

Présentation des SDR par Patrick F1EBK

- . Généralités
- . Architecture
- . Partie Matérielle du SDR
- . Partie Logicielle du SDR
- . Quelques exemples d'utilisation de SDR
- . Quelques exemples de SDR en démonstration
- . Etc ...

Qu'est-ce qu'un SDR ?

- Un SDR est un récepteur (parfois un émetteur-récepteur) dont une partie des composants matériels a été remplacé par un logiciel.
- Ceci est réalisé en numérisant le signal reçu, et en utilisant des programmes pour effectuer des fonctions qui étaient réalisées à l'aide de circuits électroniques.
- Le SDR n'a donc rien à voir avec le CAT (Computed Aided Transceiver) qui permet de commander un transceiver à l'aide d'un ordinateur. Dans le SDR, une partie des fonctions sont réalisées de manière logicielle.
- Le précurseur du SDR a été la réception télétype, mais voyons cet exemple en détail :

Le RTTY : un prototype de SDR

- Au début, pour faire du RTTY, il fallait un récepteur, un décodeur, et un télétype pour imprimer le texte reçu. Tout ce matériel était complexe, sujet à des pannes diverses.
- Dans les Années 1990, sont apparus les interfaces JVFAX. Cet interface simple à construire (en fait un simple ampli-op monté en comparateur) permettait de décoder aussi bien le RTTY, que le FAX, et même la SSTV !
- Un simple comparateur pouvait-il remplacer tout ce matériel ? Non ! Il permettait d'interfacer le récepteur à un ordinateur qui se chargeait de décoder et d'afficher le résultat !
- On peut considérer que nous avons affaire au premier SDR car nous avons remplacé une partie du matériel de réception par un programme.

Les Avantages de la SDR (début)

- Avec ce premier exemple, nous pouvons facilement mettre en évidence quelques avantages de la SDR :
- Réduction des coûts (une grande partie du matériel ayant été remplacé par du logiciel).
- Amélioration de la fiabilité.
- Réalisation de fonctions difficiles à réaliser. Qui ne se rappelle pas des bobines 88mH destinées à la discrimination des deux notes du RTTY espacées de 170Hz
- Plus grande flexibilité : Un logiciel de décodage de RTTY pourra facilement s'adapter à différentes vitesses de modulation ce que ne pouvait pas faire la version matérielle.

Avantages de la SDR (suite)

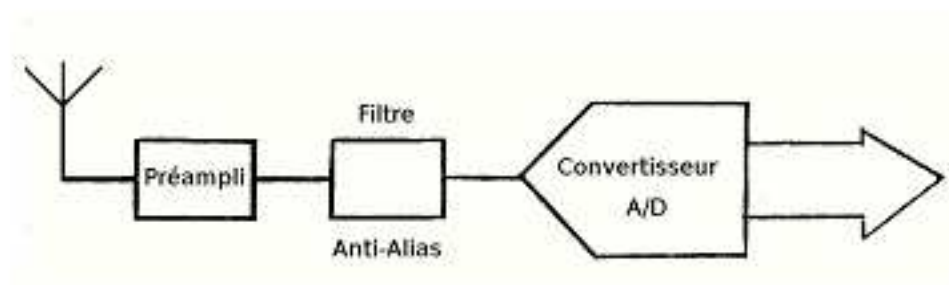
- Au delà de ce premier exemple, nous pouvons citer les avantages suivants :
- Réalisation de fonctions complexes comme des filtres à largeur variable.
- Réalisation de fonctions 'parfaites' c'est à dire que la partie logicielle va compenser les 'imperfections' de la partie matérielle de manière à la rendre 'idéale'.
- La puissance des ordinateurs nous permet de traiter en temps réel une grande bande passante et d'effectuer simultanément le décodage de multiples émissions se trouvant dans cette bande.
- Enfin, la SDR va nous permettre de faire du 'traitement du signal' avec transformée de fourrier, déconvolution, filtres prédictifs, etc...

Théorie du SDR (juste un peu!)

- Pour construire un SDR, nous allons essayer de simplifier au maximum la partie matérielle, mais nous allons voir que l'on ne pourra jamais la supprimer totalement.
- Pour 'adapter' notre récepteur à un ordinateur, nous allons utiliser un convertisseur Analogique/Digital (A/D) qui va permettre de définir le plus précisément possible le signal reçu. C'est ce que l'on appelle la numérisation.
- Le convertisseur A/D va mesurer l'amplitude du signal analogique 'un certain nombre de fois par seconde, c'est ce que l'on appelle l'échantillonnage.
- Une des règles de base de la conversion A/D est le théorème de **Nyquist-Shannon** qui dit que pour numériser un signal d'une fréquence F , nous devons échantillonner au moins à une fréquence double.

Un SDR ultra-simplifié

- La partie matérielle de notre SDR va être constitué par un convertisseur A/D qui va échantillonner au double de la fréquence à recevoir.
- Ce convertisseur sera précédé d'un filtre anti-crénelage (je préfère utiliser le nom anglais d'anti-aliasing) qui va éviter de présenter des fréquences supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage à l'entrée du convertisseur A/D.



Analyse du SDR simplifié

- Tel quel ce SDR est totalement fonctionnel, mais il possède quelques limitations :
- Le filtre anti-aliasing doit être adapté à la fréquence d'échantillonnage ce qui interdit de modifier celle-ci dans la pratique.
- Plus on monte en fréquence, plus le volume d'information transmis à l'ordinateur augmente. A 30 MHz , il faudrait échantillonner à 60 Ms/s (60 millions d'échantillons par seconde !) ce qui va nous obliger à prévoir les canaux de transport d'information de 60Mb/s (pour une numérisation sur 8 bits) et même 120Mb/s (pour une numérisation en 16 bits) entre le convertisseur et l'ordinateur.
- Cette technique de numérisation est tout à fait utilisable en VLF à condition d'avoir un bon filtre anti-aliasing.
- Le récepteur Perseus utilise cette technique.

Architecture des SDR

- Il existe de nombreuses manières pour numériser un signal. F4DAN sur son site <http://f4dan.free.fr/sdr.htm> les a toutes répertoriées.
- Vous trouverez dans les prochaines diapositives les principales méthodes avec leurs avantages ainsi que les principales réalisations basées sur ce principe.
- Pour les techniques les plus utilisées, nous allons voir en détail les avantages, les limitations ainsi que des réalisations pratiques.

Techniques de numérisation (I)

- **Numérisation par carte son de la sortie audio d'un récepteur conventionnel**

- ---

Très simple, cette technique permet d'utiliser du matériel existant mais au détriment des performances.

- Le récepteur va limiter la bande passante utilisable en fonction du mode choisi (souvent vers 3KHz) donc cette technique n'est utilisable que pour des bandes passantes étroites.

- Faible coût car tous les éléments sont déjà présents dans le shack (un récepteur et un PC équipé d'une carte son).

- Attention toutefois au raccordement de la sortie du récepteur sur l'entrée de la carte son, les niveaux ne sont pas toujours compatibles, et la plupart des récepteurs sortent la BF sur une composante continue de 6V (destructrice pour la carte son).

- Les applications sont nombreuses (PSK31, Packet-radio, WSJT, etc...)

Techniques de numérisation (II)

- **Numérisation par carte son d'une F.I. Autour de 12KHz**
- Cette technique est peu utilisée car elle cumule les inconvénients d'un récepteur matériel limitant la bande passante, et la présence d'un interface assez complexe. En général, peu de récepteurs ont une F.I. Vers 12KHz, il faut donc refaire une nouvelle F.I. À partir du 455KHz...
- On peut espérer une bande passante utilisable vers 15KHZ, mais dépend du filtrage effectué dans le récepteur.
- Peu d'applications utilisent cette technique, mais il faut citer le Dream DRM.

Techniques de numérisation (III)

Dans les exemples précédents, la bande passante utile était toujours limitée par le récepteur. Il serait donc intéressant de construire un récepteur spécial. Mais quelles vont être ses caractéristiques ?

Avoir une bande passante la plus large et la plus plate possible. Nous allons voir un peu plus tard quels sont les éléments limitant la bande passante. Pour le moment, le récepteur ne devra pas être un élément limitant.

Etre simple à réaliser. Pour rester dans un esprit de simplification, nous allons rechercher un récepteur facile à réaliser, et à faible coût.

Apporter un minimum d'imperfections à l'ensemble. La simplicité du design (encore !) nous garantira l'absence de réponses parasites.

Etude d'un récepteur dédié SDR

Le récepteur le plus simple que l'on puisse trouver est le récepteur à conversion directe.

Ce type de récepteur n'est plus utilisé à cause d'un inconvénient de taille : son incapacité à rejeter la fréquence image.

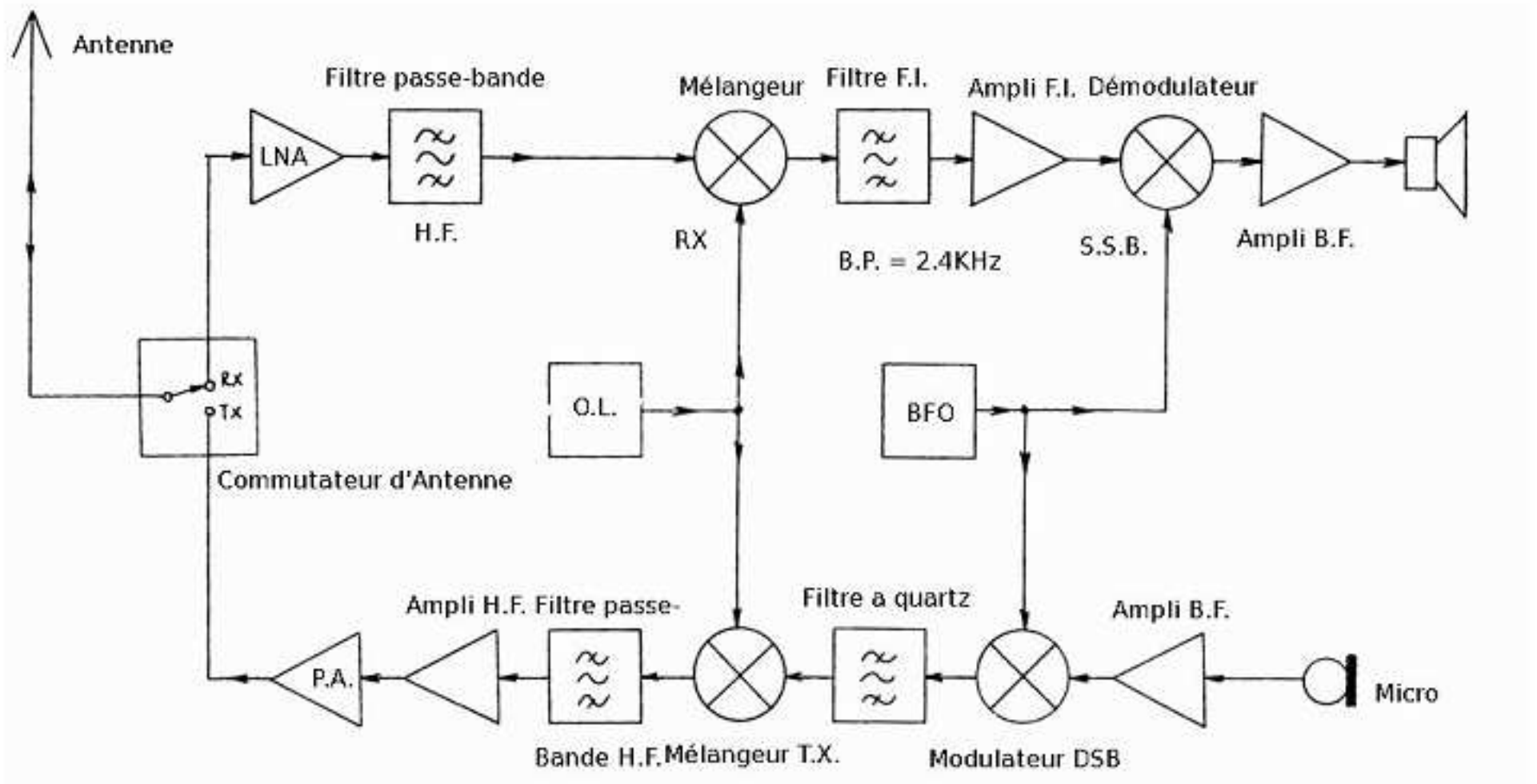
Sa très grande simplicité nous assure l'absence de raies parasites, de produits de mélange, ce sera un élément décisif pour la création d'un récepteur se rapprochant le plus possible de la perfection.

Sa grande simplicité assure également un coût de réalisation minimal, ainsi qu'une facilité de réalisation optimale.

Nous allons voir comment remédier au problème de la fréquence image.

Mais, nous allons commencer par étudier le synoptique :

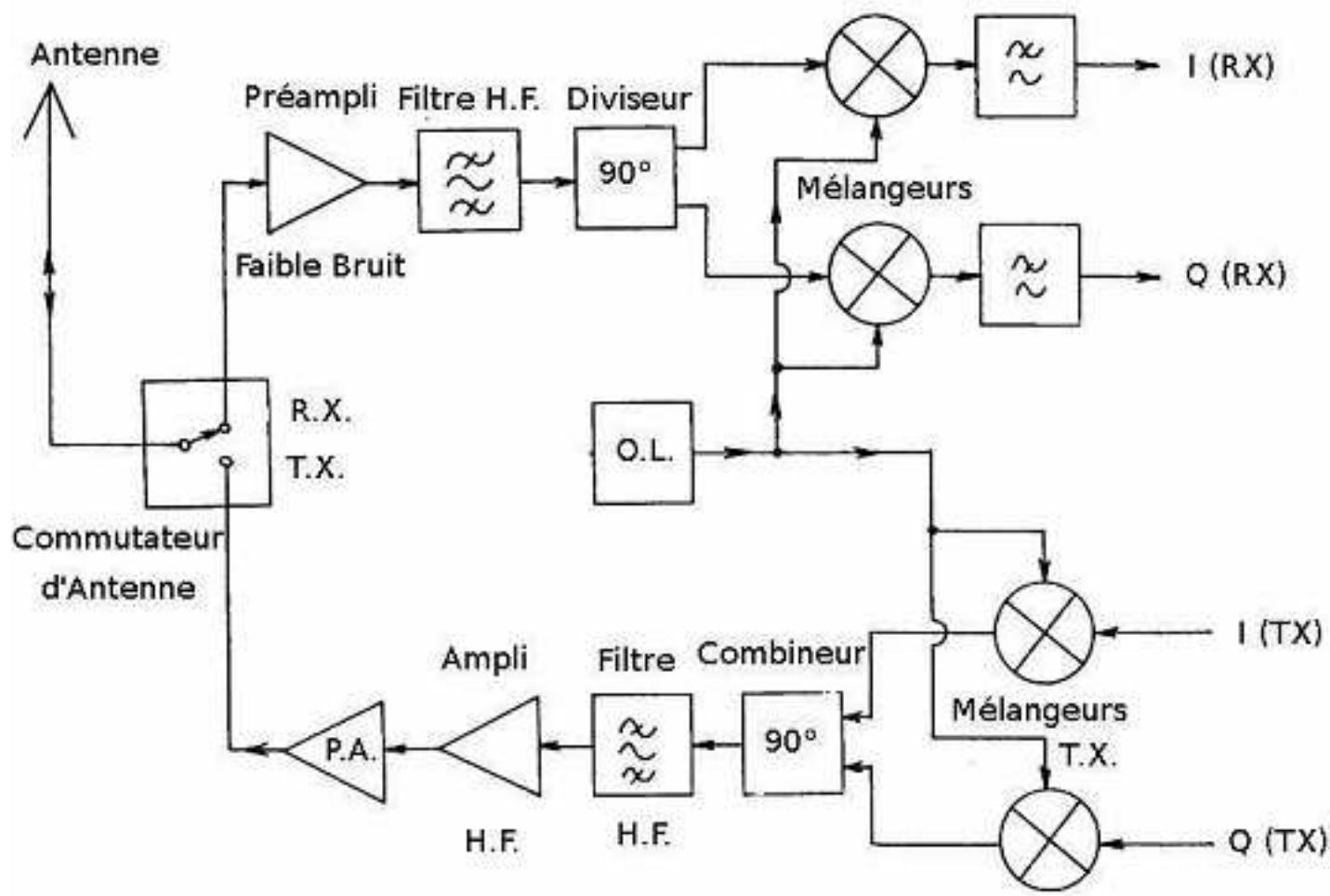
Synoptique d'un TRX à conversion directe



Amélioration du récepteur de base

- Si l'on pose la question : pourquoi la fréquence image n'est-elle pas rejetée ?
- - Un mathématicien vous répondra que la partie imaginaire du produit de mélange est ignorée.
- - Un électronicien vous dira que l'on a besoin d'une seconde information sur ce mélange pour pouvoir différencier la fréquence utile de la fréquence image.
- Ces deux réponses sont tout à fait équivalentes. Il faut faire un second mélange avec un signal déphasé de 90° (soit le signal de réception, soit l'OL) de manière à pouvoir rejeter la fréquence image.
- C'est ce que l'on appelle un 'récepteur I/Q' du nom des deux signaux de sortie. Voici le synoptique :

Synoptique d'un TRX I/Q



synoptique d'après S53MV

Le récepteur I/Q base des SDR

- Le synoptique précédent est à la base de la majorité des SDR actuels de fabrication OM ou commerciale.
- Nous voyons que dans ce synoptique, nous sortons directement les signaux I et Q à destination de la carte son. Toute la partie 'démodulation I/Q' nécessaire à la restitution du signal audio a été supprimée, et est donc réalisée par logiciel (avec bien d'autres traitements !)
- La première caractéristique de ce type de récepteur est de ne pas limiter la bande passante. Bien sûr nous allons conserver un filtre anti-aliasing (c'est important) mais ce filtre peut avoir une bande passante aussi large que possible.
- C'est le convertisseur A/D qui va être le seul élément limitant la bande passante. En fonction des caractéristiques de celui-ci, nous allons obtenir des SDR aux capacités différentes.

Les méthodes de numérisation

- Il existe deux méthodes principales de numérisation :
- La solution la plus simple, et la moins coûteuse pour numériser les voies I et Q consiste tout simplement à utiliser la carte son du PC. Avec une carte son classique, nous pouvons échantillonner à une fréquence de 44KHz ce qui va nous donner une bande passante de 44KHz. Le gain de bande passante est appréciable !
- La solution la plus performante consiste à numériser le signal à l'aide d'un convertisseur A/D rapide, et d'utiliser un FPGA, ou tout autre circuit rapide pour envoyer le signal au PC par l'intermédiaire d'un câble USB, ou du réseau Ethernet. Dans ce cas, la bande passante n'est limitée que par la vitesse d'échantillonnage du convertisseur.

Numérisation par carte son

L'utilisation de la carte son pour numériser les signaux venant du récepteur est très souvent utilisée. Au delà du fait qu'il est possible d'obtenir une bande passante de 44 KHz en utilisant la carte son intégrée à tout ordinateur, il existe des cartes son plus performantes.

Une carte très utilisée est la Delta-44 de chez M-Audio, elle est capable d'échantillonner 4 voies simultanées à 96KHz. Son matériel a été étudié (surtout par SM5BSZ) qui propose sur son site des modifications visant à améliorer la dynamique de la carte. Cette carte coute plus cher qu'une carte audio classique.

D'autres cartes son existent aujourd'hui pouvant échantillonner à 192KHz comme l'EMU0202. C'est une carte son externe (relié à l'ordinateur par câble USB), mais elle ne possède que 2 voies (souvent suffisant). La bande passante est encore doublée...

Numérisation par carte son

L'utilisation de la carte son pour numériser les signaux venant du récepteur est très souvent utilisée. Au delà du fait qu'il est possible d'obtenir une bande passante de 44 KHz en utilisant la carte son intégrée à tout ordinateur, il existe des cartes son plus performantes.

Une carte très utilisée est la Delta-44 de chez M-Audio, elle est capable d'échantillonner 4 voies simultanées à 96KHz. Son matériel a été étudié, surtout par SM5BSZ, qui propose sur son site des modifications visant à améliorer la dynamique de la carte. Cette carte coute plus cher qu'une carte audio classique.

D'autres cartes son existent aujourd'hui pouvant échantillonner à 192KHz comme l'EMU0202. C'est une carte son externe (relié à l'ordinateur par câble USB), mais elle ne possède que 2 voies (souvent suffisant). La bande passante est encore doublée...

Les limites des cartes son

C'est la fréquence d'échantillonnage de la carte son qui limite la bande passante du SDR (et elle seule). De nombreux Oms sont tentés de rechercher des cartes son échantillonnant toujours plus vite. Certains attendent la sortie de cartes 384KHz !

Mais il faut tenir compte aussi de la dynamique de la carte son. Même si une carte son de performances moyennes donnera des résultats incroyables, une carte son avec une bonne dynamique permettra d'exploiter au mieux le signal issu du récepteur.

Par exemple, la Delta-44 est une carte 24bits, mais les bits de poids faible ne sont pas significatifs. SM5BSZ a publié sur son site des modifications pour l'améliorer (filtrage, suppression de l'étage d'entrée, etc...) dans le but d'améliorer sa dynamique.

Numérisation par convertisseur A/D

Pour ceux qui ont besoin d'une bande passante encore plus large, il faut utiliser un convertisseur A/D rapide. Il existe aujourd'hui des convertisseurs très (trop ?) rapides. Mais il faut garder en mémoire les éléments suivants :

- Plus la fréquence d'échantillonnage va augmenter, plus la bande passante analysée sera large, mais le volume d'information à transmettre à l'ordinateur va augmenter.
- La transmission de ses données doit être faite en temps réel, et nécessite des circuits de traitement rapide.
- Le temps de traitement de ses données risque d'augmenter au delà des capacités de l'ordinateur. Calculer une transformée de Fourier 1024 points est beaucoup plus rapide que sur 4096 (et pas que dans un facteur 4). Or, la majorité des traitements se fait par transformée de Fourier.

L'oscillateur local

Dernière étape de notre analyse matérielle.

En fonction du montage, l'oscillateur doit fournir un signal à 2 ou 4 fois la fréquence de réception. Voici les principales qualités demandées à un OL :

- Avoir un niveau de sortie suffisant.
- Pouvoir couvrir une large gamme de fréquences.
- Avoir une bonne stabilité.

A ce jour, un véritable consensus s'est formé autour du SI570. Il existe de nombreuses sources de kits (plus ou moins partiels) pour fabriquer son propre OL. Les logiciels de traitement du signal savent le commander pour sélectionner la fréquence centrale du récepteur.

Le SI570

Dans sa version de base, le SI570 fournit un signal entre 10 et 945MHz, il existe des versions étendues qui peuvent monter à 1.4GHz , et une version CMOS limitée à 160MHz.

Son boîtier est minuscule (5x7mm), avec seulement 8 broches. Il est alimenté en 3v3.

Sa commande se fait par un bus I2C, donc nous avons besoin d'un interface pour le commander à partir d'un port USB.

Sa précision en fréquence est excellente.

Sa stabilité en fréquence est très bonne.

Sa pureté spectrale est moyenne, donc prévoir un filtrage du signal de sortie. Mais dans ce cas, la gamme de fréquences couvertes va être très limitée.

La partie logicielle du SDR

Nous avons vu en détail la partie matérielle du SDR, intéressons-nous maintenant à la partie logicielle.

Cette partie est très importante, car c'est le logiciel qui va effectuer la plus grosse partie du travail. Il est donc très important de choisir un logiciel performant.

Ce logiciel va remplacer toute une partie d'un récepteur traditionnel, nous allons voir en détail ces fonctions.

En émission, le logiciel génère les signaux I et Q qui va déterminer aussi bien la fréquence d'émission, que la modulation. Les modulations à large bande sont possibles (bien que rarement utilisées) dans la limite de la moitié de la fréquence d'échantillonnage du DAC.

Les fonctions du logiciel SDR

- Le logiciel va assurer les fonctions suivantes d'un récepteur traditionnel :
- Sélection de la fréquence de réception et de la largeur de bande.
- Démodulation du signal reçu.
- Suppression des interférences (Noise blanker).
- CAG de manière à assurer un niveau d'écoute constant.
- etc...

Les fonctions étendues

- Au delà des fonctions 'normales' d'un récepteur, il est possible d'effectuer les opérations suivantes :
- Compensation des imperfections de la partie matérielle.
- Fonctions de traitement du signal (corrélation, filtre prédictif,etc...)
- Transmission des données brutes ou prétraitées sur le réseau local.
- Ré-échantillonnage du signal reçu.

Les principaux logiciels

- Il existe de nombreux logiciels de traitement des signaux reçus, les SDR commerciaux possèdent généralement leur logiciel spécifique. N'ayant pas le choix, ceux-ci seront vu avec les SDR dont ils dépendent.
- Il existe également des logiciels généralistes permettant de traiter les signaux en provenance de différents matériels.
- Nous allons voir les caractéristiques, les avantages, mais aussi les inconvénients de ces logiciels 'universels'

HDSDR

- HDSDR est en fait le successeur de WINRAD dont l'étude a été arrêtée.
- La prise en main de ce logiciel est très simple et intuitive.
- Il est destiné à être utilisé derrière un récepteur IQ. Les rares réglages concernent l'équilibrage en gain et en phase des signaux I et Q.
- Il permet la démodulation des principaux modes AM,FM,SSB,CW.
- La simplicité d'utilisation de ce logiciel limite les performances de ce logiciel.
- En résumé, un très bon logiciel pour démarrer avec les SDR.

LINRAD

- Bien que le nom de LINRAD vienne de LINux RADio, ce logiciel 'tourne' aussi bien sous Windows que sous Linux.
- Ce logiciel n'est pas d'un emploi facile, ce qui décourage de nombreux OM.
- Son interface graphique est limitée aux informations utiles, pas d'effet graphique plaisant à l'oeil.
- Tout dans LINRAD a été conçu pour obtenir des performances optimales :
- Compensation de gain et d'offset des amplificateurs 'BF'.
- Compensation des ondulations des filtres HF.
- Compensation de la discontinuité autour de la fréquence de l'OL.
- Possibilité de transmettre sur le réseau local les signaux reçus, soit pour démodulation sur un second PC utilisant LINRAD, soit pour traitement des signaux par un autre logiciel (par exemple MAP65).
- LINRAD peut être considéré comme un véritable laboratoire numérique de traitement du signal

Les principales applications des SDR

- La réception de signaux AM/FM/SSB/CW peut très facilement être réalisé à l'aide d'un SDR. L'avantage du SDR tient surtout dans la possibilité d'utiliser une large gamme de fréquences (le Transfox ou le Funcube peuvent être utilisés depuis les bandes basses décimétriques jusqu'au 23cm).
- En CW la possibilité d'ajuster la largeur du filtre permet la réjection de signaux très proche en fréquence.
- Au contraire, en FM, il est possible d'élargir le filtre pour recevoir les station de radio de la bande 88-108 MHz.
- La réception de la bande aviation ne pose pas de problème.
- Bref, dans tous les cas, la bande passante peut être adaptée aux signaux à recevoir (par exemple les signaux APT de la bande 137MHz qui utilisent une largeur d'environ 40KHz).

Une application innovante des SDR

- Nous allons voir ensemble une application des SDR assez complexe. Une conférence entière serait nécessaire pour la décrire en détail, nous ne verrons ici que les grandes lignes.
- L'exemple que nous allons voir est un sujet pointu car nous allons voir les problèmes rencontrés dans les liaisons Terre-Lune-Terre (EME) .
- Le premier problème concerne la polarisation du signal reçu, qui peut varier d'un correspondant à l'autre, et même très rapidement pendant un QSO.
- Le second problème est lié à l'utilisation depuis 10 ans du JT65 dans ces liaisons. Le JT65 optimise au maximum la bande passante utilisée, mais ceci à un effet secondaire : la bande de fréquence est devenue soudain si grande que pour se retrouver, les OM ont été obligé de prendre rendez-vous par différents moyens (Cluster, Chat, e-mail, etc...) .

Quelles solutions va apporter le SDR ?

- Le SDR va nous permettre de traiter une large bande de fréquences de manière simultanée.
- Un simple SDR va nous permettre d'analyser une bande de fréquence d'environ 100KHz de large, et de décoder tout signal JT65 se trouvant à l'intérieur.
- Une bande de fréquence plus large serait théoriquement possible, mais le temps de calcul ainsi que la taille mémoire deviennent trop importants avec le matériel couramment disponible de nos jours.
- C'est ce que nous appelons le MAP-65, la modulation est du JT65 'classique.

Et la polarisation dans tout cela ?

- Le problème de la polarisation est réglé très simplement :
- Nous allons monter deux SDR identiques pilotés par le même OL (donc recevant toujours la même fréquence), la réception se faisant dans 2 polarisations perpendiculaires.
- Contrairement à la polarisation circulaire utilisé avec les satellites, il n'y a pas combinaison des signaux au niveau de l'antenne, mais au niveau de la 'BF'. C'est à dire après démodulation, c'est pourquoi nous avons besoins de deux chaines de réception identiques..
- Ce système va nous permettre de recevoir un signal dans n'importe quelle polarisation. Quelle que soit la cause de la rotation de polarisation (géographique, ou Faraday).

Le SDR dans une station EME

- Le schéma présenté plus haut peut être utilisé sur toutes les bandes amateur depuis le 50MHz, jusqu'à 10GHz et même au delà.
- Au-dessus de 23cm, le nombre de correspondant équipés en JT65 va être plus limité que sur les bandes plus basses. Mais notre rôle n'est-il pas d'innover ?
- A partir de 10GHz, l'OL devra être stabilisé par un moyen ou un autre. L'asservissement de l'OL sur le GPS est une solution disponible dans les endroits les plus reculés.
- La réalisation d'une première station de ce type dans la bande 2m dans les locaux de F6KBF pourra donner des idées à d'autres clubs pour monter des stations équivalentes.

Le point sur le MAP-65

- Avec le MAP-65 et les récepteurs double-polarisation, nous entrons dans l'expérimentation.
- Les logiciels utilisés sont difficiles à prendre en main, ils sont encore en cours de développement, c'est à dire qu'ils ont encore des fonctions qui ne 'marchent' pas bien.
- Les performances atteintes devraient être meilleures qu'avec une station classique, mais le gain effectif reste à déterminer.
- Pour info, un SDR a été développé dans cette optique : il s'appelle l'IQ+ de HB9DRI.