

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 4 - Deuxième partie

Circuits LC et loi de Thomson

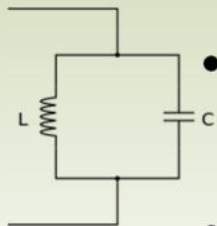
Ce document a servi pour le cours enregistré le 10/03/2023.

Ce document (*PDF*), le fichier audio (*MP3*) et le lien de la vidéo (*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/>



4-3) les circuits LC



Circuit LC
parallèle

- Les circuits LC sont des filtres composés de **bobines** et de **condensateurs**.
- Ces filtres, s'ils sont montés comme les filtres RC (la bobine remplaçant la résistance), ont un effet de coupure.
- Seuls les circuits LC ont un effet de résonance à une fréquence lorsqu'ils sont montés en série ou en parallèle.

- Les filtres LC sont utilisés dans le domaine de la Haute Fréquence (HF) (*les filtres RC ou RL sont utilisés en BF*).

- A la résonance comme à la coupure, on a :

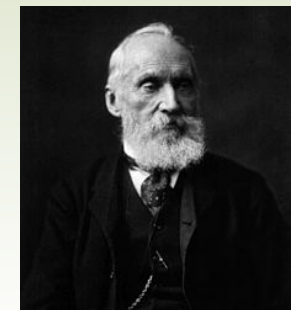
$$Z_C = Z_L \text{ (loi de Thomson)}, \text{ d'où :}$$

$$\bullet \frac{1}{(2 \pi F C)} = 2 \pi F L \text{ ou, après transformation :}$$

$$\bullet F = 1 / [2 \pi \sqrt{LC}]$$

$$\text{ou } F(\text{MHz}) = 159 / (\sqrt{L(\mu\text{H}) \cdot C(\text{pF})})$$

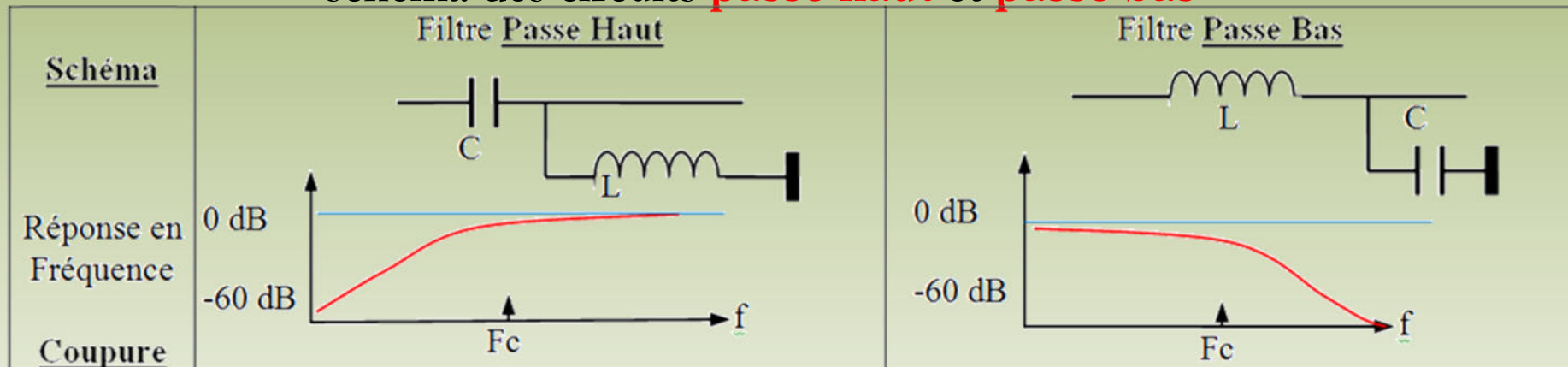
voir aussi page **CNFRA** dans Radio-REF de décembre 2008



William Thomson
 (1st Lord Kelvin 1892)
 1824 – 1907
 « la décharge d'un condensateur à travers une bobine est oscillatoire » (1853)

4-3) les circuits LC

- Les 4 montages de base des circuits LC
 - schéma des circuits **passé haut** et **passé bas**

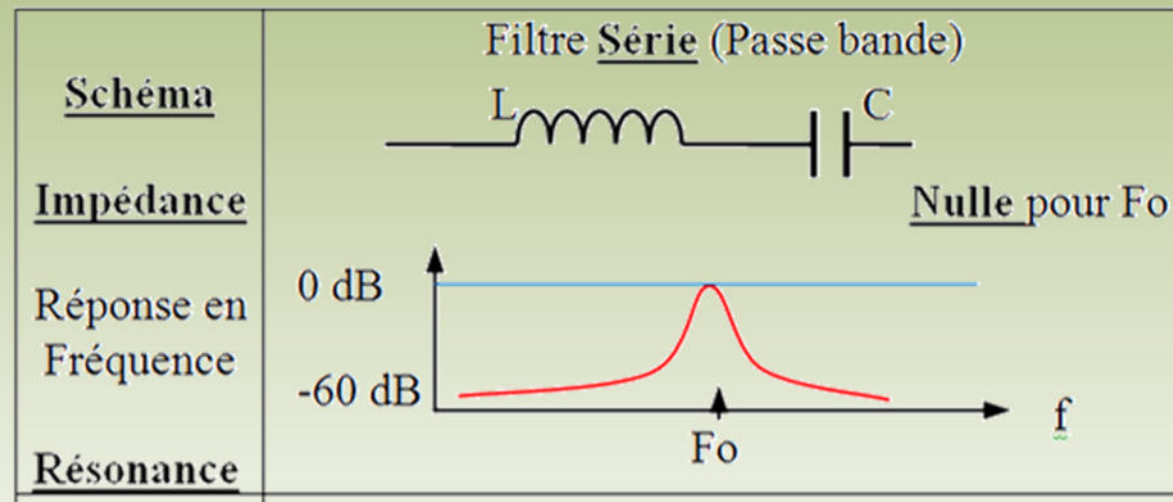


- L'atténuation d'un circuit passe bas ou passe haut est de
 - 3 dB à la fréquence de coupure
 - puis, à partir de cette fréquence :
 - 6 dB par octave et par éléments actifs
 - ou 20 dB par décade et par éléments actifs
 - *rappel : les bobines et les condensateurs sont des éléments actifs. Donc un filtre passe bas LC simple a une atténuation de 12 dB/octave à partir de F_c*
 - *caractéristiques équivalentes à un filtre RC ; il y a seulement plus d'éléments actifs (au moins 2 pour un filtre LC à une cellule)*

4-3) les circuits LC

- Les 4 montages de base des circuits LC

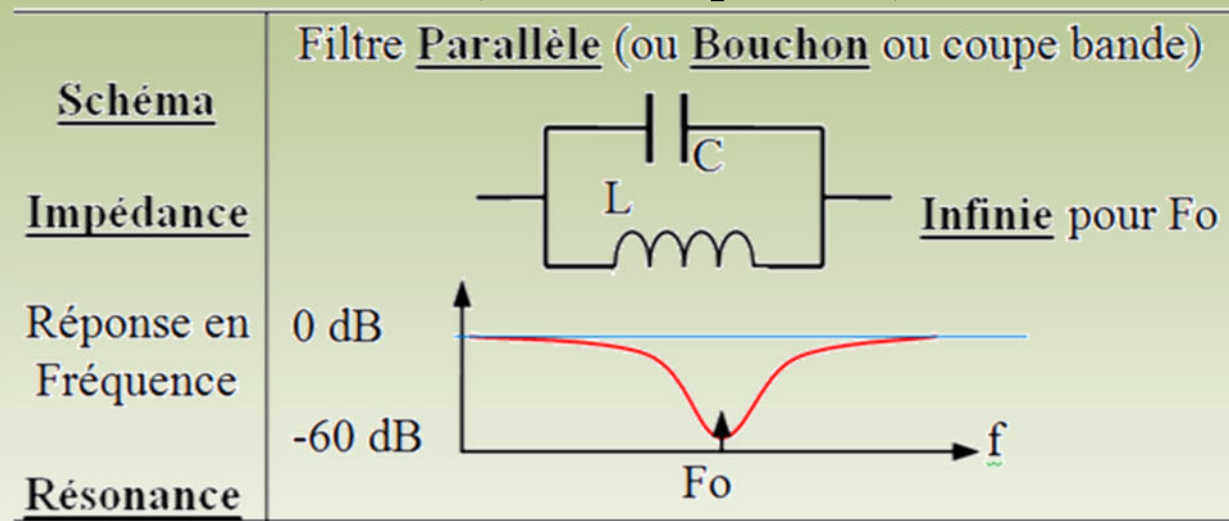
- le circuit Série (ou circuit passe bande)



- Dans le filtre série, si le signal aux bornes du circuit est en phase avec le courant parcourant la bobine et le condensateur (effet de résonance), le signal traversera le filtre (impédance nulle)
- Remarque : une atténuation de 60 dB signifie que le signal est complètement atténué (réjection ultime)

4-3) les circuits LC

- Les 4 montages de base des circuits LC
 - le circuit Bouchon (ou circuit parallèle)



- Le filtre bouchon est un filtre utilisé pour **bloquer** les signaux HF d'une fréquence désirée.
- A la résonance, l'impédance très élevée (*en théorie, impédance infiniment grande*) du circuit empêche le courant HF de traverser ce filtre.

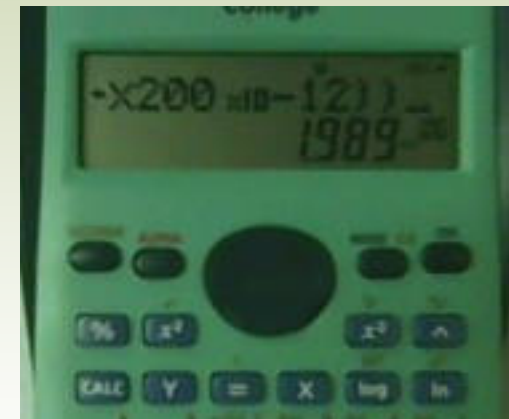
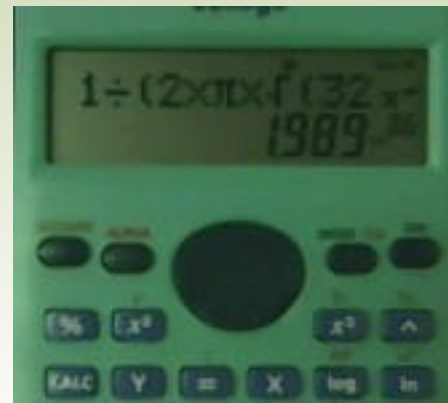
4-3) les circuits LC

- Exemple :**

Quelle est la fréquence de résonance d'un circuit bouchon avec $L = 32 \mu\text{H}$ et $C = 200 \text{ pF}$?

$$1 \div (2 \times [\pi] \times [\sqrt{ (32 \cdot 10^{-6}(L) \times 200 \cdot 10^{-12}(C)) })] = 1,98944 \cdot 10^6$$

(arrondi à **2 MHz**)



Formule simplifiée (en retenant $1/2\pi = 0,16$) :

$$160 \div [\sqrt{ (32 (L \text{ en } \mu\text{F}) \times 200 (C \text{ en } \text{pF})))}] = \mathbf{2 \text{ (MHz)}}$$

(1,9875 MHz en retenant 159 au lieu de 160)

4-3) les circuits LC

- La fréquence que donne la loi de Thomson est appelée :
 - fréquence de résonance dans les circuits bouchon ou série
 - fréquence de coupure dans les circuits passe bas et passe haut (*comme pour les filtres RC ou RL*).
- Pour **baiss**er la fréquence de résonance (ou de coupure) d'un circuit LC, il faut :
 - **aug**menter la valeur du **condensateur**,
 - **ou** augmenter la valeur de la **bobine** (*en particulier en introduisant un noyau magnétique à l'intérieur de l'enroulement*).
- Inversement, **pour augmenter la fréquence**, il faut réduire la valeur du condensateur et/ou de la bobine.
 - pour doubler la fréquence de résonance, la valeur du condensateur ou de la bobine sera divisée par 4 (*effet de la racine carrée dans la formule de Thomson*).

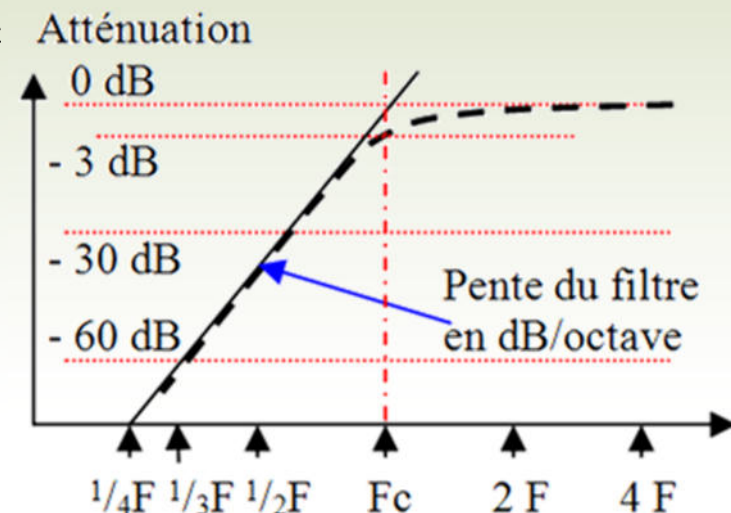


4-3) les circuits LC

- Les **courbes de réponse des filtres** sont souvent représentées par des **graphiques** dont les échelles sont logarithmiques :
 - l'échelle des **abscisses** (axe horizontal) donne les **fréquences** : chaque doublement de la fréquence prend la même place.
 - l'atténuation du filtre (en **ordonnées**, axe vertical) suit une progression logarithmique puisque les valeurs sont en **dB**.
- Un filtre peut être composé de **plusieurs cellules LC**. Dans ce cas, on repère le nombre d'éléments actifs et on applique 6 dB par octave et par élément.

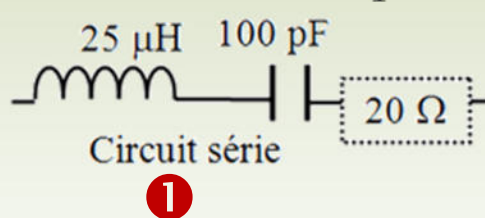


- le nombre d'éléments L et C **ne détermine pas** forcément les propriétés du circuit
- ci-contre : filtre passe-haut à 7 éléments actifs (42 dB/octave)

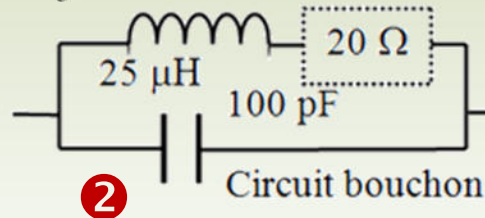


4-4) circuits bouchon et série RLC

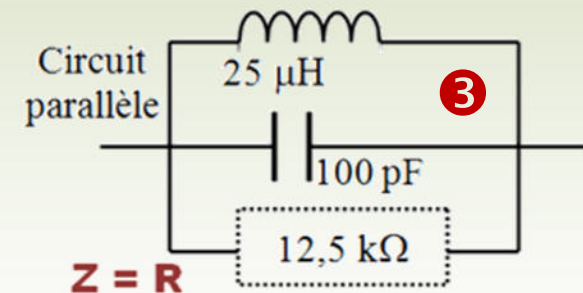
- Les circuits RLC sont des **circuits LC non parfaits** : le circuit est alors constitué d'un condensateur, d'une bobine et d'une **résistance parasite** :
 - la résistance peut être en série (*généralement avec la bobine représentant sa résistance à la HF, effet de peau*) comme dans le circuit **série** (❶) ou le circuit **bouchon** (❷).
 - dans le circuit ❸, la résistance est montée en **parallèle** et représente le défaut d'isolement du condensateur.



$$Z = R$$



$$Z = L/(C.R)$$



$$Z = R$$

- A cause de cette résistance parasite, **l'impédance** de ces 3 circuits à la résonance **n'est plus nulle ou infinie**.
- En revanche, **la fréquence de résonance reste la même**.

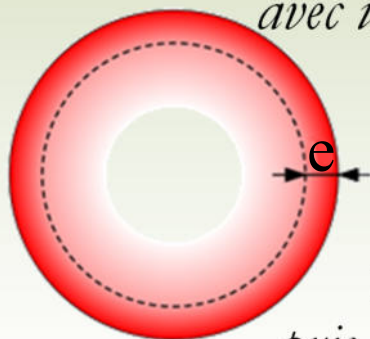
4-4) circuits bouchon et série RLC

- Rappel : l'effet de peau fait que la résistance du fil de la bobine est plus importante que sa simple mesure à l'ohmmètre : le courant HF ne circule qu'à la périphérie du fil.
- Plus précisément, l'épaisseur « e » de la « peau » (en m) se calcule avec la formule :

$$e(m) = \sqrt{\rho(\Omega m) / [\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot F(Hz)]}$$

avec μ_r et ρ propre au matériau du fil utilisé

avec une progression similaire à la charge du condensateur (voir § 2.4)



Continu



10 kHz



1 MHz

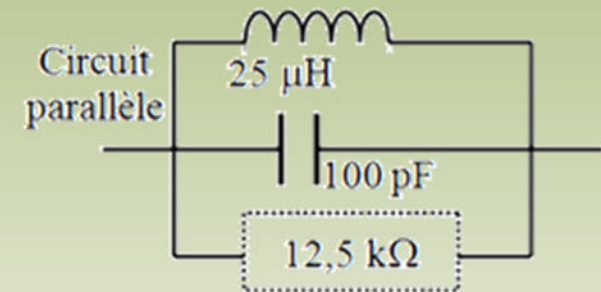
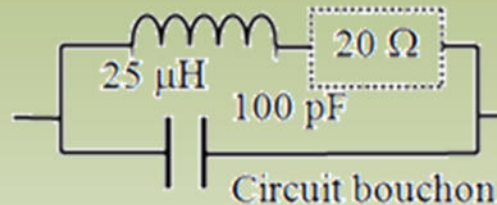
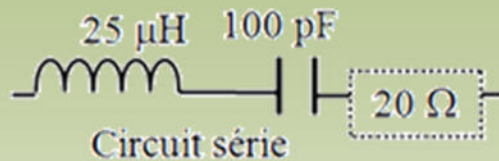
Dans la première « peau » passe 63% du courant ($63\% = 1 - (1/e)$)
 puis, dans la seconde peau de même épaisseur, passe 63% du courant restant, etc.

- voir aussi formule simplifiée au § 1.4 (valable pour du cuivre) :

$$e(\mu m) = 66 / \sqrt{F(MHz)}$$

4-4) circuits bouchon et série RLC

- exemples :** calculer Z à la résonance pour chaque circuit



- sans calcul, on trouve :
 - $Z_{\text{série}} = R = 20 \Omega$
 - $Z_{\text{parallèle}} = R = 12,5 \text{ k}\Omega$
- calcul de l'impédance à la résonance du circuit bouchon :
 - $$Z_{\text{bouchon}} (\Omega) = L(\text{H}) / (R(\Omega) \times C(\text{F}))$$

$$= 25 \cdot 10^{-6} / (20 \times 100 \cdot 10^{-12})$$

$$= 25 \cdot 10^{-6} / 2 \cdot 10^{-9}$$

$$= (25/2) \cdot 10^3 = 12,5 \cdot 10^3$$

$$= 12,5 \text{ k}\Omega$$



4-4) circuits bouchon et série RLC

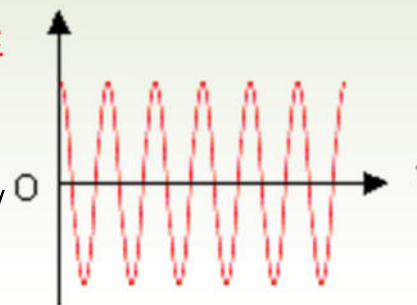
- Le **facteur Q** définit la qualité d'un circuit RLC simple.
 - Si **L et C sont en parallèle**, Q est le rapport obtenu en divisant l'impédance du circuit à la résonance (Z) par la partie réactive d'un composant (X_L ou X_C) : **$Q = Z / X_L = Z / X_C$**
 - Si **L et C sont en série**, on a le rapport inverse :
 $Q = X_L / Z = X_C / Z$
 - Rappel : à la résonance, par définition, on a toujours $X_L = -X_C$*
- En appliquant ces rapports au **circuit Série ou Bouchon**, on obtient une formule identique : **$Q = \sqrt{(L / C)} / R$**
- En revanche, pour un **circuit Parallèle**, la formule est inversée : **$Q = R / [\sqrt{(L / C)}]$**
- Tableau récapitulatif de l'Impédance et du facteur Q**

Circuit	Bouchon	Série	Parallèle
Z	$L / (C \times R)$	R	R
Q	$\sqrt{(L / C)} / R$	$\sqrt{(L / C)} / R$	$R / [\sqrt{(L / C)}]$

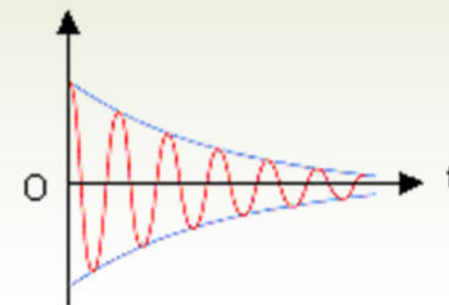
4-4) circuits bouchon et série RLC

- Plus **Q est faible**, plus la qualité du circuit est dégradée et plus **l'oscillation du circuit s'amortit vite** car l'énergie disponible est dissipée dans R.
 - La tension aux bornes d'un circuit bouchon à la fréquence de résonance sera fonction de la puissance du signal à l'entrée du circuit et de son impédance à la résonance (d'où l'autre nom du facteur Q pour un circuit bouchon : **coefficient de surtension**)
 - Dans un circuit série, le facteur Q est appelé **coefficient de surintensité**

Simulation amortissement LC :
<http://lushprojects.com/circuitjs/circuitjs.html>



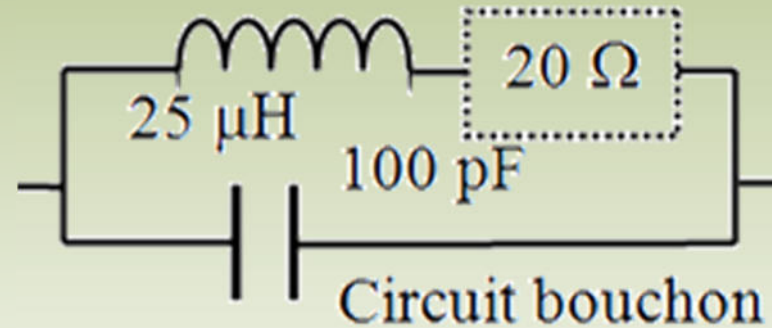
Résistance nulle



Résistance faible

4-4) circuits bouchon et série RLC

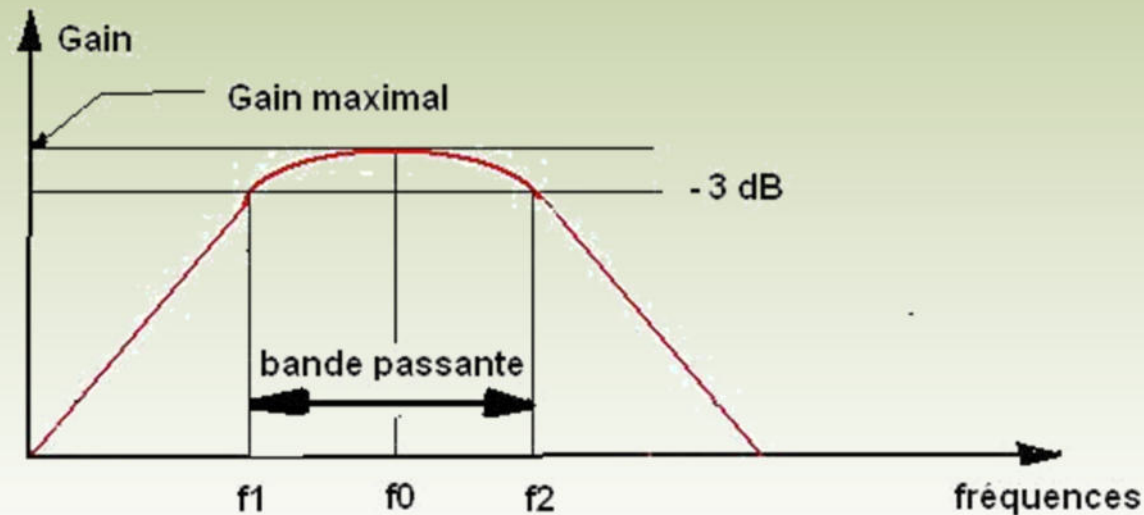
- Dans l'exemple du circuit bouchon, on aura :
 - $Q = \sqrt{[L / C] / R} = \sqrt{[25 \cdot 10^{-6} / 100 \cdot 10^{-12}] / 20} = 25$



- *Rappel : même calcul pour le circuit série (Q identique si le circuit a les mêmes valeurs)*

4-4) circuits bouchon et série RLC

- Le facteur Q d'un circuit détermine sa bande passante à -3 dB (B) à la fréquence de résonance : $B = F_0 / Q$
- Plus Q est élevé, plus le filtre est étroit et ses flancs sont raides et mieux les fréquences adjacentes seront rejetées.



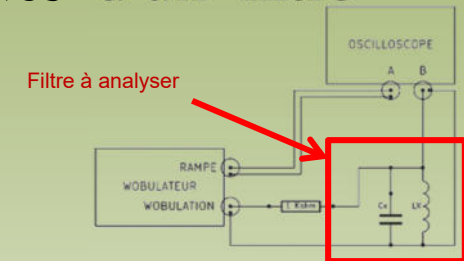
- Dans les exemples ci-dessus :
 - $B_{\text{bouchon}} = 3,18 \text{ MHz} / 25 = 127 \text{ kHz}$

4-4) circuits bouchon et série RLC

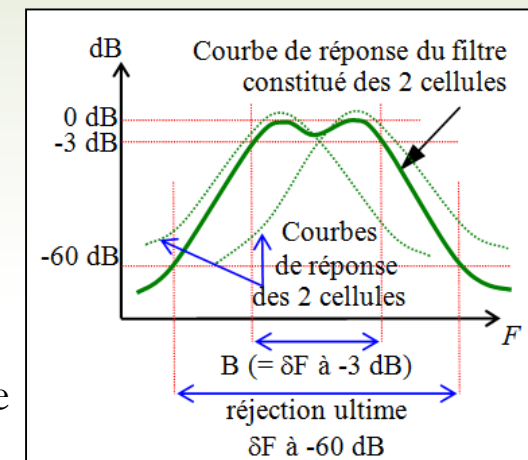


- On peut mesurer les courbes caractéristiques d'un filtre quelconque grâce à un :

- analyseur de spectre
- ou à un wobulateur (couplé avec un oscilloscope)

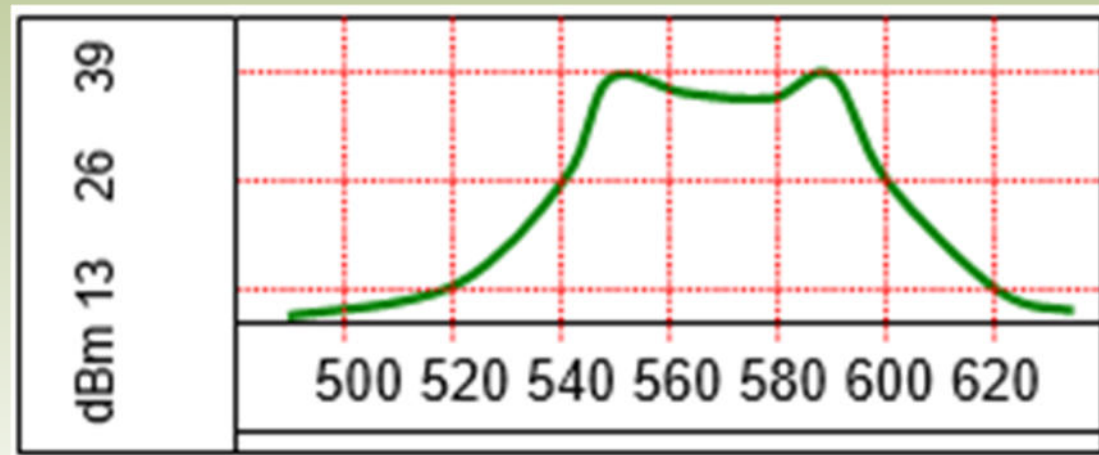


- Lorsqu'un filtre est constitué de plusieurs cellules LC
 - résonant sur la même fréquence
 - ou dont les fréquences de résonance sont légèrement décalées (donnant des « bosses » au sommet de la courbe),
 - la courbe de réponse du filtre n'est plus définie par le facteur Q mais par deux paramètres :
 - la largeur de bande passante (définie à -3 dB)
 - le taux de sélectivité égal au rapport de :
 - la bande passante à -3 dB
 - divisé par la bande passante à -60 dB
 - le facteur de forme est le rapport inverse



4-4) circuits bouchon et série RLC

- **Exemple** : : Quelle est la largeur de la bande passante à -13 dB du signal visualisé sur l'écran de l'analyseur de spectre ?



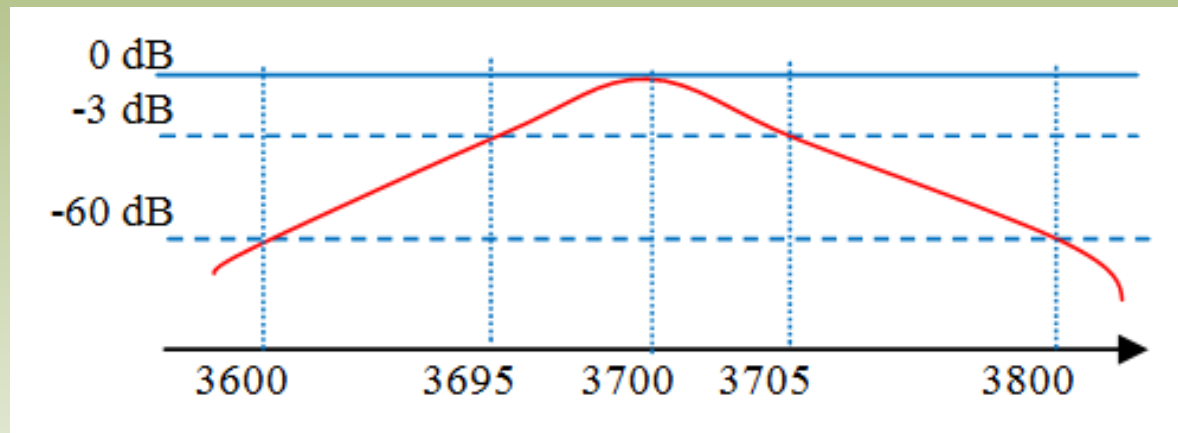
La puissance crête du signal mesure 39 dBm. La bande passante de ce signal à -13 dB est la largeur du signal dont la puissance est supérieure à 26 dBm ($= 39 \text{ dBm} - 13 \text{ dB}$).

Les fréquences extrêmes du signal sont 540 et 600.

*La bande passante à -13 dB du signal est de **60** ($= 600 - 540$)*

4-4) circuits bouchon et série RLC

- Exemple : Quel est le taux de sélectivité ?



$$S (\%) = (3705 - 3695) / (3800 - 3600) = 10 / 200 = \mathbf{5\%}$$

$$\text{Facteur de forme} = \text{rapport inverse} = 200 / 10 = \mathbf{20} (= 1/0,05)$$

Remarque : un circuit RLC (à une seule cellule, c'est-à-dire composé d'une résistance, d'une bobine et d'un condensateur) a toujours un facteur de forme de 1000, soit un taux de sélectivité de 0,1 %

*voir aussi pages **CNFRA** dans Radio-REF de janvier 2011 et mars 2013*

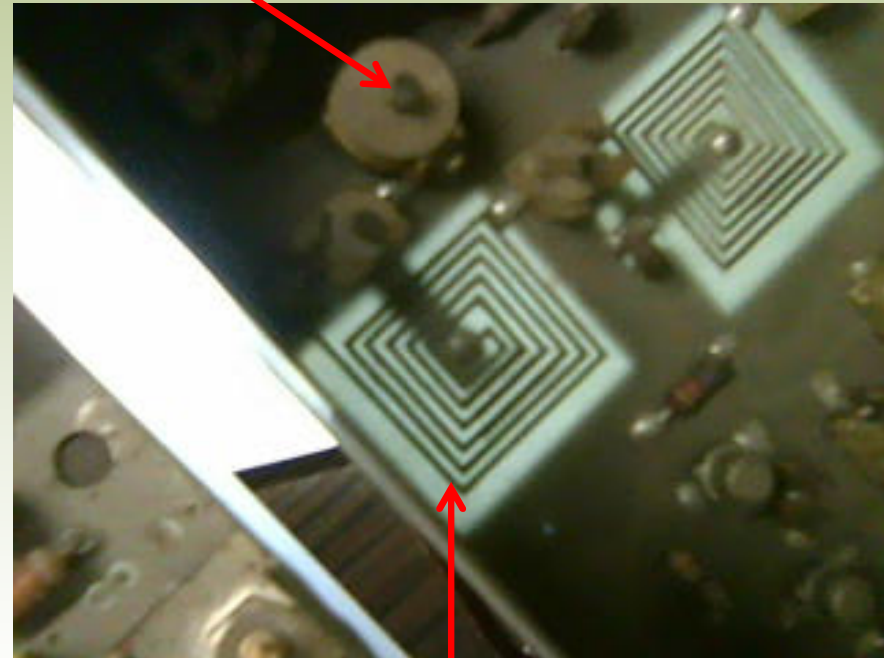
4-4) circuits bouchon et série RLC

- Quelques filtres LC particuliers :

Condensateurs variables



« Micro-strip » servant de bobines



Bobines gravées dans le
circuit imprimé

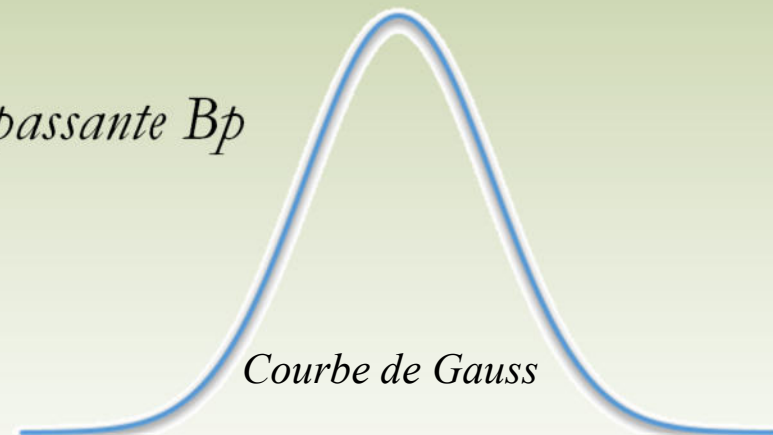
4-4) circuits bouchon et série RLC

- L'atténuation du signal à la sortie du filtre RLC constitué d'une seule cellule suit une courbe de Gauss (« en cloche ») et la bande passante du circuit pour une atténuation différente de 3 dB est donnée par la formule :

$$B_p = B \times \sqrt{(p - 1)} \text{ avec}$$

$$B = F_o / Q$$

et $p =$ rapport de puissance de la bande passante B_p
 (pour rappel, 60 dB = rapport de 1.000.000)



Ainsi, un circuit RLC à une seule cellule a un facteur de forme de 1000
 (soit $S = 0,1\%$) car

$$\delta F \text{ à } -60 \text{ dB} = \sqrt{(1000000 - 1)} \times B \approx 1000 \times B.$$

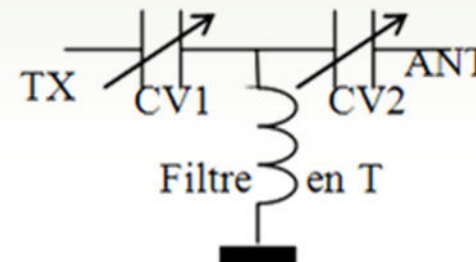
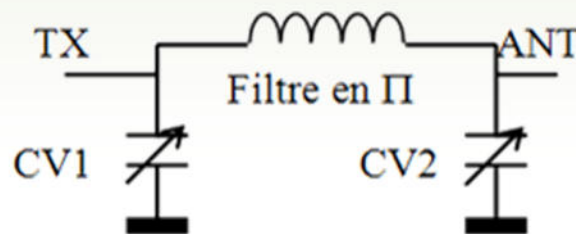
4-4) circuits bouchon et série RLC

- Un **ondemètre à absorption** est un appareil de mesure de fréquence qui nécessite de la puissance pour fonctionner.
 - la bobine interchangeable du circuit LC de l'ondemètre est couplée avec le signal dont on veut connaître la fréquence.
 - lorsque la valeur du condensateur varie, la tension aux bornes du circuit LC lue par le voltmètre de l'appareil marque un pic très net (le « dip ») indiquant que le circuit est accordé.
 - la fréquence est relevée sur l'échelle de lecture du condensateur.
 - si le pic n'est pas franc, il peut s'agir d'un harmonique.
 - le voltmètre peut être remplacé par une lampe à incandescence dont l'éclat indique le pic de résonance.
- Un **grid-dip** fonctionne sur le même principe mais n'a besoin d'aucune puissance externe pour fonctionner car il possède son propre générateur HF.
 - lorsque le circuit à mesurer résonne sur la fréquence de l'oscillateur, la consommation de ce dernier chute brutalement indiquant l'accord du circuit.



4-5) filtre en pi

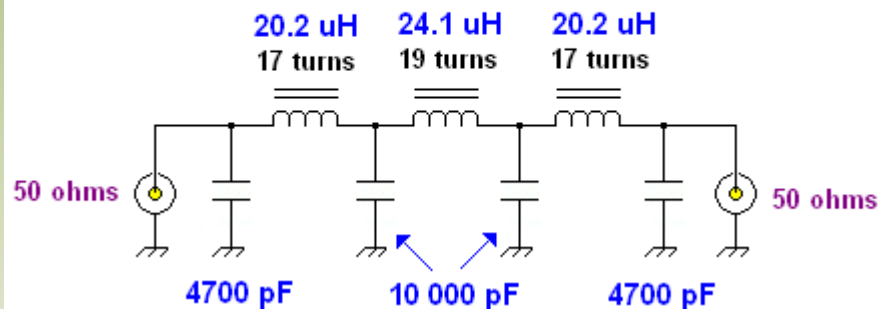
- Le filtre en pi est un filtre passe-bas dont l'impédance d'entrée est différente de celle de sortie grâce aux deux condensateurs variables indépendants.
 - Ce filtre permet d'adapter l'impédance de l'ensemble câble + antenne avec l'impédance de sortie de l'émetteur.
 - L'atténuation de ce filtre est de 12 dB par octave car les deux CV se comportent comme un seul CV (montage en série).
- Le filtre en T est un filtre passe-haut du second ordre nommé ainsi à cause de sa forme (en T) constitué d'une bobine et de deux condensateurs



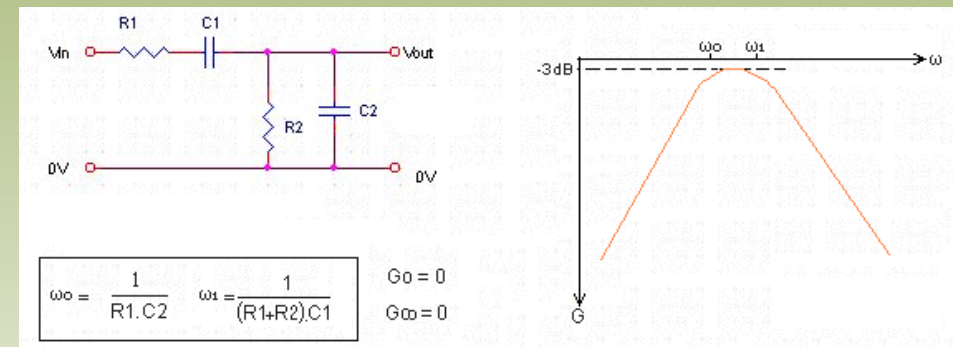
4-5) filtre en pi

• Exemples d'autres filtres

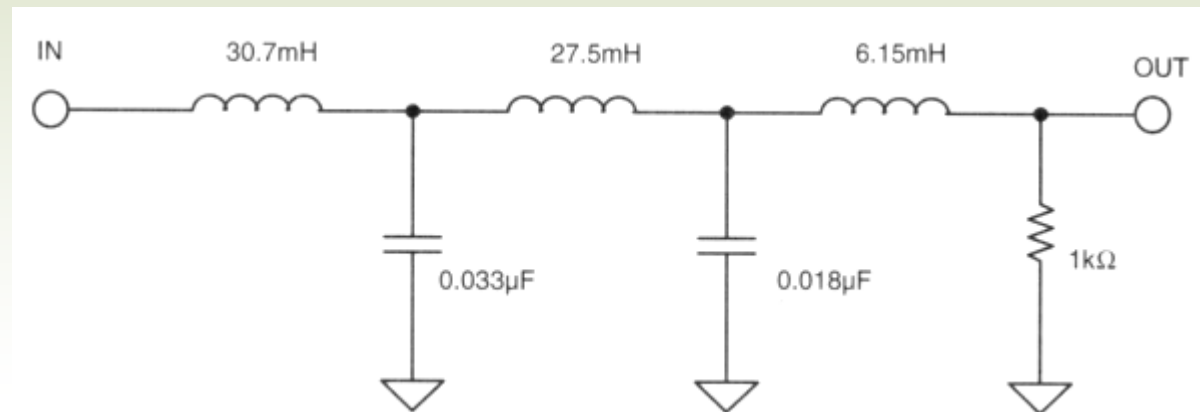
533 KHz Low Pass Filter



Filtre passe-bas 6 éléments actifs (36 dB/oct)



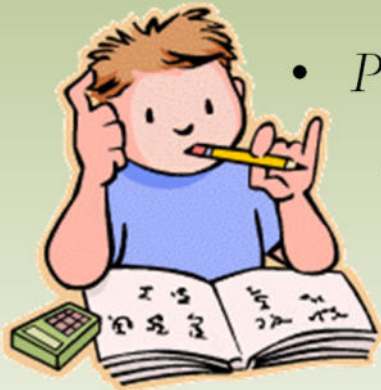
Filtre passe bande RC 6 dB/oct.



Filtre passe-bas de Butterworth d'ordre 5 avec Fc à 8kHz)

4-6) variantes et autres calculs à partir des formules de ce chapitre

- Quelques questions de l'examen portent sur les **variantes** des formules que nous avons développées dans ce chapitre. Voici les variantes les plus couramment utilisées :



- Pour une fréquence donnée à partir d'une des valeurs L ou C connues :
 - **$C = 1 / 4\pi^2 F^2 L$ ou encore : $L = 1 / 4\pi^2 F^2 C$**
 - formules simplifiées : **$C(\text{pF}) = 25330 / F^2(\text{MHz}) / L(\mu\text{H})$**
 $L(\mu\text{H}) = 25330 / F^2(\text{MHz}) / C(\text{pF})$
- Pulsation de la fréquence de résonance : **$\omega (\text{rad/s}) = 1/\sqrt{L.C}$**
- Calcul de Z_L et de Z_C à la résonance : **$Z_L (= Z_C) = \sqrt{L / C}$**

4-6) variantes et autres calculs à partir des formules de ce chapitre

- La résistance d'un **circuit bouchon ou série** non parfait n'est pas facilement mesurable mais se calcule.
 - dans un **circuit série**, le facteur Q est le rapport obtenu en divisant la tension entre L et C (mesurée avec un oscilloscope) par la tension issue du générateur branché aux bornes du circuit et délivrant la fréquence de résonance.
 - dans un **circuit bouchon**, la bande passante à -3 dB du circuit (B) est estimée à l'aide d'un grid-dip. On en déduit $Q (= F_0 / B)$
 - en connaissant L et C, on a pour les deux circuits :
$$R = \sqrt{(L / C) / Q}$$
 - on peut aussi en déduire Z à la résonance du circuit bouchon :
$$Z = \sqrt{(L / C) \times Q}$$
 - Quelques questions d'examen sur ces deux formules !



Chapitre 4 – 2^{ème} partie

La théorie avec les figures animées

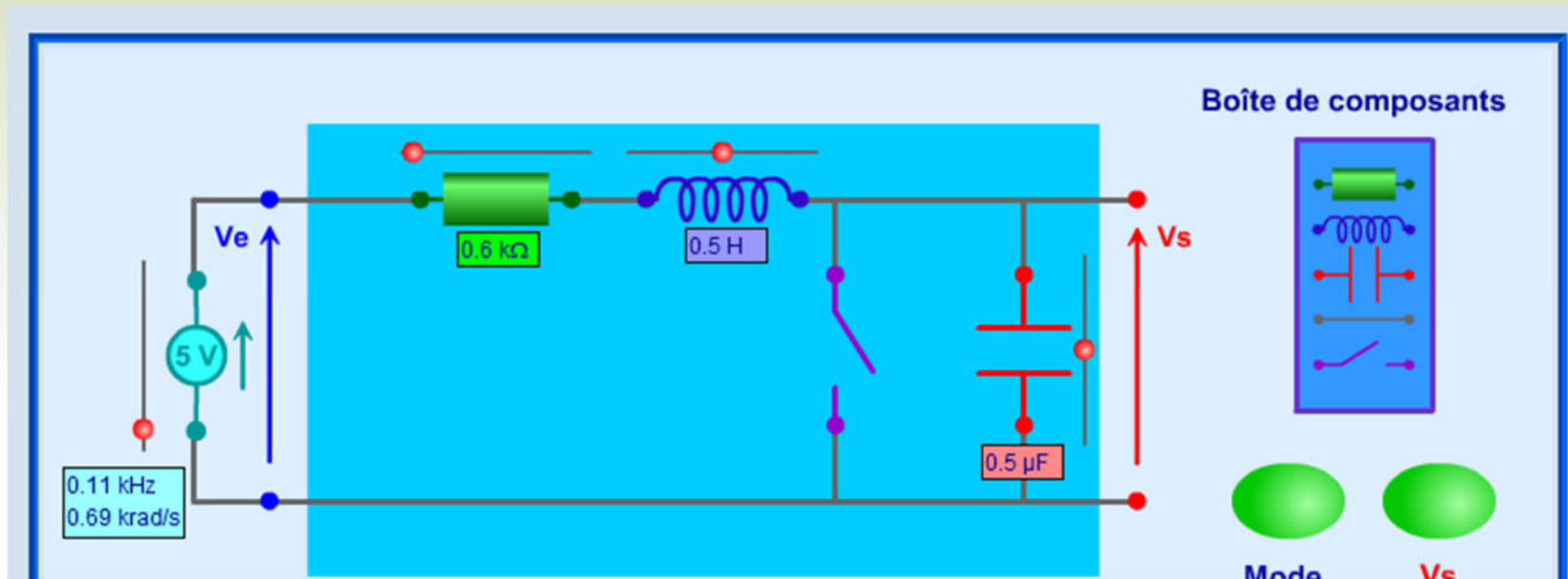


- *Figures animées pour la physique, étude d'un filtre bouchon LC*

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Elec/Filtres/filtre.php

- **R = 0,6 kΩ** (effet de peau de la bobine, valeur exagérée compte tenu de Fo)
- **C = 0,5 μF** valeurs peu fréquentes
- **L = 0,5 H** en HF !
- **Rechercher la fréquence de résonance du circuit. Vérification par calcul :**

$$F_0 = 1/[2\pi\sqrt{(0,5 \times 0,5 \cdot 10^{-6})}] = 1/[6,28 \times 0,5 \cdot 10^{-3}] = \mathbf{318 \text{ Hz}} \text{ soit } 2000 \text{ rad/s } (= 2\pi \times 318)$$

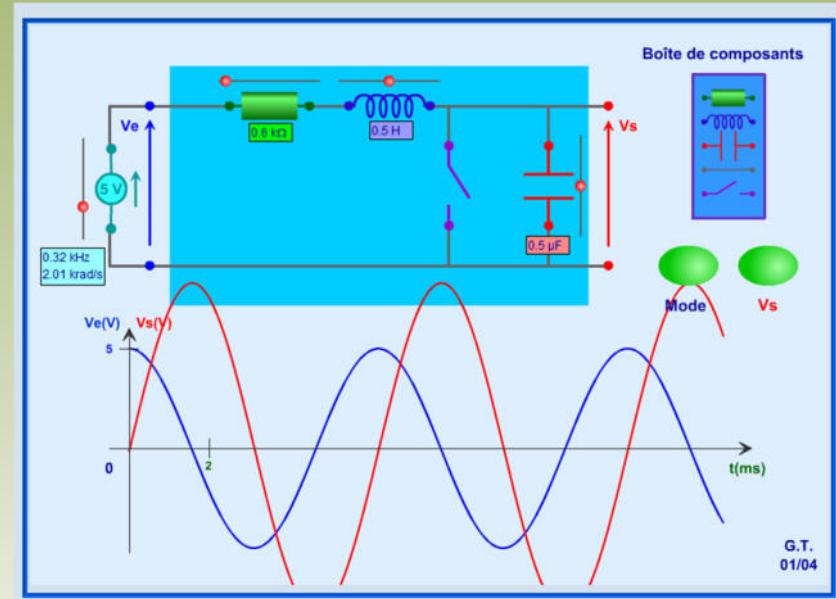
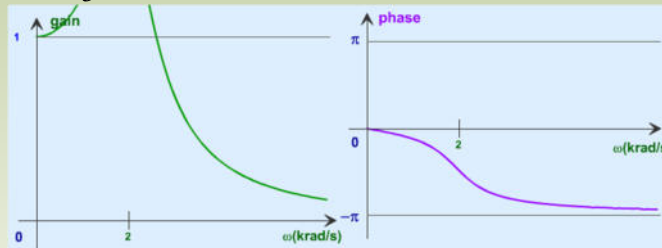


Chapitre 4 – 2^{ème} partie

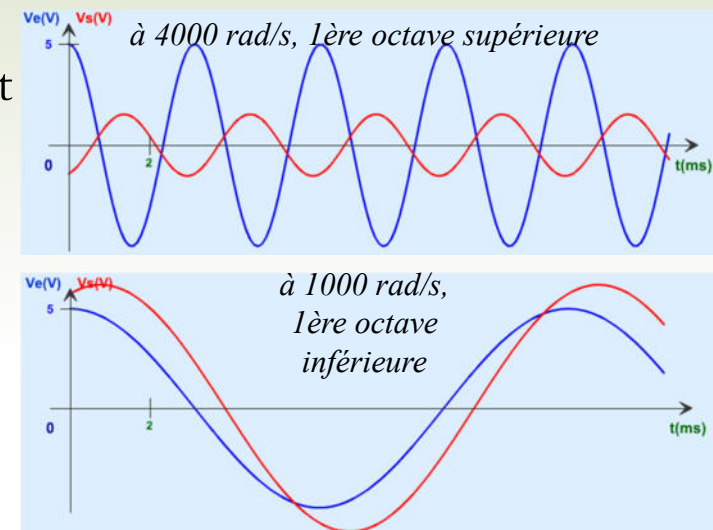
La théorie avec les figures animées



- **A la résonance**, la tension sur le condensateur est à son **maximum** et en **retard de 90°**
- *En faisant varier R (qui doit rester faible), la tension aux bornes de C diminue mais on a toujours la tension maximum à Fo.*



- *Ci-dessus, le gain (max à Fo) et le déphasage*
- **Après la résonance**, la tension de sortie est en **retard de près de 180°** par rapport à la tension d'entrée et $V_s < V_e$.
- **Avant la résonance**, la tension de sortie est (*presque*) en **phase** par rapport à l'entrée et il reste un gain plus faible ($V_s > V_e$).
- *En mesurant aux bornes de L (au lieu de C), les déphasages et le gain sont inversés : avant la résonance, V_s en avance de 180° et $V_s < V_e$.*

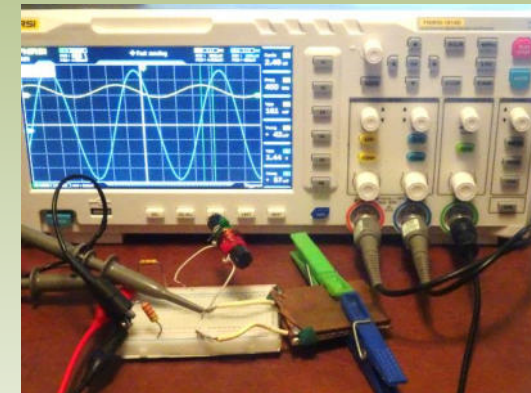


Chapitre 4 – 2^{ème} partie

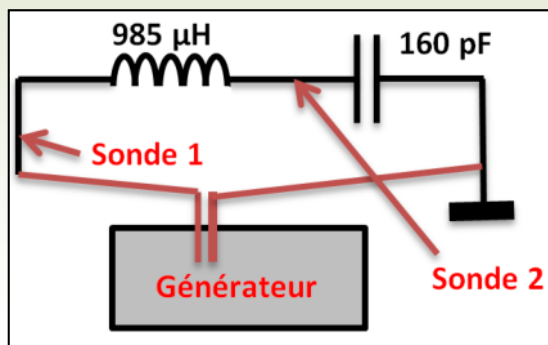
La pratique avec nos composants



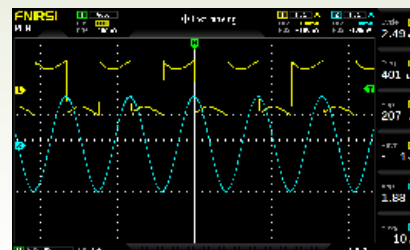
- Mesure du facteur Q d'un circuit série LC
 - *mise en évidence de l'effet de résonance (tension max pour une fréquence)*
 - $L = 985 \mu\text{H}$ et $C = 160 \text{ pF}$
 - Calcul : $F = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 401 \text{ kHz}$
 - Surtension = 8,8 (1,42 V / 161 mV)
 - Bande passante à -3 dB du circuit :
 - Bp : 383 kHz à 424 kHz = 41 kHz
 - $Q = 401/8,8 = 45$
 - $R_L = \sqrt{L/C}/Q = 281 \Omega$ ($R_{fil} = 1,7 \Omega$)



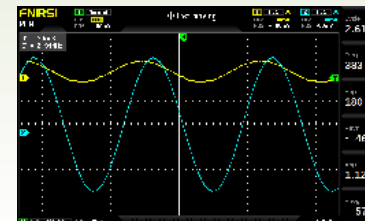
Recherche de la fréquence de résonance
 (max de tension et déphasage de -90°
 car mesure aux bornes de C)



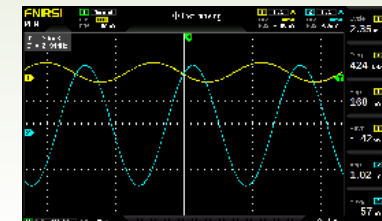
Le schéma du montage



Même avec un signal
 carré médiocre en
 entrée, le signal de
 sortie reste sinusoïdal



Avant (en phase) et après (déphasé de 180°)
 la fréquence de résonance (atténuation de
 3 dB, 71% de la tension à la résonance)



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>