

Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL
Port de Plaisance
F-93330 Neuilly sur Marne

Bienvenue sur le cours de F6KGL

La séance de ce soir porte sur

Technique Chapitre 11 Les synoptiques

Ce document a servi pour le cours enregistré le **02/06/2023**.

Ce document (*PDF*), le fichier audio (*MP3*) et les liens des vidéos (*YouTube*)
sont disponibles sur la page <https://f6kgl-f5kff.fr/lespodcasts/>

Les documents de notre site Internet sont mis à disposition selon les termes de la
Licence <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>





11-0) Préambule



Nombreuses questions :
 jusqu'à 5 par épreuve !

Attention : seuls les synoptiques sont au programme de l'épreuve de technique. Ne pas se laisser surprendre par :

- un schéma où l'imbrication des étages est peu commune
- ou par les schémas partiels
- Les **synoptiques** (*en anglais « block diagram »*)
 - ne sont pas des schémas électriques
 - mais des **schémas de principes**
 - ils montrent comment s'enchaînent les différents étages d'un émetteur ou d'un récepteur.
 - les liaisons entre les étages sont souvent omises
 - sauf lorsqu'elles permettent de mieux expliquer le fonctionnement de l'ensemble
 - Les différents étages RF ont été présentés dans le cours « **Tech07-2** ».
 - Les étages de modulation et de démodulation (*ainsi que les modulations*) seront vus au dans le cours « **Tech12** ».



11-0) Préambule



- les étages sont représentés par des

- **rectangles** (*cas général*)

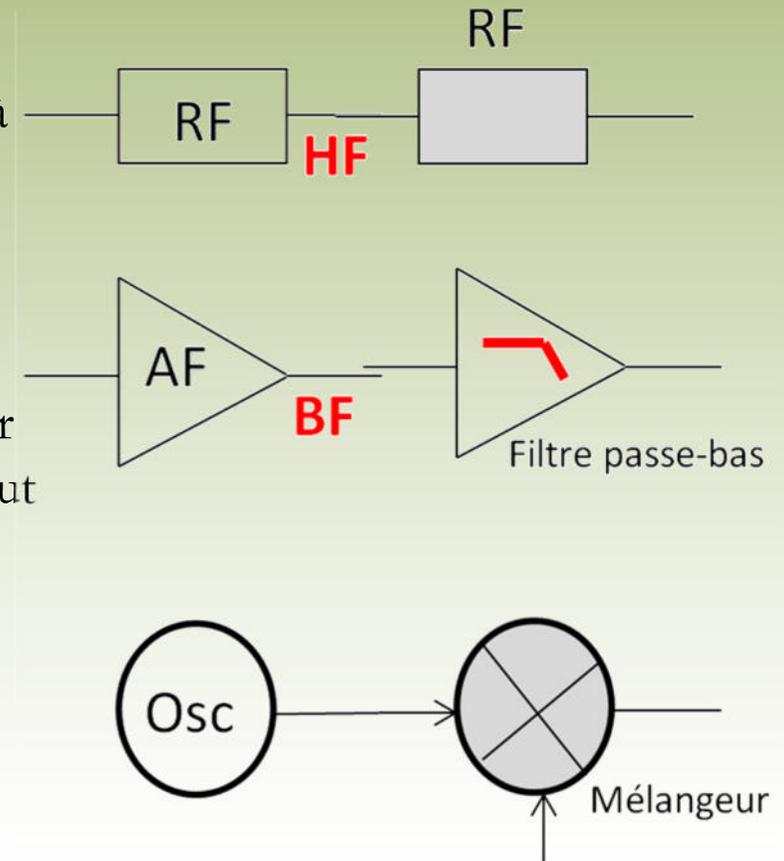
- l'indication de la fonction est à l'intérieur ou à côté

- **triangles** (*amplificateur*)

- la pointe indique la sortie
- l'amplificateur peut aussi servir de filtre passe-bande, passe haut ou passe-bas

- **cercles** dans le cas suivants :

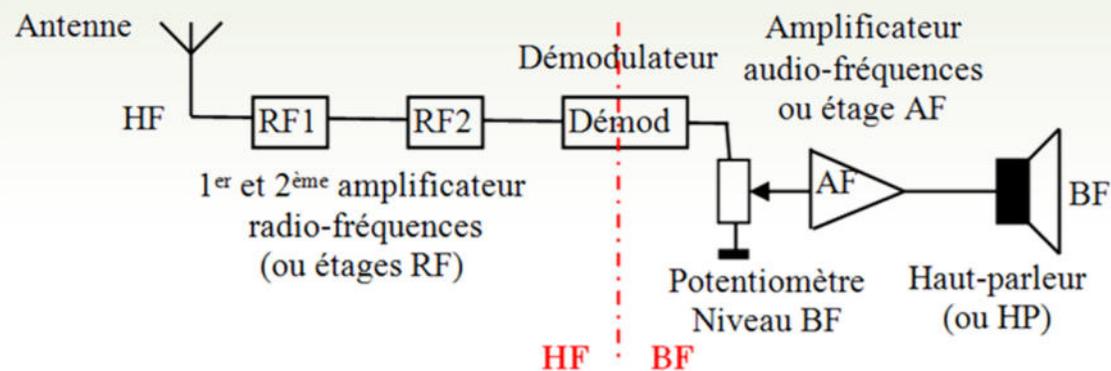
- oscillateur
- mélangeur
 - flèches sur les 2 entrées
 - croix de la multiplication



11-1) récepteur sans conversion de fréquence (amplification directe)



- Un synoptique de **récepteur** se lit de l'antenne vers le haut parleur.
 - Un **récepteur sans conversion** se compose d'une série d'amplis RF accordés sur la fréquence HF à recevoir.
 - S'il y a plusieurs fréquences à recevoir, les fréquences d'accord de RF1 et RF2 varient en même temps.
 - Le démodulateur suit les étages RF et extrait le signal utile BF du signal HF.
 - Un potentiomètre dose le niveau BF (*liaison entre les étages*)
 - L'étage AF amplifie le signal utile appliqué au Haut Parleur.





11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Sans conversion, un récepteur est difficile à accorder sur une bande, surtout si les étages RF sont nombreux. Fin 1918, Lucien Lévy contourne cette difficulté avec son montage intégrant une **fréquence intermédiaire**

- Le récepteur est alors qualifié de **superhétérodyne**

Le principe de la **fréquence intermédiaire (FI)** est de

- mélanger la fréquence à recevoir
- avec une fréquence variable générée par un oscillateur local calculée de telle manière que la fréquence à recevoir soit transférée sur une fréquence fixe, la FI, plus facile à filtrer.
- à la sortie du mélangeur se présentent deux fréquences, dont une est la FI, l'autre étant éliminée par filtrage



Lucien Lévy
 1892 - 1965
 Brevet du montage
 superhétérodyne
 (1918)

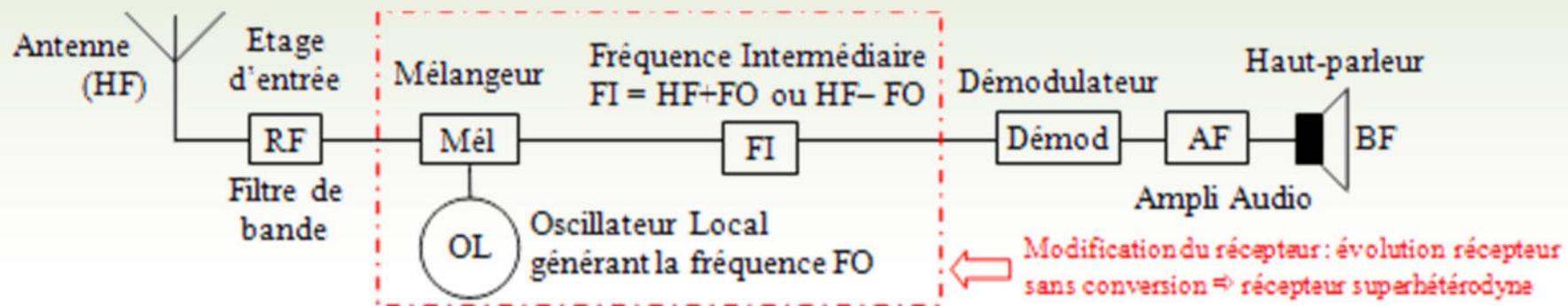
Par rapport au récepteur à conversion directe,

- seul le premier étage R.F. subsiste
- cet étage RF devient un filtre de bande.
- *l'étage RF peut ne pas comporter d'amplificateur (filtres passe bande uniquement) pour être moins sensible à la transmodulation (voir §11.7)*

11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



- Le **rôle de l'étage FI** est d'améliorer
 - la sélectivité
 - faculté d'un récepteur d'extraire la fréquence à recevoir du signal reçu à son entrée
 - utilisation de filtres dont les flancs seront les plus raides possible pour rejeter les signaux indésirables adjacents
 - la sensibilité
 - plusieurs étages amplificateurs (le plus linéaire possible, voir § 11-4)
- Le démodulateur et les étages suivants sont identiques au récepteur sans conversion



11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



- Les fréquences de l'oscillateur local (**FO**), de la fréquence à recevoir (**HF**) et de l'étage de fréquence intermédiaire (**FI**) sont calculées de telle manière que l'on a :

Différence • **FI = HF - FO** (mélange infradyne $FO < HF$)

• ou **FI = FO - HF** (mélange supradyne $FO > HF$)

Somme • **FI = FO + HF** (*si $FO > HF$, supradyne ; sinon infradyne*)

- Si la fréquence de l'oscillateur (FO) est inférieure à la fréquence à recevoir (HF), le récepteur est infradyne
- Dans le cas contraire, le récepteur est supradyne.
- **Attention au vocabulaire :**
 - superhétérodyne qualifie le type de récepteur (présence d'une fréquence intermédiaire)
 - hétérodynage (ou *hétérodyne utilisé en adjectif*) qualifie le système mis en œuvre

11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



- pour augmenter la fréquence à recevoir (HF) sans changer la Fréquence Intermédiaire (FI)
 - quand le mélange conduit à sélectionner la différence ($FI = HF - FO$ ou $FO - HF$), il faut augmenter la fréquence FO
 - dans ce cas, le spectre du signal HF à recevoir est inversé dans l'étage FI (*repli spectral*) et la fréquence FI est plus basse que la fréquence à recevoir.
 - à l'inverse, quand le mélange conduit à sélectionner la somme ($FI = HF + FO$), il faut diminuer la fréquence FO
 - si bien que la FI est plus élevée que la fréquence à recevoir et qu'il n'y a pas de repli spectral

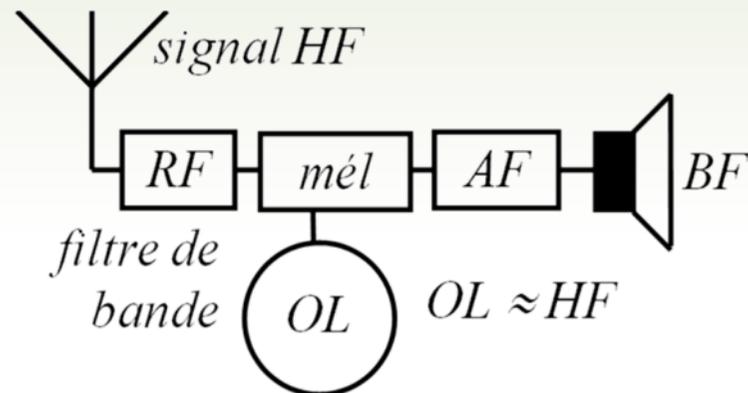
systeme	FO/HF	FI =	Repli spectral		Pour augmenter HF
Infra dyne	FO < HF	HF + FO	non	HF < FI	Diminuer FO
		HF - FO	oui	HF > FI	Augmenter FO
Supra dyne	FO > HF	FO + HF	non	HF < FI	Diminuer FO
		FO - HF	oui	HF > FI	Augmenter FO



11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



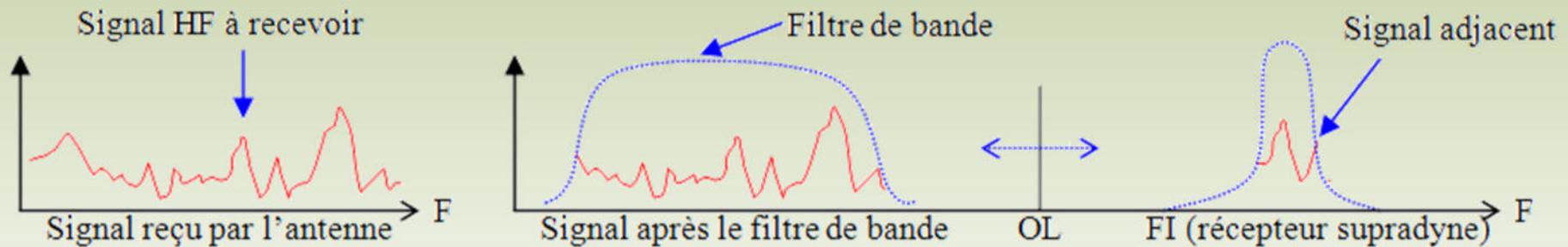
- Le récepteur à **conversion directe** sera étudié en détail lors de la prochaine séance (§12.6 du cours)
 - il ne peut être classé dans les superhétérodynes même s'il possède un oscillateur local et un mélangeur
 - ce récepteur simple à mettre en œuvre nécessite un amplificateur AF à très grand gain (>10.000) et ne démodule que des signaux modulés en amplitude (AM, BLU, CW) sauf s'il y a un traitement numérique du signal après (ou à la place de) l'étage AF
 - l'étage RF se limite à un simple filtre de bande sans amplification



11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



- L'antenne reçoit le signal HF que l'on souhaite recevoir mais aussi tous les autres.
- Le filtre de bande (*avant le mélangeur*) effectue un premier tri puis l'étage FI, grâce à sa sélectivité, extrait le signal désiré.



- Dans le schéma ci-dessus, à droite du signal à recevoir, apparaît un signal adjacent qui pourra dégrader la réception une fois notre signal démodulé.
 - pour supprimer complètement ce signal parasite, il faudrait un filtre FI avec une bande passante plus étroite



11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Le traitement numérique du signal est au programme de l'épreuve de Technique. Toutefois, pas de question recensée à l'examen

- Les récepteurs modernes sont dotés d'un **étage DSP** (*Digital Signal Process, traitement numérique du signal*) situé avant l'amplificateur AF ou, de préférence, avant le démodulateur (*sur la FI lorsque sa fréquence n'est pas trop élevée*).
 - le traitement numérique fait appel aux convertisseurs analogiques numériques (**CAN**) et aux transformées de Fourier (**FFT**), voir vidéos **Tech02-1** (§ 2.1 du cours) et **Tech08** (§ 8.5 du cours).
- Le signal, une fois numérisé, est traité par des algorithmes (*programmes reproduisant des filtres ou des démodulateurs*) faisant appel aux matrices et aux nombres complexes.
 - le nombre de bits de codage du signal détermine la dynamique du circuit (*en dB, rapport entre le signal le plus puissant avant saturation et le signal le plus faible, 6 dB par bit de codage (b), quantification = 2^b*).
 - une fois le traitement numérique effectué, le signal filtré (*et démodulé si le signal est prélevé sur la FI*) est reconverti en analogique (**CNA**) puis envoyé à l'étage AF s'il s'agit d'un signal audio BF

11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Le traitement numérique du signal est au programme de l'épreuve de Technique. Toutefois, pas de question recensée à l'examen

- Un **récepteur SDR** (Software Defined Radio) combine la conversion directe avec un traitement numérique du signal
- au lieu d'utiliser un CAN classique, le récepteur SDR utilise un mélangeur à double sortie (**I et Q**, en phase et en quadrature)
 - le traitement numérique est beaucoup plus rapide
 - le montage monte en fréquence beaucoup plus facilement car le nombre d'échantillons requis pour convertir le signal est limité (fréquence d'échantillonnage moindre)
 - les réalisations les plus simples utilisent une conversion de fréquence générant un signal en quadrature (I/Q) numérisable par une simple carte son de PC stéréo.
 - l'échantillonnage se fait typiquement à 44 kHz, 96 kHz ou 192 kHz, autorisant le traitement numérique par un PC d'un bloc complet de spectre de largeur 44 kHz, 96 kHz ou 192 kHz respectivement.

voir la présentation de Sylvain F4GKR à l'AG 2016 du REF

http://telecharger.r-e-f.org/Docs/Anatomie_SDR_F4GKR_Congres2016.pdf

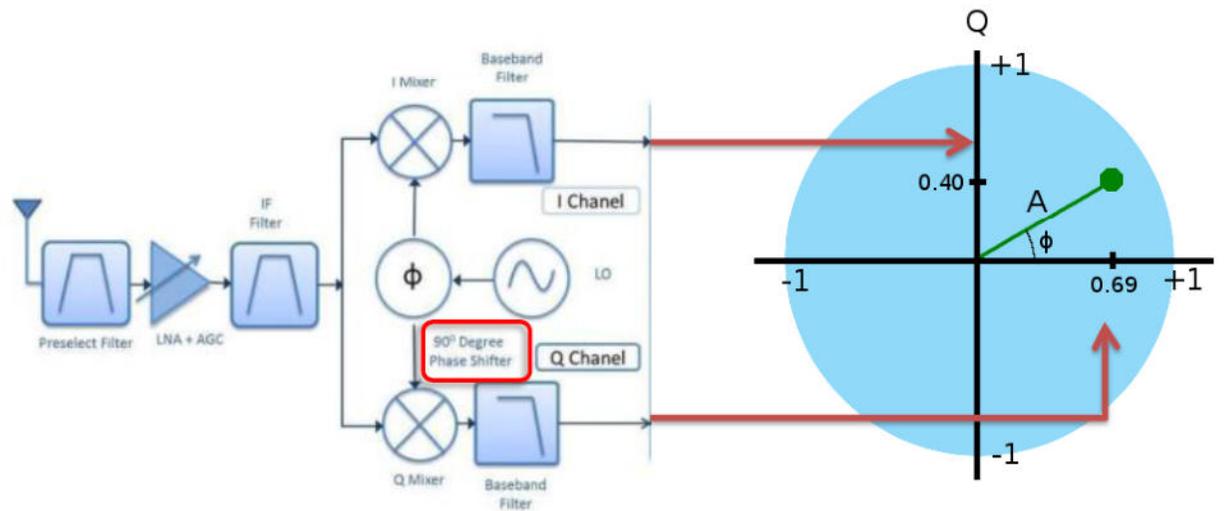
11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Présentation de Sylvain F4GKR
à l'AG 2016 du REF

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

Le traitement numérique du signal est au programme de l'épreuve de Technique. Toutefois, pas de question recensée à l'examen

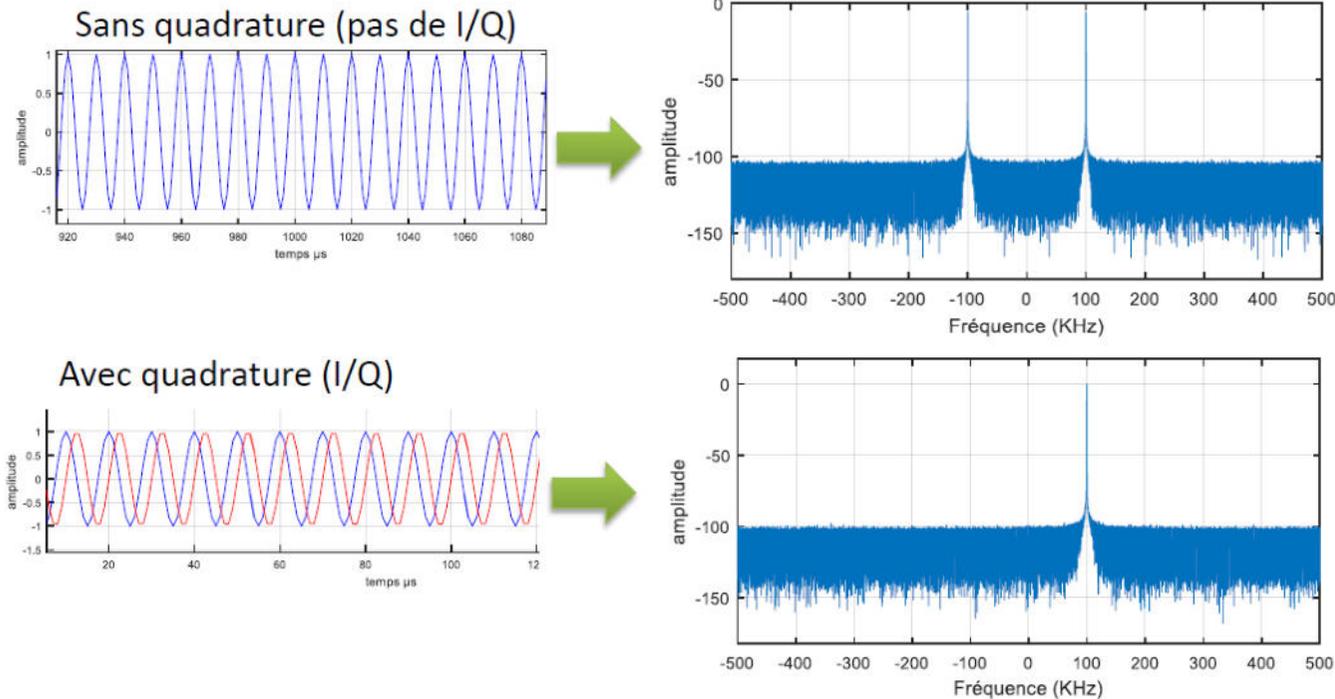


11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Présentation de Sylvain F4GKR
à l'AG 2016 du REF

Spectre réel / spectre complexe



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

Le traitement numérique du signal est au programme de l'épreuve de Technique. Toutefois, pas de question recensée à l'examen



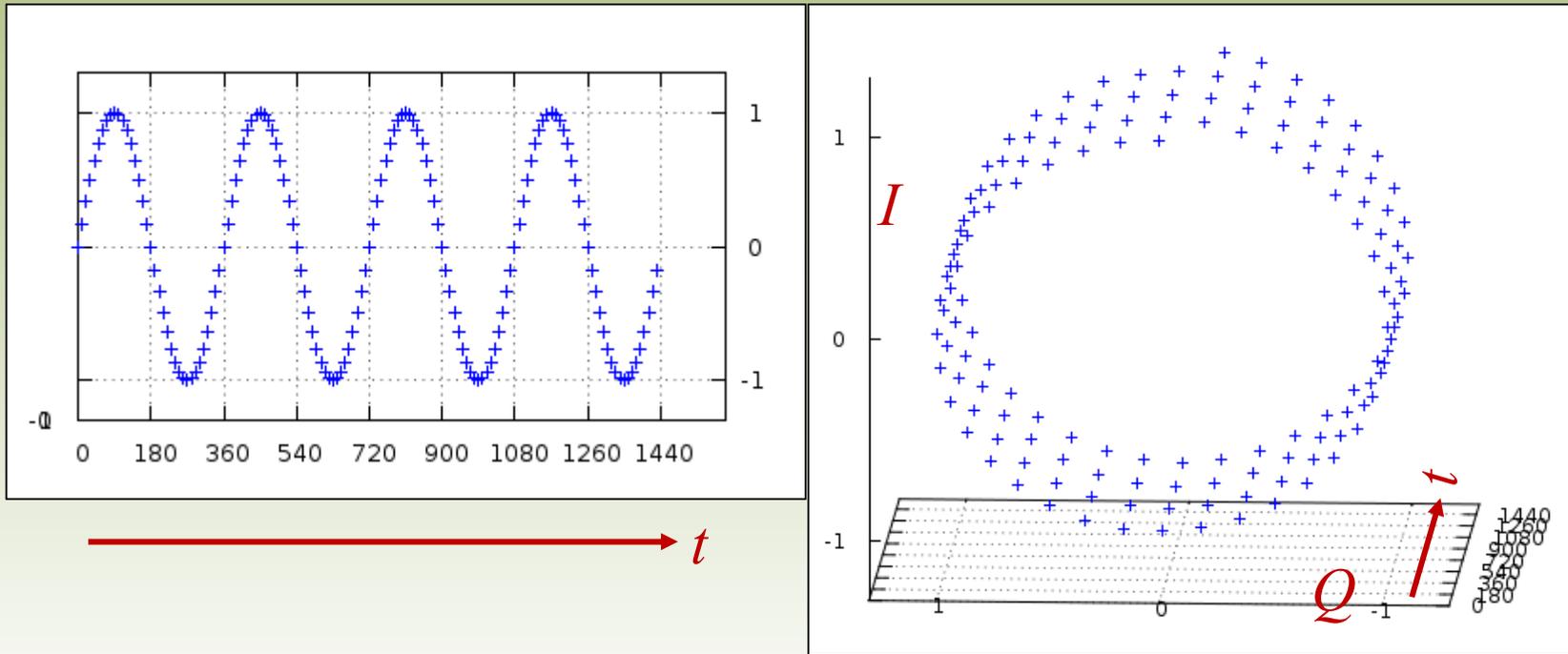


11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Le traitement numérique du signal est au programme de l'épreuve de Technique. Toutefois, pas de question recensée à l'examen

- *Autre manière de représenter I et Q (en 3D)*



- <https://www.pe0sat.vgnet.nl/sdr/iq-data-explained/>
 - *Assez simple avec une seule sinusoïde comme ci-dessus mais plus complexe quand plusieurs sinusoïdes sont superposées...*

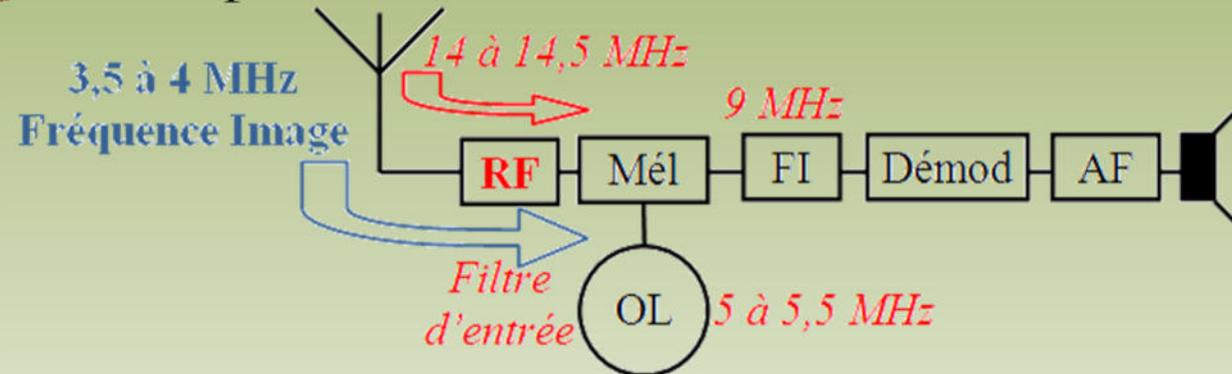


11-3) fréquence image

- On vient de voir que la fréquence intermédiaire (FI) est la résultante du mélange
 - de la fréquence à recevoir (HF)
 - et de la fréquence de l'oscillateur local (FO).
- La **fréquence image** (**FIm**) est la fréquence obtenue par le mélange inverse utilisé pour générer la FI.
 - Si l'étage RF est de **mauvaise qualité** et laisse passer la fréquence image, alors
 - les deux signaux (**HF** et **FIm**) seront présents à l'entrée de l'étage FI
 - et il sera impossible, à ce niveau (et sur les étages suivants), de les séparer
 - il faut donc soigner particulièrement le premier étage RF qui doit rejeter les fréquences/bandes indésirables.

11-3) fréquence image

- **Exemple** : récepteur 14,0 à 14,5 MHz avec FI à 9 MHz

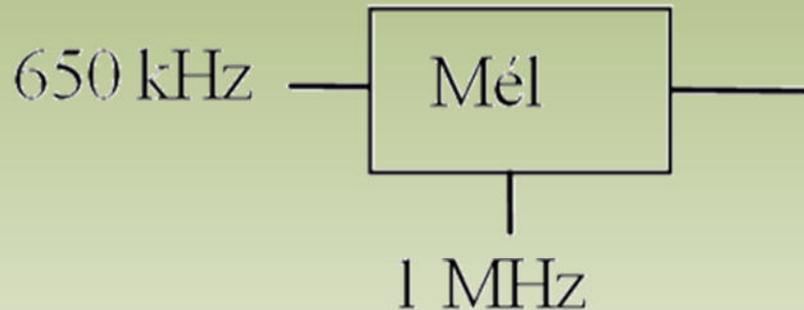


- Le **calcul de la Fréquence Image** diffère selon le récepteur :
 - si le récepteur est infradyne, avec $FI = HF - FO$:
 $F_{im} = |2.FO - HF|$ ou $F_{im} = |2.FI - HF|$ et avec
 $FI = HF + FO$: $F_{im} = 2.FO + HF$ ou $F_{im} = 2.FI - HF$
 - si le récepteur est supradyné avec $FI = FO - HF$:
 $F_{im} = 2.FO - HF$ ou $F_{im} = 2.FI + HF$ et avec
 $FI = HF + FO$: $F_{im} = 2.FO + HF$ ou $F_{im} = 2.FI - HF$
 - dans l'exemple, le récepteur est infradyne ($FO < HF$) et le mélange retenu sur la FI est la différence ($14 - 5 = 9$) donc $F_{im} = |(2 \times 5) - 14|$ ou $|(2 \times 9) - 14|$
- **le calcul fait toujours intervenir 2.FI ou 2.FO**



11-3) fréquence image

- Exemple :



Quelle peut être la fréquence image ?



**Question
d'examen très
tordue !**

- 1350 kHz - bonne réponse
- 1,7 MHz
- 1,65 MHz
- 350 kHz

Réponse : par tâtonnements, avec les valeurs données, la FI peut être 350 kHz ou 1650 kHz. Dans ces conditions, la fréquence image peut être 1350 kHz ($1350 - 1000 = 350$, fréquence de la FI). La réponse « 2,65 MHz » non proposée ici aurait pu convenir ($FI + OL = 1650 \text{ kHz} + 1 \text{ MHz} = 2,65 \text{ MHz}$).

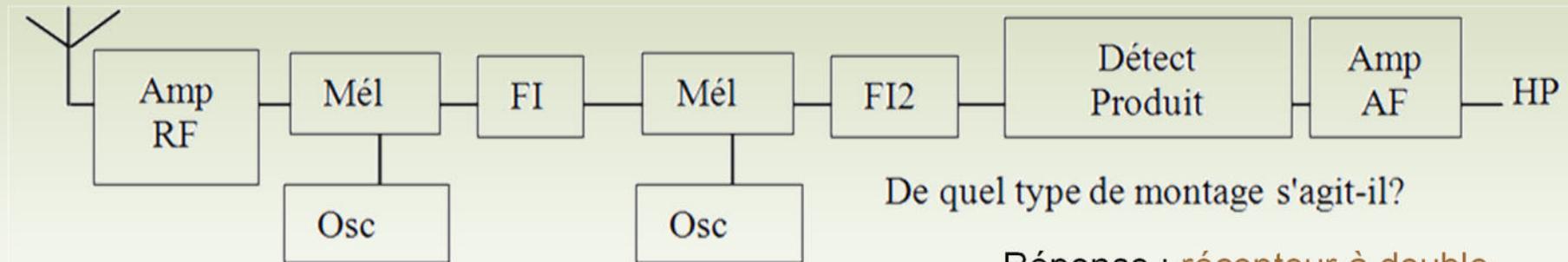
Si récepteur supradyne ($FI = 1650$), $Fim = HF + 2 \times FO = \underline{2650}$ (non proposé)

*Si récepteur infradyne ($FI = 350$) et $FO > HF$, $Fim = HF - 2 \times FO$
 $= 650 - 2000 = \underline{1350}$*



11-3) fréquence image

- Pour limiter ce problème, les récepteurs grand public à large couverture sont de type double changement de fréquence avec une première FI élevée (100 MHz et plus, fréquence à définir en fonction de la fréquence maximum à recevoir), rejetant très loin la Fréquence Image et facilitant ainsi le filtrage d'entrée :



Réponse : récepteur à double changement de fréquence

- la 1^{ère} FI est supradyne (*élimination de la fréquence image*)
- l'oscillateur local utilisé pour la 2^{ème} FI est fixe
- *la fréquence de la seconde FI est généralement plus basse que la première*
- *sur la 2^{ème} FI (ou sur l'étage AF) se trouvent les étages DSP*

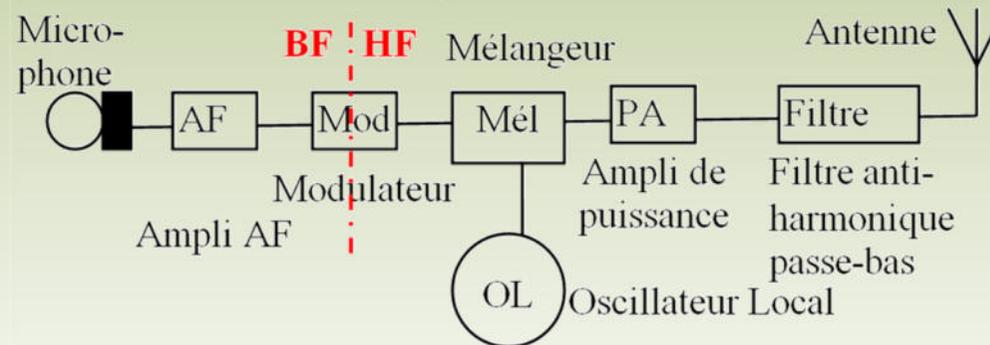


11-4) sensibilité d'un récepteur

- La **sensibilité** d'un récepteur se mesure par son signal d'entrée minimum. La puissance de ce signal minimum se mesure de préférence en dBm (décibels par rapport au mW)
 - une liaison radio est jugée bonne si le bruit propre du récepteur est très en dessous du signal à recevoir.
 - plus un récepteur est sensible, plus il "sortira" les signaux faibles.
 - la puissance du signal reçu se mesure aussi en « points S ».
 - en dessous de 30 MHz, un signal **S9** correspond à une tension de **50 μ V** à l'entrée du récepteur chargé par une impédance de 50 Ω
 - **S9 correspond à -73 dBm** sur une charge de 50 Ω
 - **S0 correspond à -127 dBm** sur une charge de 50 Ω (0,1 μ V / 50 Ω)
 - S0 est souvent la sensibilité annoncée des récepteurs modernes (0,1 à 0,2 μ V)
 - afin d'augmenter la sensibilité d'un récepteur, chacun des étages (oscillateur, amplificateur) devra générer le moins de bruit possible et donc être le plus linéaire possible
 - pour un amplificateur ou un oscillateur, le manque de linéarité revient à générer du bruit (revoir les vidéos **Tech07-1** et **Tech07-2** ou les §7.4 et 7.5 du cours)
 - le bruit généré par un étage se mesure aussi en dBm et conduit à apporter une atténuation au signal à amplifier (voir § 11.7)

11-5) émetteur

- Le synoptique d'un **émetteur** se lit du microphone vers l'antenne. Un émetteur :
 - peut avoir un ou plusieurs changements de fréquences.
 - est équipé d'un **filtre anti-harmonique** (filtre "en pi" par exemple) pour éviter les « rayonnements non essentiels ».



- peut être couplé à un récepteur (*formant alors un « transceiver »*). Certains étages sont alors en commun :
 - l'oscillateur local (ainsi, la fréquence de réception varie avec celle de l'émission),
 - la prise antenne qui permettra d'utiliser le même aérien.
 - un système de relais fera la permutation émission/réception*



11-6) compatibilité électromagnétique (CEM)



Déjà vu lors de
l'épreuve de
Réglementation

- La **Comptabilité ElectroMagnétique** est plus souvent un sujet de l'épreuve de réglementation. La CEM est la faculté
 - d'un émetteur de **ne pas perturber son environnement**, en particulier un récepteur (problèmes d'**émission**),
 - d'un récepteur de **ne pas être perturbé par un émetteur** ou son environnement (problèmes de **susceptibilité**).
- Un matériel (ensemble d'appareils) a un certain **niveau d'immunité** à son environnement électromagnétique.
 - lorsque les perturbations dépassent ce niveau, son **seuil de susceptibilité** est alors atteint
 - il faut alors prendre des mesures de **durcissement**
- Une perturbation (émission ou susceptibilité) est
 - **conduite** lorsqu'elle est véhiculée par des conducteurs
 - **rayonnée** lorsqu'elle se propage dans l'espace environnant par un champ électromagnétique



11-7) intermodulation, transmodulation et bruit

- Tout produit d'**intermodulation** est créé par un mélange de fréquences au niveau d'un étage (ou d'un composant) non linéaire aussi bien à la sortie d'un émetteur que sur l'entrée d'un récepteur.
- Le mélange correspond à la somme et la différence des fréquences fondamentales et de leurs harmoniques.



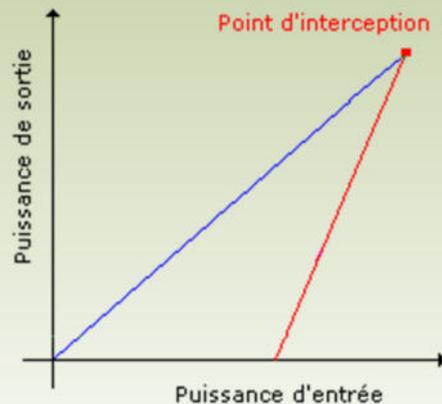
Déjà vu lors de
l'épreuve de
Réglementation

- Soient A et B , deux fréquences présentes sur l'entrée d'un étage défaillant. En sortie de cet étage, on aura :
 - $A + B$ et $A - B$ (les « mélanges » classiques, produits du 2^{ème} ordre)
 - mais aussi $2A$ et $2B$ (les harmoniques)
 - et d'autres mélanges comme $2B - A$ et $2A - B$, produits du 3^{ème} ordre, d'autant plus difficile à éliminer que A et B seront des fréquences voisines.



11-7) intermodulation, transmodulation et bruit

- Le point d'interception du 3^{ème} ordre (IP3) est le croisement de la droite représentant la caractéristique entrée/sortie du récepteur (*en bleu*) et de la droite des produits d'intermodulation du 3^{ème} ordre (*en rouge*) qui augmentent beaucoup plus vite que les signaux d'entrée.



- Ce point théorique (en dBm) doit avoir le niveau le plus élevé possible
- Il est fonction de l'espacement entre les fréquences du signal désiré et du signal parasite ($\approx +100$ dBm à 20 kHz).

11-7) intermodulation, transmodulation et bruit

- La **transmodulation** est un problème de réception : cet effet apparaît lorsqu'un signal de fréquence voisine de F , fréquence du signal désiré, est un **signal puissant** de forte amplitude,
 - celui-ci va provoquer une **surcharge de l'étage d'entrée** du récepteur qui devient non linéaire
 - ce signal puissant, non désiré, va alors interférer avec le signal désiré et **moduler** ce dernier.
 - en conséquence, on entendra la modulation normale du signal désiré mais également la nouvelle modulation
 - pour limiter la transmodulation, le premier étage RF ne comportera pas d'amplificateur (filtres passe-bande uniquement), la chaîne d'amplification FI comblera le manque d'amplification du signal par un gain supérieur.
- Avec l'intermodulation, il y a une relation entre la fréquence parasite et la fréquence désirée. Il n'y en a pas avec la transmodulation.



Déjà vu lors de
l'épreuve de
Réglementation



11-7) intermodulation, transmodulation et bruit



Ludwig Boltzmann
 1844 – 1906
 k permet de définir
 l'entropie (1877)

- Le **bruit** provient de la chaleur (agitation des électrons) et arrive par l'antenne ou est créé par des étages non linéaires (oscillateurs ou amplificateurs). La puissance de bruit se mesure en dBm.

Calcul du bruit thermique : **$P(W) = k \cdot T(^{\circ}K) \cdot B(Hz)$**

$k =$ constante de Boltzmann $= 1,38 \cdot 10^{-23}$;

$T =$ température en $^{\circ}K$ (soit $^{\circ}C + 273$) ; $B =$ bande passante en Hz

Ainsi, la puissance du bruit thermique dans une antenne à la température ambiante de $20^{\circ}C$ pour une bande passante de 2500 Hz (téléphonie BLU) est de -140 dBm (soit seulement 13 dB en dessous de S0)

- Sur une antenne, à ce bruit thermique, s'ajoutent :
 - le bruit généré par l'homme qualifié de pollution radioélectrique,
 - le bruit atmosphérique très important sur les bandes basses (4 MHz et en dessous, le bruit est dû au mode de propagation : les ondes de sol se propagent entre la Terre et la couche D)
 - le bruit galactique dû essentiellement à l'activité solaire, surtout sensible dans les fréquences élevées (VHF et au-delà)
 - les pertes dans la ligne de transmission et les désadaptations (même effet que du bruit)

11-7) intermodulation, transmodulation et bruit

- *Si bien que le bruit capté sur l'antenne est souvent supérieur à S_0 .*
 - *si le signal est faible et noyé dans le bruit, il ne pourra pas être démodulé.*
- *Les étages non linéaires (oscillateurs, amplificateurs) génèrent du bruit qui s'ajoute au bruit présent sur l'entrée du récepteur.*
 - *le bruit généré par chaque étage non linéaire se mesure aussi en dBm.*
 - *le bruit généré par le premier étage doit être le plus faible possible.*
 - *le facteur de bruit total est donné par la relation suivante :*

$$F = F_1 + [(F_2 - 1) / G_1] + [(F_3 - 1) / (G_1 \times G_2)] + \dots$$

Étage 1
Étage 2
Étage 3

Le facteur de bruit et le gain de chaque étage sont exprimés en rapport (et non pas en dB)

F = facteur de bruit total ;

F₁ = facteur de bruit (ou perte) apporté par l'étage 1 ; F₂ = bruit de l'étage 2

G₁ = gain de l'étage 1 ; G₂ = gain de l'étage 2

La formule a autant de termes qu'il y a d'étages dans le récepteur

Les premiers termes (F1 et G1) impactent fortement le résultat de l'ensemble

Le montage de la soirée

Le transceiver FORTY (1ère partie)

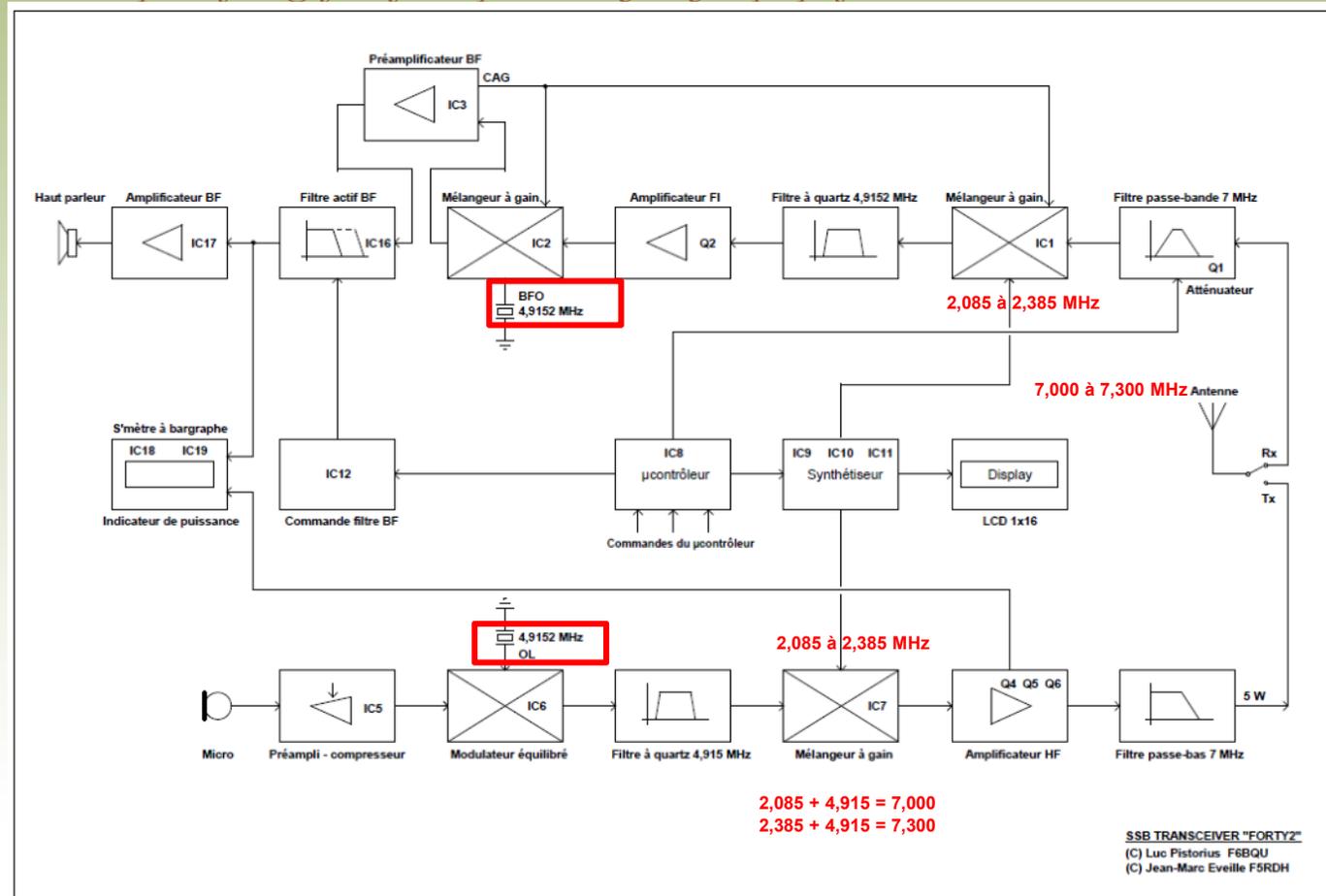


- Présentation du transceiver FORTY par F6BQU
 - <http://f6kgl.free.fr/mp3/Forty2-synopt.pdf>

Chaîne réception

Étages communs

Chaîne émission



Lien vers la page du FORTY : <http://lpistor.chez-alice.fr/forty2s.htm>

Radio-Club de la Haute Île



F5KFF / F6KGL

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

Le cours de F6KGL

était présenté par F6GPX

Bon week-end à tous et à la semaine prochaine !

**Retrouvez-nous tous les vendredis soir au Radio-Club
de la Haute Île à Neuilly sur Marne (93) F5KFF-F6KGL,
sur 144,575 MHz (FM) ou sur Internet.**

Tous les renseignements sur ce cours et d'autres documents sont disponibles sur notre site Internet, onglet "*Les cours*" puis "*Certificat Radioamateur*"

f6kgl.f5kff@free.fr

<https://www.f6kgl-f5kff.fr>