

Logiciels SDR : ce qu'il y a sous le capot

Sylvain AZARIAN - F4GKR
F6KLO – Brive – 19/11/2016



www.f4gkr.org

SDR : ce qu'il y a sous le capot

Objectifs de cette présentation :

- Démystifier le fonctionnement des récepteurs et des logiciels
- Comprendre ce qui est faisable facilement et ce qu'il l'est moins (avec du matériel « low cost » - voir slide 39),
- comprendre les traitements du signal associés, le volume de calculs requis,
- comprendre à quoi correspondre les paramétrages proposés dans les logiciels.



Au programme

- Présentation théorique sur le fonctionnement du matériel et du logiciel SDR « en général »
- Présentation de matériel amateur (ou pas trop cher) – voir slide 39
- Démo logiciel gkSDR et « manips » : comprendre les problèmes des récepteurs pas cher, (*« où pourquoi en analogique c'est quand même mieux des fois »*)
- Démo Cloud-SDR

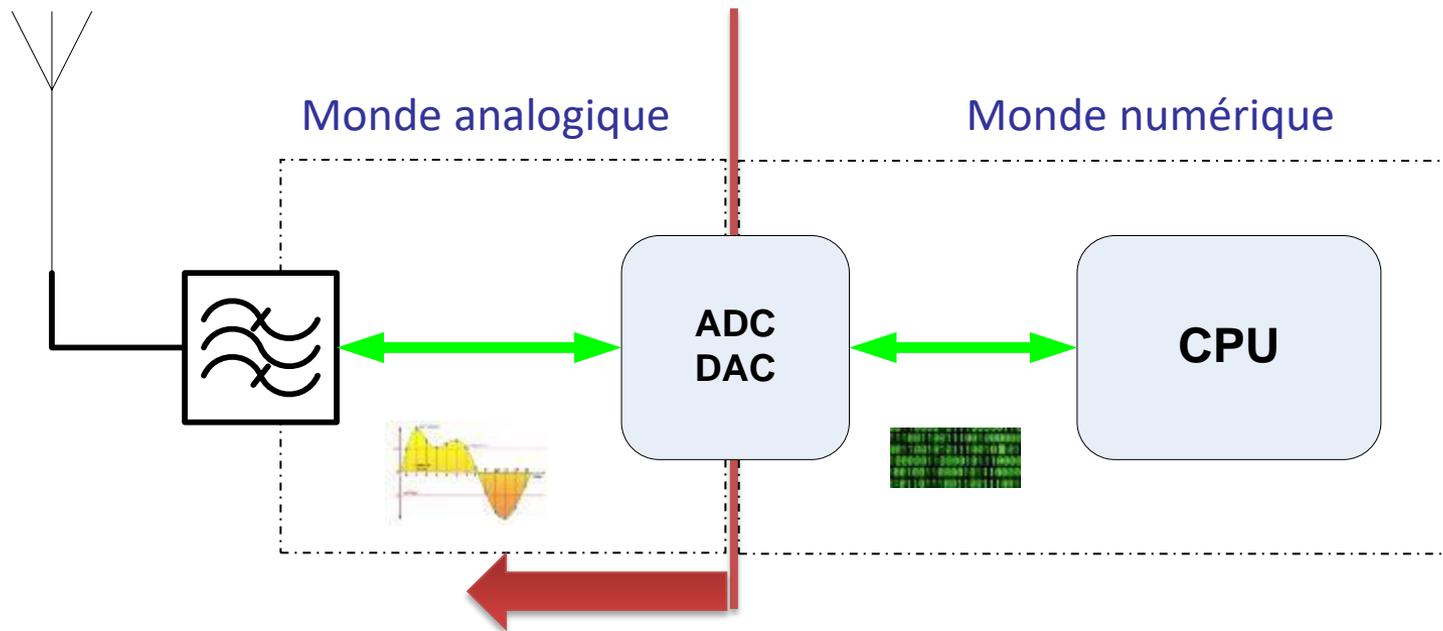


1^{ère} PARTIE

Aspects « hardware » avec un peu de Maths



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

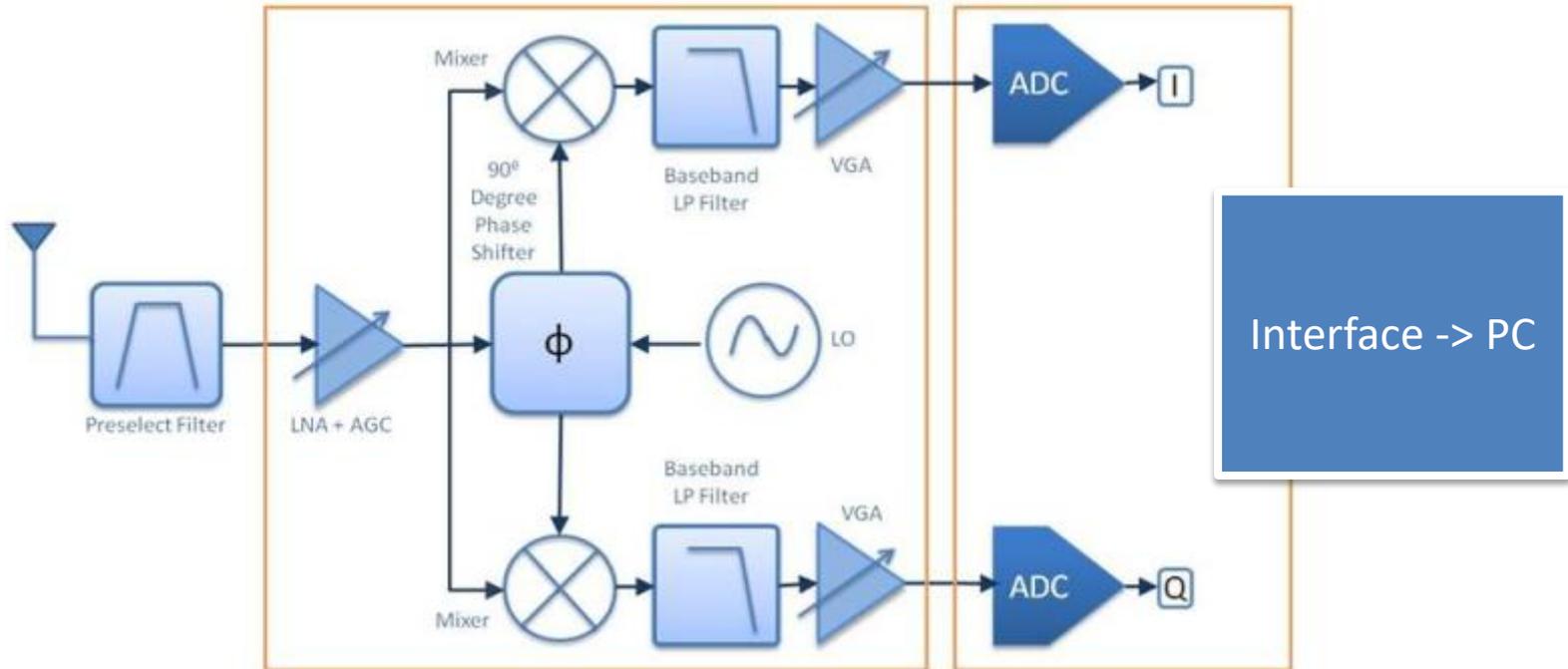
Récepteur SDR

Principalement deux types d'architectures dans les équipements amateurs :

- A conversion directe
- A échantillonnage RF direct



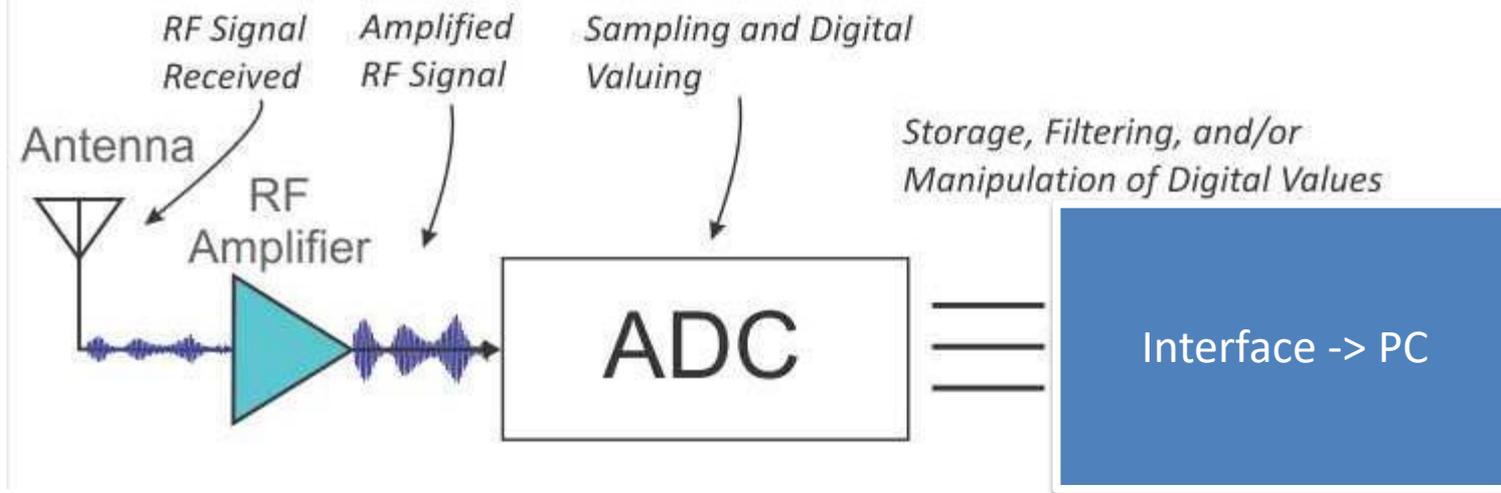
SDR à conversion directe



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.

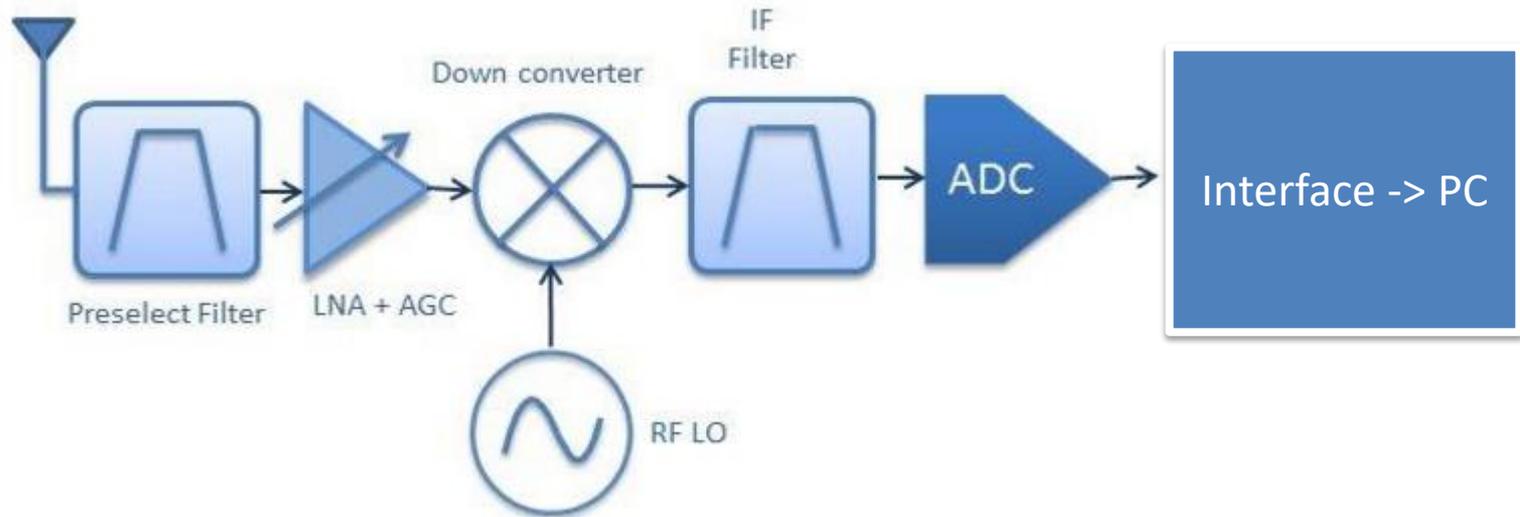


SDR à échantillonnage direct



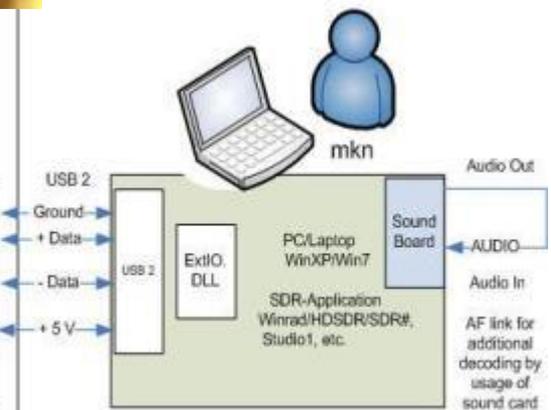
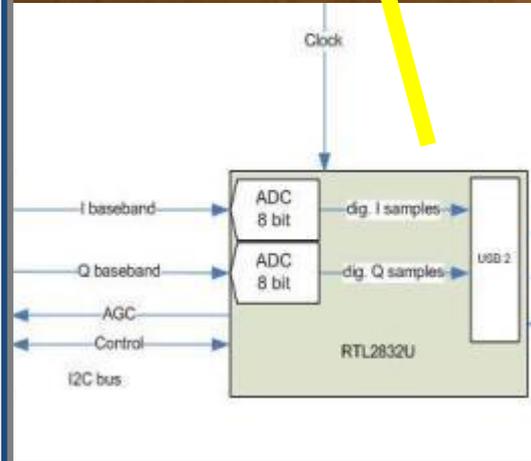
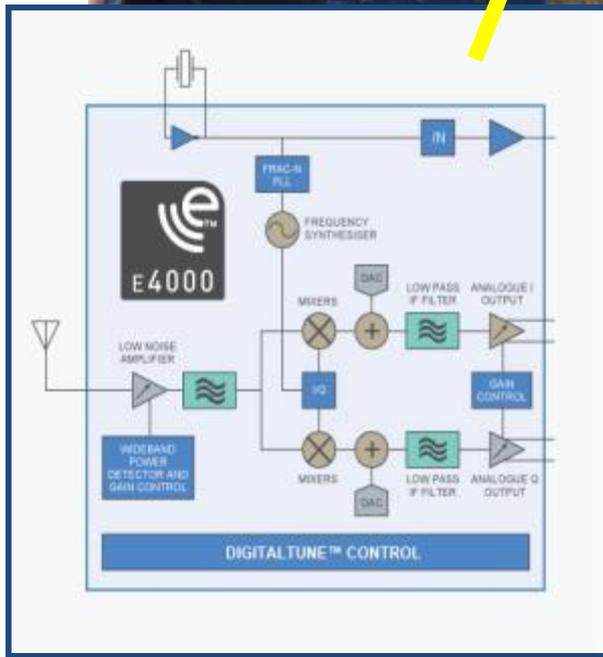
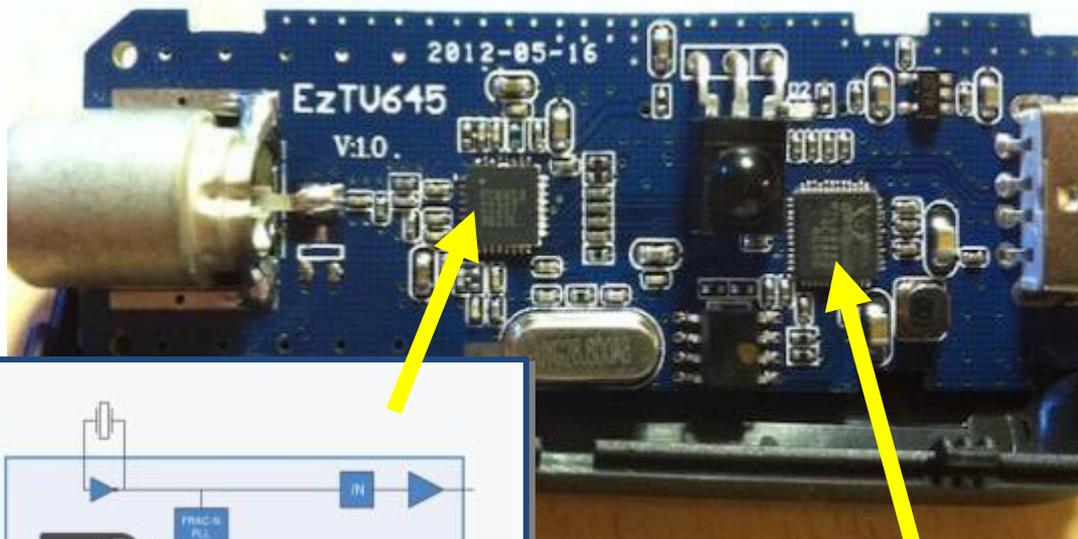
Après amplification le signal résultant est numérisé pour être envoyé vers l'ordinateur et le logiciel de traitement.

SDR à échantillonnage direct

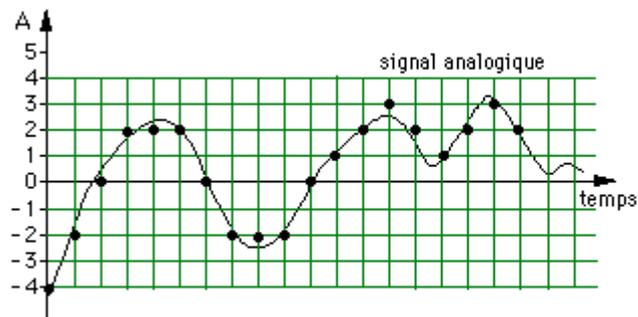


En pratique, bien souvent un oscillateur local transpose le signal reçu. Après filtrage, le signal résultant est numérisé.

Exemple : clé USB RTLSDR



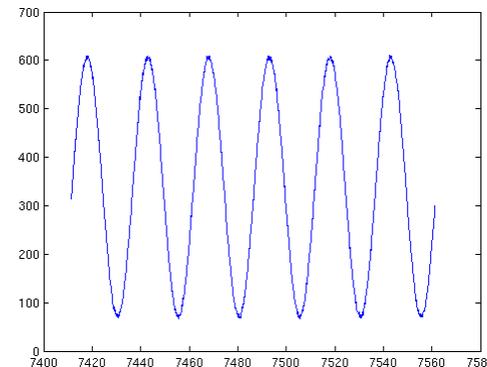
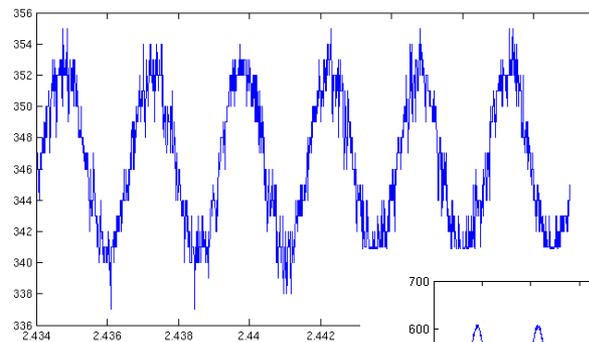
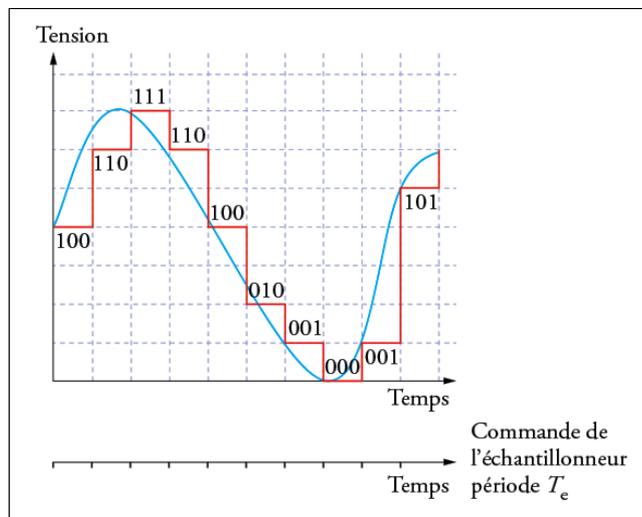
La conversion analogique / numérique



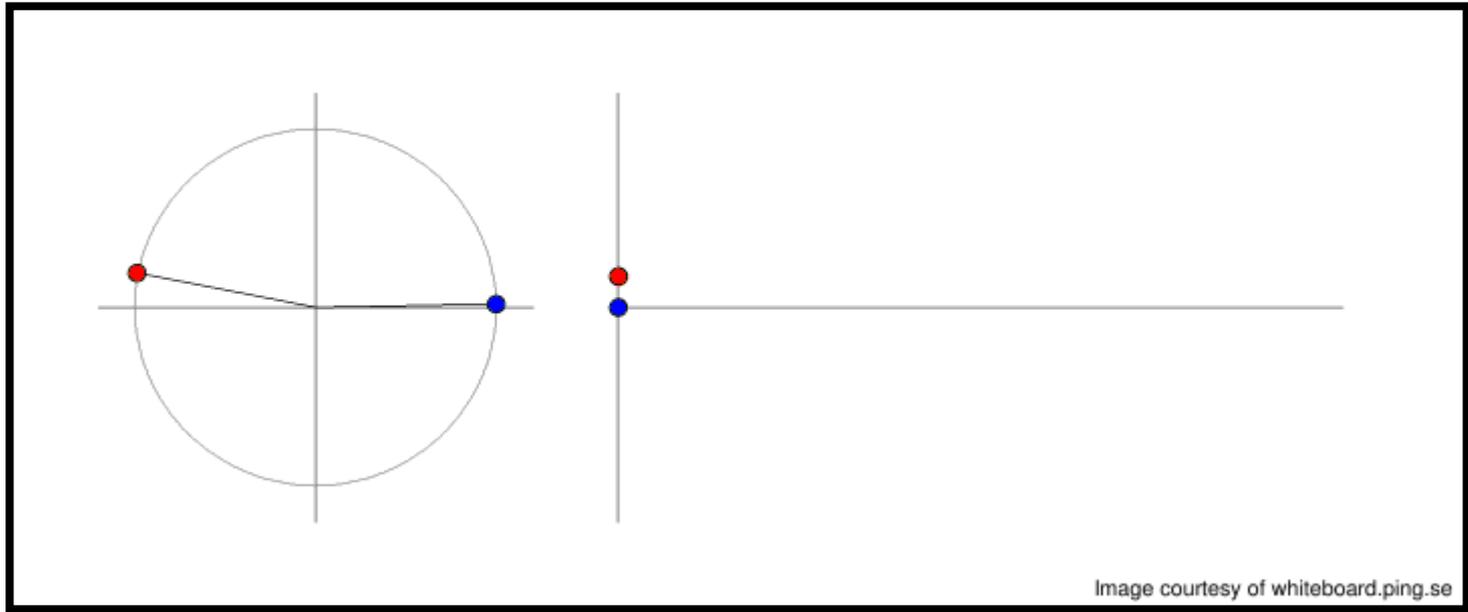
t	val
0	-4
1	-2
2	0
3	2
4	2
5	2
6	0
7	-2
8	-2
9	-2
...	...

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

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



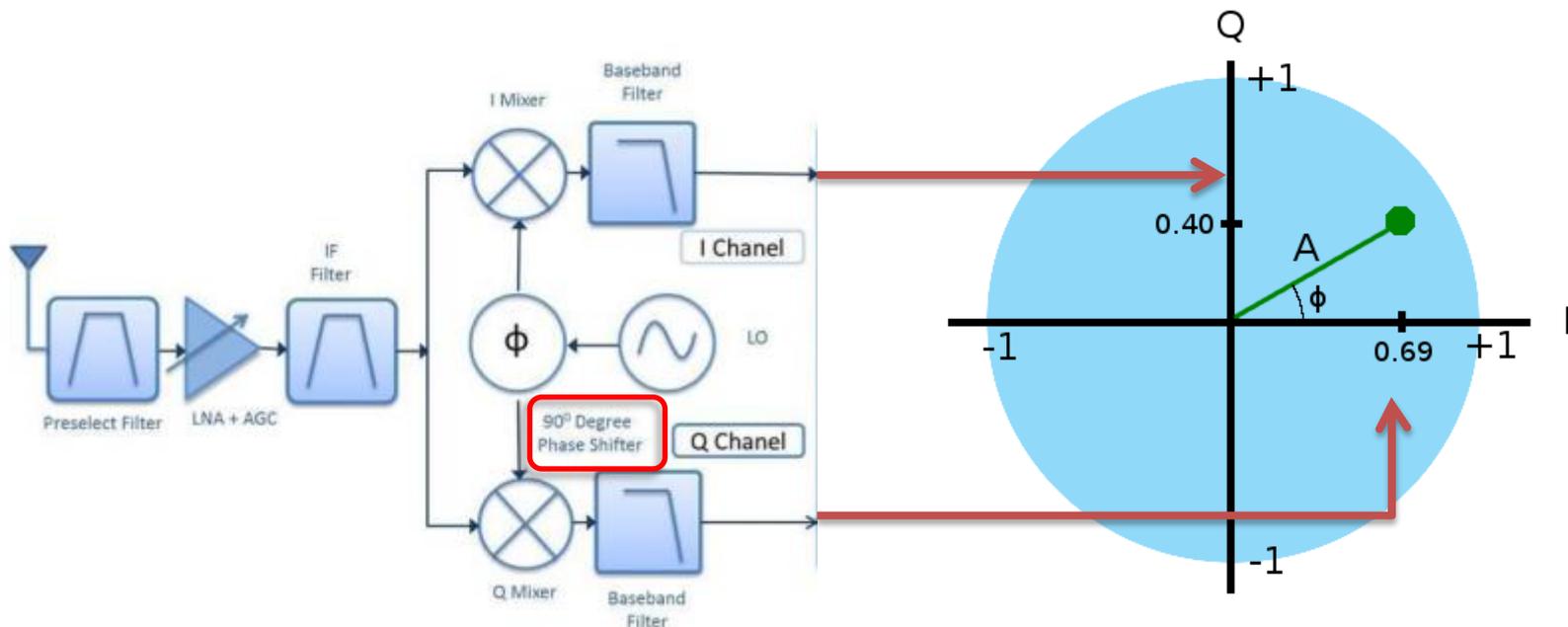
Pourquoi « signaux IQ » ?



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

Signaux en quadrature

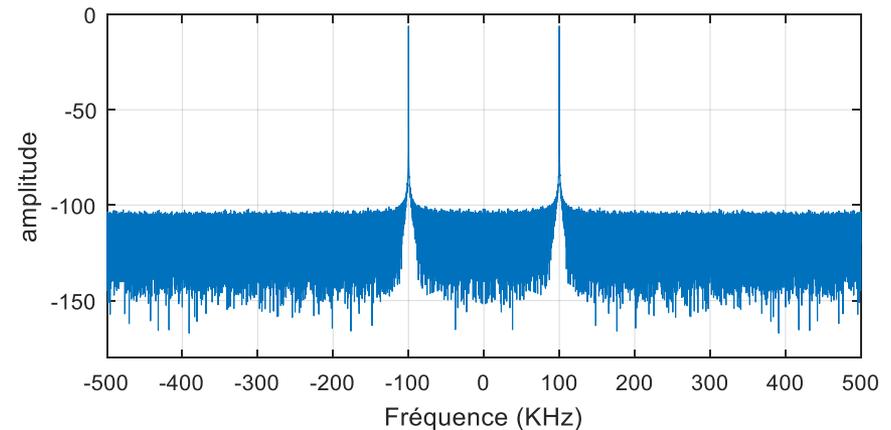
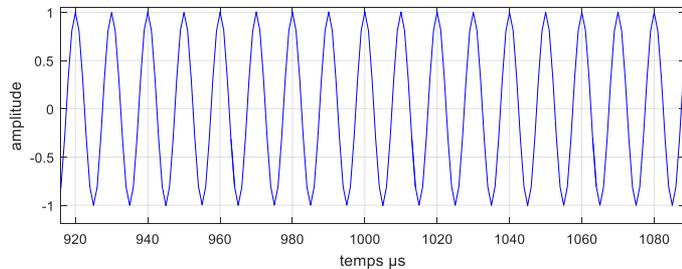
- La solution consiste à prendre deux échantillons du signal mélangé, mais avec deux OL déphasés de 90° : C'est l'échantillonnage « complexe » ou « IQ »



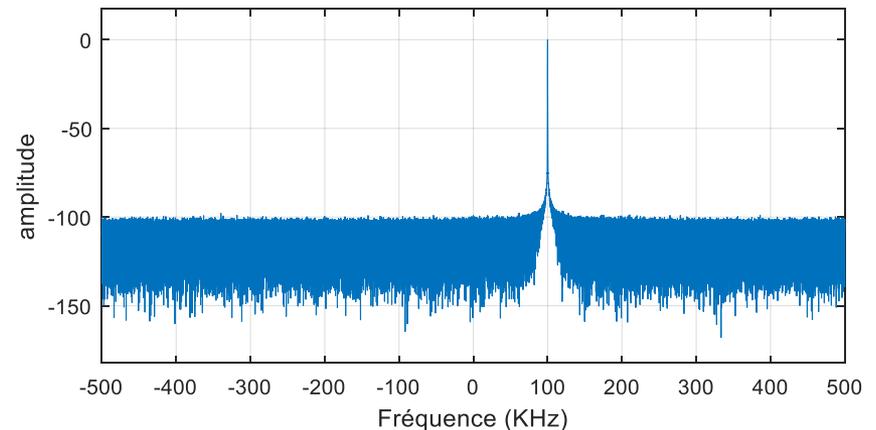
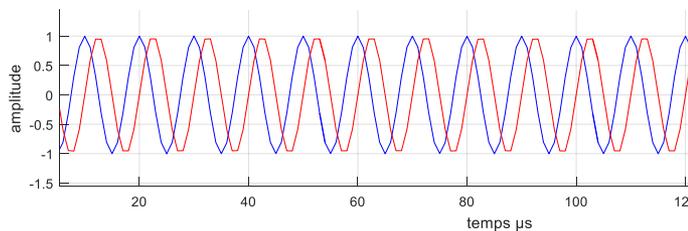
Remarque : pour les SDR à échantillonnage direct il y a une astuce pour retrouver I et Q

Spectre réel / spectre complexe

Sans quadrature (pas de I/Q)



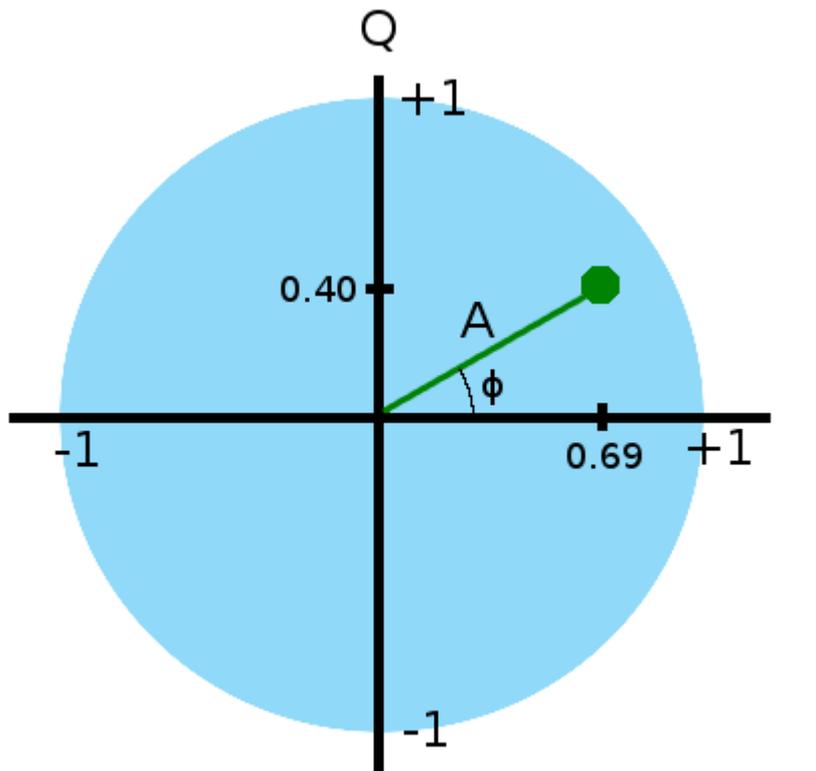
Avec quadrature (I/Q)



- Les signaux IQ permettent de connaître « le signe » du signal

En fait ça simplifie les calculs...

- Si on fait un peu de trigonométrie :



- Amplitude = longueur de A
- Angle ϕ

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

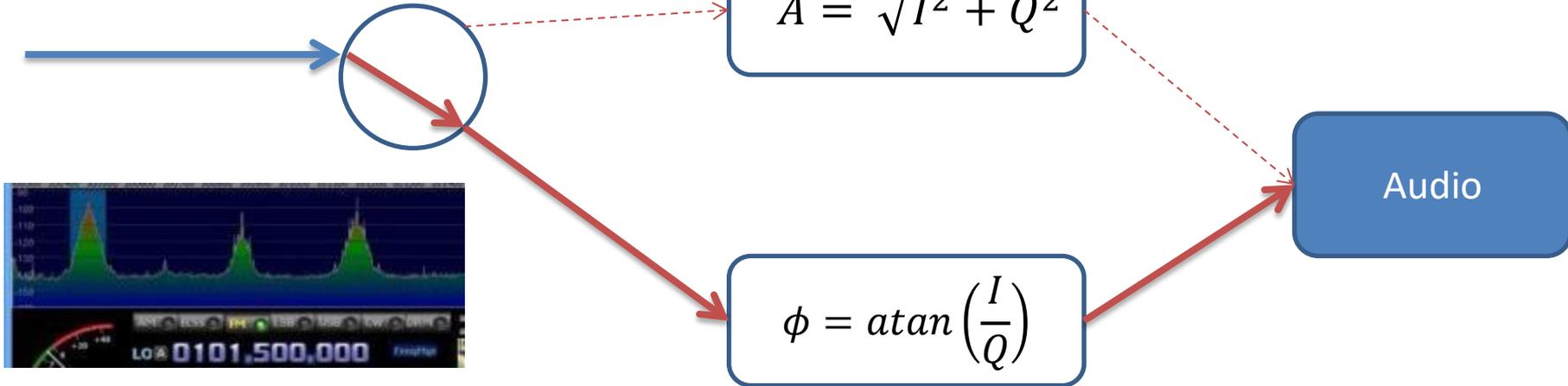
$$\phi = \text{atan} \left(\frac{I}{Q} \right)$$

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

Flux de données IQ



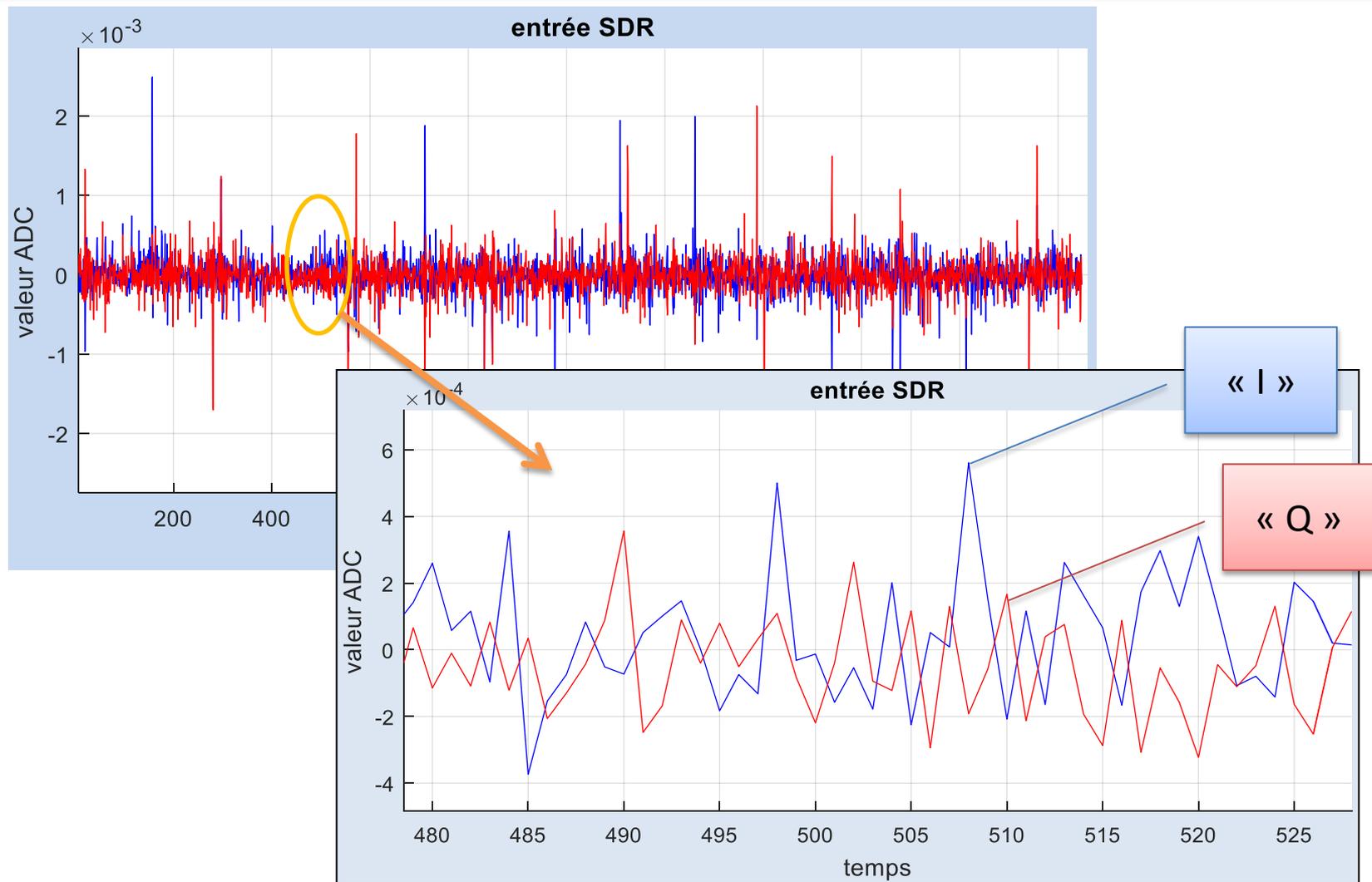
- Chaque modulation correspond à un sous-programme de calcul dédié
- En fonction du choix de l'utilisateur le flux de données IQ est envoyé vers le bloc correspondant

Transférer les échantillons : USB

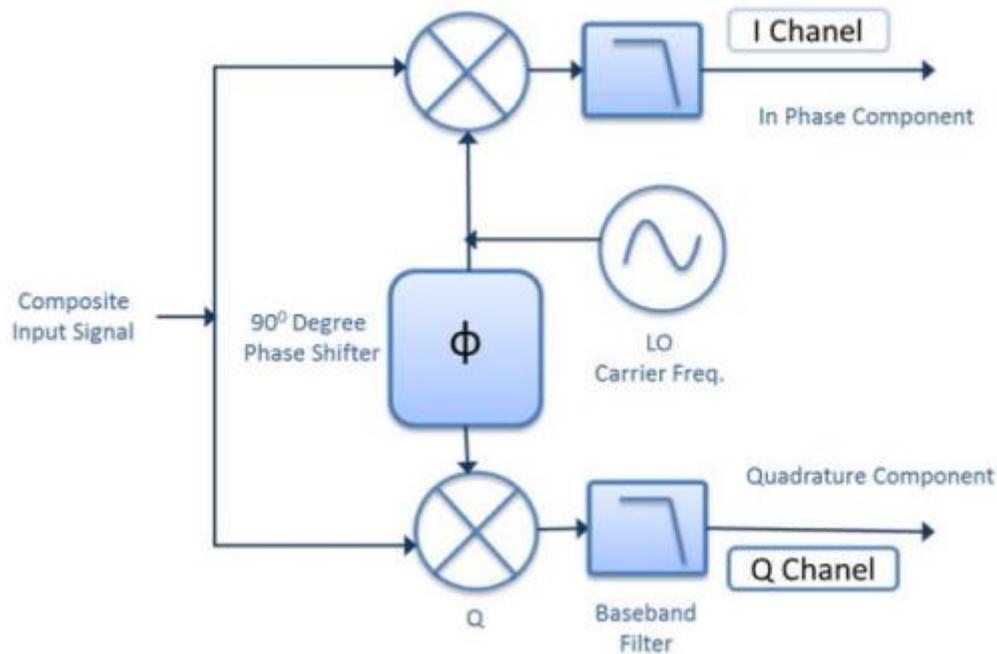
- L'USB est un **bus série** : 1 octet est transmis bit par bit entre le PC et le périphérique;
- Le débit théorique annoncé est en **bits/seconde**, mais il faut « enlever » toute la partie protocole / signalisation
- Le débit restant pour le SDR est donc très réduit...

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

Résumé : Ce que l'on a en entrée



Pour la suite de cette présentation



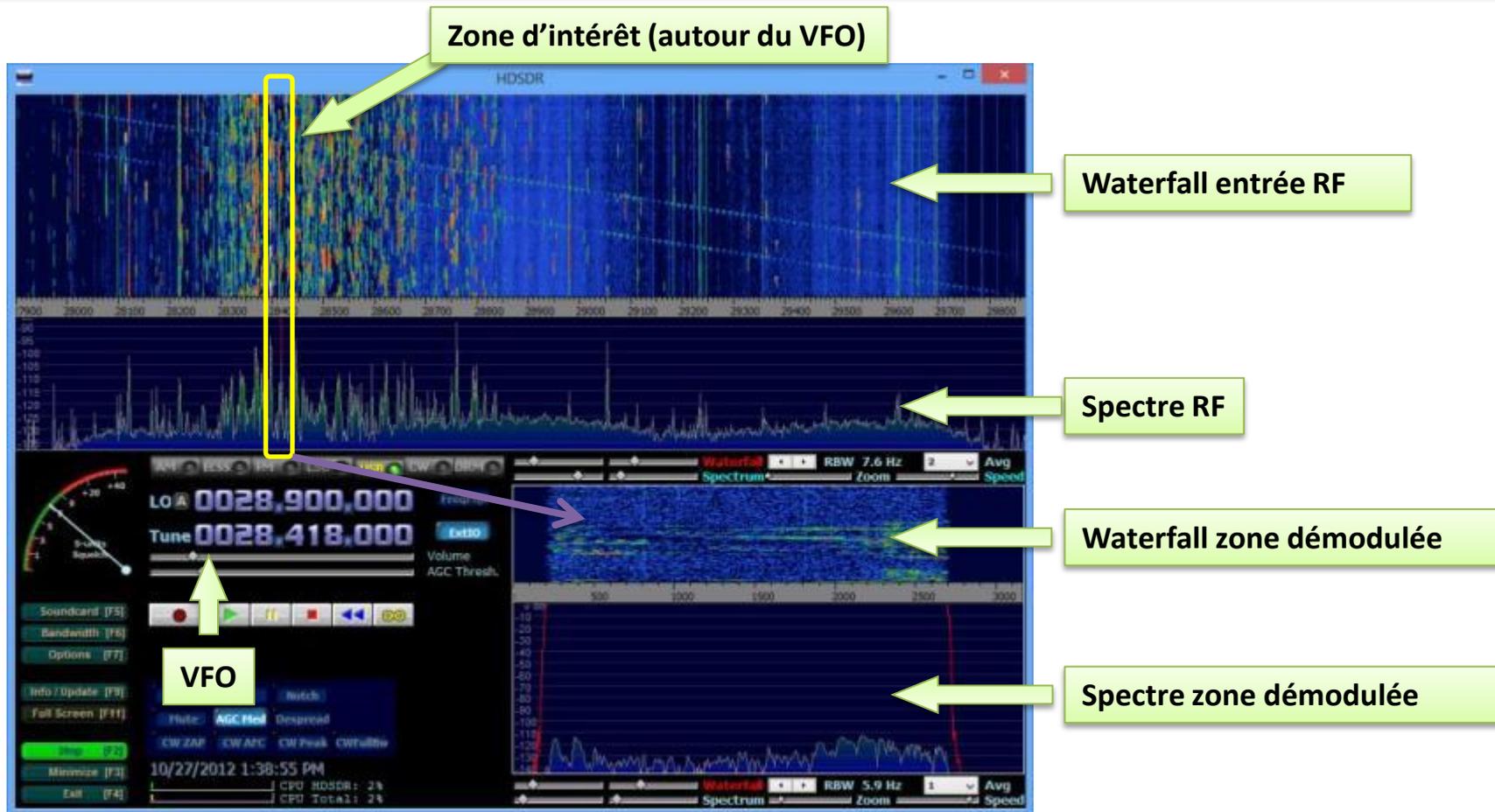
On supposera récepteur de type « conversion directe » envoyant I et Q numérisés séparément

2^{ème} PARTIE

Logiciels SDR : principes de fonctionnement Algorithmes utilisés *(et surtout pourquoi il faut un PC puissant)*



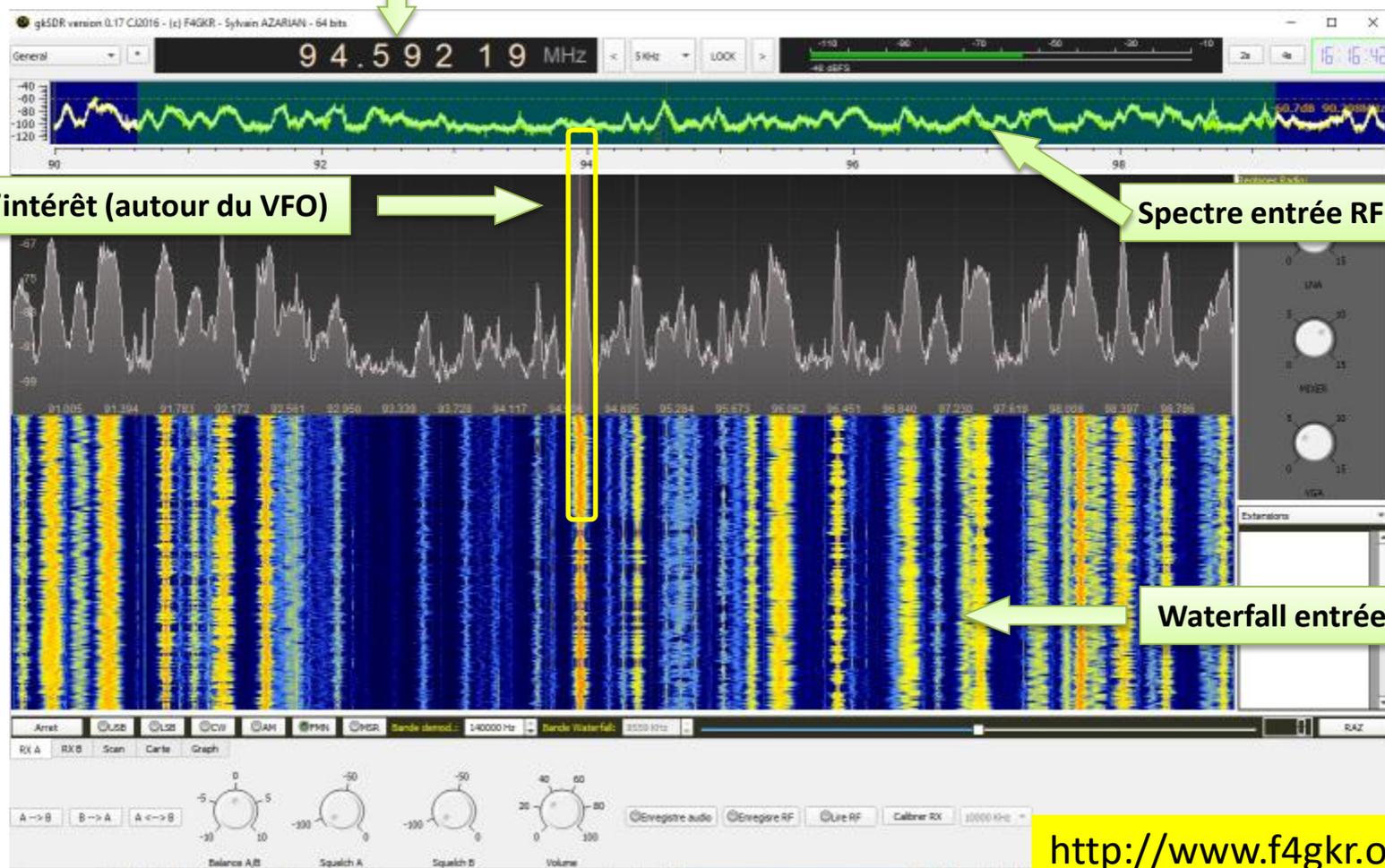
Logiciel SDR : exemple HDSDR



<http://www.hdsdr.de/>

Logiciel SDR : exemple gkSDR

VFO



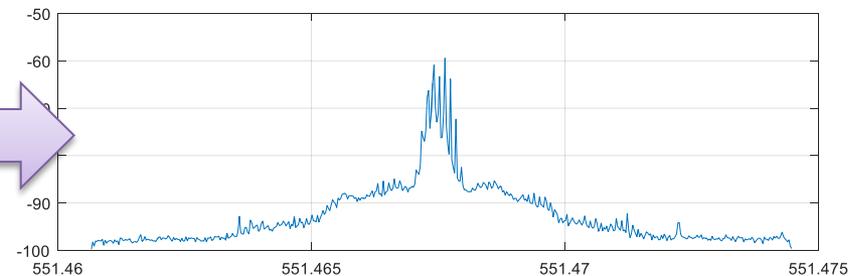
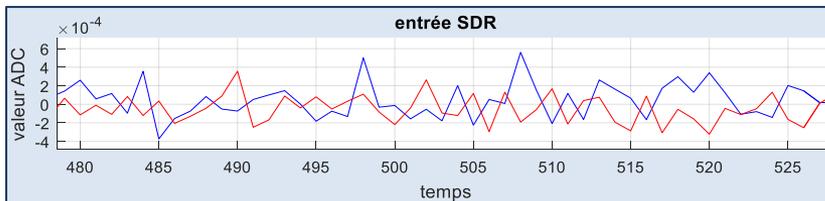
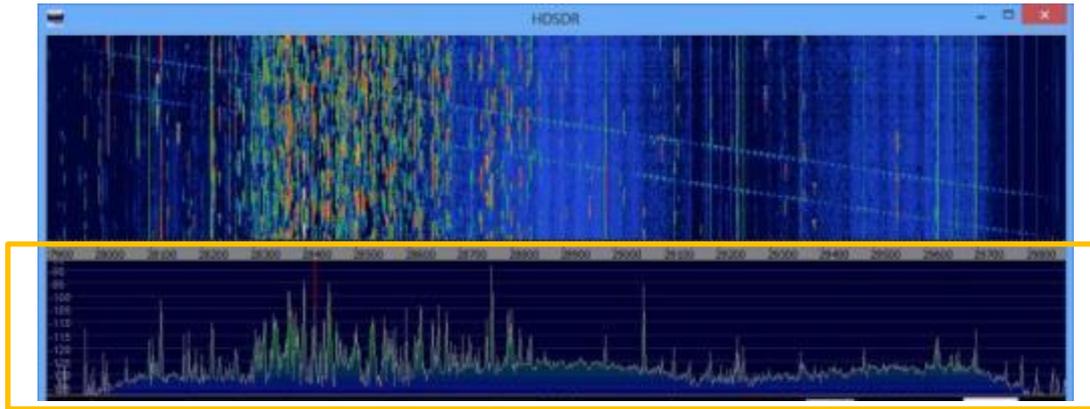
Zone d'intérêt (autour du VFO)

Spectre entrée RF

Waterfall entrée RF

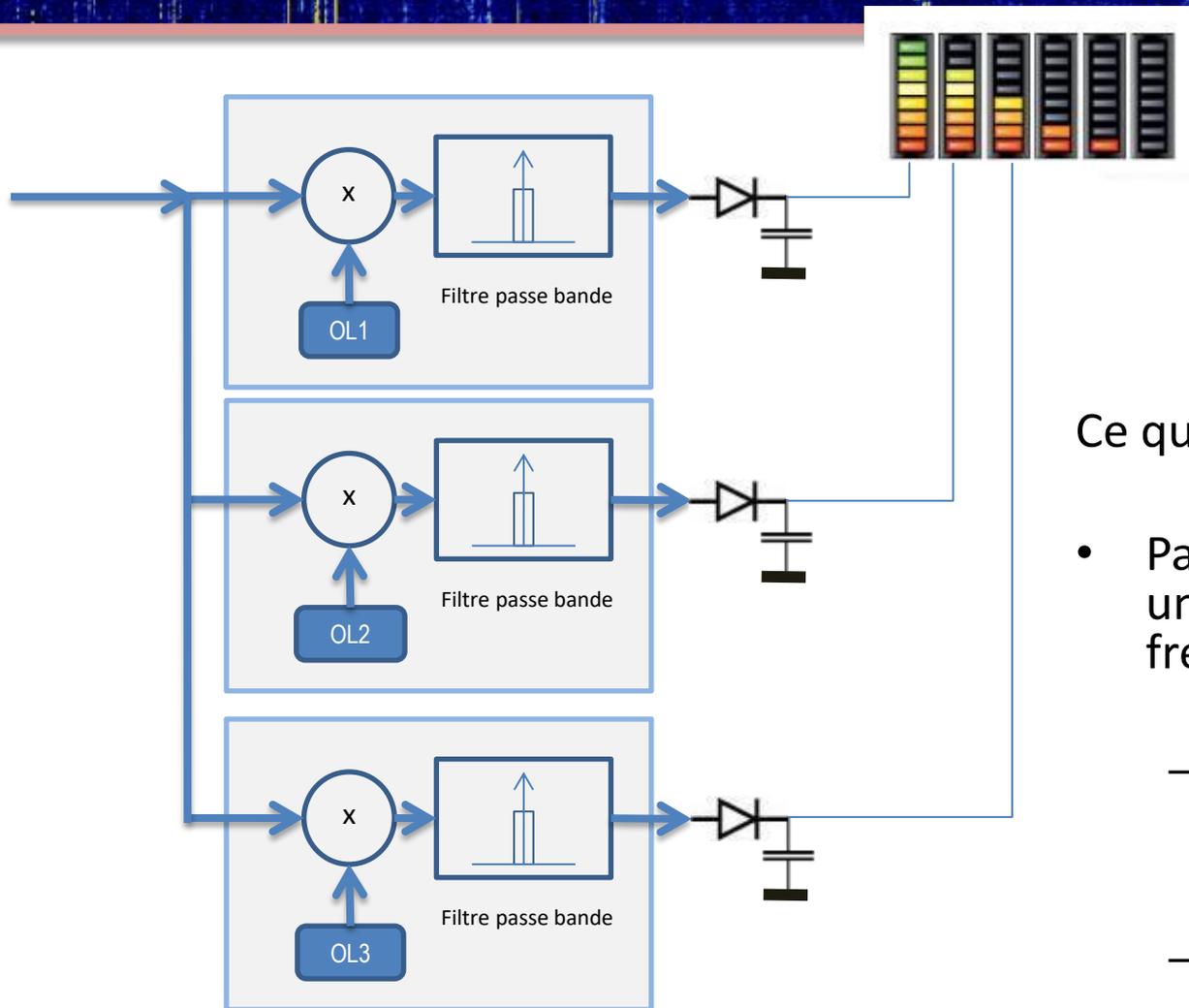
<http://www.f4gkr.org/>

Affichage du spectre



- Transformation « temporel » -> « fréquentiel »
- Comment est-ce réalisé ?

La transformée de Fourier



Ce que permet la FFT :

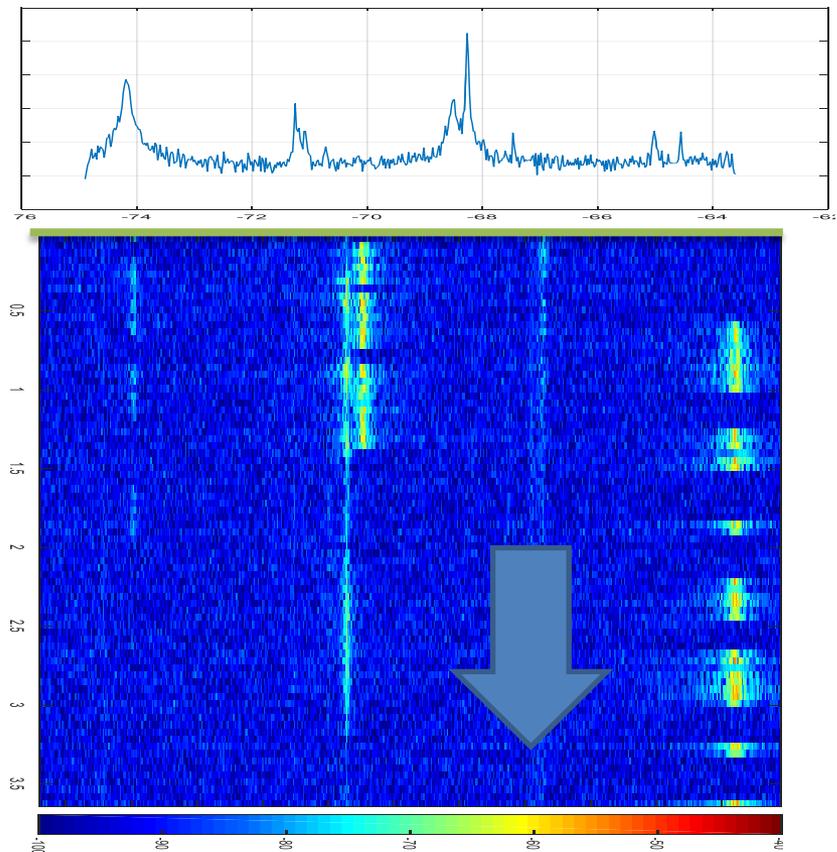
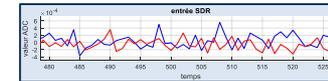
- Passer d'un signal temporel à une représentation fréquentielle
 - En entrée : une séquence d'échantillons successifs à pris à une cadence constante
 - En sortie : l'amplitude et la phase pour chaque fréquence

La transformée de Fourier *rapide* (FFT)

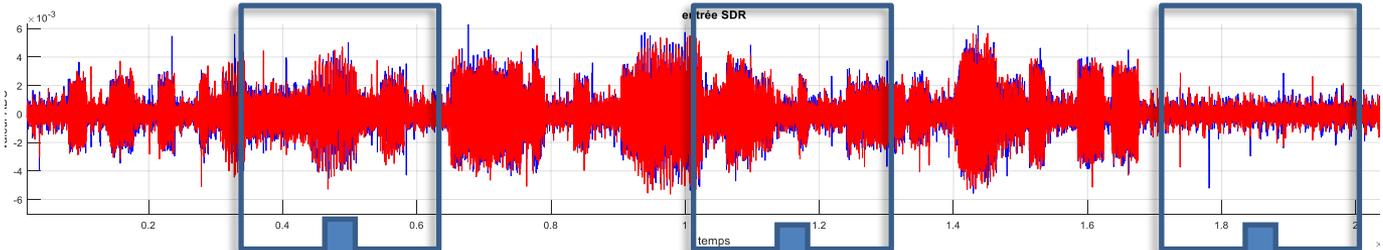
- Algorithme de calcul de la transformée optimisé pour des suites de valeurs (des échantillons). Ne requiert « que » $n \cdot \log_2(n)$ multiplications
- Optimisé pour des tailles puissances de 2 (..512,1024,2048 etc.)
- Exemples : SDR à 2 MHz
 - $n=1024$, $\log_2(n)=10$ il faut environ 10240 multiplications
 - $n=4096$, $\log_2(n)=14$ 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

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



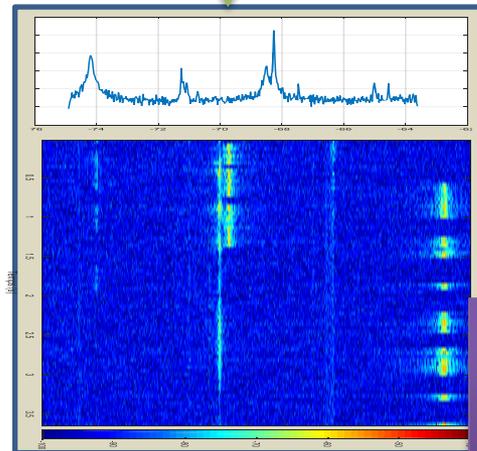
En résumé jusqu'à présent



FFT

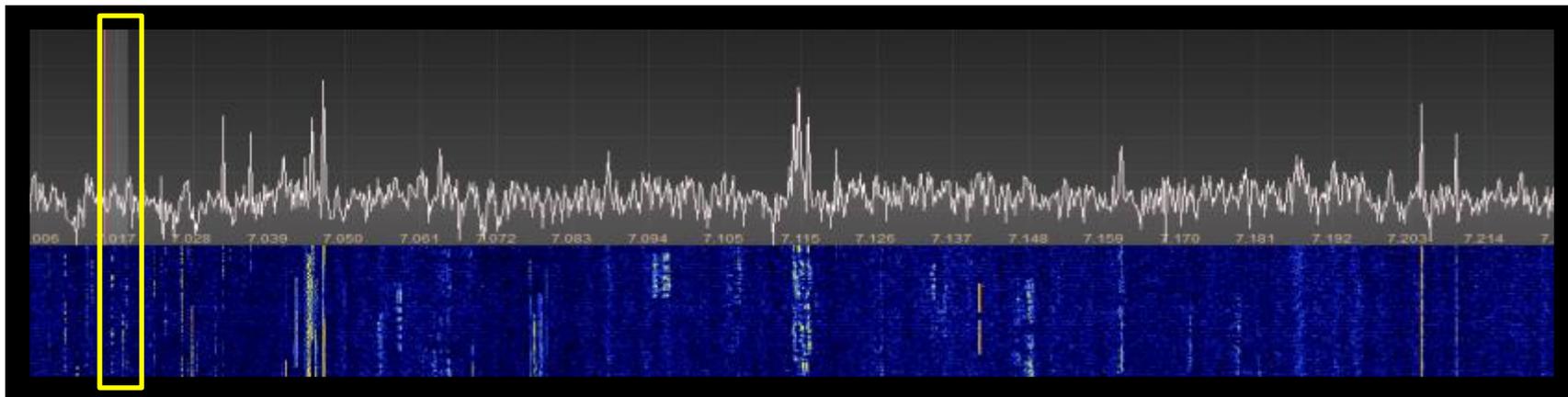
FFT

FFT



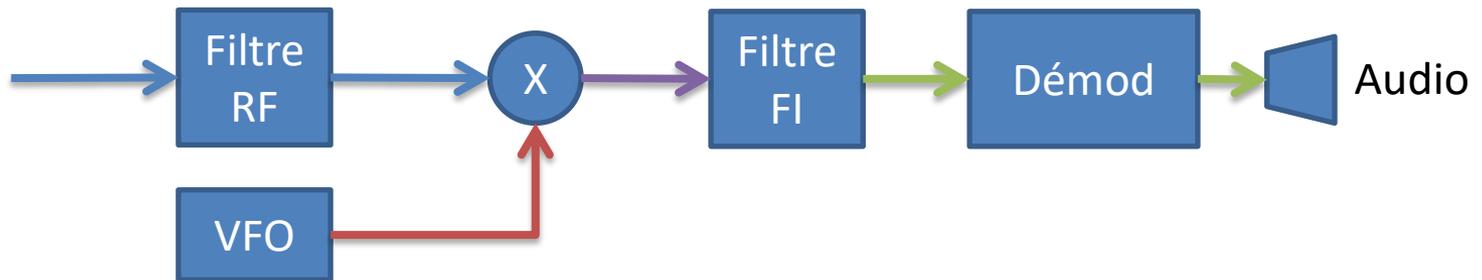
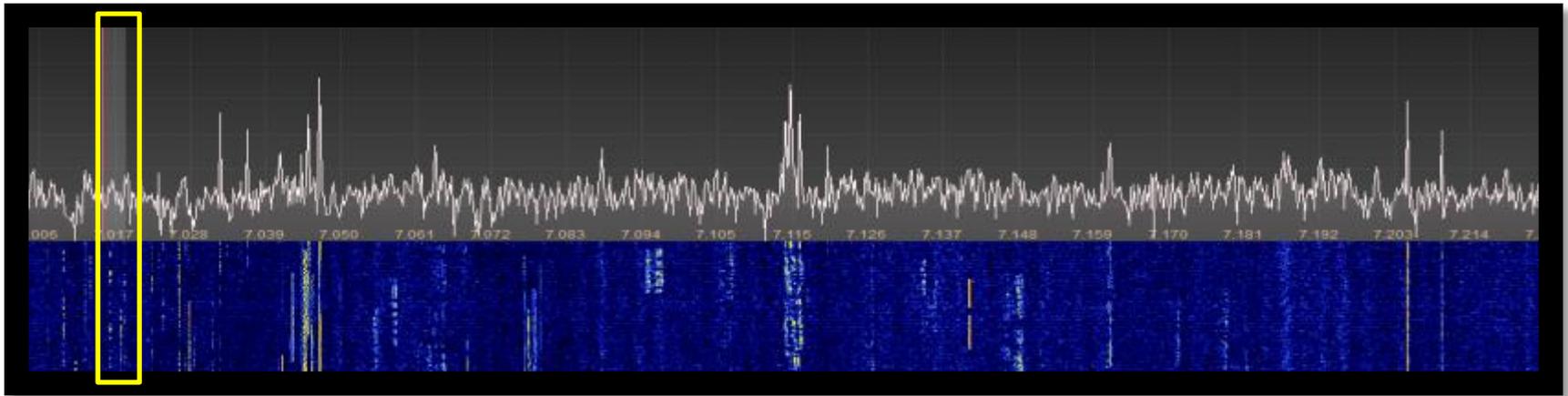
- Flux découpé en morceaux
- Calculs en continu
- A chaque coup, $n \cdot \log_2(n)$ opérations

Sélectionner la bande à démoduler



- On veut « extraire » une partie de la bande reçue (par exemple 3300 Hz en BLU) pour ensuite extraire l'audio (démoduler)
- Deux premières étapes :
 1. « Tuner » sur la bonne bande,
 2. Appliquer un filtrage passe-bande

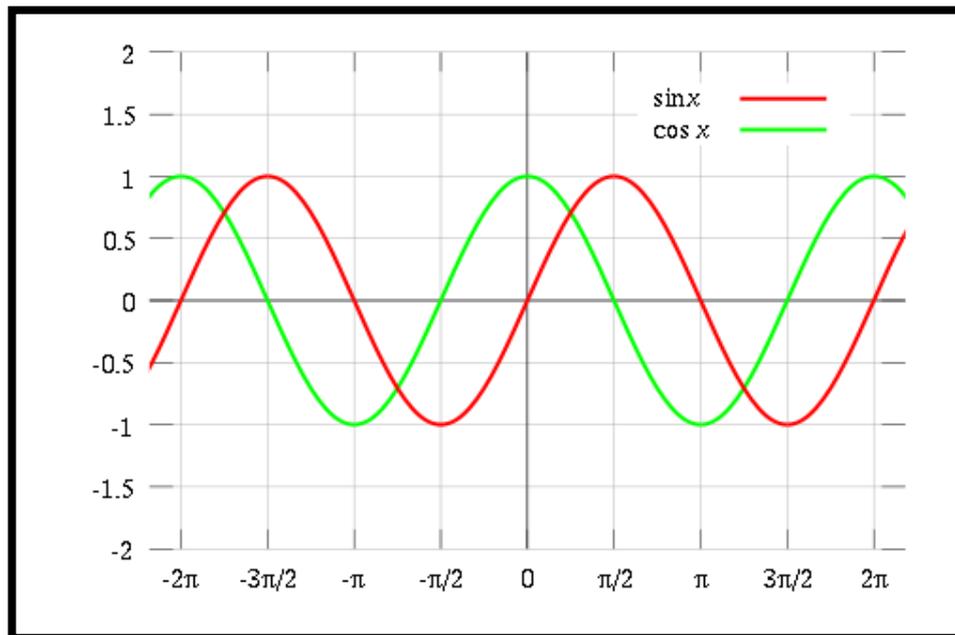
Sur un récepteur analogique



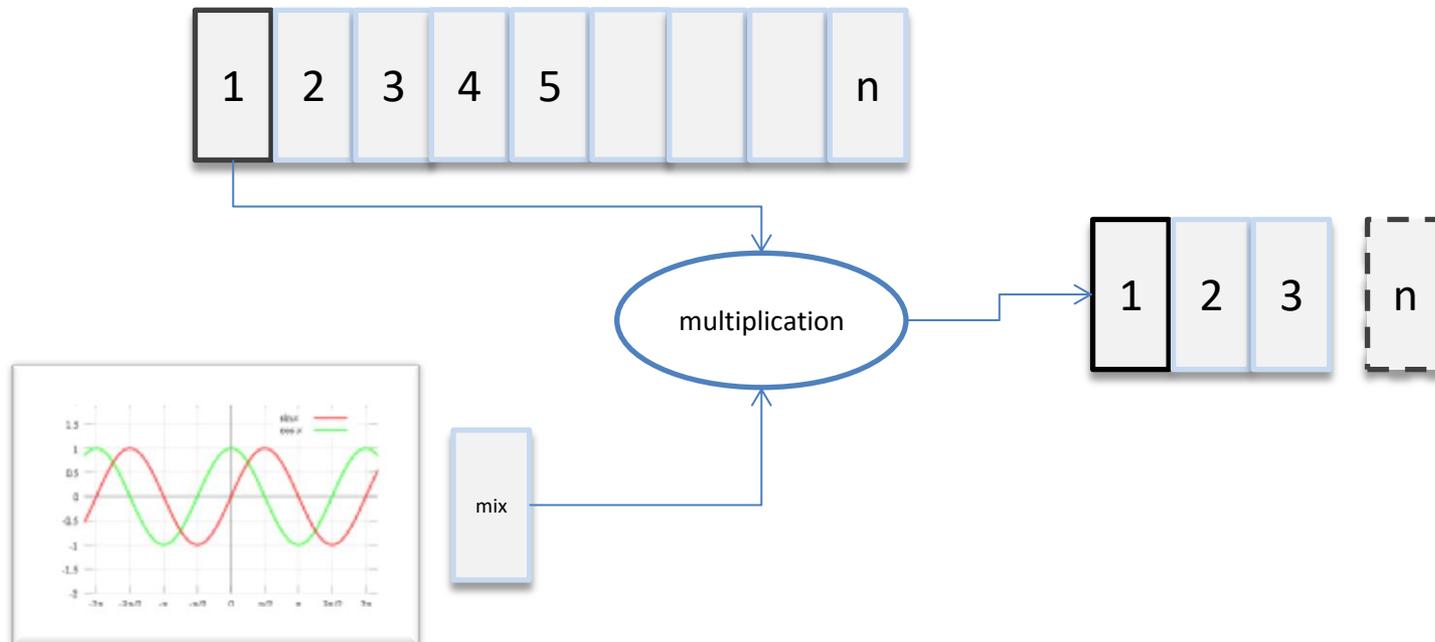
- La sélectivité dépend de la qualité des filtres
- Le bruit de phase / stabilité du VFO est critique

Le VFO

- L'objectif est de générer un signal de mixage le plus propre possible
- Très simple dans un SDR grâce à l'emploi de deux formules « simple » :
 - $\cos(x)$ et $\sin(x)$
 - Exactement déphasées de 90°

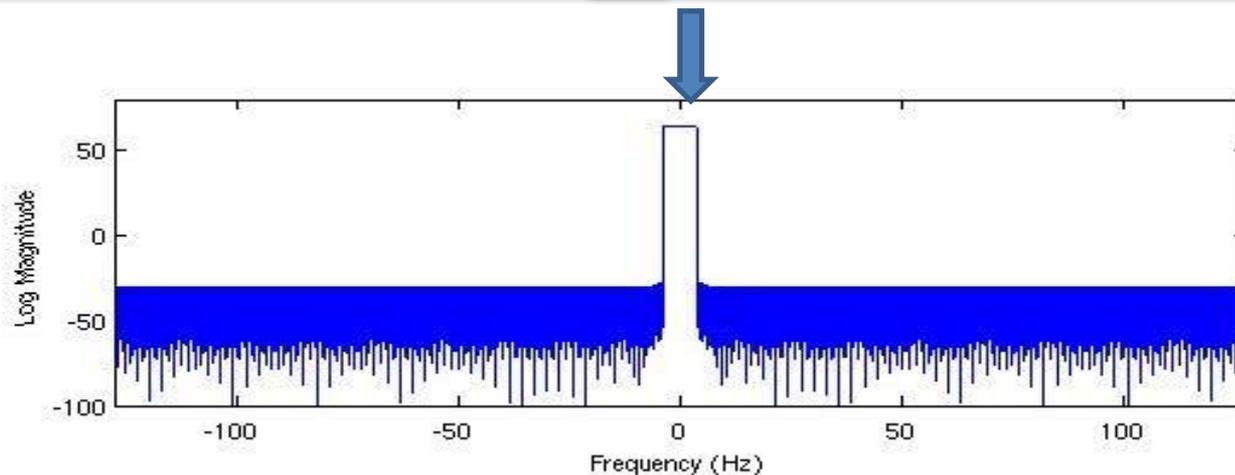
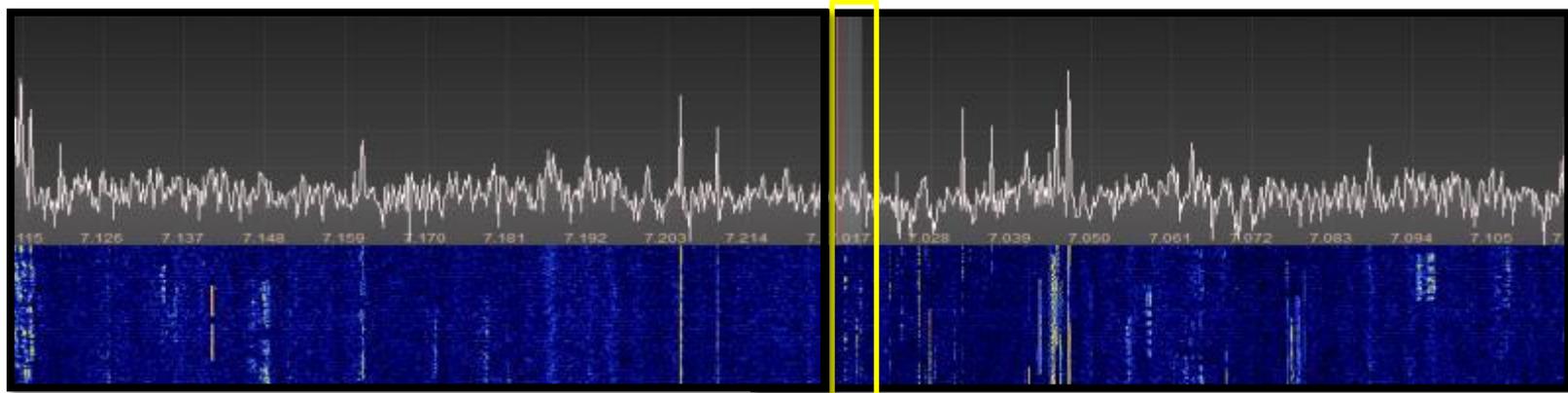


Le mixage



- En sortie de ce calcul; le spectre est « décalé » et recentré sur la fréquence de mixage
- Une multiplication par échantillon + calcul sin/cos

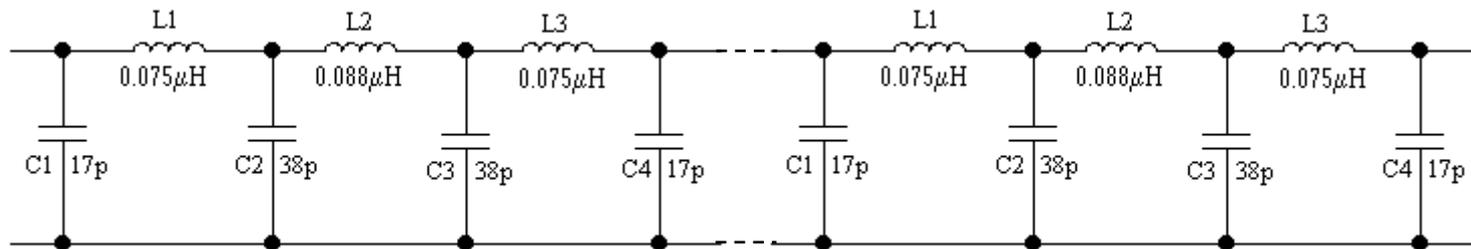
Extraction de la bande « utile »



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

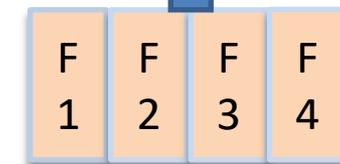
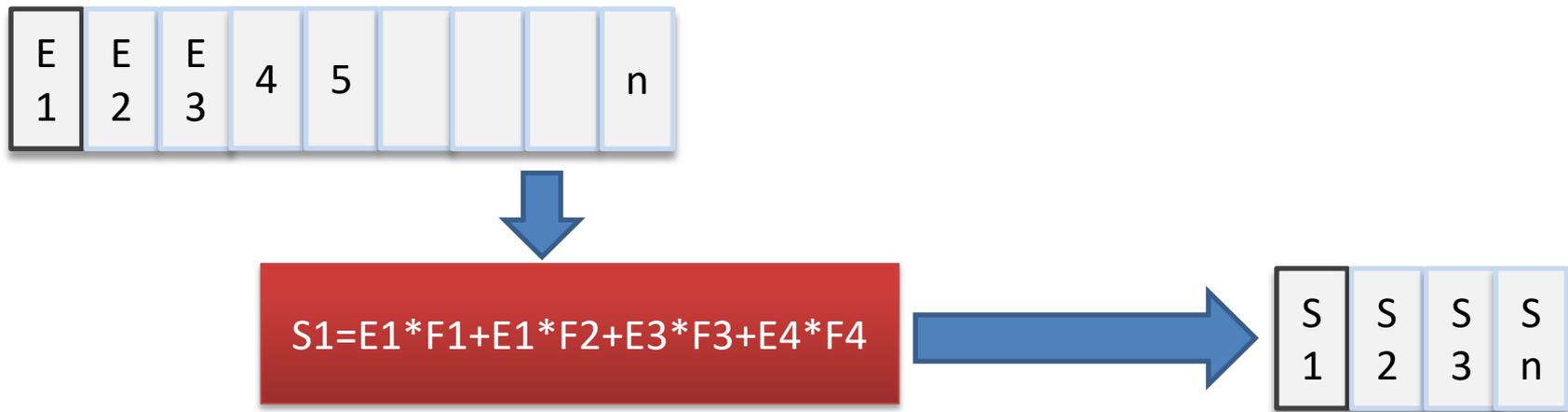
Introduction au filtre FIR

- FIR = Finite Impulse Response Filter
- En pratique : un « **certain nombre de coefficients** » bien choisis pour permettre de supprimer les composantes « hautes fréquences » (au-delà de la fréquence de coupure)
- Comme en analogique : *plus c'est long plus c'est bon*
 - Il faut beaucoup d'étages pour être sélectif (ou utiliser un filtre à Quartz)



Le filtrage « FIR »

- Opération répétée pour chaque échantillon

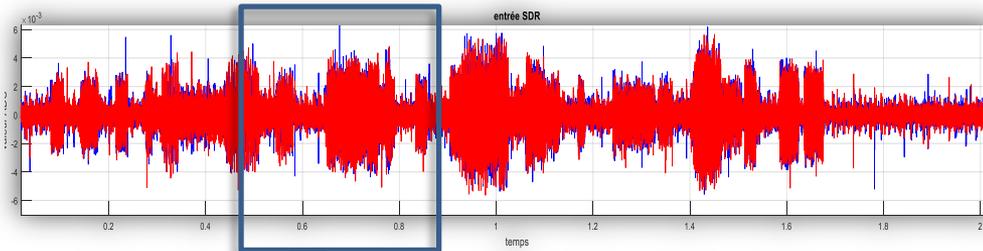


Filtre à 4 coefficients

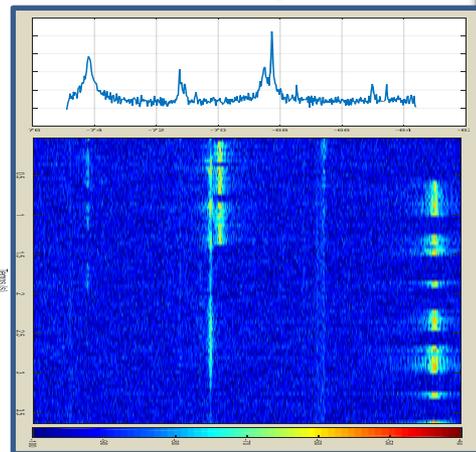
Nombre d'opérations à réaliser :

- N échantillons en entrée
- M coefficients
- Alors on fait **$N * M$ multiplications et M additions** (que l'on ne compte pas...)

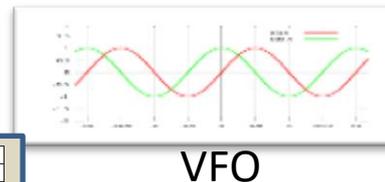
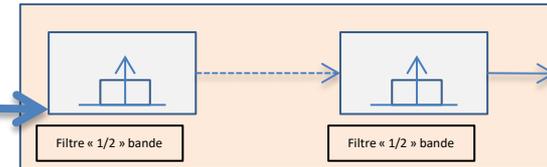
En résumé jusqu'à présent...



FFT



mix



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

Démodulateurs



Transfert des données entre blocs

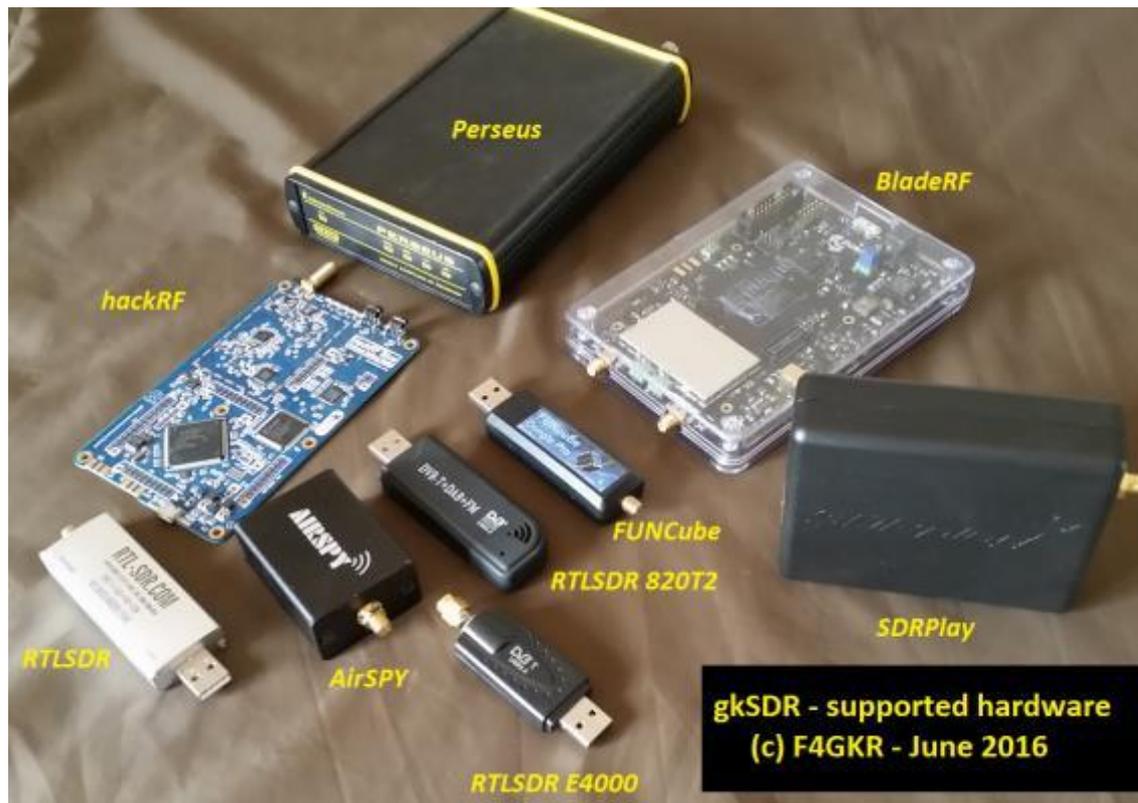
Dans un équipement « non logiciel » les données RF sont acheminées par une ligne de transmission (coax, piste etc.)

- Dans un logiciel SDR, les données entrent **par paquets** (USB, réseau, etc.) et sont envoyées par paquets à la carte son, au disque dur
- La difficulté est que les paquets répartis entre les différentes étapes du traitement entraînent un **temps de latence**.
- A titre d'information :
 - La majorité des « API » audio utilisent des buffers de quelques Ko (2048 par exemple)
 - Si les données audio ne sont pas envoyées au bon moment, ça s'entend (craquements)
 - Il faut donc dimensionner les traitements « à l'envers »... 1000 échantillons audio à 48 KHz représentent $1/48^{\text{ème}}$ de seconde, soit sur un SDR à 2MHz environ 42000 échantillons, et 200 000 pour 10 MHz de bande



3^{ème} PARTIE

Matériel amateur (ou pas trop cher)



Matériels présentés

Modèle	Fréquence mini	Fréquence maxi	Largeur de bande	Prix approximatif	Convertisseur	Où acheter / Infos ?
Clé DVBT "RTLSDR"	24 MHz	1766 MHz	de 256 KHz à 2.5 MHz	24 € + frais de port 2 x 8 bits	USB2	http://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/
SDRPlay	100 KHz	2 GHz	de 200 KHz à 8MHz	153 € 2 x 10 bits	USB2	http://www.sdrplay.com/
AirSpy	24 MHz	1800 MHz	2.5 MHz ou 10 MHz	200 € avec port inclus 1 x 12 bits	USB2	http://airspy.com/purchase/
BladeRF	240 MHz	3800 MHz	de 0,1 à 40 MHz	396€ (420\$) + port 2 x 12 bits	USB3	https://www.nuand.com/blog/shop/
Perseus SDR	0,1 MHz	40 MHz	0,125 MHz à 2 MHz	799 € + port 2 x 24 bits	USB2	http://microtelecom.it/perseus/
Afedri SDR (double)	0,1 MHz	30 MHz	1,8 Mhz ou 2x900 KHz	330 € port inclus 4 x 12 bits	USB2 ou réseau	http://www.afedri-sdr.com/index.php/new-afe822x-sdr-net-dual-channel

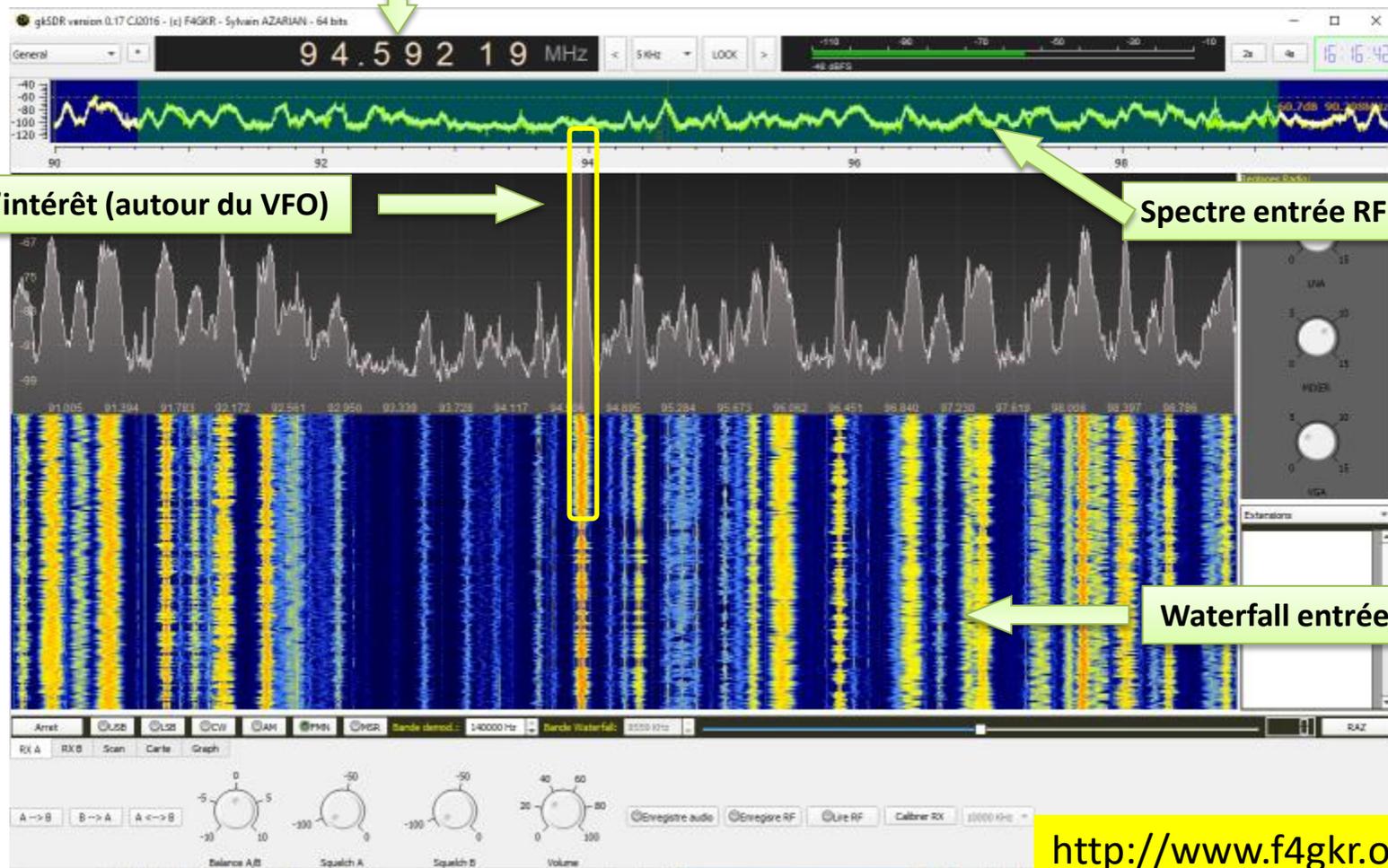
ATTENTION :

Certains récepteurs à échantillonnage direct contiennent en réalité un seul ADC par voie (ex: Perseus ou Afredri). Les voies « I et Q » sont reconstituées par calcul dans le FPGA intégré.

Ils échantillonnent à grande vitesse (ex: 72 MHz pour AFEDRI) et ensuite réduisent par le FPGA la bande à quelques KHz. Cette réduction (décimation) permet d'améliorer le rapport signal/bruit et fait « comme si » l'ADC avait une meilleure résolution.

Démo gkSDR

VFO



Zone d'intérêt (autour du VFO)

Spectre entrée RF

Waterfall entrée RF

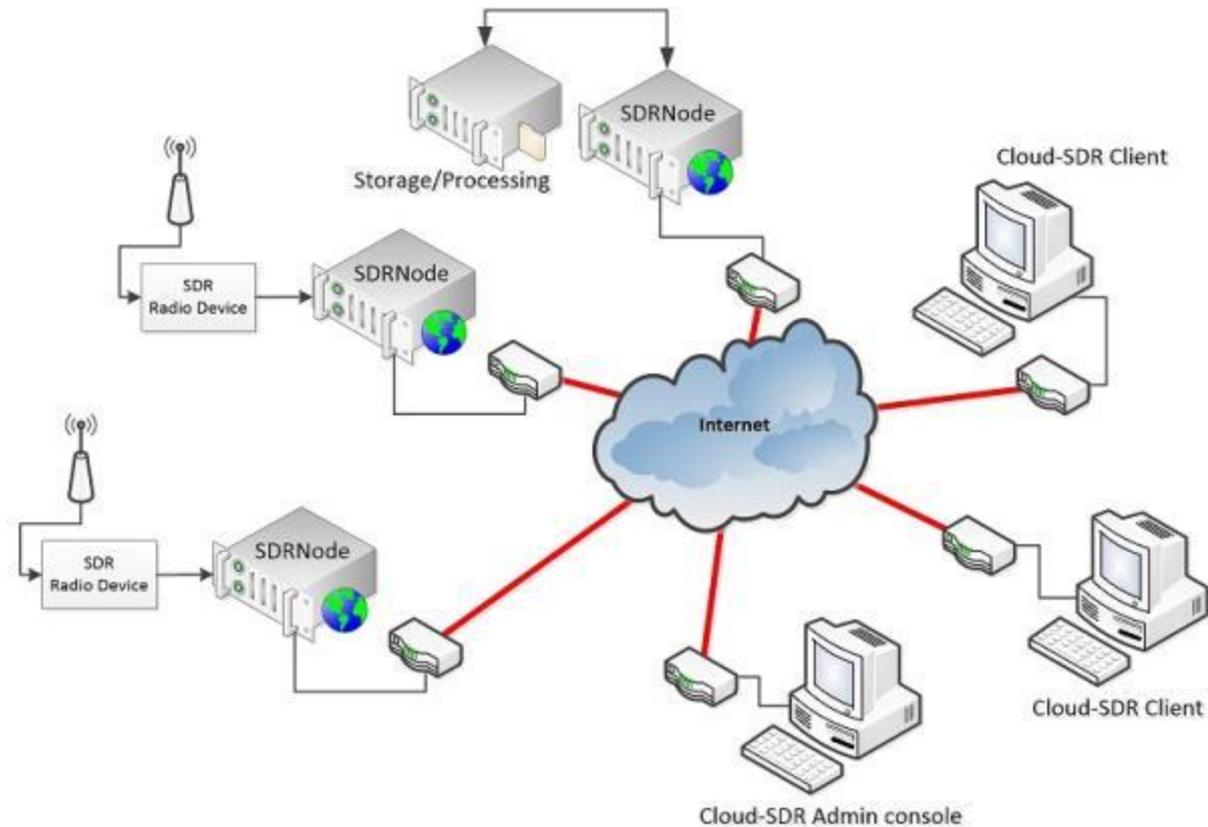
<http://www.f4gkr.org/>

gkSDR

- gkSDR est un logiciel gratuit et open source disponible sur mon site perso : www.f4gkr.org



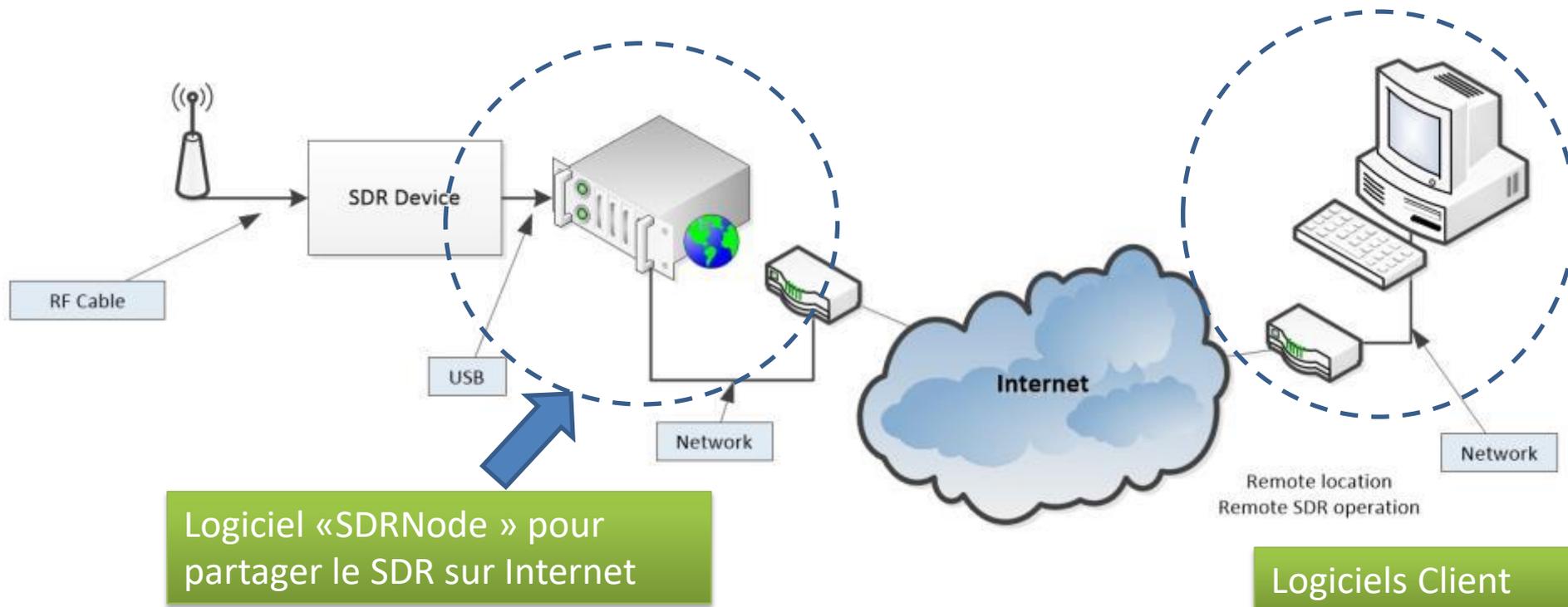
Présentation et démo Cloud-SDR



Cloud-SDR

- Est un produit (bientôt) commercialisé par la société SDR-Technologies SAS (créée 07/11/2016...)
- Destiné **aussi** aux amateurs et SWL

Le Concept Cloud-SDR



Réglementation

- Cadre réglementaire : Articles 226-1, 226-2, 226-3 du Code Pénal
- **L'accès au spectre pouvant contenir des informations à caractère personnel est réglementé**

Cloud-SDR intègre donc :

- Transactions cryptées (mécanisme de clé publique/clé privée),
- Fréquences demandées limitées selon le type d'utilisateur,
- N'implémente pas de fonctions de décodage des protocoles « télécom ».



Serveur SDR-Node



- Système autonome et programmable à distance,
- Exploite des miniPC avec environnement logiciel spécifique.

Logiciel client

- Version spéciale gkSDR avec partie du programme non open-source,
- Extension « extio » pour HDSDR, SDRUno,...

Cloud-SDR

- Site officiel : www.cloud-sdr.com
- Pour les personnes qui étaient présents à KLO, me contacter pour utiliser le logiciel.