	Utilisé uniquement par le WiFi

Comment est évaluée une antenne ? La mesure du VSWR

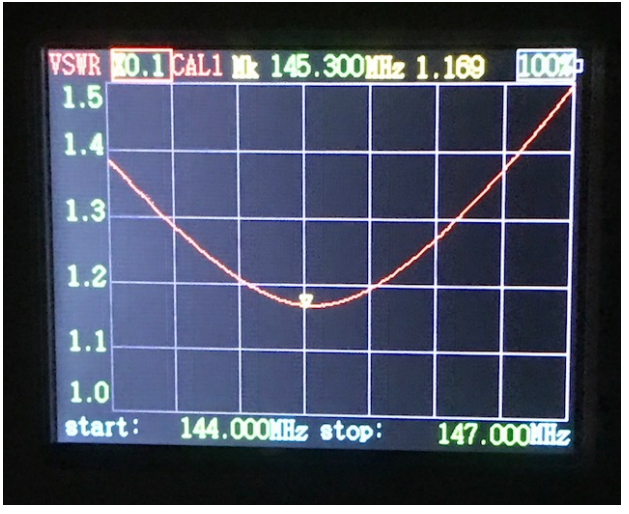
un VSWR «*Voltage Standing Wave Ratio*»inférieur à 2 est acceptable ;

$$RL(dB) = 10log_{10}\frac{P_i}{P_r}$$ où P_i est la puissance incidente et P_r la puissance réfléchie.

«*Return loss is used in modern practice in preference to SWR because it has better resolution for small values of reflected wave*»

$\Longrightarrow$une valeur du «*Return Loss*» importante correspond à une valeur de SWR petite :

Return Loss (dB)	VSWR	Puissance réfléchie (%)
1	17,39	79,43
9	2,10	12,59
10	1,92	10
20	1,22	1
40	1,02	0,01





- Un VNA, «*Vector Network Analyzer*», permet de mesurer la **puissance** et la **phase**.
- Un «*Vector Impedance Analyzer*» permet de mesurer la puissance et la phase mais ne dispose pas de toutes les mesures possibles d'un VNA, mais suffit pour **évaluer la fréquence de résonnance** d'une antenne.

Recommendations pour le choix d'une antenne

- ▷ Utiliser des **câbles courts**, de **gros diamètre** et de **bonne qualité** ;
- ▷ une antenne ne fonctionne bien, en général, que sur une fréquence : sa **fréquence de résonnance** ;
- ▷ **plus** une antenne est **longue** plus sa **fréquence** de résonnance est **petite** ;
- ▷ pour sa **fréquence de résonnance** :
  - ◇ une **bonne antenne** transmet toute son énergie dans les airs ;
  - ◇ une **mauvaise antenne** réfléchit une partie de cette énergie au circuit d'émission ;
- ▷ **Toujours connecter** une antenne sur l'émetteur, sinon toute **l'énergie émise est réfléchie** et risque d'endommager le circuit d'émission.
- ▷ **3m** de câble correspond à une perte de **36km** à travers les airs ;
- ▷ Une antenne est **polarisée** :
  - ◇ si les deux antennes sont **verticales** ou **horizontales** : les conditions de communication sont **optimales** ;
  - ◇ si une des antennes est **horizontale** et l'autre **verticale** : on **perd** de la puissance.
- ▷ plus l'antenne a de **gain**, plus elle est **directionnelle** ;
- ▷ une «*ligne de vue*» permet des transmissions à **longue distance** ;
- ▷ plus la fréquence de transmission est **élevée**, plus elle se comporte comme la lumière : il faut une ligne de vue **sans obstacles** pour obtenir de bonnes performances.

La mesure de puissance : le «dBm»

La **puissance d'émission** est exprimée en dBm qui exprime un rapport de puissance en dB par rapport à la puissance de référence fixée à $1mW$:

$$dBm = 10\log_{10}\left(\frac{Puissance}{1mW}\right)$$

Cette puissance est exprimée en référence à une puissance de 1mW $\Longrightarrow 0dBm = 1 * 1mW$

Une table des puissances exprimées en dBm :

mW	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	2	10	100	200	400	1000
dBm	-50	-40	-30	-20	-10	0	3	10	20	23	26	30

Attention

La **puissance d'émission globale** est **régulée** : elle est **limitée légalement**.

La puissance d'émission globale dépend de :

- la puissance d'émission de l'émetteur exprimée en dBm ;
  $\Longrightarrow$ *dépend du paramétrage du circuit radio de l'émetteur ;*
  $\Longrightarrow$ *consomme de l'énergie sur l'alimentation de l'émetteur ;*
- la **perte** dues au câbles/connecteurs $\Longrightarrow$ *dépend de la qualité des composants/connexions ;*
- le **gain** de l'antenne $\Longrightarrow$ *dépend de la nature de l'antenne*.



RFPower8000 Features

- Measurement range: -45 to -5 dBm
- Measurement resolution: 0.1 dBm
- Measurement frequency range: 1 MHz - 5 GHz
- Measured power: 1nW 2W (with the use of attenuator RF attenuator to extend to 33dBm)
- Power supply: 5V DC (via micro-USB and CH340 drivers)
- Configurable from Windows software
- Operating current: <50 mA
- Dimensions: 50x50x25mm

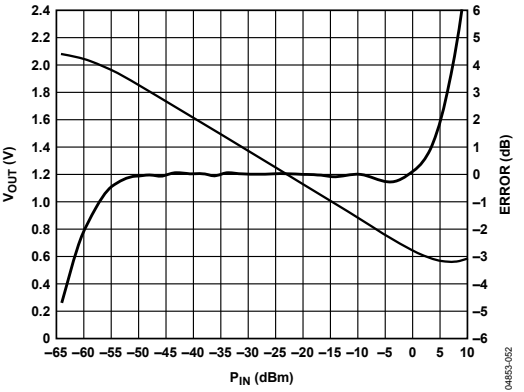
et Linux aussi :-)

Le RFPower 8000 utilise un AD8318 pour réaliser la mesure de puissance et un micro-controlleur pour le piloter.

L'échantillonnage de l'appareil est de 8 mesures par secondes, ou $8Hz$, ou toutes les $125ms$:

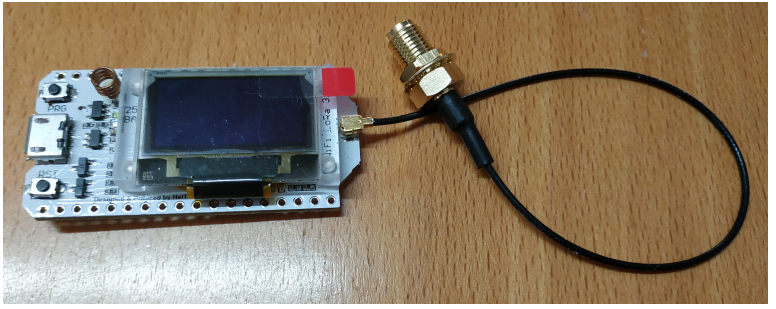
$\Longrightarrow$ il faut que la **transmission** soit faite pendant qu'une **mesure** est réalisée, sinon on ne pourra pas la mesurer.

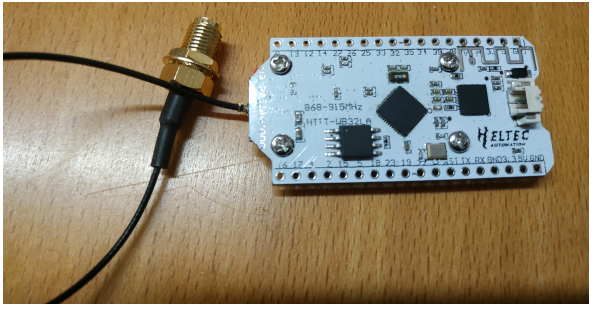
$\Longrightarrow$ il faut que la **durée de transmission** soit suffisante pour permettre une mesure pendant celle-ci : elle doit excéder 125ms.



La mesure est linéaire pour des puissances comprises entre $-50dB$ et $-5dB$, d'après la documentation du AD8318.
$\Longrightarrow$ il faut **atténuer** le signal en entrée.

ESP32 + Semtech SX1276 LoRa





Les caractéristiques du SX1276 :

- 168dB maximum link budget
- +20dBm - 100 mW constant RF output vs. V supply
- +14dBm high efficiency PA
- Programmable bit rate up to 300kbps
- High sensitivity: down to -148dBm
- Low RX current of 9.9mA, 200nA register retention
- Fully integrated synthesizer with a resolution of 61Hz
- FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa and OOK modulation
  Built-in bit synchronizer for clock recovery
- Preamble detection
- 127dB Dynamic Range RSSI
- Packet engine up to 256 bytes with CRC

Un connecteur SMA-femelle vers SMA-femelle :



Deux atténuateurs : 10dB et 20dB



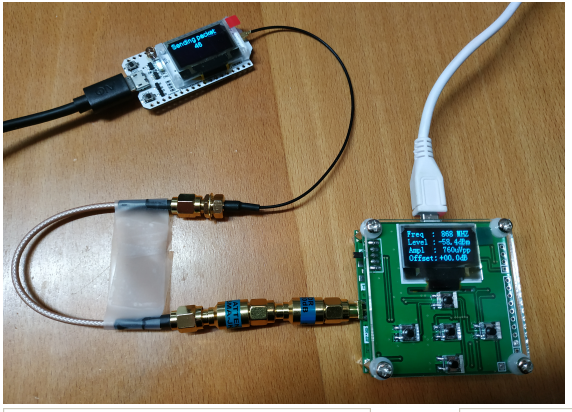
que l'on peut combiner en un atténuateur de 30dB :



Une rallonge SMA-femelle vers SMA-mâle :



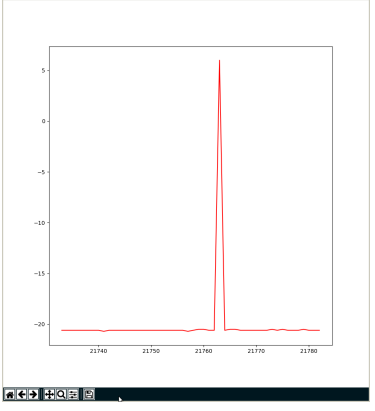
Mesure de la puissance de transmission



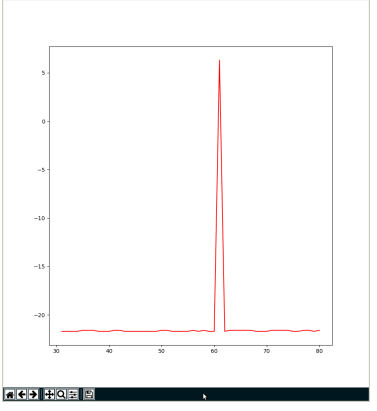
Banc de mesure :

- ▷ l'ESP32 + module LoRa avec connecteur antenne de type «*Ipex Micro Coax*» ;
- ▷ adaptateur Ipex micro vers SMA ;
- ▷ changeur de genre : SMA-femelle vers SMA-femelle ;
- ▷ utilisation du «*Spreading Factor*» de 7 pour la transmission du paquet «*Hello from ESP32*».

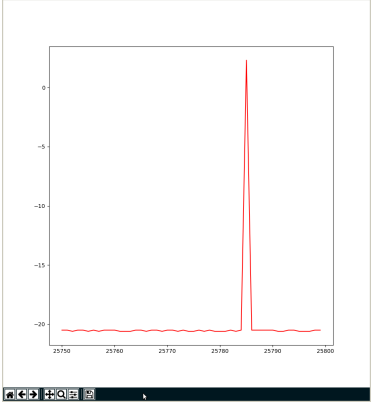
On observe une perte d'environ $4dBm$ *dans les câbles et connecteurs :*



- ☐ Transmission : $10dBm$
- ☐ Atténuation : 30dB
- ▷ $-20,6dBm$ sans transmission ;
- ▷ $6dBm$ lors d'une transmission ;



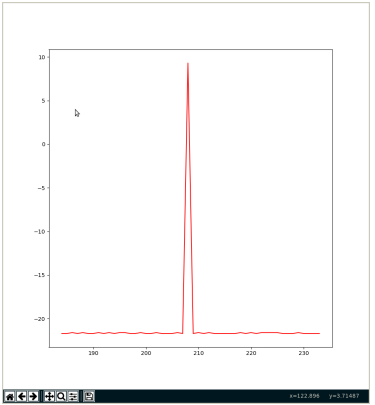
- ☐ Transmission : $14dBm$
- ☐ Atténuation : 30dB
- ▷ $-20,6dBm$ sans transmission ;
- ▷ $9dBm$ lors d'une transmission ;



- ☐ Transmission : $6dBm$
- ☐ Atténuation : 30dB
- ▷ $-20,5dBm$ sans transmission ;
- ▷ $2,3dBm$ lors d'une transmission ;

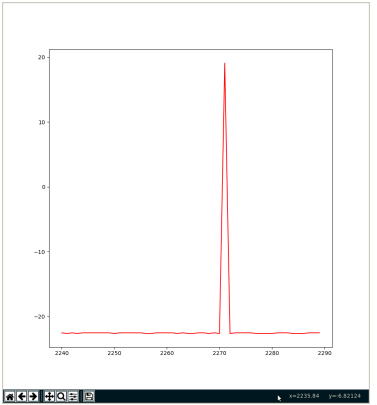
Une mesure de l'atténuation des câbles et connecteurs

Avec l'atténuation des $30dB$, c-à-d les deux atténuateurs :



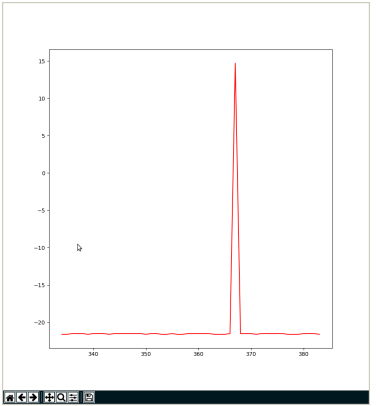
- ▷ sans communication : $-22,5dBm$
- ▷ avec communication : $9,1dBm$

Sans l'atténuateur de 10dB, soit une atténuation de $20dB$:



- ▷ sans communication : $-22,5dBm$
- ▷ avec communication : $19,1dBm$

Avec une atténutation de $20dB$ et le câble de rallonge :



- ▷ sans communication : $-22,5dBm$
- ▷ avec communication : $14,8dBm$

$\Longrightarrow$On observe que le câble de rallonge atténue le signal de $4dBm$!



Affaiblissement en espace libre, «*Free Space Loss*»

D'après Wikipedia

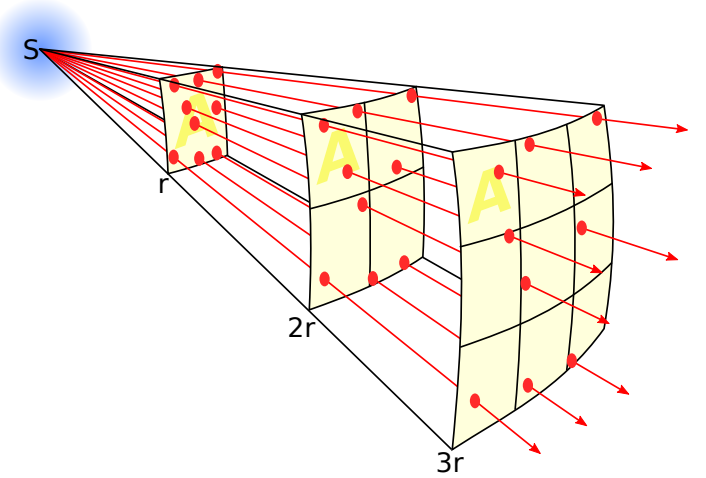
En physique, une loi en **carré inverse** est une loi physique postulant qu'une quantité physique (énergie, force, ou autre) est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette quantité physique.

L'intensité est **inversement proportionnelle** au **carré de la distance** :

$$\text{Intensité} \propto \frac{1}{\text{distance}^2}$$

Affaiblissement en espace libre : la puissance du signal est diminuée par la répartition géométrique du «front d'onde».

On parle de FSL, «*Free Space Loss*» ou de FSPL «*Free Space Path Loss*».



*La **puissance du signal** se répartit sur le front d'onde, dont la surface augmente en même temps que la distance depuis la source augmente. C'est pourquoi l**a densité de cette puissance diminue** (les lignes de flux issues de la source, en rouge sur le schéma, ont une densité moindre si la distance augmente).*

Affaiblissement en espace libre, «*Free Space Path Loss*»

$\text{FSPL}_{\text{dB}} = 10\log_{10}\left(\frac{4\pi df}{c}\right)^2$ où d est la distance en mètre,
f est la fréquence en Hertz et c, la vitesse de la lumière.

$\text{FSPL}_{\text{dB}} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right)$

Ce qui donne : $\text{FSPL}_{\text{dB}} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 147,55$

Et si on exprime
▷ f en MHz
▷ d en km,
cela donne la formule suivante :

$\text{FSPL}_{\text{dB}} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32,45$

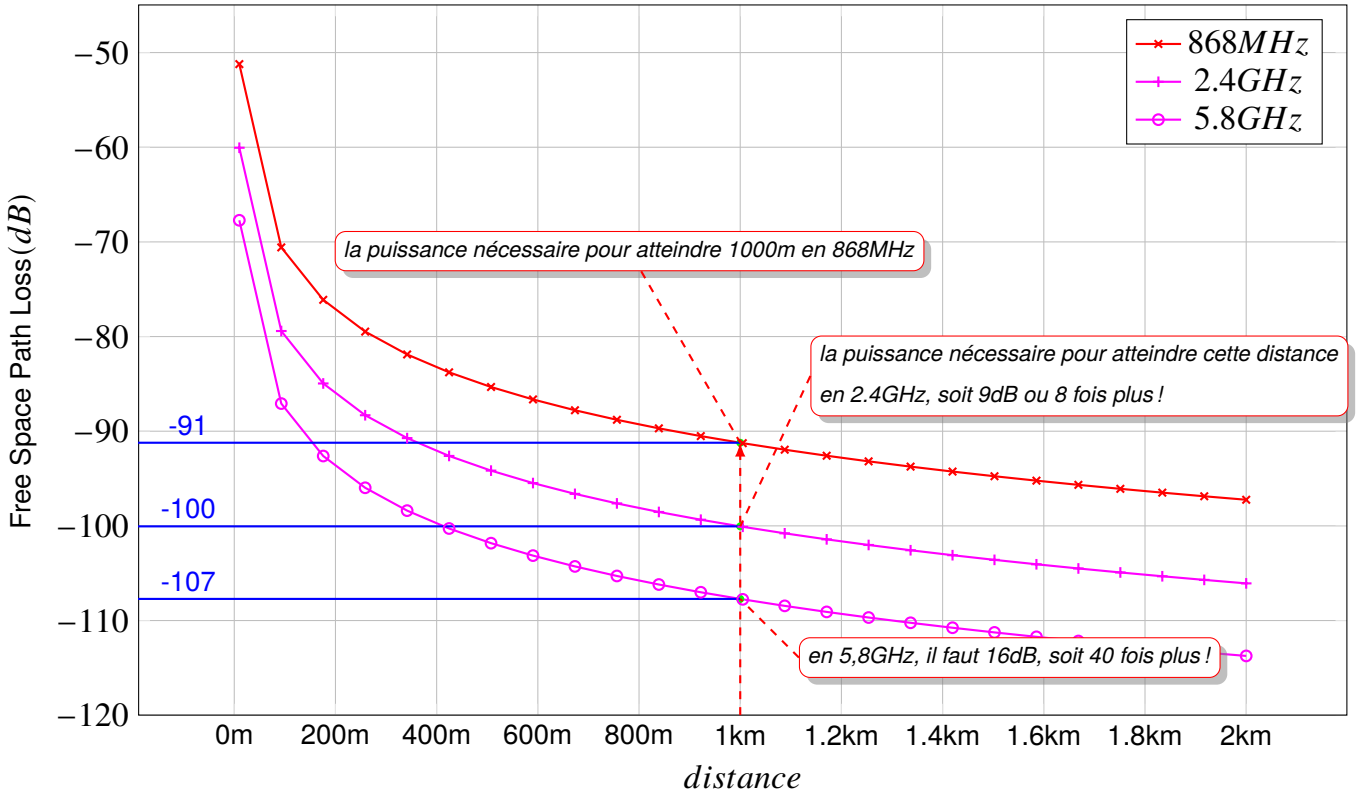
D'où la table suivante :

On remarquera que pour la fréquence du WiFi de $2485Mhz$, on obtient la formule simplifiée :
$\text{FSPL}_{dB} = 100 + 20\log_{10}(d)$, avec une distance exprimée en km.

	Fréquence		
Distance	868MHz	2.4GHz	5.8GHz
1km	91.22	100.05	107.72
2km	97.24	106.07	113.74
3km	100.76	109.60	117.26
4km	103.26	112.10	119.76
5km	105.20	114.03	121.70
10km	111.22	120.05	127.72
20km	117.24	126.07	133.74
30km	120.76	129.60	137.26
40km	123.26	132.10	139.76
50km	125.20	134.03	141.70

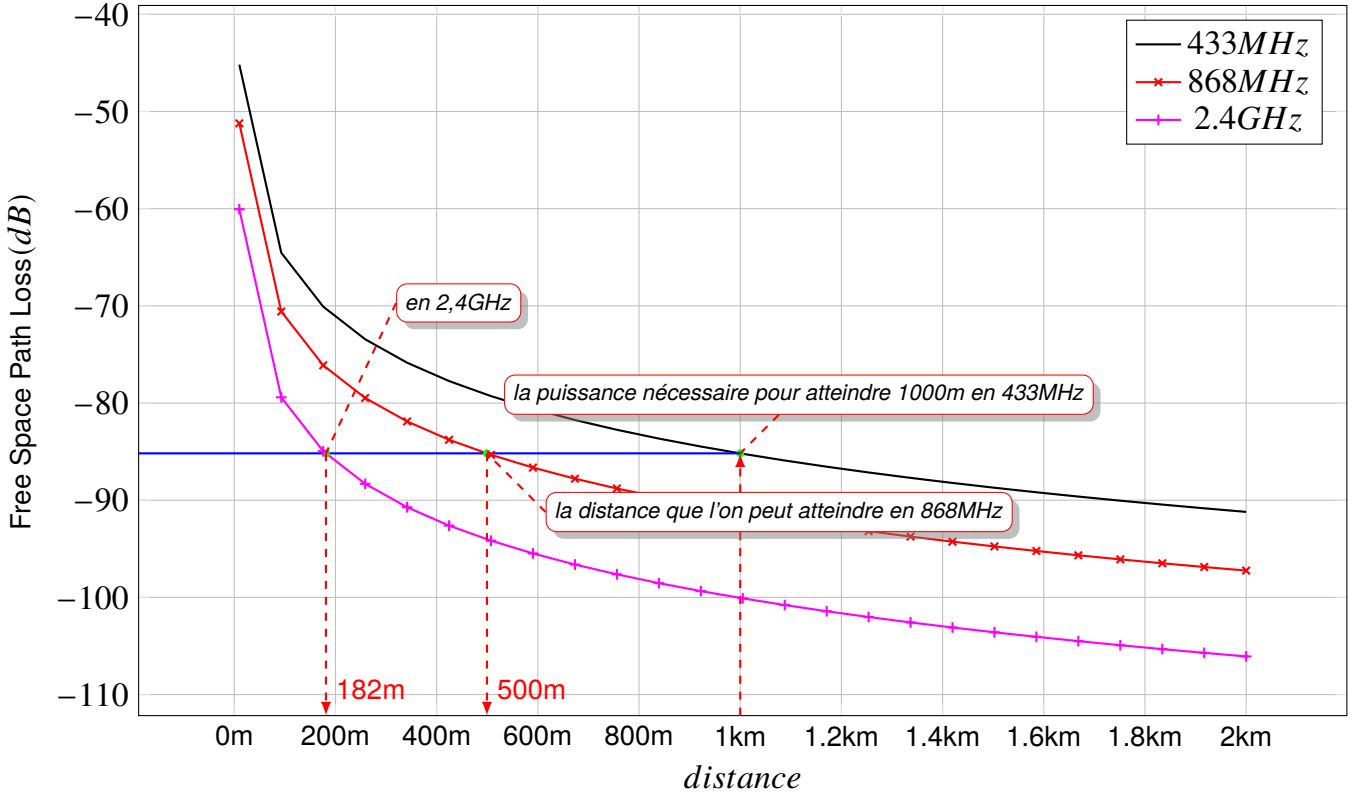
Affaiblissement en espace libre, «*Free Space Path Loss*»

Plus la **fréquence** est **élevée**, plus la **perte** est **importante** :



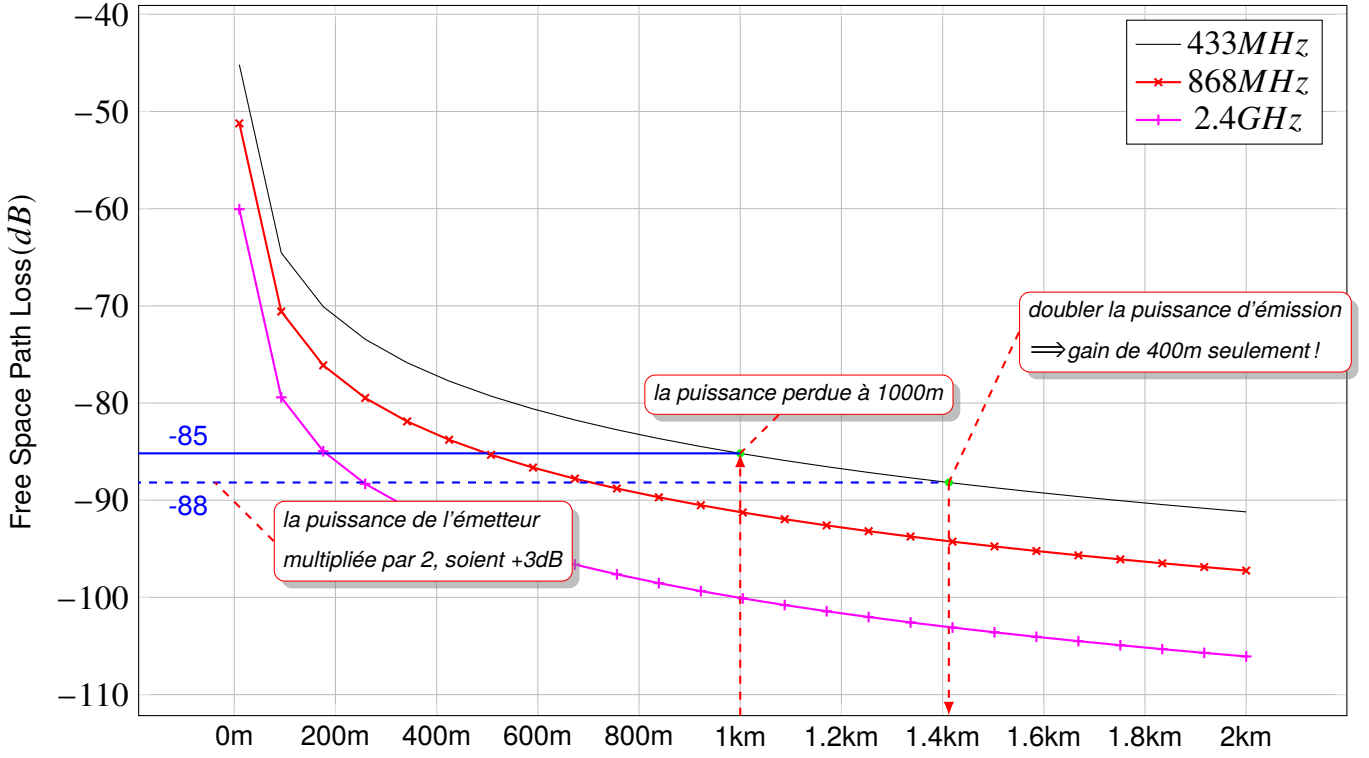
Affaiblissement en espace libre, «*Free Space Path Loss*»

Pour des fréquences standards de $433MHz$, $868MHz$ et $2,4GHz$:



Affaiblissement en espace libre, «*Free Space Path Loss*»

En considérant la fréquence de $433MHz$, on constate que **doubler la puissance** permet un gain de **distance** :



$\Longrightarrow$Un gain de $+3dB$, peut être **facilement** obtenu avec une **meilleur antenne** !

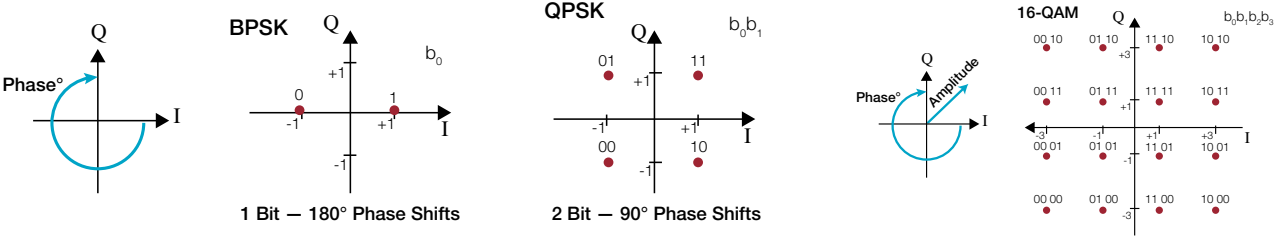
«*Link budget*»

- Le «*Link Budget*» permet de quantifier les **performances** d'un lien.
- La puissance reçue dépend de plusieurs paramètres :
  - la puissance transmise ;
  - le gain de l'antenne d'émission ;
  - le gain de l'antenne de réception ;
  - la perte en espace libre ;
  - la fréquence utilisée ;
  - la modulation utilisée.
- La performance d'un lien de communication dépend de la **qualité du matériel utilisé**.
- Si la **puissance** moins **l'atténuation** en espace libre du chemin est **supérieure** au niveau **minimal** de réception du signal de la radio du récepteur alors une liaison est **possible** ;

  La sensibilité, «*Sensitivity*» du récepteur

  C'est la **valeur minimale** de la puissance du signal que le récepteur est **capable de discerner**.

- La différence entre le minimum de niveau du signal reçu, la **sensibilité** du récepteur, et la puissance reçue est appelée le «***link margin***», «**marge de liaison**».
- La **sensibilité** de la radio du récepteur dépend de la **modulation** utilisée $\Longrightarrow$ plus elle est complexe, plus elle est dure à discerner.
- Le «*link margin*» doit être **positif** et doit être **maximisé**, c-à-d supérieur à au moins $10dB$ pour une communication fiable.



Le rapport Signal/Bruit, «SNR»

La technique de modulation détermine :

- ▷ le débit et la capacité du canal de communication ;
- ▷ la fiabilité du système :
  - ◇ compromis entre le débit et la distance ;
  - ◇ plus la technique de modulation est efficace plus le SNR doit être élevé ;
  - ◇ 64-QAM demande un **SNR plus élevé** alors que BPSK se suffit d'un **SNR moins élevé** car il est plus résistant au bruit présent sur le canal de communication.

Le codage ou «*coding*»

Correction d'erreurs : x bits sont convertis en y bits :

Data Bits	Coded Bits	Coding Rate	Efficiency	Reliability
1	2	1/2	Less	More
2	3	2/3		
3	4	3/4		
5	6	5/6	More	Less

On définie alors le **SNR** nécessaire au récepteur pour atteindre un niveau de fiabilité en terme de «BER», «*Bit Error Rate*» acceptable :

SNR = Puissance reçue − Bruit du canal de communication

Modulation & Codage	Débit (Mbps)	SNR (dB)
BPSK 1/2	6	8
BPSK 3/4	9	9
QPSK 1/2	12	11
QPSK 3/4	18	13
16-QAM 1/2	24	16
16-QAM 3/4	36	20
64-QAM 2/3	48	24
64-QAM 3/4	54	25

Plus de bruit sur le récepteur ⟹ moins de débit possible !

«*Link budget*» : un exemple

- ▷ fréquence de travail : 2,4GHz ;
- ▷ distance entre le point d'accès et la radio du client : 5km ;
- ▷ le point d'accès est connecté à une antenne :
  - ◇ gain : 10dBi ;
  - ◇ puissance d'émission : 20dBm ;
  - ◇ sensibilité de réception : -89dBm ;
- ▷ le client est connecté à une antenne :
  - ◇ gain : 14dBi ;
  - ◇ puissance d'émission : 15dBm ;
  - ◇ sensibilité de réception : -82dBm ;
- ▷ les câbles de connexion à l'antenne sont courts des deux côtés avec une perte de 2dB.

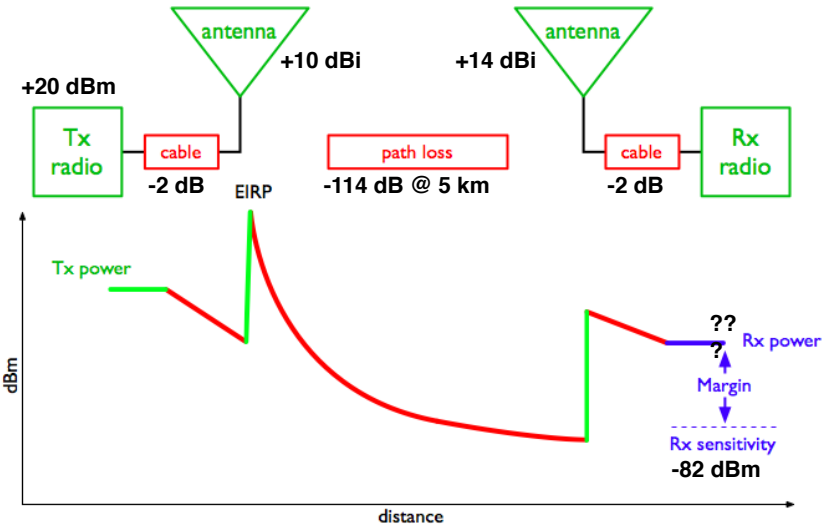
AP vers le client

Link Budget	Description
20dBm	TX Power AP
+10dBi	Antenna Gain AP
-2dB	Cable Losses AP
+14dBi	Antenna Gain Client
-2dB	Cable Losses Client

40dB	gain total
-114dB	FSPL pour 5km

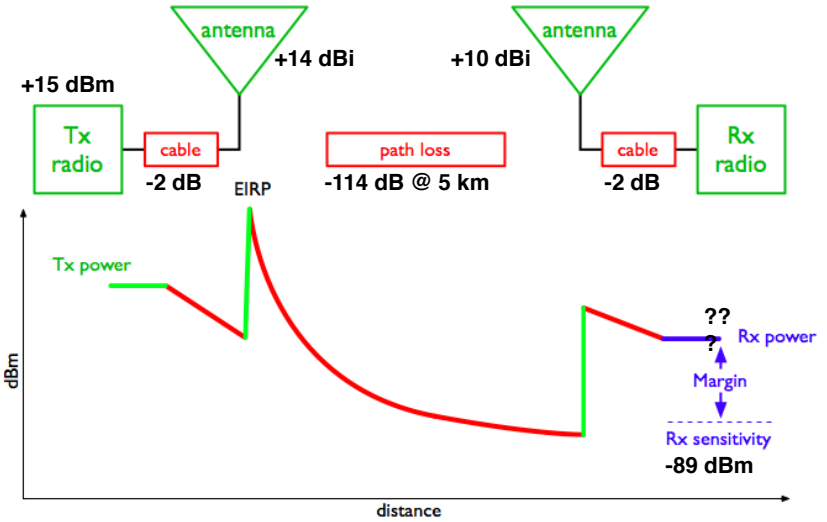
-74dBm	niveau de signal reçu
-82dBm	sensibilité du client

8dB	link margin



«*Link budget*» : un exemple – suite

- ▷ fréquence de travail : 2,4GHz ;
- ▷ distance entre le point d'accès et la radio du client : 5km ;
- ▷ le point d'accès est connecté à une antenne :
  - ◇ gain : 10dBi ;
  - ◇ puissance d'émission : 20dBm ;
  - ◇ sensibilité de réception : -89dBm ;
- ▷ le client est connecté à une antenne :
  - ◇ gain : 14dBi ;
  - ◇ puissance d'émission : 15dBm ;
  - ◇ sensibilité de réception : -82dBm ;
- ▷ les câbles de connexion à l'antenne sont courts des deux côtés avec une perte de 2dB.



Client vers l'AP :

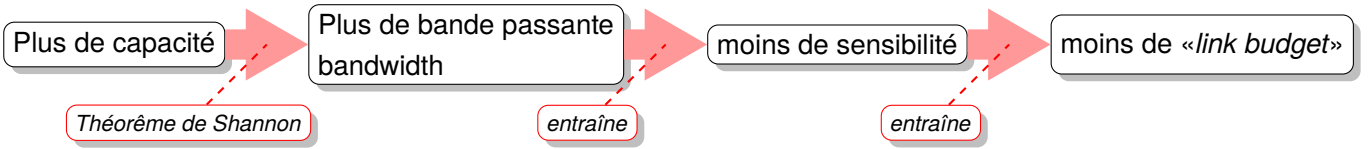
Link Budget	Description
15dBm	TX Power Client
+14dBi	Antenna Gain Client
-2dB	Cable Losses Client
+10dBi	Antenna Gain AP
-2dB	Cable Losses AP

35dB	gain total
-114dB	FSPL pour 5km

-79dBm	niveau de signal reçu
-89dBm	sensibilité de l'AP

10dBm	link margin

Si on veut augmenter la capacité de communication⟹on réduit le «*link margin*»



Pour augmenter le «*link margin*»⟹améliorer l'antenne

Quelle sorte d'antenne utiliser pour augmenter le «*link budget*» ?

- le récepteur n'est **pas régulé** contrairement à l'émetteur
  ⟹on peut utiliser une antenne avec un bon gain ;
  ⟹un bon gain permet d'augmenter le «*link margin*» ;
- directionnelle ? cela dépend :
  - si les nœuds sont fixes et l'on sait où est la «*gateway*»⟹ **bonne** idée !
  - si les nœuds sont répartis n'importe où ⟹ **pas une bonne** idée !
  - si les nœuds bougent ⟹ **pas une bonne** idée !

Pour augmenter le «*link margin*»⟹changer la modulation utilisée avec l'émetteur

Une modulation offrant **plus de débit** exige une **meilleure sensibilité**.
Un **débit plus bas**⟹ un «*link margin*» plus **important**.

Pour augmenter le «*link margin*»⟹utiliser un «*LNA*», «*Low Noise Amplifier*»

L'utilisation d'un **amplificateur** améliore la sensibilité mais demande des composants de **meilleure qualité**.

La réception est affectée par la **traversée des matériaux** occultant la ligne de vue, «*line of sight*» :

Materiaux	**Atténuation à 900MHz**
Verre 6mm	0,8 dB
Verre 13mm	2 dB
Bois 76mm	2,8 dB
Brique 89mm	3,5 dB
Brique 178mm	5 dB
Brique 267mm	7 dB
Béton 102mm	12 dB
Parpaing 203mm	12 dB
Parpaing 406mm	17 dB
Béton 203mm	23 dB
Béton renforcé 203mm	27 dB
Parpaing 610mm	28 dB
Béton 305mm	35 dB

Le béton est un très bon atténuateur...

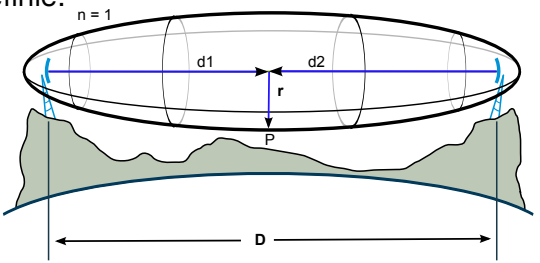
La «zone de Fresnel» et l'atténuation du signal

La «zone de Fresnel» est une zone ellipsoïdale autour de la «ligne de vue» ou «*Line-Of-Sight*» :

- ☐ de diamètre plus large de au centre qu'au bord ;
- ☐ plus grande est la distance entre les antennes, plus grande est la zone dans son centre ;

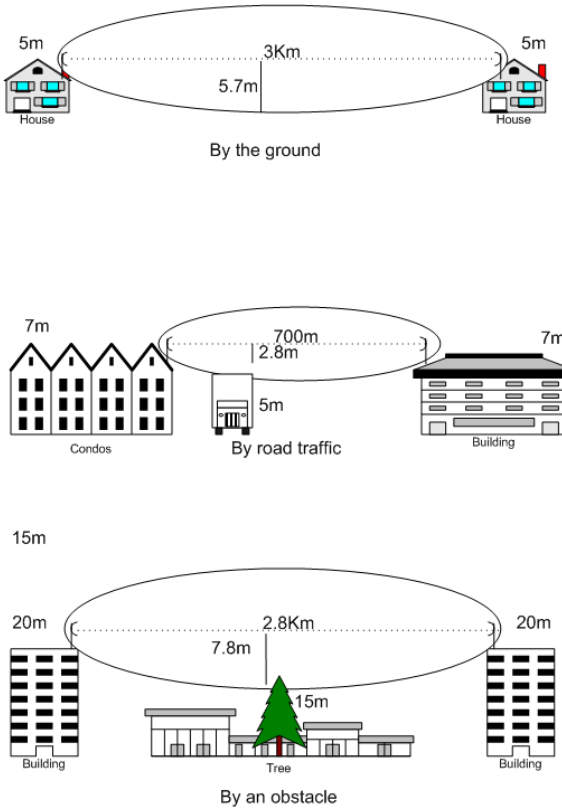
L'**atténuation du signal** dépend de :

- ▷ la ligne de vue : le fait que l'on voie une antenne depuis l'autre ;
- ▷ la présence d'obstacle dans la zone ellipsoïdale définie.



Exemple : à 2,4GHz sur une distance de 10km, la zone de Fresnel à un rayon de 17,6m.

On considère que 20 à 40%d'obstruction de la zone n'introduit pas d'interférence.

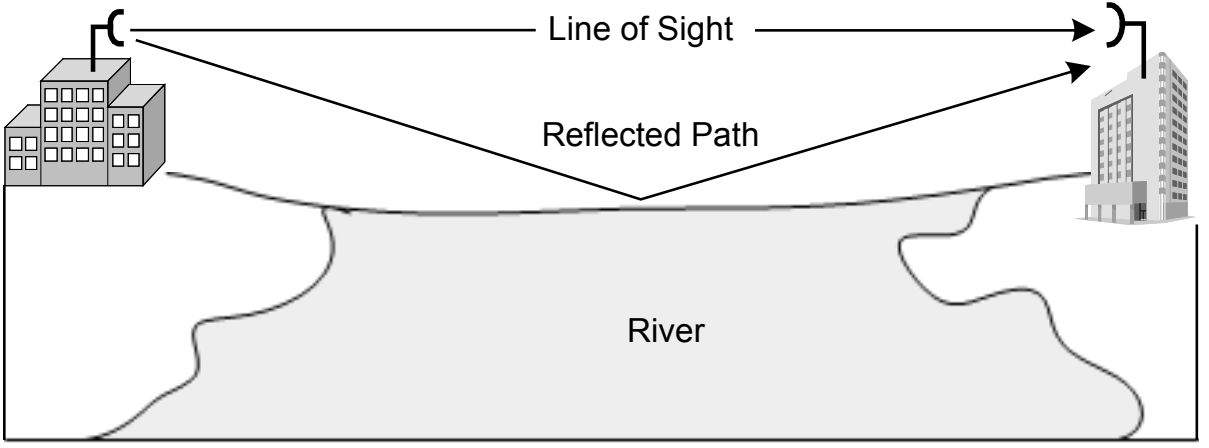


Suivant la nature des obstacles à traverser, la perte est plus ou moins importante :

- ▷ arbres : 10 à 20dB ;
- ▷ murs : de 10 à 15dB ;
- ▷ sols : de 12 à 27dB (du sol en bois à celui en béton armé) ;

Mais...

Les obstacles peuvent **améliorer** le signal reçu :



*On se sert des multiples chemins, «*multipath*» pour améliorer la réception du signal à l'aide de plusieurs antennes, «*diversity*».*

- mesure de la puissance du **signal reçu** dans un réseau sans-fil ;
- exprimée sous forme de :
  - ◇ **pourcentage** indiquant la qualité du signal
  - ◇ **RSSI**, «*Received Signal Strength Indicator*», en dBm de 0 à -120.
    plus la valeur est proche de zéro, plus le signal est puissant ;
- en général :
  - RSSI $\geq$ -50 $dBm \Longrightarrow$ 100% qualité ;
  - RSSI $\leq$ -100 dBm $\Longrightarrow$ 0% qualité ;
- pour un RSSI entre -50dBm et -100dBm :
  - ◇ qualité $\simeq$ 2*(RSSI + 100)
  - ◇ RSSI $\simeq$ (qualité/2)-100

  Un réseau fonctionne correctement avec un RSSI > à -80dBm, et de -45dBm à -87dBm c'est plutôt satisfaisant.

haute qualité	90%	-55dBm
qualité moyenne	50%	-75dBm
basse qualité	30%	-85dBm
mauvaise qualité	8%	-96dBm

Bruit

- ▷ combinaison du bruit ajouté par l'**électronique du récepteur**, du «bruit thermique», d'interférences, de distortion, *etc.*
- ▷ valeur comprise entre 0 et -120dBm : plus la valeur est proche de -120 mieux c'est pour la communication, car il y a peu ou pas d'interférences.

SNR, «*Signal to Noise Ratio*», et *SNR margin*

SNR margin = signal(dBm)-noise(dBm)
Exemple : RSSI = -55dBm et bruit = -85dBm, d'où : (-55 signal)-(-85 noise) = 30 dB de marge de SNR.
Plus haut est le «*SNR margin*», plus le signal est propre avec moins de bruit.
***Rappel** : le SNR définit la **capacité** du canal de transmission d'après Shannon :* $C = BW \log_2(1 + SNR)$
L'utilisation du débit de 54Mbps en WiFi requiert au moins un SNR margin de 25dB car il utilise une modulation efficace.

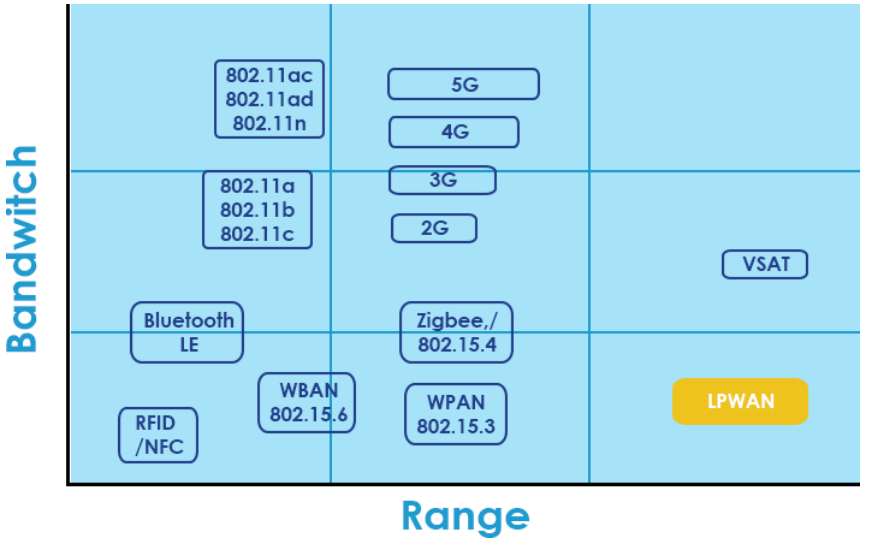
5 LoRa, «*Long Range*»

Plan

- LPWAN : «*Low Power Wide Area Network*» ;
- Technologies radio, fréquence et capacité ;
- Usages et caractéristiques ;
- Pourquoi des communications longue portée quand on en a de courte portée ?
- Différentes technologies radios : limitations techniques et administratives ;
- Les communications longue portée : aspects transmission.

OVERVIEW - Positioning

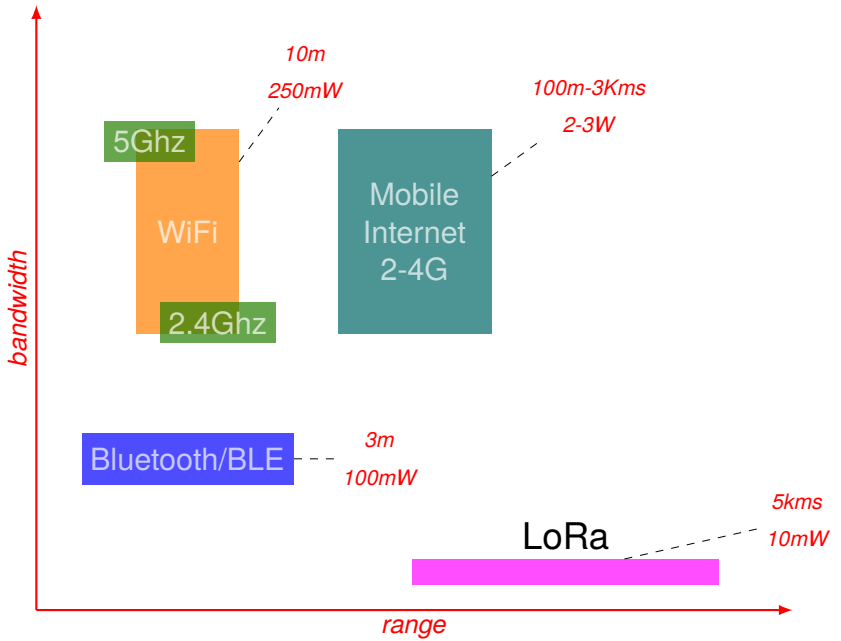
A sweet spot for LPWAN that suits the Internet of Things usages.
Besides LPWAN, no other technologies fulfills the needs of IoT applications.



Source : Perter R. Egli (http://fr.slideshare.net/PeterREgli/lpwan)

www.vertical-m2m.com

- «*Low Power*» *vs Wide Area* : pour transmettre sur de longues distances avec un **minimum d'énergie** on doit utiliser une faible bande passante ou «*bandwidth*» ;
- **faible bande passante** $\Longrightarrow$ faible capacité de communication du canal (théorême de Shannon) ;



LoRa, fréquences autorisées :

- 868 MHz ;
- 915 MHz ;
- 433 MHz ;

OVERVIEW – Usages



Long rage communications even in dense urban areas

Smart City: smart grid, metering, lighting, structural health monitoring…
Smart Industry: predictive maintenance…



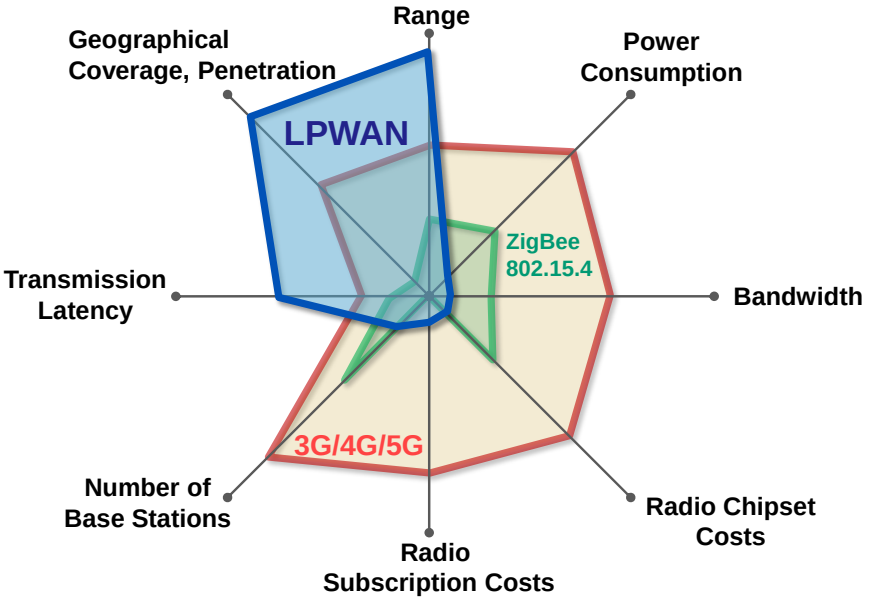
Isolated assets for applications requiring long life battery

Smart Agriculture: irrigation systems, …
Smart Grid / Water: metering

www.vertical-m2m.com

2. LPWAN requirements and characteristics (1/2)

The needs of IoT and M2M applications pose some unique requirements on LPWAN technologies as shown in the comparison with other wireless technologies:



© Peter R. Egli 2015

	LoRaWAN	Narrow-Band	LTE Cat-1	LTE Cat-M	NB-LTE
Modulation	SS Chirp	UNB/GSK/BPSK	OFDMA	OFDMA	OFMA
Rx Bandwidth	500-125KHz	100Hz	20MHz	20-1.4MHz	200KHz
Data rate	290bps-50Kbps	100bps 12/8 bytes max	10Mbps	200kbps-1Mbps	20Kbps
Max output power	20dBm	20dBm	23-46dBm	23/30dBm	20dBm
Battery lifetime 2000mAh	105 months (9 years)	90 months (7.5 years)		18 months (1.5 years)	
Link budget	154dB	151dB	130dB	146dB	150dB
Security	Yes	No	Yes	Yes	Yes

5G

On remarque que le «link budget» de LoRa est de 154dB qui est supérieur à celui du LTE Cat-1 qui utilise une énergie supérieure de 23 à 46 dBm.

Link budget :

- ▷ «rempli» par la **puissance de transmission** de l'émetteur et la **sensibilité** du récepteur ;
- ▷ dépend de la **fréquence** de transmission ;
- ▷ «diminué» par les **obstacles** (câbles, murs, arbres, *etc*), et la **distance** ;
- ▷ dépend de la **qualité** et de la **directivité** de **l'antenne**.

Quelles sont le fréquences utilisables librement ?

Frequency	Band	Notes
13.553-13.567 MHz	ISM	RFID
26.957-27.283 MHz	ISM	Citizens' Band
433.050-434.790 MHz	ISM	LPD433 (70-centimeter band)
863–870 MHz		SRD860
2400.0–2483.5 MHz	ISM	13-centimeter band Heavily used by WiFi; BLE
5725–5875 MHz	ISM	5-centimeter band used by WiFi ac

Yeaahhh

Et pour le LoRa ?

SRD860

In Europe, 863 to 870 MHz band has been allocated for license-free operation using FHSS, DSSS, or analog modulation with either a transmission **duty cycle** of 0.1%, 1% or 10% depending on the band, or Listen Before Talk (LBT) with Adaptive Frequency Agility (AFA). Although this band falls under the Short Range Device umbrella, it is being used in Low-Power Wide-Area Network (LPWAN) wireless telecommunication networks, designed to allow long range communications at a low bit rate among things (connected objects).

Frequency	Duty cycle	Channel spacing	ERP
863.0 – 865.0 MHz	100% (wireless audio)		10 mW
863.0 – 865.6 MHz	0.1% or LBT+AFA		25 mW
863.0 – 868.0 MHz *			25 mW wideband up to 1 MHz (data only)
865.0 – 868.0 MHz	1% or LBT+AFA		25 mW
865.0 – 868.0 MHz *			2 W (RFID only)
865.0 – 868.0 MHz *	10% (access points), 2.5% (other devices)	4 frequencies	500 mW (data only, power control required)
868.0 – 868.6 MHz	1% or LBT+AFA		25 mW
868.6 – 868.7 MHz	1% (alarms)	25 kHz	10 mW
868.7 – 869.2 MHz	0.1% or LBT+AFA		25 mW

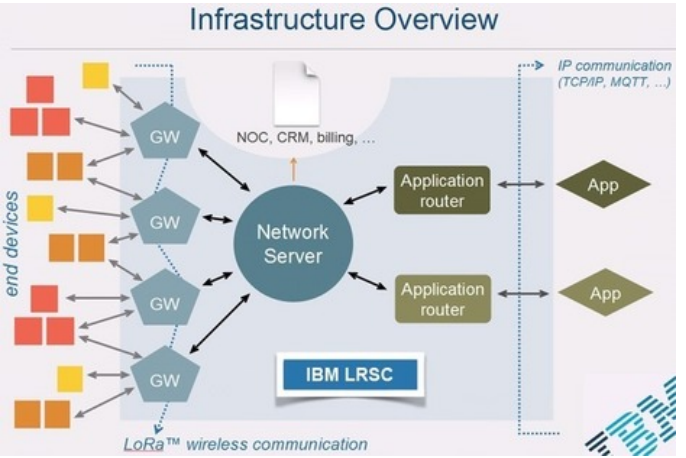
	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 +8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kpbs				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Le «*duty cycle*» assure le multiplexage

- 8 canaux $\Longrightarrow$ 8 appareils ;
- 50% «duty cycle» $\Longrightarrow$ 16 appareils ;
- 1% «duty cycle» $\Longrightarrow$ 800 appareils ;

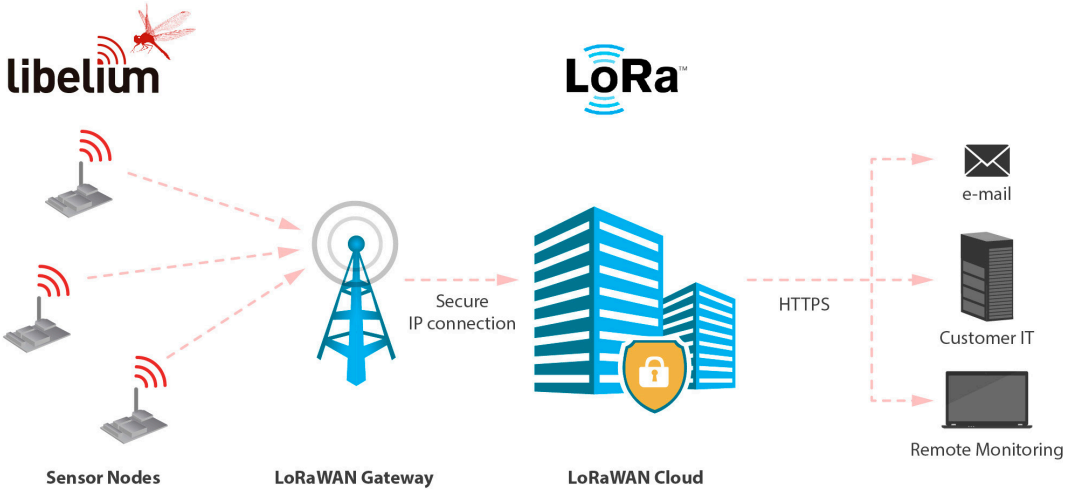
  $\Longrightarrow$ *bandwidth encore plus réduite* !
- 250 bps/100 = 2.5bps ;

Un modèle basé sur des passerelles, «*GateWays*», des capteurs «*end devices*» et du Cloud.

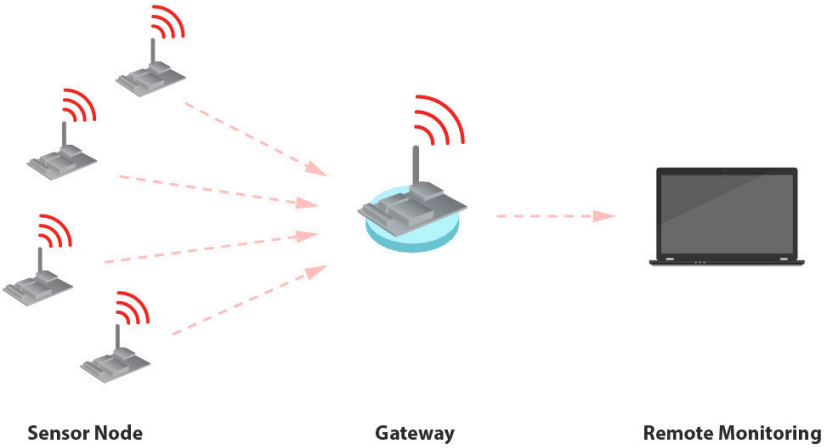


LoRa vs LoRaWan

- **LoRa** correspond au «*link layer protocol*» : peut être utiliser pour des communications P2P entre les nœuds ;
- **LoRaWan** inclus la «couche réseau» en plus : possible d'envoyer des informations à n'importe quelle «base station» déjà connectée au Cloud ⟹ c'est ce modèle qui correspond à l'internet des objets, «*IoT*».
  Les modules LoRaWan fonctionnent sur plusieurs canaux et mêmes plusiseurs fréquences simultanéments (plusieurs antennes) :
  - communications entre les nœuds et les «*gateways*» : différents canaux et différents débits, «data rate» :
    - différents débits : compromis entre portée radio et durée du message ;
    - différents canaux (étalement de spectre + choix d'un canal) : pas d'interférences entre les communications et création de canaux «virtuels» : augmente la capacité de la passerelle ;
    - ADR, «*Adaptive Data Rate*» : permet d'adapter le débit, la puissance de transmission pour augmenter la capacité de gestion de la passerelle et optimiser la batterie des nœuds ;
  - «*gateways*» : connectées par IP et capable de s'intégrer au Cloud ;



Lora : communications en P2P



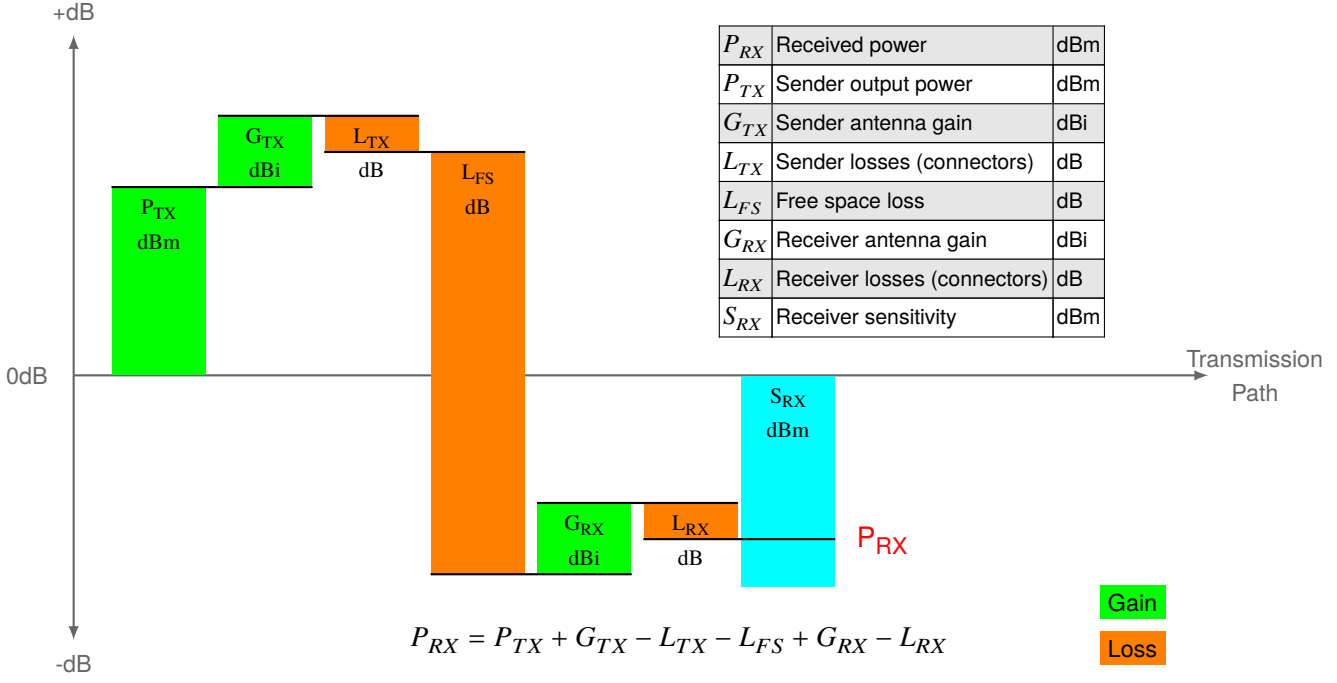
- ▷ pas de «*base station*», ni de Cloud (pas d'abonnement à une plateforme de médiation) ;
- ▷ The Internet of Things Network, TTN, `https://www.thethingsnetwork.org`

THE THINGS NETWORK

LoRaWan, est-ce nécessaire ?

- ▷ sensibilité de -136dBm combinée avec une puissance d'émission de +14dBm : 140dB de «*link budget*» ;
- ▷ portée en LOS, «*Line of Sight*» de 22km ou 2km en NLOS ;
- ▷ fréquence de 868MHz contre 2,4GHz pour le WiFi :
  - ◇ meilleure pénétration des matériaux : briques, ciment, arbres ;
  - ◇ moins d'atténuation en FSPL, «*free-space path loss*» ;

Et le bilan de liaison pour le LoRa ?



P_{RX}	Received power	dBm
P_{TX}	Sender output power	dBm
G_{TX}	Sender antenna gain	dBi
L_{TX}	Sender losses (connectors)	dB
L_{FS}	Free space loss	dB
G_{RX}	Receiver antenna gain	dBi
L_{RX}	Receiver losses (connectors)	dB
S_{RX}	Receiver sensitivity	dBm

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} - L_{TX} - L_{FS} + G_{RX} - L_{RX}$$

Le «*Free Space Loss*» est le paramètre qui **réduit le plus** la puissance reçue par le récepteur.

La **sensibilité du récepteur**, «*receiver sensitivity*», doit être choisie de manière à être **égale ou inférieure** à P_{RX}.

La sensibilité de LoRa est très bonne : jusqu'à $140dBm$ *!*

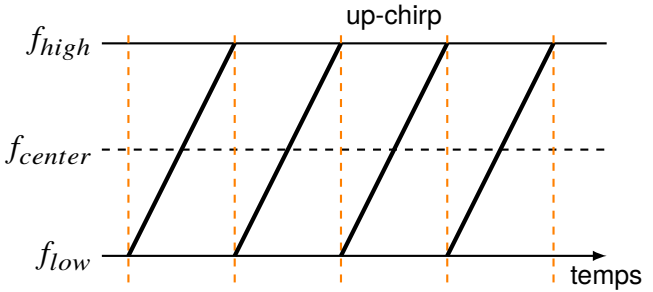
Le «*Link Margin*» est égale à $P_{RX} - S_{RX}$, avec S_{RX} qui est une valeur négative : il indique si **la communication est possible**.

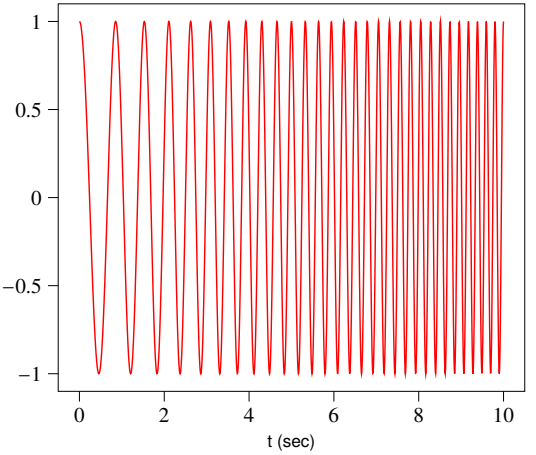
Le **niveau maximal de bruit** supportable se calcule à l'aide du SNR, «*Signal to Noise Ratio*», minimum nécessaire pour la modulation choisie : $Max\ Channel\ Noise = P_{RX} - SNR_{MIN}$.

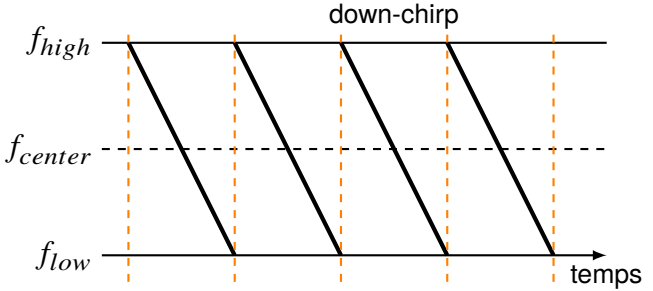
La **valeur courante du bruit** est mesurée sur le récepteur au travers du RSSI : elle ne doit pas dépasser celle calculée.

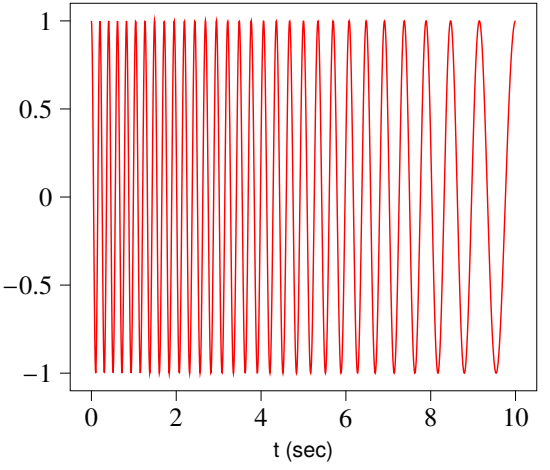
Et le LoRa utilise du CDMA ?

Mais comment ?

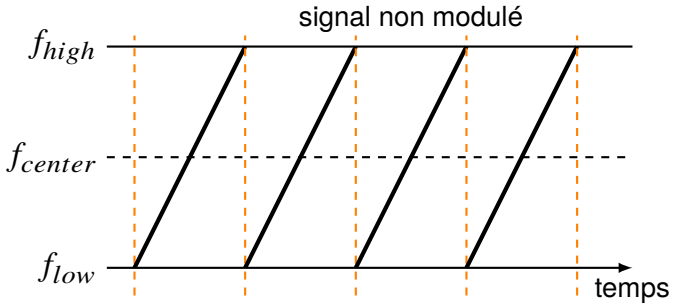

up-chirp
f_{high}
f_{center}
f_{low}
temps

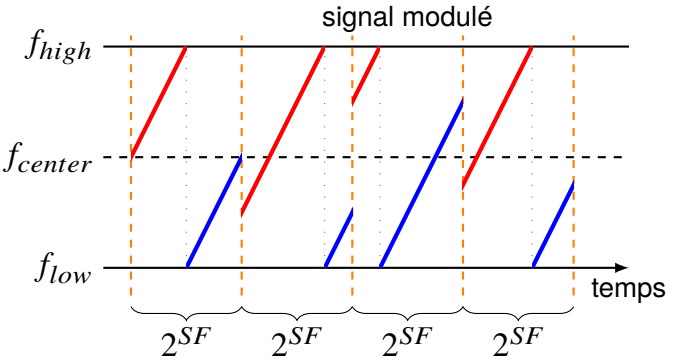

1
0.5
0
−0.5
−1
0
2
4
6
8
10
t (sec)


down-chirp
f_{high}
f_{center}
f_{low}
temps


1
0.5
0
−0.5
−1
0
2
4
6
8
10
t (sec)

Modulation du LoRa

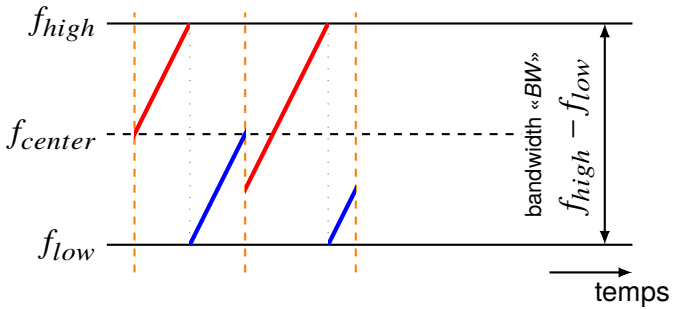




Débit ou Chip rate

$BW = R_c$ = chip rate en chips/s

Par exemple pour $BW = 125kHz$ avec un $SF = 9$:



- $SF = 9$
- chaque symbole transporte 9 bits d'information
- $2^{SF} = 2^9 = 512 chips$
- $BW = R_c$ = chip rate = $125000 chips/s$

Calcul du débit

Remarque : Le «*chip rate*» est **toujours supérieur** au «*symbol rate*» : $R_c > R_s$

$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{(4+CR)}$ avec :

- Bandwidth, «*BW*»en Hz ;
- Spreading Factor, «*SF*» allant de 7 à 12 ;
- Code Rate, «*CR*» allant de 1 à 4 ;

Exemples avec $SF = 7$ et $CR = 1$:

▷ $BW = 125kHz, R_b = 7 * (125000/2^7) * (4/(4+1)) = 5,5kbits/s$

▷ $BW = 250kHz, R_b = 7 * (250000/2^7) * (4/(4+1)) = 10,9kbits/s$

▷ $BW = 500kHz, R_b = 7 * (500000/2^7) * (4/(4+1)) = 21,9kbits/s$

▷ **si le bandwidth ↗ alors le «*bit rate*», ou «*data rate*», ↗**

Exemples avec $BW = 125kHz$ et $CR = 1$:

▷ $SF = 7 \Longrightarrow BW = 125kHz, R_b = 7 * (125000/2^7) * (4/(4+1)) = 5,5kbits/s$

▷ $SF = 8 \Longrightarrow BW = 125kHz, R_b = 8 * (125000/2^8) * (4/(4+1)) = 3,13kbits/s$

▷ $SF = 9 \Longrightarrow BW = 125kHz, R_b = 9 * (125000/2^9) * (4/(4+1)) = 1,76kbits/s$

▷ $SF = 10 \Longrightarrow BW = 125kHz, R_b = 10 * (125000/2^{10}) * (4/(4+1)) = 0,98kbits/s$

▷ $SF = 11 \Longrightarrow BW = 125kHz, R_b = 11 * (125000/2^{11}) * (4/(4+1)) = 0,54kbits/s$

▷ $SF = 12 \Longrightarrow BW = 125kHz, R_b = 12 * (125000/2^{12}) * (4/(4+1)) = 0,29kbits/s$

▷ **si le spreading factor ↗ alors le «*bit rate*», ou «*data rate*», ↘**

Durée d'un «*chip*»

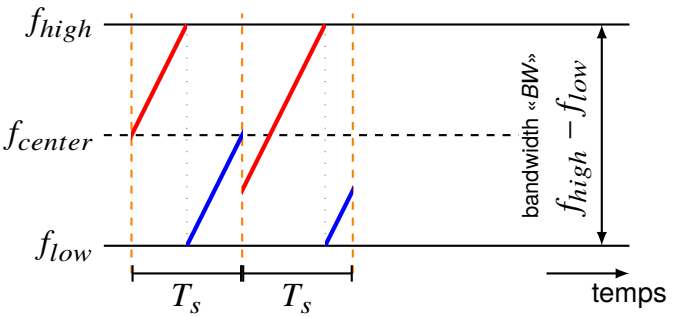
$R_c = BW$ avec bandwidth en Hz
$\Longrightarrow T_c = \frac{1}{BW}$ avec T_c en secondes.

Exemple avec $BW = 125kHz$
$T_c = 1/125000 = 8\mu s$

Durée d'un symbole

La durée d'un symbole correspond à la durée de «*balayage*» du «*chirp*».

$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$ avec :
- T_s en secondes ;
- bandwidth, BW en Hz
- Spreading Factor, SF allant de 7 à 12 ;

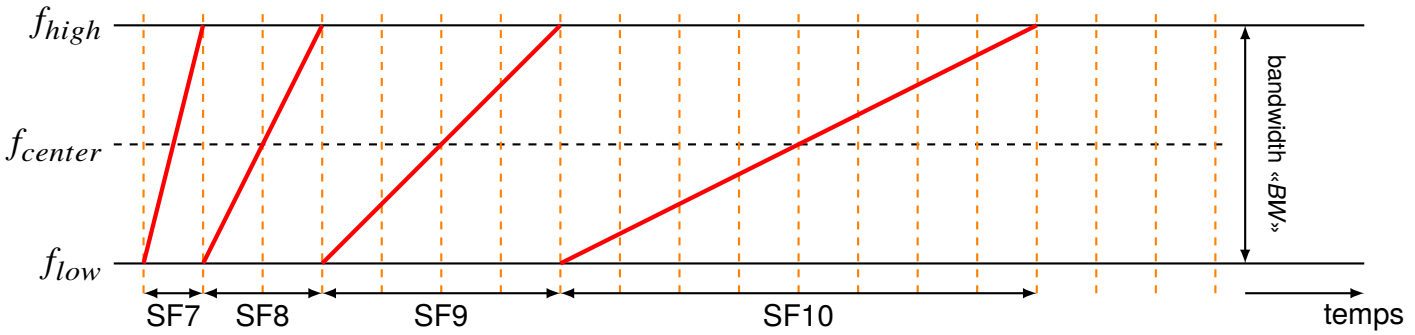


Par exemple pour $SF = 7$
- ▷ $BW = 125kHz, T_s = 2^7/125000 = 1,024ms$
- ▷ $BW = 250kHz, T_s = 2^7/250000 = 512\mu s$
- ▷ $BW = 500kHz, T_s = 2^7/500000 = 256\mu s$
- ▷ **si la bandwidth BW ↗ alors la «*durée d'un symbole*» ↘**

Par exemple pour $BW = 125kHz$
- ▷ $SF = 7, T_s = 2^7/125000 = 1,024ms$
- ▷ $SF = 9, T_s = 2^9/125000 = 4,096ms$
- ▷ $SF = 12, T_s = 2^{12}/125000 = 32,768ms$
- ▷ **si le Spreading Factor ↗ alors la «*durée d'un symbole*» ↗**

LoRa : Spreading Factor *vs* durée d'un symbole

Si le Spreading Factor **augmente de 1** alors la durée d'un symbole **double**.



Effets du Spreading Factor

- ▷ la durée d'un symbole **double** par rapport à la valeur précédente du SF ;
- ▷ le «*bit rate*», «*data rate*», est approximativement **divisé par deux** par rapport au SF précédent ;
- ▷ le «*Time on Air*», ou **temps de transmission d'un message**, ↗ et la portée ↗ ;
  Par exemple pour un message de 10 octets avec un $BW = 125kHz$:
  - ◇ $SF = 7$, temps de transmission est de $41ms$
  - ◇ $SF = 12$, temps de transmission est de $991ms$
- ▷ **Pourquoi** utiliser un **SF plus élevé** ?
  - ◇ **parce que** le signal est **faible** car le composant est **plus éloigné** de la «*gateway*»
  - ◇ **parce qu'il** y a beaucoup **d'interférence** ;

  $\Longrightarrow$ un «*ToA*» plus élevé $\Longrightarrow$ une **consommation d'énergie** ↗ et la **batterie** ↘

Et si on veut résumer
pour prendre la bonne décision ?

La portée d'une communication LoRa est fonction :
- ☐ la **bande passante** choisie,
- ☐ la **puissance de sortie** du signal
- ☐ le **facteur d'étalement de spectre** utilisé : «*Spreading Factor*» (SF).

L'étalement du signal **augmente sa portée**, au détriment :
- ▷ du **débit** car il est transmis sur une plus longue période ;
- ▷ de **l'autonomie** de l'équipement car la communication radio consomme beaucoup :

⟹*plus la communication est longue plus la consommation d'énergie est importante*.

La **bande passante** peut être choisie de 7,8KHz à 500KHz : par défaut elle est de 125KHz.
La **puissance** peut être choisie de -1 à 14dBm, voire de 5 à 23dBm.
Le **débit** dépend du CR, «*Code Rate*», c-à-d le FEC, «*Forward Error Correction*» choisi : (4/5⟹ 1 bit en plus tous les 4 bits).

Pour une bande passante de 250KHz :

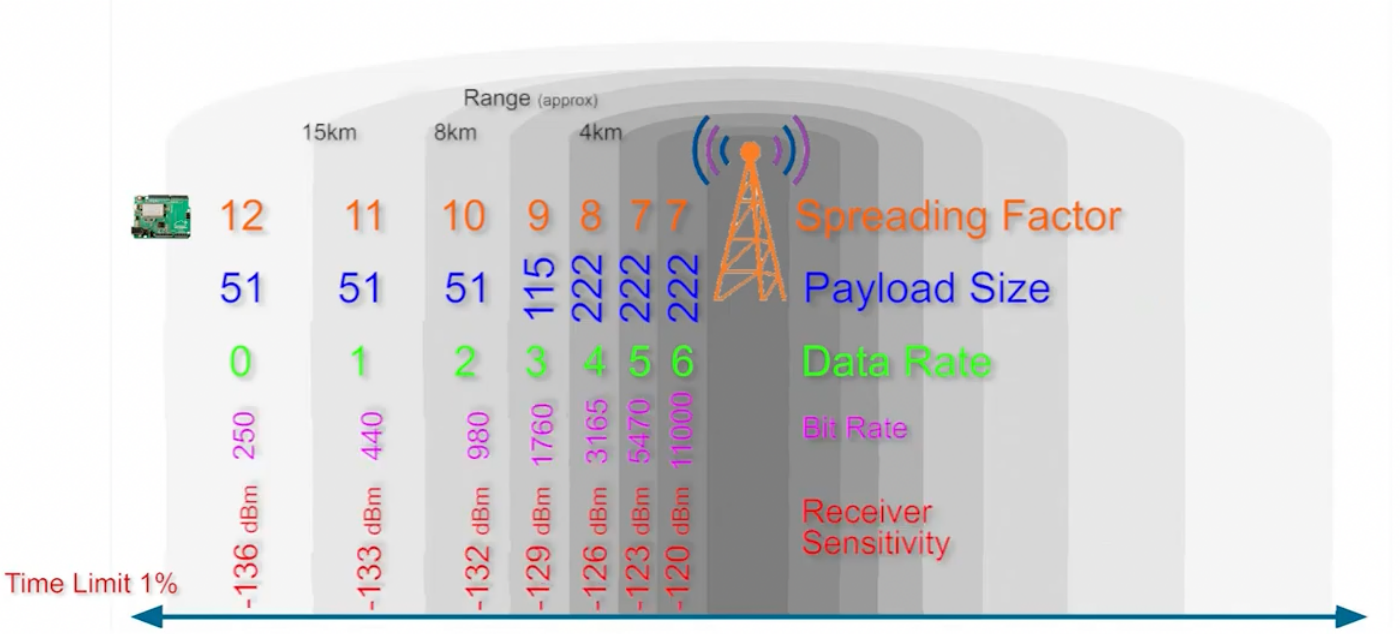
Spreading Factor	Chips/Symbol	LoRa demodulator SNR	Sensitivity
7	128	-7.5dB	-121.5dBm
8	256	-10dB	-124dBm
9	512	-12.5dB	-126.5dBm
10	1024	-15dB	-129dBm
11	2048	-17.5dB	-131.5dBm
12	4096	-20dB	-134

Pour une bande passante de 125KHz : la sensibilité est de -3dBm en plus (SF=10 ⟹ -132dBm).

Pour une bande passante de 500KHz : la sensibilité est de +3dBm en plus (SF=10 ⟹ -129dBm).

*Le **SF** doit être **connu** de l'émetteur et du récepteur (les différents SFs sont **orthogonaux** entre eux et n'entrent donc pas en interférence).*
*Le **SNR** au niveau du **récepteur** varie en fonction du **SF** : plus il est petit, plus la sensibilité est élevé et plus le «link budget» sera important.*

Paramètre d'une communication LoRa



Une affaire de compromis...

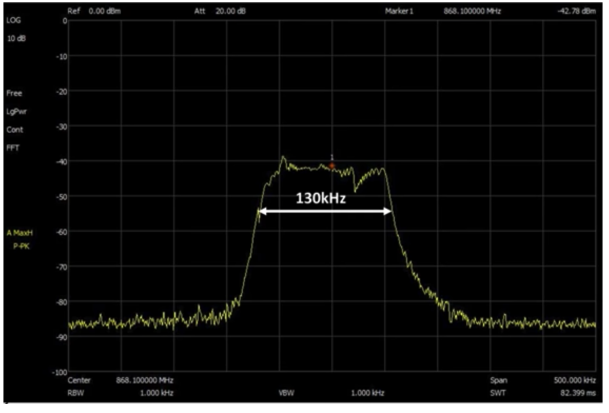
- ▷ distance ;
- ▷ durée de communication/consommation d'énergie ;
- ▷ taille des paquets ;
- ▷ débit.

LoRa : quelques conclusions

- LoRa ne transmets des données qu'avec un **faible débit** ;
- le **temps de transmission** d'un message dépend essentiellement de la taille de ce message ;
- LoRa utilise différents «*spreading factor*» qui influencent la **portée** de la transmission du signal ;
- SF7 est le plus **rapide** mais aussi le moins «sûr» quand à la fiabilité de la transmission ;
- SF12 est le plus **lent** mais offre une **meilleure portée** ;
- SF12 **consomme plus d'énergie** que SF7 à cause de la durée de transmission du message (la radio reste plus longtemps allumée) ;

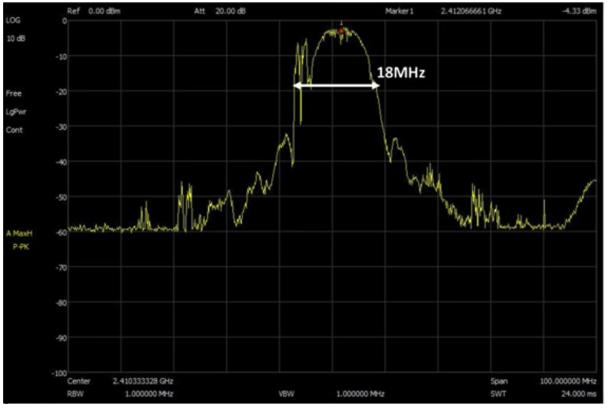
Comparaison entre WiFi et LoRa

LoRa bandwidth :



consommation de 125mA pendant la durée de transmission

WiFi bandwidth :



consommation de 380mA pendant la durée de transmission

Pour une alimentation en 3,3v du composant :

State	Power Consumption
On	2.8 mA
Transmitting data	38.9 mA
Receiving data	14.2 mA

Suivant le débit défini par le «*spreading factor*» et le «*signal bandwidth*» :

Transmit mode	Time elapsed
Send unconfirmed at 5470 bps	2.8 seconds
Send unconfirmed at 250 bps	4.2 seconds
Send confirmed at 5470 bps	1.7 seconds
Send confirmed at 250 bps	4.2 seconds

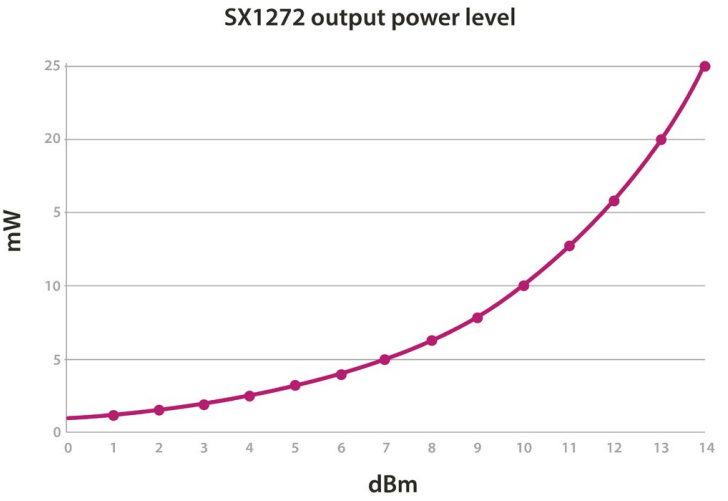
Le **temps de communication** influence directement la **consommation** : plus la consommation est **longue**, plus la consommation est **grande**.

Et en vrai, ça donne quoi ?

Choix du canal et de la puissance de transmission

Channel Number	Central frequency
CH_10_868	865.20 MHz
CH_11_868	865.50 MHz
CH_12_868	865.80 MHz
CH_13_868	866.10 MHz
CH_14_868	866.40 MHz
CH_15_868	866.70 MHz
CH_16_868	867 MHz
CH_17_868	868 MHz

Parameter	SX1272 power level
'L'	0 dBm
'H'	7 dBm
'M'	14 dBm

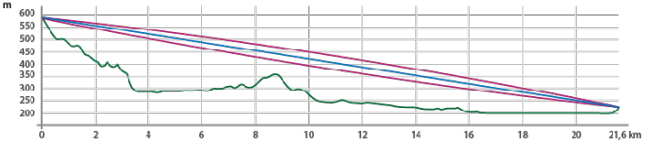




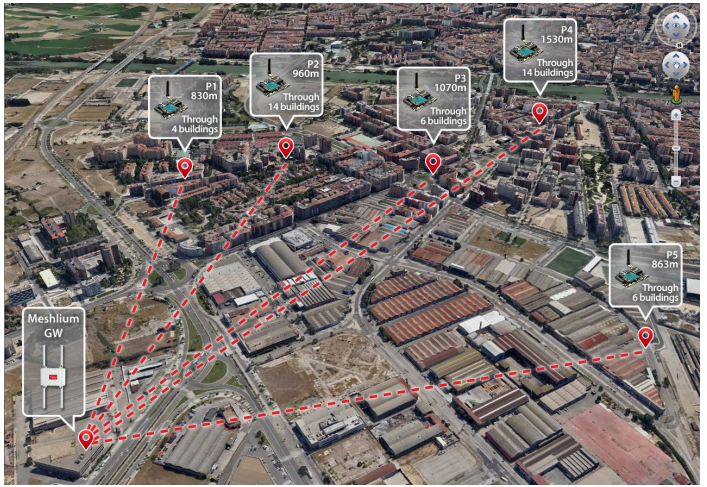
Coupe du terrain :

- ▷ la ligne bleue représente la ligne de vue ;
- ▷ l'ellipse mauve représente la zone de Fresnel ;

On notera qu'il n'y a pas d'obstacles dans la zone, ce qui minimise la FSPL, «Free-Space Path Loss».



LoRa Mode	Range	Power	Channel	Success (%)	Mean SNR (dB)	Mean RSSI (dBm)	Mean RSSI packet(dBm)	Sensitivity (dB)	Margin (dB)
Mode 1	21.6 km (13.4 miles)	High	CH_12_868	100	-9.79	-113.72	-126.79	-134	7.21
		Max		100	-4.33	-113.76	-121.76	-134	12.24
		High	CH_16_868	100	-10.06	-114.28	-127.06	-134	6.94
		Max		100	-3.20	-113.97	-120.21	-134	13.79
Mode 3	21.6 km (13.4 miles)	High	CH_12_868	95	-10.29	-114.16	-127.29	-129	1.71
		Max		95	-3.73	-114.08	-120.73	-129	8.27
Mode 6	21.6 km (13.4 miles)	High	CH_12_868	99	-14.77	-107.22	-125.77	-125.5	-0.27
		Max		100	-8.42	-106.60	-119.43	-125.5	6.07
Mode 9	21.6 km (13.4 miles)	High	CH_12_868	0	-	-	-	-117	-
		Max		49	-9.95	-107.68	-120.95	-117	-3.95



Les différents points :

1. le signal passe par 4 bâtiments : 3 élevés et un bas, avec un espace ouvert mais pas de LOS ;
2. 14 bâtiments dont un groupe résidentiel ;
3. 6 bâtiments dont des bâtiments industriels ;
4. 14 bâtiments pour le plus long chemin avec des bâtiments résidentiels et industriels et un espace ouvert ;
5. 6 bâtiments industriels et pas d'espace ouvert.

Point	Range (m)	Number of Buildings (signal going through)	Success (%)	Mean SNR (dB)	Mean RSSI (dBm)	Mean RSSI packet (dBm)	Margin (dB)
Point 1	830	4	96	-7.89	-112.95	-124.89	9,11
Point 2	960	14	92	-14.26	-111.26	-131.26	2,74
Point 3	1070	6	98	-3.22	-114.14	-120.24	13,76
Point 4	1530	14	98	-13.16	-112.24	-130.16	3,84
Point 5	863	6	100	-3.42	-113.48	-120.42	13,58

Mode	BW	CR	SF	Sensitivity (dB)	Transmission time (ms) for a 100-byte packet sent	Transmission time (ms) for a 100-byte packet sent and ACK received	Comments
1	125	4/5	12	-134	4245	5781	max range, slow data rate
2	250	4/5	12	-131	2193	3287	-
3	125	4/5	10	-129	1208	2120	-
4	500	4/5	12	-128	1167	2040	-
5	250	4/5	10	-126	674	1457	-
6	500	4/5	11	-125,5	715	1499	-
7	250	4/5	9	-123	428	1145	-
8	500	4/5	9	-120	284	970	-
9	500	4/5	8	-117	220	890	-
10	500	4/5	7	-114	186	848	min range, fast data rate, minimum battery impact

Mode	BW	CR	SF
1	125	4/5	12
2	250	4/5	12
3	125	4/5	10
4	500	4/5	12
5	250	4/5	10
6	500	4/5	11
7	250	4/5	9
8	500	4/5	9
9	500	4/5	8
10	500	4/5	7

Le choix de la «*bandwidth*» doit être fait de manière à garantir que l'émetteur et le récepteur soient à moins de 20% de la «bw» en déviation de fréquence l'un par rapport à l'autre.

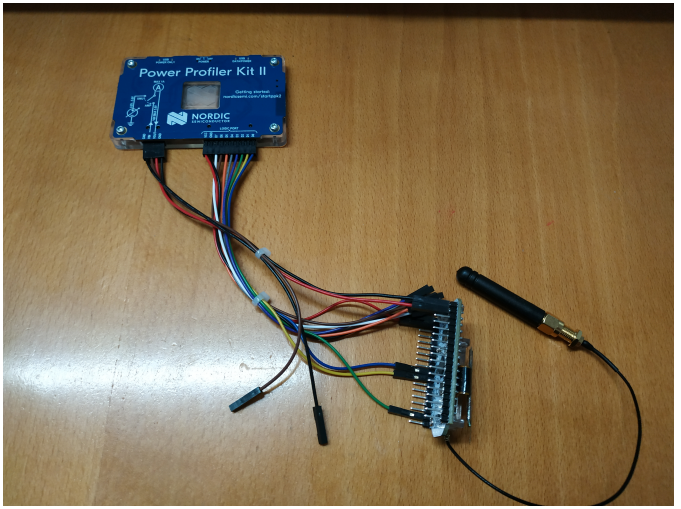
Plus petite est la «*bandwidth*» :

- ▷ meilleure est la **sensibilité** ⟹ meilleur «*link budget*» ;
- ▷ plus long est le temps de transfert d'un paquet ⟹ plus de consommation électrique et moins de longévité pour la batterie ;

Le «*coding rate*», indiqué avec x/y, indique que pour envoyer x bits de données il faut transmettre y bits : chaque «symbole» est allongé ⟹ améliore la sensibilité mais augmente le temps de transfert ;

Le «*spreading factor*», c-à-d le nombre de «chips» par symbole : plus la valeur est **grande**, plus le récepteur peut «s'éloigner» du bruit ⟹ **améliore la sensibilité** ⟹ **augmente la portée** ⟹ **augmente le temps de transfert** ⟹ **diminue la batterie**.

Le «*Power Profiler Kit II*»



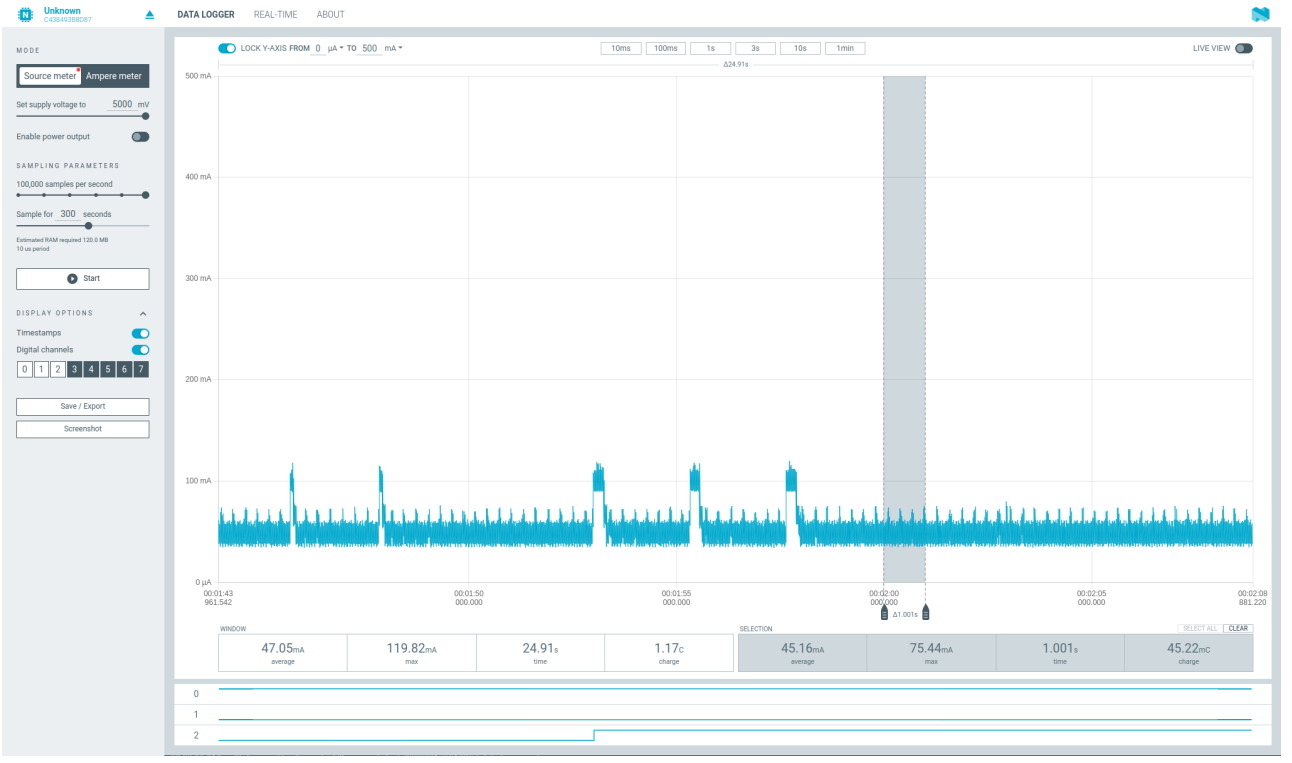
Key features

- ☐ 200nA to 1A current measurement range with a resolution that varies between 100nA and 1mA
- ☐ Source mode and ampere meter mode
- ☐ Source mode includes built-in programmable regulator with a 0.8V to 5V output range and up to 1A current supply
- ☐ 100 ksps sampling rate (10 x greater than previous generation)
- ☐ Standalone unit
- ☐ 8 digital inputs for low-end logic analyzer support

Le PPK2 :

- ▷ alimente l'ESP32 et mesure sa consommation ;
- ▷ analyse 3 broches digitales permettant de «*suivre*» l'expériementation :
  - ◇ les 3 broches digitales permettent de créer une valeur entre 0 et $2^3 - 1$;
  - ◇ chaque combinaison de paramètres LoRa est numérotées par une une de ces valeurs ;

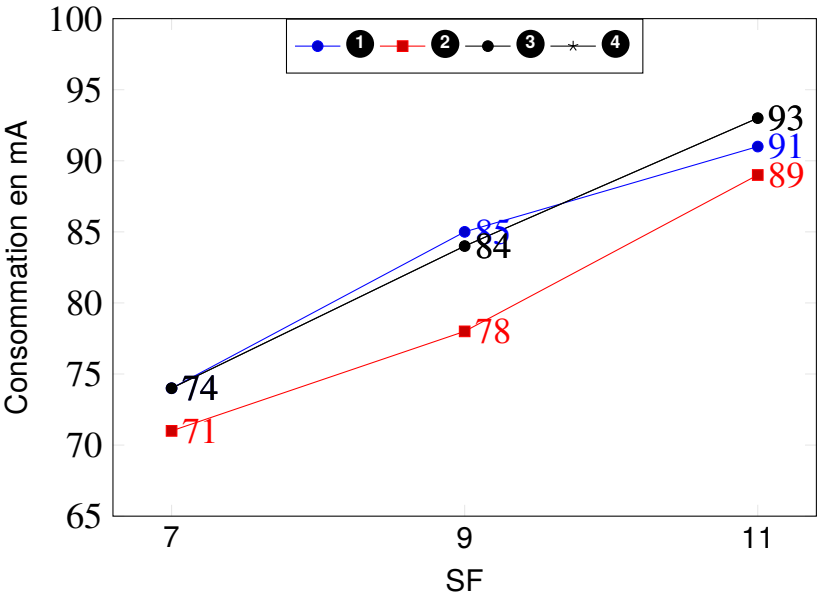
  $\Longrightarrow$ il est facile d'identifier et de suivre les mesures de consommation asociées à ces combinaisons !



On sélectionne à la souris pour obtenir une valeur de consommation :

- ▷ *Ici, on fournit 5v en entrée de la carte de développement ;*
- ▷ *mais un régulateur fournit du 3,3v vers l'eSP32 et le composant LoRa sx127x ;*
- ▷ *on dispose de la mesure en* «coulomb» *avec la conversion 1 coulomb/seconde = 1 watt/volt*

Power=0dBm⟹1mW	**BW=125kHz❶**		
	SF=7	*SF=9*	*SF=11*
	74mA	85mA	91mA
	BW=250kHz❷		
	SF=7	*SF=9*	*SF=11*
	71mA	78mA	89mA
Power=3dBm⟹2mW	**BW=125kHz❸**		
	SF=7	*SF=9*	*SF=11*
	74mA	84mA	93mA
	BW=250kHz❹		
	SF=7	*SF=9*	*SF=11*
	70mA	80mA	90mA



Ce n'est pas très concluant... Ou disons qu'il y a peu de différences...

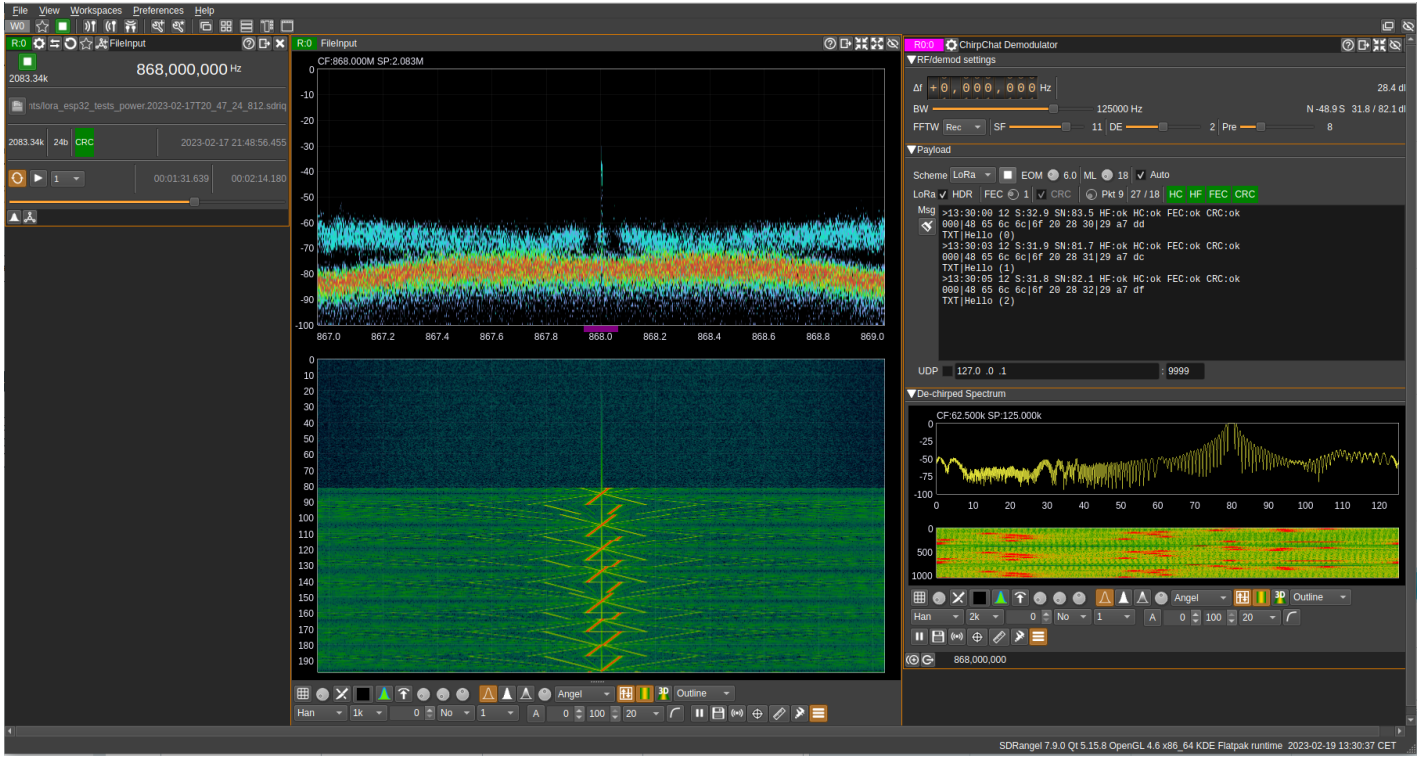
Démodulation LoRa : utilisation de la SDR «*ADALM-PLUTO*»



Features

- Based on Analog Devices AD9363–Highly Integrated RF Agile Transceiver and Xilinx® Zynq Z-7010 FPGA
- RF coverage from 325 MHz to 3.8 GHz
- Up to 20 MHz of instantaneous bandwidth
- Flexible rate, 12-bit ADC and DAC
- One transmitter and one receiver, half or full duplex
- libiio, a C, C++ and Python API
- USB 2.0 Powered Interface with Micro-USB 2.0 connector

Démodulation LoRa : le logiciel SDRangel



Le logiciel SDRangel permet de démoduler le LoRa pour un SF de 11.

Sur cette capture on voit :

- ▷ *la* «waterfall» *avec les chirps de la modulation LoRa ;*
- ▷ *la démodulation avec les messages* «`Hello (i)`».



Ici, la bande passante de modulation est de 125kHz :

- ▷ *l'énergie transmise est répartie entre les différentes fréquences de 0 à 125kHz ;*
- ▷ *on observe une mini «*waterfall*».*

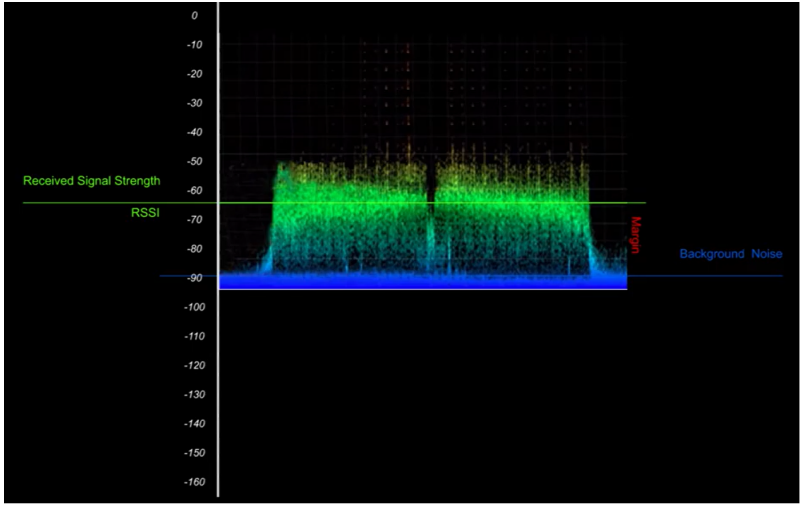
RSSI et SNR ?

RSSI, «*Received Signal Strength Indicator*»

- **mesure relative** qui permet de savoir si le signal reçu est suffisamment fort pour avoir une bonne réception depuis l'émetteur ;
- mesuré en dBm et sa valeur est négative ;
- plus le RSSI est proche de zéro plus le signal reçu est fort ↗
- influencé par : la perte en champs libre (FSPL), gain de l'antenne, pertes dues aux câbles/connecteurs, pertes dues aux obstacles.

SNR, «*Signal-to-Noise Ratio*»

Il est calculé par : SNR (dB) = Preceived_signal (dBm) - Pnoise (dBm)
On est en dB, c-à-d que $\frac{S}{N}$ *se traduit par* $S - N$ *en logarithme*.



Ici, le RSSI est de $-65dBm$ *et le niveau de bruit est de* $-90dBm$*, ce qui donne :*

SNR (dB) = -65 dBm -(-90 dBm) = 25 dB

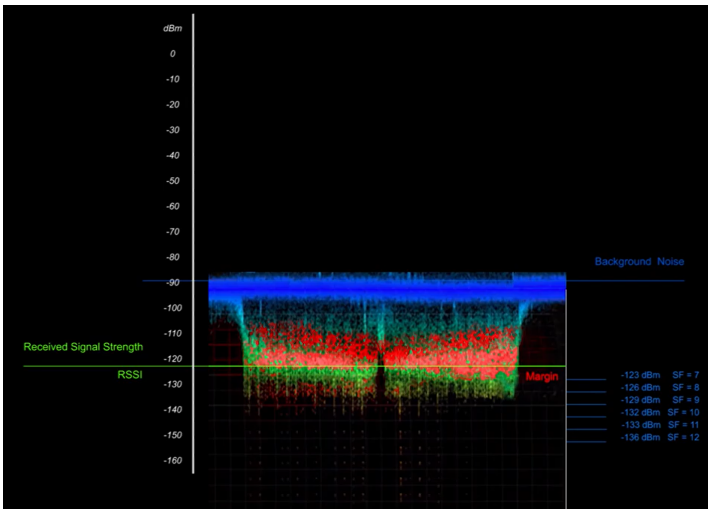
$\Longrightarrow$ *la valeur positive de 25dBm, le récepteur sera en mesure de démoduler le signal reçu.*

Si le RSSI est **en-dessous** du niveau de bruit, il est **impossible** de démoduler le signal.

Mais en LoRa, avec l'aide du SF on peut démoduler **en dessous** du niveau de bruit :

SpreadingFactor (RegModulationCfg)	Spreading Factor (Chips / symbol)	LoRa Demodulator SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

Exemple



Ici, le RSSI est de -120dBm pour un niveau de bruit de -90dBm

SNR (dB) = Preceived_signal (dBm) - Pnoise (dBm)

SNR (dB) = -120 dBm -(-90 dBm) = -30 dB

La valeur obtenur du SNR de -30dBm est en-dessous du niveau de SNR minimum du LoRa de -20dBm pour un SF=12
⟹le récepteur ne pourra pas démoduler quand même le signal reçu.