

Faculté
des Sciences
& Techniques



Université
de Limoges

Master 2^{nde} année

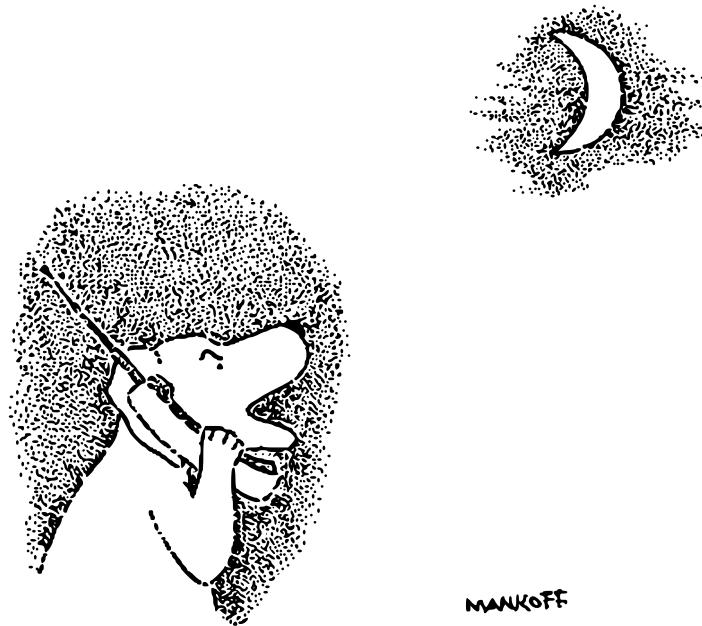


Table des matières

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	13
2	Pour transmettre de manière analogique	14
	Codage par modulation : les détails	15
	Passage d'un signal analogique à un signal numérique	19
	Les causes de dégradation d'une transmission	25
	La «bande passante» : éviter les mauvaises fréquences	27
	La capacité d'une ligne de transmission	28
3	Le partage d'accès au support : les solutions physiques	34

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.

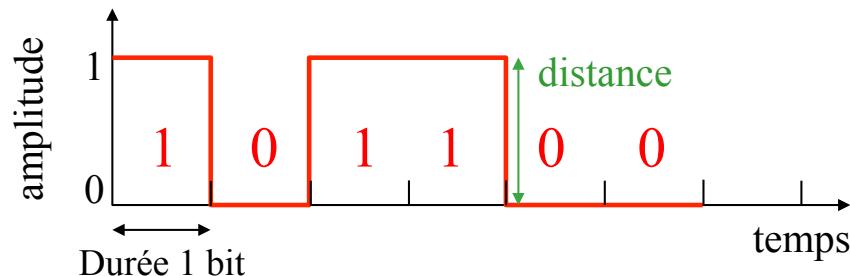
Un signal est une quantité mesurable variant au cours du temps ou dans l'espace.

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.

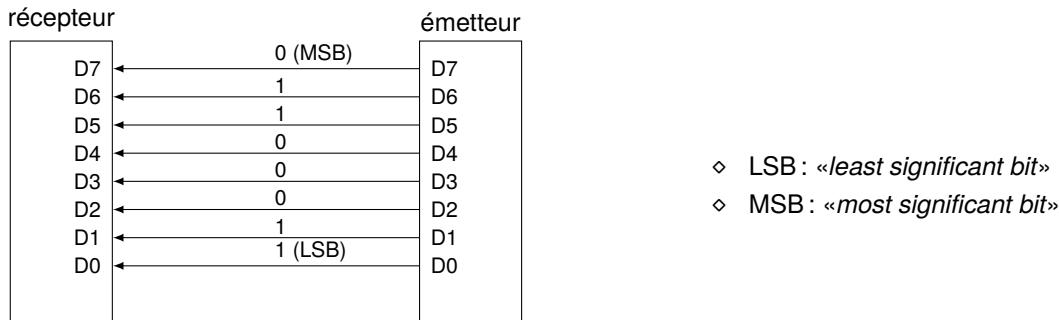
Exemple : bits codés suivant une différence de tension



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

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

Transmission parallèle



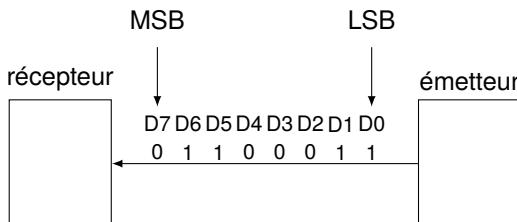
- ◊ LSB : «*least significant bit*»
- ◊ MSB : «*most significant bit*»

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 où l'émetteur les envoie.

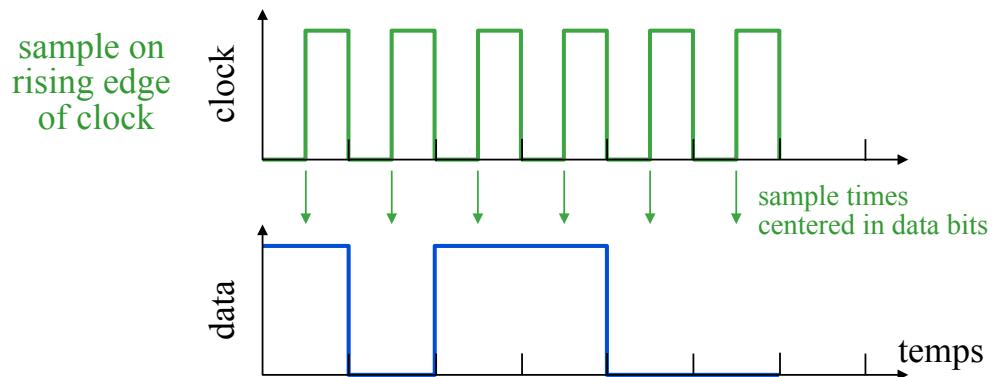
Inconvénient :

- ▷ 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

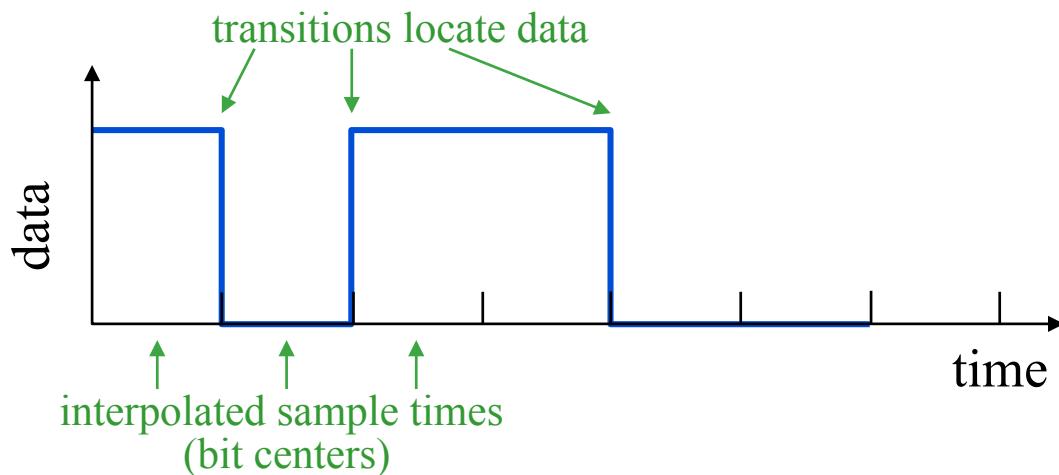


Transmission série sur un seul fil pour une liaison asynchrone

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 :



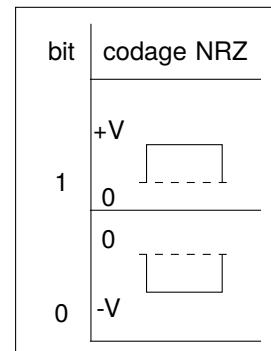
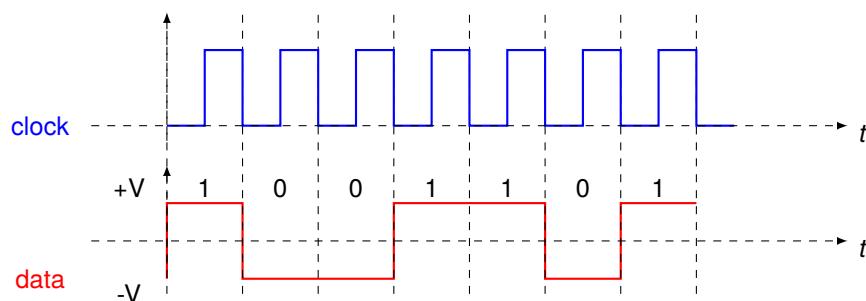
Généralisation des codages

- Chaque variation des informations transmises est faite suivant un rythme prédefinie : 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

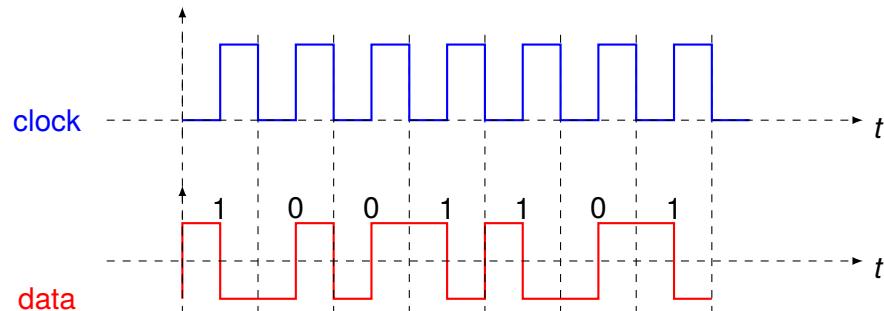


Codage Manchester

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

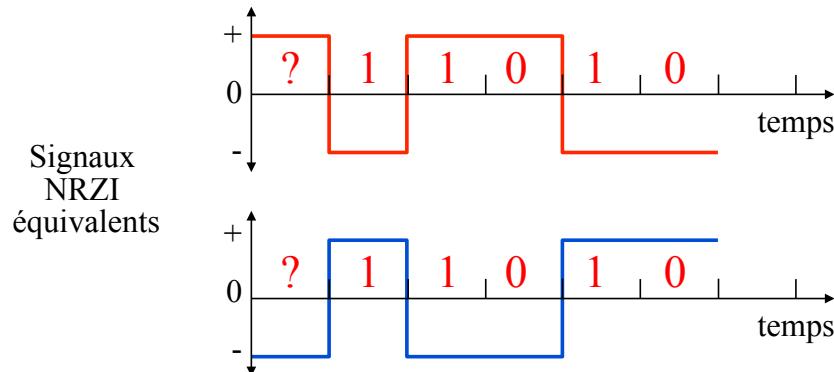
- * le non passage par zéro, rendant possible par le récepteur la détection d'un signal
- * un «spectre» occupant une large bande (le spectre correspond aux fréquences présentes dans le signal)

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.



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 :

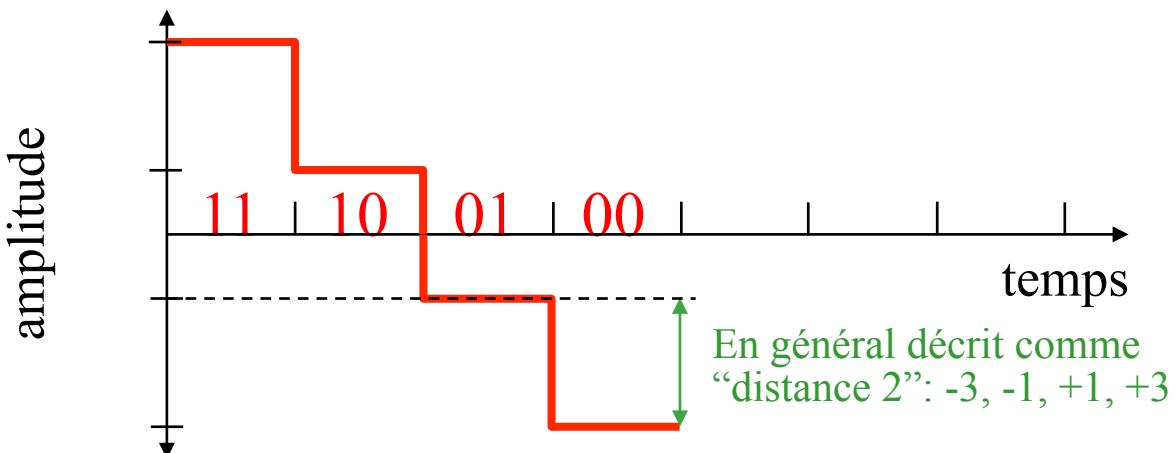
- être regroupée suivant une taille quelconque ;
- être différenciée d'une autre séquence, par la valeur de chacun de ses bits par rapport à son rang dans la séquence : 00100 est différent de 10100 ;
- être interprétée comme un **symbole**...

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

Codage à 4 niveaux : le codage 2B1Q

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

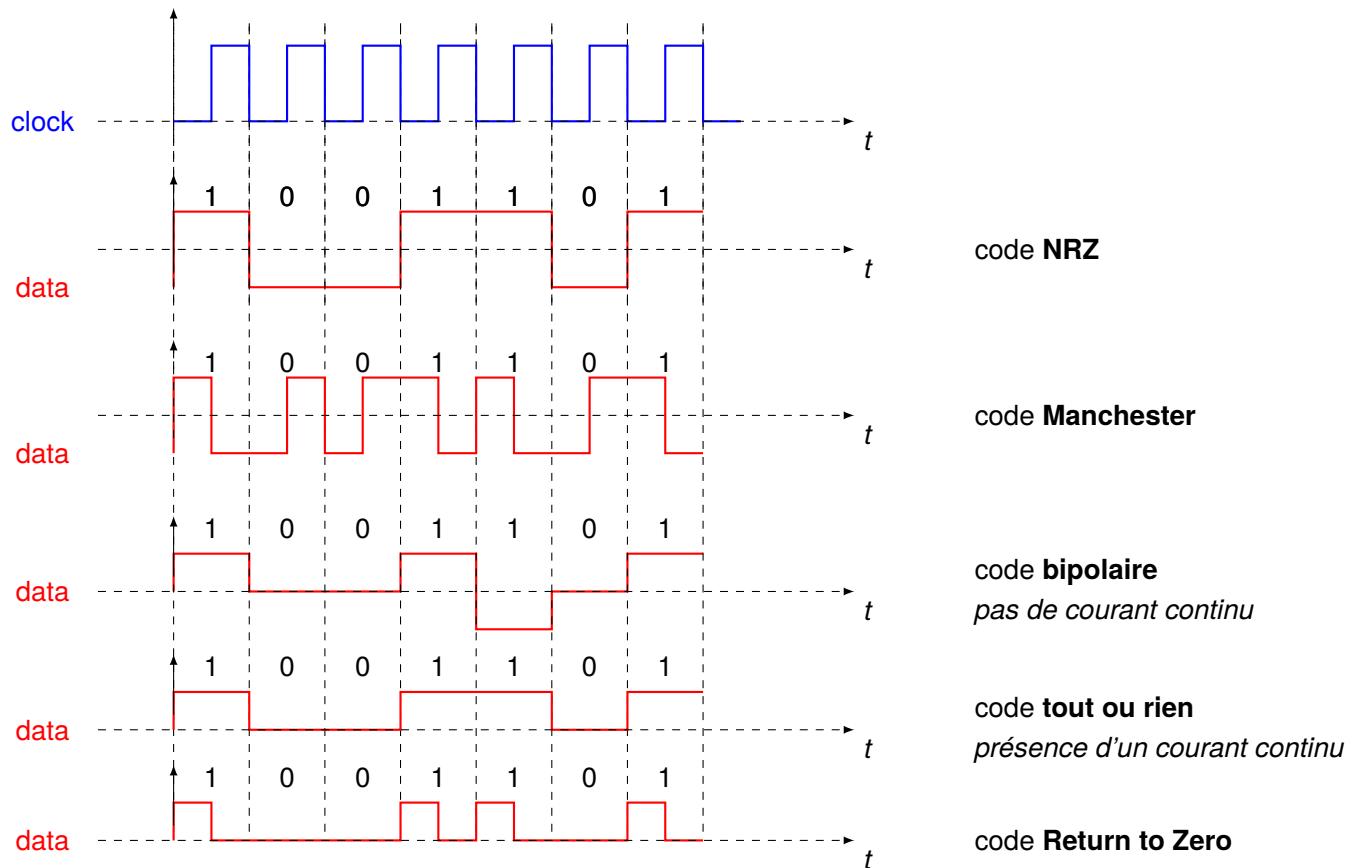
- ▷ la séquence de bits «11» donne +3 ;
- ▷ la séquence de bits «10» donne +1 ;
- ▷ la séquence de bits «01» donne -1 ;
- ▷ la séquence de bits «00» donne -3 ;



Récapitulatif de différents codages numériques

12

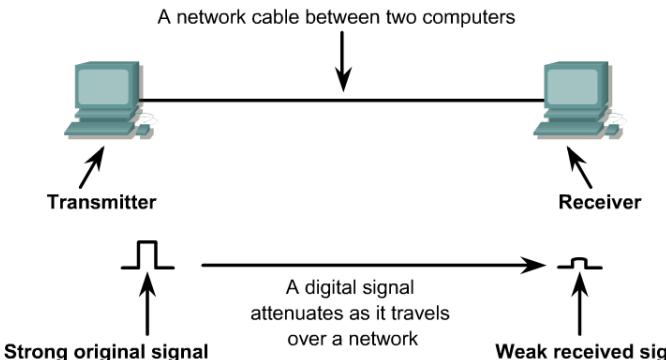
Représentation des 0 et de 1 par variation du voltage du courant



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».

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** ;

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).

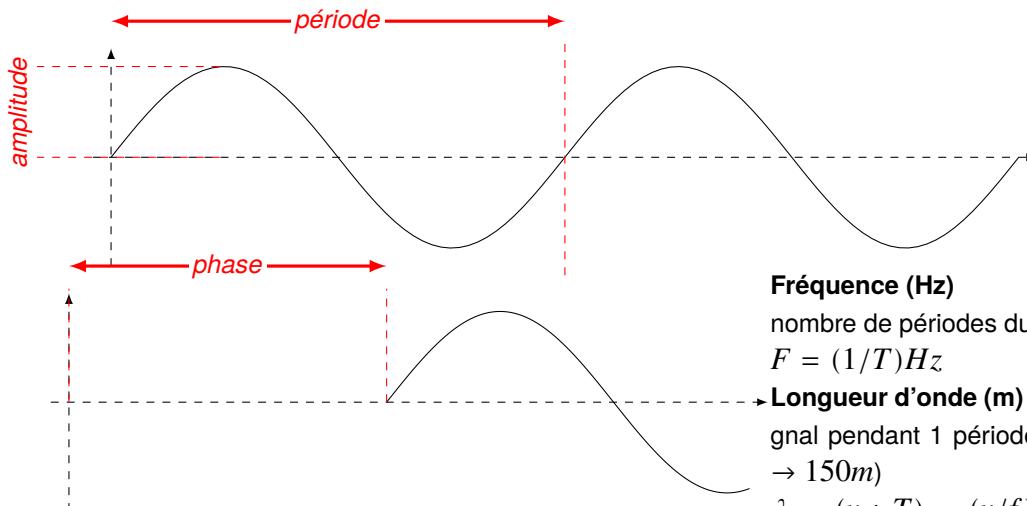
Conserver et changer

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)

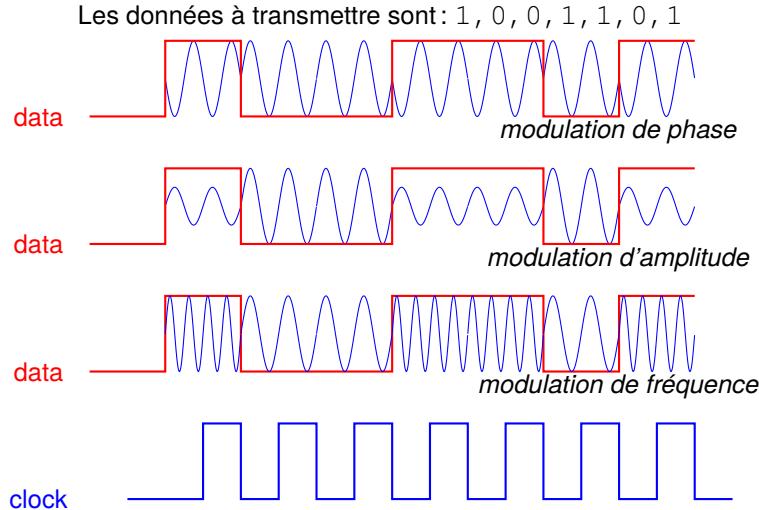
nombre de périodes du signal pendant 1 seconde

$$F = (1/T) \text{ Hz}$$

→ **Longueur d'onde (m)** distance parcourue par le signal pendant 1 période ($1\text{MHz} \rightarrow 300\text{m}$, $2\text{MHz} \rightarrow 150\text{m}$)

$$\lambda = (\nu * T) = (\nu/f) \text{ mètre avec } \nu, \text{ la vitesse de déplacement du signal.}$$

- 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

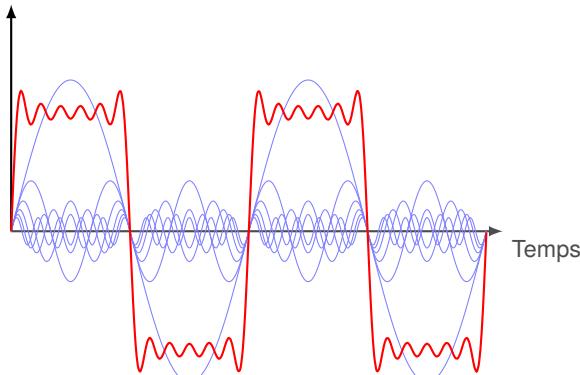
La **variation du paramètre** amplitude, phase ou fréquence peut être faite de manière :

- ▷ **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

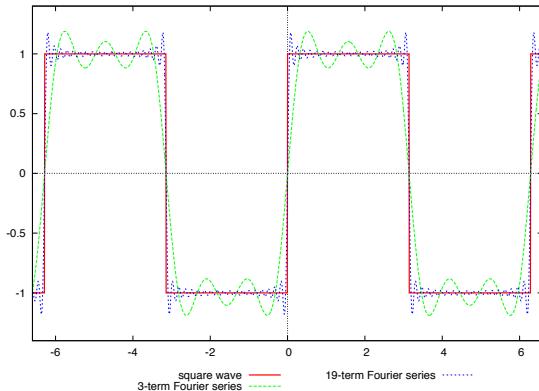
Approximation d'un signal de forme «carré»

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

Amplitude

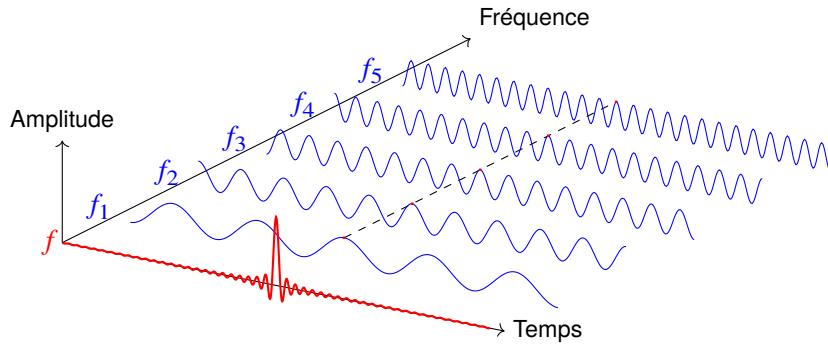


Plus on augmente le nombre de termes de la série, meilleure est l'approximation :



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

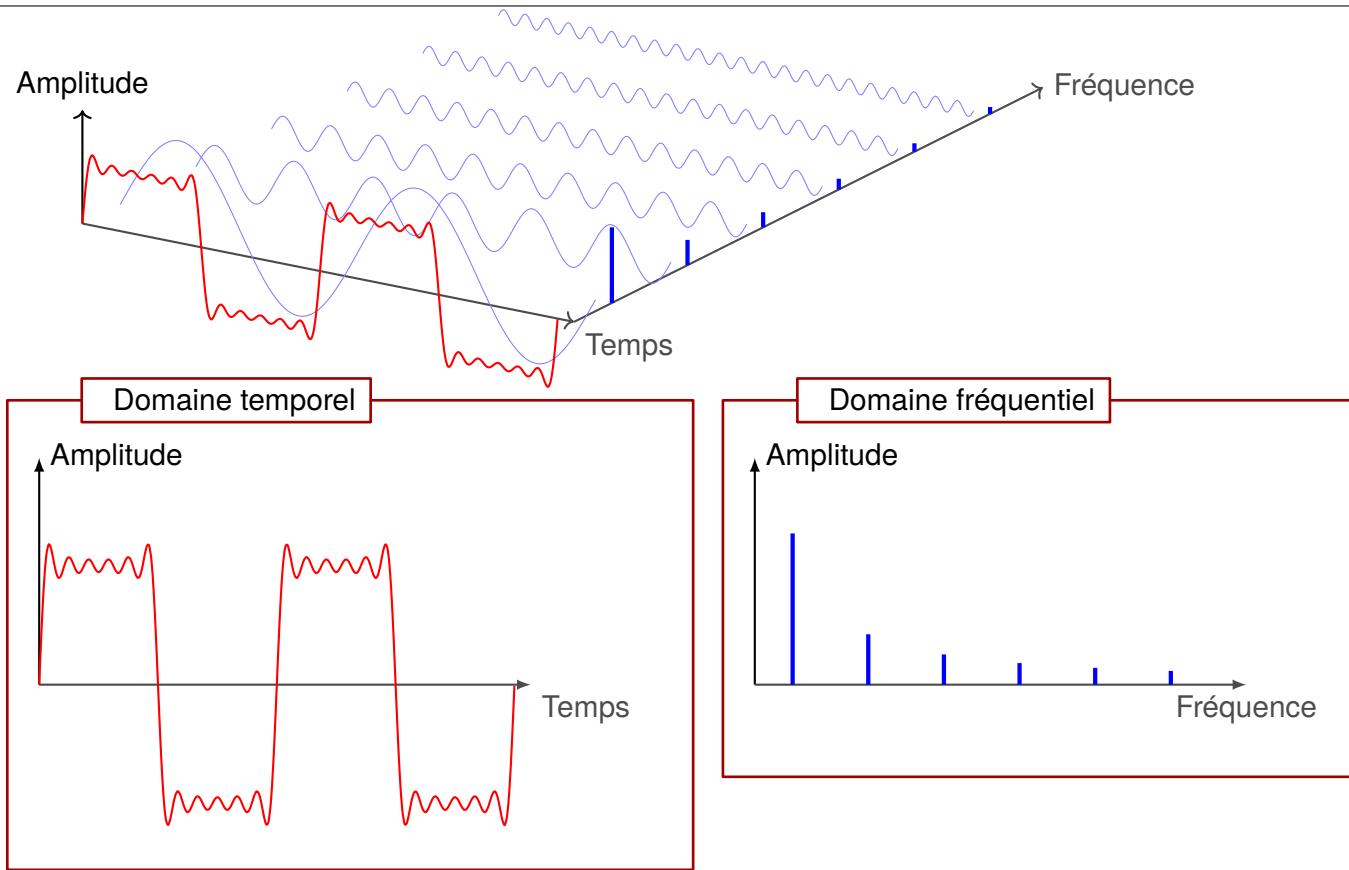
Autre exemple



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

Domaine temporel vs Domaine fréquentiel

18



Numérisation

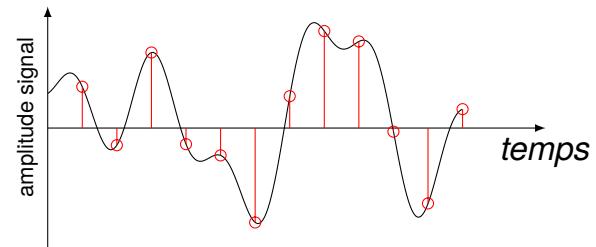
Pour pouvoir être traité dans un ordinateur, un signal analogique doit être **numériser**.

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

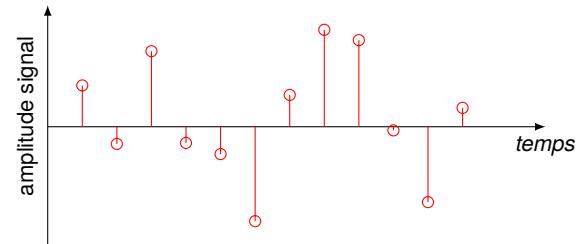
Échantillonnage

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

Le signal analogique :



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

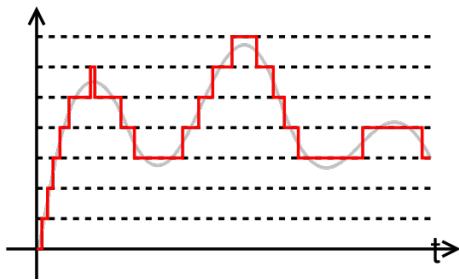
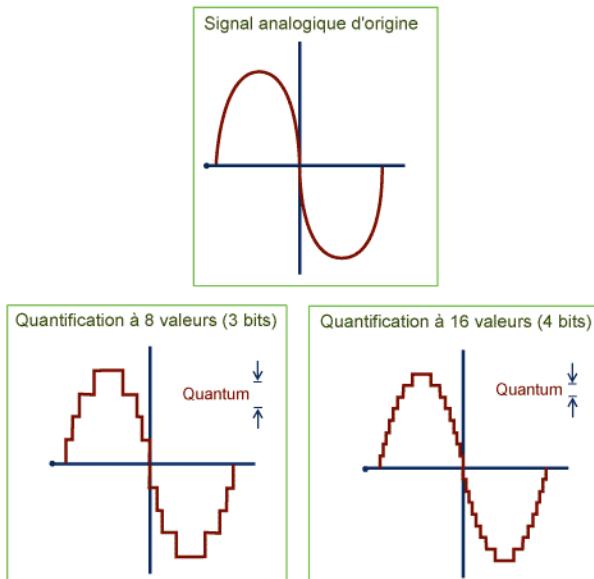


Quantification

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 : $\{-10, 0, 10, 20\}$).

Principe de la quantification

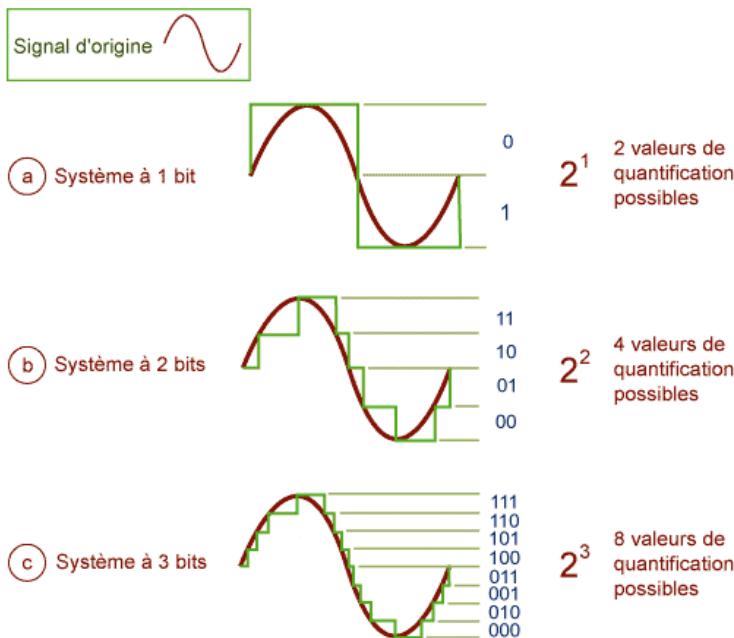


On associe pour chaque valeur du signal continu la valeur quantifiée la plus proche (il y a une perte de précision).

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.

Valeurs de quantification



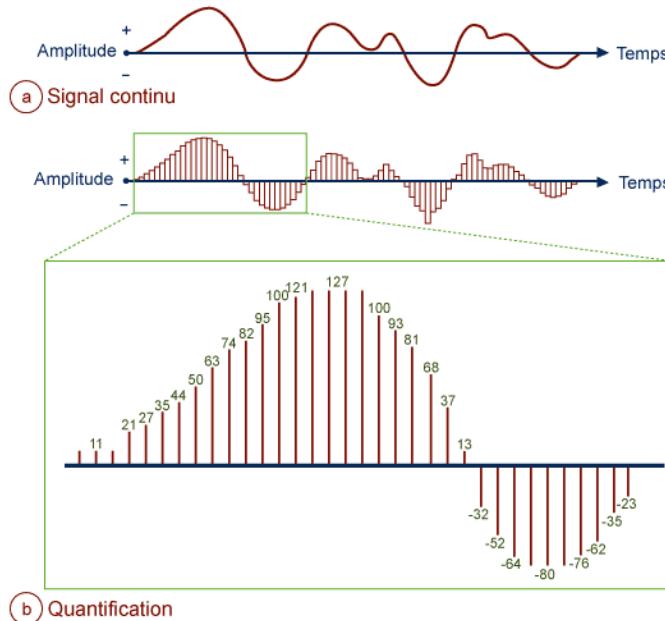
Ce nombre de valeurs est choisi comme une puissance de 2 (par exemple $2^8 = 256$ valeurs possibles).

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).

Échantillonnage et quantification



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'échantillonage :

freq_échantillonnage

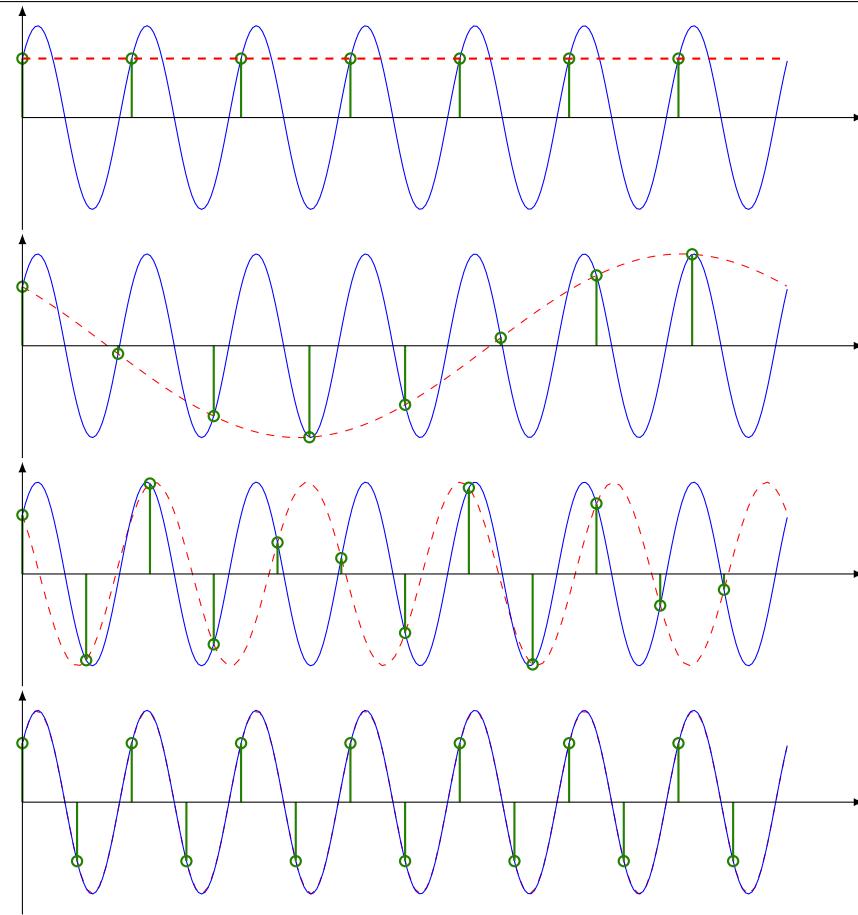
$$> 2 * freq_{maximale_analogique}$$

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

Numérisation : Pourquoi 2*féquence ?

23

Réseau non filaire – P-FB



$$\underline{f_s} = 7 \text{ Hz}$$

$$\underline{f_{\text{éch}}} = 7 \text{ Hz}$$

la fréquence du signal reconstruit est nulle

$$\underline{f_s} = 7 \text{ Hz}$$

$$\underline{f_{\text{éch}}} = 8 \text{ Hz}$$

$$\underline{f_s} = 7 \text{ Hz}$$

$$\underline{f_{\text{éch}}} = 12 \text{ Hz}$$

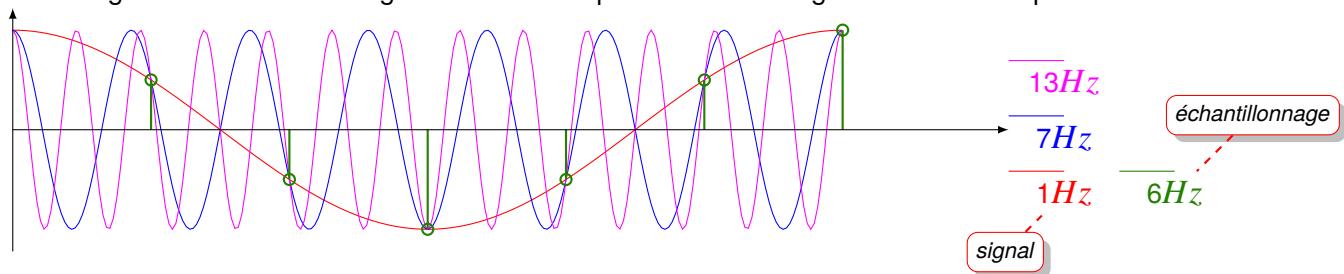
$$\underline{f_s} = 7 \text{ Hz}$$

$$\underline{f_{\text{éch}}} = 14 \text{ Hz}$$

le signal est reconstruit

L'aliasing

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

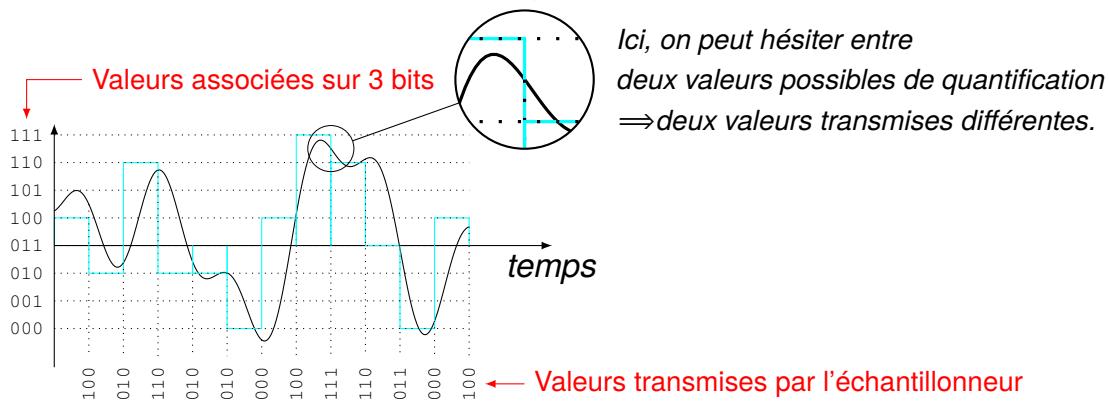


On dit que la fonction originale possède des «alias» :

alias : fréquence_originale + $n * \text{fréquence_échantillonnage}$

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

Erreurs dues à la faiblesse de niveaux de quantifications



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.

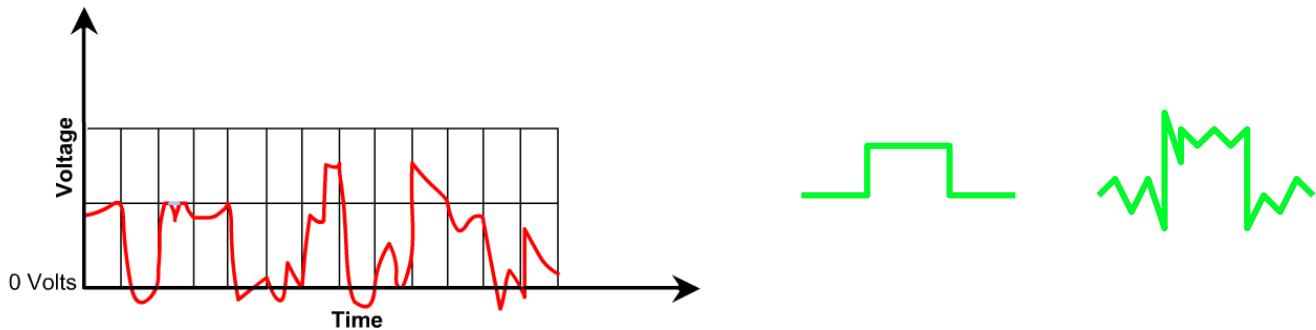
Deux types de bruit :

- * 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 \Rightarrow *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 :

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

*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

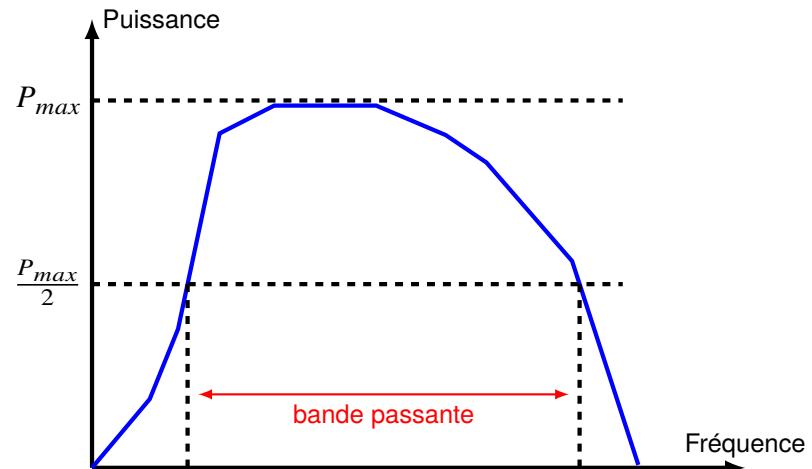
Elle désigne la **différence**, en Hz, entre la plus haute et la plus basse des **fréquences utilisables** sur un support de transmission.

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**.

Bandé 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.

⇒ 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 :

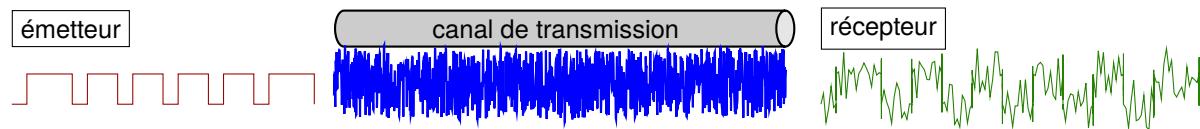
$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

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

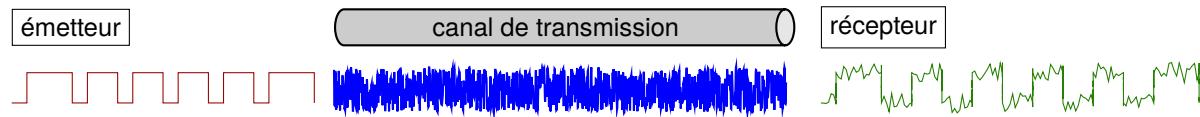
La transmission d'un signal est perturbée par la présence de **bruit**.

Un **bruit inhérent** 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 :

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

où W est la **bande passante**.

Le décibel ou dB

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

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 :

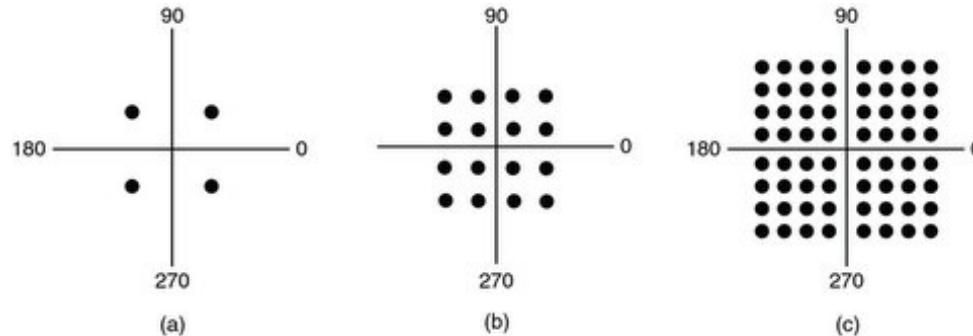
- ▷ $+16dB \Rightarrow +10 + 3 + 3 \Rightarrow *10 * 2 * 2 = *40$, c-à-d la valeur est multipliée par 40 !

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.

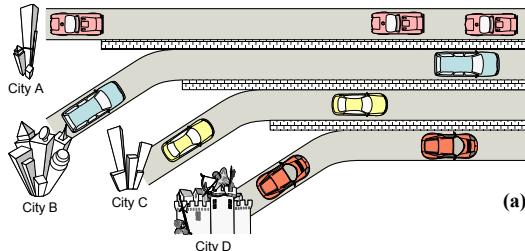
Pour passer au nombre de bits que l'on peut transmettre, on calcule 2^n = nombres de symboles (où n est le nombre de bits).

Et le partage d'accès au lien de communication ?

Le multiplexage : partager la capacité du lien entre plusieurs communications

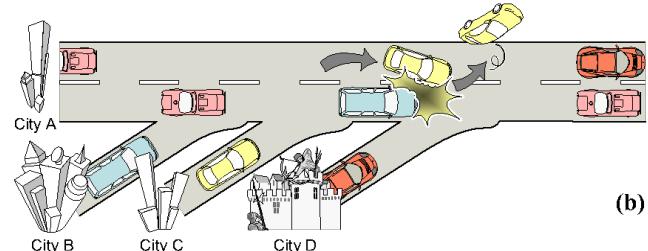
TDM, «*Time Division Multiplexing*»

FDM, «*Frequency Division Multiplexing*» :



(a)

«*Statistical Multiplexing*»



(b)

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 ;

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*

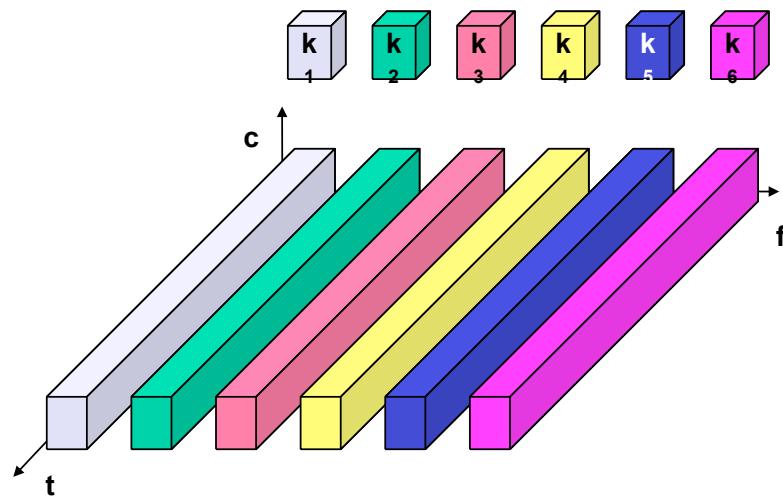
- Chaque équipement va utiliser une fréquence différente ;
- Les domaines couramment utilisés pour fournir les accès suivants :
 - ◊ Chaque canal de communication se voit affecté une bande de fréquence ;
 - ◊ C'est le cas de : la radio, de la télé, des systèmes cellulaires (WiFi, GSM de 1^{ère} génération, 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

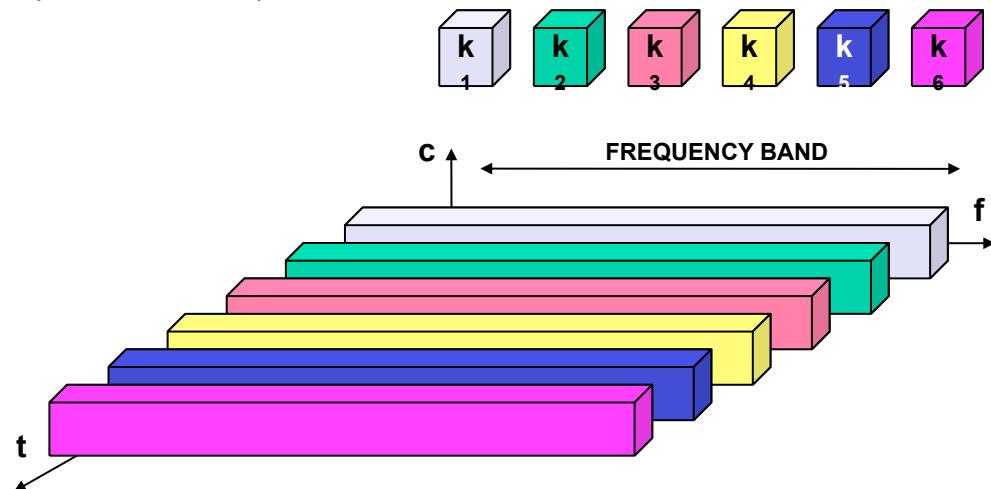
Tous les équipements utilisent la même fréquence, mais pas au même moment.

Avantages

- Il est 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 !



Allocation statique : combinaison de TDMA et FDMA

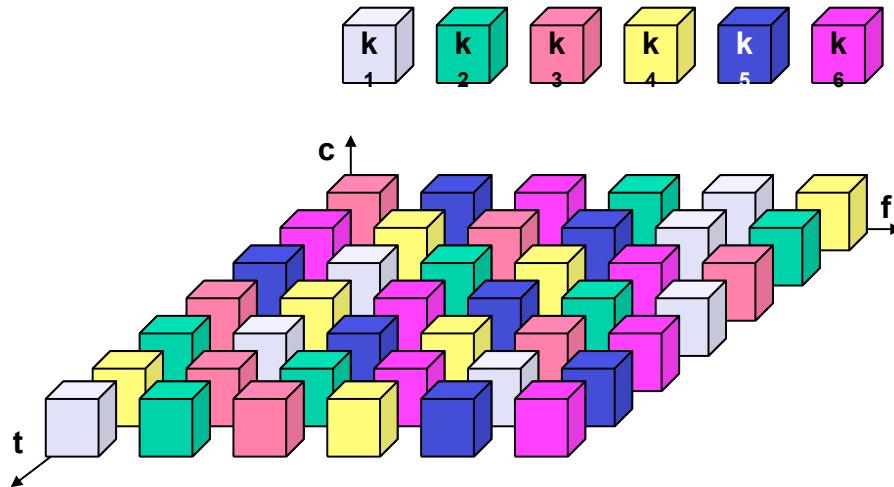
Chaque canal obtient une certaine fréquence pour un certain temps (exemple : le GSM).

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 fréquence, au même moment, mais pas de la même façon ! *Suivant des «codes».*

- chaque canal utilise un «code» unique ;
- tous les canaux utilisent le même spectre de fréquences au même moment mais avec des codes orthogonaux (c-à-d sans corrélation).

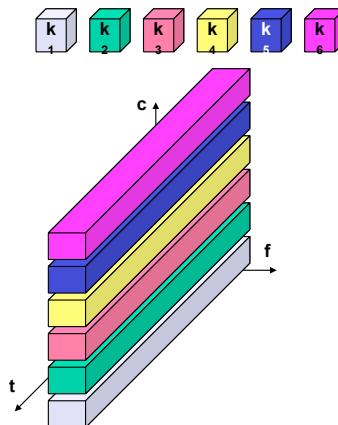
Avantages

- bonne utilisation de la bande passante (l'espace de code est grand) ;
- il n'y a pas de coordination ou de synchronisation entre les différents canaux ;
- une meilleure résistance aux écoutes et aux interférences ;
- plus de capacité que le TDMA, et moins de consommation.

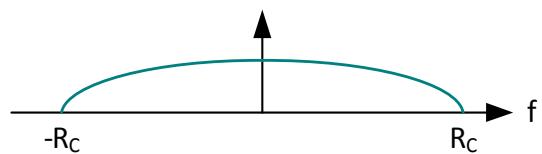
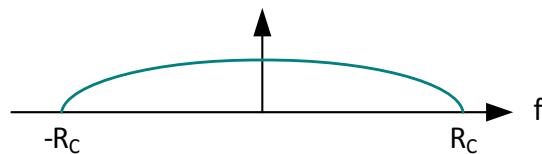
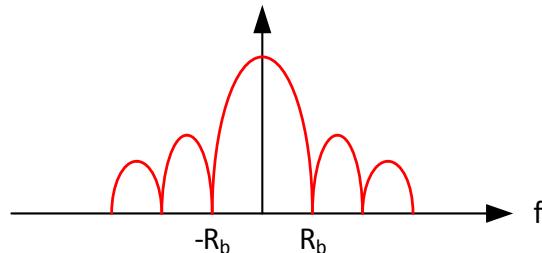
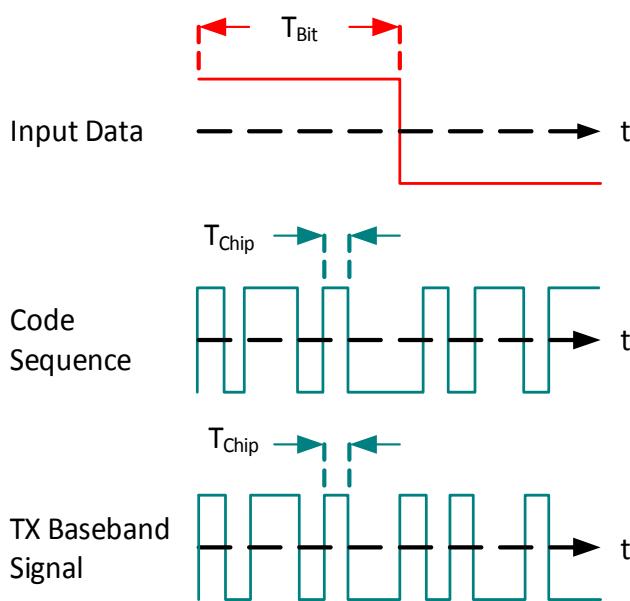
Inconvénients

la recomposition du signal est plus difficile et complexe.

Elle est utilisée la technique «d'étalement de spectre» : répartir la communication sur toutes les fréquences, au lieu de quelques unes.

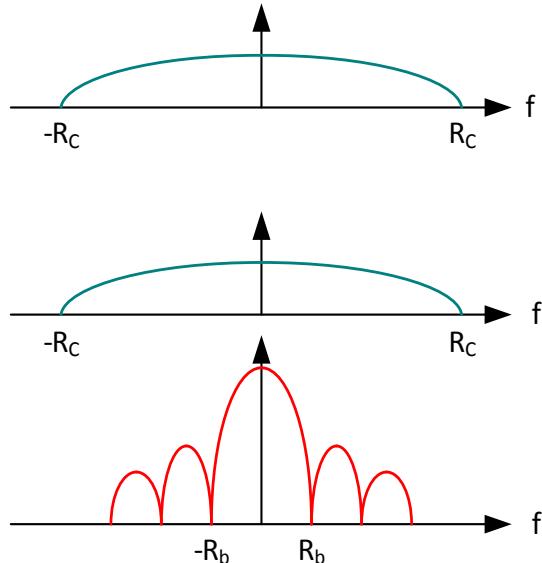
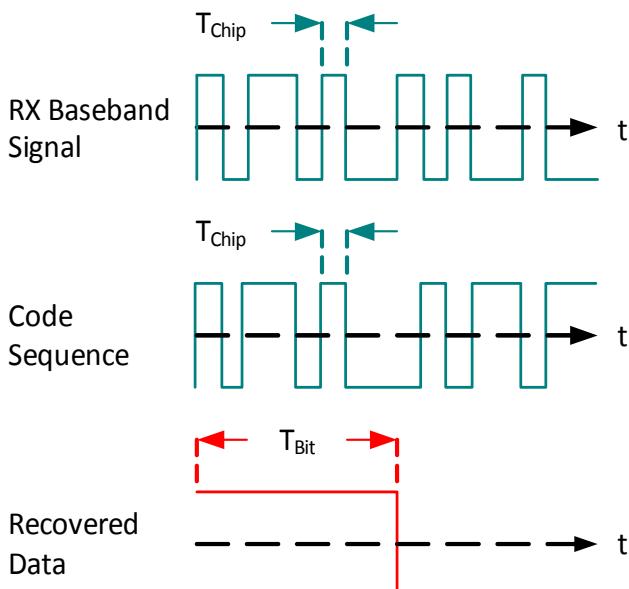


Modulation / Spreading



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

Demodulation / De-spreading



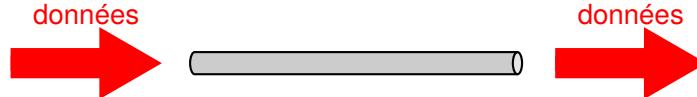
Le «signal binaire» est «démodulé» par la même séquence binaire utilisée lors de la modulation (à la manière d'un «xor»).

Et pour les transmissions sans fil ?

Plan

- Transmission de l'information par onde électromagnétique ;
- Réception radio et traitement du signal ;
- Introduction du «*Link Budget*» ;
- 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 :



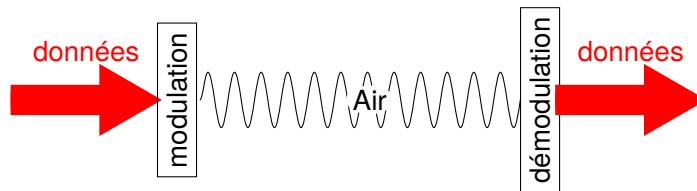
L'air ne conduit pas l'électricité...

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



Les données doivent être :

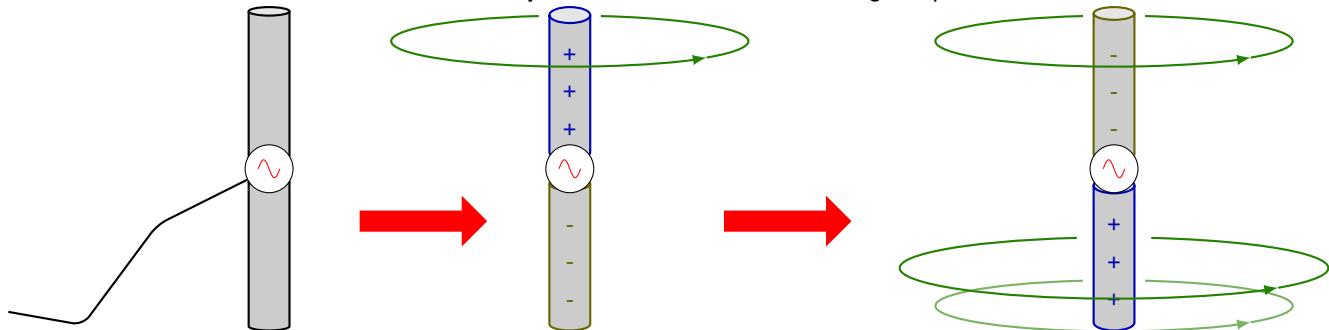
- ▷ «portées» par l'onde électromagnétique ⇒ «modulation»
- ▷ récupérées lors de leur réception ⇒ «démodulation»



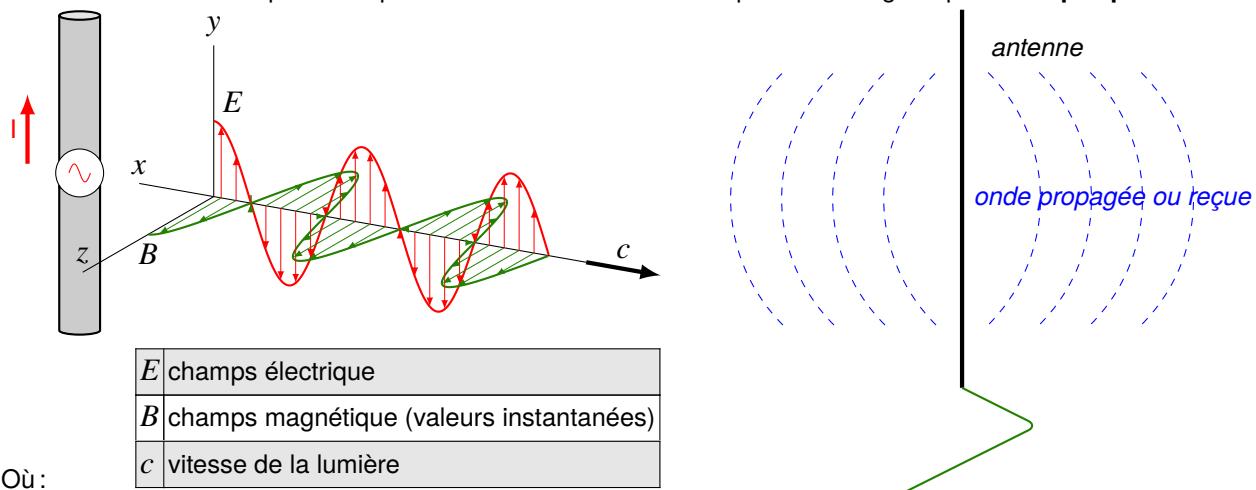
Champs électrique vs Champs magnétique

43

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

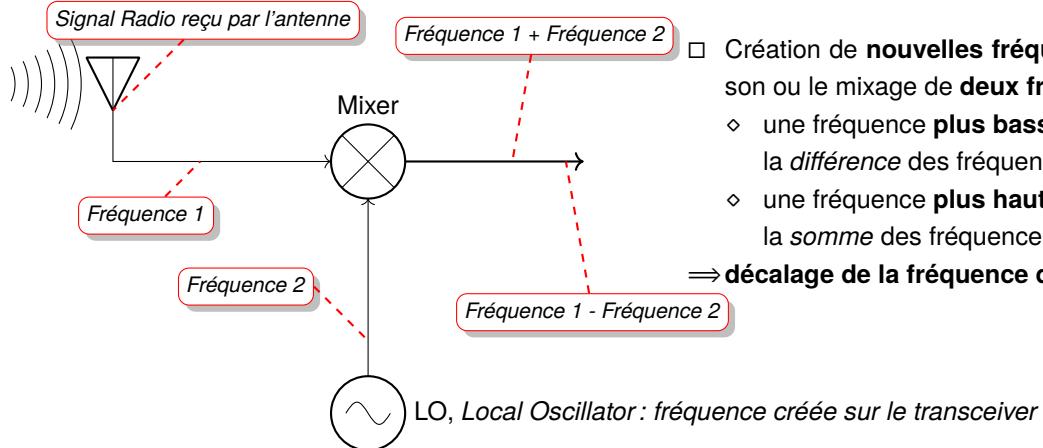


Cette variation de champs électrique induit la variation d'un champs électromagnétique et **réciproquement**:



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'électrique, etc) ⇒ ce sera la **fréquence support** ou «portuese» 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**.

▷ **Transmission :**

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

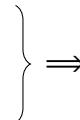
⇒ «*Frequency Division Multiplexing*»

▷ **Réception :**

- ◊ démoduler le signal désiré ⇒ 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 ;

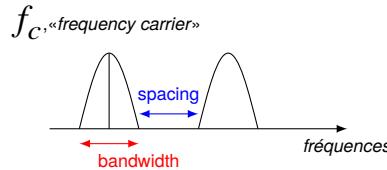


	bandwidth
Voix/discours	4kHz
Musique de bonne qualité	15kHz

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

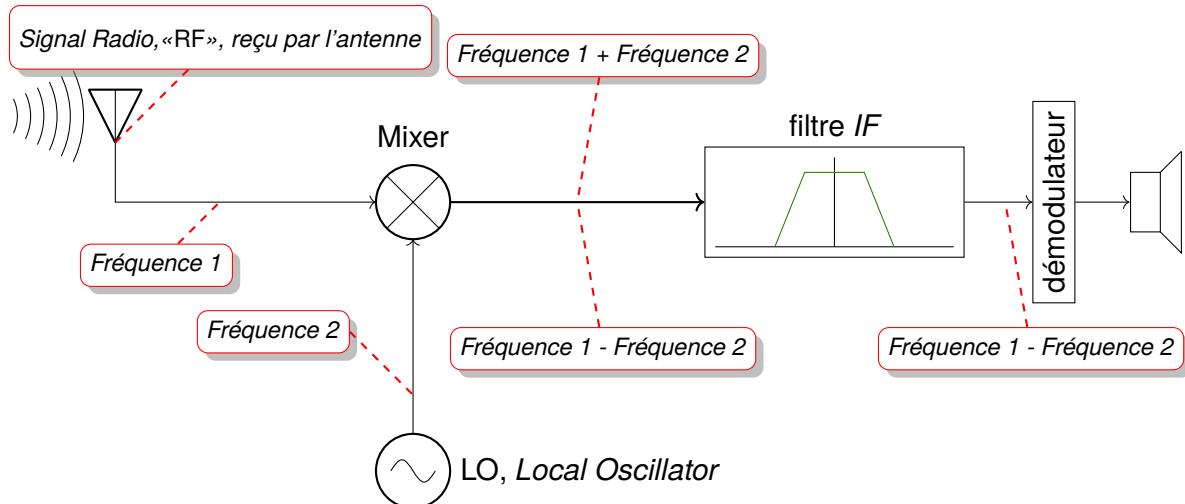
AM baseband	5kHz
FM baseband	15kHz

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



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

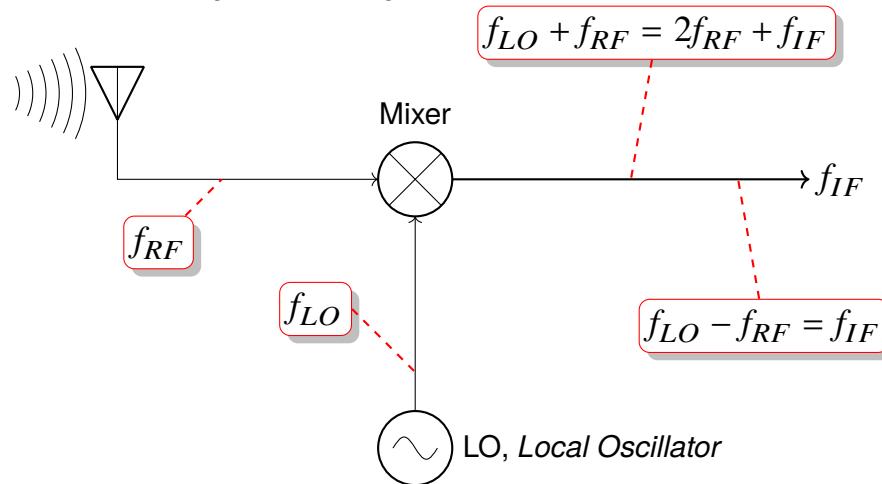
Réception radio et traitement du signal : le récepteur «Super Heterodyne»⁴⁶



- 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 :
 $\Rightarrow f_{LO} = f_{RF} + f_{IF}$

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 :

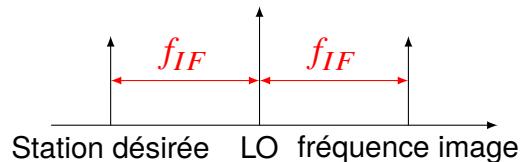
▷ $f_S - f_{LO} = (f_{LO} + f_{IF}) - f_{LO} = f_{IF}$

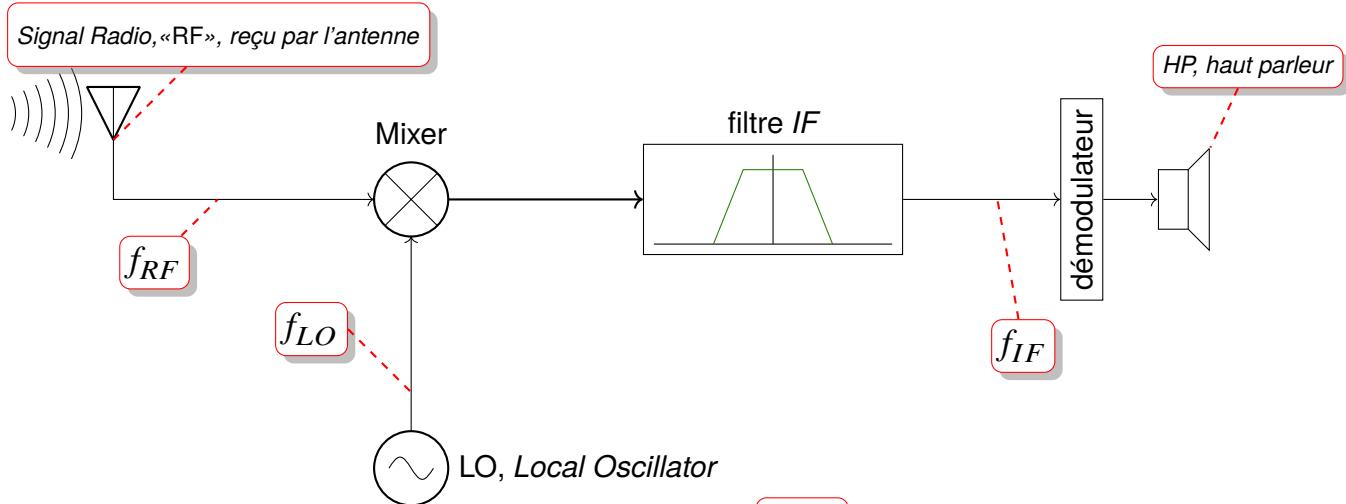
f_S est appelée «fréquence image» : $f_i = f_{LO} + f_{IF} = f_{RF} + 2f_{IF}$

⇒ **Deux fréquences en entrée**

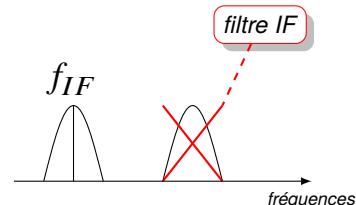
donnent la même fréquence en sortie !

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





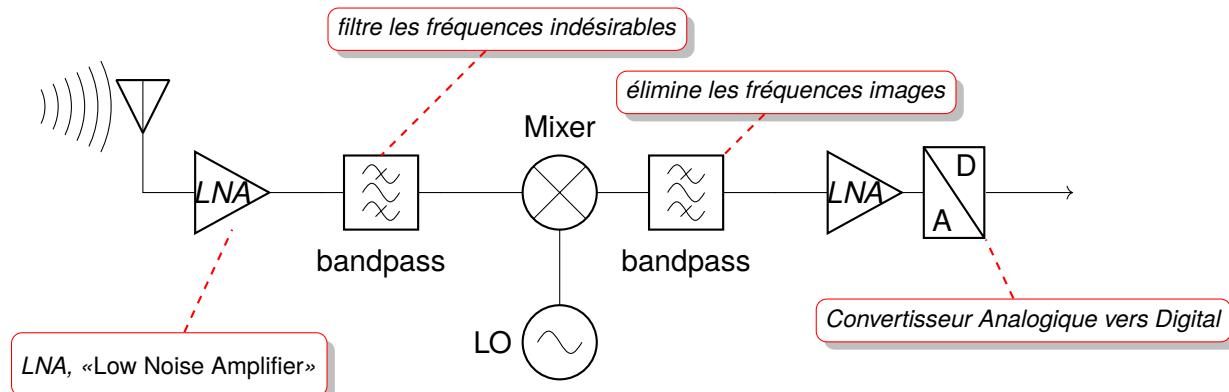
- Suppression de la fréquence image :



- Démodulation adaptée :

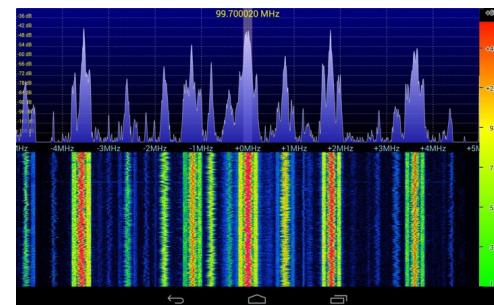
- ◊ AM : $f_{IF} = 455\text{kHz}$, filtre réducteur de bande à 10kHz, puis détecteur d'enveloppe ;
- ◊ FM : $f_{IF} = 10,7\text{MHz}$, filtre réducteur de bande à 150kHz (les fréquences varient de $\pm 75\text{kHz}$), puis discriminateur de fréquence.

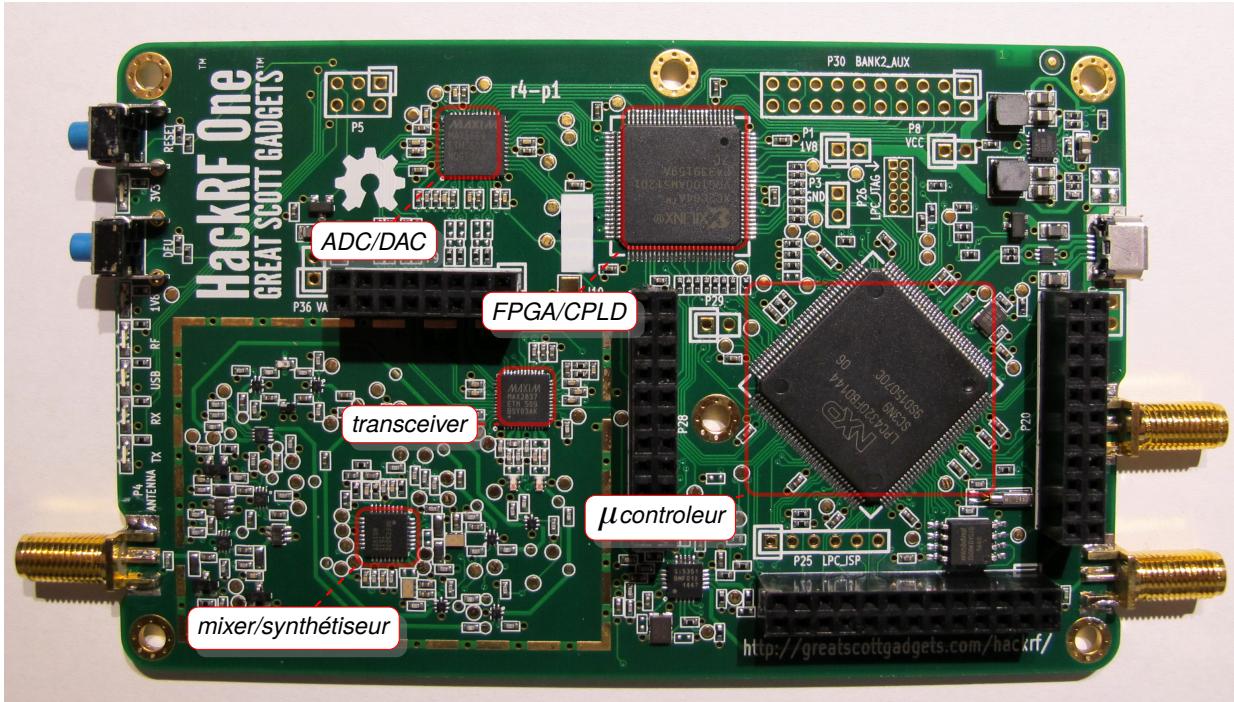
- sortie audio finale.



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

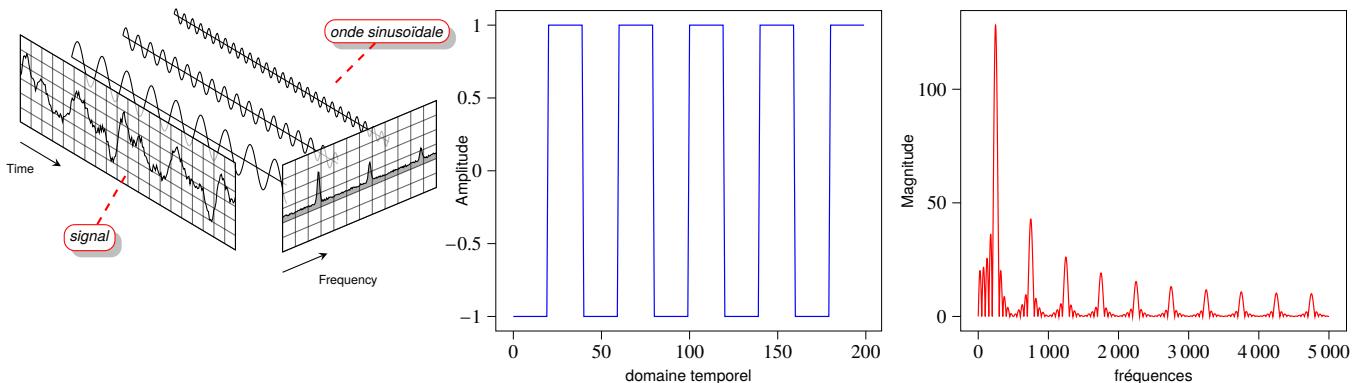
- ▷ recevoir **simultanément** plusieurs signaux contenus dans cette bande passante, comme par exemple, recevoir plusieurs stations de radios FM !
- ▷ afficher en temps réel un **spectre de fréquence** et le suivre au cours du temps :
- ▷ utiliser des algorithmes de traitement numérique comme la FFT,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





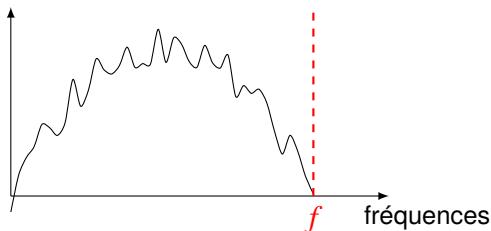
- RF frontend:
 - ◊ Synthesizer/Mixer : 30MHz-6GHz ;
 - ◊ LowPass Filter : 30MHz-2.3GHz ;
 - ◊ ByPass Filter : 2.3GHz-2.7GHz ;
 - ◊ HighPass Filter : 2.7GHz-6GHz ;
- Baseband/IF :
 - ◊ 2.3GHz-2.7Ghz ;
 - ◊ ADC/DAC : 0-22MHz ;

Domaine temporel vs domaine fréquentiel



Remarques : Un changement rapide dans le domaine temporel \Rightarrow 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 :

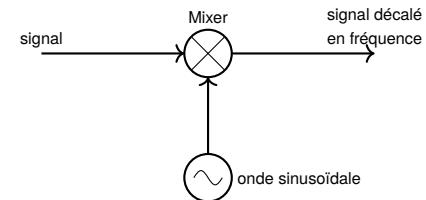
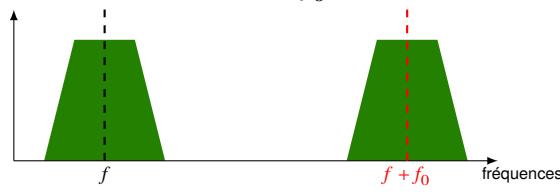
$$f_s > 2B$$

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

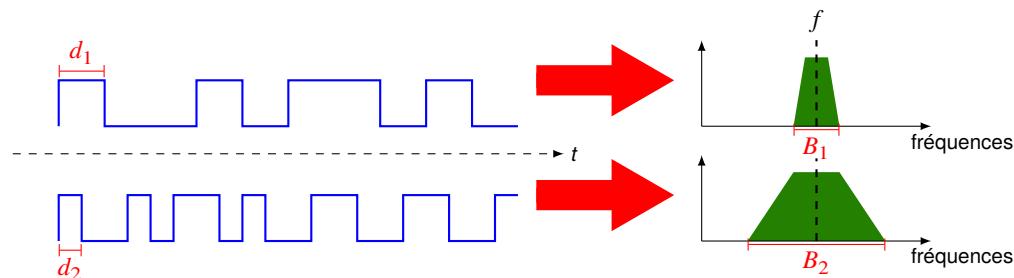
Pour éviter l'**aliasing** on filtre les fréquences supérieures à $f_s/2$

Domaine temporel transformée de Fourier Domaine fréquentiel

- Propriétés :**
- **Linéarité**: la somme de deux signaux dans le domaine temporel \Rightarrow 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 , \Rightarrow la **bande passante** B_1 utilisée **augmente** vers une **bande passante plus grande** B_2 (variation inverse).

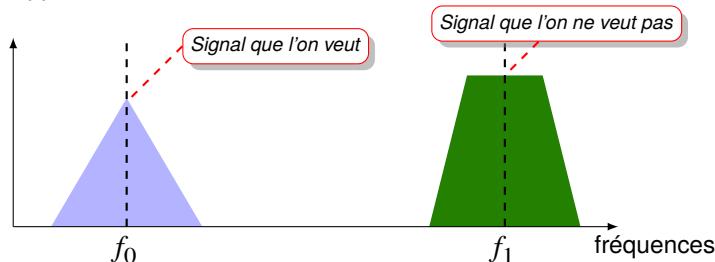


- ▷ **Plus le débit augmente, plus la bande passante utilisée augmente !**
- ▷ La bande passante est **limitée par contrainte légale**: on ne peut pas déborder de la bande passante autorisée.
- ▷ **Le débit maximale utilisable est borné.**

- **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 \Rightarrow **mélange** ou **moyenne pondérée** des deux.

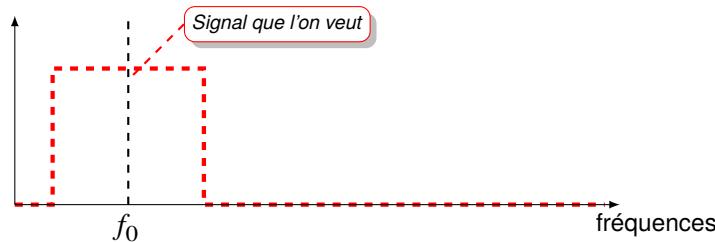
Application à la création de **filtre**:

Propriétés :

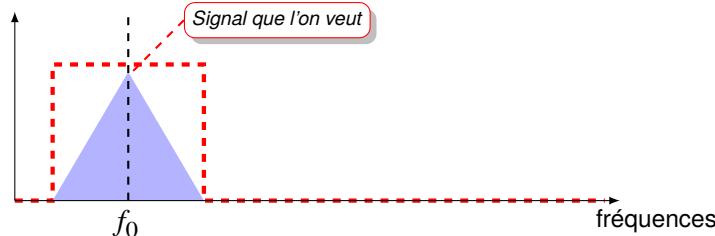


On veut isoler un signal autour de la fréquence f_0 .

Un signal «parasite» est présent autour de la fréquence f_1 .

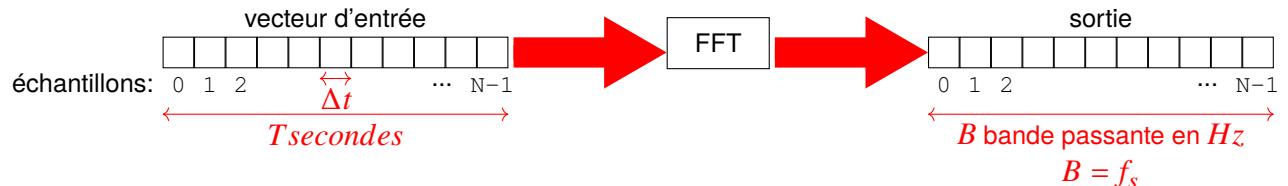


On construit un «masque» et on le multiplie par le signal précédent : on réalise le «*produit de convolution*», pour isoler le signal autour de f_0 .



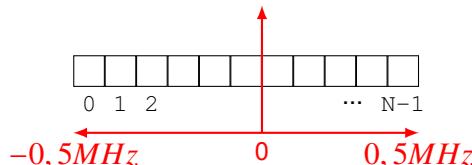
On obtient le signal autour de f_0 .

- ▷ 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 ?

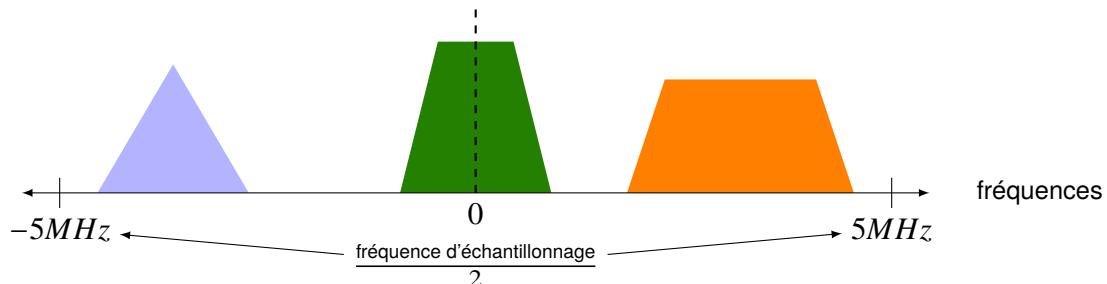
Exemple : fréquence d'échantillonnage de $1MHz \Rightarrow$ on **ne peut voir** des fréquences $< 0,5MHz$



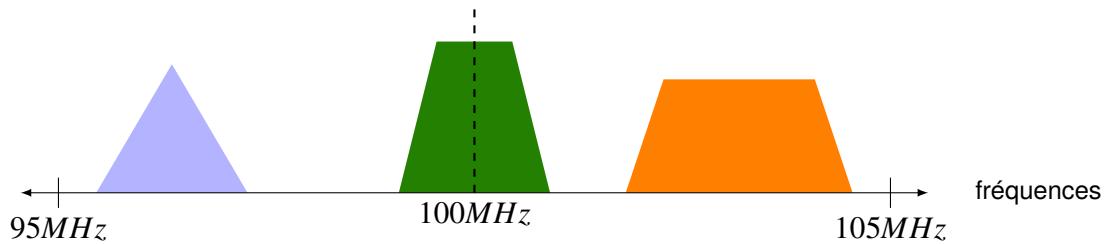
La sortie montre des fréquences de $-f_s/2$ à $f_s/2$, où f_s est la fréquence d'échantillonnage.
⇒ **des fréquences...négatives ?**

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 :



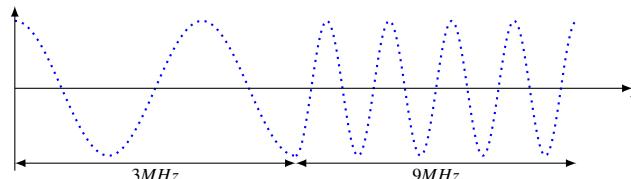
- ▷ ce qui se traduit par le domaine de fréquences centrés sur la fréquence de référence :



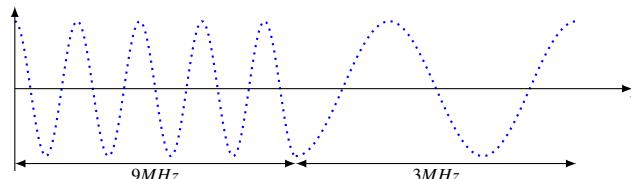
- **but:** signal temporel $\xrightarrow{\text{FFT}}$ signal en fréquence ;

- L'ordre dans le domaine temporel n'est pas important :

◊ le signal :



◊ le signal :



◊ ces deux signaux donnent le **même domaine de fréquences** :



- au niveau des calculs, la FFT donne :



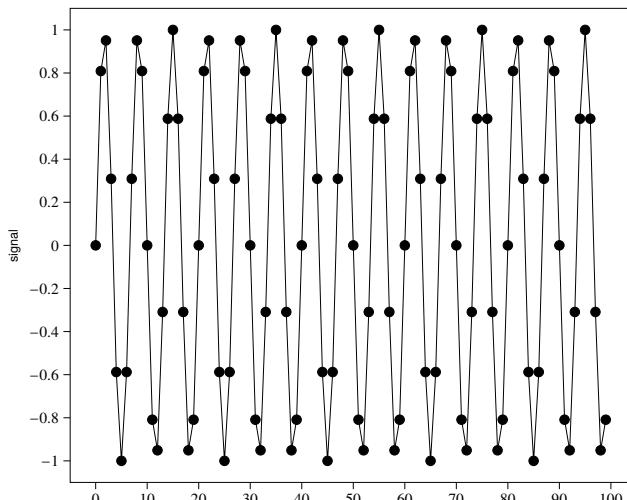
Le calcul de la FFT donne un tableau de fréquences qu'il faut décaler si on le veut centrer autour de la fréquence zéro, c-à-d le courant continu DC.

```

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()

```

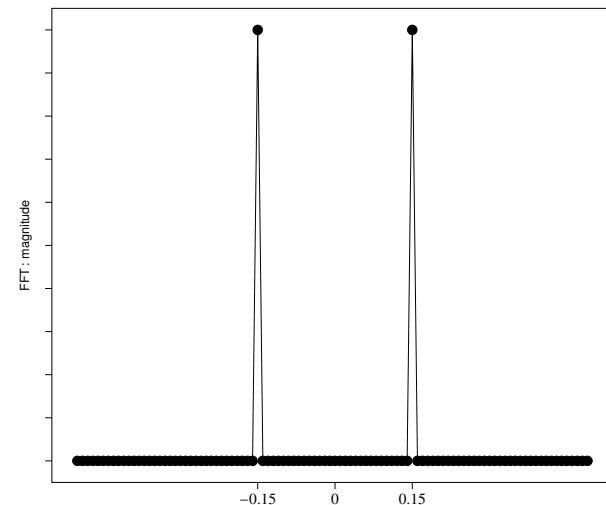
Signal



- 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
⇒magnitudes ;

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

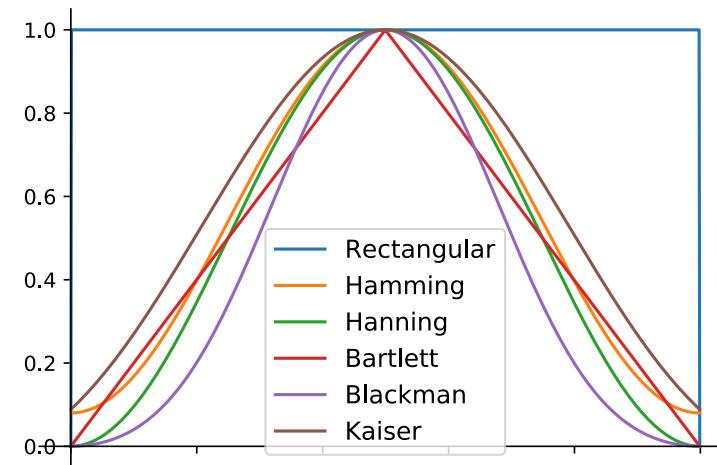
FFT



- 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 fréquences** dans le domaine fréquentiel.
- ⇒ la **première** et la **dernière** valeur du tableau doivent être **égales ou proches** !

On utilise un **mécanisme de fenêtrage** :

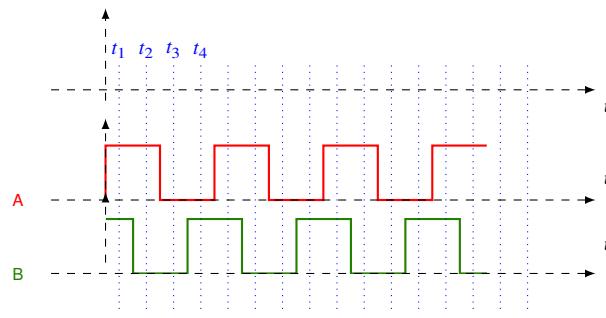
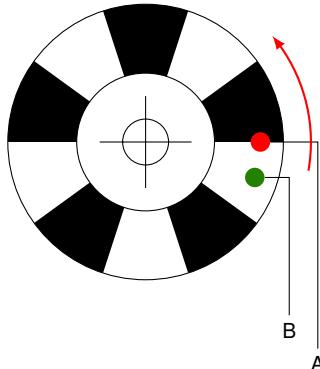
- ▷ on force des valeurs à zéro en début et fin du tableau par **convolution** avec différentes formes de fonctions ;
- ▷ ne pas utiliser de fonction de fenêtrage, revient à utiliser une fenêtre en rectangle qui ne fait rien sur les extrémités du tableau ;
- ▷ la plus courante est celle de Hamming ;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

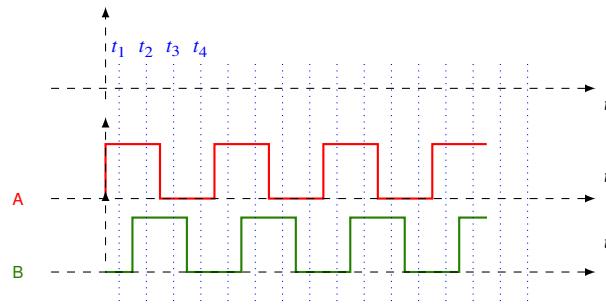
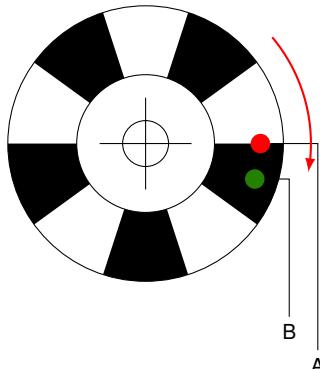
Signaux en quadrature : l'exemple du «rotary encoder»

59



	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 retard» 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

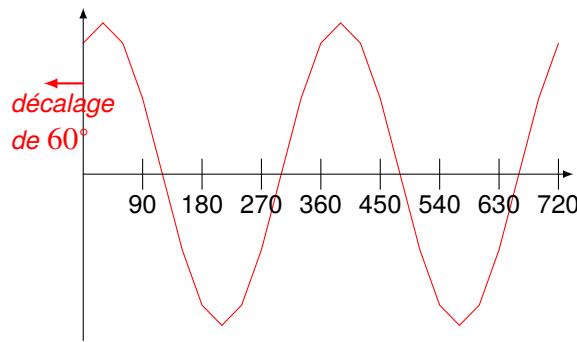
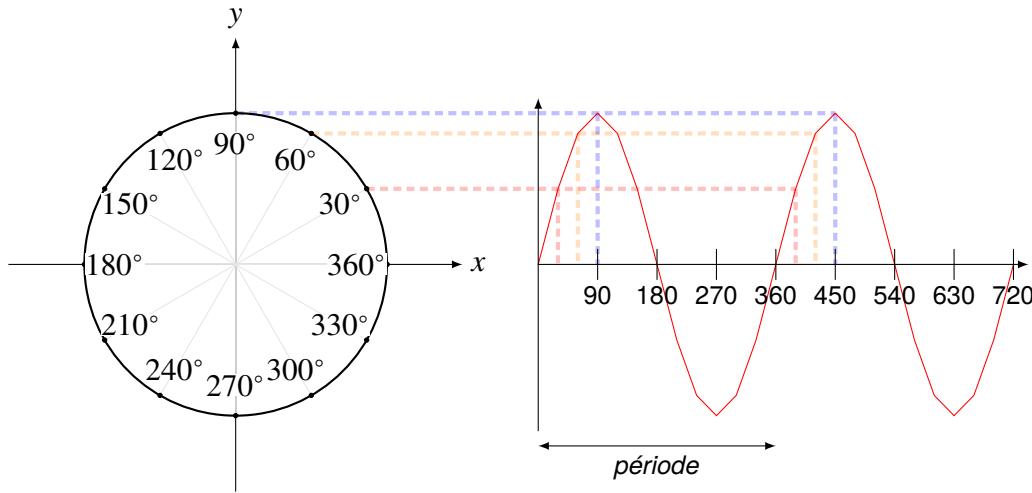
Le signal en sortie de A est «en avance» sur le signal en sortie de B.

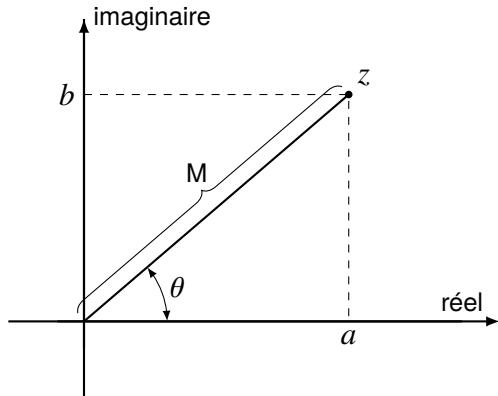
La zone blanche du disque est conductrice, la zone noire ne l'est pas.

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

Phase et décalage

60





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 :

$$M = \sqrt{a^2 + b^2}$$

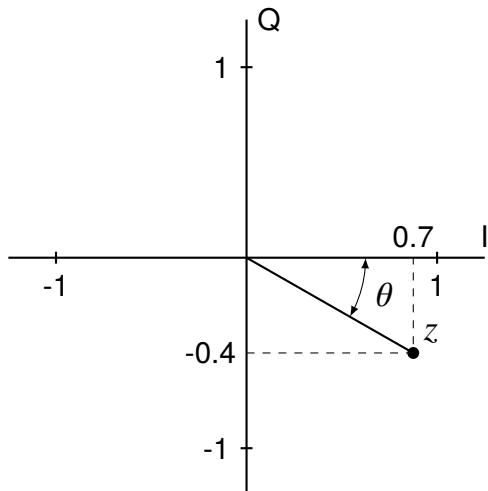
▷ θ est la phase, l'angle entre le vecteur et l'axe réel positif :

$$\theta = \arctan\left(\frac{a}{b}\right)$$

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

- Exemple :
- $z = 0,7 - 0,4j$
 - $magnitude = 0.806$
 - $phase = -29,7^\circ = -0.519 \text{ radians}$

```
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
```

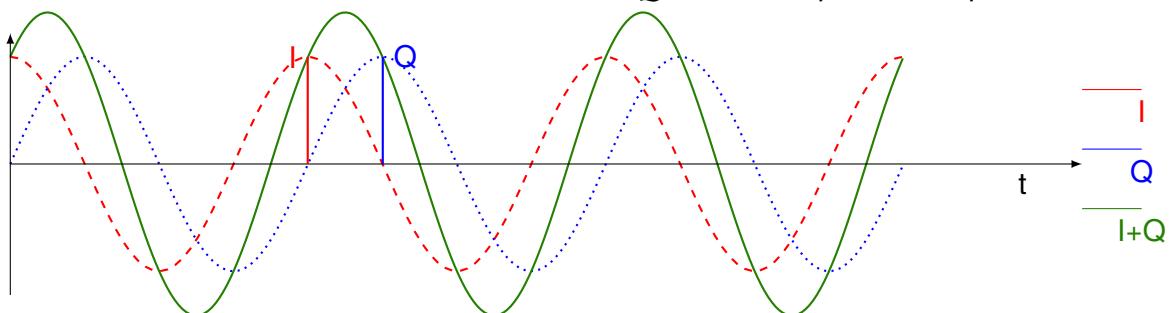


- I est la partie réelle ;
- Q est la partie imaginaire ;
- I et Q : des ondes en «déphasage» de 90° :
 - ◊ I associé à la fonction cosinus ;
 - ◊ Q associé à la fonction sinus ;
 - ◊ équivalence : $\sin(x) = \cos(90^\circ - x)$
- signal = $I \cos(2\pi ft) + Q \sin(2\pi ft)$

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

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

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

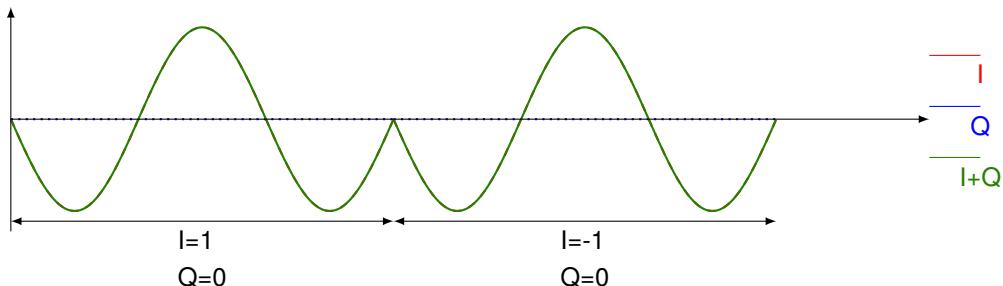


Ici, I et Q sont à 1.

Modulation de Phase

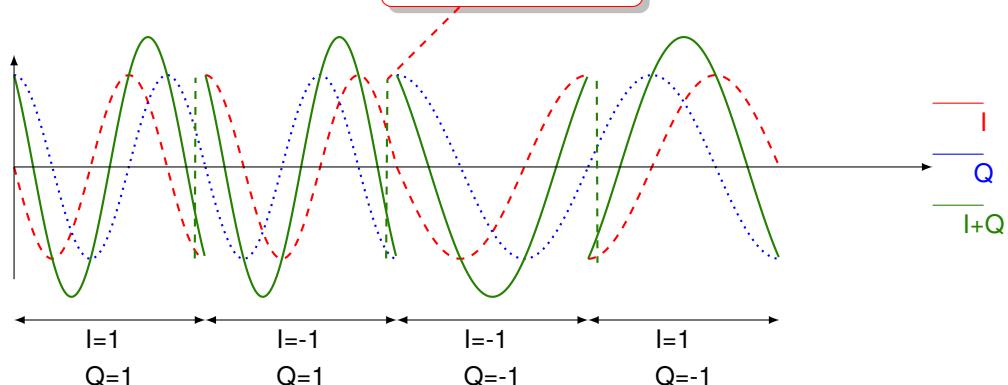
BPSK, «Binary Phase Shift Keying» :

- ▷ 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 $(I, Q) = \{(1, 1), (-1, 1), (-1, -1), (1, -1)\}$

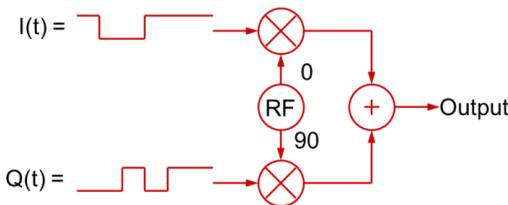
fréquence supplémentaire



- ▷ 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** ;
 ⇒ : on génère de **nouvelles fréquences**, ce qui **augmente la bande passante** utilisée ;
- ⇒ : 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 ;
- ⇒ : limitation sur le débit !

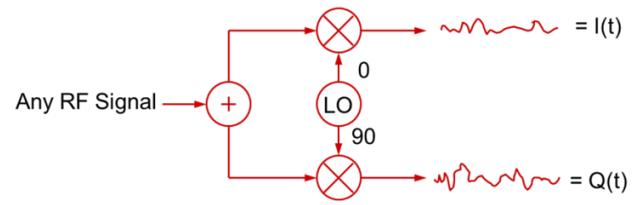
Utilisation de la modulation IQ au niveau de la SDR, «Software Defined Radio»

Au niveau de l'émetteur :

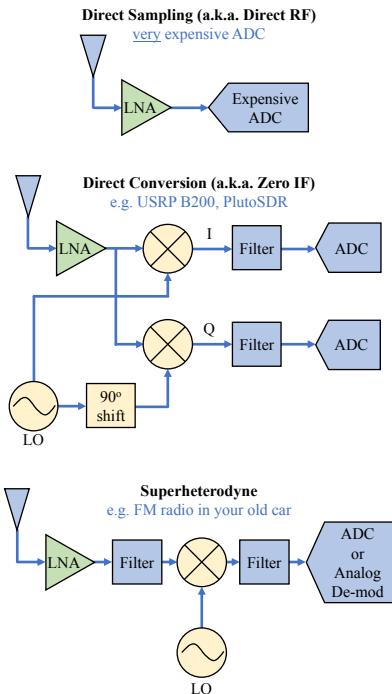


- ▷ on génère une fréquence choisie : RF, modulée par I ;
- ▷ on décale de 90°, modulée par Q ;
- ▷ on fait la somme : signal transmis.

Au niveau du récepteur :



- ▷ on génère une fréquence choisie : LO, que l'on mixe pour isoler I ;
- ▷ on décale de 90° 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.
 ⇒ 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**
- ⇒ on est directement en «*baseband*» ;

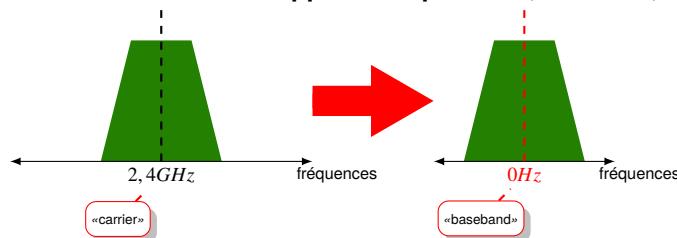
□ Direct Sampling

- ◊ 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

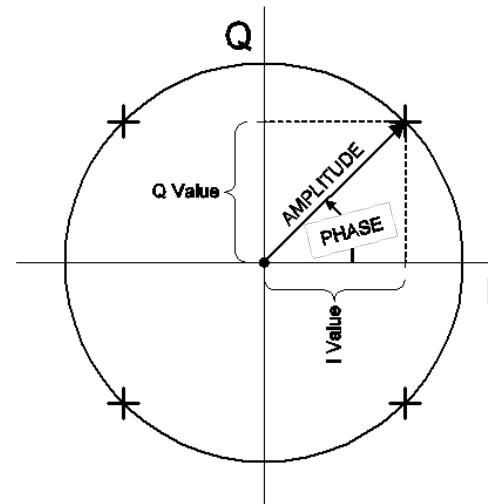
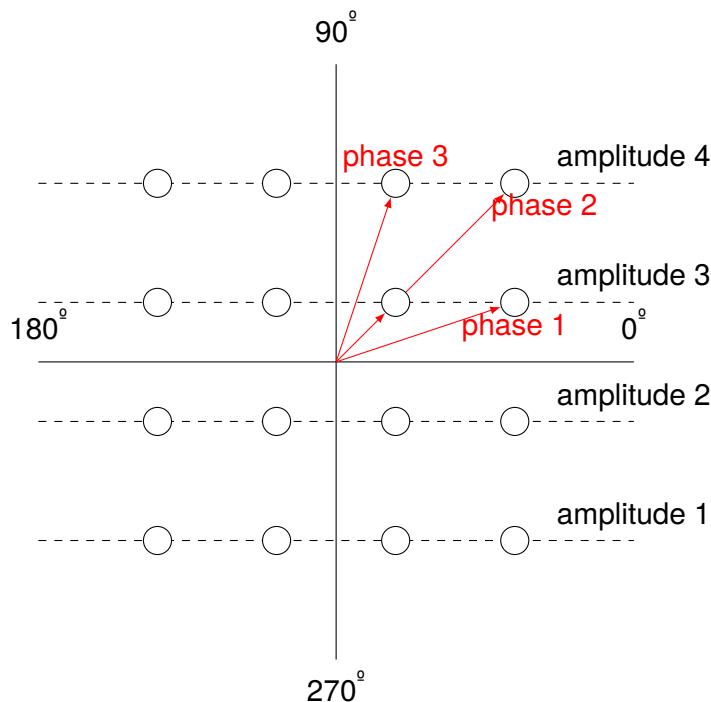
- ◊ on réalise une «*downconversion*» mais pas jusqu'à 0Hz mais jusqu'à une fréquence intermédiaire appelée «*IF*».

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



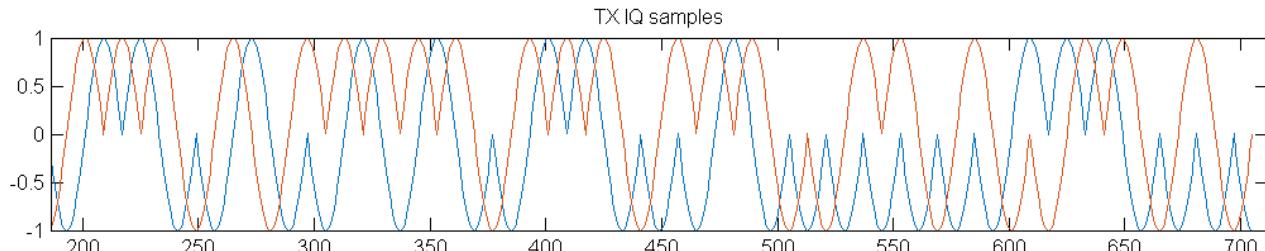
- ▷ L'intérêt de revenir en «*baseband*» est de travailler avec un **échantillonnage moins rapide**.
- ▷ La plupart des signaux ont une bande passante entre 100kHz et 20MHz ;
- ▷ Le signal en «*baseband*» est en **valeurs complexes** : il correspond à des fréquences **positives ou négatives** centrées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

16 QAM exprimé en IQ



FSK modulation

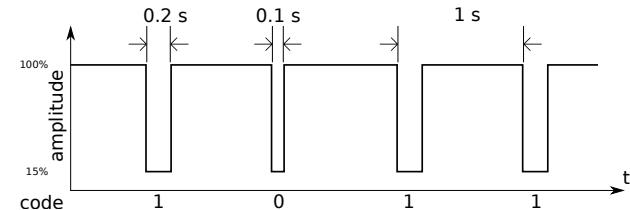
- FSK signal où :
 - ◊ f_c est la fréquence de la porteuse ou «*carrier*» ;
 - ◊ $f_c + \Delta f$ représente 1 ;
 - ◊ $f_c - \Delta f$ représente 0 ;
- on fait varier la phase de I par rapport à Q :
 - ◊ un changement de phase positif entre la phase de I par rapport à celle de Q \Rightarrow fréquence positive $f_c + \Delta f$
 - ◊ un changement de phase négatif entre la phase de I par rapport à celle de Q \Rightarrow 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 68

- 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 résonance à 77,5KHz :

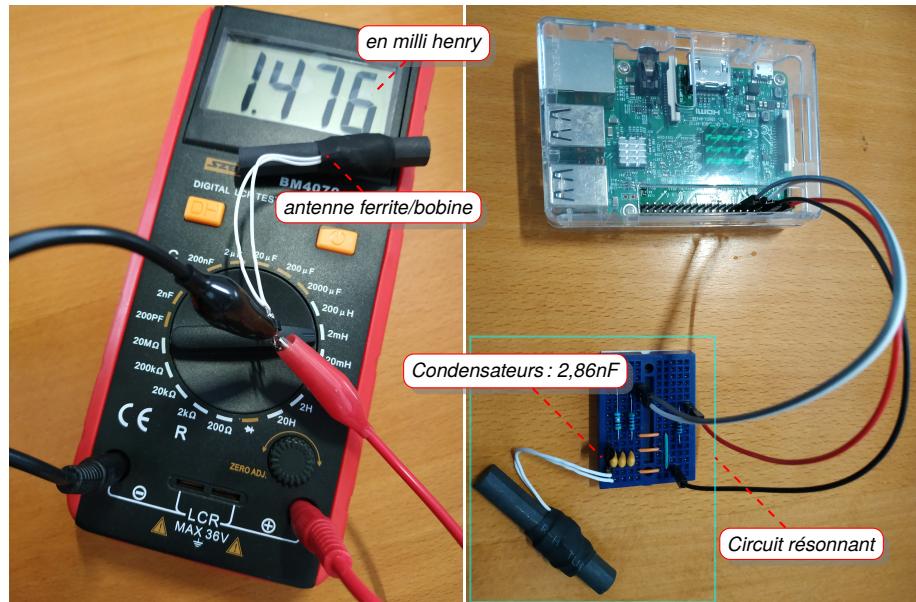
LC Resonant Frequency Calculator

Inductance, L	1.473	mH
Capacitance, C	?	nF
Resonant Frequency, f	77.5	KHz

Calculate **Reset**

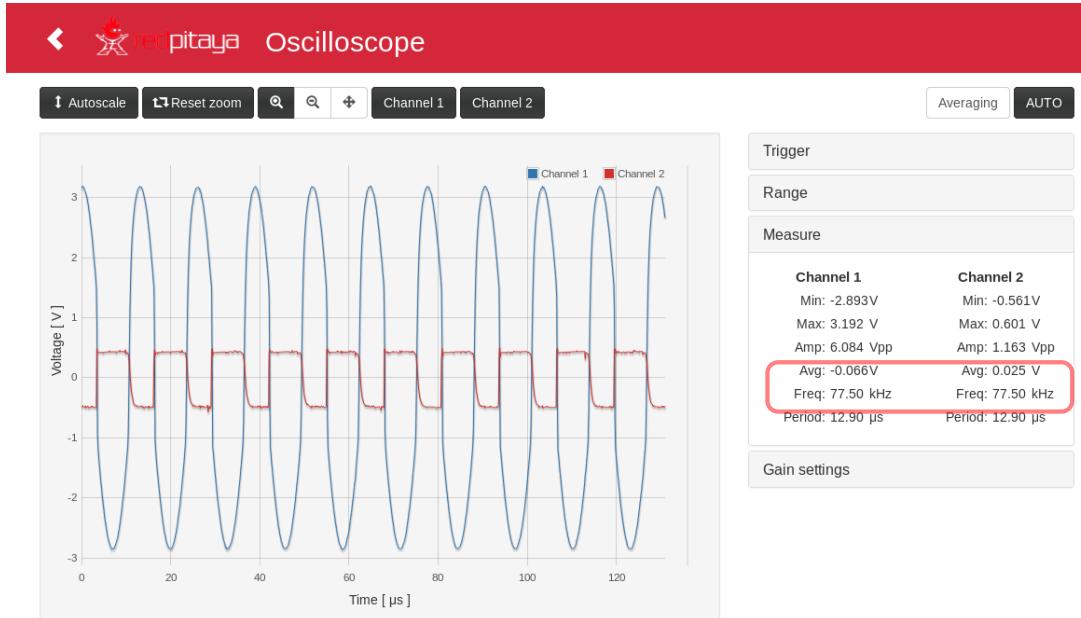
Results

Capacitance (C) = **2.863084141 nF**



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

Sur l'oscilloscope

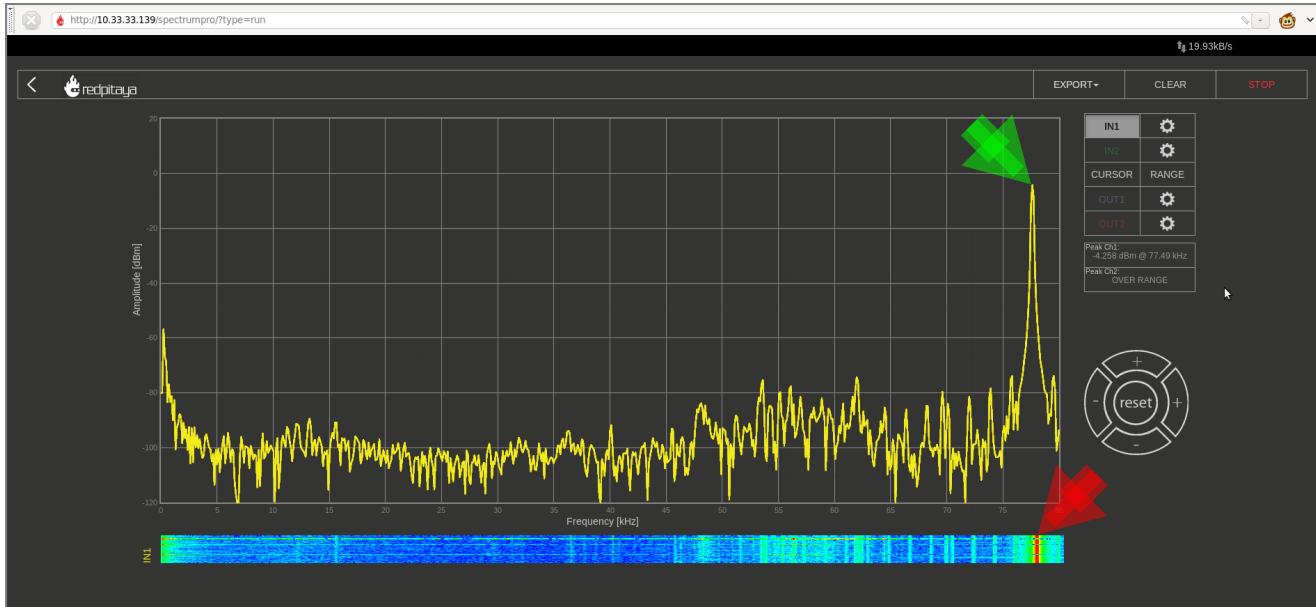


© 2014 - Red Pitaya

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

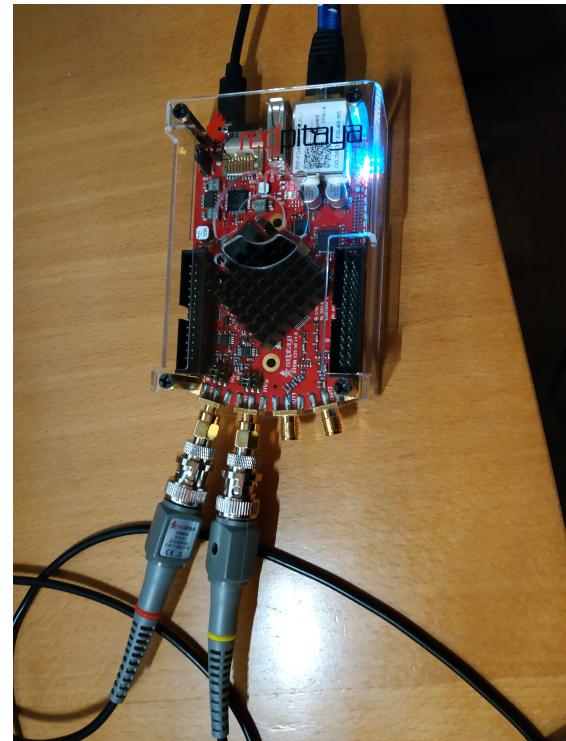
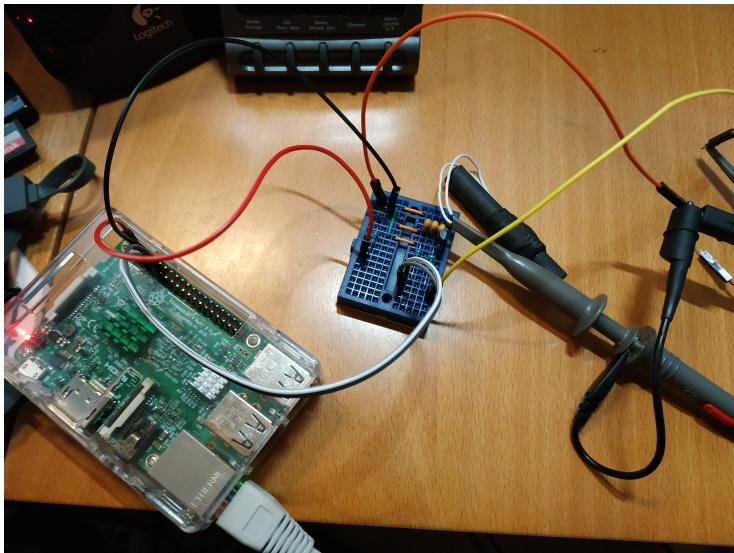


- ▷ *flèche verte* : l'énergie la plus forte est reçue à la fréquence de $77,5\text{kHz}$
- ▷ *flèche rouge* : sur la «*waterfall*», l'énergie reçue est indiquée de la couleur bleue (pas d'énergie) à rouge (beaucoup d'énergie);

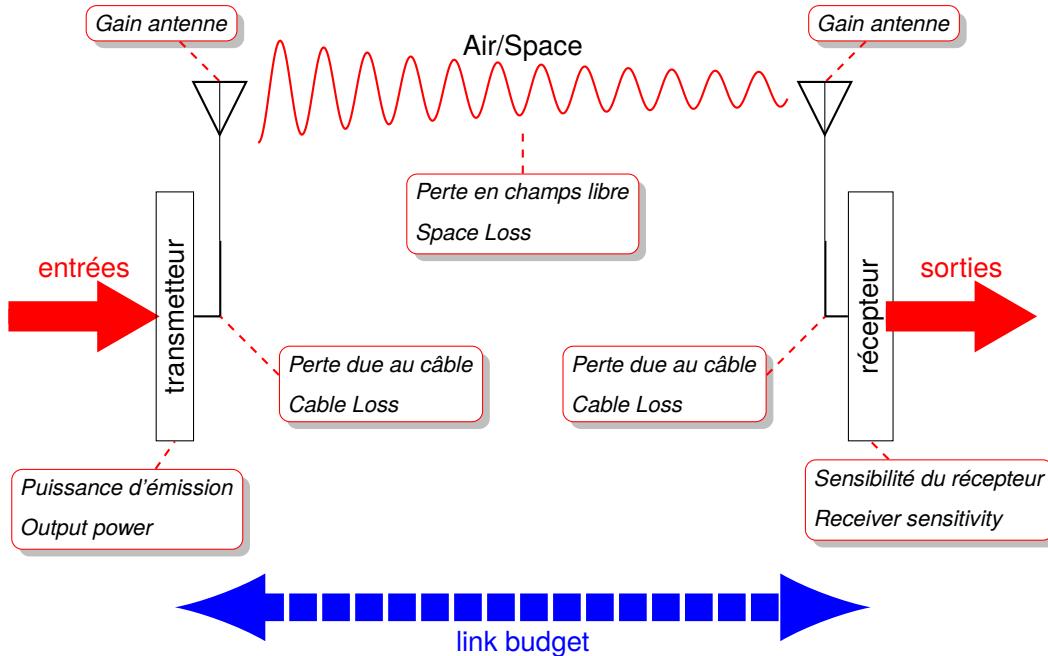
Le reste correspond au bruit.

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

71



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.

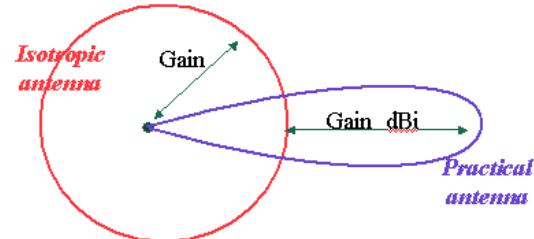
Antenne et transmission effective

73

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.

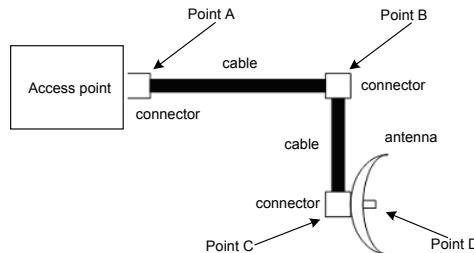
Une antenne **quelconque** émet *plus dans une direction*, c-à-d qu'elle a un **gain** par rapport à l'antenne isotrope dans cette direction.

Le gain est exprimé en *dB_i*.



La puissance émise au niveau du transmetteur

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



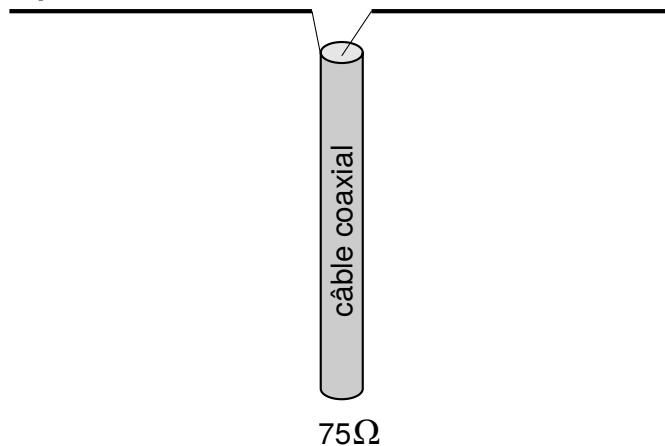
$$EIRP_{[\text{dBm}]} = P_T_{[\text{dBm}]} - L_C_{[\text{dB}]} + G_a_{[\text{dB}_i]}$$

où :

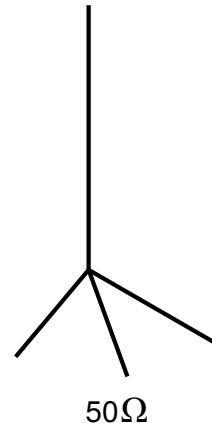
- ▷ P_T est la puissance de transmission ;
- ▷ L_C est la perte, «*loss*», dans les câbles et connecteurs ;
- ▷ G_a est le gain de l'antenne.

Access Point	Point A	Point B	Point C	Point D
100 mW	-3 dB	-3 dB	-3 dB	+12 dB _i
= 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				

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

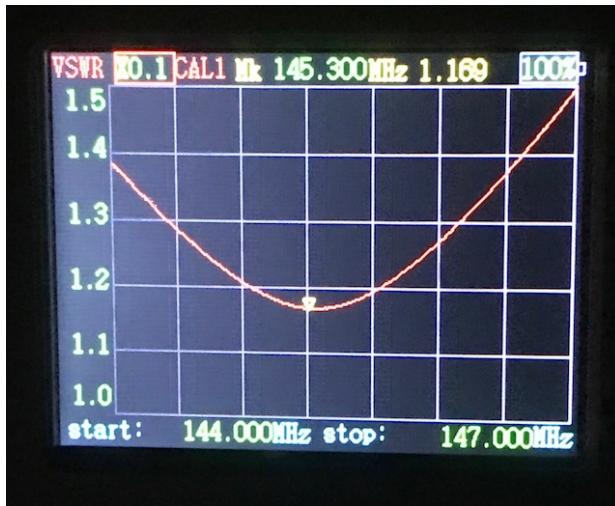
un VSWR «*Voltage Standing Wave Ratio*» inférieur à 2 est acceptable ;

$$RL(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_r}$$

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*»

⇒ 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.

- ▷ 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*:

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

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

Une table des puissances exprimées en *dBm*:

<i>mW</i>	0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	2	10	100	200	400	1000
<i>dBm</i>	-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* ;
 \Rightarrow dépend du paramétrage du circuit radio de l'émetteur ;
 \Rightarrow consomme de l'énergie sur l'alimentation de l'émetteur ;
- la **perte** dues au câbles/connecteurs \Rightarrow dépend de la qualité des composants/connexions ;
- le **gain** de l'antenne \Rightarrow 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

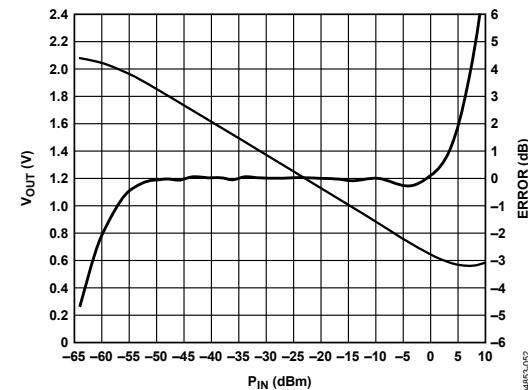
et Linux aussi :-)

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 $125ms$:

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

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



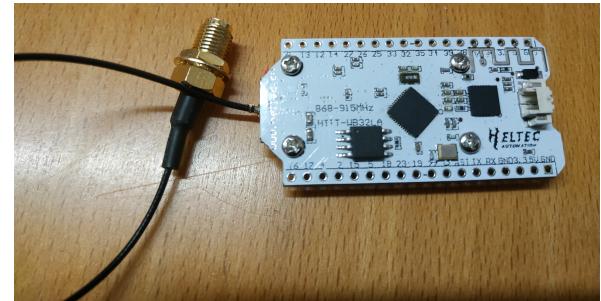
La mesure est linéaire pour des puissances comprises entre $-50dB$ et $-5dB$, d'après la documentation du AD8318.
⇒ il faut **atténuer** le signal en entrée.

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

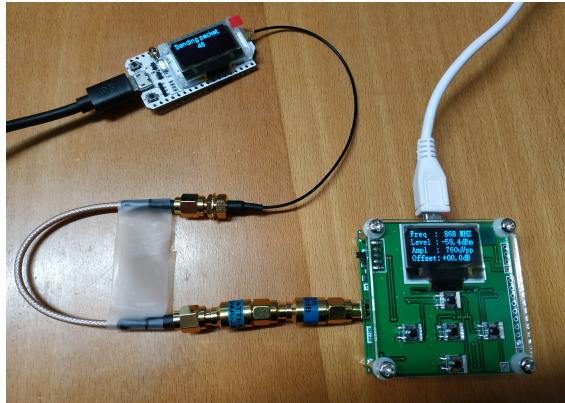


que l'on peut combiner en un atténuateur de 30dB :



Une rallonge SMA-femelle vers SMA-mâle :

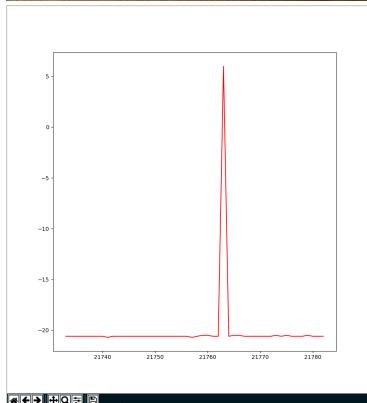




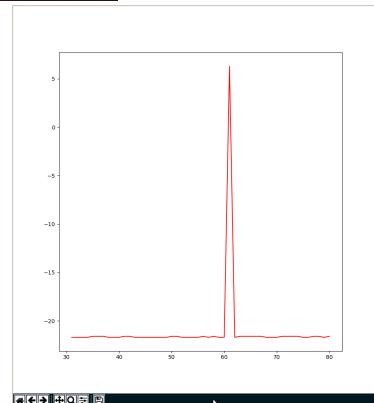
Banc de mesure :

- ▷ l'ESP32 + module LoRa avec connecteur antenne de type «Ipx Micro Coax» ;
- ▷ adaptateur Ipx 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*».

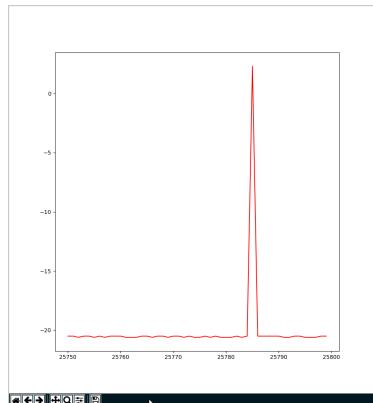
On observe une perte d'environ 4dBm dans les câbles et connecteurs :



- 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 ;

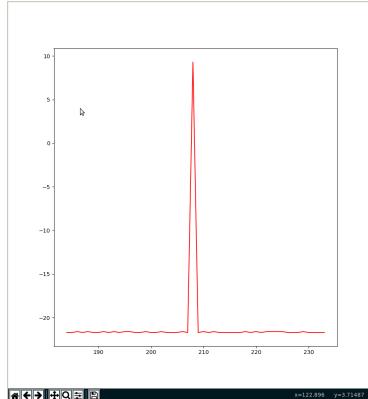


- Transmission : 6dBm
- Atténuation : 30dB
- ▷ -20,5dBm sans transmission ;
- ▷ 2,3dBm lors d'une transmission ;

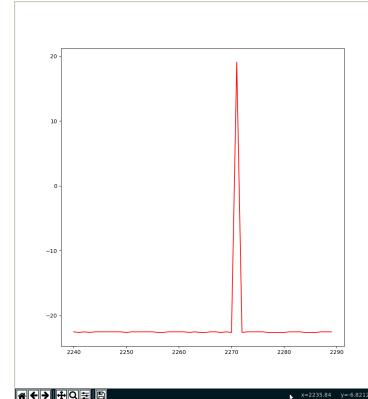
Une mesure de l'atténuation des câbles et connecteurs

81

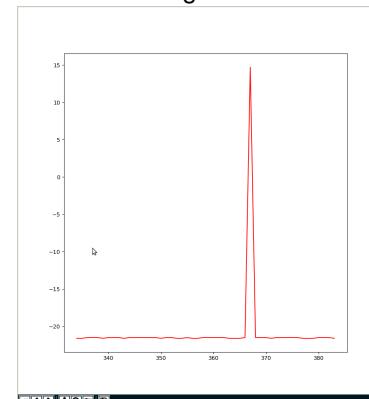
Avec l'atténuation des $30dB$, c-à-d les deux atténuateurs :



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



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



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

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

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

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



D'après Wikipedia

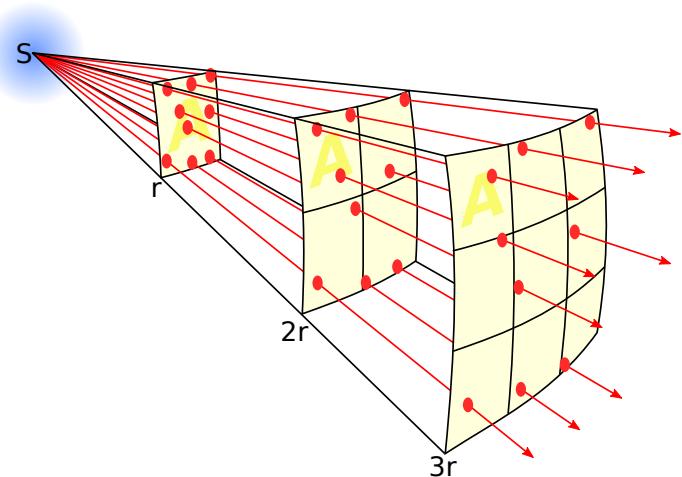
En physique, une loi en **carré inverse** est une loi physique postulant qu'une quantité physique (énergie, force, ou autre) est inversement proportionnelle au carré de la distance de l'origine de cette quantité physique.

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 la **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).

$$\text{FSPL}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2$$

où d est la distance en mètre,
 f est la fréquence en Hertz et c , la vitesse de la lumière.

$$\text{FSPL}_{\text{dB}} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)^2$$

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 :

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

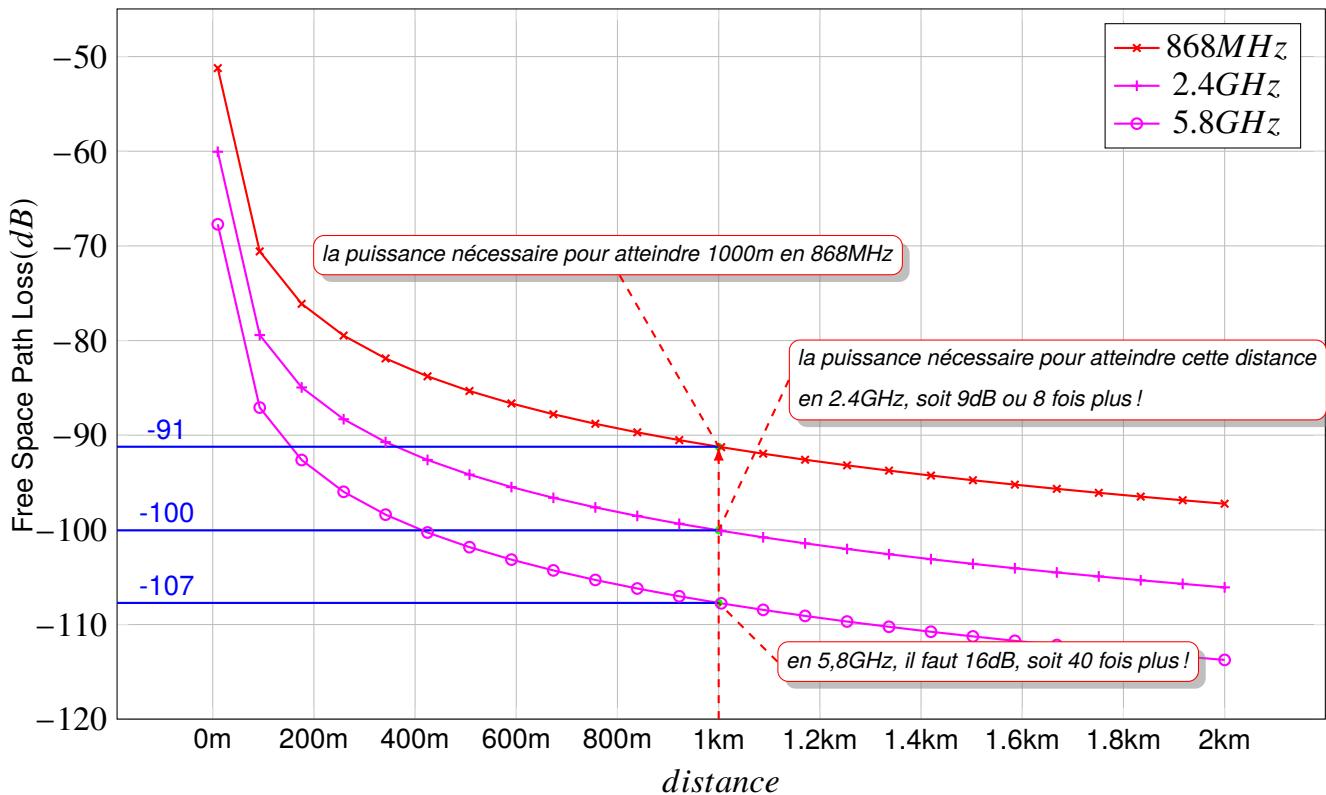
D'où la table suivante :

On remarquera que pour la fréquence du WiFi de 2485MHz, on obtient la formule simplifiée :

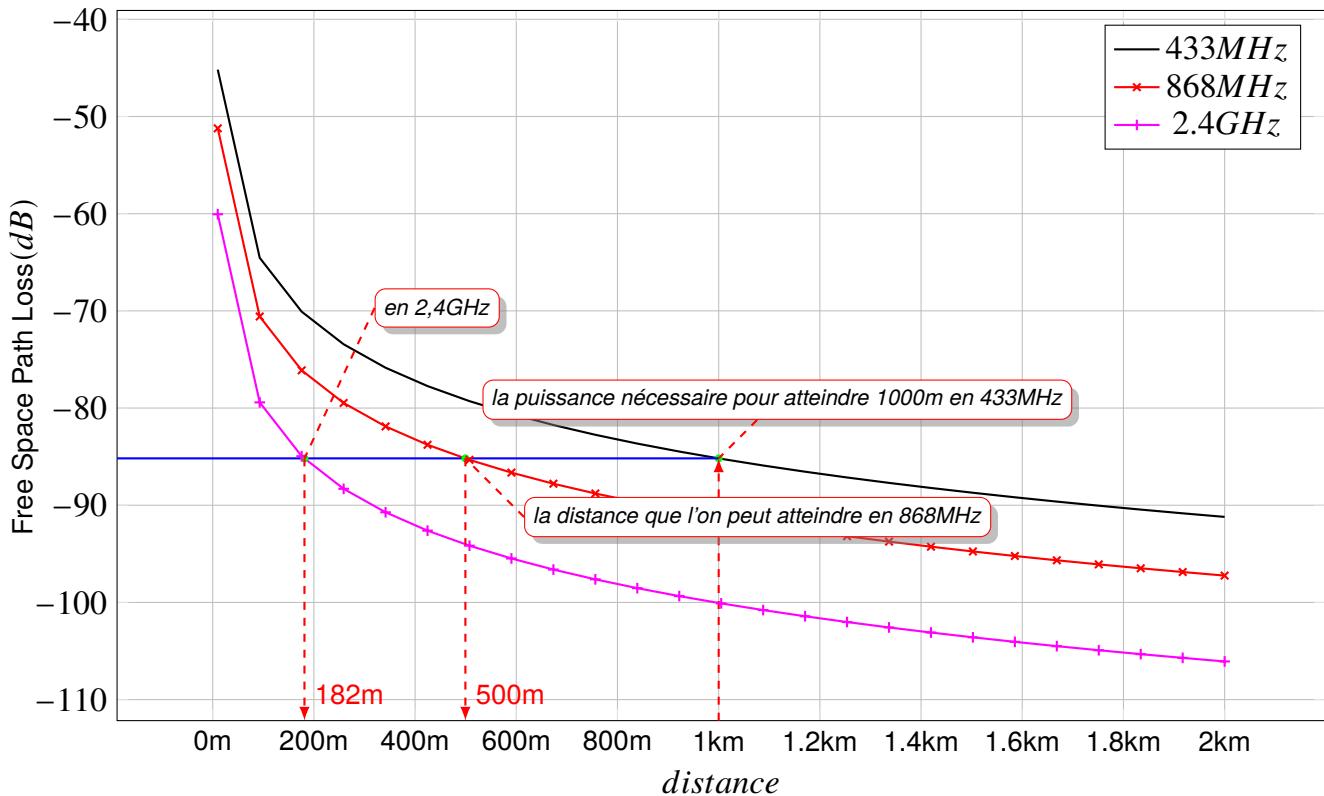
$\text{FSPL}_{\text{dB}} = 100 + 20 \log_{10}(d)$, avec une distance exprimée en km.

Distance	Fréquence		
	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

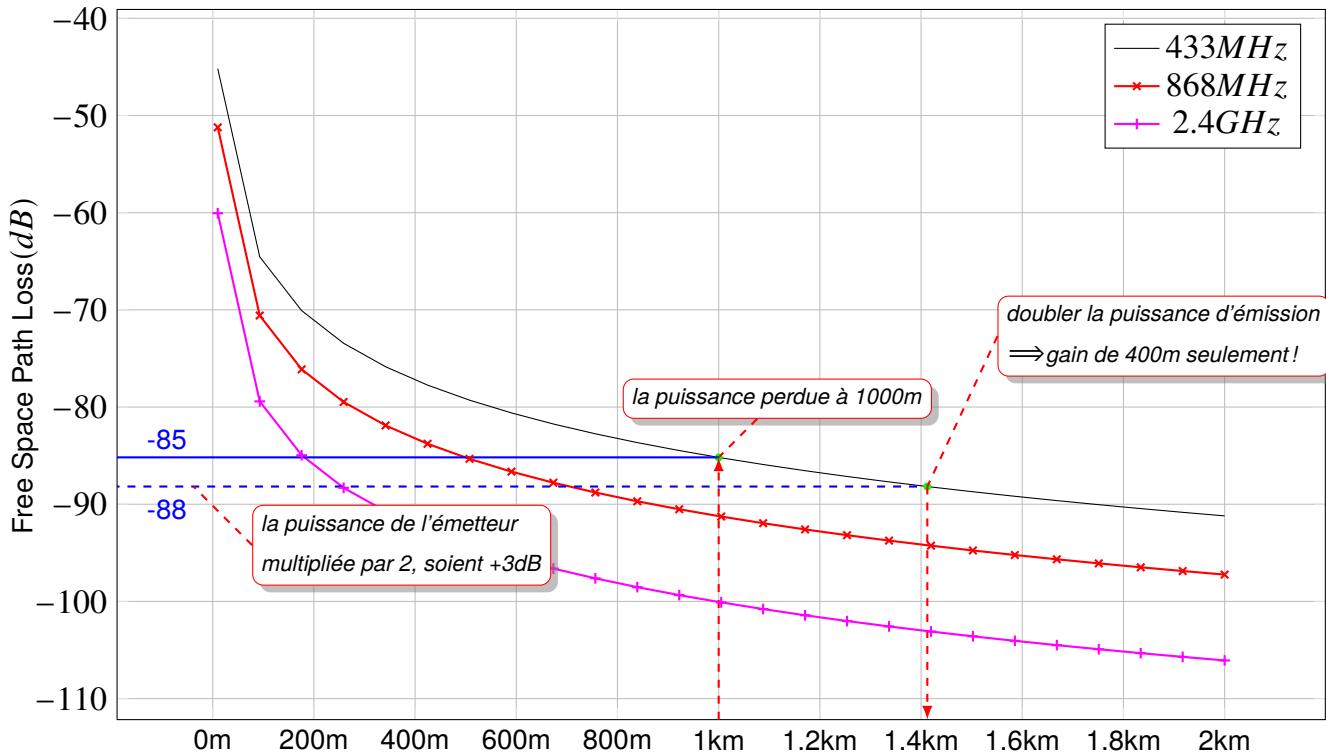
Plus la fréquence est élevée, plus la perte est importante :



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



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

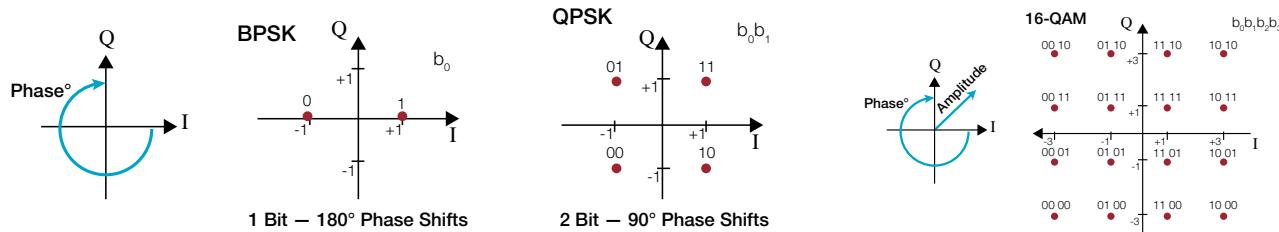


⇒ Un gain de $+3dB$, peut être **facilement** obtenu avec une **meilleur antenne** !

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

$$\text{SNR} = \text{Puissance reçue} - \text{Bruit du canal de communication}$$

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 \Rightarrow moins de débit possible !

- ▷ 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.

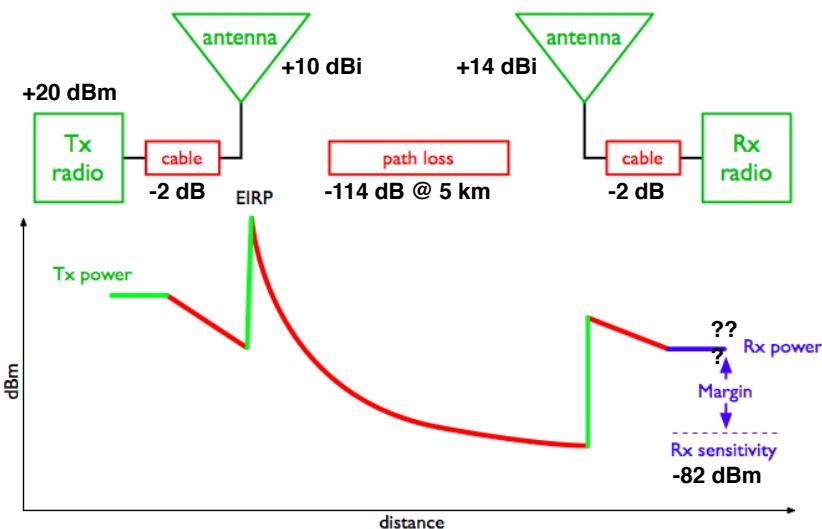
AP vers le client

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

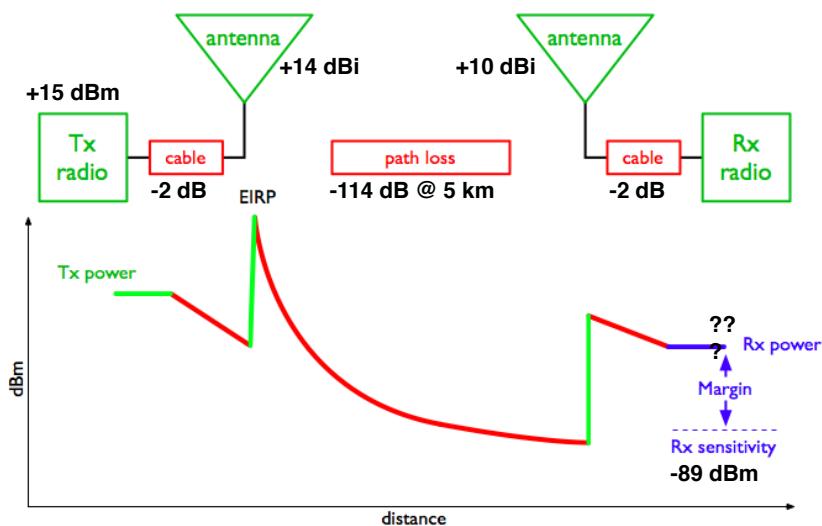
40dB	gain total
-114dB	FSPL pour 5km

-73dBm	niveau de signal reçu
-82dBm	sensibilité du client

8dB	link margin



- ▷ 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 :

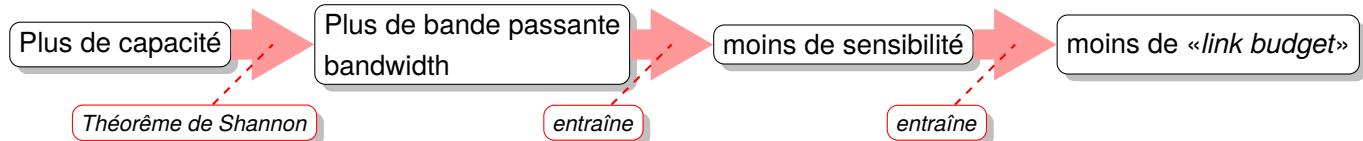
Link Budget	Description
15dBm	TX Power Client
+14dBi	Antenna Gain Client
-2dB	Cable Losses Client
+10dBi	Antenna Gain AP
-2dB	Cable Losses AP

35dB	gain total
-114dB	FSPL pour 5km

-78dBm	niveau de signal reçu
-89dBm	sensibilité de l'AP

10dBm	link margin

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



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

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

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

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

Une modulation offrant **plus de débit** exige une **meilleure sensibilité**.

Un **débit plus bas** \Rightarrow un «*link margin*» **plus important**.

Pour augmenter le «*link margin*» \Rightarrow 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

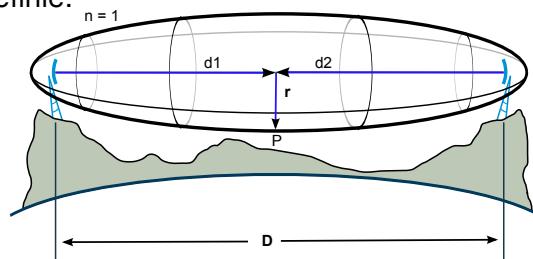
93

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 ;

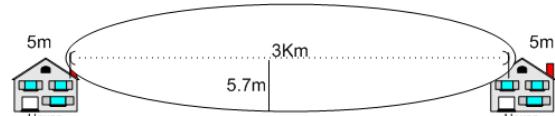
L'atténuation du signal dépend de :

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

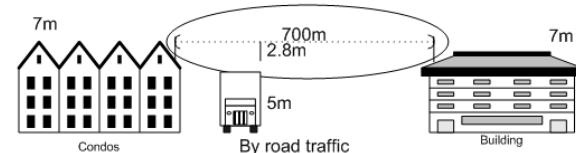


Exemple : à 2,4GHz sur une distance de 10km, la zone de Fresnel à un rayon de 17,6m.

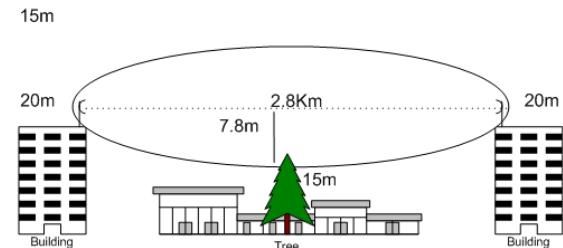
On considère que 20 à 40% d'obstruction de la zone n'introduit pas d'interférence.



By the ground



By road traffic



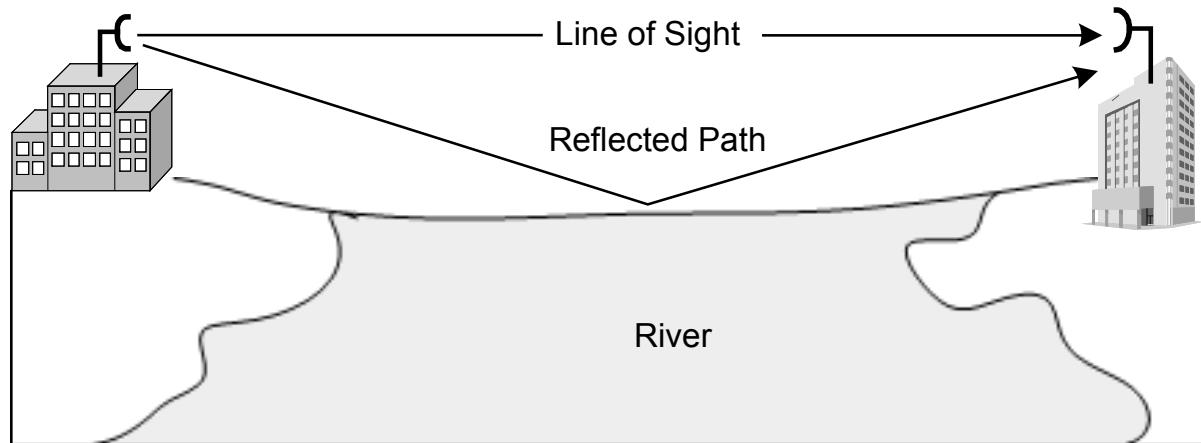
By an obstacle

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 :
 - ◊ $\text{RSSI} \geq -50 \text{ dBm} \Rightarrow 100\% \text{ qualité} ;$
 - ◊ $\text{RSSI} \leq -100 \text{ dBm} \Rightarrow 0\% \text{ qualité} ;$
- pour un RSSI entre -50 dBm et -100 dBm :
 - ◊ qualité $\simeq 2^*(\text{RSSI} + 100)$
 - ◊ $\text{RSSI} \simeq (\text{qualité}/2) - 100$

Un réseau fonctionne correctement avec un RSSI > à -80 dBm , et de -45 dBm à -87 dBm 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 -120 dBm : 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*

$\text{SNR margin} = \text{signal(dBm)} - \text{noise(dBm)}$

Exemple : $\text{RSSI} = -55 \text{ dBm}$ et bruit = -85 dBm , d'où : $(-55 \text{ signal}) - (-85 \text{ noise}) = 30 \text{ dB}$ 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 : $C = \text{BW} \log_2(1 + \text{SNR})$

L'utilisation du débit de 54Mbps en WiFi requiert au moins un SNR margin de 25dB car il utilise une modulation efficace.

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 ?
- SIGFOX vs LoRa ;
- Différentes technologies radios : limitations techniques et administratives ;
- Les communications longue portée : aspects transmission.

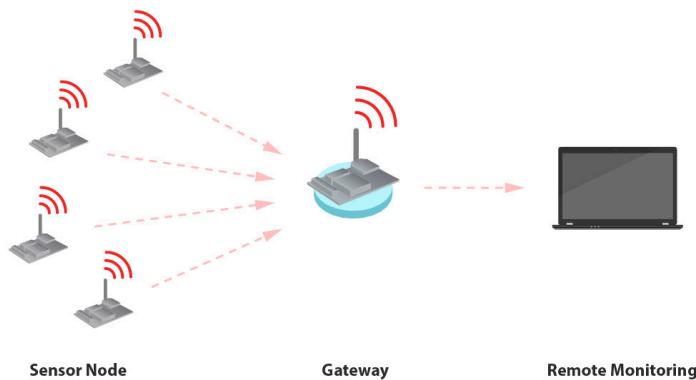
LoRa vs LoRaWan

- **LoRa** correspond au «*link layer protocol*» : peut être utilisé pour des communications P2P entre les nœuds ;
- **LoRaWan** inclut 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 plusieurs fréquences simultanément (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

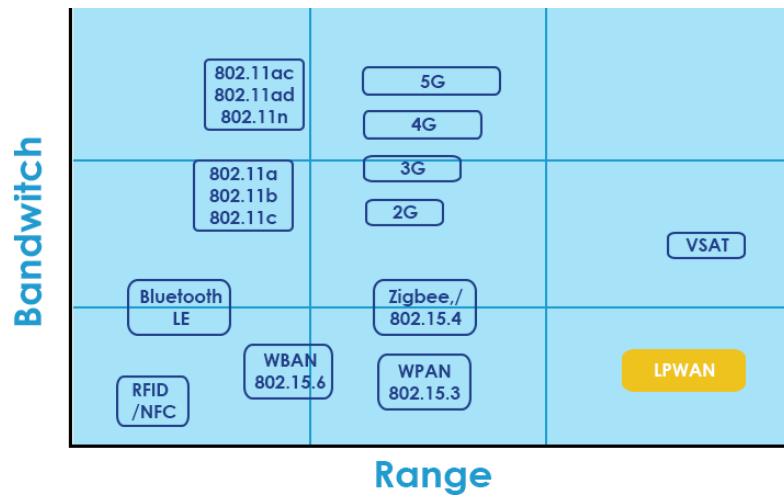
- ▷ pas de «*base station*», ni de Cloud (pas d'abonnement à une plateforme de médiation) ;

LoRa et LoRaWan

- ▷ 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*» ;

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.



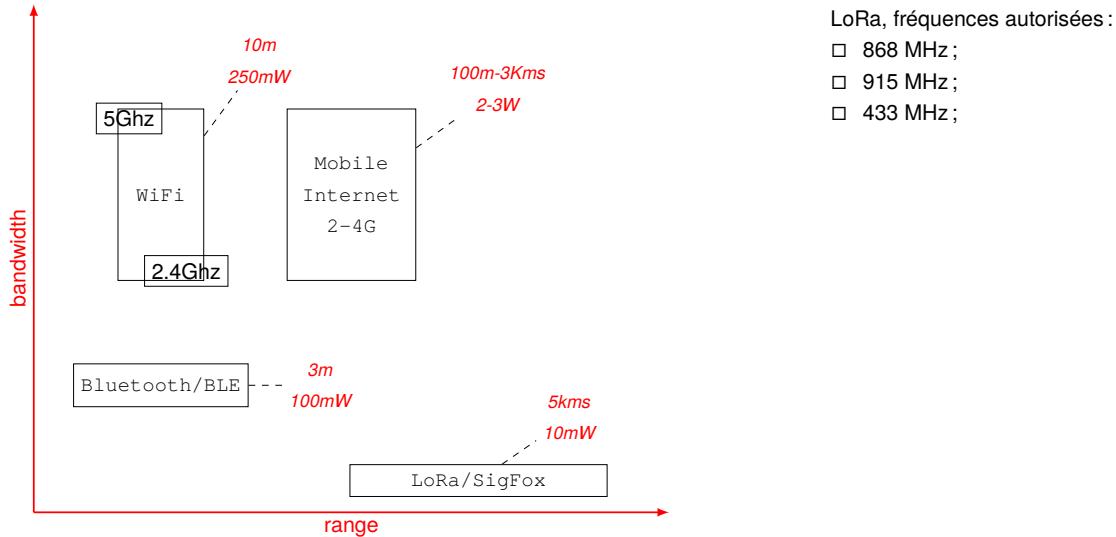
Source : Peter R. Egli (<http://fr.slideshare.net/PeterREgli/lpwan>)

www.vertical-m2m.com

Low Power Wide Area Network : LPWAN

4

- «*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** ⇒ faible capacité de communication du canal (théorème de Shannon) ;



OVERVIEW – Usages



**Long range 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**

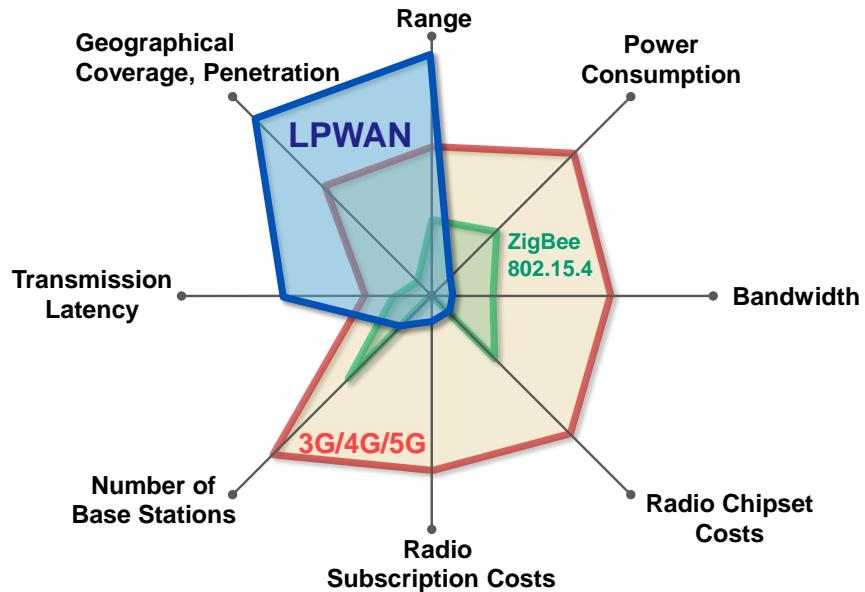
Smart Agriculture: irrigation systems, ...

Smart Grid / Water: metering

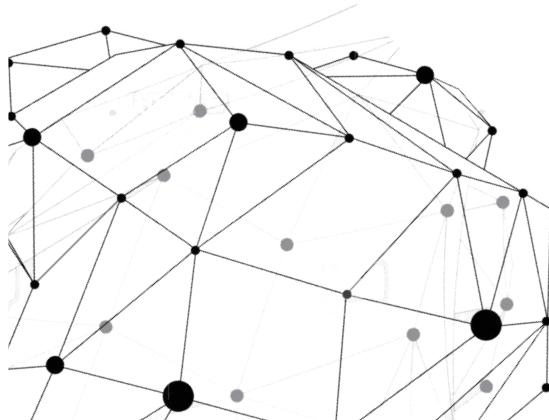
www.vertical-m2m.com

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:



The two main LPWAN technologies



1. About
2. General points and data transmission
3. Architecture principles
4. Business model

www.vertical-m2m.com



1. About

SIGFOX is a French start-up company founded in 2009 and based in Toulouse.

Deploy long range infrastructure worldwide (visit:
<http://www.sigfox.com/coverage>)

SIGFOX technology features modules able to send messages of **12 octets** maximum, with a maximum frequency of **140 transmissions per day**, and a datarate of **100 bits/s**.

- Network operator model only (annual subscriptions/connected object)
- Deployment outside France by selected SNOs (Sigfox Network Operator). Eg: Arqiva in the UK, Aerea in the Netherlands, Abertis Telecom in Spain, EI Towers in Italy...)
- Integration to its capital of telecommunication operators and equipment manufacturer to influence normalization of the Narrow-Band IoT.

www.vertical-m2m.com

2. General points

- The transmission uses public, open but regulated ISM radio band (ISM 868 MHz in Europe, 902 MHz in the US/FCC).
- Within an actual bandwidth of 48 KHz and soon of 192 KHz, centred on the 862 MHz frequency, in France and Europe, each device transmits on a bandwidth of 100 Hz. **A Sigfox modem cannot transmit more than overall 30s / hour** (1% of time, i.e. roughly 6 messages max/hour).
- The base frequency and authorised bandwidth are set in accordance with each country's regulations. This frequency range is public and can be shared with others users.

2. Transmission of the messages over the network

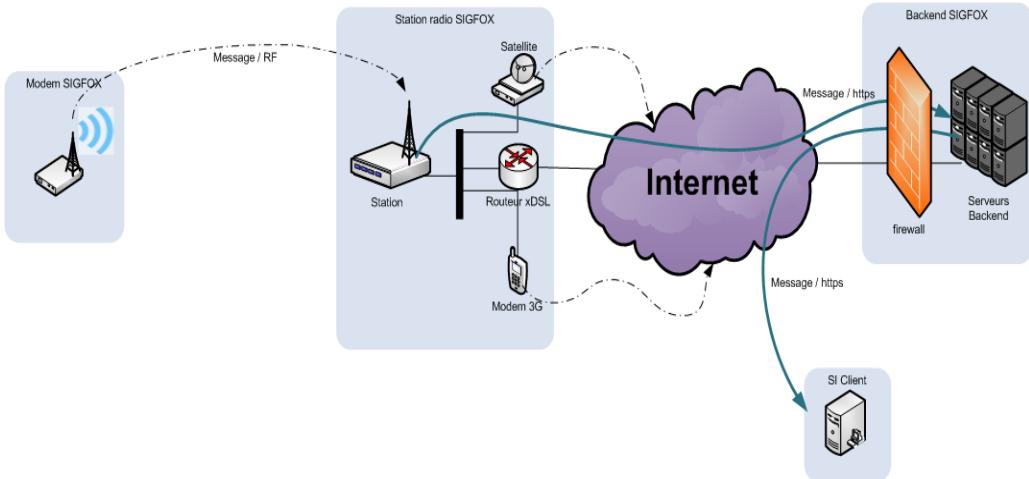
- Each device and each station have a unique Sigfox ID. The message are transmitted and signed with this ID. This signature authenticate the Sigfox device.
- Transmission mode is *fire and forget*. the modem does not wait for any acknowledgement from the base stations receiving the message. The modem has no awareness of the base station within its reach. Its missions are:
 - Multiple times transmission of messages (3 transmissions of the same message on 3 different canals)
 - The choice of transmission frequencies.
 - The choice of reception frequency which is calculated according to the frequency used for the last transmission



3. Bidirectional communication in Sigfox

- Uplink transmission (UL)
- Downlink transmission (DL)
 1. The user sends to the back-end the demand for control
 2. At the following UL connection of the Sigfox device, it is informed of the demand
 3. Transmission by a single Base station
 4. Delay in operation of transmission (asynchronous)
 5. Up to 4 messages downlink per day per device (« platinum » subscription)

3. Architecture principles



The messages are received by a base station. The station transmits the messages to the Backend (BE) through IP connectivity. The BE stores and sends the messages to the client Information System.

The BE can send messages to the base station and connect to it. Nonetheless neither the BE nor the base station can connect to the device.

4. Business model

- An economic model based on subscription per connected devices (4 levels)
 - Royalties from telecom operators offering the Sigfox network
 - Network operator model (in France and the USA)
- Key variables for current Sigfox pricing model:
 - Total volume of connected devices (different price ranges)
 - Trafic profile / device (maximum number of uplink / downlink messages)
 - Duration of the subscription contract (impact = action fee for each single contract)
 - From < 1 € excl. tax/year/object to 7 € excl. tax/year/object + action fee/device/contract

COMPARISON - SigFox or LoRA ?



Advantages of each technologies



- LoRa requires more base stations than Sigfox for the same communication capability. **Infrastructures cost less** to Sigfox that will be able to lower its prices.
- Already **91% of the french population covered and several deployments worldwide**. LoRa coverage in France is at pilot stage: national coverage expected at the end of 2016 which prevent from tracking assets for instance which is a frequent usage on the Sigfox network.



- The content of **each message can reach 242 octets** in comparison with 12 for Sigfox. LoRa suits better with applications requiring higher data rates (protocol based on spread spectrum).
- The technology **better penetrates buildings**
- **Better bidirectional support** owing to the symmetric link. Example: if you are looking to perform control-command operations over your equipments.
- Adaptable data rate according to the object's environment
- LoRa is **backed by several telecom operators in France** (Orange, Bouygues)

Conclusion

- A battle for the normalization of the two LPWA technologies with the support on both sides of telecom operators (SFR/NC for Sigfox, Orange & Bouygues Telecom for LoRA in France for example)
- Both technologies will coexist for the next years. They answer different needs !

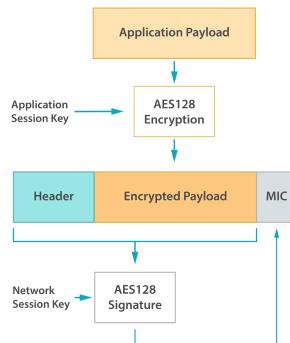
COMPARISON – main LPWAN technologies

Feature	LORAWAN	SIGFOX	LTE Cat 1	LTE M	NB - LTE
Modulation	SS chip	UNB / GFSK / BPSK	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Rx Bandwith	500 – 125 KHz	100 Hz	20 MHz	20 – 1.4 MHz	200 KHz
Data Rate	290bps – 50Kbps	100 bit / sec 12 / 8 bytes Max	10 Mbit /sec	200 kbps – 1 Mbps	Average 20K bit / sec
Max. # Msgs/day	Unlimited	UL: 140 msgs / day	Unlimited	Unlimited	Unlimited
Max Outpu Power	20 dBm	20 dBm	23 – 46 dBm	23/30 dBm	20 dBm
Link Budget	154 dB	151 dB	130 dB+	146 dB	150 dB
Battery lifetime – 2000 mAh	105 months	90 months		18 months	
Power Efficiency	Very High	Very High	Low	Medium	Med high
Interference immunity	Very High	Low	Medium	Medium	Low
Coexistence	Yes	No	Yes	Yes	No
Security	Yes	No	Yes Oui	Yes	Yes
Mobility / localization	Yes	Limited mobility, No localization	Mobility	Mobility	Limited mobility, No localization

Source: LoRAWAN Alliance, 2015

www.vertical-m2m.com

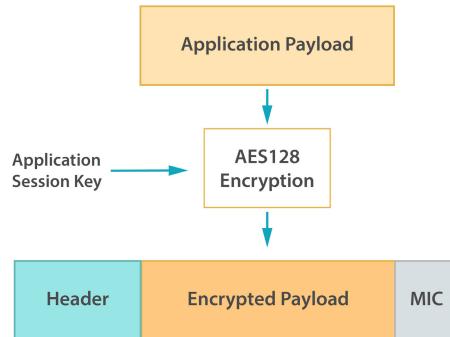
Sécurité dans LoRaWAN



- ▷ «*Network Session Key*», 128 bits : sécurité couche réseau ;
- ▷ «*Application Session Key*», 128 bits : sécurité de bout en bout, «*end to end*», couche application ;
- ▷ «*Application Key*», 128 bits : sécurité de bout en bout, couche application pour la procédure d'OTAA, «*Over-The-Air Activation*» ;

Un MIC, «*Message Integrity Check*» sert de signature :

- ▷ assure authentification et intégrité ;
- ▷ la clé NSK de 128 bits est connue uniquement par le nœud et le serveur réseau ;



- Le **nœud** est identifié par un EUI, «*Extended Unique Identifier*» sur 64 bits : qui est intégré au nœud et ne peut être changé ;
- **L'application** est identifiée également par un EUI : sert à identifier le fournisseur de l'application, en général le propriétaire du nœud ;

Intégration d'un nœud dans LoRaWAN

- **OTAA**, «*Over The Air Activation*» :

Le nœud doit suivre une procédure pour envoyer des données avec le serveur réseau, il doit disposer de :

- Device EUI sur 64 bits ;
- Application EUI sur 64 bits ;
- Application Key sur 128 bits ;

La procédure d'OTAA permet au nœud de récupérer :

- ▷ la NSK, «*Network Session Key*» ;
- ▷ l'ASK, «*Application Session Key*» ;

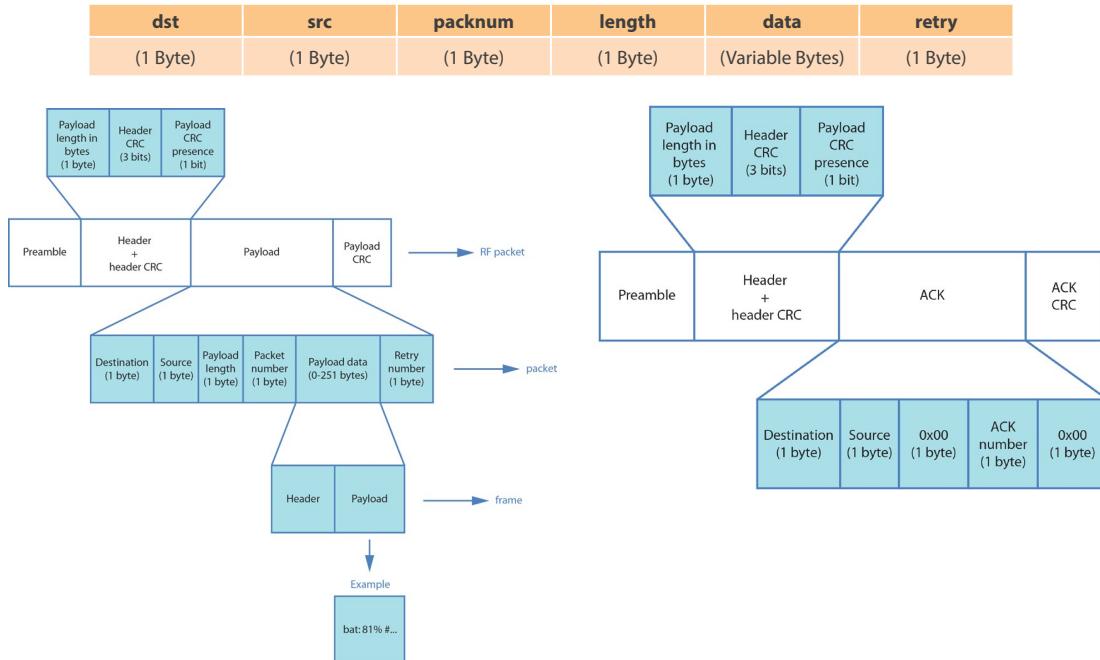
- **ABP**, «*Activation By Personalization*», permet de stocker directement les deux clés, ASK et NSK, sur le nœud.

Ces clés directement stockées dans le nœud ne doivent pas compromettre la sécurité des autres nœuds en cas de récupération : leur construction ne doit pas dériver d'informations publiques.

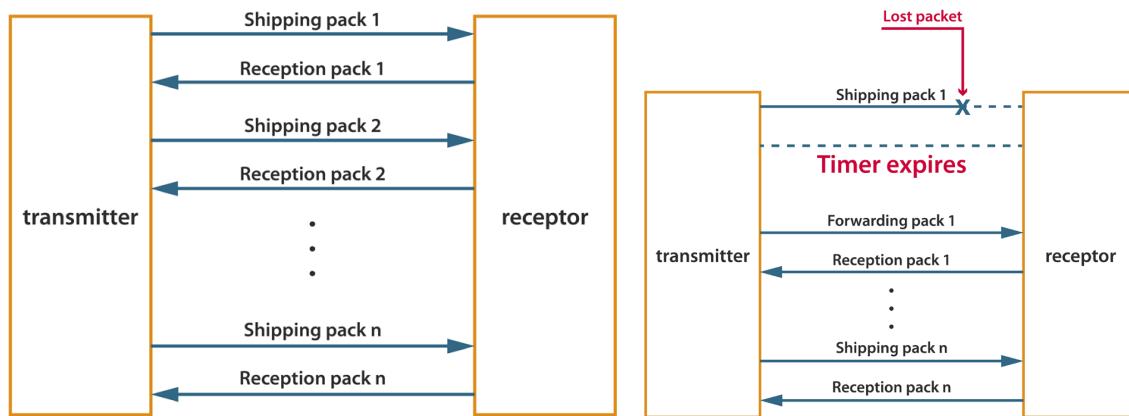
LoRaWAN : MAC

Format des trames échangées dans LoRaWAN

Taille maximale d'une trame : 250 octets



L'envoi de paquet confirmé et non confirmé dans LoRaWAN



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**.

Power Index	Power level (868 MHz)	Power level (433 MHz)	Power level (900 MHz)
0	N/A	10 dBm	
1	14 dBm	7 dBm	
2	11 dBm	4 dBm	
3	8 dBm	1 dBm	
4	5 dBm	-2 dBm	
5	2 dBm	-5 dBm	20 dBm
7			16 dBm
8			14 dBm
9			12 dBm
10			10 dBm

Data Rate	Configuration	Indicative physical bit rate [bits/s]	Maximum payload [bytes]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250	51
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440	51
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980	51
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1760	115
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3125	222
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5470	222

LoRa : paramètres de communication

Dans la version EY, 16 canaux sont disponibles :

Channel Number	Parameters	Frequency band	
		868	433
Channel 0	Frequency (Hz)	868100000	433175000
	Duty cycle	302	302
	Data rate range	0-5	0-5
	Status	On	On
Channel 1	Frequency (Hz)	868300000	433375000
	Duty cycle	302	302
	Data rate range	0-5	0-5
	Status	On	On
Channel 2	Frequency (Hz)	868500000	433575000
	Duty cycle	302	302
	Data rate range	0-5	0-5
	Status	On	On
Channel 3 - 15	Frequency (Hz)	0 (to be configured by the user)	0 (to be configured by the user)
	Duty cycle	65535	65535
	Data rate range	15-15	15-15
	Status	Off	Off

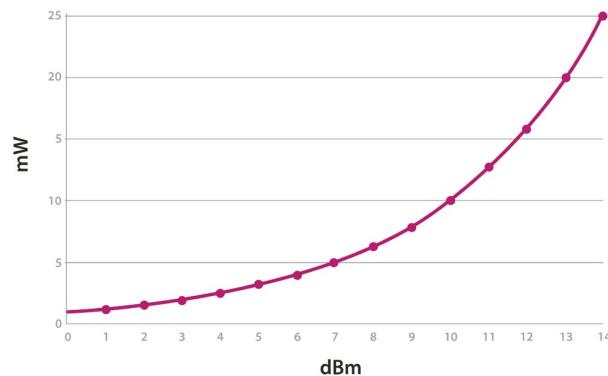
Le «duty cycle» X donné en pourcentage est calculé par : $dutycycle = 100/(X - 1)$, pour 302, la valeur est de 0,33%

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

SX1272 output power level



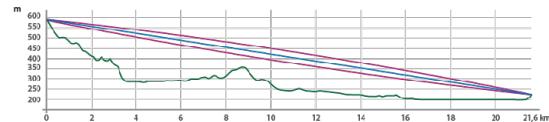
LoRa : test

40



Coupe du terrain :

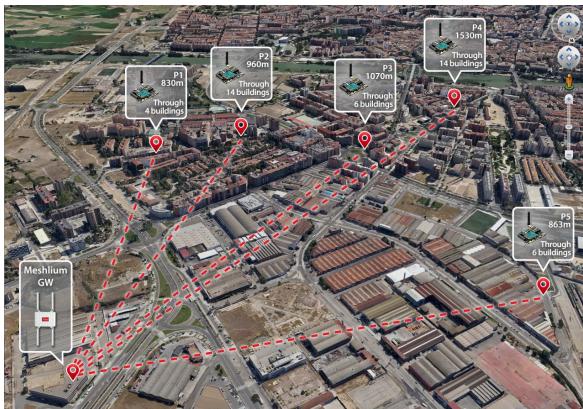
- ▷ la ligne bleue représente la ligne de vue ;
- ▷ l'ellipse mauve représente la zone de Fresnel ;
On notera qu'il n'y a pas d'obstacles dans la zone, ce qui minimise la FSPL, «Free-Space Path Loss».



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
	21.6 km (13.4 miles)	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

LoRa : test

41



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

LoRa : bilan

42

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 «symbol» 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**.

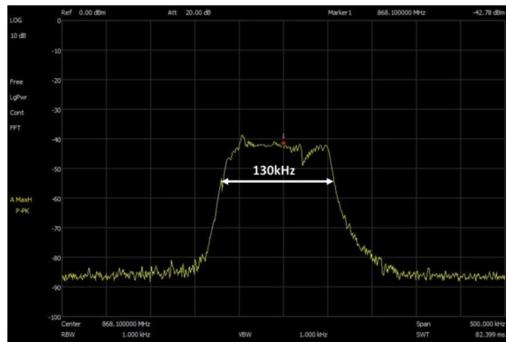
LoRa : quelques conclusions

29

- LoRa ne transmet 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) ;

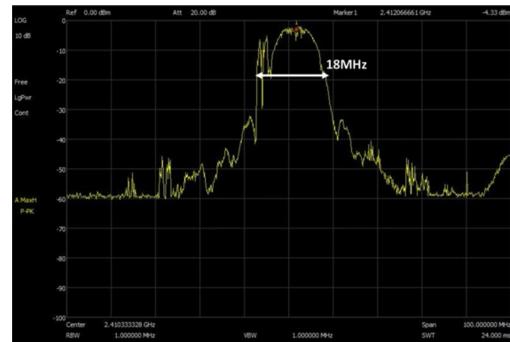
Comparaison entre WiFi et LoRa

LoRa bandwidth :



consommation de 125mA pendant la durée de transmission

WiFi bandwidth :



consommation de 380mA pendant la durée de transmission

LoRa : bilan

42

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

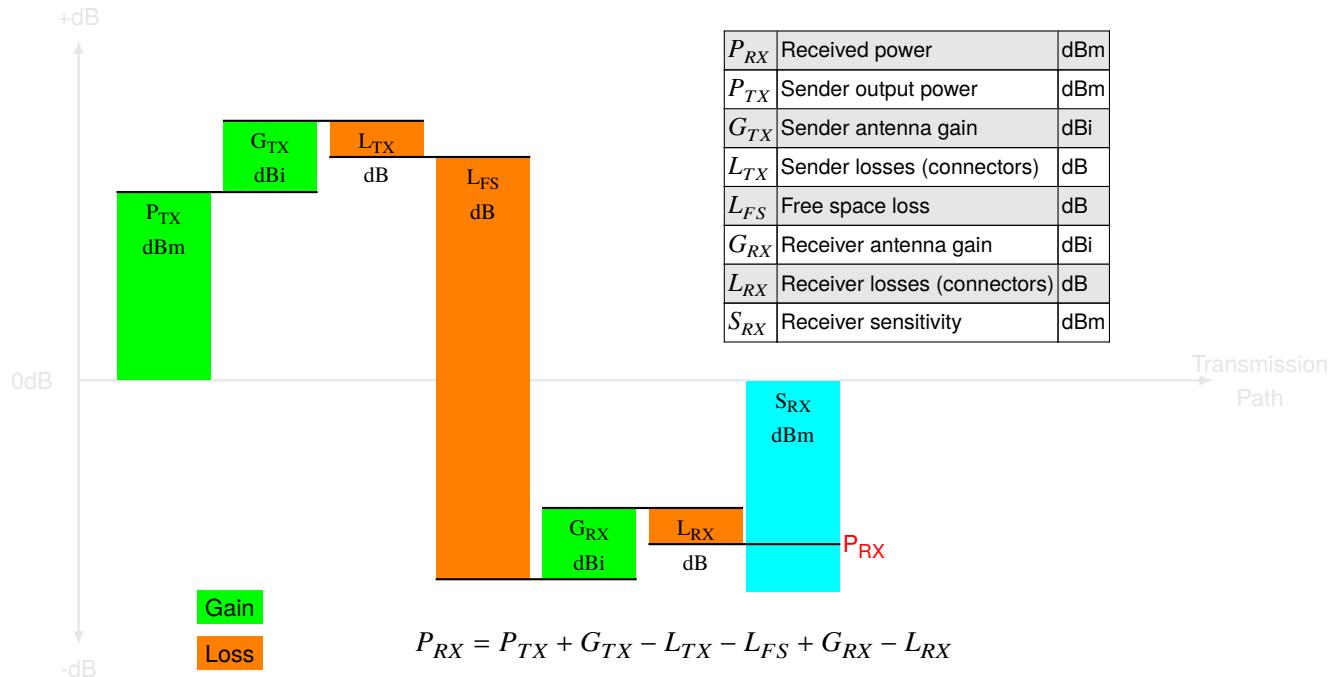
Le choix de la «*bandwidth*» doit être fait de manière à garantir que l'émetteur et le récepteur soient à moins de 20% de la «bw» en déviation de fréquence l'un par rapport à l'autre.

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

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

La sensibilité de LoRa est très bonne $\leq 140\text{dBm}$: réception des signaux dont l'ordre de grandeur, peut aller jusqu'à 10^{-7} .

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 : $\text{Max Channel Noise} = P_{RX} - \text{SNR}_{MIN}$.

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

Pour l'utilisation des «hat» dragino pour Raspberry Pi, vous installerez la version de la bibliothèque RadioHead adaptée par Charles Hallard :

xterm

```
$ git clone https://github.com/hallard/RadioHead
```

Vous compilerez le code client/serveur du répertoire «RadioHead/examples/raspi/rf95/» :

```
1 rf95.setFrequency(868);
2 rf95.setSpreadingFactor(7);
3 rf95.setSignalBandwidth(125E3);
4 rf95.setCodingRate4(5);
5 rf95.setTxPower(20, false);
6 /*
7 //Different Combination for distance and speed examples:
8 Example 1: Bw = 125 kHz, Cr = 4/5, Sf = 128chips/symbol, CRC on. Default medium range
9 rf95.setSignalBandwidth(125000);
10 rf95.setCodingRate4(5);
11 rf95.setSpreadingFactor(7);
12 Example 2: Bw = 500 kHz, Cr = 4/5, Sf = 128chips/symbol, CRC on. Fast+short range
13 rf95.setSignalBandwidth(500000);
14 rf95.setCodingRate4(5);
15 rf95.setSpreadingFactor(7);
16 Example 3: Bw = 31.25 kHz, Cr = 4/8, Sf = 512chips/symbol, CRC on. Slow+long range
17 rf95.setSignalBandwidth(31250);
18 rf95.setCodingRate4(8);
19 rf95.setSpreadingFactor(9);
20 Example 4: Bw = 125 kHz, Cr = 4/8, Sf = 4096chips/symbol, CRC on. Slow+long range
21 rf95.setSignalBandwidth(125000);
22 rf95.setCodingRate4(8);
23 rf95.setSpreadingFactor(12);
24 */
```