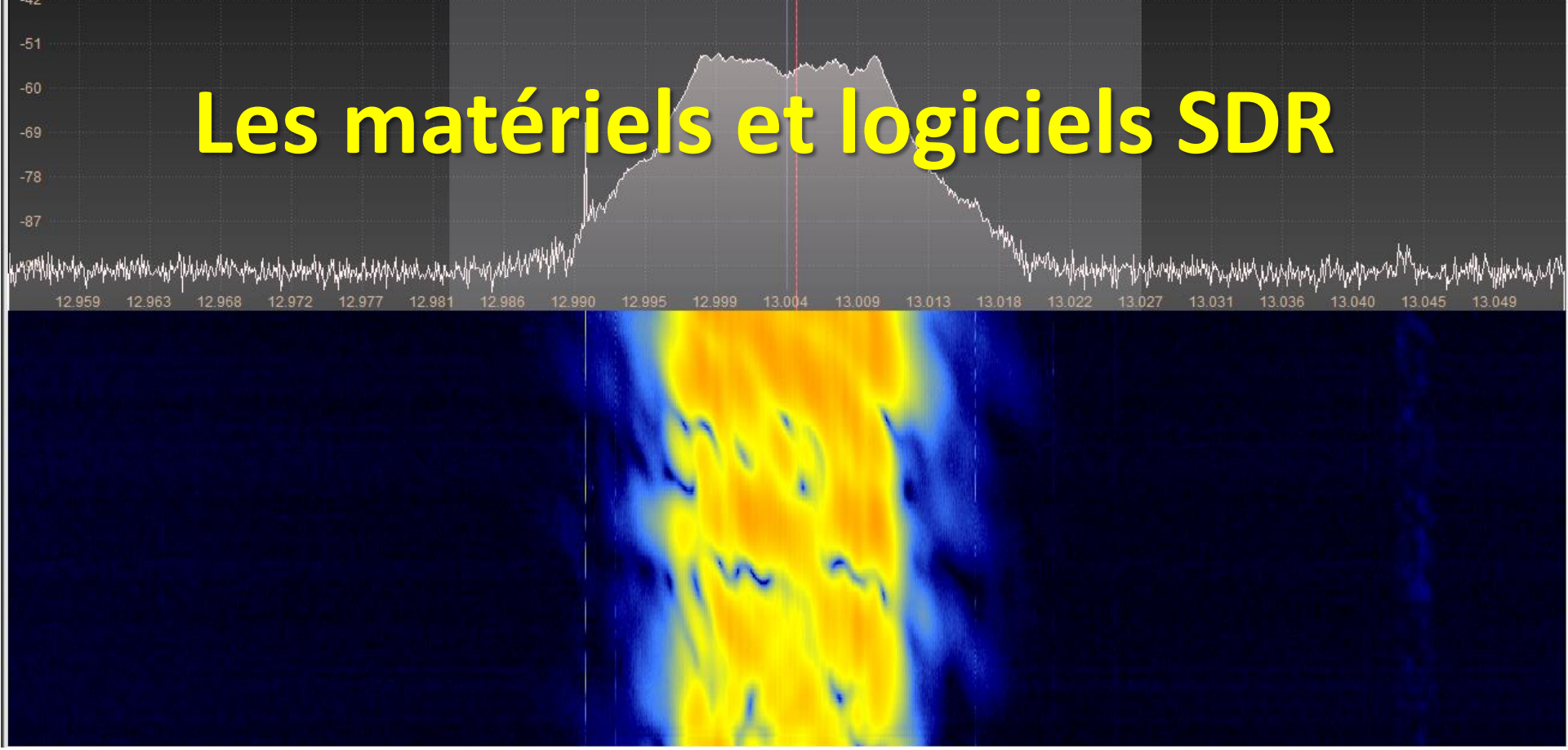
Les matériels et logiciels SDR



Sylvain F4GKR

Congrès du REF

Radioamateurs du Haut-Rhin
www.ref68.com

Les logiciels et matériels SDR

- Introduction
- Première partie : La théorie
- Seconde partie : Architecture matérielle et logicielle
- Troisième partie : le matériel pour les amateurs

Objectifs de la présentation

- Un peu de théorie pour présenter les concepts et comprendre comment ça fonctionne,
- Un tour d'horizon de quelques matériels disponibles pour les amateurs
- Avec dans l'idée de vous aider à savoir de quoi vous avez besoin (=combien dépenser…)

Origines

- Première apparition du terme « Radio Logicielle » dans une publication du chercheur Joseph Mitola – 1991 «*Software Radio: Survey, Critical Analysis and Future Directions*»

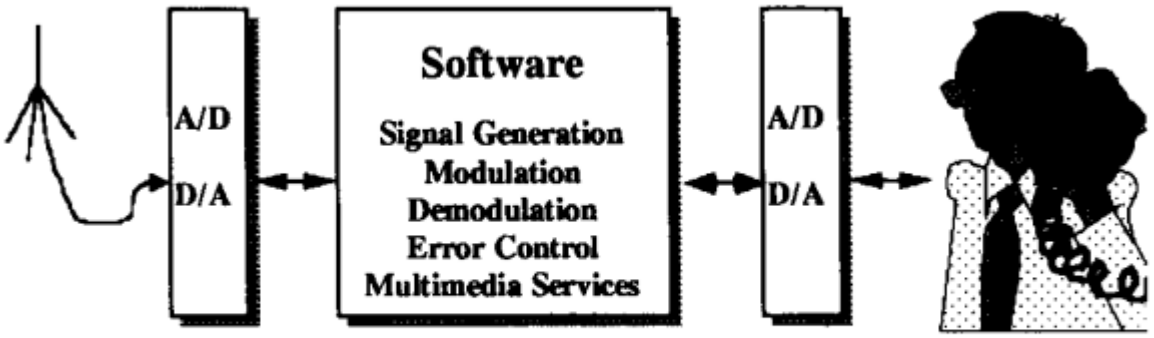
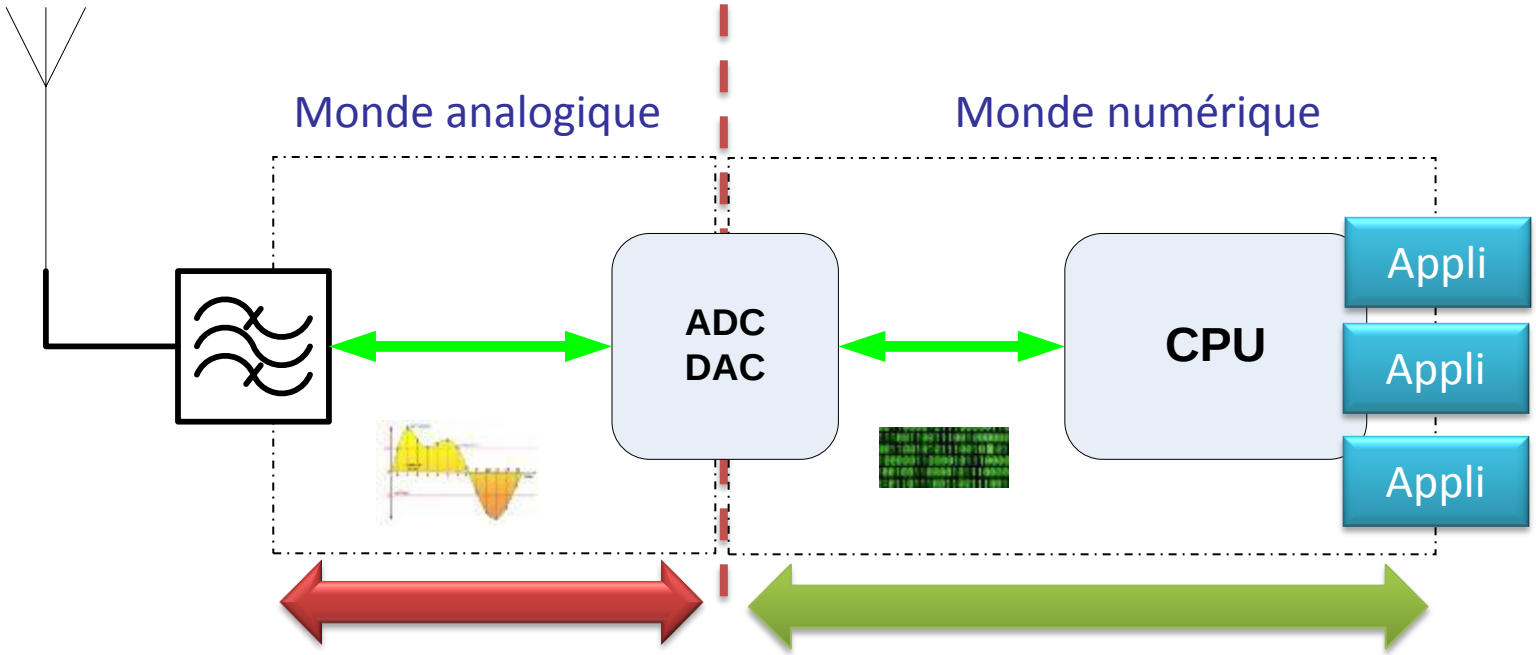


Figure 1, An Idealized Software Radio

SDR : Architecture “idéale”



Les éléments qui composent le SDR idéal :

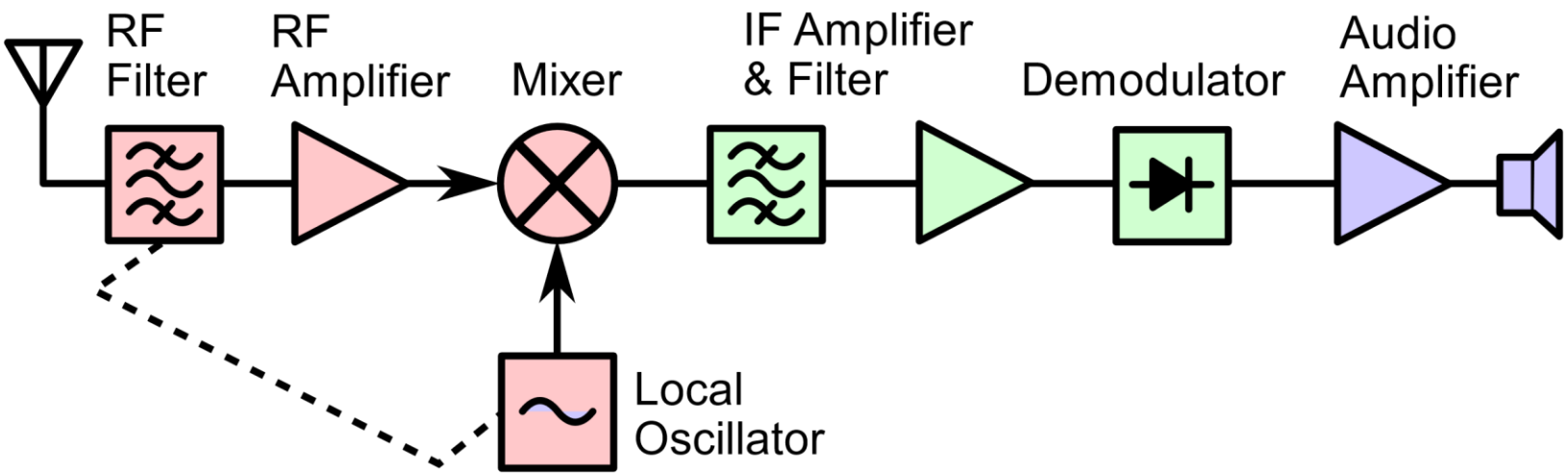
- **Une antenne et un peu de filtrage,**
- **Des circuits de conversion analogique/numérique,**
- **CPU + applications.**

Avec un « monde analogique » aussi réduit que possible

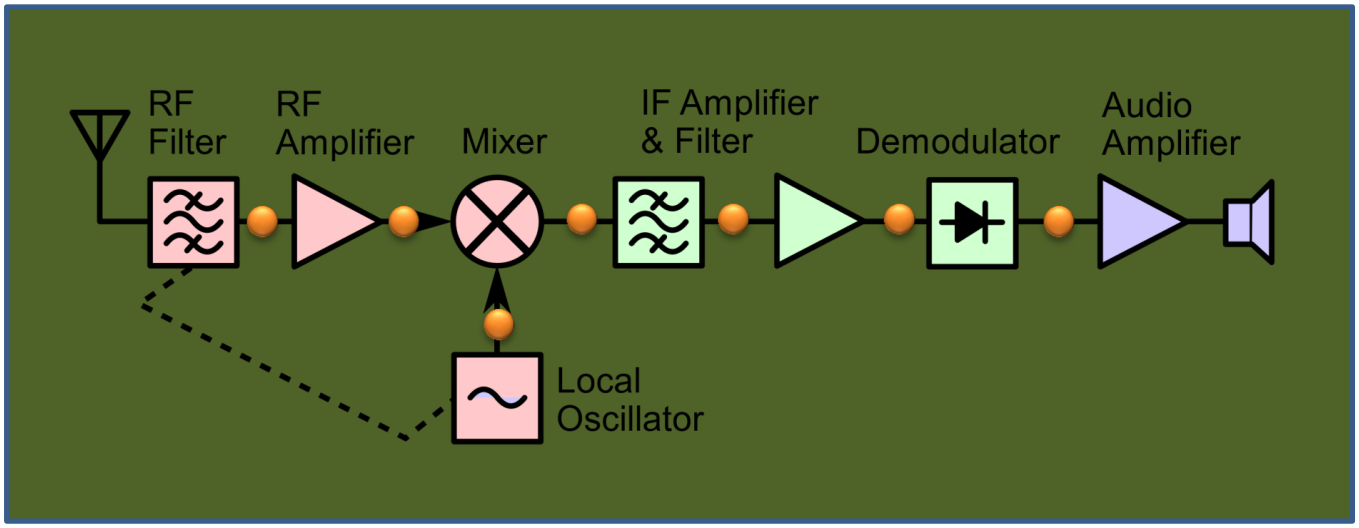
PREMIÈRE PARTIE

Un peu de théorie pour comprendre d’où ça vient et comment ça fonctionne

Récepteur radio « conventionnel »

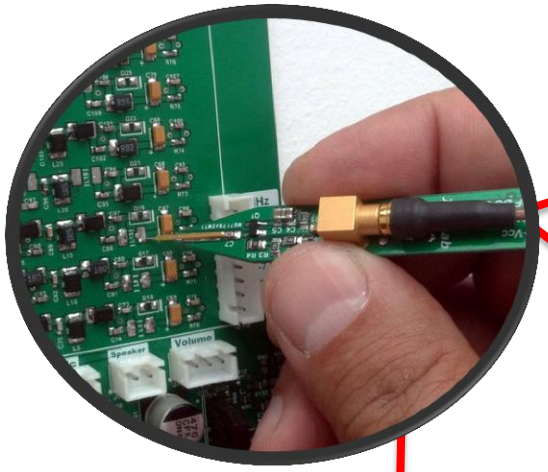


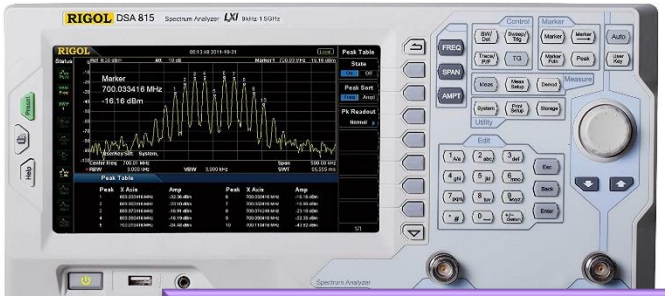
Un « récepteur SDR » va chercher à remplacer le maximum de ces blocs fonctionnels par des opérations réalisées dans un logiciel.



- **QUELLE EST L'INFORMATION TRAITÉE ?**

Ce qu'il y a dans les fils





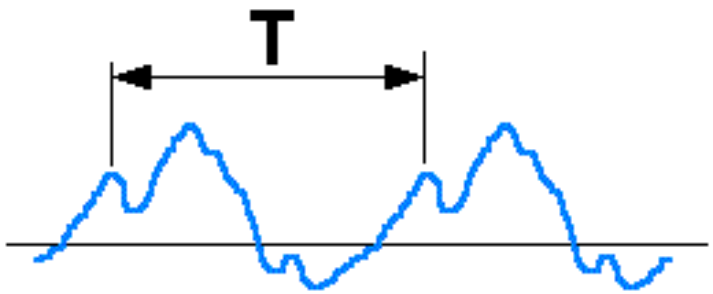
Domaine fréquentiel (« spectre »)

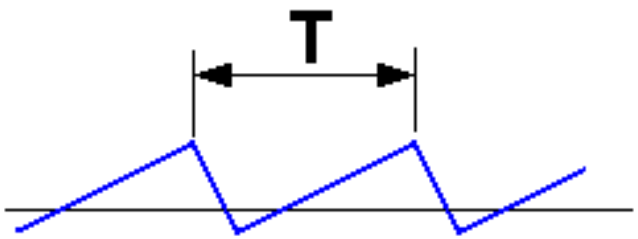
Domaine Temporel (« instantané »)

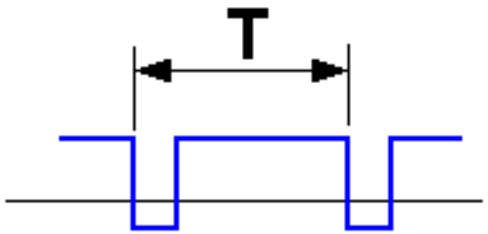
Domaine Temporel (« moyenne»)

Signal périodique

- Un signal est dit **périodique** si les variations de son amplitude se reproduisent régulièrement au bout d'une période ***T*** constante



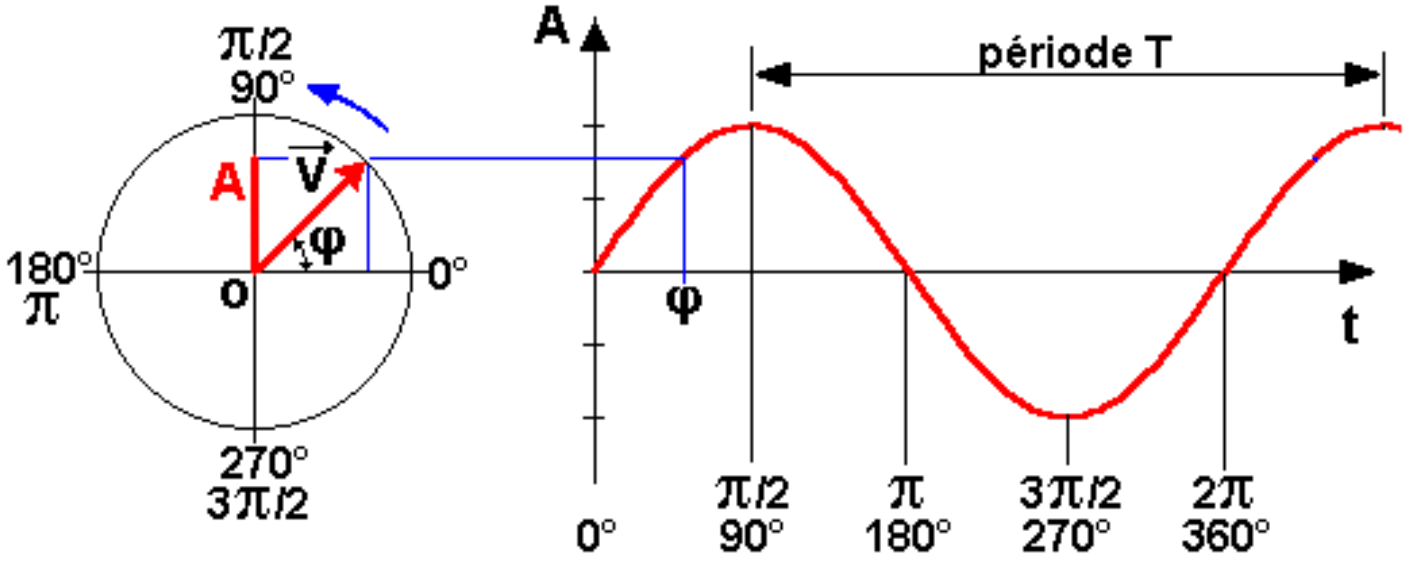




On sait que le signal est périodique si on l'observe pendant « assez longtemps »

→Si on observe pendant T, on ne peux pas être sûr que le signal se répète après… Pour une observation de durée T, la plus grande période observable est donc T/2

Cas particulier: signal « sinusoïdal »



$$s(t) = A\,\sin(\omega t + \varphi)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

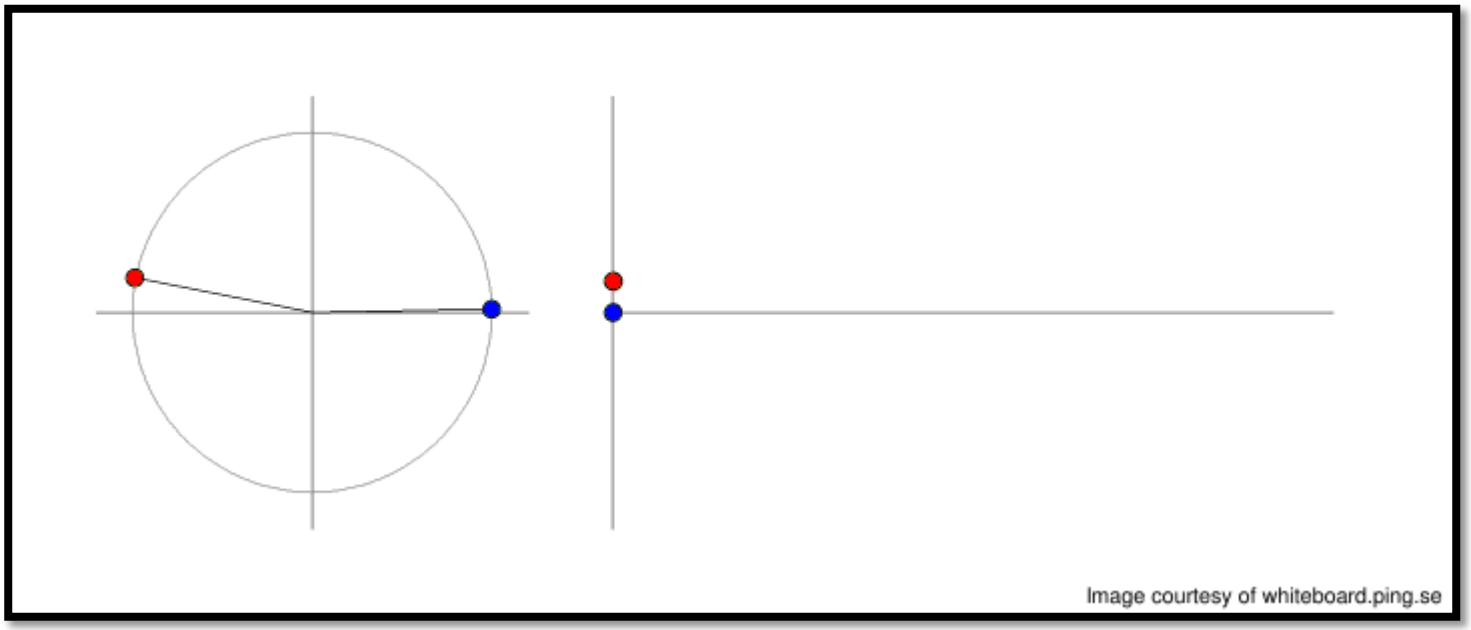
Nyquist et Shannon

- On se fixe une durée de l'observation T
- Le théorème de Nyquist-Shannon dit:
  - Si un signal x ne contient pas de fréquence supérieure à 1/T, il est alors complètement déterminé si l'on prend **2 mesures pendant T**.
  - Cette limite f=1/T est la fréquence de Nyquist

- Il suffit de **2 mesures** pour connaître un signal
- Pour plus de détails sur la partie « théorique », voir la présentation faite à F8KCF en mars 2017 :

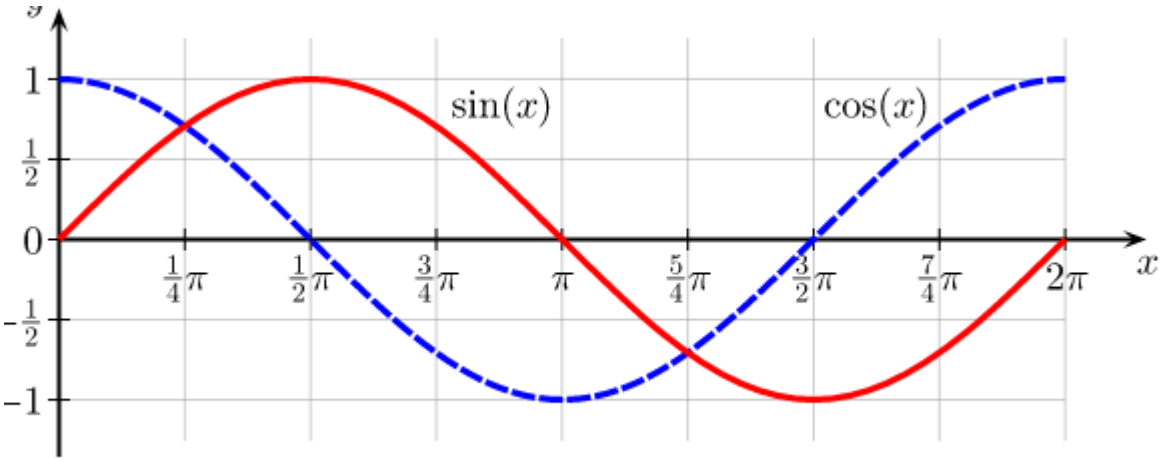
http://f8kcf.free.fr/index.php/the-news/115-conf-sdr-docs

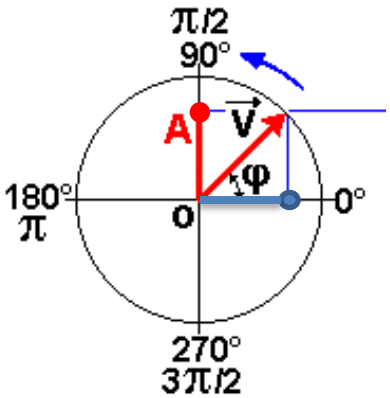
2 mesures… Oui ou non ?



- Les deux signaux n'évoluent pas « dans le même sens » et pourtant leur représentation temporelle est identique (donc ça va pas)

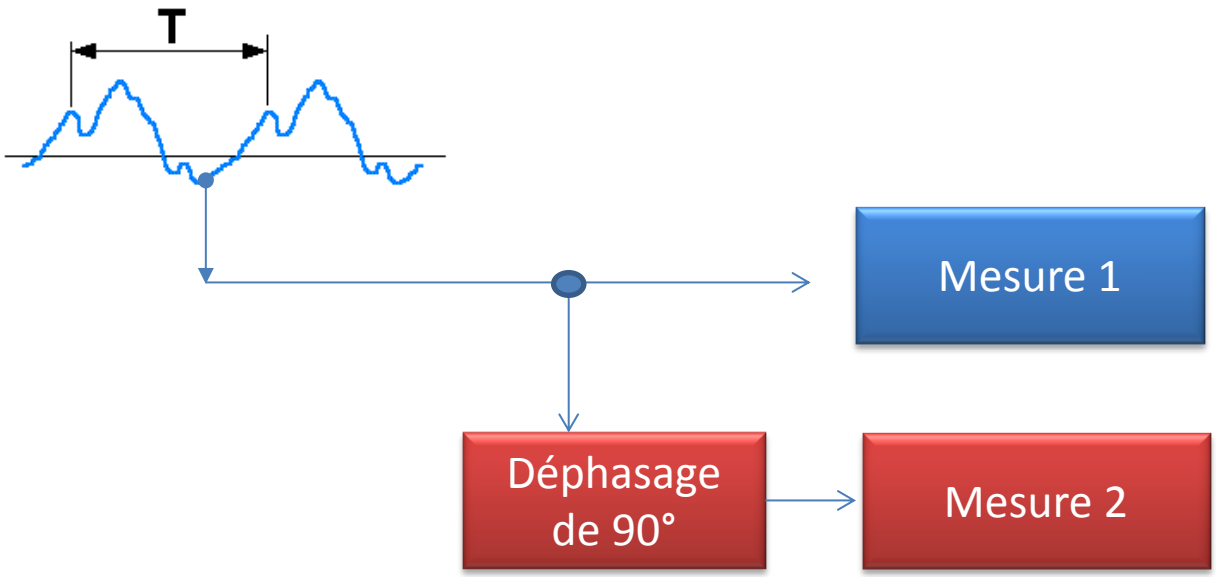
sin(x) et cos(x)





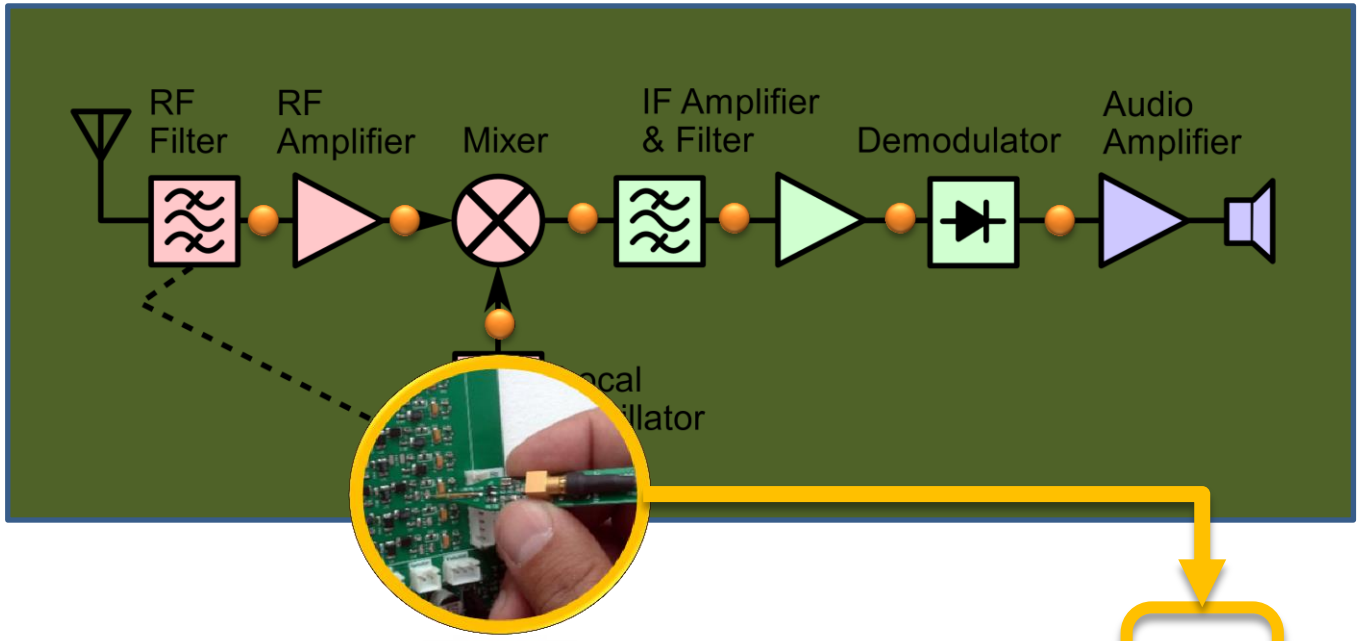
- « sinusix » et « cosinusix » sont les mêmes courbes, mais **déphasées** de 90°
- Si on mesure **aussi** - <u>en même temps</u> - le rouge **ET** le bleu, on a le sens de rotation

En pratique on fait



- Le signal à quantifier est déphasé de 90° puis mesuré
- On parle de signaux « IQ » ou « Complexes »

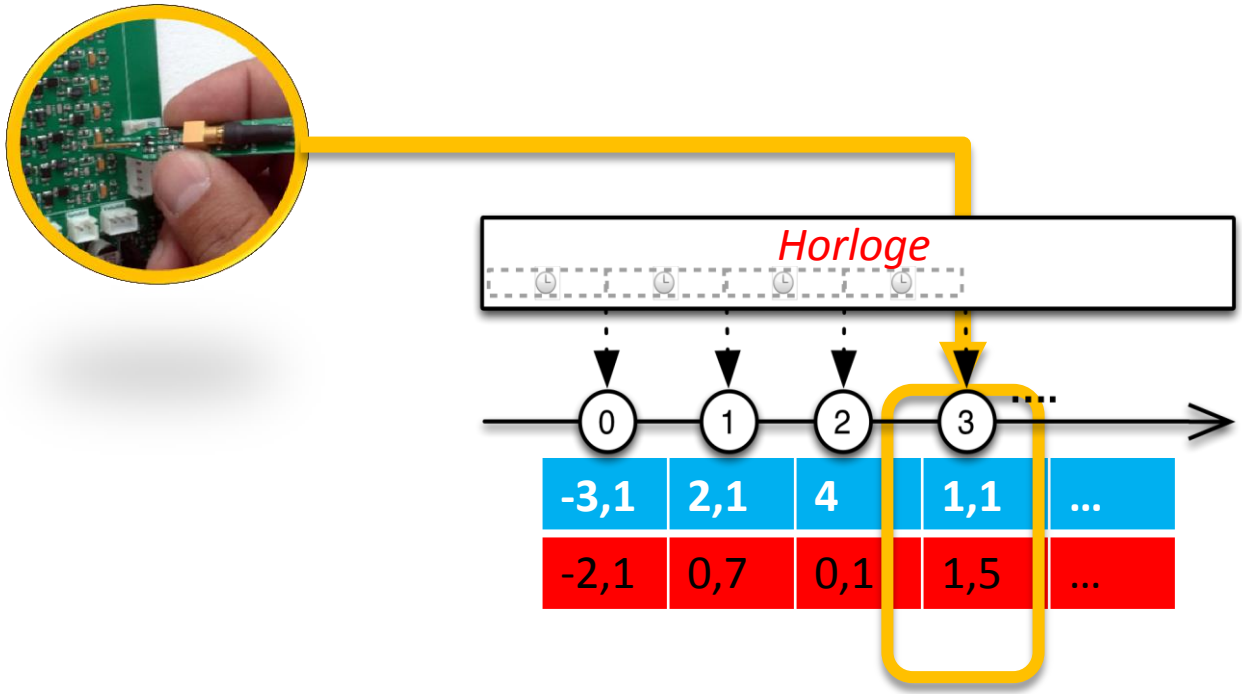
Information = série de valeurs



0,21	0,5	-1,4	2,1	0,7	-3,1	2,1	4	1,1	…
1,8	-0,1	2,2	-0,2	1,99	-2,1	0,7	0,1	1,5	…

On traite une série de valeurs mesurées (échantillons) et on applique des opérations sur ces valeurs

Information = série de valeurs



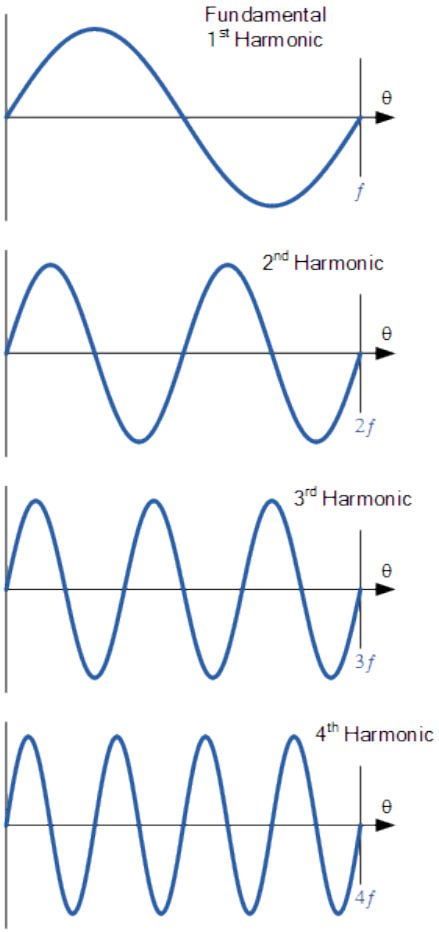
Quand l'intervalle de temps T entre deux échantillons est constant… Nyquist nous a dit (tôt ce matin ☺) que on pouvait représenter des signaux de fréquence < 1/T

Exemple :

- T = 1µseconde
- Fmax = 1MHz

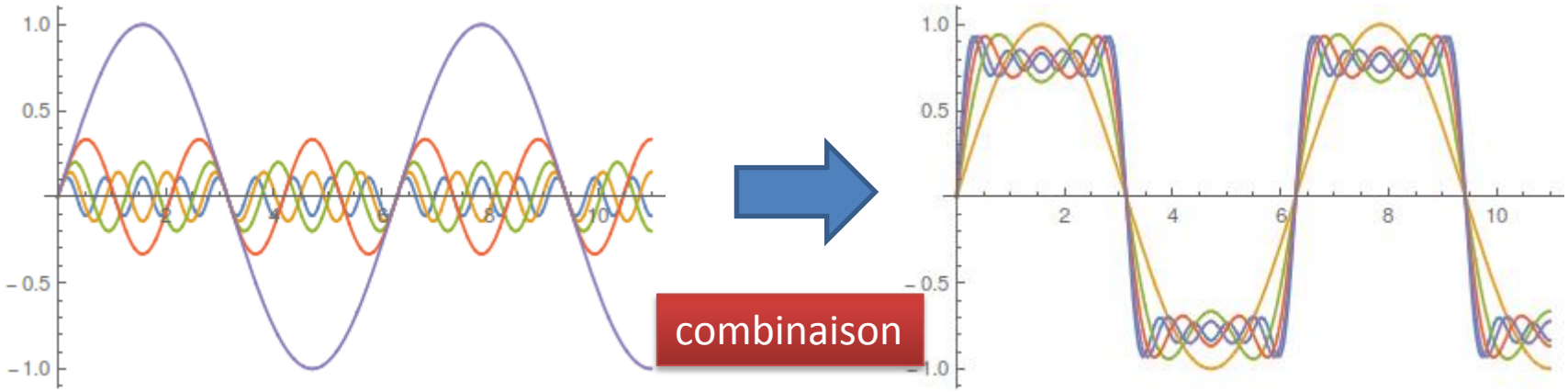
Harmoniques

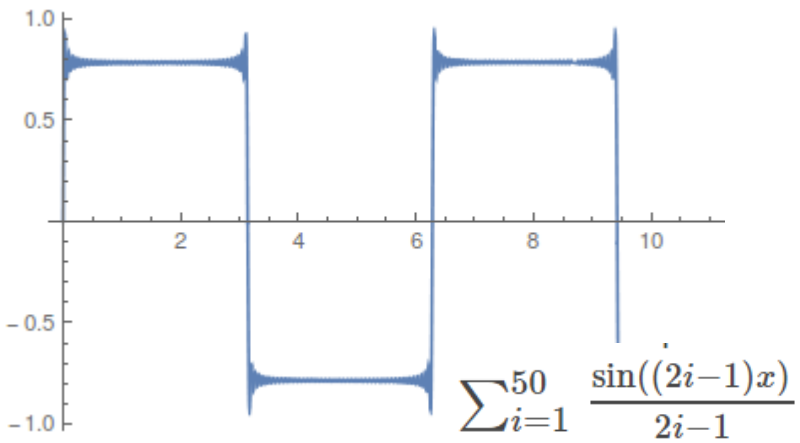
Une harmonique d'un signal ***s*** est un signal dont la fréquence est un multiple **entier** de la fréquence de ***s***

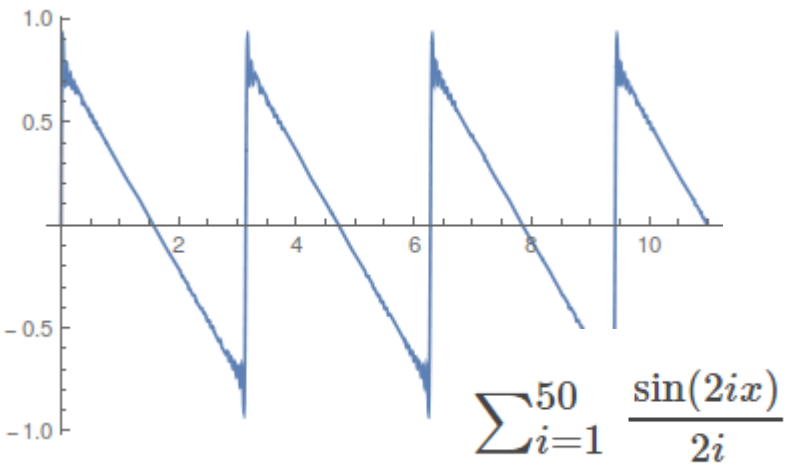


Harmonic Waveforms

Combinaison de signaux harmoniques

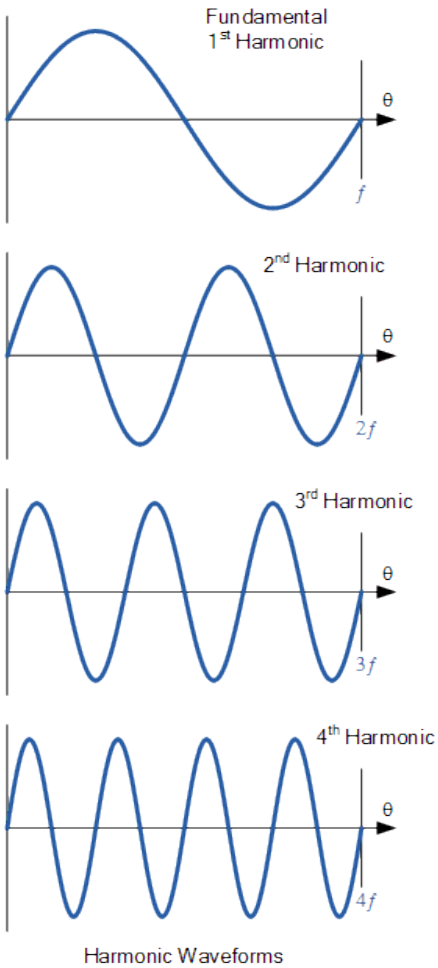




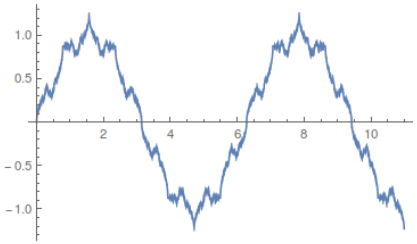


Source: http://hawaiireedlab.com/wpress/?p=1693

Synthétiser un signal



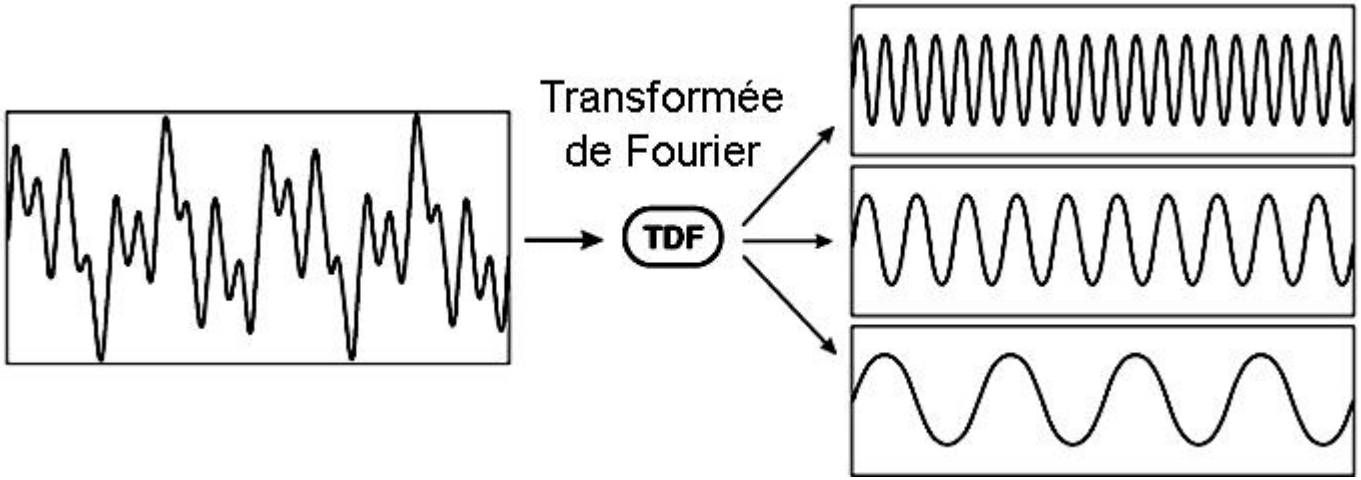
En combinant « comme il faut » des signaux sinusoïdaux* harmoniques, on peut « synthétiser » d'autres signaux périodiques (mais pas des sinusoïdes)



**Remarque : on peut aussi utiliser autre chose que des sinusoïdes…*

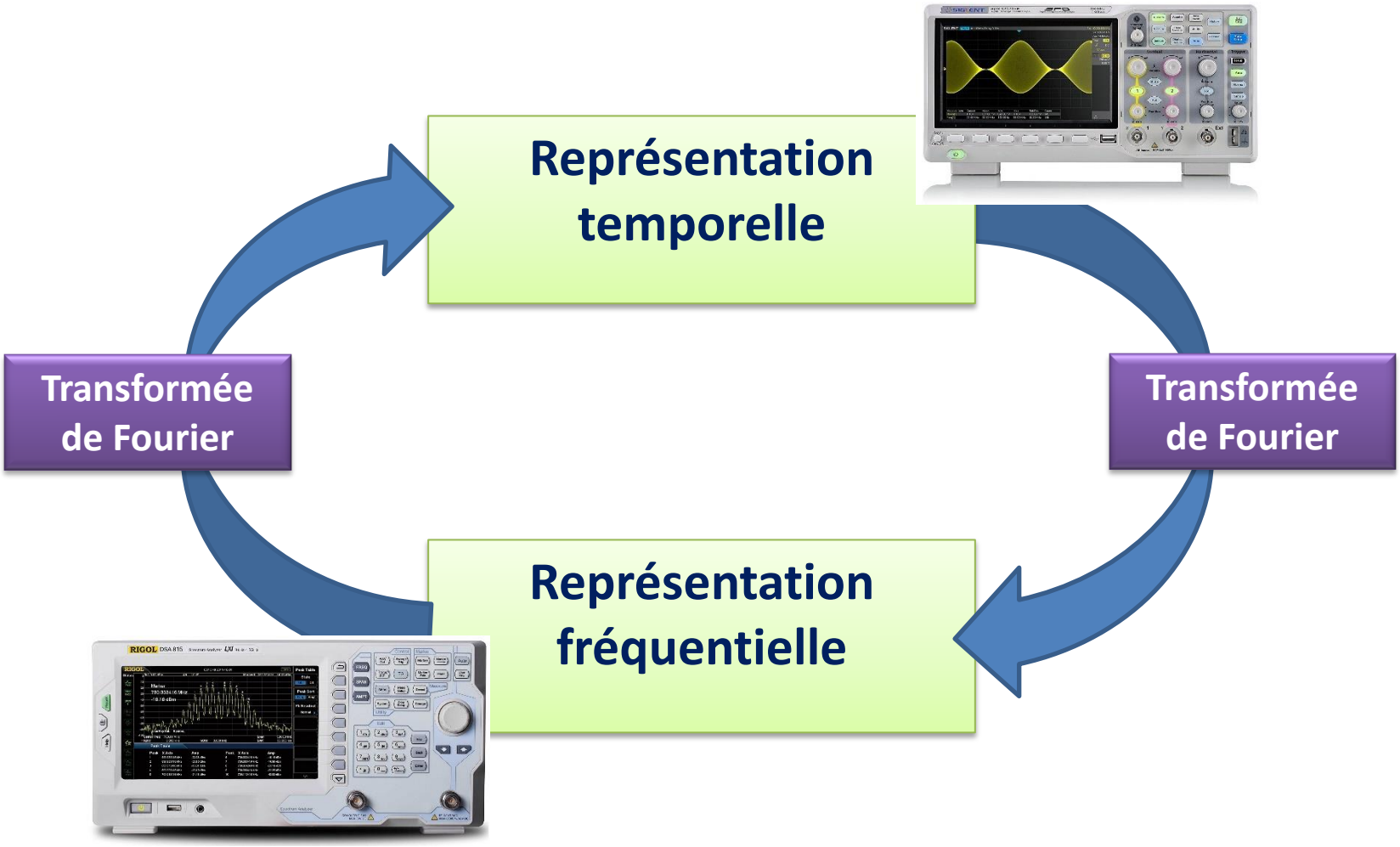
Décomposer un signal

A partir d'un signal d'entrée, retrouver les « ingrédients » qui ont servi à le générer
C'est le processus inverse de ce qui a été vu précédemment



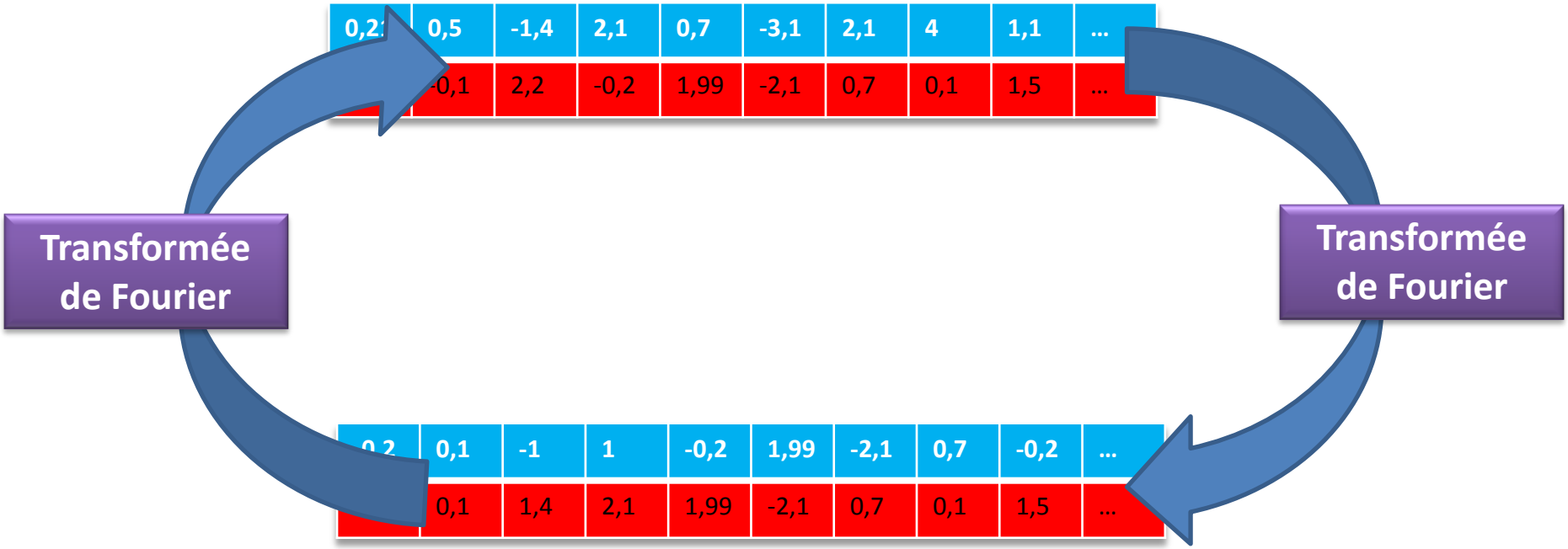
La transformée de Fourier (joseph) permet de faire cette décomposition

Synthétiser/Décomposer

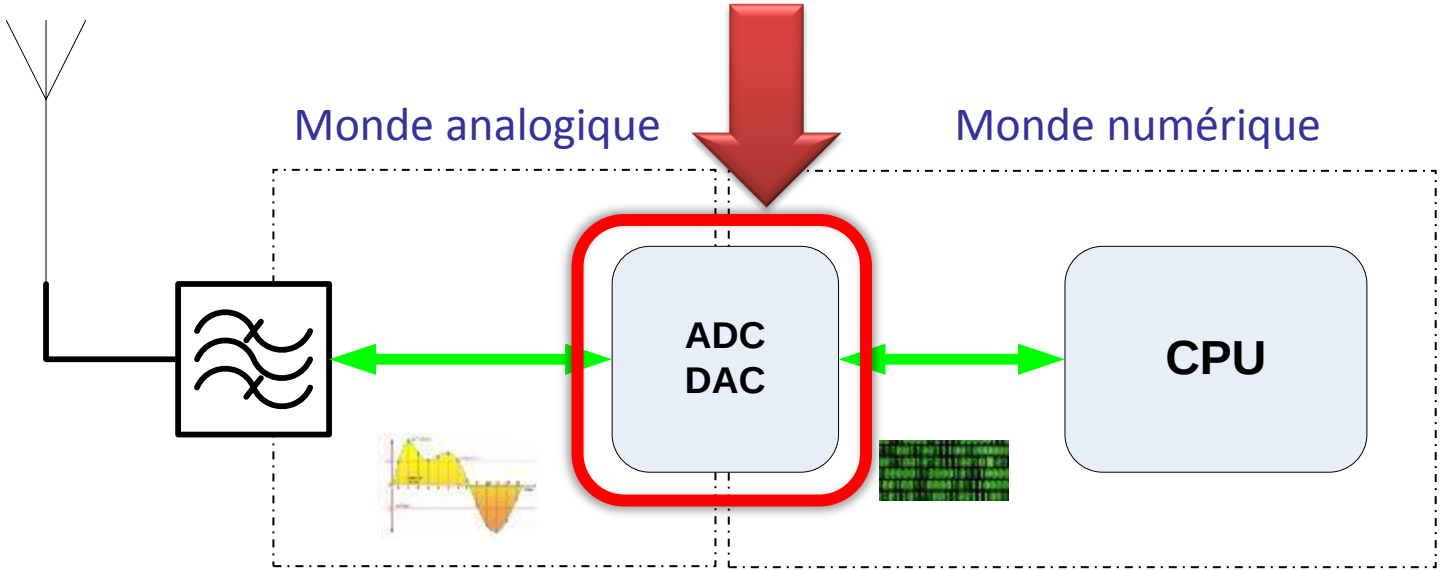


Synthétiser/Décomposer

Domaine temporel : un échantillon = une mesure à un instant donné



Domaine fréquentiel : un échantillon = une « certaine intensité et phase » de signal à une « certaine fréquence »



DE L'ANALOGIQUE AU NUMÉRIQUE

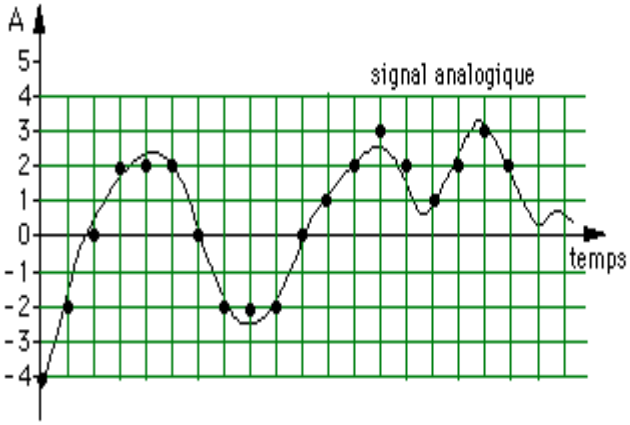
(« *DU COAX AUX SIGNAUX* »)

Conversion analogique → numérique

- On a besoin d'une horloge d'échantillonnage régulière à une fréquence F_{ech}
- Comme il faut 2 mesures… :
  - Si on a 1 seul ADC, il faudra 2 échantillons qui permettront de numériser jusqu'à $F_{ech}/2$.
  - Que si on a 2 ADC et un déphaseur 90°, 1 seul échantillon **PAR ADC** permettra d'échantillonner jusqu'à F_{ech}

Dans les deux cas, on a $2*F_{ech}$ mesures

La conversion analogique / numérique

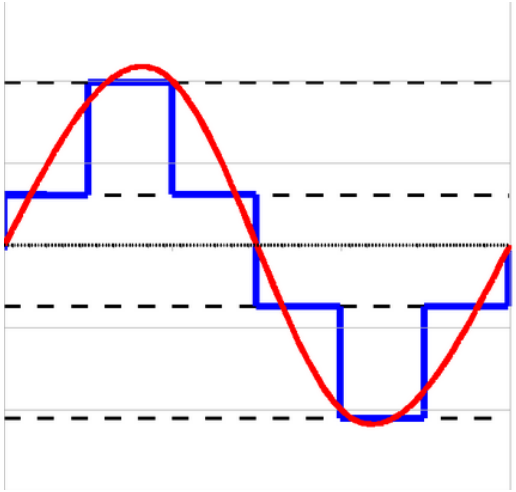


t	val
0	-4
1	-2
2	0
3	2
4	2
5	2
6	0
7	-2
8	-2
9	-2
	...

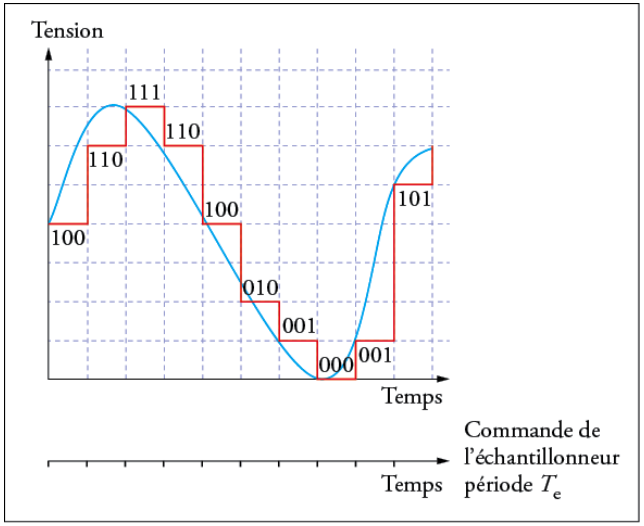
On va « mesurer » la tension entrante à des instants précis.

Les ADC qui comportent un étage d'échantillonnage blocage sont les bienvenus… la valeur à mesurer ne doit pas changer pendant la mesure.

La conversion analogique / numérique



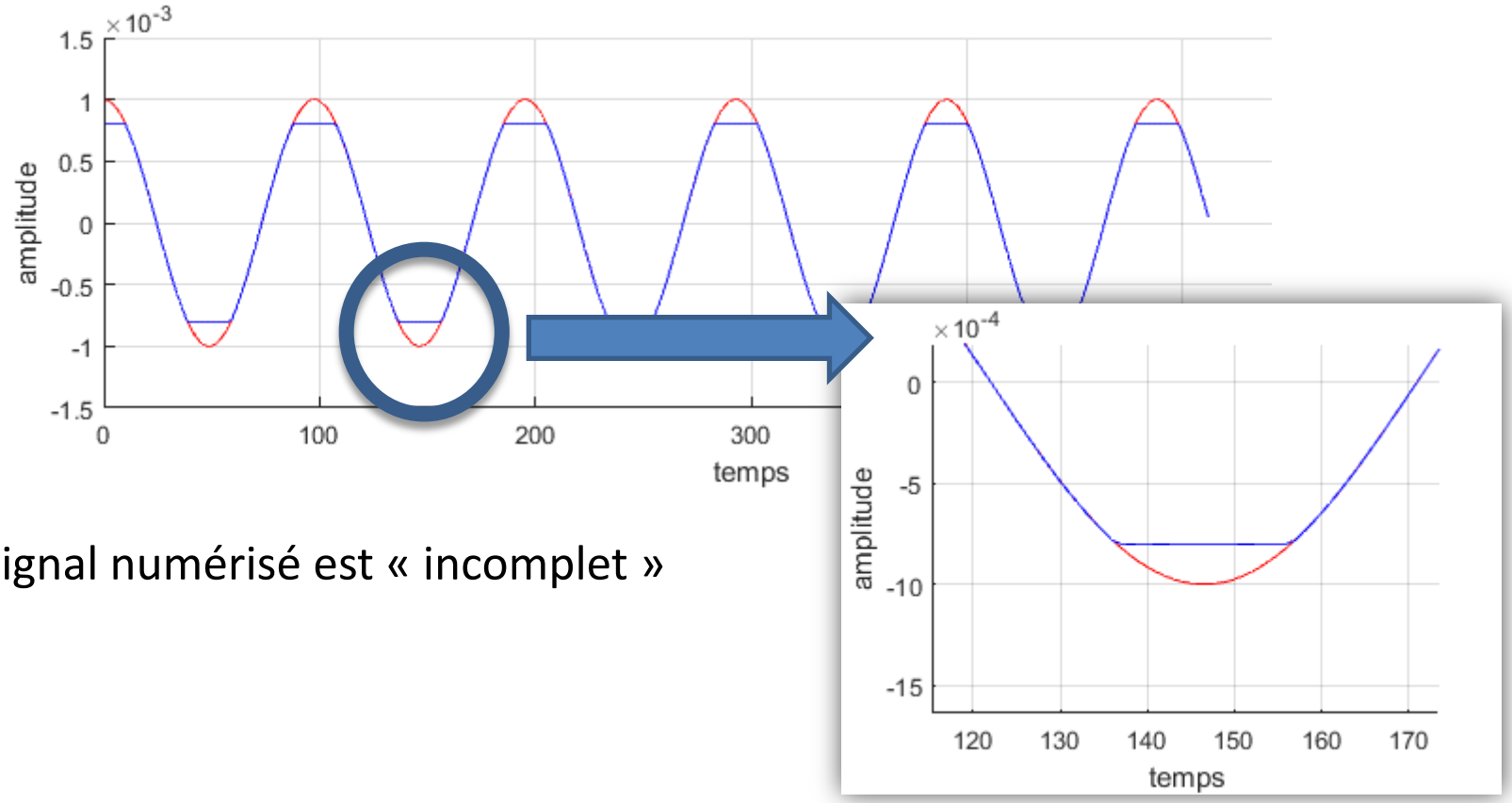
11
10
01
00



En fonction de la **résolution** du circuit (nombre de bits), on obtiendra une représentation plus ou moins « fidèle »

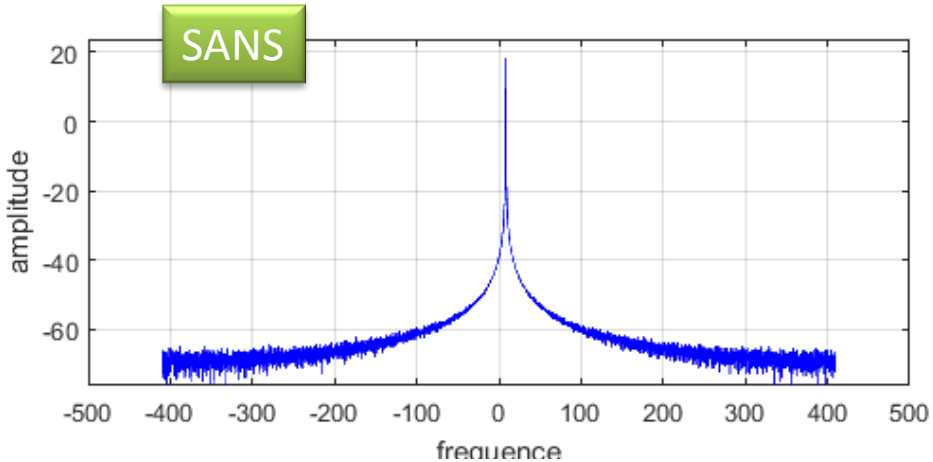
Saturation à l'entrée

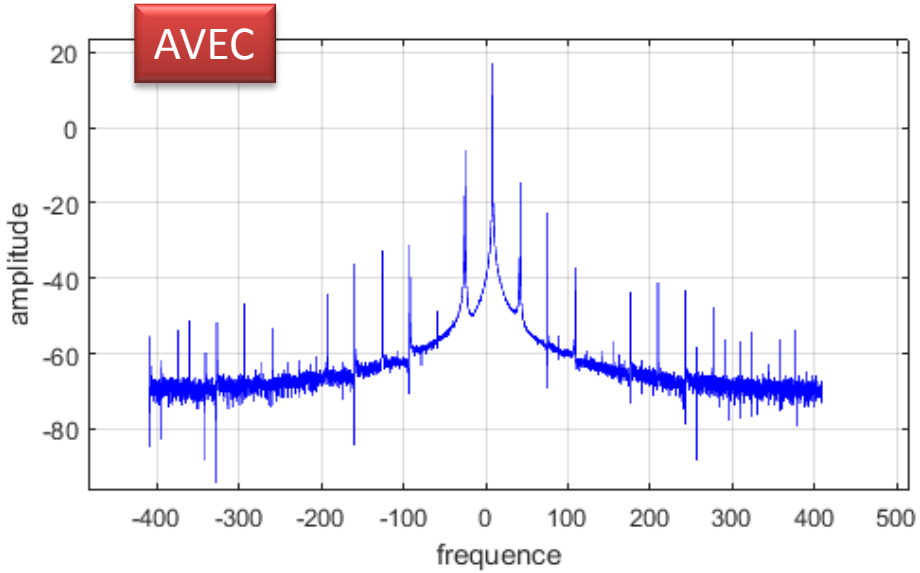
Gain trop important ou signal entrant trop fort avec saturation de l'amplificateur, ou dépassement VREF adc :



Le signal numérisé est « incomplet »

Saturation





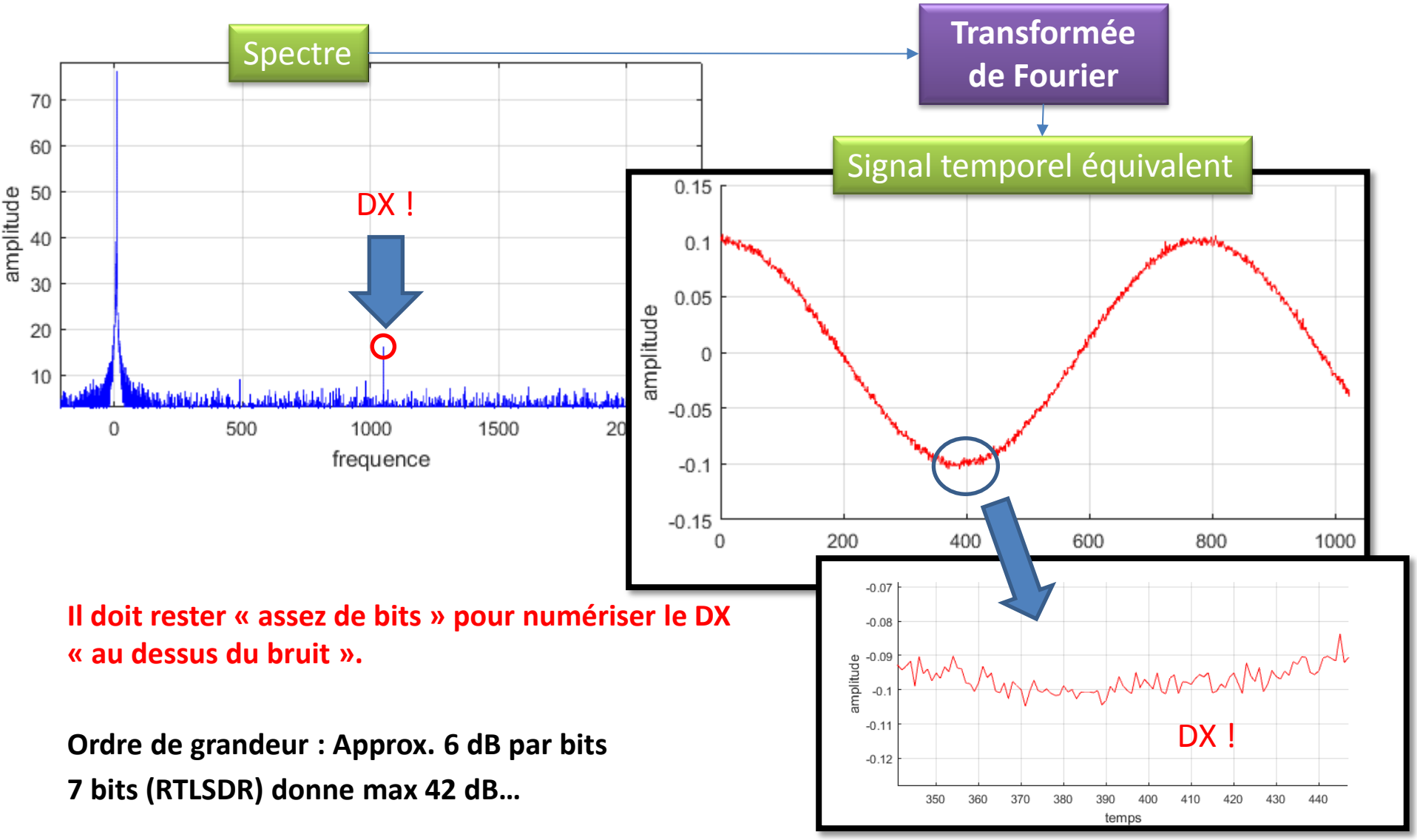
- Apparition de signaux « fantômes » sur le spectre,
- Apparition de porteuses audibles après démodulation

Dynamique

Contexte du problème:

- Deux signaux à l'entrée: un signal utile très faible et un « brouilleur » très fort (exemple: station japonaise sur 7MHz à côté émission AM très forte)
- L'ADC doit avoir « assez de bits » pour numériser les deux

Dynamique

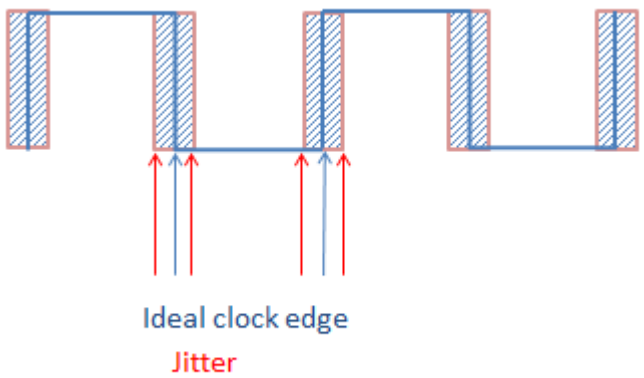


Il doit rester « assez de bits » pour numériser le DX « au dessus du bruit ».

Ordre de grandeur : Approx. 6 dB par bits

7 bits (RTLSDR) donne max 42 dB…

Horloge de numérisation : *Jitter*

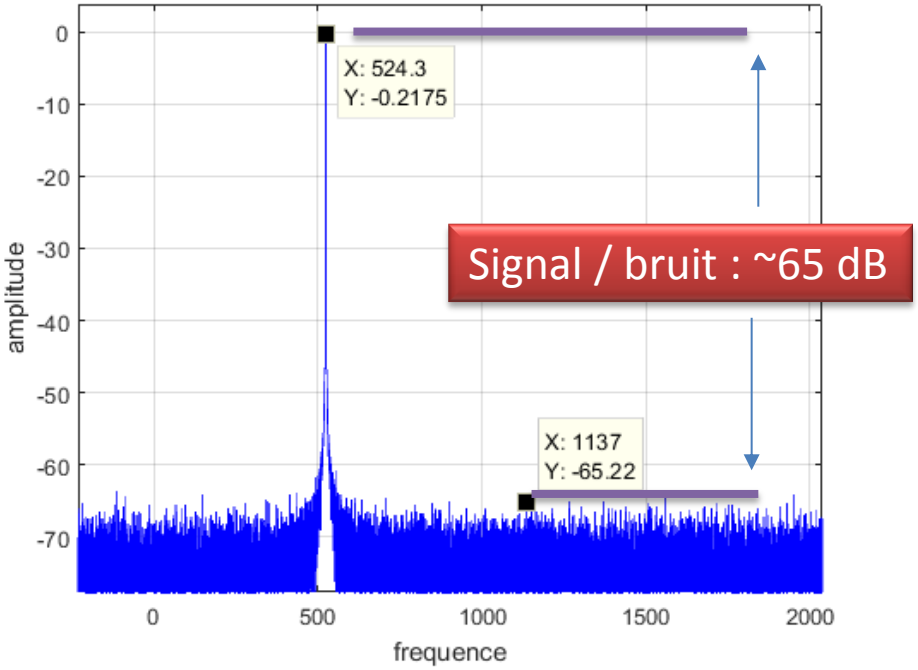


Le bruit d'horloge d'échantillonnage se traduira par une « prise de mesure » à un autre instant que celui qui était prévu.

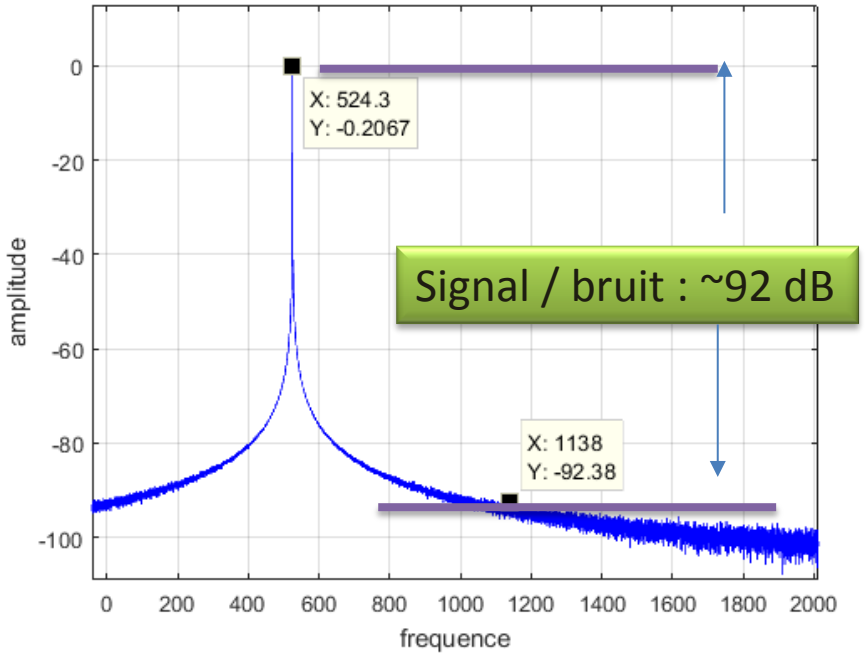
Il vaut mieux une horloge stable qu'une horloge juste…

Horloge de numérisation : *Jitter*

±5 µs d'erreur sur Fclock=100 KHz :



±5 ns d'erreur sur Fclock=100 KHz :



Dans cette simulation, la différence est de l'ordre de 30 dB !

Aparté statistique

Je lance une pièce :

- « Pile » … ou « face »

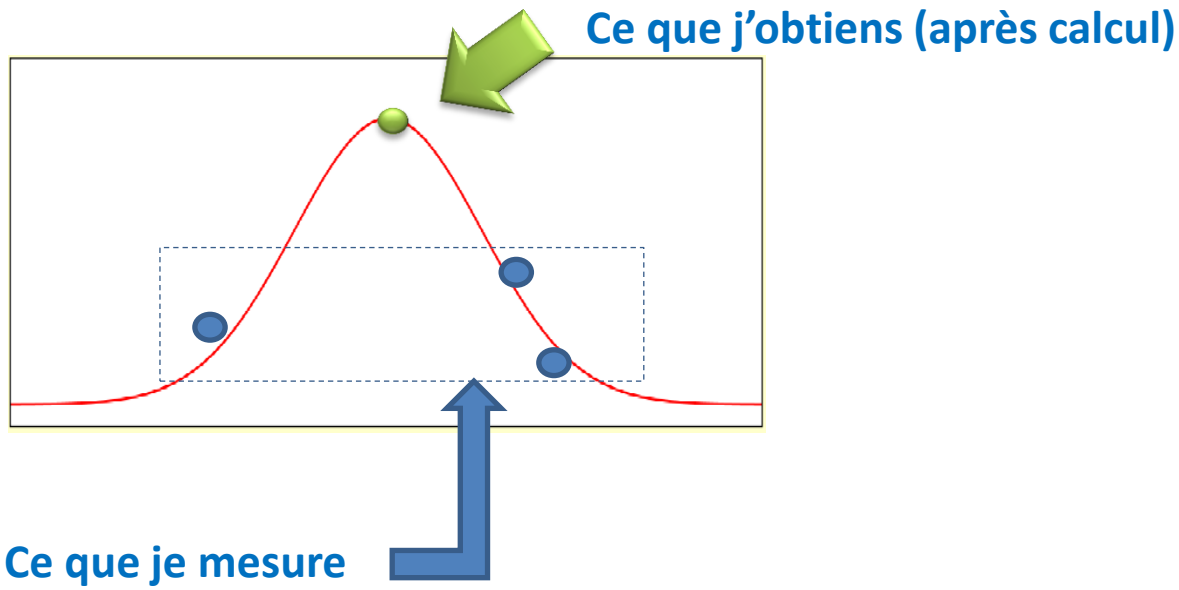
Une chance sur 2 ?

Si on lance « beaucoup beaucoup » de fois une pièce, oui…

Loi Normale – Courbe de Gauss

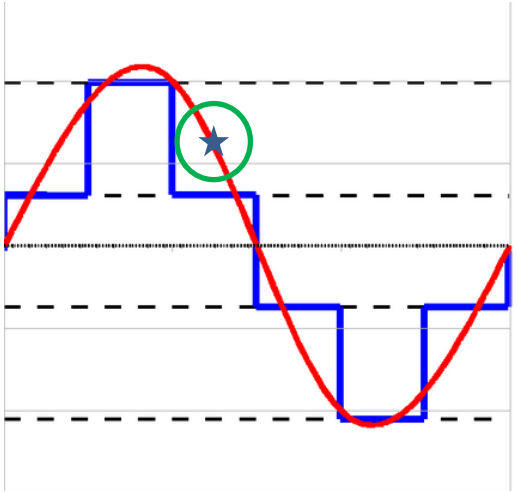
Si mon « expérience » est gaussienne… et que je connais quelques valeurs, alors…
Je peux estimer la « vraie » valeur

(on l'appelle l'espérance d'ailleurs ☺)



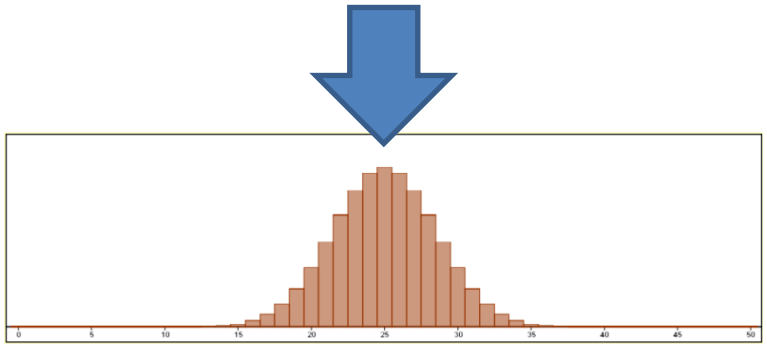
Retour au signal discret

Si le phénomène mesuré obéît à une loi normale (au sens gaussien) … alors… ?



11
10
01
00

1 mesure : 11 ou 10
2 mesures: (11,11) puis (11,10)
Ou (11,10) puis (10,11)
Ou…



Le sur-échantillonnage permettra d'obtenir une meilleure « mesure » (estimation) de la valeur à l'instant t

SDR : Numériser un signal RF

- On cherche à faire un SDR sur la bande 14.000 à 14.350

- Quelle est la fréquence d'échantillonnage nécessaire ?

  – Réponse 1 : 28700 KHz (2*14350 Nyquist)
  – Réponse 2 : 700 KHz
  – Réponse 3 : 350 KHz
  – Réponse 4 : euuh…. j'ai besoin d'une pause café

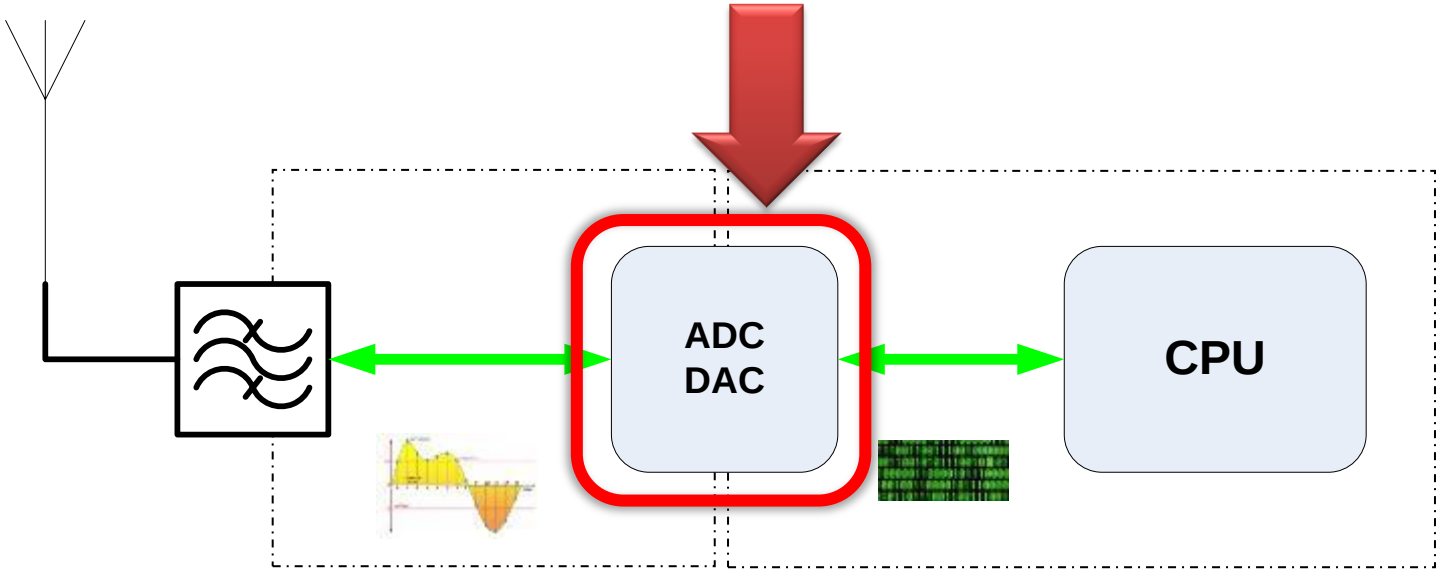
Numériser un signal RF

- Toutes les réponses sont bonnes… mais ne coûtent pas le même prix et n'ont pas les mêmes conséquences

- En pratique 4 solutions possibles:
  - Echantillonnage direct (28.7 MHz) avec 1 ADC
  - Echantillonnage direct à 14.35 MHz avec 2 ADC
  - Transposition avec OL puis numérisation avec 1 ADC à 700 KHz
  - Transposition avec OL puis 2 numérisation avec 2 ADC à 350 KHz

Synthèse sur les ADC

- **C'est le point critique du récepteur SDR**: signal mal échantillonné difficilement « rattrapable » par traitement ensuite,
- Compromis à trouver entre résolution, fréquence et d'échantillonnage,
- Soigner la stabilité de l'horloge d'échantillonnage

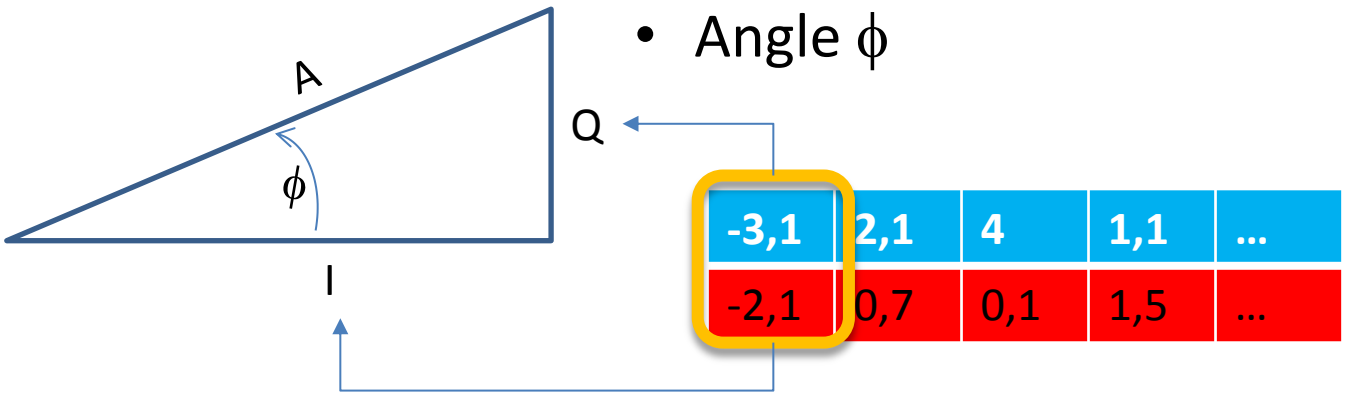


SECONDE PARTIE

Architecture :

Comment tout ça se traduit en logiciels et en matériels

I & Q sont les ingrédients de base



- Amplitude = longueur de A
- Angle ϕ

- Un peu de trigonométrie (Pythagore):

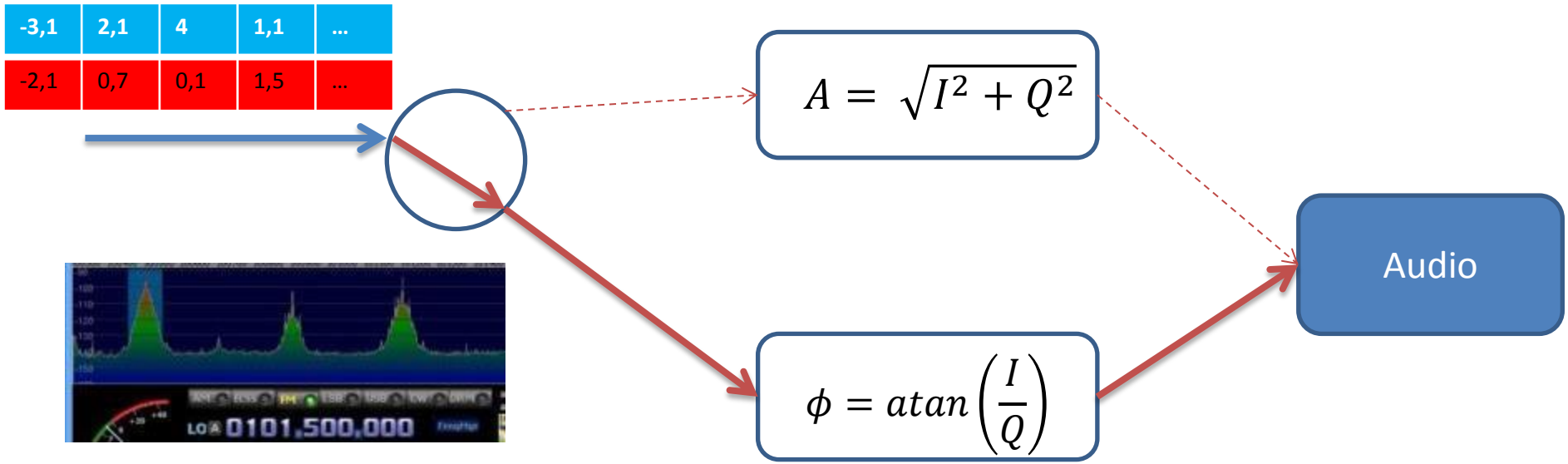
$$\boldsymbol{A} = \sqrt{I^2 + Q^2} \qquad \boldsymbol{\phi} = atan\left(\frac{Q}{I}\right)$$

Et donc ? AM … FM …

- **AM** = Amplitude Modulation = Variation de l'amplitude au cours du temps
  - Démoduler l'AM = calculer ***A*** à chaque instant et envoyer à la sortie audio

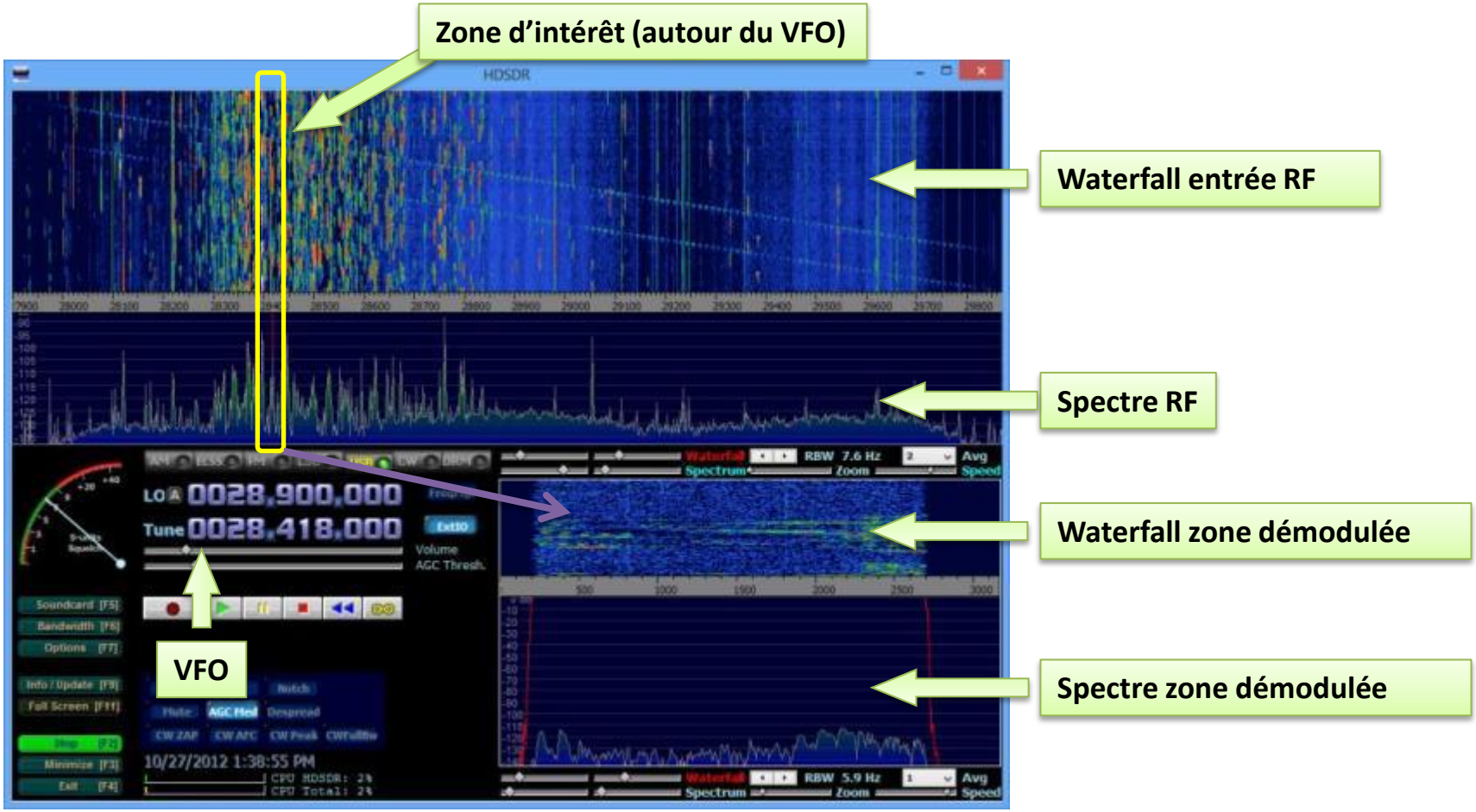
- **FM** = Modulation de Fréquence (de Phase)
  - Démoduler la FM = calculer ϕ à chaque instant et envoyer *la variation* à la sortie audio

I et Q sont les ingrédients de base



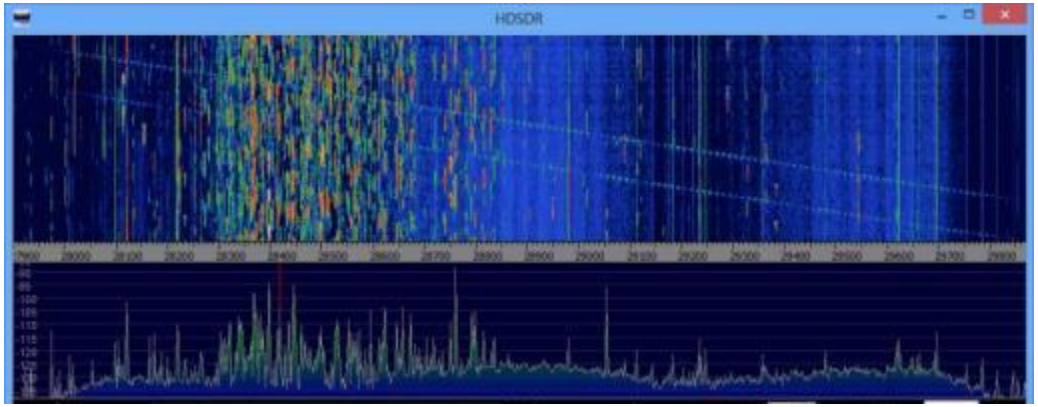
- Chaque modulation correspond à un sous-programme de calcul dédié
- En fonction du choix de l'utilisateur le flux de données IQ est envoyé vers le bloc correspondant

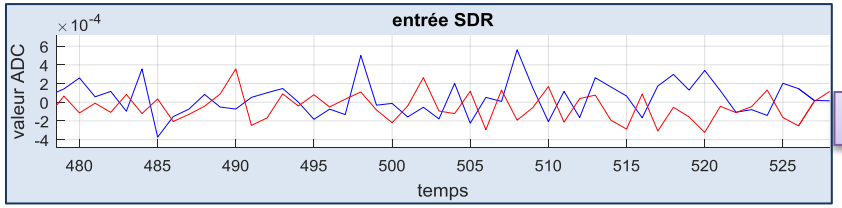
Logiciel SDR : exemple HDSDR

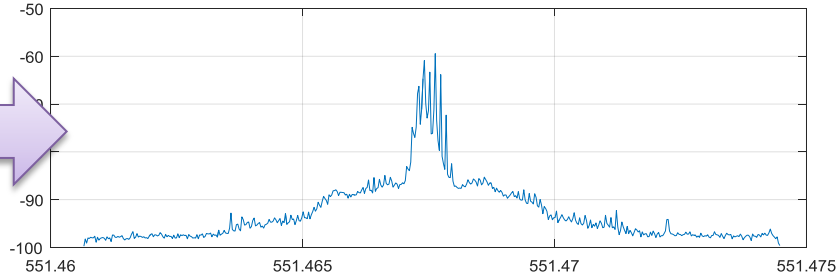


http://www.hdsdr.de/

Affichage du spectre



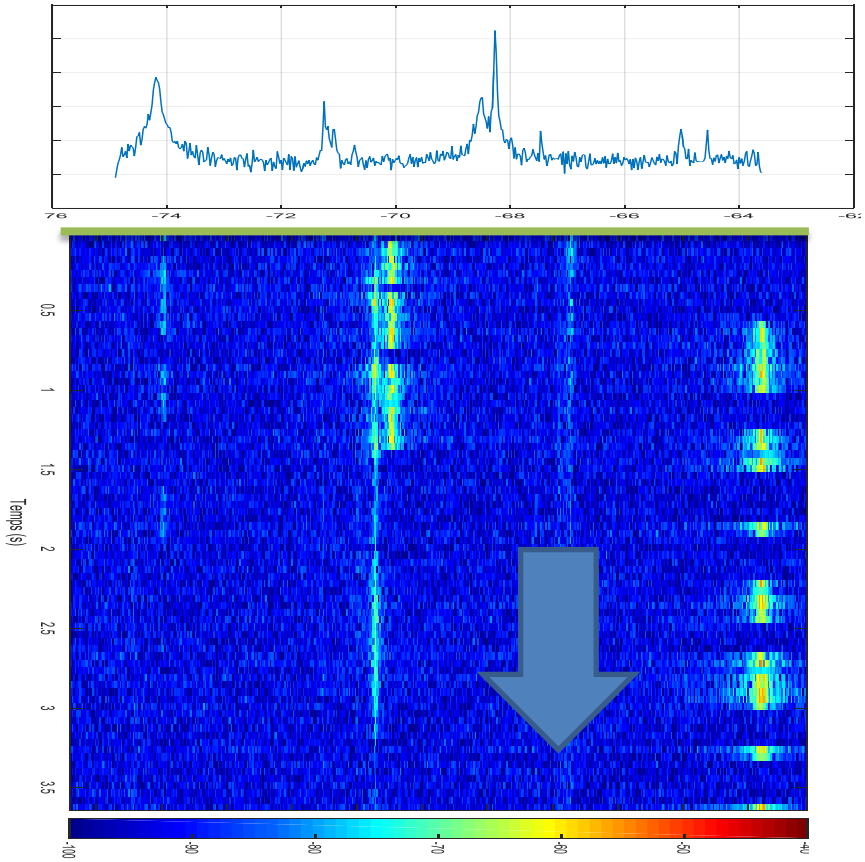




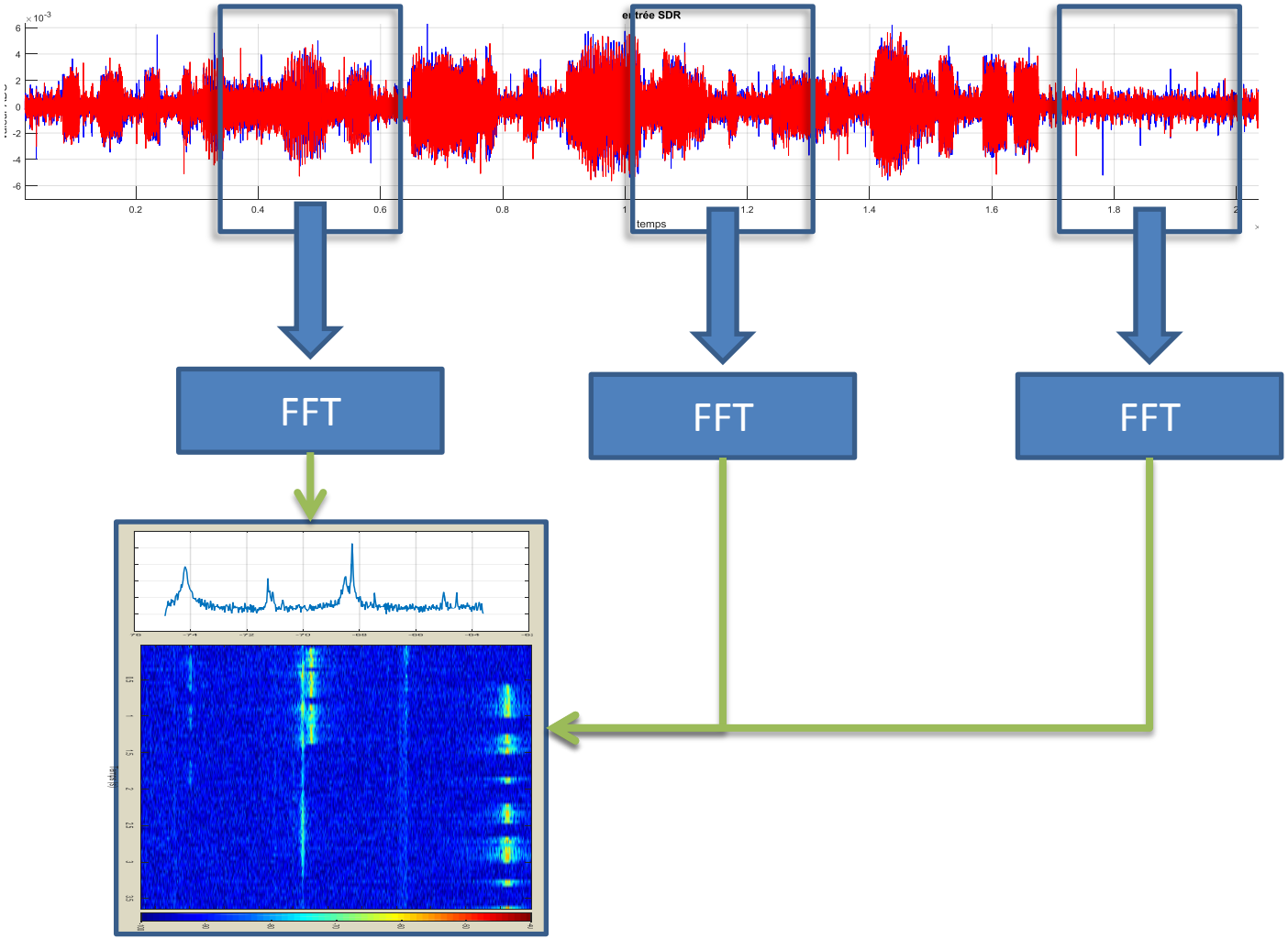
- Transformation « temporel » -> « fréquentiel »

Le Waterfall (chute d'eau)

- Juste un empilage de spectre…
- On calcule des FFT en continu en prenant des « morceaux » du signal qui arrive du récepteur
- On peut aussi moyenner plusieurs FFT pour faire « sortir » des signaux faibles



En résumé jusqu'à présent



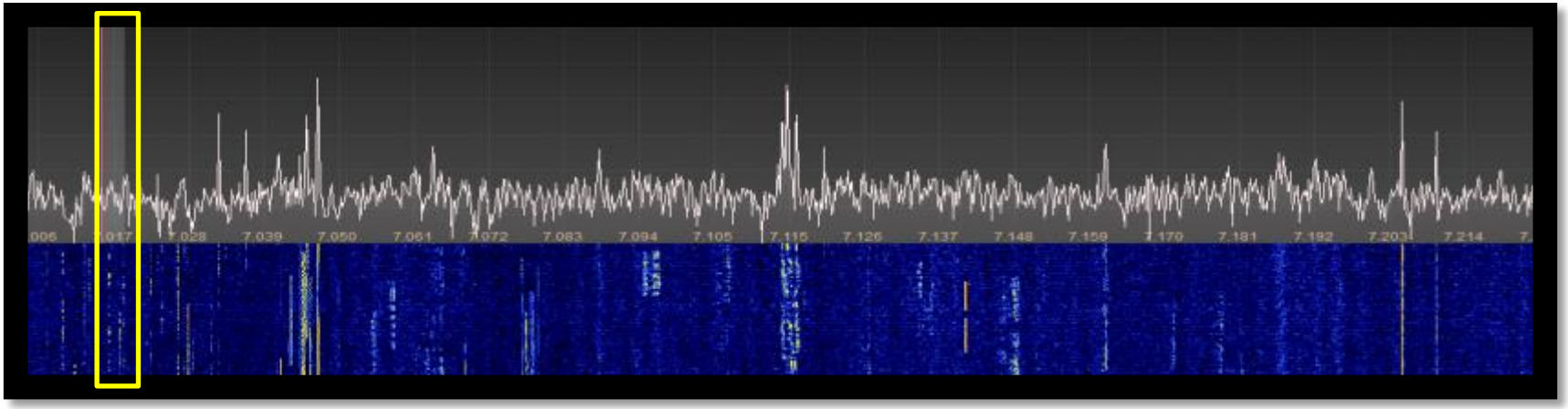
La transformée de Fourier *rapide* (FFT)

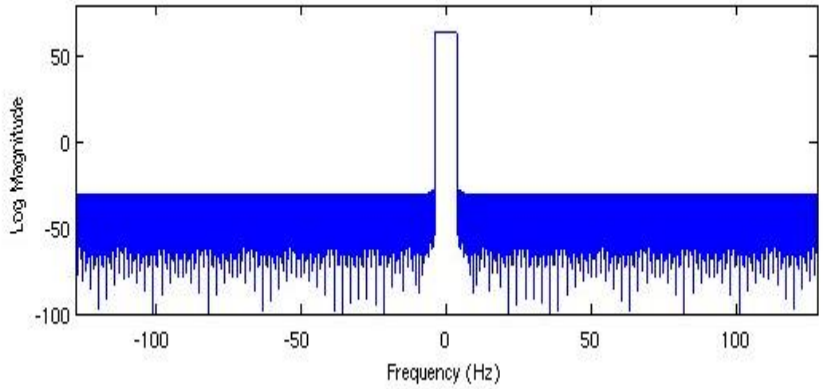
- Algorithme de calcul de la transformée optimisé pour des suites de valeurs (des échantillons). Ne requiert « que » $n.\log_2(n)$ multiplications
- Optimisé pour des tailles puissances de 2 (..512,1024,2048 etc.)

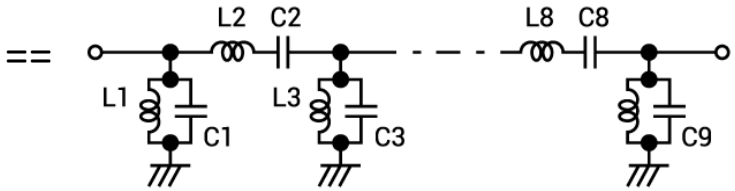
- Exemples : SDR à 2 MHz
  - $n=1024$, $\log_2(n)=10$ il faut environ 10240 multiplications
  - $n=4096$, $\log_2(n)=14$ il faut environ 57344 multiplications

  - n=1024 donne une résolution de 2M/1024 = 1,95 KHz
  - n=4096 donne une résolution de 2M/4096 = 488 Hz

Extraction de la bande « utile »







On a donc besoin d'un filtre qui va atténuer tout ce qui est « hors bande »

Exemple de FIR

- La moyenne glissante :

E 1	E 2	E 3	4	5				n

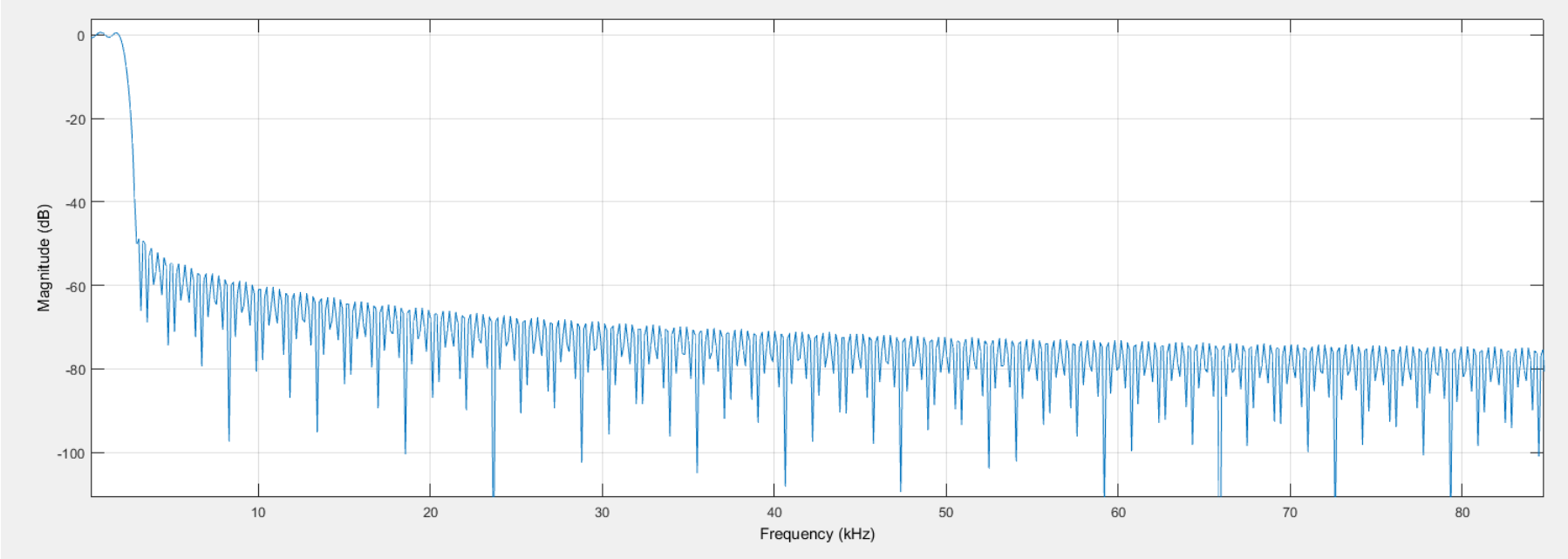
$$S_3 = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{3}$$

S 1	S 2	S 3	S n

2 additions + 1 multiplication par échantillon

Avoir la bonne longueur…

- Combien de coefficients faut il ?



Exemple ici : 2MHz de bande en entrée, on veut 3KHz de bande

Il faut… 5060 coefficients

5060 coefficients, et alors ?

- Avec 2 millions d'échantillons par seconde (IQ…) , on a donc 4 millions de valeurs nouvelles par seconde à traiter
- Chaque valeur doit être multipliée par un filtre de longueur 5060
- Ça fait donc : (4 million)x(5060) = 20,2 Milliards de multiplication par seconde = 20 « gigaFlops »

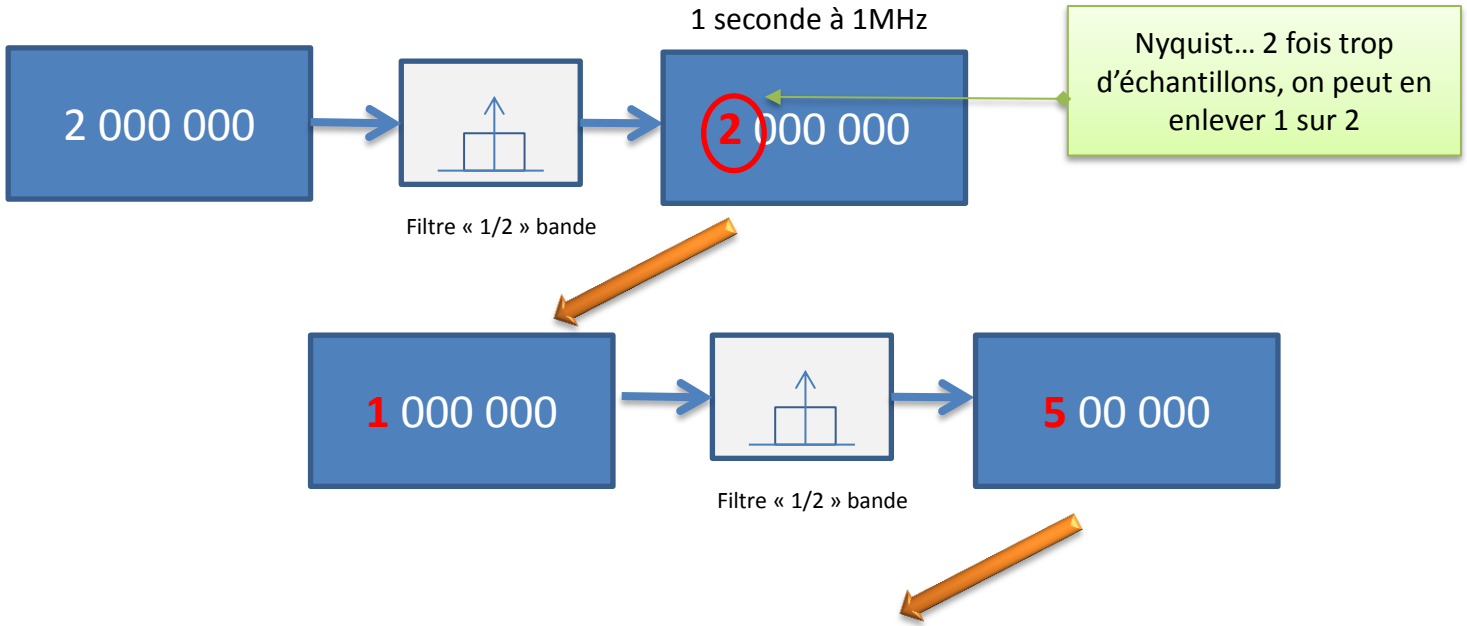
Pour « à peine » 50 dB de réjection hors bande… avec tout juste 2MHz de bande en entrée…

Diviser pour régner

- **Nyquist** dit « au moins 2fmax »
  - 1 seconde à 2MHZ = 2000000 échantillons
  - 1 seconde à 4KHz = 4000 échantillons
  - Après le filtrage on a 200000/4000=500 (au lieu de 2), on est large…

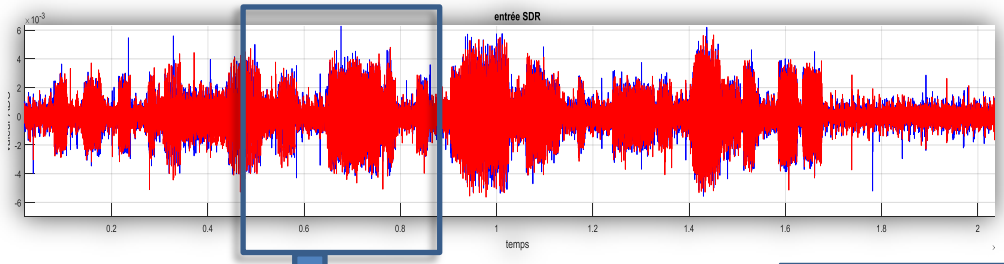
- L'astuce consiste à enchaîner des réductions par 2 = la décimation

Décimation

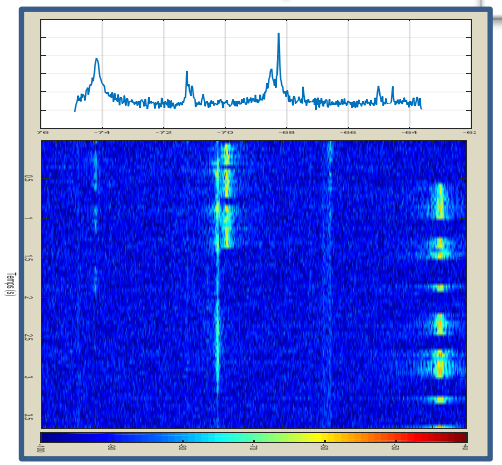


- En répétant cette opération et avec des filtres bien choisis (de plus en plus sélectifs) on arrive à une bonne réjection et des temps de calcul raisonnables
- Par exemple: Premier filtre à 7 coefficients, puis 11, …. , puis 43 et 51 pour terminer

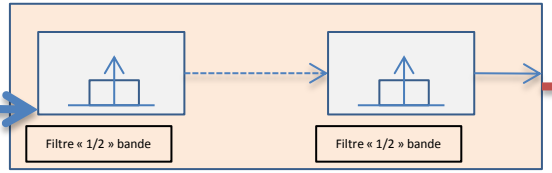
En résumé jusqu'à présent…

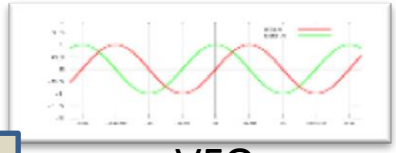


FFT



mix





VFO

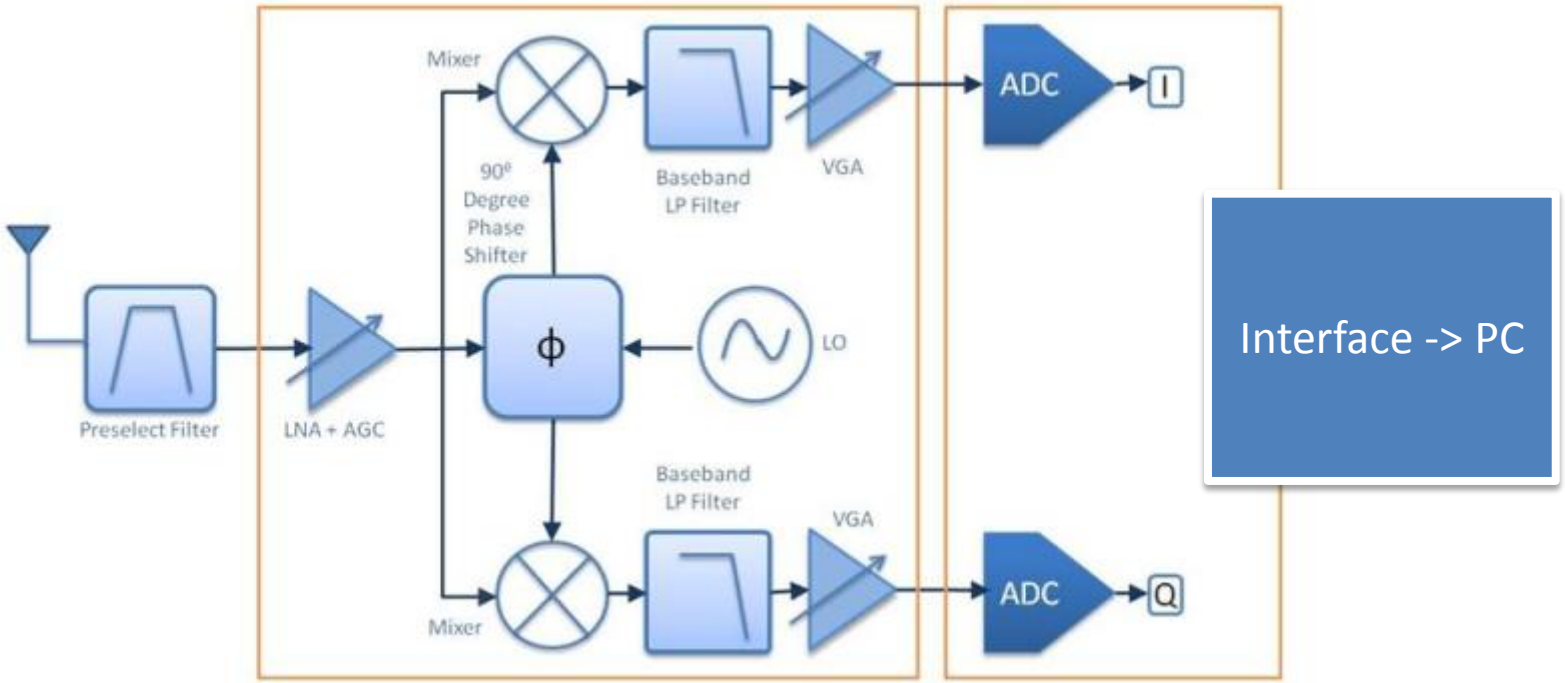
$$A = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\phi = atan\left(\frac{I}{Q}\right)$$

Démodulateurs

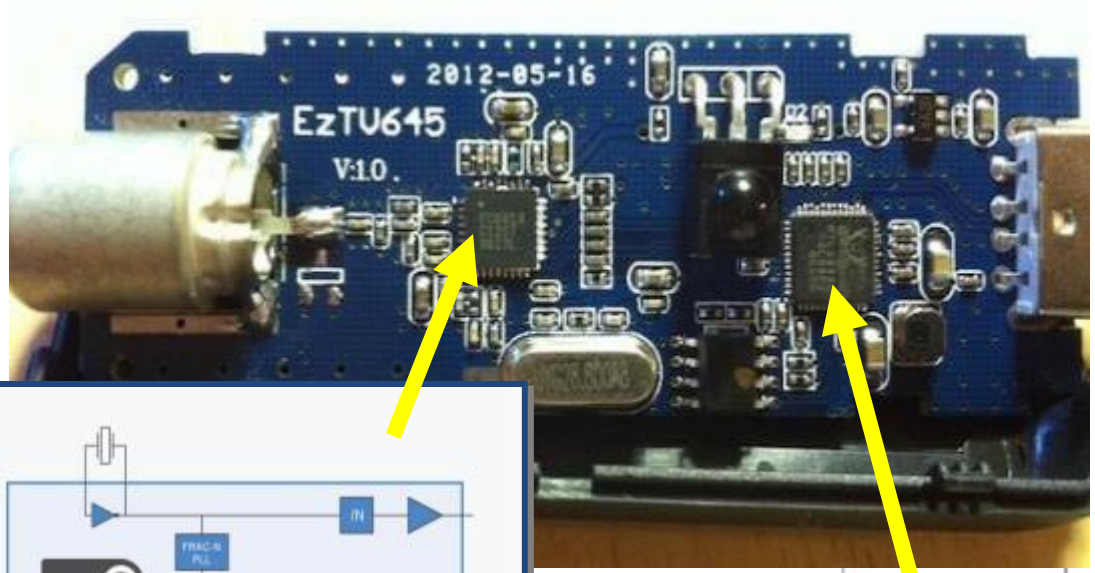
Audio

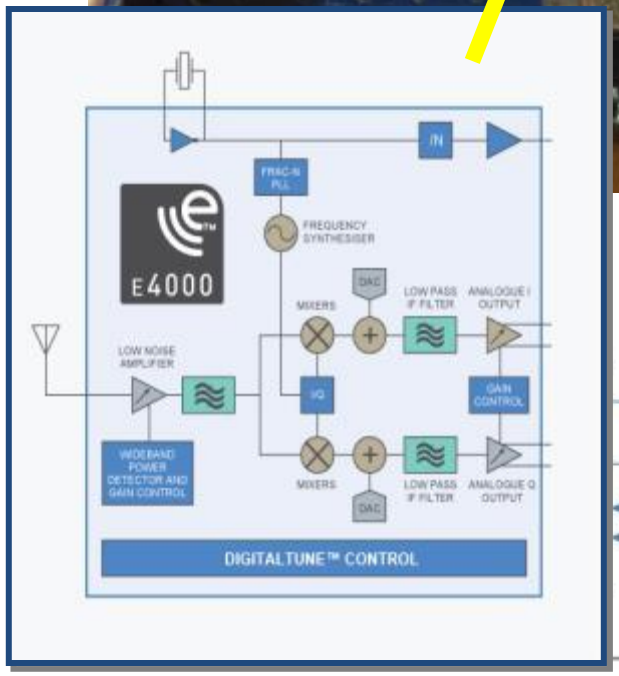
SDR à conversion directe

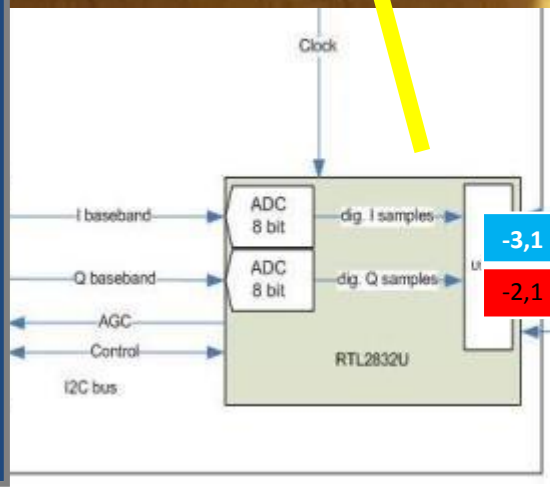


Un oscillateur local sélectionne la fréquence d'intérêt. Autour de cette fréquence, deux bandes sont « extraites » puis numérisées pour être envoyées vers l'ordinateur et le logiciel de traitement.

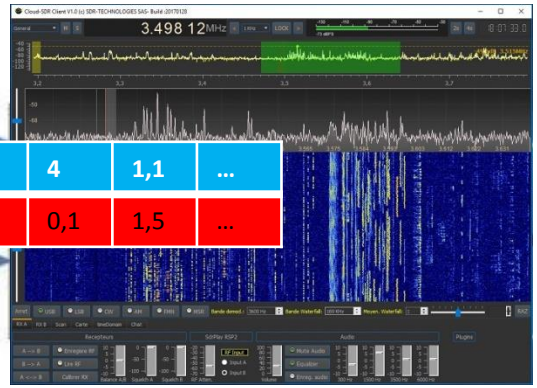
Exemple : clé USB RTLSDR



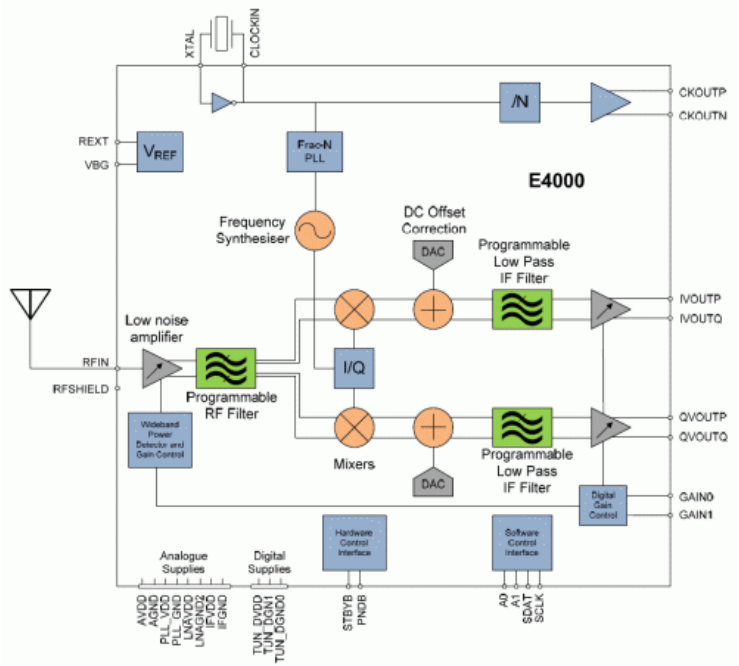


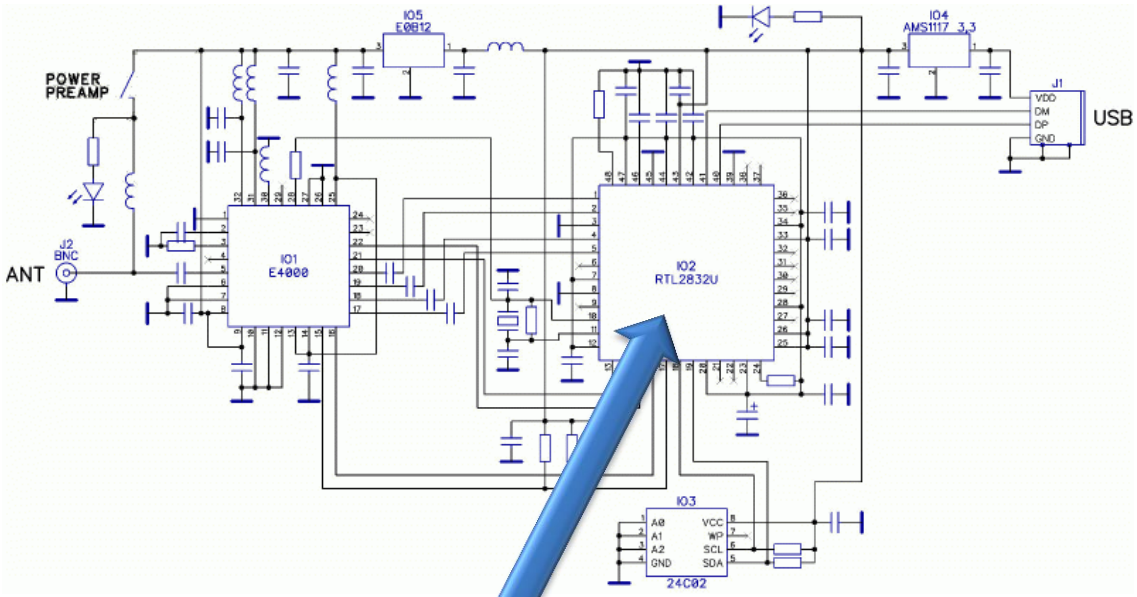


-3,1	2,1	4	1,1	...
-2,1	0,7	0,1	1,5	...



Clé RTLSDR





2 ADC « 8 » bits
Décodage DVBT (pas utile en mode SDR)
Lien USB
µProcesseur intégré

Points faibles de la conversion directe

- 2 voies = Peu probables qu'elles soient identiques…
- Fuite de l'oscillateur local

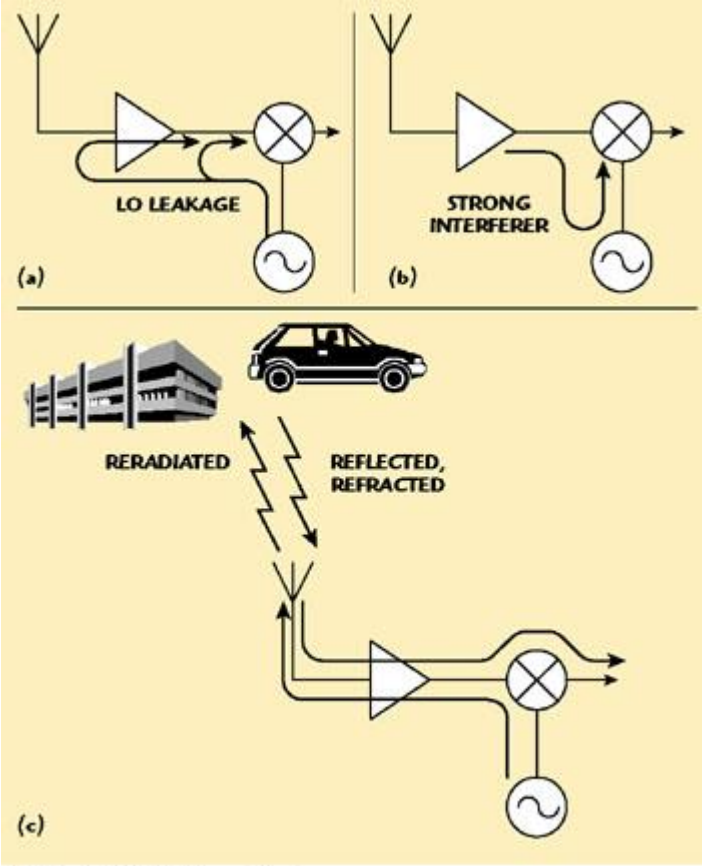
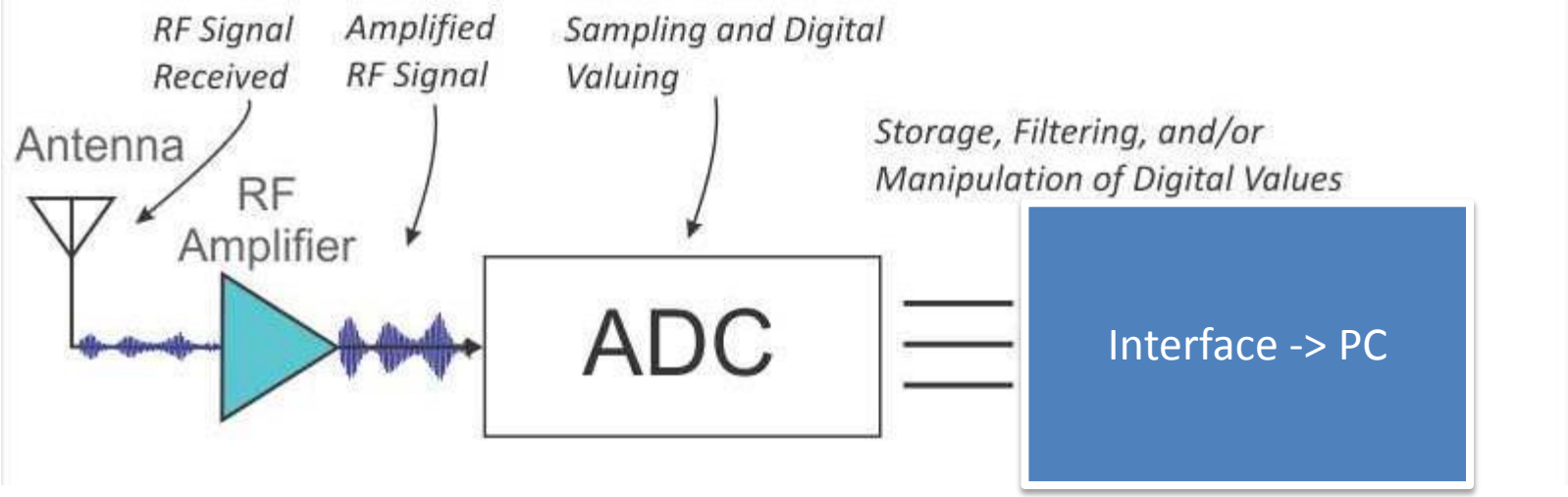


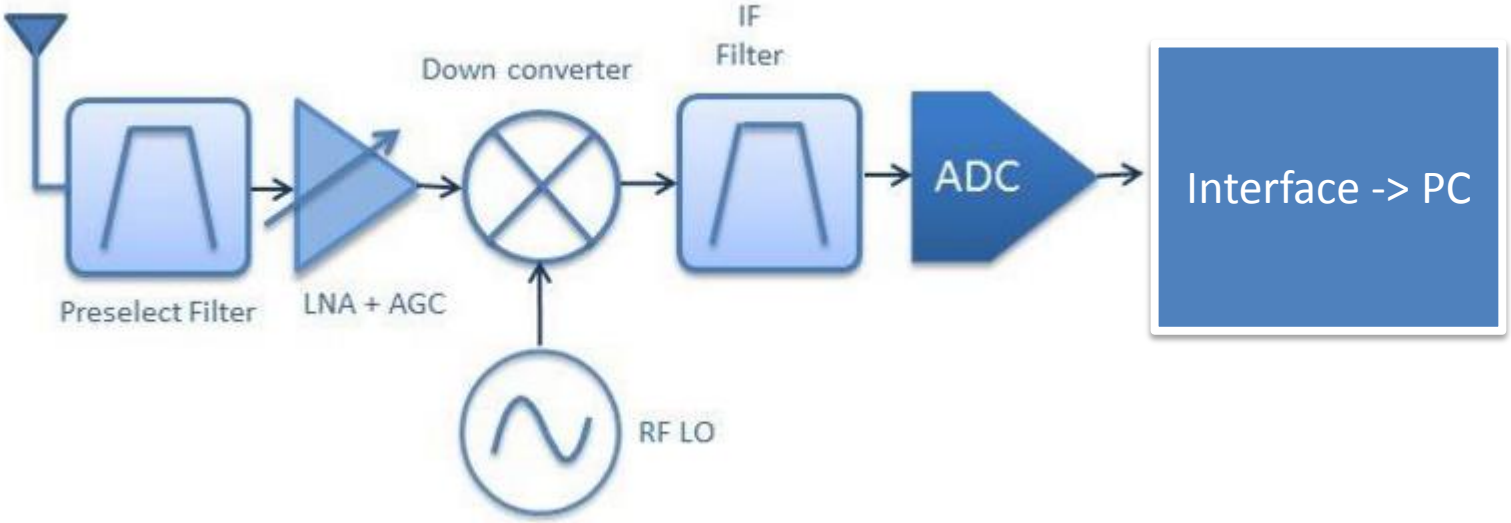
Fig. 8 DC offset mechanisms.

SDR à échantillonnage direct



Après amplification le signal résultant est numérisé pour être envoyé vers l'ordinateur et le logiciel de traitement.

SDR à échantillonnage direct



En pratique, bien souvent un oscillateur local transpose le signal reçu. Après filtrage, le signal résultant est numérisé.

Transférer les échantillons : USB

- L'USB est un **bus série** : 1 octet est transmis bit par bit entre le PC et le périphérique;
- Le débit théorique annoncé est en **bits/seconde**, mais il faut « enlever » toute la partie protocole / signalisation
- Le débit restant pour le SDR est donc plus réduit…

- Et on doit souvent transmettre au minimum 2 octets par échantillon (IQ sur 8 bits)

USB3.0 et USB3.1

Version	Speed	Bits/sec	HD movie 25GB
USB 1.1	Low speed (LS) Full speed (FS)	1.5 Mbps 12 Mbps	~9.25 hours
USB 2.0	High speed (HS)	480 Mbps	~14 mins
USB 3.0	SuperSpeed (SS)	~~5 Gbps~~	~70 sec
USB 3.1	SuperSpeedPlus (SSP)	~~10 Gbps~~	~35 sec

USB2 :

- 480 Mbits = limite très très théorique, en pratique de l'ordre de 15 à 20 Mo/seconde
- 10 MHz de bande sous 8 bits passe… rarement plus

USB3

- 5 Gbps = 5 Giga bits per seconds

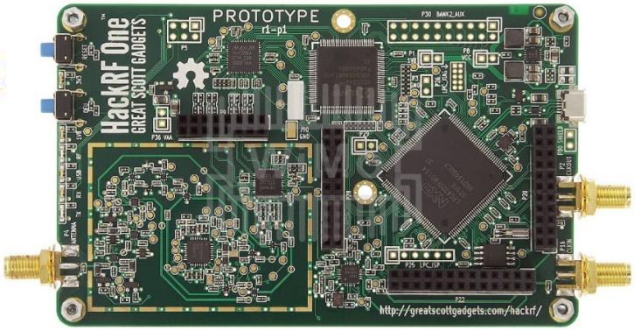
  = environ **300 millions de IQ @ 8 bits**

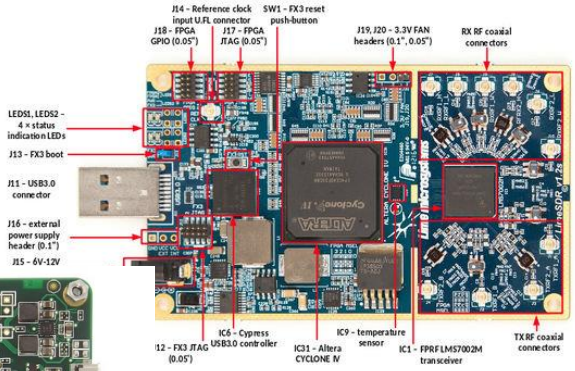
  = environ 150 millions de IQ @ 16 bits = 150 MHz avec une « super résolution »

- **Problème** : avoir le PC qui va assez vite pour les calculs qui restent à faire…

Logiciels SDR pour l'émission

- Beaucoup de logiciels pour le RX, mais pas grand-chose (encore) pour le TX « analogique » (SSB, FM etc.)
- A noter: **SDRAngel de F4EXB**
- Pour l'expérimentation: GNURadio, compatible avec 99% des transceiver SDR existants





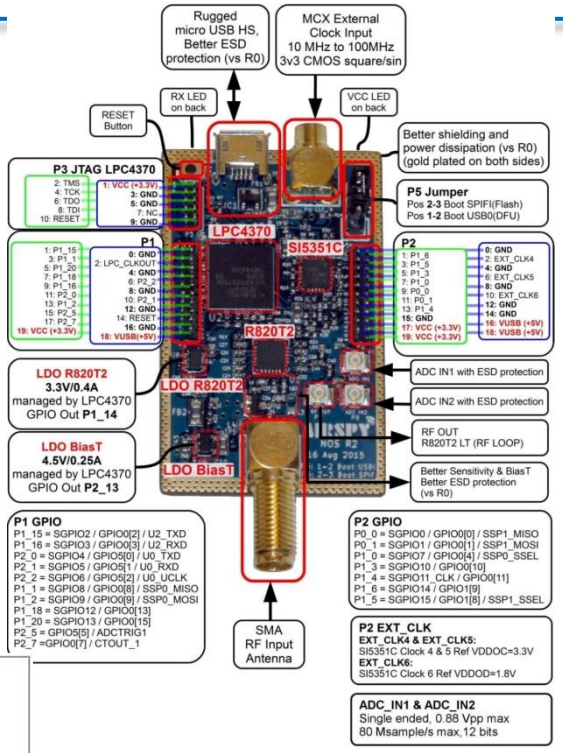
TROISIÈME PARTIE

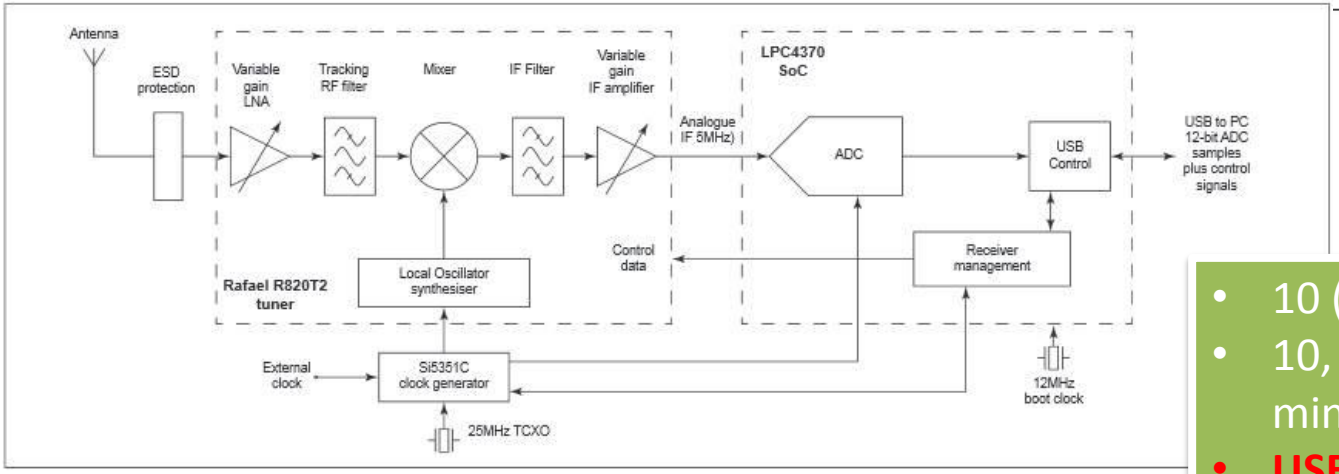
Pour votre prochaine liste de courses…

Récepteurs « AirSpy »

de 24 à 1800 MHz

- Utilise un tuner R820T2
- 1 Seul ADC 12 Bits, intégré au µP LPC4370,
- 10MHz externe possible sur le R2 uniquement
- ATTENTION: Prise USB fragile (voir site HB9FAO pour bonne idée de boitier)
- **Exige** un contrôleur USB performant à 10 MHz





- 10 (2.5) MSPS pour le R2
- 10, 6 and 3 MSPS pour le mini
- **USB 2**

Récepteurs « SDRPlay »

de 0,01 à 2000 MHz

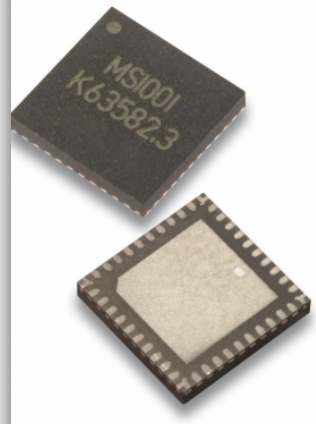
RSP1A

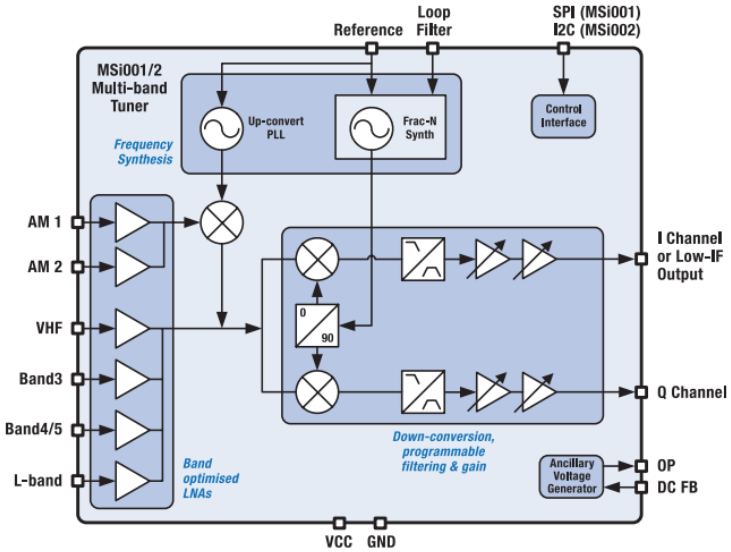
RSP2

RSP2 « pro »

- De 0,2 à 10 MSPS pour le RSP2 et 2PRO
- Possibilité de REF externe 24 MHz (I/O), chaînage possible de plusieurs RX
- **USB 2**

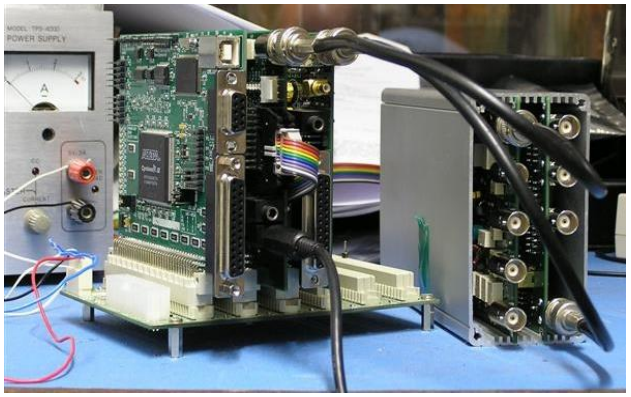
2 ADC 12 Bits





Famille HPSDR *(High Performance SDR)*

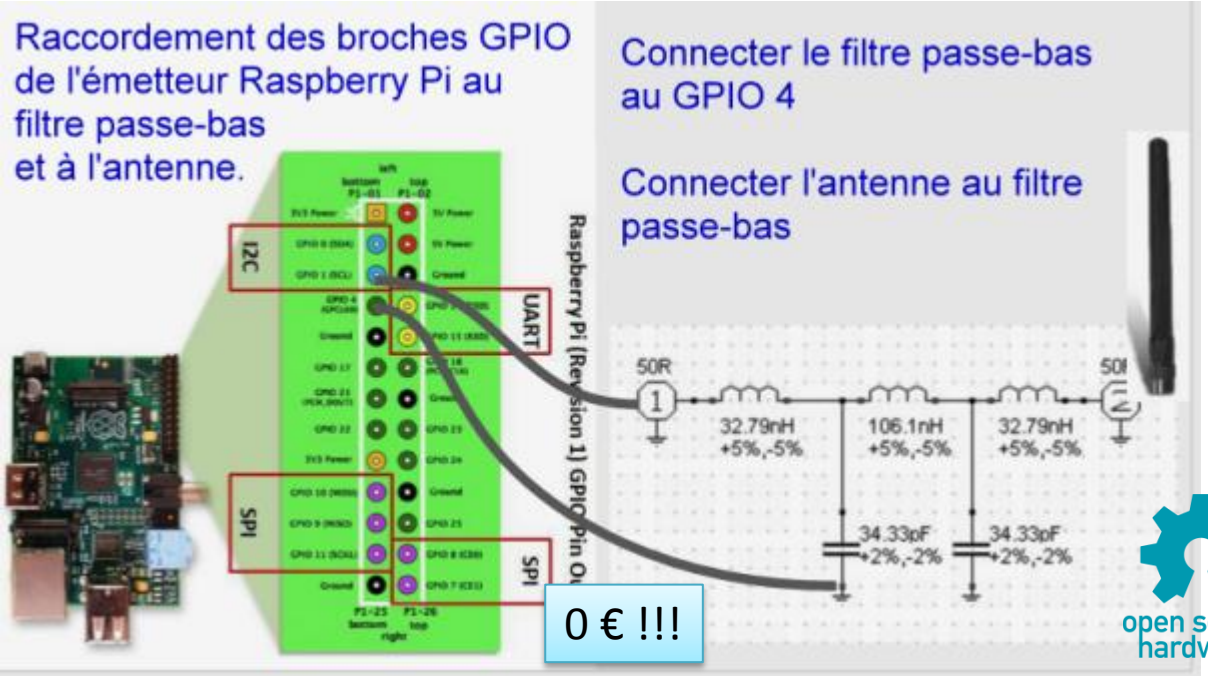
- Projet Open-Source - https://openhpsdr.org/
- Couvre l'aspect matériel ET logiciel
- Disponibilité de kits complets ou sous-ensembles, ou encore de produit commercial prêts à l'emploi



FlexRadio

- Probablement la solution la plus ancienne sur le marché
- Prix variables selon modèles et options, ~7500$

RPiTx

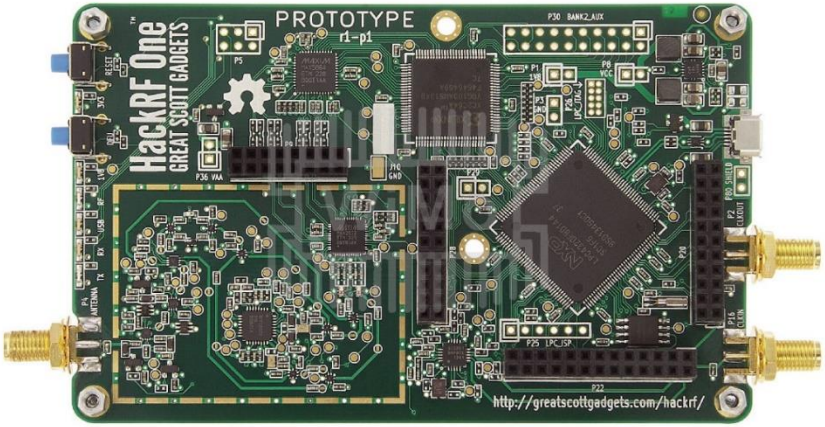


- La solution la plus « fun » de toutes, merci F5OEO
- Un Raspberry Pi + du fil (et éventuellement des filtres…)
- Logiciel spécifiques pour ATV, SSB, FM etc.

HackRF

TX et RX de 1 à 6000 MHz

open source hardware

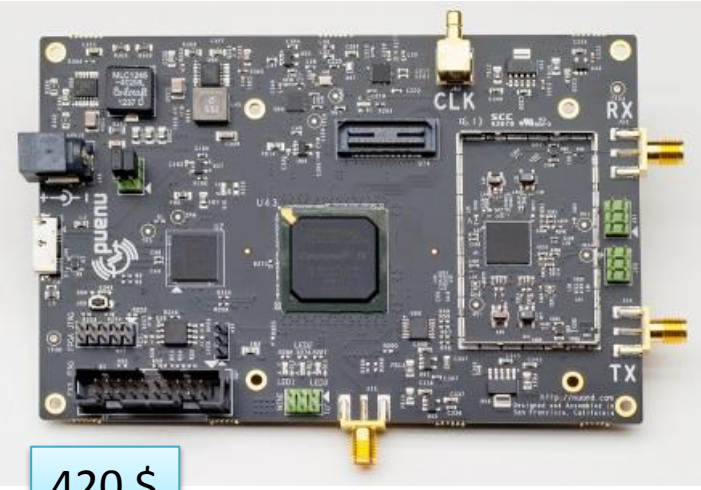


De 1 MHz à 6 GHz, Emetteur-récepteur en semi-duplex
Jusqu'à 20 Mhz, 8 bits en quadrature (8 bits I et Q 8-bit)
USB 2.0
Alimentation par USB

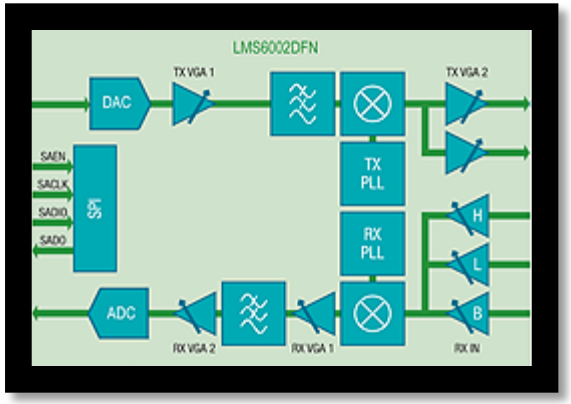
- Expérience personnelle: Préampli RX très fragile, accrochages en HF, émission « très moyenne » , équilibrage IQ moyen

BladeRF

TX et RX de 240 à 3800 MHz



420 $

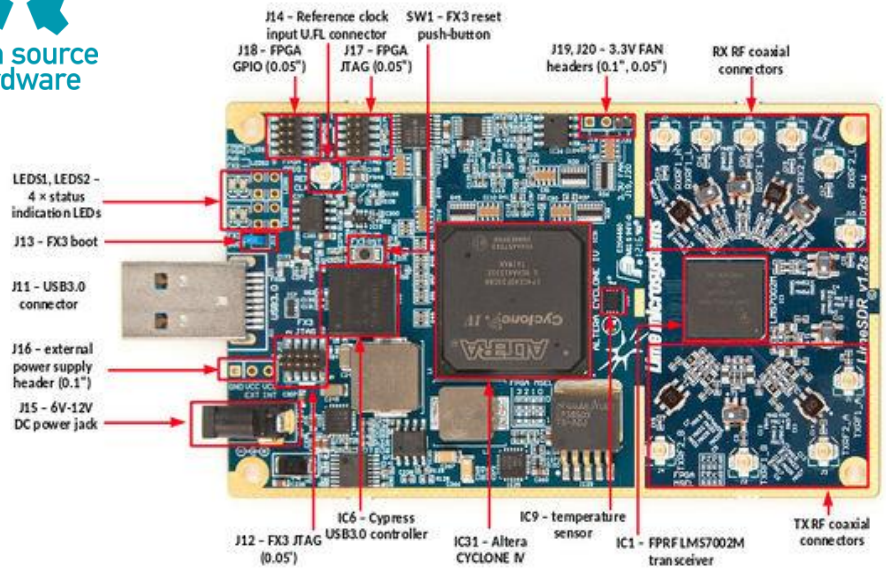


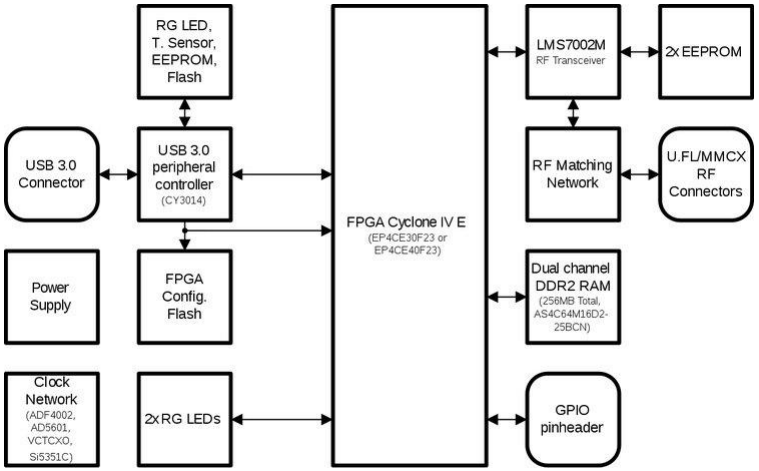
Chip LMS6002D de chez Lime

- Full duplex TX et RX, de 2 MSPS à 28MSPS
- Double ADC 12 bits (RX), Double DAC 12 Bits (TX)
- Horloge intégrée, possibilité synchro PPS externe (firmware specifique)
- USB3
- Test perso: Très bonne sensibilité RX

LimeSDR

open source hardware





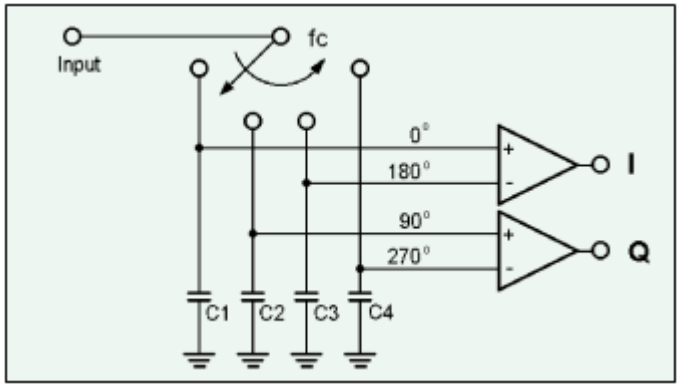
- Financement participatif, très gros succès
- Aspect logiciel… bâclé !

SoftRock

RX et TX – HF et VHF selon modèles

open source hardware

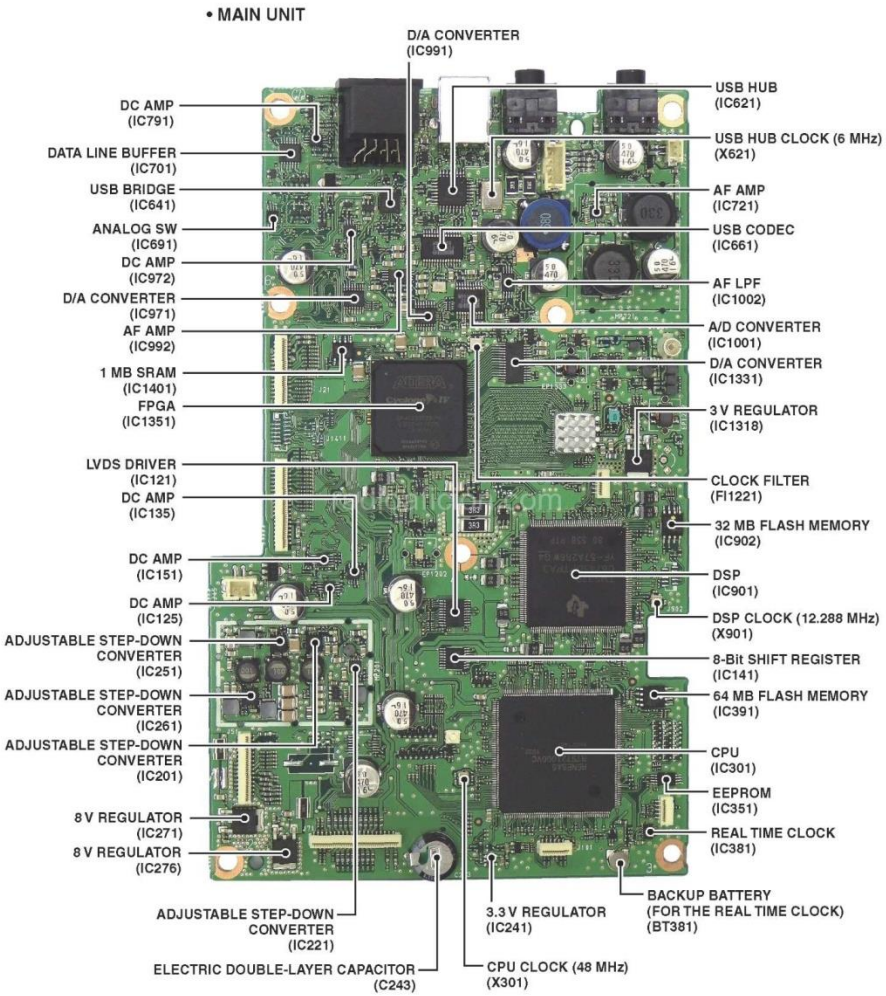
89$!



- Mélangeur à base de « QSD » (switches commutés à la fréquence de l'OL)
- Un peu semblable au Gilbert Cell mixer

- Vendu en kit
- Emission QRP
- Repose sur ADC et DAC audio du PC

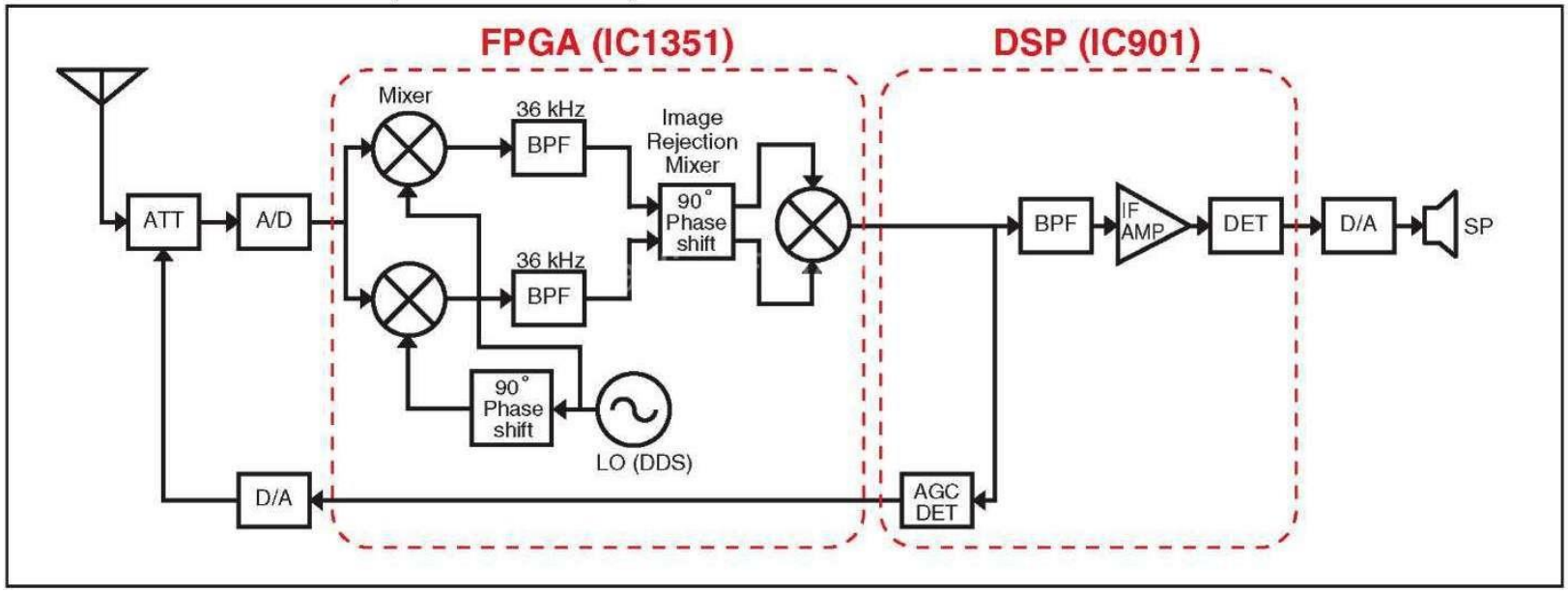
IC7300



Où sont les selfs, les quartz, les CV ?

Exemple de l'IC7300

• FPGA BLOCK DIAGRAM (Receive circuits)



- 1 seul ADC – échantillonnage direct
- Tout le traitement est fait en numérique dans un réseau logique programmable (FPGA)

IC7300 : l'approche idéale ?

- Un seul ADC à échantillonnage direct, mais:
  - Attention à la dynamique,
  - Attention au repliement éventuel (FM…) impose un filtre très sélectif,
  - Débit d'information (échantillons) important
- Traitement par FPGA uniquement:
  - Pas forcément très couteux, mais mise au point très très complexe,
  - Calculs en virgule fixe, avec souvent des problèmes d'arrondi (attention à l'OL)

Fin…

Merci à tous pour votre attention !