

Radio-Club de la Haute Île



**F5KFF / F6KGL**

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

# Les fiches de synthèse de F6KGL

## Epreuve de Technique

Pour plus de détails, voir le cours de F6KGL :

[http://f6kgl.f5kff.free.fr/cours\\_radio.pdf](http://f6kgl.f5kff.free.fr/cours_radio.pdf) ►

ou la vidéo et le PDF disponibles sur la page :

◀ <https://f6kgl-f5kff.fr/lespodcasts/>



# 1-1) Les bases de l'électricité



Alessandro Volta  
1745 – 1827  
Pile Zinc-Charbon (1800)



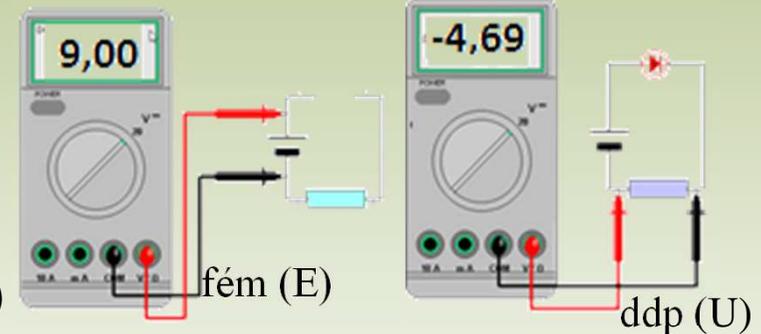
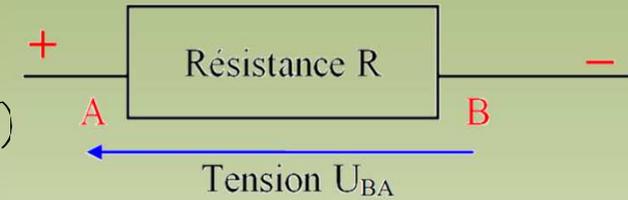
Volta présente sa pile à Napoléon (nov. 1801)



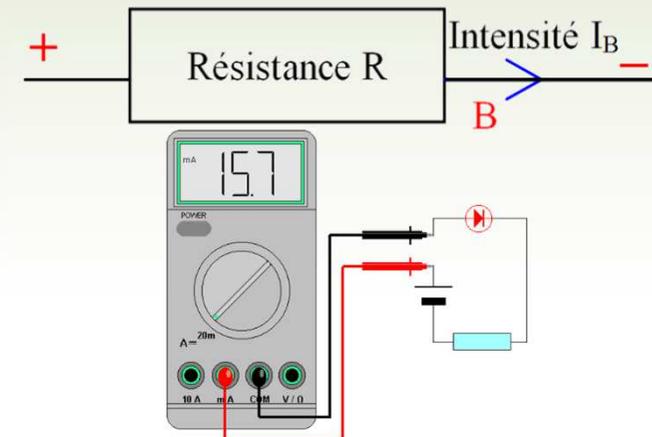
André-Marie Ampère  
1755 – 1836  
Relation entre magnétisme et électricité (1820)

## • L'électricité repose sur 4 grandeurs :

- la **tension**
  - notée  $U$  (ou  $E$ ), donnée en volts (V)
  - représentation
    - flèche entre deux points
    - tension de référence
  - mesure (avec un voltmètre)
    - force électromotrice (fém)
    - différence de potentiel (ddp)



- l'**intensité**
  - notée  $I$  et donnée en ampères (A)
  - représentation
    - sens du courant (flèche sur le circuit)
    - sens électrique et sens électronique
  - mesure (avec un ampèremètre)



# 1-1) Les bases de l'électricité

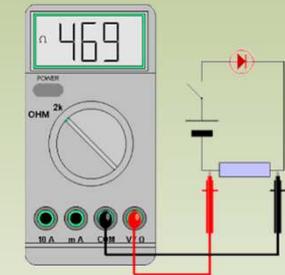
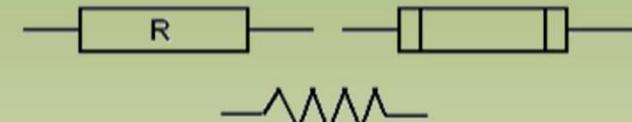
## • L'électricité repose sur 4 grandeurs :



Georg Simon Ohm  
1789 – 1854  
Théorie du circuit galvanique (Die galvanische Kette, 1827)

### • la résistance

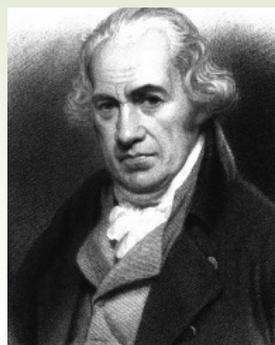
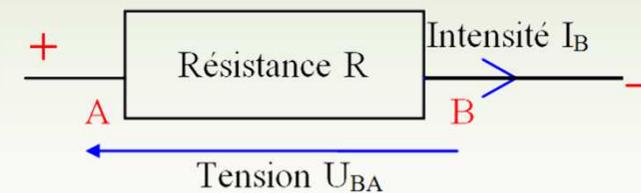
- notée R et donnée en ohms ( $\Omega$ )
- ne pas confondre le phénomène et le composant
- représentation schématique
- mesure (avec un multimètre)
- *ce composant sera présenté en détail dans le prochain cours*



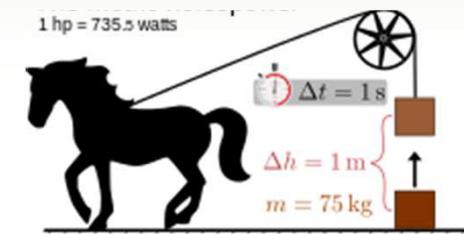
### • la puissance

- notée P et donnée en watts (W)
- puissance disponible
  - source
- puissance consommée
  - thermique (chaleur)
  - électrochimique (chargement d'un accu)
  - électromagnétique (champ d'une antenne)
  - mécanique (moteur)
    - 1 cheval-vapeur = 735,5 W = 75 kg·m·s<sup>-1</sup>

Chaleur dégagée = Puissance  $P_R$



James Watt  
1736 – 1819  
Améliore la machine à vapeur (1765) et définit le cheval-vapeur (1780)

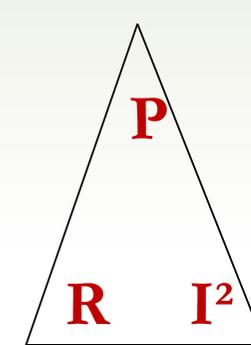
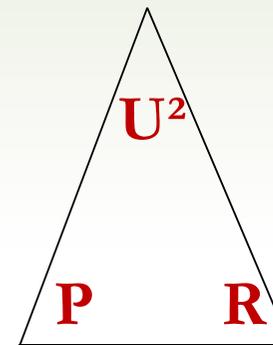
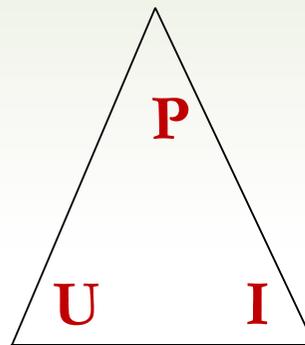
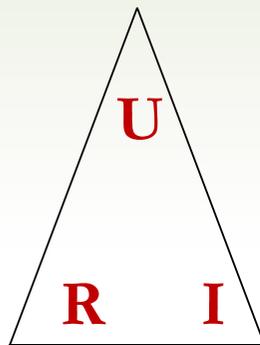


## 1-2) Lois d'Ohm et de Joule

- Les 12 formules liant ces 4 grandeurs sont :

|                | P en watts               | U en volts                        | I en ampères                      | R en ohms                           |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| P (W)          |                          | $R = U^2 / P$                     | $R = P / I^2$                     | $\sqrt{(P / R)}$                    |
| U (V)          | $I = P / U$              |                                   | $R = U / I$                       | <b><math>P = U^2 / R</math></b>     |
| I (A)          | $U = P / I$              | <b><math>P = U \cdot I</math></b> |                                   | <b><math>P = R \cdot I^2</math></b> |
| R ( $\Omega$ ) | $U = \sqrt{(P \cdot R)}$ | $I = U / R$                       | <b><math>U = R \cdot I</math></b> |                                     |

- Les quatre équations en **rouge** ci-dessus servent de base aux quatre triangles de calcul simplifié :

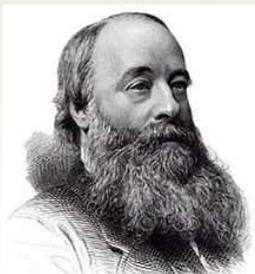


## 1-3) autres unités



Charles-Augustin de  
Coulomb  
1736 – 1806  
Balance de Coulomb  
mesurant la force entre 2  
charges électriques (1784)

- Le **coulomb**
  - est noté **C**
  - représente une **quantité d'électricité** (notée **Q**), c'est-à-dire un nombre d'électrons
    - précisément :  $6,25 \cdot 10^{18}$  électrons (*6 milliards de milliards*)
  - l'intensité est un débit et correspond au passage d'électrons par unité de temps. Un ampère est égal à un coulomb par seconde, soit la relation suivante :
    - **$I(A) = Q(C) / t(s)$**  ou (variante)  **$Q(C) = I(A) \cdot t(s)$**
  - *autre unité d'électricité : **ampère-heure** (Ah) :  **$1 Ah = 3600 C$***

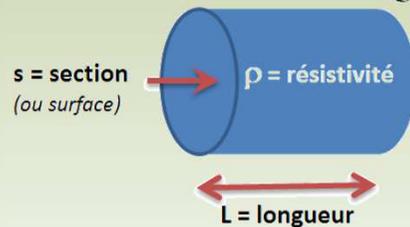


James Prescott Joule  
1818 – 1889  
Expériences sur  
l'équivalent mécanique de  
la chaleur (1843)

- Le **joule**
  - est noté **J**
  - représente une quantité d'**énergie disponible** (notée **E**) ou une quantité d'**énergie consommée** (travail et notée **W**)
  - un watt est égal à un joule par seconde, soit la relation suivante:
    - **$P(W) = E$  ou  $W(J)/t(s)$**  ou  **$E$  ou  $W(J) = P(W) \cdot t(s)$**
  - *autre unité d'énergie : **watt-heure** (Wh) :  **$1 Wh = 3600 J$***

## 1-4) la résistivité

- **La résistivité** est un nombre qui caractérise le pouvoir d'un matériau à résister au passage du courant électrique continu à une température définie (20°C en général).
  - la résistivité est notée  $\rho$  (*rhô*) et se définit en  $\Omega\text{m}$ .
  - la résistance d'un corps dépend de sa résistivité mais aussi de ses dimensions. Si le corps est homogène, la résistance est :

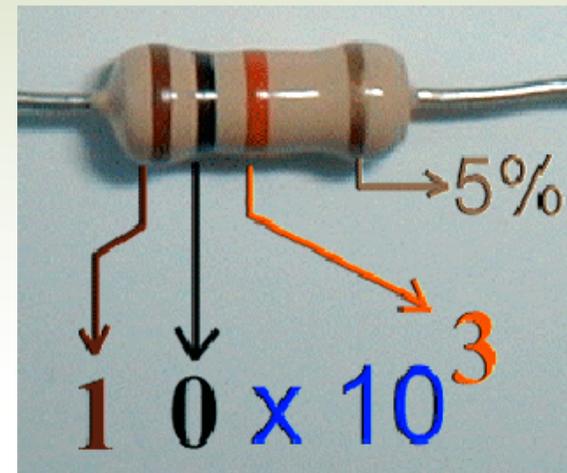


- proportionnelle à la longueur
- inversement proportionnelle à la section (*et non pas diamètre*)
- donnée par la formule :  $R(\Omega) = \rho(\Omega\text{m}) \cdot L(\text{m}) / s(\text{m}^2)$

## 1-5) Le code des couleurs

- La valeur d'une résistance est codée avec **3 bagues** :
  - les **deux premières bagues** indiquent les **deux premiers chiffres** de la valeur,
  - la **troisième bague** indique le **nombre de 0** de la valeur.
  - *une quatrième bague indique la tolérance si elle est supérieure à 20%*
  - *les bagues doivent se situer à gauche de la résistance (ou en haut si verticale).*

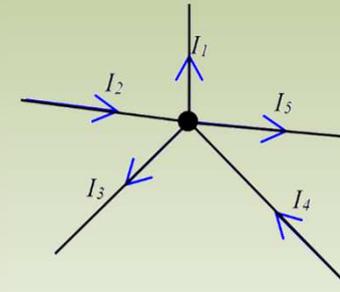
| <b><u>Phrase</u></b> | <b><u>Couleur</u></b> | <b><u>Chiffre</u></b> |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Ne                   | Noir                  | 0                     |
| Mangez               | Marron                | 1                     |
| Rien                 | Rouge                 | 2                     |
| Ou                   | Orange                | 3                     |
| Je                   | Jaune                 | 4                     |
| Vous                 | Vert                  | 5                     |
| Battrai              | Bleu                  | 6                     |
| Violemment           | Violet                | 7                     |
| Grand                | Gris                  | 8                     |
| Boa                  | Blanc                 | 9                     |



## 1-6) La loi des noeuds et des mailles

- Rien ne se perd, rien ne se crée
  - la somme algébrique des courants passant en un nœud est nulle
    - il y a, dans un nœud (*endroit où se rejoignent plusieurs fils conducteurs*), autant de courant qui y entre que de courant qui en sort.

$$\bullet \quad I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0$$



$$\bullet \quad \text{autre présentation : } I_2 + I_4 = I_1 + I_3 + I_5$$

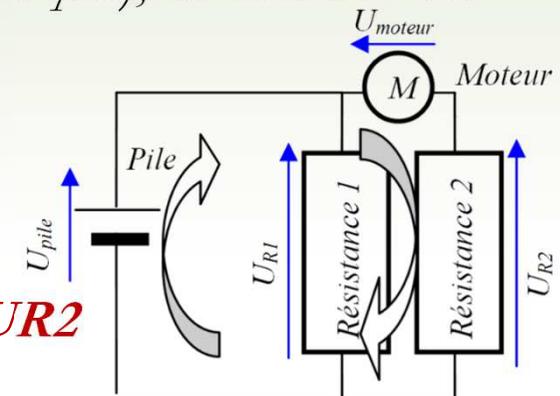
- la somme algébrique des tensions en une maille est nulle
  - quand on fait le tour de la maille (*incluant la pile*), la tension du générateur est absorbée par la (ou les) charge(s)

$$\bullet \quad U_{\text{pile}} + U_{\text{moteur}} + U_{R2} = 0$$

$$\bullet \quad U_{\text{pile}} + U_{R1} = 0$$

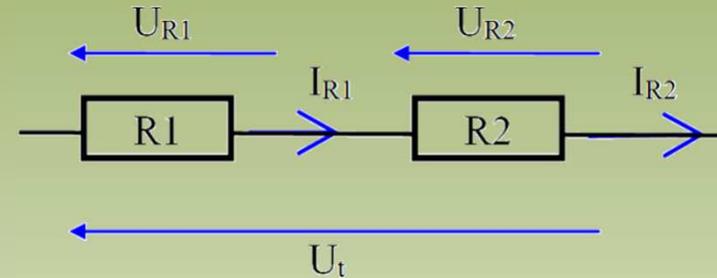
$$\bullet \quad U_{R1} + U_{\text{moteur}} + U_{R2} = 0$$

$$\bullet \quad \text{autre présentation : } U_{\text{pile}} = U_{R1} = U_{\text{moteur}} + U_{R2}$$



## 1-7) Groupements Série et Parallèle

- Dans un groupement de résistances en **série** :

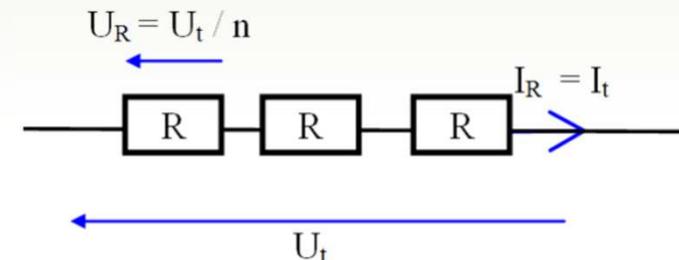


- la résistance équivalente est la somme des résistances :
  - $R_t = R1 + R2 + \dots$
- la tension est répartie au prorata des résistances
  - $U_{R1} = U_t \cdot (R1 / R_t)$
  - $U_t = U_{R1} + U_{R2} + \dots$  (loi des mailles)
- l'intensité est identique dans chacune des résistances
  - $I_t = I_{R1} = I_{R2} = \dots$  (loi des nœuds)
- la puissance totale dissipée est répartie au prorata des résistances :
  - $P_{R1} = U_{R1} \cdot I_t = P_t \cdot (R1 / R_t)$

- Dans un groupement de résistances de **valeurs identiques en série** :

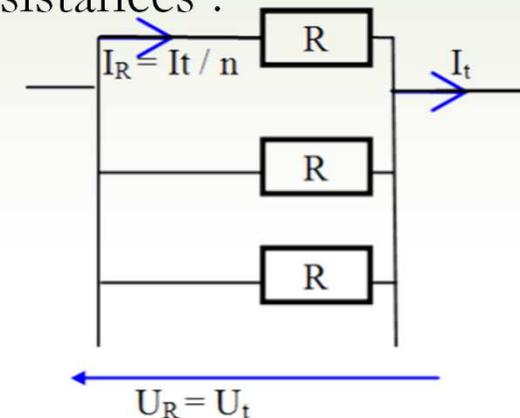
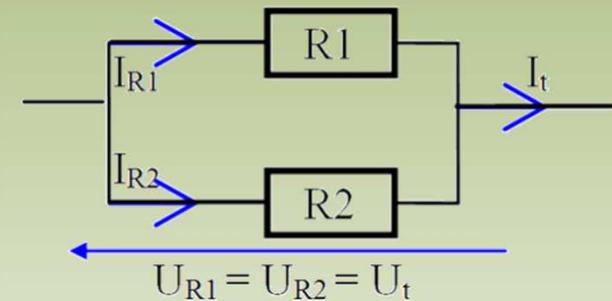
$$R_t = R \times n ; U_R = U_t / n ;$$

$$I_t = I_{R1} = I_{R2} = \dots ; P_R = P_t / n$$



## 1-7) Groupements Série et Parallèle

- Dans un groupement de résistances en **parallèle** :
  - 2 formules pour la résistance équivalente :
    - $R_t = (R1 \times R2) / (R1 + R2)$ 
      - pour deux résistances uniquement
    - $R_t = 1 / [(1/R1) + (1/R2) + \dots]$
  - la tension est constante (loi des mailles)
    - $U_t = U_{R1} = U_{R2} = \dots$
  - l'intensité est inversement proportionnelle aux résistances :
    - $I_{R1} = I_t \cdot (R_t / R1)$
  - la puissance est répartie au prorata inverse des résistances :
    - $P_{R1} = P_t \cdot (R_t / R1)$
- Dans un groupement de résistances de **valeurs identiques en parallèle** :



$$R_t = R / n ; U_R = U_t$$

$$I_R = I_t / n ; P_R = P_t / n$$

# 1-8) Exemples d'application avec des résistances

## • Exemple n° 1 (pont de Wheatstone)

- Produit en croix :

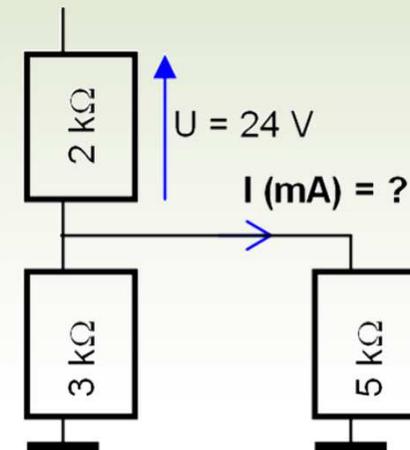
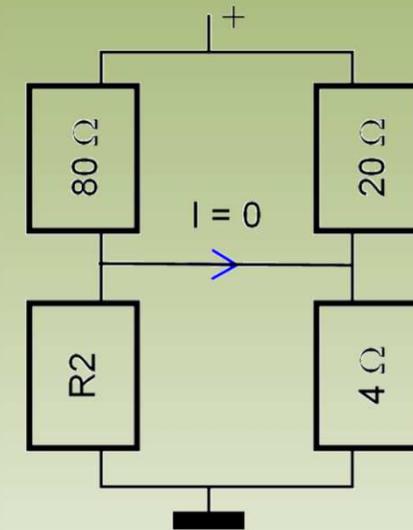
$$R2 = (80 \times 4) / 20 = \mathbf{16 \Omega}$$

- *plus empirique : on voit que 4 ohms est 5 fois plus petite que 20 ohms. Pour équilibrer le pont, R2 sera 5 fois plus petite que 80 ohms :*

$$R2 = 80 / 5 = 16$$

## • Exemple n° 2 (pont diviseur)

- $I_{RT} = I_{R1} = U_{R1} / R1 = 24 / 2000 = 0,012 \text{ A}$
- $R_T = (3 \times 5) / (3 + 5) = 15 / 8 = 1,875 \text{ k}\Omega$
- $IR = I_{RT} \times (R_T / R) = 0,012 \times (1875 / 5000) = 0,0045 \text{ A} = \mathbf{4,5 \text{ mA}}$

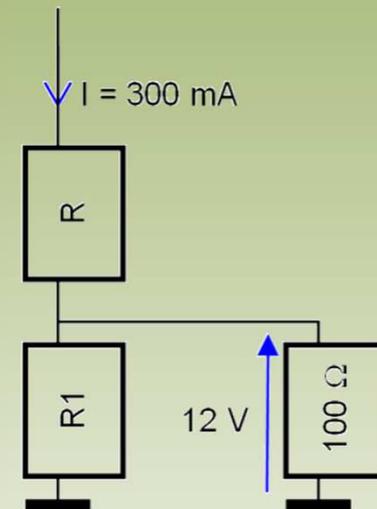


# 1-8) Exemples d'application avec des résistances

## Exemple n° 3 (pont diviseur)

Calculer  $I_{R1}$  et  $R1$

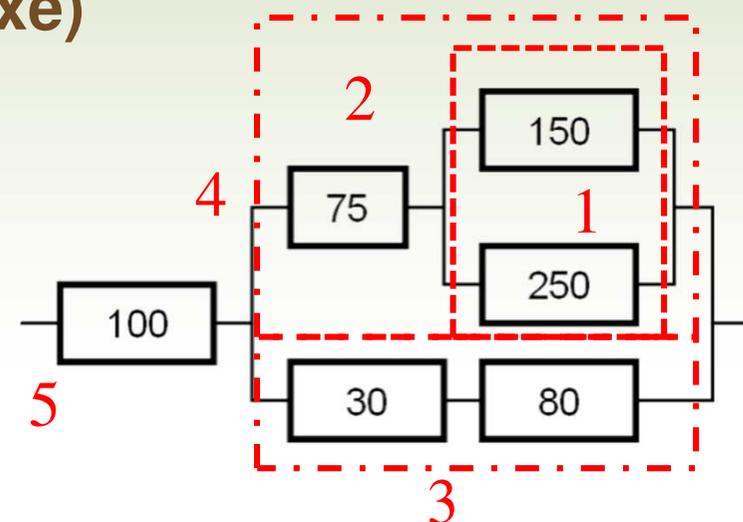
- $I_{R2} = U_{R2} / R2 = 12 / 100 = 0,12 \text{ A} = 120 \text{ mA}$
- $I_{R1} = I_R - I_{R2} = 300 \text{ mA} - 120 \text{ mA} = \mathbf{180 \text{ mA}}$
- $R1 = U / I = U_{R2} / I_{R1} = 12 / 180 \text{ mA}$   
 $= 12 / 0,18 = \mathbf{66,7 \Omega}$  (ou  $0,0667 \text{ k}\Omega$ )



## Exemple n° 4 (réseau complexe)

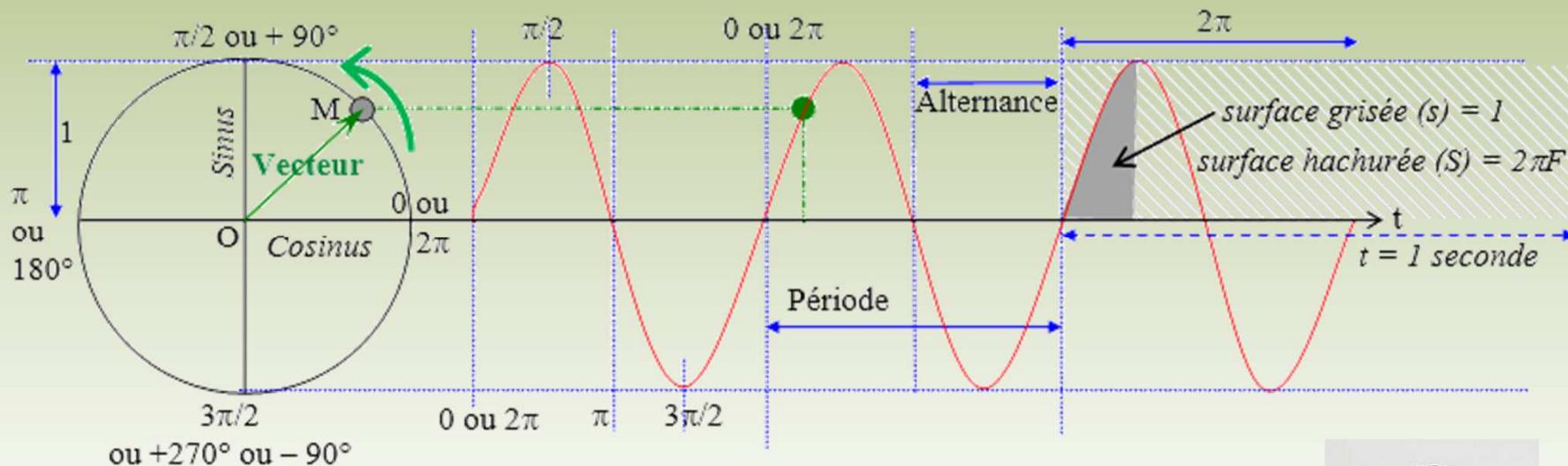
Calculer la résistance équivalente

- du plus élémentaire au plus complexe en 5 étapes*
- **1** :  $(150 \times 250) / (150 + 250) = 93,75$
  - **2** :  $93,75 + 75 = 168,75$
  - **3** :  $30 + 80 = 110$
  - **4** :  $(168,75 \times 110) / (168,75 + 110) = 66,59$
  - **5** :  $100 + 66,59 = \mathbf{167 \Omega}$  (arrondi)



## 2-1) Courants alternatifs

- Le signal **sinusoïdal** est la forme la plus régulière, sans à-coups, des signaux alternatifs
- Représentation d'une fonction Sinus



- Les formules :
  - durée d'une **période** :  $t(s) = 1 / F(\text{Hz})$
  - fréquence** :  $F(\text{Hz}) = 1 / t(s)$
  - pulsation** :  $\omega(\text{rad/s}) = 2 \times \pi \times F(\text{Hz})$

*rapport entre la zone « S » (surface =  $2\pi F$  pour une seconde) et la zone « s » (surface = 1)*



Heinrich Rudolf Hertz  
1857 - 1894  
Son éclateur à sphères met en évidence les ondes électromagnétiques - 1888

## 2-2) valeurs maximum, efficace, moyenne, crête à crête



- La **valeur moyenne** ( $U_{moy}$  ou  $I_{moy}$ ) d'un signal alternatif est la moyenne algébrique du courant ou de la tension. C'est la valeur lue par un galvanomètre. **Un signal sinusoïdal a une valeur moyenne nulle.**
- La **valeur maximale** ( $U_{max}$  ou  $I_{max}$ ) d'un signal alternatif est la **valeur la plus grande** que prend le signal au cours d'une période. Elle est appelée aussi **valeur crête** ( $U_{crête}$  ou  $I_{crête}$ ).
- La **valeur efficace** ( $U_{eff}$  ou  $I_{eff}$ ) d'un signal alternatif est la **valeur pour laquelle s'appliquent les lois d'Ohm et de Joule**. Lorsque le signal est sinusoïdal, on a :  
$$U_{max} = \sqrt{2} \cdot U_{eff} = 1,414 \times U_{eff}$$
$$U_{eff} = U_{max} / \sqrt{2} = 0,707 \times U_{max}.$$
- La valeur **crête à crête** ( $U_{càc}$  ou  $I_{càc}$ ) est la valeur de **l'écart entre les extrêmes positif et négatif** du signal.

## 2-2) valeurs maximum, efficace, moyenne, crête à crête

- *La superposition d'un signal sinusoïdal et d'une composante continue modifie la valeur efficace du signal.*
  - *pour pouvoir appliquer la loi d'Ohm, on retiendra la formule suivante pour calculer la valeur efficace totale ( $U_{\text{efftot}}$ ) du signal :*

$$U_{\text{efftot}} = \sqrt{(U_{\text{cont}}^2 + U_{\text{eff}}^2)}$$

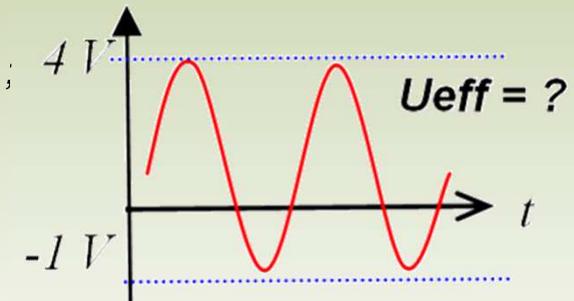
- **Exemple :**

Calcul de  $U_{\text{eff}}$  :  $U_{\text{cac}} = 5V [= 4V - (-1V)]$  donc  $U_{\text{max}} = 2,5 V$  ;  
donc  $U_{\text{eff}} = 1,77 V (= 2,5 \times 0,707)$

La composante continue de ce signal est égale à sa tension moyenne :  $U_{\text{cont}} = U_{\text{moy}} = [4 + (-1)] / 2 = 1,5 V$

Tension efficace totale :  $U_{\text{eff}} = \sqrt{[1,5^2 + 1,77^2]} = \mathbf{2,3 V}$

Remarque : si la tension continue avait été négative (-1,5 V, ce qui implique que le signal variant entre +1V et -4 V aurait été inversé), le résultat aurait été le même (heureusement !)



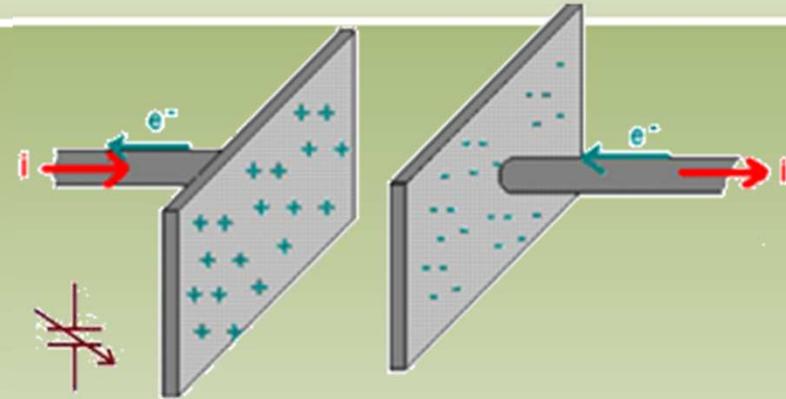
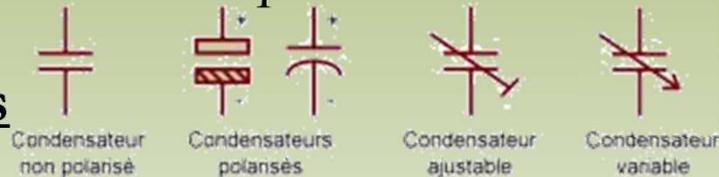
*Lorsque deux signaux sinusoïdaux sont superposés et pour les signaux alternatifs non sinusoïdaux, le calcul se complique...*

*Les valeurs efficaces ne sont pas signées (+ ou -) et on ne peut pas les additionner quand elles sont superposées (comme en courant continu)*

## 2-3) Bobines et condensateurs

- Le condensateur  
origines du phénomène :  
effet électrostatique

### Schémas



Unités : le **Farad** :  $\mu\text{F}$ ,  $\text{nF}$ ,  $\text{pF}$

ancienne unité :  $\text{cm}$  ( $\approx 1,1 \text{ pF}$ )

**Capacité :  $C = d \cdot S / E$**

calcul pratique :  **$C(\text{pF}) = 8,85 \cdot S (\text{cm}^2) / E (\text{V} / 10 \text{ mm})$**

- permittivité  $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF} / \text{m}$  [ $= (1/36\pi) \cdot 10^{-9} \text{ F} / \text{m}$ ]

- coefficient diélectrique (ou permittivité relative  $\epsilon_r$ ), rigidité diélectrique (en  $\text{kV} / \text{mm}$ )

- condensateurs électrochimiques (polarisés)

code des couleurs



Michael Faraday  
1791 - 1867  
Travaux sur  
l'induction  
magnétique - 1831  
et l'électrochimie -  
1833

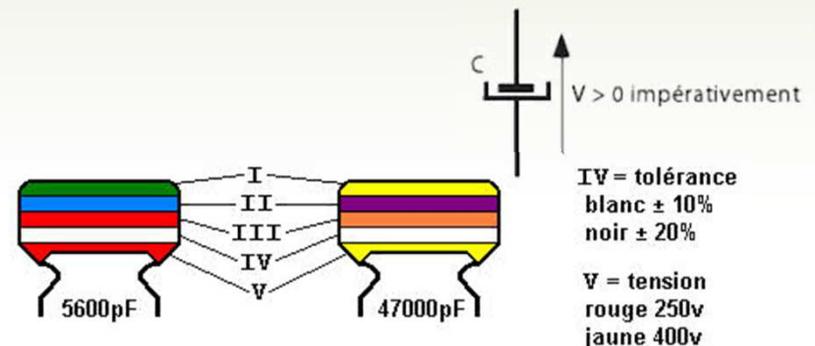
### Définitions physiques :

$$C(\text{F}) = Q(\text{C}) / U(\text{V}) \text{ ou}$$

$$Q(\text{C}) = C(\text{F}) \cdot U(\text{V})$$

$$E(\text{J}) = \frac{1}{2} \cdot Q(\text{C}) \cdot U(\text{V})$$

on rappelle que  $Q = I \cdot t$



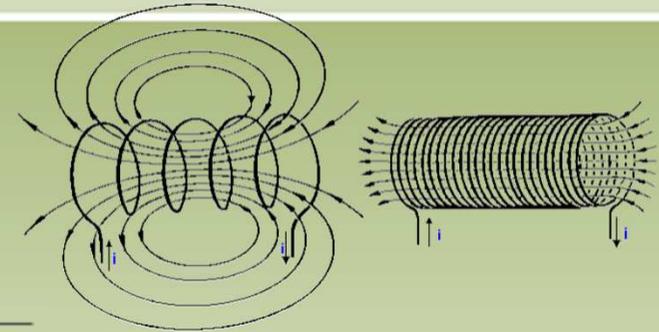
## 2-3) Bobines et condensateurs

- La bobine**

origines du phénomène :

effet électromagnétique

Schémas



Joseph Henry  
1797 - 1878  
Définition de l'unité de mesure d'induction électrique - 1832

Unités : le **Henry** : mH,  $\mu$ H, nH

**Inductance :  $L = F \cdot N^2 \cdot D^2$**

*L en l'honneur de H. Lenz*

Nagaoka simplifiée  **$L(\mu H) = [N^2 \times D^2 (cm)] / [45 D (cm) + 100 long (cm)]$**

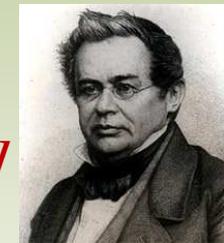
- *formule de base :  $L = \mu_o \cdot D^2 \cdot N^2 / long$*
- *perméabilité ( $\mu_o = 1,26 \mu H / m [= 4\pi \cdot 10^{-7} H / m]$ ,  $\mu_r$  (noyau)*
- *matériau magnétique (fer, ferrite, nickel) et diamagnétique (cuivre, zinc)*
- *flux d'induction magnétique ( $\Phi$  en Weber). 1 Weber est le flux d'induction magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produit une force électromotrice de 1 volt si on l'annule en 1 seconde par une décroissance uniforme :  $\Phi = U \times t$*

**Définitions physiques :**

$$\Phi(Wb) = L(H) \cdot I(A) \text{ ou}$$

$$L(H) = \Phi(Wb) / I(A)$$

$$E(J) = \frac{1}{2} L(H) \cdot I^2(A)$$



Heinrich Lenz  
1804 - 1865  
Complément des travaux de Faraday - 1834



Wilhelm Eduard Weber 1804 - 1891  
théorie de l'interaction électromagnétique - 1846

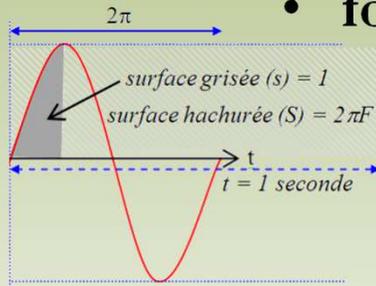
## 2-3) Bobines et condensateurs

- Lorsqu'ils sont traversés par des **courants alternatifs**, les bobines et les condensateurs réagissent différemment :
  - **le condensateur ne laissera passer que la composante alternative** d'une tension
  - **la bobine s'opposera à toutes variations de l'intensité** qui la parcourt.
- Bien que ces phénomènes se mesurent en ohms, on ne peut plus parler de résistance. Le terme d'**impédance** (*notée  $Z$* ) est employé et plus précisément :
  - **réactance** dans la cas de la bobine
  - **capacitance** (ou réactance négative) pour le condensateur
  - *les impédiments sont les bagages qui ralentissent la marche d'une armée.*
- **Aucune énergie n'est consommée** : les bobines et les condensateurs, s'ils sont parfaits, emmagasinent l'énergie puis la restituent à l'identique (*pas de perte en chaleur ou dans le champ magnétique de la bobine*).

## 2-3) Bobines et condensateurs

rappel : pulsation =  $\omega$  (rad/s) =  $2 \pi \cdot F(\text{Hz})$

- Calcul de l'impédance d'un **condensateur** :
  - **Capacitance** :  $Z_C = 1 / \omega C = 1 / [2 \cdot \pi \cdot F(\text{Hz}) \cdot C(\text{F})]$
  - **formule simplifiée** :  $Z(\Omega) = 159 / F(\text{MHz}) / C(\text{nF})$



- $C = Q / U$
- $C = (I \times t) / U$
- $t / C = U / I$
- $1 / (2\pi F \times C) = Z$

*en cas de variation d'intensité,  $t = 1/2\pi F$  (partie active)*

- Calcul de l'impédance d'une **bobine** :
  - **Réactance** :  $Z_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot F(\text{Hz}) \cdot L(\text{H})$
  - **formule simplifiée** :  $Z(\Omega) = 6,28 \times F(\text{MHz}) \times L(\mu\text{H})$ 
    - $L = \Phi / I$
    - $L = (U \times t) / I$
    - $L / t = U / I$
    - $2\pi F \times L = Z$

*en cas de variation de tension,  $t = 1/2\pi F$  (partie active)*

*le calcul de l'impédance donné ici ne s'applique qu'à un signal sinusoïdal*

## 2-3) Bobines et condensateurs

- Capacité équivalente d'un groupement de condensateurs:

- calcul inverse des résistances

- **série** :  $C_t = 1 / [(1/C1) + (1/C2)] = (C1 \times C2) / (C1 + C2)$

*répartition de la tension au prorata inverse : le plus petit condensateur a la tension la plus élevée à ses bornes ( $Q = C \times U$  et  $Q_{C1} = Q_{C2}$ )*

- **parallèle** :  $C_t = C1 + C2$

*voir aussi page CNFRA dans Radio-REF d'avril 2010*

- Inductance équivalente d'un groupement de bobines:

- calcul comme pour les résistances

- **série** :  $L_t = L1 + L2 \pm M$

M = mutuelle induction

*(± selon le sens des spires et valeur selon le coefficient de couplage)*

- **parallèle** : *rarement utilisé et complexe en cas de mutuelle induction*

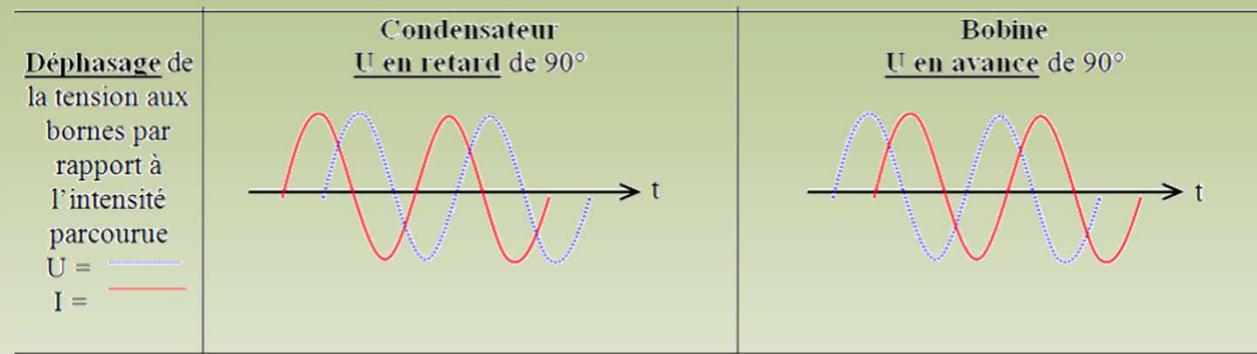
*voir aussi page CNFRA dans Radio-REF d'octobre 2012*

Bobines non  
couplées  
(perpen-  
diculaires)



## 2-3) Bobines et condensateurs

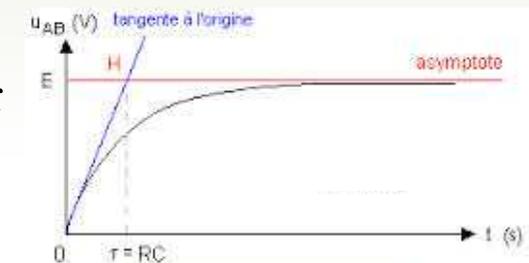
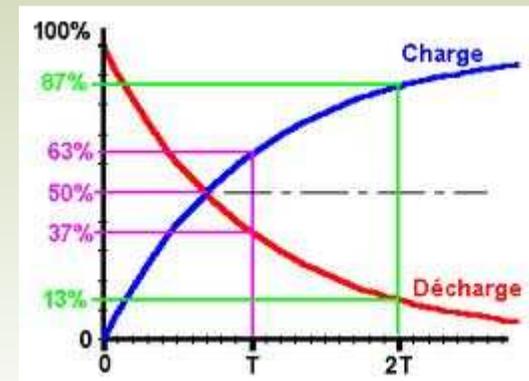
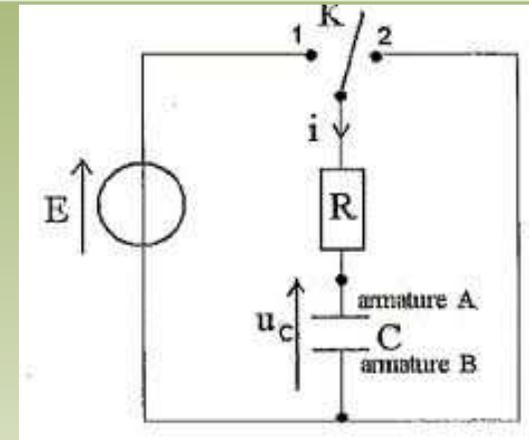
- *Dans une résistance, tension et intensité sont en phase (loi d'Ohm)*
- *On mesure le déphasage par rapport à l'intensité.*



- Dans un condensateur,
  - il y a d'abord établissement du courant puis établissement de la tension car le courant remplit le condensateur.
  - La tension est en retard de 90° par rapport au courant
- Dans une bobine,
  - une tension est préalablement nécessaire pour générer un courant puis, une fois la réserve d'énergie créée sous la forme d'un champ magnétique, le courant s'établit.
  - La tension est en avance de 90° par rapport au courant

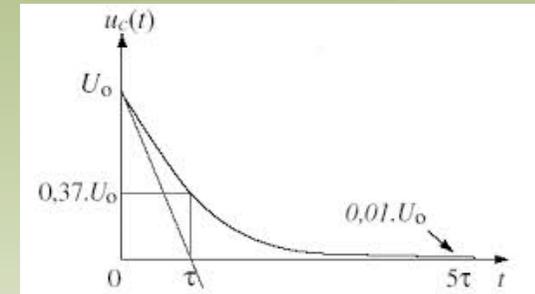
## 2-4) Charge, décharge et constante de temps pour les condensateurs

- Un condensateur se remplit (ou se charge) à travers une résistance grâce à une pile. Un inverseur permet au condensateur de se vider (ou se décharger) via la résistance.
- Pour déterminer le **temps de charge** du condensateur, on utilise la constante de temps :  $t(s) = R(\Omega) \times C(F)$ 
  - $Q = CU \Rightarrow I \times t = CU \Rightarrow t = U/I \times C = RC$
  - *formule simplifiée* :  $t(ms) = R(k\Omega) \cdot C(\mu F)$ 
    - à mesure que le condensateur se charge, la tension aux bornes de R diminue et le courant remplissant le condensateur diminue si bien qu'au bout du temps  $t$ , le condensateur n'est chargé qu'au **2/3 de la tension** (63,2%).
- **le condensateur se remplit en 5 t**



## 2-4) Charge, décharge et constante de temps pour les condensateurs

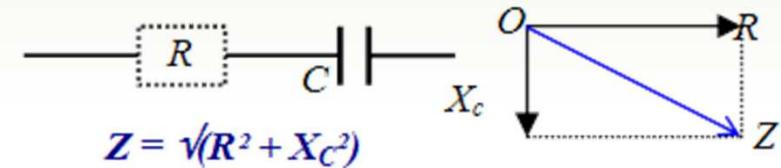
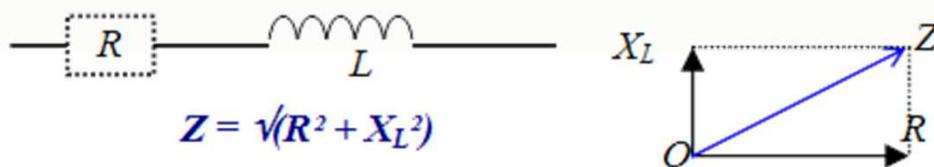
- Le raisonnement est inverse pour la **décharge** :
  - à chaque constante de temps, le condensateur **se vide du tiers** ( $1/2,718 = 36,8\%$ ) de la tension à ses bornes.
  - au bout de  $1 \tau$ , il reste  $(1/3) \times E$  ;  
au bout de  $2 \tau$ , il reste  $(1/9) \times E$ , etc...
  - au bout de  $5 \tau$** , la tension résiduelle est inférieure à 1% de la tension d'origine : **le condensateur s'est vidé.**
- En théorie, **le condensateur n'est jamais vide ni complètement chargé.**
- L'établissement du **courant dans une bobine** (ou l'interruption du courant) suit la même courbe.
  - la constante de temps est, dans ce cas,  **$t(s) = L(H) / R(\Omega)$** 
    - $\Phi(Wb) = L \times I \Leftrightarrow U \times t = L \times I \Leftrightarrow t = L \times (I/U) = L/R$
  - Attention aux bobines des relais** : lors de l'interruption brutale du courant, la tension inverse générée par le flux magnétique peut atteindre plusieurs dizaines de fois la tension d'alimentation de la bobine ( $\Phi = U \times t$ ).



## 2-5) Impédance de bobines et de condensateurs non parfaits

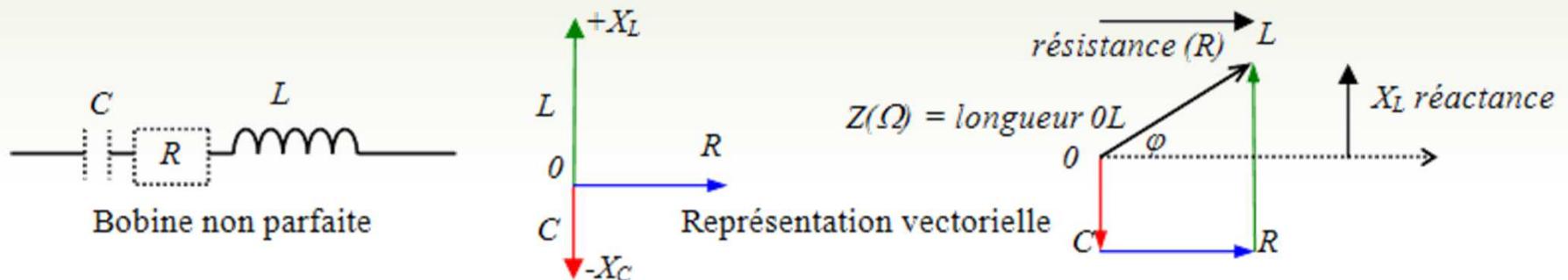


- Les bobines et les condensateurs ne sont **jamais parfaits** : ils ont toujours une partie résistive que nous appelons résistance pure.
- La réactance (rapport  $U / I$ ) de la bobine ou du condensateur ne peut pas s'ajouter avec la résistance du fil à cause du déphasage de l'intensité par rapport à la tension aux bornes de la bobine ou du condensateur.
- La partie résistive s'ajoute géométriquement (somme vectorielle) à la réactance :  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
- La direction du vecteur OZ indique le déphasage (en  $^\circ$  ou en fraction de  $\pi$ )



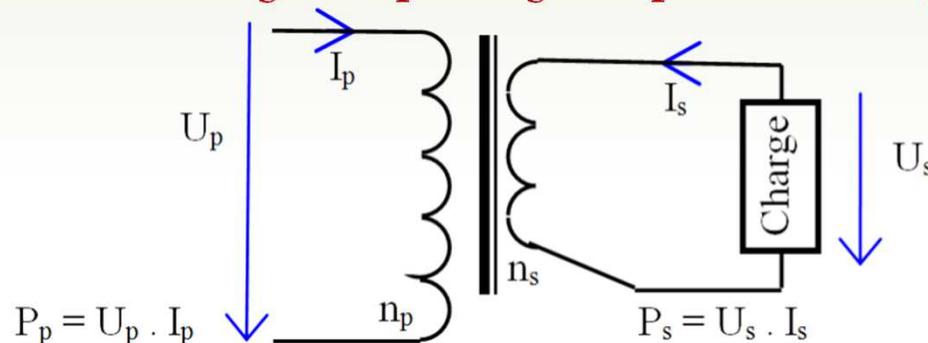
## 2-5) Impédance de bobines et de condensateurs non parfaits

- Un condensateur a toujours une composante réactive (bobine) à cause de la forme de ses armatures (formant un coude, par exemple). Une bobine a une composante capacitive liée à l'espacement entre ses spires.
- Les vecteurs  $R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $Z$  gardent la même échelle de longueur en  $\Omega$ ,
  - le vecteur de réactance de la **bobine** ( $L$ ) va vers le haut ( $+90^\circ$ ),
  - le vecteur de la capacitance du **condensateur** ( $C$ ) vers le bas ( $-90^\circ$ ),
  - le vecteur de la **résistance** ( $R$ ) va vers la droite (**pas de déphasage**)
  - le vecteur d'impédance ( $Z$ ) est la **somme vectorielle** formée :
    - d'une résistance ( $R$ )
    - et d'une réactance positive ( $+X_L$ ) ou négative ( $-X_C$ )
    - la résultante s'écrira sous la forme  $R \pm jX$ .



## 3-1) Transformateurs

- Un transformateur est composé d'au moins **deux enroulements** bobinés autour d'un **même circuit magnétique**
  - L'énergie est appliquée sur le **primaire** et est récupérée sur le ou les **secondaires**.
- Un transformateur possède plusieurs caractéristiques :
  - le **nombre de spires** donne le rapport de transformation N (des tensions : élévateur ou abaisseur)
  - la **puissance** utile délivrée au(x) secondaire(s) du transformateur est exprimée en VA (et non pas en watts)
  - le **rendement**  $\eta$  (êta) d'un transformateur parfait est de 100% : toute l'énergie présente sur le primaire est transférée sur le secondaire
- **Formules du transformateur parfait (ou idéal)**
  - **$U_s / U_p = n_s / n_p = N$  et  $I_s / I_p = n_p / n_s = 1/N$**



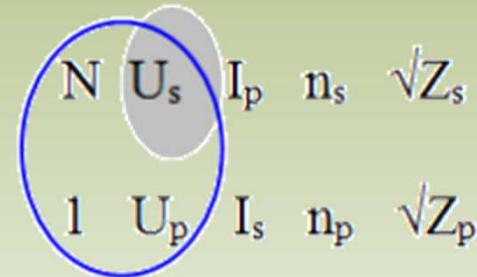
|   |       |       |       |              |
|---|-------|-------|-------|--------------|
| N | $U_s$ | $I_p$ | $n_s$ | $\sqrt{Z_s}$ |
| 1 | $U_p$ | $I_s$ | $n_p$ | $\sqrt{Z_p}$ |

## 3-1) Transformateurs

- **Exemple 1** : un transformateur, alimenté en 282 Vmax à son primaire, a un rapport de transformation de 1/10. Quelle sera la tension efficace mesurée au secondaire ?

$$U_p = 282 \text{ Vmax} \times 0,707 = 200 \text{ Veff}$$

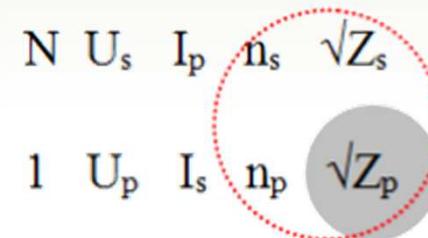
$$U_s = U_p \times N = 200 \times 1/10 = \mathbf{20 \text{ Veff}}$$



- **Exemple 2** : sur le secondaire d'un transformateur est branchée une résistance de 200 ohms. Le transformateur possède 80 spires au primaire et 40 spires au secondaire. Quelle impédance mesure-t-on au primaire ?

$$N = n_s / n_p = 40 / 80 = 1/2 = 0,5$$

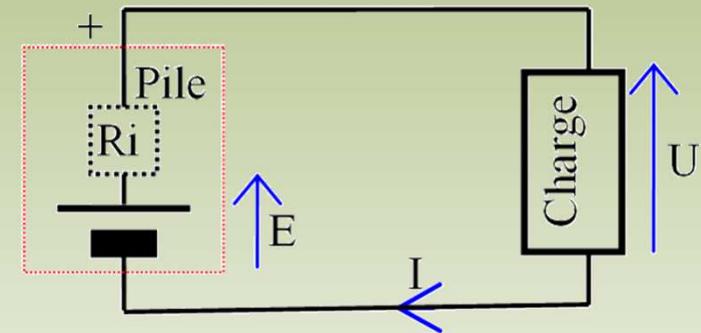
$$Z_p = Z_s / N^2 = 200 / 0,5^2 = \mathbf{800 \Omega}$$



## 3-3) Piles et accumulateurs

- Les piles et les accumulateurs sont des réserves de courant continu. Ils emmagasinent l'électricité grâce une réaction chimique (*électrodes, bain électrolytique*).

- représentation schématique :
- une pile est une source
- un accumulateur est une source ou une charge selon qu'on le fait débiter ou qu'on le recharge.



- Une pile (ou un accu) possède des caractéristiques propres:
  - sa force électromotrice (fém) est la tension **E** à vide, variable selon la constitution chimique des électrodes.
    - la fcém (force contre-électromotrice) d'un accumulateur est toujours supérieure à sa fém (il faut une tension pour inverser la réaction chimique)
  - sa résistance interne en  $\Omega$  (très faible pour les accus)
    - lorsque la pile est usée, sa résistance interne augmente
  - sa capacité : en C ou en Ah (**1 Ah = 3600 C**)

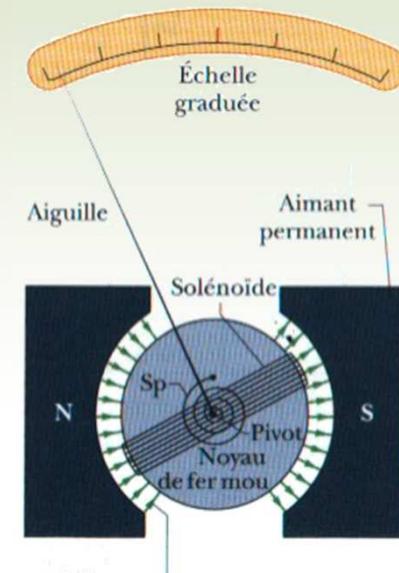
## 3-4) les galvanomètres



Luigi Galvani  
1737 – 1798

Commentaire sur les  
forces électriques  
dans le mouvement  
musculaire (1791)

- Les galvanomètres à cadres mobiles sont des appareils de mesure d'intensité. Un galvanomètre est composé :
  - d'une bobine (*solénoïde*, *solen* = « tuyau » en grec)
  - d'un cadre mobile
  - surmonté d'une aiguille
  - un cadran gradué permet de lire la mesure
- Les caractéristiques d'un galvanomètre sont :
  - sa résistance interne ( $R_i$  en  $\Omega$ )
    - de l'ordre d'une dizaine d'ohms
  - son intensité de déviation maximum ( $I_g$ )
    - de l'ordre du mA, voire moins ( $50 \mu A$ )
  - un galvanomètre ne peut lire que :
    - de faibles intensités ou de faibles tensions
    - des valeurs continues

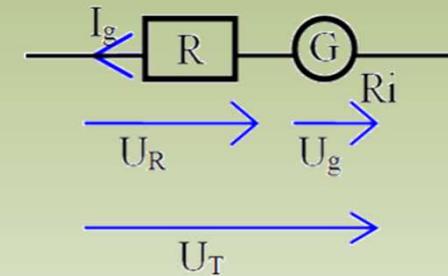


## 3-4) les galvanomètres

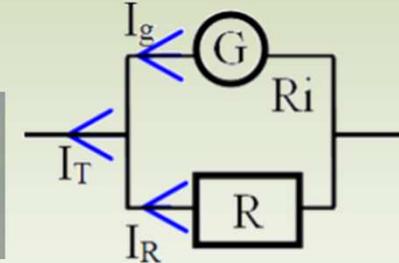
- Pour lire des tensions ou des intensités supérieures, on utilisera une **résistance** déterminée par la loi d'Ohm :



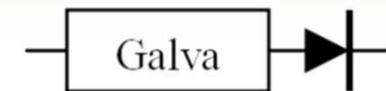
- en **série** avec le galvanomètre, ce qui donne un **voltmètre**
  - pour ne pas perturber le circuit mesuré,  $I_g$  doit être la plus faible possible
- en **dérivation** (**shunt**), ce qui donne un **ampèremètre**
  - $R_i$  doit être la plus faible possible



Shunt d'un multimètre



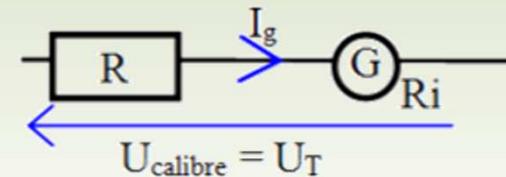
- le galvanomètre ne mesure que des **valeurs moyennes**. Pour indiquer des valeurs efficaces ou maximum,
  - une diode sera montée en série (redressement)
  - une échelle de lecture adaptée sera utilisée



voir aussi page **CNFRA** dans *Radio-REF* de septembre 2012

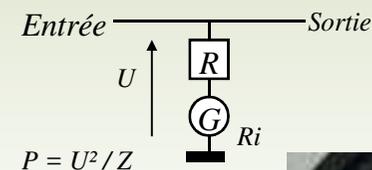
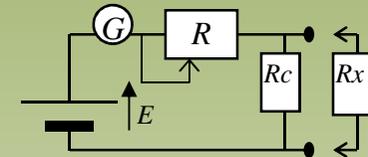
## 3-5) Qualité des voltmètres

- Le fait de brancher un voltmètre sur un circuit **ne doit pas perturber** le fonctionnement de ce dernier.
- Le **facteur de qualité** du voltmètre (**Q**) est égal au rapport :
  - de la **résistance totale** du voltmètre ( $R_i + R$ )
  - divisé par le **calibre** de l'appareil (tension lue à pleine échelle)
    - ce rapport ( $R / U$ ) est directement fonction de la **sensibilité** du galvanomètre ( $I_g$ ).
  - un voltmètre possède toujours le **même rapport  $\Omega/V$**  quelque soit le calibre utilisé.
- **$Q = (R + R_i) / U_T = \Omega / V$**
- **$Q = 1 / I_g$** 
  - *Les multimètres modernes (numériques) ont une résistance interne quasiment constante quelque soit le calibre utilisé.*
  - *Leur impédance d'entrée est très grande par rapport aux multimètres analogiques (à aiguille).*



## 3-6) Ohmmètre et wattmètre

- un **ohmmètre** est composé d'un ampèremètre avec lequel on mesure le courant traversant la résistance à mesurer ( $R_x$ ). Cet instrument nécessite donc une pile.  $R_c$  est la résistance de calibre. La résistance  $R$  est variable pour tarer l'ohmmètre à  $0 \Omega$  (déviatiion maxi).
- un **wattmètre** est composé d'un voltmètre qui indique la puissance sous une impédance donnée
- pour ces deux instruments de mesure, une échelle de lecture adaptée, non linéaire, est déterminée par les lois d'Ohm ou de Joule



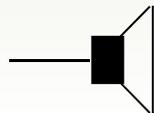
## 3-7) Microphone, haut-parleur et relais électromécanique

- **Le microphone** est constitué d'une membrane qui recueille les vibrations de l'air et les transforme en variation de grandeurs électriques.



- *microphone électret (impédance très élevée et nécessite une alimentation)*
- *microphone céramique utilisant l'effet électrostatique du condensateur*
- *microphone à charbon (ou microphone résistif, impédance  $\approx 1000 \Omega$ )*
- *microphone dynamique (le plus répandu en radio, impédance  $\approx 1000 \Omega$ )*
- *microphone à ruban (basse impédance, très sensible, bidirectionnel)*

- **Le haut-parleur** (HP) reproduit les vibrations d'air au rythme du courant délivré par l'amplificateur AF



- *le HP électrodynamique : sa membrane rigide et légère est mise en mouvement par le courant de la bobine plongée dans un champ magnétique. Son impédance est faible (environ  $10 \Omega$ , voire moins)*
- *le HP électrostatique (système directif et peu puissant, impédance élevée)*
- *le HP piézoélectrique utilisant les propriétés de certains polymères qui réagissent mécaniquement aux tensions (utilisé dans les oreillettes)*
- *le HP à ruban (utilisé dans les tweeters en Hi-Fi)*

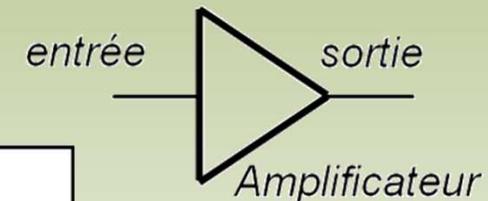
## 4-1) le décibel (dB)

- Le **décibel** (dB) est une unité permettant d'exprimer un **rapport entre deux unités de même nature**.

$P_s$  = puissance de sortie et  $P_e$  = puissance d'entrée

- Schéma d'un amplificateur :

- Triangle, entrée (base), sortie (pointe)

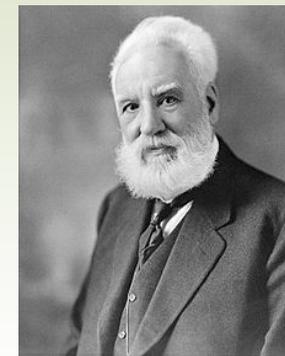


- table de conversion :**

### Table de conversion simplifiée :

|  |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|
| unités de dB :                         | 0 | 3 | 6 | 9 |
| Rapport arithmétique :                 | 1 | 2 | 4 | 8 |
| Dizaine de dB = nombre de 0 du rapport |   |   |   |   |

- rapport arithmétique  $\Rightarrow$  dB :
  - nombre de 0 du rapport = dizaine de dB
  - premier chiffre du rapport = unité de dB
- dB  $\Rightarrow$  rapport arithmétique :
  - dizaine de dB = nombre de 0 du rapport
  - unité de dB = premier chiffre du rapport
- Un **nombre négatif de dB** inverse le rapport arithmétique et indique une **atténuation** et non un gain



Alexander Graham Bell  
1847 - 1922  
Dépôt du premier brevet pour  
un téléphone (1876)

## 4-1) le décibel (dB)

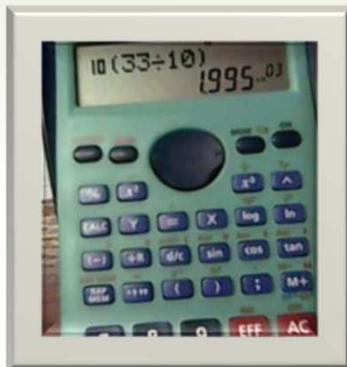
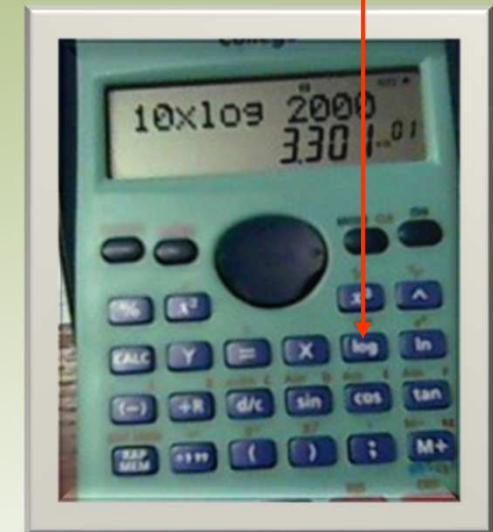
- Sur une calculette :
- Pour passer du rapport arithmétique au décibel :

- **Gain (dB) = 10 log (P<sub>s</sub> / P<sub>e</sub>)**
- en écriture naturelle :
  - 10 x [LOG] 2000 (*Rapport*)  
= 33,013 arrondi à 33

- Pour passer des dB au rapport :

- **P<sub>s</sub> = 10<sup>(dB / 10)</sup> x P<sub>e</sub>**
- en écriture naturelle :
  - 10 [<sup>^</sup>] (33 (dB) ÷ 10) = 1995,26 arrondi à 2000
  - **Attention**, ne pas utiliser la fonction « .10<sup>x</sup> » (ou E<sup>x</sup>), utilisée pour saisir des multiples, mais **utiliser la fonction « 10 puissance x »**, généralement proche, sur les calculettes, de la fonction « LOG »

Fonctions « log » et « 10<sup>x</sup> »  
de la FX92



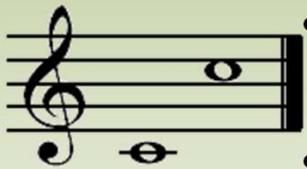
## 4-1) le décibel (dB)

- Lorsque les valeurs du rapport sont exprimées en **tension**, les formules deviennent :
  - **Gain (dB) = 20 log (U<sub>s</sub> / U<sub>e</sub>)**
  - **U<sub>s</sub> = 10<sup>(dB / 20)</sup> x U<sub>e</sub>**
  - le rapport des puissances est le carré du rapport des tensions (car P = U<sup>2</sup> / R). Le gain (en dB) est le double de celui calculé lorsque les valeurs sont exprimées en watts. **Exemples :**
    - Quel est le gain (en dB) de cet amplificateur ?  
= 6 dB (= 3 dB x 2 ; 3 dB correspond à un rapport de puissance de 2)
    - 10 μV sur une antenne de 12 dB, tension aux bornes de l'antenne ?  
12 dB correspond à un rapport de tension de 4 ; U<sub>s</sub> = 4 x 10 μV = **40 μV**
    - même calcul si les valeurs du rapport sont exprimées en **intensité** (puisque P = RI<sup>2</sup>)
    - Ceci n'est valable que si les impédances d'entrée et de sortie sont identiques. Si ce n'est pas le cas, le calcul se complique...



## 4-2) circuits RC

- Un **harmonique** est un multiple entier d'une fréquence
  - L'harmonique 3 est la fréquence de référence multipliée par 3
- A chaque **octave**, la fréquence est multipliée ou divisée par **2**
  - L'**octave supérieure** est l'harmonique 2 d'une fréquence.
  - La 2<sup>ème</sup> octave est l'harmonique 4
  - La 3<sup>ème</sup> octave est l'harmonique 8 (*et non pas l'harmonique 3 qui n'est pas une octave*).
  - L'**octave inférieure** (qui n'est pas un harmonique) est la fréquence de référence divisée par 2
- A chaque **décade**, la fréquence est multipliée ou divisée par **10**
  - La **décade supérieure** est l'harmonique 10 d'une fréquence.
  - La 2<sup>ème</sup> décade supérieure est la fréquence multiplié par 100
  - La **décade inférieure** est la fréquence divisée par 10
- **Exemples** : Soit  $F = 150 \text{ kHz}$ .

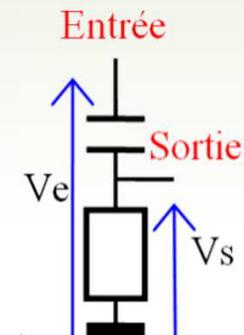
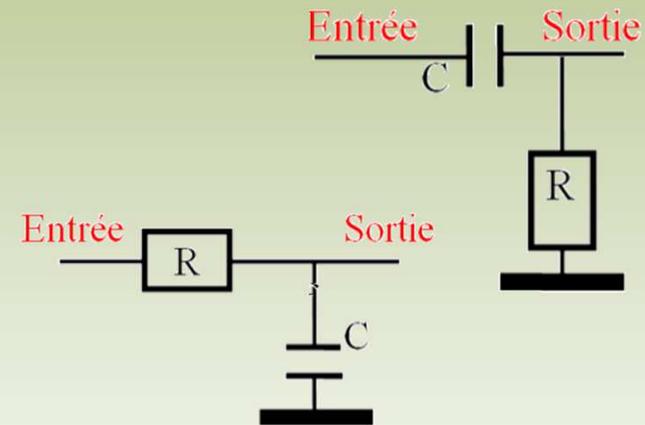


Quelle est la 5<sup>ème</sup> octave supérieure ?  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32 \times 150 = \mathbf{4800 \text{ kHz}}$

Quelle est la 3<sup>ème</sup> décade inférieure ?  $10 \times 10 \times 10 = 1000$  ;  $150 \text{ kHz} / 1000 = \mathbf{150 \text{ Hz}}$

## 4-2) circuits RC

- un **circuit RC** est un filtre composé d'une résistance et d'un condensateur. Selon la place des composants, ce filtre laissera passer :
  - les fréquences supérieures à la fréquence de coupure (filtre **passé-haut**),
  - les fréquences inférieures à la fréquence de coupure (filtre **passé-bas**).
- **mnémotechnique** : rôle du filtre = place du condensateur
- à la **fréquence de coupure**, la résistance est égale à l'impédance du condensateur, d'où :
  - $R(\Omega) = 1 / [2\pi \times F(\text{Hz}) \times C(\text{F})]$ , donc :
  - **$F(\text{Hz}) = 1 / [2\pi \times R(\Omega) \times C(\text{F})]$**



## 4-2) circuits RC

- L'atténuation de ces deux filtres est de :
  - **3 dB à la fréquence de coupure** (la puissance du signal à la sortie de ce filtre est divisée par 2)
  - **6 dB par octave à partir de la fréquence de coupure** (par octave supérieure pour un filtre passe bas et par octave inférieure pour un filtre passe haut).

- ou **20 dB par décade**

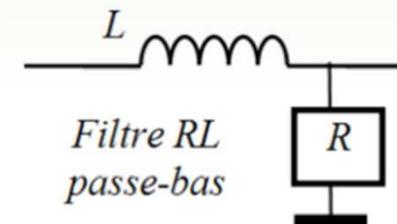
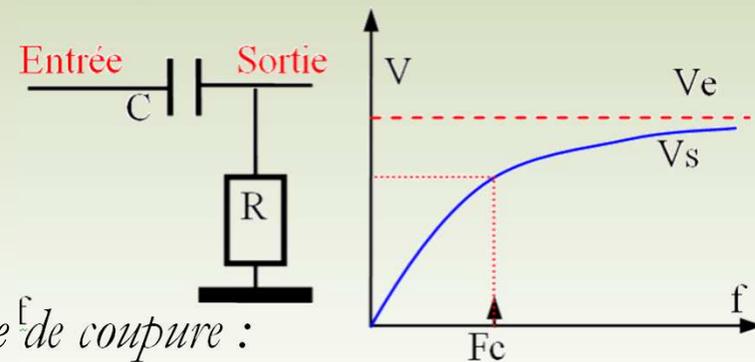
- courbe d'atténuation pour un filtre passe-haut :

- *Formule simplifiée de la fréquence de coupure :*

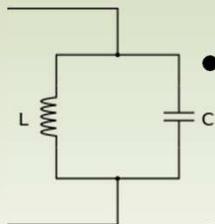
$$F(\text{Hz}) = 159 / R(\text{k}\Omega) / C(\mu\text{F})$$

- *Dans un filtre RL, la courbe de réponse est inversée et à la coupure, on a  $R = 2\pi FL$ , donc :*

$$F = R / (2\pi L)$$

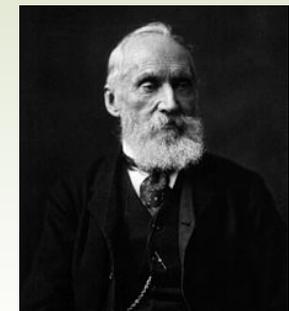


## 4-3) les circuits LC



Circuit LC  
parallèle

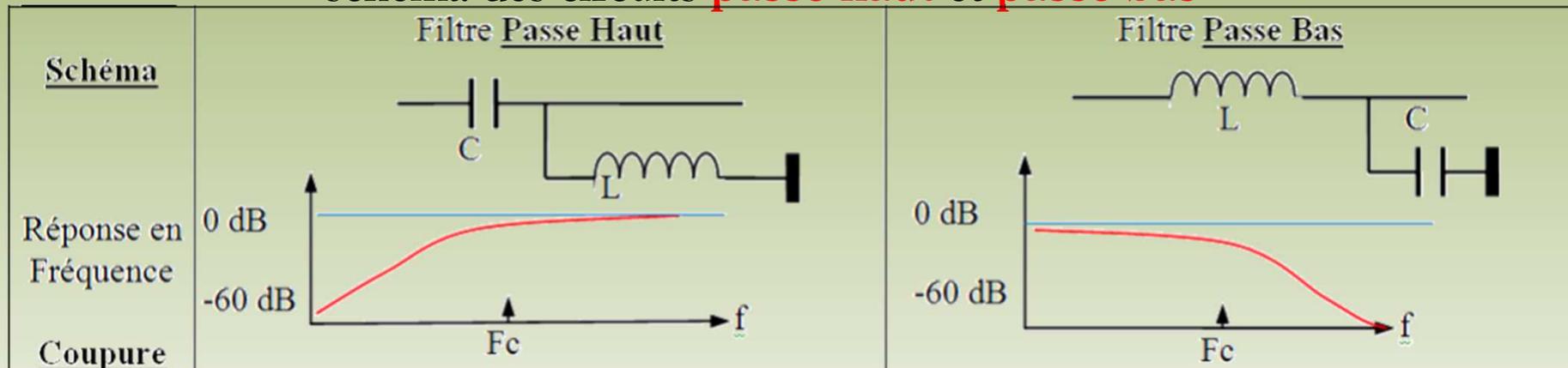
- Les circuits LC sont des filtres composés de **bobines** et de **condensateurs**.
- Ces filtres, s'ils sont montés comme les filtres RC (la bobine remplaçant la résistance), ont un effet de coupure.
- Seuls les circuits LC ont un effet de résonance à une fréquence lorsqu'ils sont montés en série ou 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 :  
 $Z_C = Z_L$  (loi de Thomson), d'où :
  - $1/(2\pi FC) = 2\pi FL$  ou, après transformation :
  - $F = 1 / [ 2\pi \sqrt{LC} ]$
  - ou  $F(\text{MHz}) = 159 / (\sqrt{L(\mu\text{H}) \cdot C(\text{pF})})$



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

## 4-3) les circuits LC

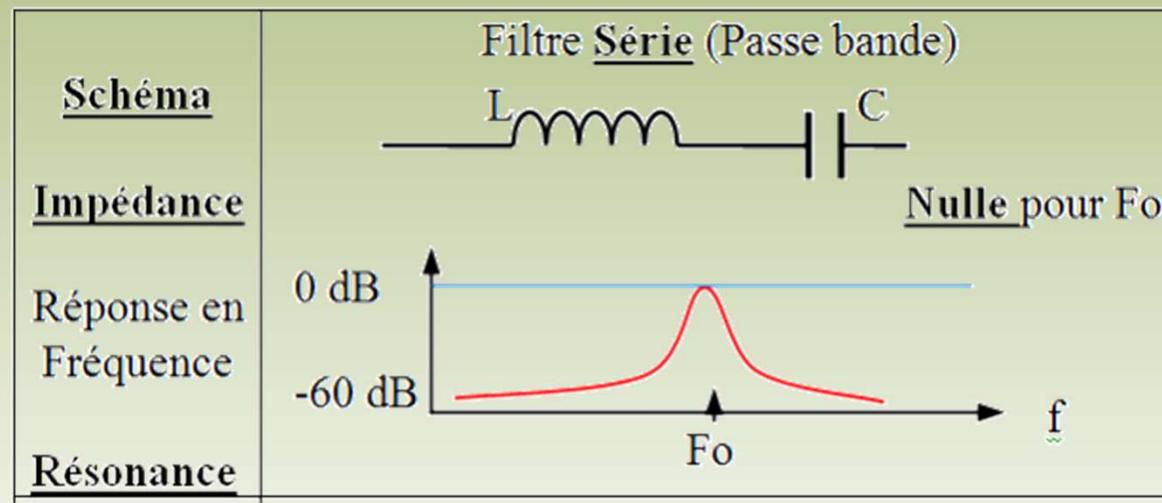
- Les 4 montages de base des circuits LC
  - schéma des circuits **passé haut** et **passé bas**



- 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 Fc*
  - *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

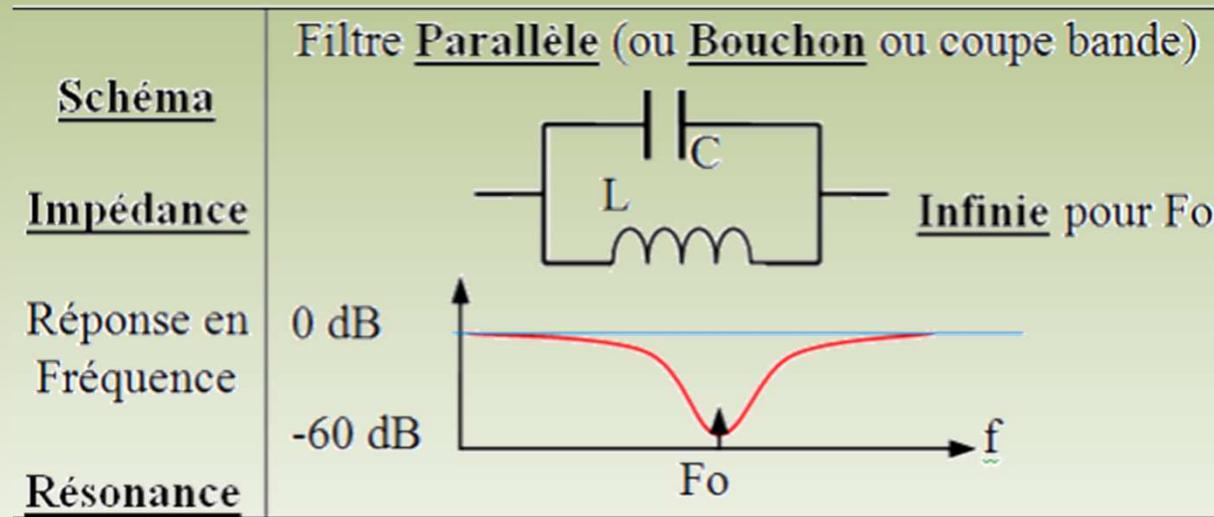
- Les 4 montages de base des circuits LC
  - le circuit Série (ou circuit passe bande)



- 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

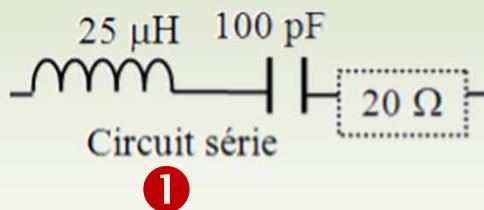
- Les 4 montages de base des circuits LC
  - le circuit Bouchon (ou circuit parallèle)



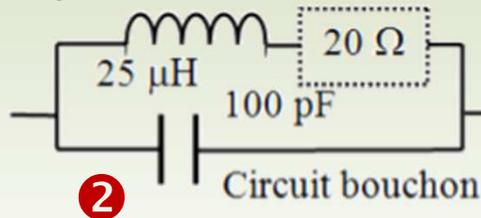
- Le filtre bouchon est un filtre utilisé pour **bloquer** les signaux HF d'une fréquence désirée.
- A la résonance, l'impédance très élevée (*en théorie, impédance infiniment grande*) du circuit empêche le courant HF de traverser ce filtre.

## 4-4) circuits bouchon et série RLC

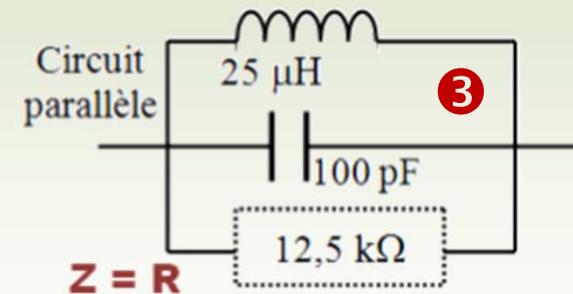
- Les circuits RLC sont des **circuits LC non parfaits** : le circuit est alors constitué d'un condensateur, d'une bobine et d'une **résistance parasite** :
  - la résistance peut être en série (*généralement avec la bobine représentant sa résistance à la HF, effet de peau*) comme dans le circuit **série** (1) ou le circuit **bouchon** (2).
  - dans le circuit (3), 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**.

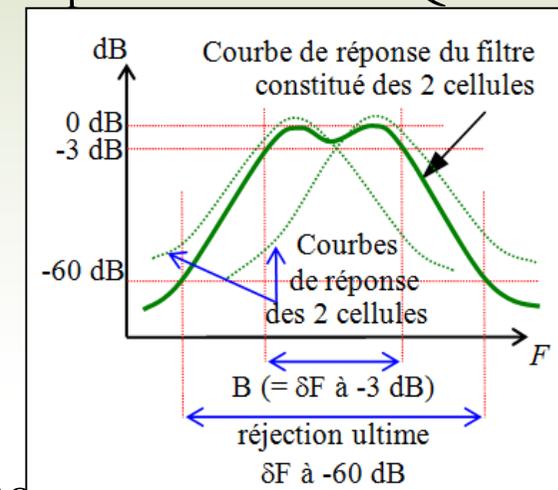
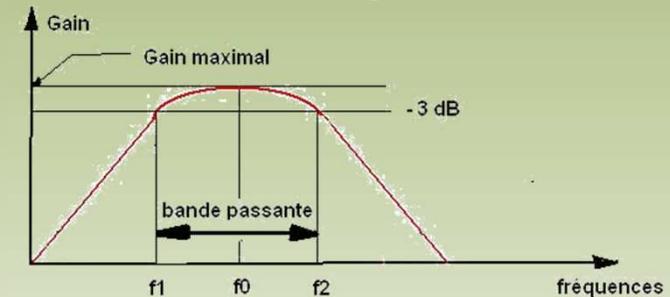
## 4-4) circuits bouchon et série RLC

- 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       | $\sqrt{L / C} / R$ | $\sqrt{L / C} / R$ | $R / [\sqrt{L / C}]$ |

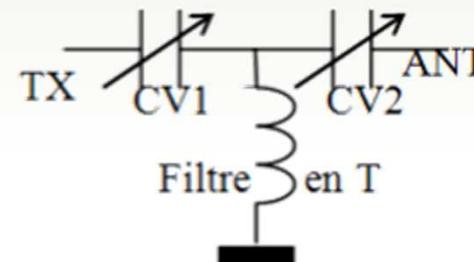
## 4-4) circuits bouchon et série RLC

- Le facteur  $Q$  d'un circuit RLC détermine sa **bande passante à -3 dB** (B) à la 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.
- Lorsqu'un filtre est constitué de **plusieurs cellules LC**, 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)
  - la **réjection ultime** (définie généralement à -60 dB)
- Le **taux de sélectivité** (en %) est 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

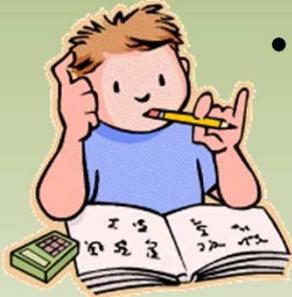


## 4-5) filtre en pi

- 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



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



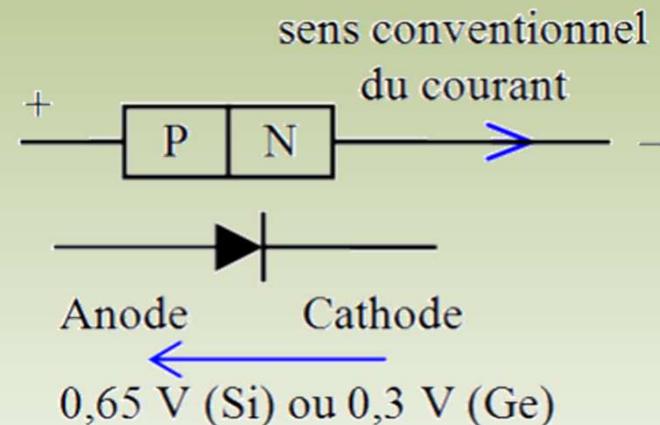
- Quelques questions de l'examen portent sur les **variantes** des formules vues dans ce chapitre. Voici les variantes les plus utilisées :
  - Pour une fréquence donnée à partir d'une des valeurs L ou C connues :
    - $C = 1 / 4\pi^2 F^2 L$  ou encore :  $L = 1 / 4\pi^2 F^2 C$
    - formules simplifiées :  $C(\text{pF}) = 25330 / F^2(\text{MHz}) / L(\mu\text{H})$   
 $L(\mu\text{H}) = 25330 / F^2(\text{MHz}) / C(\text{pF})$
  - 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 :  $Z_L (= Z_C) = \sqrt{L / C}$
  - La résistance d'un **circuit bouchon ou série** non parfait n'est pas facilement mesurable mais se calcule.
    - en connaissant L et C, on a R à la résonance du circuit bouchon ou série:  
 $R = \sqrt{L / C} / Q$
    - on peut aussi en déduire Z à la résonance du circuit bouchon :  
 $Z = \sqrt{L / C} \times Q$  (rappel : dans un circuit série,  $Z = R$ )

## 5-1) diodes

- Les diodes sont formées de deux **cristaux semi-conducteurs** en **Silicium** (Si) ou en **Germanium** (Ge) accolés et **dopés** par des **impuretés** de type **P** ou **N**.
- Le courant électrique circule uniquement dans le sens  **$P \Rightarrow N$** .

- La diode est passante si :

- l'anode est reliée au +
- et la cathode est reliée au -



- En sens inverse, la résistance de la diode est très importante
- La cathode de la diode est repérée au « K » du dessin et par une bague de couleur sur le composant.
- Le boîtier métallique des diodes de puissance (*qui peut être vissé sur un radiateur*) est relié à la cathode

## 5-2) courbes et caractéristiques de fonctionnement des diodes

- Pour mieux comprendre les différentes applications des diodes, il faut analyser la **courbe d'intensité** ( $I_d$ ) **en fonction de la tension** appliquée à leurs bornes ( $U_d$ ). On

remarque **3 zones** :

- zone **redressement**

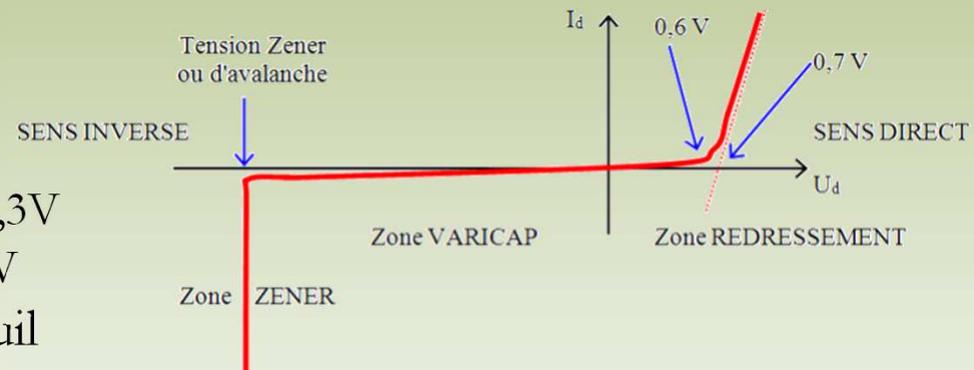
- tension de seuil
  - Germanium = 0,3V
  - Silicium = 0,65 V
- pente au delà du seuil

- zone **Varicap**

- sens inverse
- la barrière de potentiel sert de diélectrique
- *plus la tension inverse est importante, plus la capacité est faible*

- zone **Zener**

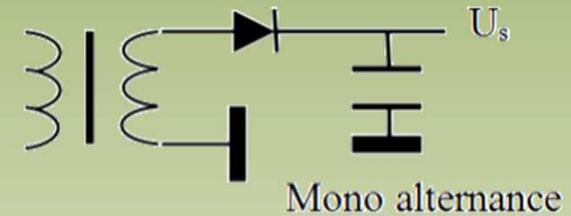
- tension Zener (*ou tension de claquage, d'avalanche ou disruptive*)
- avalanche, *effet réversible dans le cas des diodes Zener ou destruction pour les autres diodes.*



## 5-3) montages des diodes

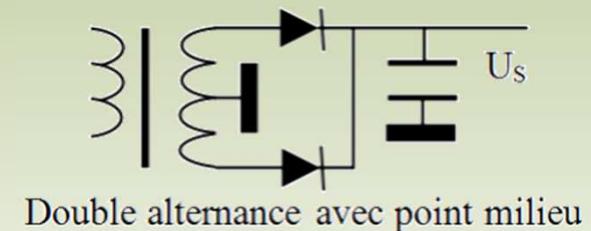
- **Redressement mono-alternance**

- une diode
- une seule alternance redressée
- la seconde alternance est bloquée



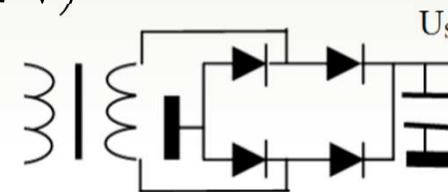
- **Redressement double alternance**

- le condensateur de filtrage a une valeur plus faible
- chaque alternance passe par une diode, la seconde diode bloque le passage du courant



- **Redressement double alternance avec pont de diode**

- chute de tension de 2 diodes (environ 2 V)
- les diodes sont toutes dirigées vers le condensateur de filtrage
- pendant une alternance, les diodes des coins opposés fonctionnent en même temps



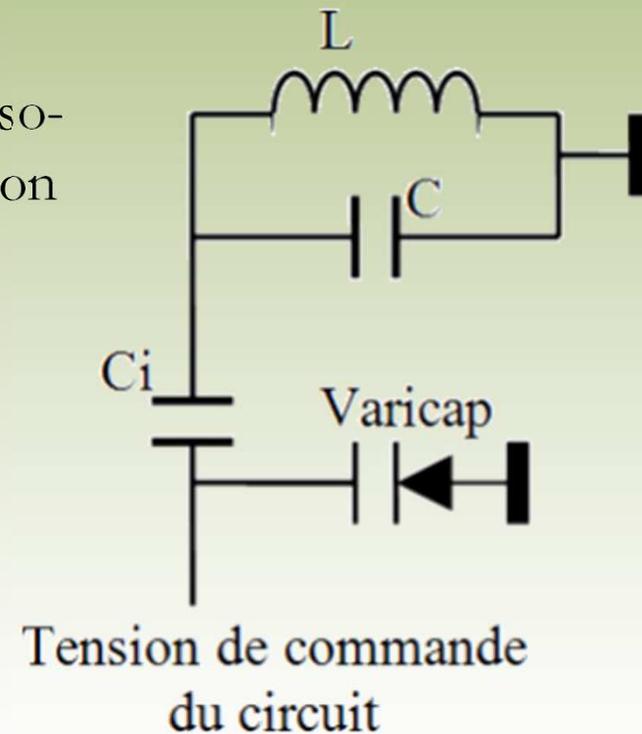
## 5-3) montages des diodes

- **Circuit bouchon commandé par une Varicap** : la diode Varicap se reconnaît à son double trait (condensateur)
  - diode montée en sens inverse
  - utilisation d'un condensateur d'isolement ( $C_i$ ) pour séparer la tension de commande de la Varicap



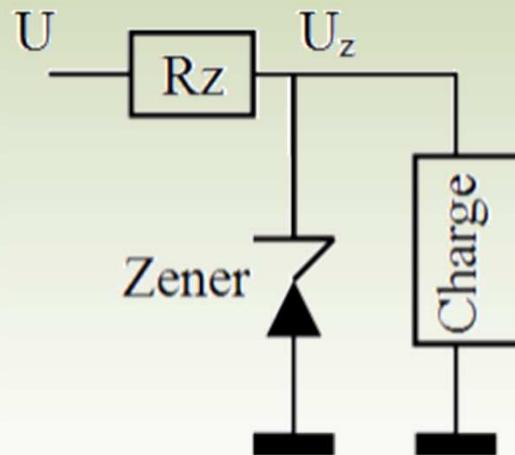
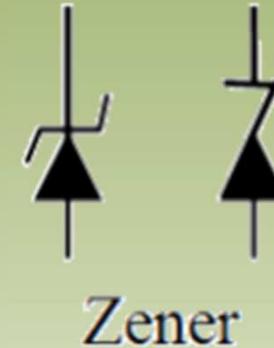
Diode BB109D

- *astuce : une diode Zener (plus courante) possède aussi un effet « Varicap »*
- *pour augmenter la fréquence, il faut diminuer la valeur du condensateur et donc augmenter la tension de commande du circuit.*



## 5-3) montages des diodes

- Stabilisation par diode Zener
  - se reconnaît par son Z
  - est montée en sens inverse
  - la résistance  $R_z$  limite le courant d'avalanche dans la diode Zener



Clarence Zener  
1905 – 1993  
Théorie de la tension de  
claquage d'un milieu  
diélectrique (1934)

## 5-3) montages des diodes

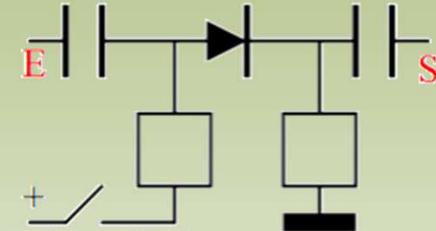
- *Les autres diodes et leurs fonctions :*

- les **LED** (diodes émettrices de lumière)



- la couleur émise et la tension de seuil dépendent du semi-conducteur utilisé

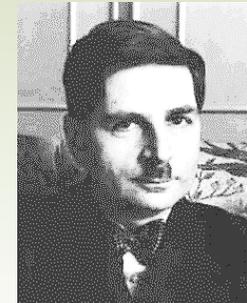
- utilisation d'une diode jonction en commutation (en remplacement d'un relais)



Diode utilisée en commutateur

- les diodes **PIN** (Positif, Isolant, Négatif) sont adaptées pour fonctionner dans les commutateurs HF à la place des diodes jonction classiques.

- les diodes **Schottky** : fabriquées à partir d'une liaison entre un semi-conducteur et un métal (comme un détecteur à galène). Leur commutation est très rapide, la tension de seuil est faible (0,25 V) mais la tension inverse est limitée et le courant inverse est plus élevé

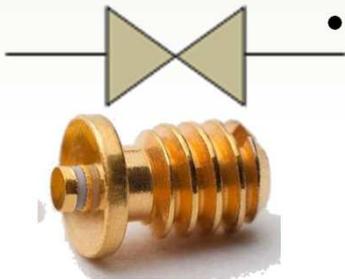


Walter Schottky  
1886 – 1976

Bases de la physique des semi-conducteurs (1927)

- les diodes **Gunn** : utilisation en hyperfréquences (dans les cavités résonantes)

- l'instabilité en fréquence des cavités résonantes à diode Gunn ainsi que son bruit de phase élevé en sont les causes principales.



## 5-4) alimentation

- Les diodes au silicium font chuter la tension d'un peu plus de 0,7 volt à chaque passage (jusqu'à 1 volt), soit près de 2 volts en tout pour un redressement par pont de diodes.



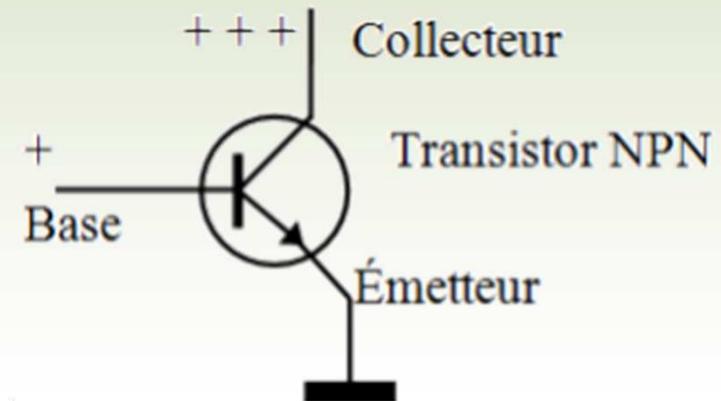
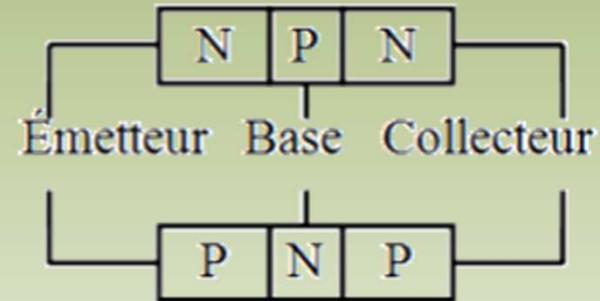
- dans les questions d'examen, **la chute de tension des diodes est souvent négligée**, attention au piège
- le condensateur de filtrage maintient la valeur de la tension de sortie à sa valeur de crête.

| Éléments         | Redressement par un Pont                      | Chute de tension des diodes                                | Lissage du condensateur   |
|------------------|---|--|---|
| Forme du courant |   |  |   |
| Calcul           | Alternance 2 redressée<br>$U_s$ ne change pas | Passage dans 2 diodes<br>Chute de $2 \times 0,7 \text{ V}$ | Filtrage<br>$U_s = (U \times 1,414) - (2 \times 0,7 \text{ V})$ |

- Voir aussi le montage de la soirée (redressement mono-alternance)*

## 6-1) transistors

- Un **transistor** (bipolaire ou jonction) est composé
  - d'un **émetteur**
    - repéré par la flèche
  - d'une **base**
    - trait vertical
  - d'un **collecteur**
    - sans repère (masse des boîtiers métalliques)
- Deux types : **NPN** ou **PNP**
  - différencié par la flèche
    - PNP : Pénètre
      - émetteur relié au +
    - NPN : Ne Pénètre pas
      - émetteur relié au -
      - les NPN sont les plus courants.
  - la flèche indique le sens du courant dans le transistor.



## 6-2) gain des transistors

- Le **courant collecteur est fonction du courant de base** :

- gain en courant =  $\beta$
- $I_c = I_b \cdot \beta$

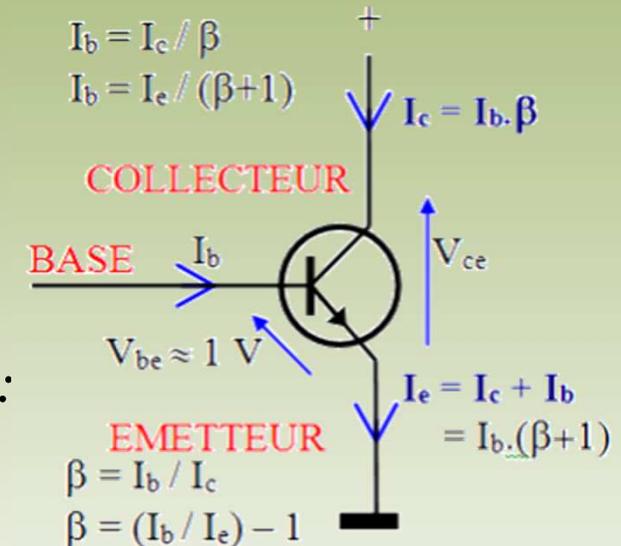
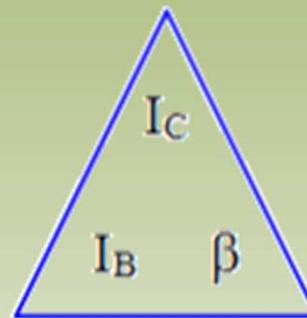
- D'autre part :

- $I_e = I_c + I_b$

- le gain est un coefficient  
(n'est pas donné en dB) d'où son autre nom :



$h_{FE}$  avec  $h$  = fonction de transfert ;  $F$  = Forward  
current amplification ;  $E$  = common Emitter

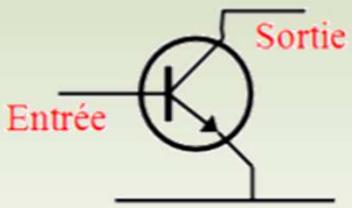
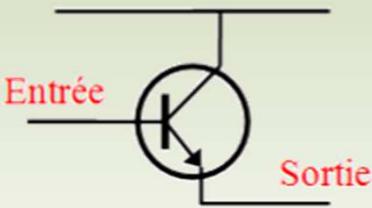
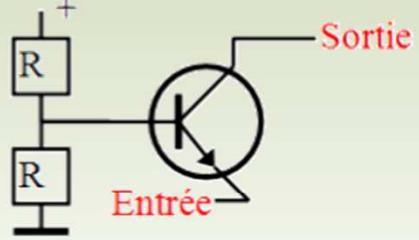


- Le gain est toujours donné par le constructeur pour du **courant continu** et pour une **température de 20°C**.

- le gain augmente avec la température, d'où les problèmes liés à **l'emballement thermique**.
- le gain diminue lorsque la **fréquence** à amplifier augmente.
  - la **fréquence de coupure** est la fréquence pour laquelle le gain n'est plus que de 70% du gain initial en courant continu (à 20°C), ce qui correspond à une perte en puissance de 3 dB (arrondi)

## 6-3) montages des transistors

- Trois montages fondamentaux existent et ont des caractéristiques spécifiques qu'il faut connaître :
  - montages (*sur la broche « commune », il n'y a ni entrée ni sortie*) :
    - Émetteur commun (le plus courant)
    - Collecteur commun
    - Base commune (peu utilisé)

| Montage                             | Émetteur commun  | Collecteur commun  | Base commune   |
|-------------------------------------|--|--|--|
| Schémas                             |  |  |  |
| <u>Caractéristiques :</u>           |  |  |  |
| <u>Gain</u> en intensité en tension | $I_c = I_b \cdot \beta$ , Gain = $\beta$<br>Moyen                                  | $I_e = I_b \cdot (\beta + 1)$ , Gain = $\beta + 1$<br>Pas de gain (<1)               | $I_c \approx I_e$ , Gain = $\beta / (\beta + 1) < 1$<br>Élevé                        |
| <u>Z Entrée / Sortie</u>            | Moyenne / Élevée   | Élevée / Basse   | Basse / Très élevée  |
| <u>Déphasage</u>                    | 180° (signal inversé)  | Pas de déphasage   | Pas de déphasage   |

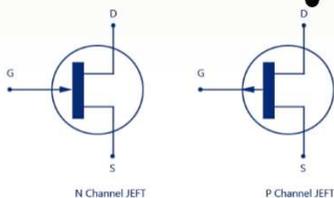
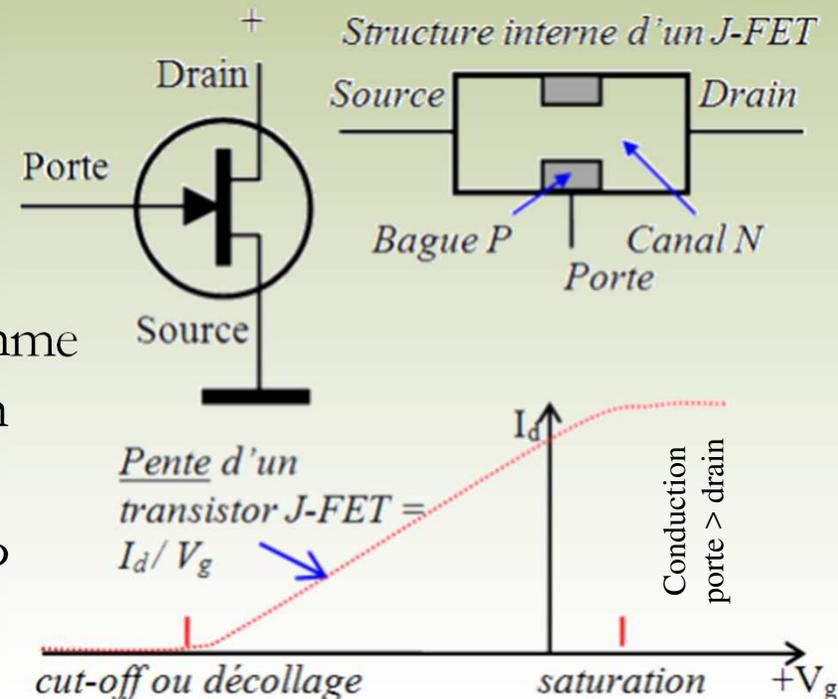
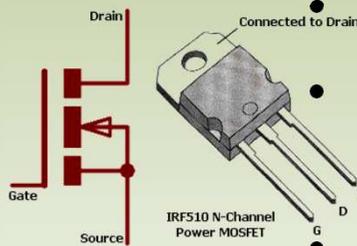
ordre de grandeur : Z basse < 30  $\Omega$  < Z moyenne < 300  $\Omega$  < Z élevée < 3000  $\Omega$  < Z très élevée



## 6-4) transistors FET

- Les transistors FET (Field Effect Transistor en anglais ou TEC, transistor à effet de champ) s'apparentent plus aux tubes thermoïoniques qu'aux transistors jonction.

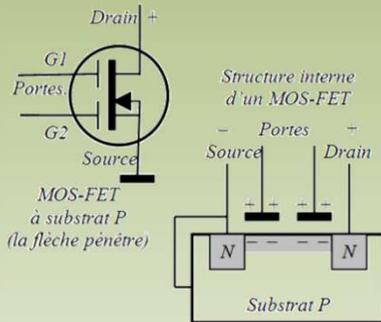
- l'entrée s'appelle la source,
- la sortie s'appelle le drain,
- la commande se nomme la porte (gate en anglais)
- on ne parle pas de gain comme pour les transistors jonction mais de pente ( $= I_d / V_g$ )
- deux types : canal N ou canal P
- ce transistor est nommé aussi « FET à jonction » ou JFET pour le distinguer du MOS-FET.



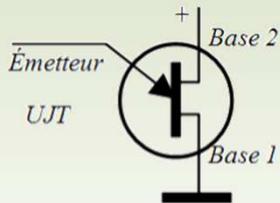
## 6-4) transistors FET

*D'autres transistors existent mais ne sont pas au programme :*

- les **MOS-FET** (ou **FET à porte isolée**) possèdent souvent deux portes : G1 est la porte de commande où le signal d'entrée est appliqué, la tension de G2 définit la pente du montage. A la différence des FET à jonction, la tension de commande des portes est positive par rapport à la source.



- le **transistor unijonction (UJT)**, appelé aussi diode à deux bases, est composé d'un émetteur sur lequel est appliqué le signal d'entrée et de deux bases.

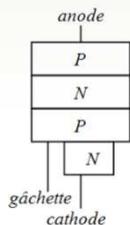
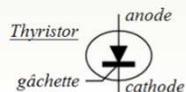


- peu utilisé dans les applications radioamateurs, il est remplacé de nos jours par un thyristor.

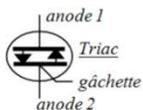


- quelques questions recensées sur le nom des électrodes (**émetteur et 2 bases**)

- le **thyristor** est composé d'une anode, d'une cathode et d'une gâchette et est utilisé en courant continu (interrupteur).



- un **triac** est composé de deux thyristors montés tête-bêche.



## 6-5) diodes thermoïoniques

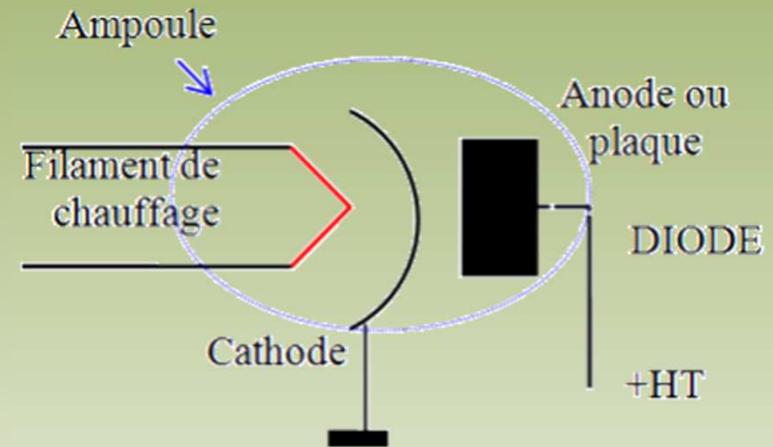
- **Les diodes thermoïoniques**



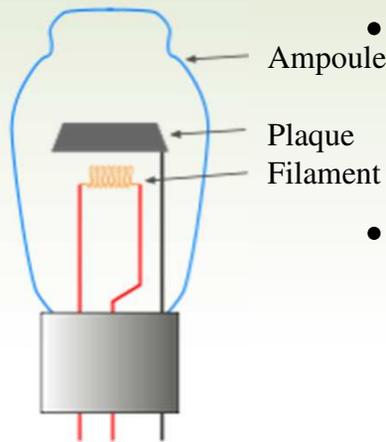
John Fleming  
1849 - 1945

Brevet du « kenotron »,  
tube redresseur à deux  
électrodes (1904)

(appelées aussi **valves**) ont  
été les premiers tubes  
thermoïoniques mis au point  
au début du 20<sup>ème</sup> siècle.



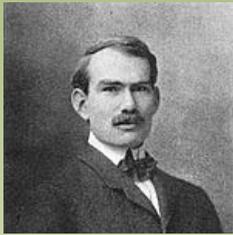
- Dans une ampoule en verre ou en céramique, dans laquelle on a fait le vide, se trouve deux électrodes :



Diode à chauffage direct

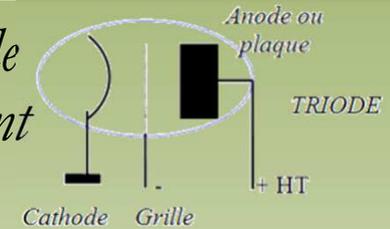
- la **cathode** constituée d'un fil chauffé par un **filament**
  - la température élevée de la cathode génère une émission d'électrons.
- les électrons sont récupérés sur l'**anode**, ou **plaque**, lorsque sa tension est positive par rapport à la cathode.
  - le courant plaque sera d'autant plus fort que la tension plaque sera élevée

## 6-6) autres tubes thermoïoniques

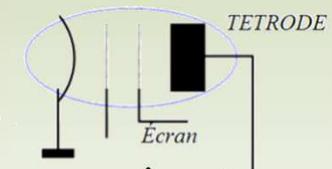


Lee de Forest  
1873 - 1961  
Invention de  
l'Audion (triode)  
(1907)

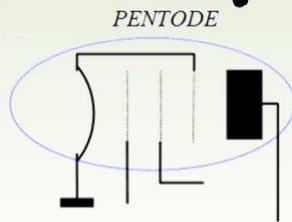
• **Triode** : l'intensité plaque varie en insérant entre anode et cathode une grille de commande, alimentée négativement par rapport à la cathode. Plus la tension grille ( $V_g$ ) est négative, plus le courant plaque ( $I_p$ ) est faible car les électrons refusent de passer à travers la grille et sont repoussés par celle-ci.



• **Tétrode** : en augmentant la fréquence du courant amplifié par le tube, des effets capacitifs entre grille et plaque nuisent au bon fonctionnement du circuit (auto-oscillation). Pour éviter ce phénomène, une électrode est insérée entre grille et plaque : l'écran.



• **Pentode** : une troisième grille est ajoutée, la suppresseuse, qui est reliée à la cathode. Sans cette grille, le choc des électrons sur la plaque les fait rebondir et retournent sur l'écran.

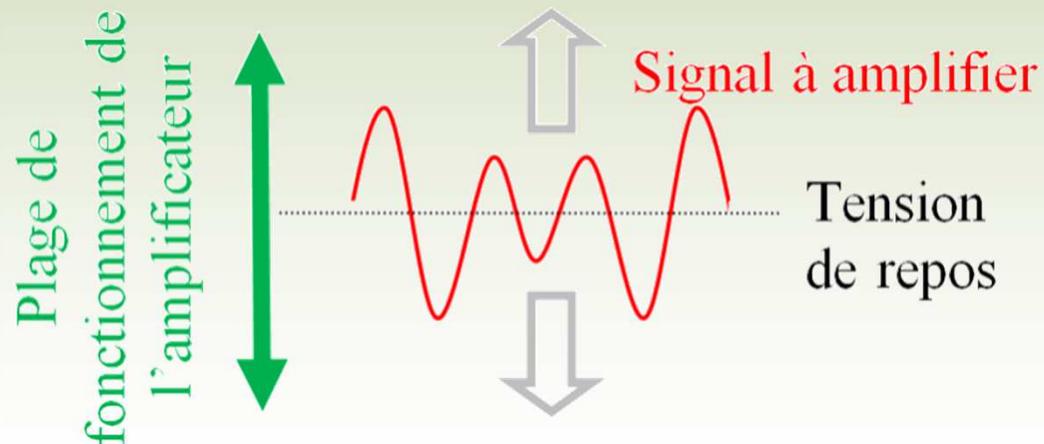


- il existe d'autres tubes avec des fonctions spécifiques et/ou des électrodes supplémentaires.
- certaines ampoules accueillent plusieurs tubes ayant des fonctions différentes (pentode-triode, double diode, ...)

## 7-1) classes d'amplification



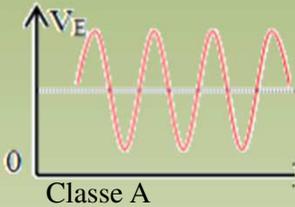
- **Ne pas confondre** montage du transistor (*électrode sur laquelle le signal n'est ni appliqué ni recueilli, voir chapitre 6*) et classe d'amplification (*tension de repos de l'amplificateur, voir ci-après*).
  - on peut « mixer » les montages avec les classes d'amplification
  - le montage d'amplificateur le plus courant est l'émetteur commun dont le signal d'entrée est alimenté en classe A
- La **tension de repos** est la tension en l'absence de signal à l'entrée du circuit.



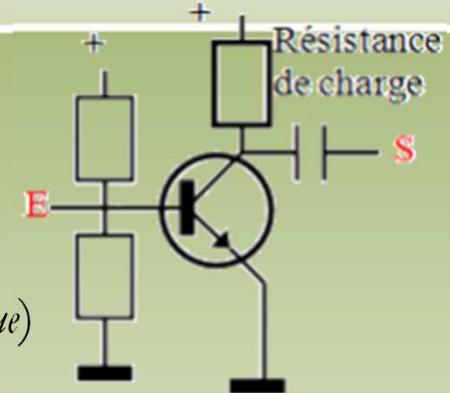
- Le niveau de cette tension par rapport à la plage de fonctionnement de l'amplificateur définit la **classe d'amplification**.

## 7-1) classes d'amplification

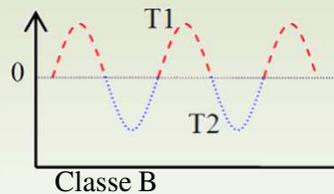
### • Classe A :



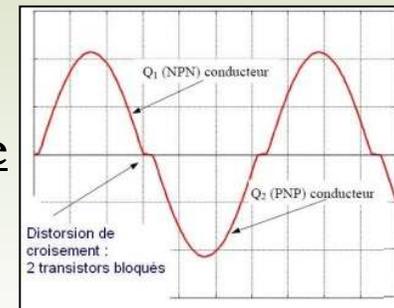
- la tension de repos **au milieu** de la plage de fonctionnement
- montage linéaire et très courant
- rendement faible (*50% maxi théorique, 30% en pratique*)
- *le déphasage du signal de 180° est dû au montage en émetteur commun (et non pas à la classe d'amplification)*



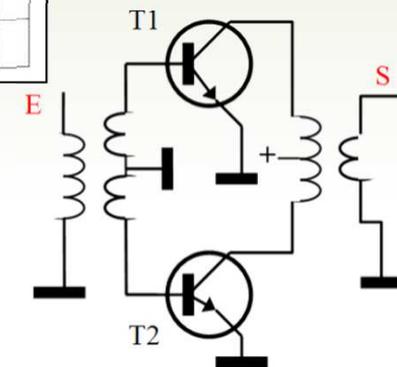
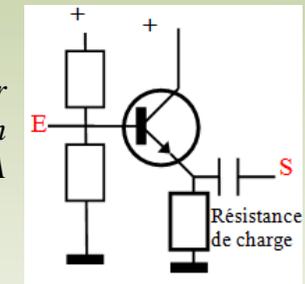
### • Classe B



- utilise 2 transistors qui amplifient chacun une alternance du signal.
- la tension de repos est **à la limite** de la plage de fonctionnement
- encombrant et difficile à régler
- harmoniques impaires (3F, 5F)
- rendement moyen (*78,6% en théorie, 50% en pratique*)
- nécessite des transistors appairés et/ou complémentaires (PNP/NPN)



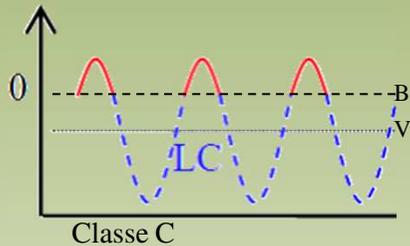
Montage en collecteur commun, amplification en classe A



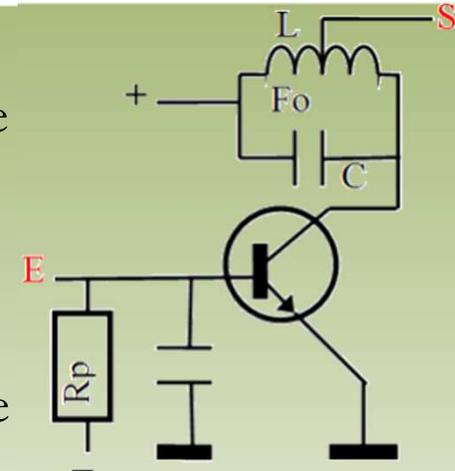
Voir pages **CNFRA** (Radio-REF nov. 2012)

## 7-1) classes d'amplification

### • Classe C



- la tension de repos est **en dessous** de la plage de fonctionnement
- montage peu courant (CW, FM)
- fort rendement (80% et +)
- génère un fort niveau d'harmoniques
- seule une partie du signal est amplifiée le reste du signal est restitué par le circuit oscillant
- *pas de courant de repos (le transistor reste bloqué jusqu'à la tension B)*



### • Classe D (impulsion à largeur variable - PWM)

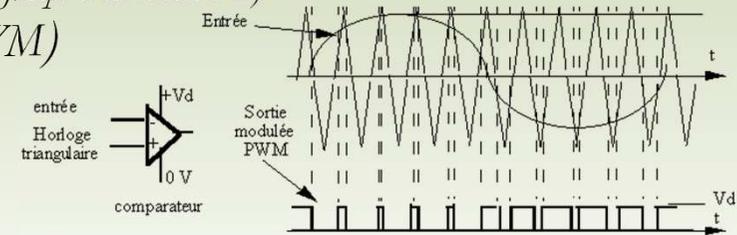
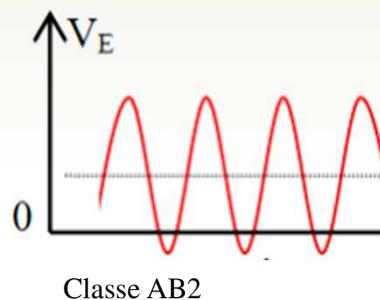
- *utilisée essentiellement en BF*
- *montage avec un ampli op (comparateur)*

### • Les autres classes se basent sur les principes

des 4 classes de base (A, B, C et D). Par exemple, on trouve les classes AB :

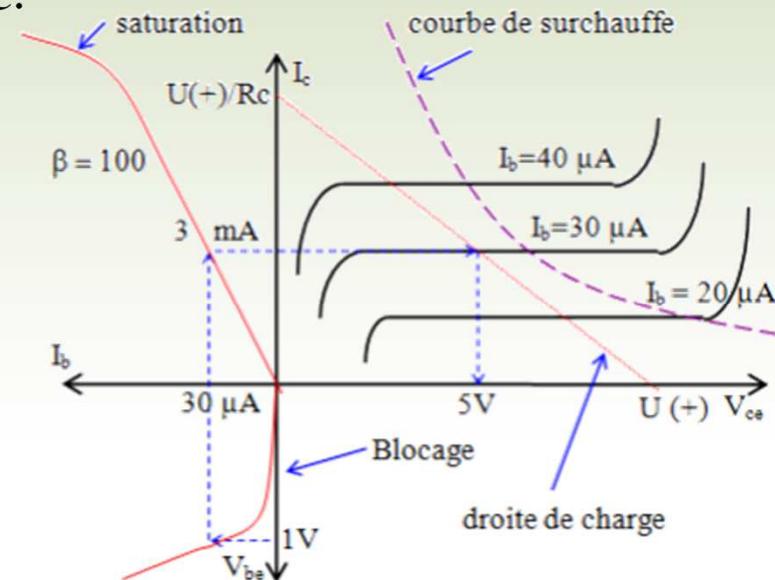
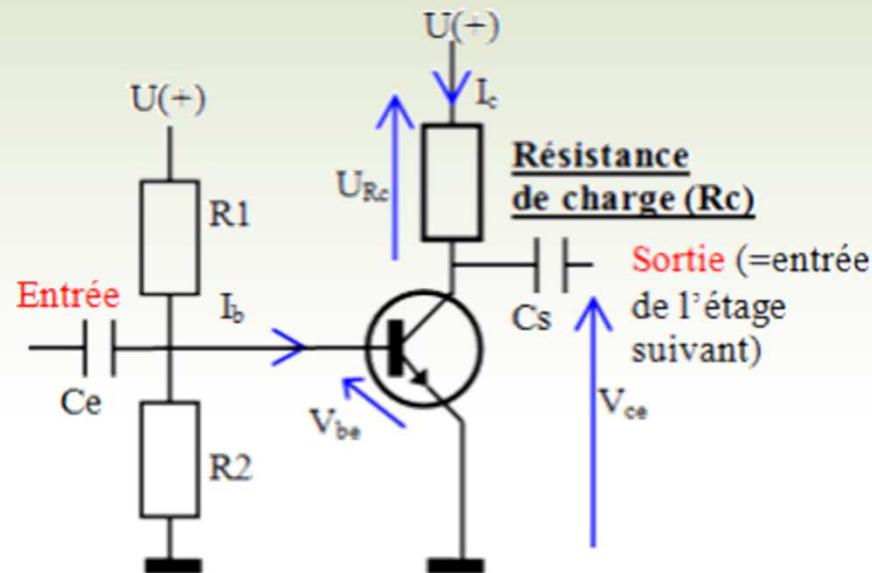
- la tension de repos est inférieure à celle de la classe A, ce qui augmente le rendement de l'amplificateur sans trop détériorer sa linéarité

- **AB1** : pas d'absorption du courant de l'étage précédent amplificateur à haute impédance, utilisé en HF suivi d'un filtre
- **AB2** : absorption d'une partie du courant de l'étage précédent, utilisé en HF comme les montages en classe C (CW, FM). Le signal à amplifier n'est pas intégralement compris dans la plage d'amplification (écrêtage du bas du signal)



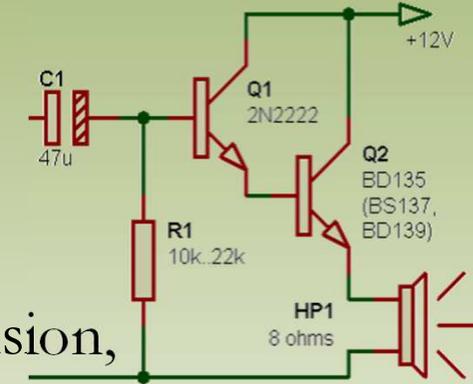
## 7-2) résistance de charge

- La **résistance de charge** est le dispositif normalement utilisé pour récupérer les variations de tension aux bornes de sortie du transistor. Cette résistance est responsable d'un déphasage de  $180^\circ$  du montage en émetteur commun.
- Les paramètres de fonctionnement du transistor et du montage sont regroupés dans un graphique qui détermine la tension de sortie issue de la **droite de charge** en fonction de la tension d'entrée.



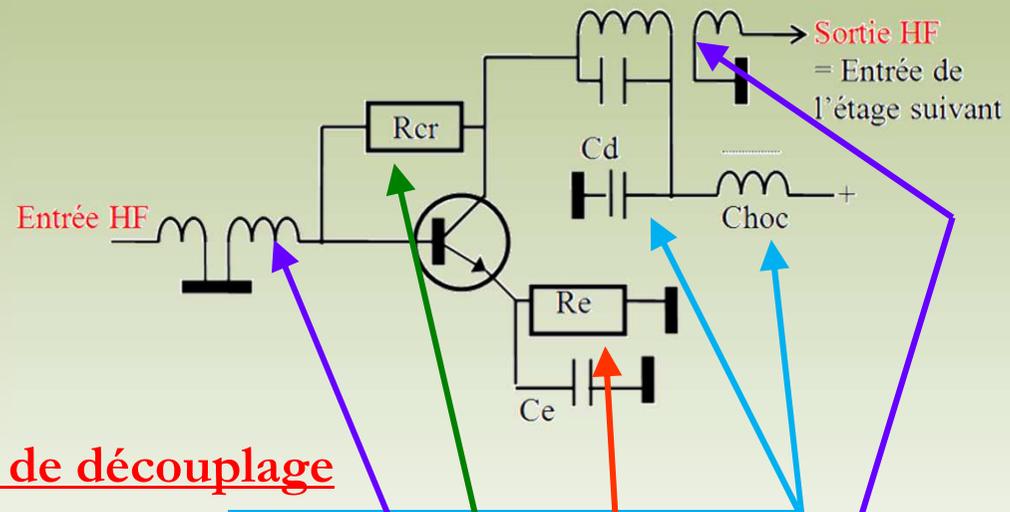
## 7-3) liaisons entre les étages

- Les différents étages d'un montage peuvent être liés de différentes manières
  - En **direct**, le collecteur est relié à la base du transistor de l'étage suivant
  - Mais ce montage reste peu utilisé
- Pour éviter des problèmes de niveau de tension,
  - **en courant continu**
    - une ou plusieurs **diodes** sont rajoutées **en série**
  - **en courant alternatif**
    - un **condensateur** en série séparera les étages
    - afin d'adapter des impédances, la liaison par **transformateur** est utilisée
- Un étage spécifique qui prend le nom de **séparateur** (ou **tampon**) sert à adapter les niveaux de puissances ou de tensions et/ou les impédances entre deux étages.



## 7-4) amplificateur RF (radio fréquences)

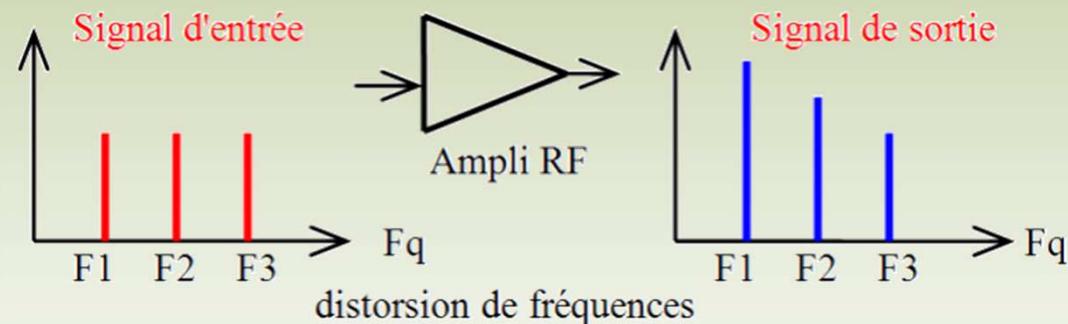
- L'amplificateur RF amplifie de la HF. Il est constitué de **filtres HF** (circuit bouchon) et de **circuits spécifiques** :



- sur l'alimentation
  - **condensateur de découplage**
  - **bobine de choc**
    - *mauvaise traduction de choke coil (littéralement bobine d'étouffement)*
- liaison par transformateur (**adaptation** des impédances)
- résistance de **contre-réaction**
- protection contre l'**emballement thermique**

## 7-4) amplificateur RF (radio fréquences)

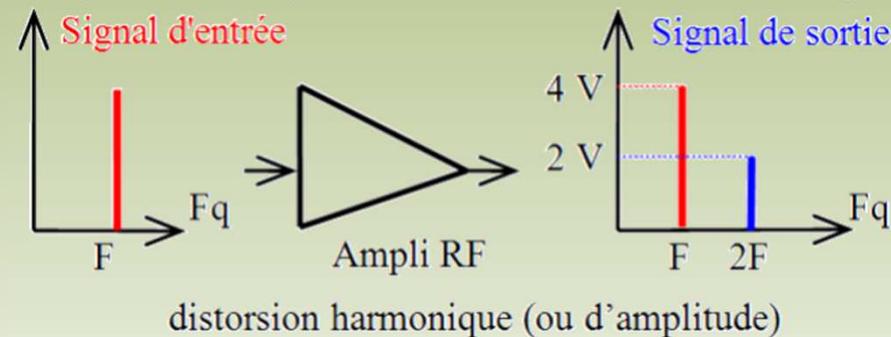
- Malgré les précautions prises, il arrive souvent qu'un amplificateur RF ne soit pas linéaire. Dans ce cas des **distorsions** se produisent : le signal de sortie n'est plus identique (proportionnel) à celui d'entrée.
- **Distorsion de fréquences**



- dans notre exemple, les fréquences élevées sont moins amplifiées que les fréquences basses.
- mais l'inverse peut se produire
- ou encore le cas où une bande de fréquence est plus (ou moins) amplifiée que les autres
- *ce type de distorsion ne génère pas trop de problèmes sauf si les fréquences sont proches*
  - *cette distorsion survient notamment quand il y a un circuit accordé (filtres LC, RC ou RL)*

## 7-4) amplificateur RF (radio fréquences)

- **Distorsion harmonique** (ou d'amplitude)
  - s'il n'existe qu'une fréquence en entrée, plusieurs **signaux harmoniques** (en général 2F et 3F) seront présents en sortie



- Le **taux de distorsion harmonique** (TDH, en %) est le rapport obtenu en divisant
  - la tension du signal parasite (*harmonique n*)
  - par la tension du signal désiré (*fréquence F*)  **$TDH (\%) = U_{nF} (V) / U_F (V)$** 
    - On doit donc définir la tension parasite (2F ou 3F par exemple)
    - *Lorsque l'on parle de taux de distorsion harmonique total, on prend en compte l'ensemble des signaux parasites. On n'additionne pas leur tension mais on retient pour les signaux parasites :  $U = \sqrt{(2F^2 + 3F^2 + \dots)}$ , c'est-à-dire la somme des puissances exprimées en Volts.*

## 7-4) amplificateur RF (radio fréquences)

- **Distorsion quadratique** (ou distorsion d'intermodulation)
  - l'amplificateur non linéaire se comporte en partie comme un mélangeur (*voir § 7-7, séance de la semaine prochaine*) générant des **produits du second ordre** (ou produits quadratiques).
  - si on applique deux fréquences  $F1$  et  $F2$  à l'entrée d'un étage non linéaire, on trouvera en sortie :
    - **$F1$**  et  **$F2$**  (c'est normal pour un amplificateur),
    - **$2 \times F1$**  et  **$2 \times F2$**  (comme l'amplificateur à distorsion d'amplitude)
    - et les mélanges « classiques »  **$F1 + F2$**  et  **$F1 - F2$**  (ou  $F2 - F1$ ).
- **Distorsion cubique**
  - un circuit amplificateur génère des distorsions cubiques (ou **distorsions du 3ème ordre**) lorsque, en plus des fréquences  $F1$  et  $F2$ , on trouve en sortie des mélanges qui font intervenir trois fois les fréquences présentes à l'entrée :
    - **$3F1$**  et  **$3F2$** ,
    - **$2F1+F2$**  et  **$2F2+F1$**  } *Élimination grâce à un filtre passe bas en sortie*
    - **$2F1-F2$**  et  **$2F2-F1$**  } *ces deux derniers mélanges sont difficiles à éliminer*

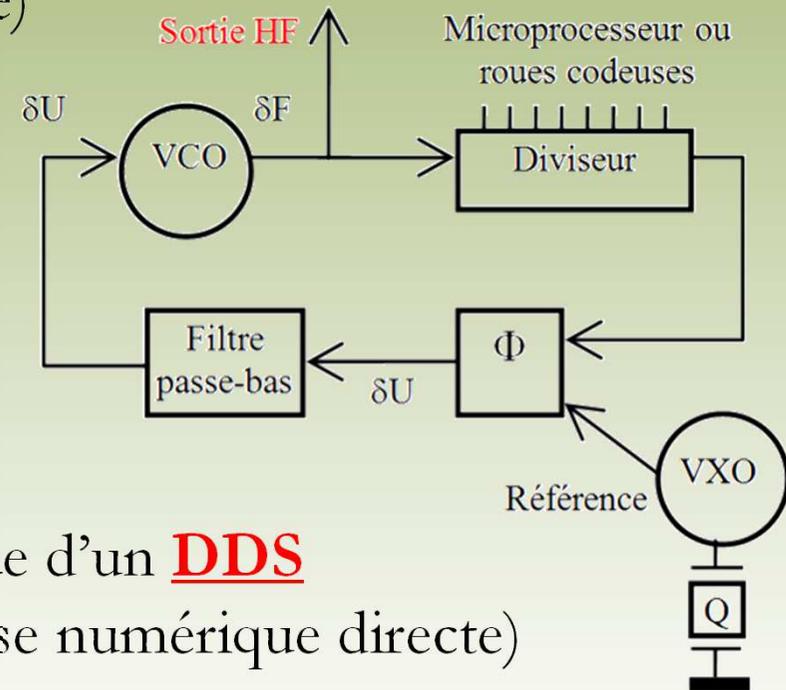
## 7-5) oscillateurs

- Un oscillateur est un circuit **générateur de signaux périodiques** (*sinusoïdaux dans le monde de la radio*) de fréquence calculée. Il existe des oscillateurs
  - à fréquence fixe (à quartz) (**VXO**)
  - à fréquence variable commandés
    - mécaniquement avec un condensateur variable (**VFO**),
    - par la variation de tension sur une diode Varicap (**VCO**)
    - électroniquement
      - avec un synthétiseur (**PLL**)
      - et plus récemment par traitement numérique (**DDS**)
  - Le **fréquencemètre** mesure la fréquence d'un signal en comptant les périodes pendant une durée de référence connue et stable.
    - plus cette durée est longue, plus l'affichage de la fréquence mesurée est fin.
    - la précision de l'instrument dépend de l'oscillateur générant la durée de référence.

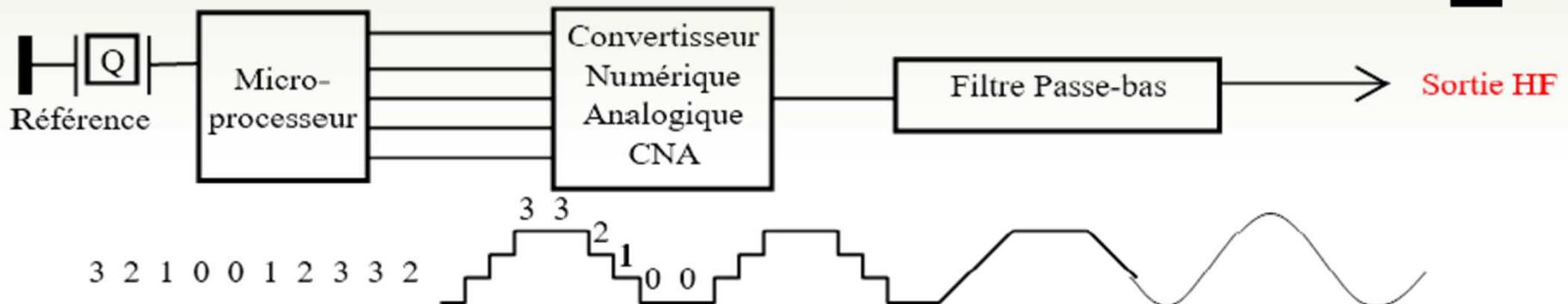


## 7-5) oscillateurs

- Analyse du schéma synoptique d'un **PLL** (*Phase Lock Loop*, boucle à verrouillage de phase)



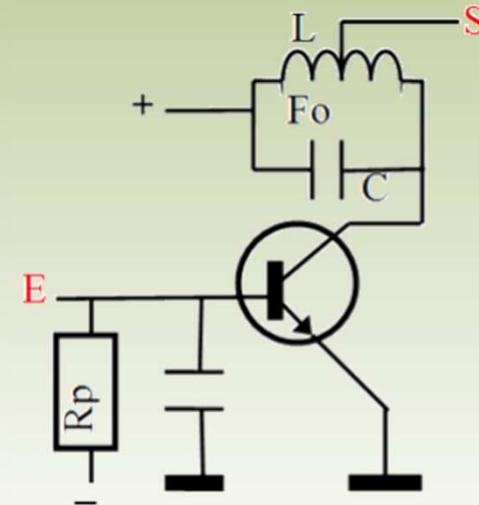
- Analyse du schéma synoptique d'un **DDS** (*Direct Digital Synthesis*, synthèse numérique directe)



## 7-6) multiplicateurs de fréquences

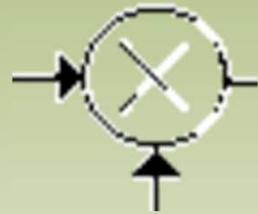
- Un **multiplicateur de fréquence** est un circuit amplificateur RF monté en classe C (générateur de très fortes distorsions harmoniques) dont le filtre de sortie est accordé sur un des harmoniques de la fréquence d'entrée :

- x 2
- x 3
- ou x 5 maximum
  - nombre entier
  - si la fréquence doit être multipliée par 9, deux multiplicateurs par 3 seront montés à la suite l'un de l'autre.



- *le spectre d'un signal passant par un multiplicateur est modifié :*
  - *en FM, l'excursion du signal est augmentée mais le signal reste « démodulable »*
  - *en AM ou en BLU, seules les crêtes du signal sont amplifiées (montage en classe C) ce qui rend le signal transmis inexploitable.*

## 7-7) mélangeurs



- Un **mélangeur** est un circuit **multiplicateur de tension**:
  - l'amplificateur n'est pas linéaire et la distorsion particulière du circuit (**distorsion quadratique**) nous permettra de récupérer en sortie un **mélange de fréquences**.
  - le filtre de sortie sélectionne une des deux fréquences.
  - soient F1 et F2 deux fréquences présentes aux entrées du mélangeur.
    - à la sortie du mélangeur, deux fréquences sont générées :
      - **$F_{max} = F1 + F2$  (somme)**
      - **$F_{min} = F1 - F2$  (différence)**
  - *Pour trouver les fréquences d'entrée (F1 et F2) à partir des fréquences de sortie :*
    - **$F_1 = (F_{max} - F_{min}) / 2$**  (moitié de la différence)
    - **$F_2 = F_{max} - F_1$**  (puisque  $F_{max} = F1 + F2$ )

## 7-7) mélangeurs

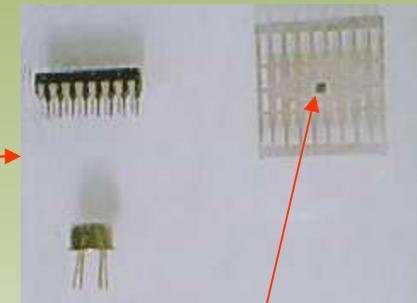
- **Lorsque le mélangeur n'est pas parfait** (ou lorsqu'un amplificateur n'est pas linéaire), il ne multiplie pas exactement les tensions présentes à son entrée et on trouvera à sa sortie :
  - les mélanges « classiques »  $F1 + F2$  et  $F1 - F2$  (mélanges du 2<sup>nd</sup> ordre) mais, comme pour les distorsions harmoniques d'un amplificateur linéaire, (voir le cours précédent) nous trouverons aussi :
    - les fréquences  $F1$  et  $F2$  et leurs harmoniques
      - s'il n'y a que les harmoniques 2 ( $2 \times F1$  et  $2 \times F2$ ) ou paires, ce sont des distorsions quadratiques (qui sont une forme de distorsion harmonique)
    - ainsi que d'autres combinaisons comme par exemple :
      - $[(2 \times F1) + F2]$  ou  $[(2 \times F1) - F2]$  (mélanges du 3<sup>ème</sup> ordre ou distorsions cubiques, une autre forme de distorsion harmonique).
- Les **mélangeurs équilibrés** ont des caractéristiques particulières
  - ils sont constitués de diodes montées « en anneau »
  - ils seront étudiés en détail au chapitre 12 (modulateur BLU)

# 8-1) caractéristiques des amplificateurs opérationnels

- **Présentation** d'un amplificateur opérationnel

- circuits intégrés :

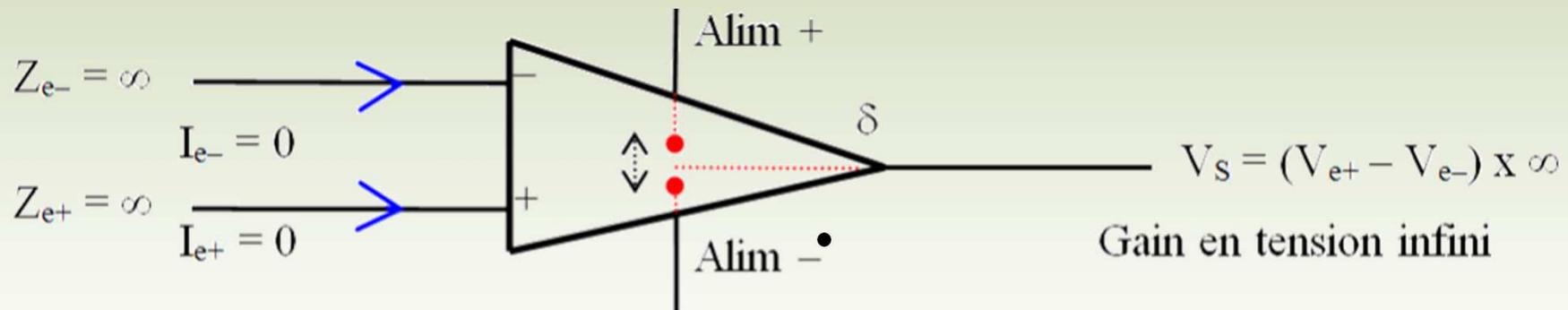
- étapes de fabrication
- détrompage, numérotation des pattes



Puce

- L'amplificateur opérationnel possède

- **deux entrées** : une normale (+) et une inverseuse (-)
- **une sortie** différentielle ( $\delta$ ).

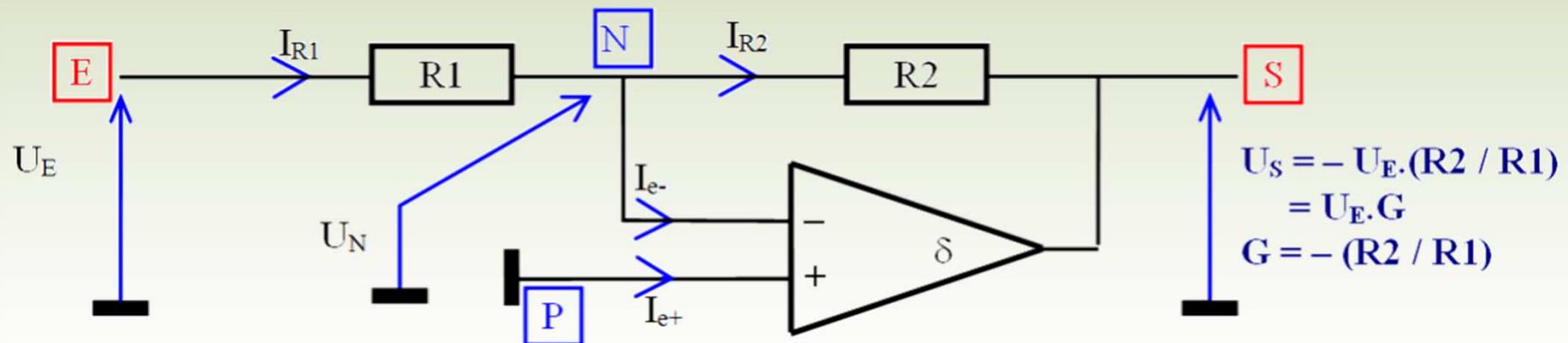


- Les amplificateurs opérationnels ont :

- une **impédance d'entrée infinie** (plus de 1 M $\Omega$ )
- un **gain en tension** (noté G) **infini** (*gain = rapport, comme pour les transistors*)
- une **impédance de sortie faible** (sortie connectée au + ou au -)

## 8-2) montage fondamental des amplificateurs opérationnels

- Le montage fondamental est un amplificateur inverseur de tension
  - le signal d'entrée (**E**) est appliqué à l'entrée inverseuse via R1
  - le montage fait appel à une contre-réaction grâce à R2
  - le système cherche l'équilibre pour avoir  $U_N = U_P$
  - le gain en tension à la sortie (**S**) est  $G = - (R2 / R1)$



## 8-3) autres montages des amplificateurs opérationnels

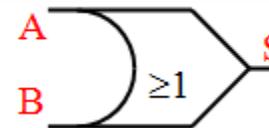
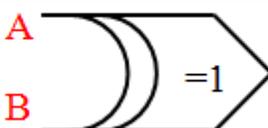


- Seul le montage inverseur est au programme de l'examen de classe 2. Toutefois quelques questions portant sur le gain du montage non inverseur ont été recensées et il existe de nombreux autres montages :

| Non inverseur  | Soustracteur  | Intégrateur   | Filtre RC   | Ampli classe D   |
|--|---|---|---|--|
| <p><math>G = (R2 / R1) + 1</math><br/><math>U_S = U_E \cdot G</math></p> | <p><math>G = -1</math> (si R constant)<br/><math>U_S = (U_{E+}) - (U_{E-})</math></p> | <p><math>t(s) = R(\Omega) \cdot C(F)</math><br/>Au bout de <math>5t</math>, le condensateur C est chargé : <math>U_S \approx U_E</math></p> | <p>Filtre de bande 2 cellules (12 dB/oct.)<br/><math>F(Hz) = 1/[2\pi R(\Omega) \cdot C(F)]</math></p> | <p>Amplificateur PWM (sortie en impulsions à largeur variable)<br/>si <math>V_E &lt; V_H</math>, alors <math>V_S</math>, sinon 0</p> |

## 8-4) circuits logiques

- A ce jour, aucune question recensée à l'examen mais les « circuits logiques simples » sont au programme.
  - les circuits logiques sont des **opérateurs binaires** : ils ne connaissent que deux positions : **0 ou 1**.
    - Les **niveaux logiques** sont à 1 pour une tension proche de 5 V et à 0 pour 0 V (logique TTL).
  - les portes peuvent avoir 2 ou plusieurs entrées mais une seule sortie.

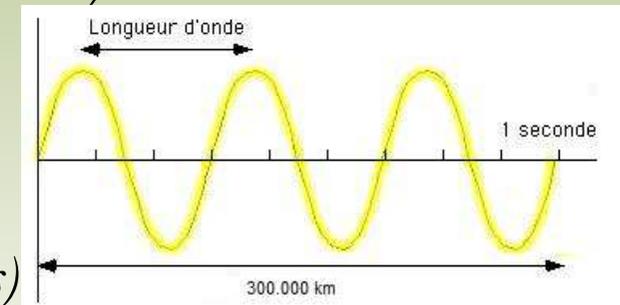
| Circuit logique | ET (AND ou &)   | OU (OR ou $\geq 1$ )   | NON ET (Nand)   | OU Ex (EXOR ou =1)  |        |        |
|-----------------|---|--|---|---|--------|--------|
| Schéma          |  |  |  |  |        |        |
| Calcul de Boole | $S = A \cdot B$   | $S = A + B$  | $S = \overline{A \cdot B} (= \overline{A} + \overline{B})$                            | $S = A \oplus B (= \overline{A} \cdot B + A \cdot \overline{B})$                      |        |        |
| Table de vérité | A   | B  | Sortie  | Sortie  | Sortie | Sortie |
|                 | 1   | 1  | 1   | 1   | 0      | 0      |
|                 | 1   | 0  | 0   | 1   | 1      | 1      |
|                 | 0   | 1  | 0   | 1   | 1      | 1      |
|                 | 0   | 0  | 0   | 0   | 1      | 0      |

## 9-1) relation longueur d'onde/fréquence

- La **longueur d'onde** est fonction de la **vélocité** (*vitesse de déplacement*) de l'onde dans son **milieu de propagation**,
  - la longueur d'onde est notée  $\lambda$
  - la longueur d'onde est égale à la distance (*en mètres*) entre deux points identiques d'une onde (*période*) dans son milieu de propagation
- **v** est la **vélocité** de l'onde (*en m/s*)
- **F** est la **fréquence** (*en Hz*)
- **t** est le temps que dure la période (*en s*)



Christian Doppler  
1803 - 1853  
Complément de son étude  
« sur la lumière colorée  
des étoiles doubles et  
d'autres étoiles du ciel »  
où il tient compte des  
vitesses relatives de la  
source de lumière et de  
l'observateur (1846)

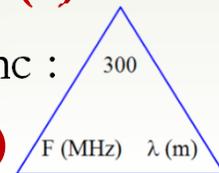


On a déjà vu que :  $F(\text{Hz}) = 1 / t(\text{s})$  ou  $t(\text{s}) = 1 / F(\text{Hz})$

$$\lambda(\text{m}) = v(\text{m/s}) / F(\text{Hz}) \quad \text{et} \quad \lambda(\text{m}) = v(\text{m/s}) \times t(\text{s})$$

La **vitesse de propagation** des ondes est de **300 000 km/s**, donc :

$$\lambda(\text{m}) = 300 / F(\text{MHz}) \quad \text{et} \quad F(\text{MHz}) = 300 / \lambda(\text{m})$$



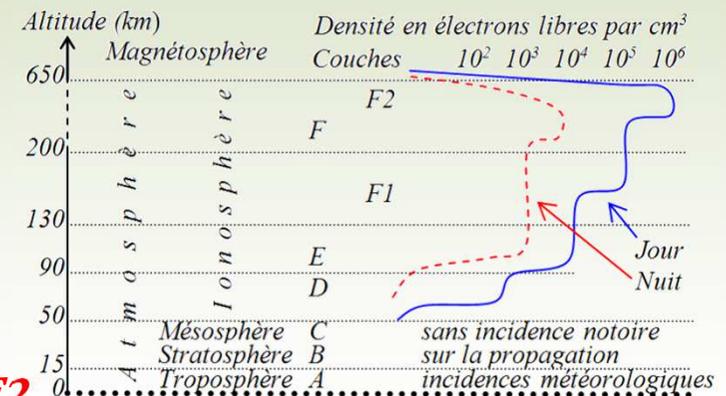
- **Effet Doppler** : la fréquence augmente quand les stations se rapprochent (la vitesse apparente diminue)

## 9-2) propagation

- Les ondes radioélectriques peuvent se propager de différentes façons selon leur fréquence :
  - en **ondes directes** : les antennes sont en vue l'une et l'autre
    - *ce mode de propagation fonctionne sur toutes les fréquences*
  - en **ondes de sol** : les ondes suivent le relief terrestre
    - *elles se propagent entre le sol et la couche D, comme dans un guide d'onde.*
  - en **ondes réfléchies** :
    - les ondes se réfléchissent sur les hautes couches de l'atmosphère, fortement ionisées par le rayonnement solaire,
      - ionosphère, réfraction et réflexion sur les couches E et F
      - absorption par la couche D
    - les ondes réfléchies sont renvoyées sur la Terre,
    - d'où elles peuvent être renvoyées vers l'espace.
    - un bond ne peut pas dépasser 4.000 km du fait de la courbure de la terre et de l'altitude de réflexion.
- *Les calculs de **prévision de propagation** des ondes réfléchies en décimétrique tiennent compte de l'**activité solaire** et sont donnés pour une date et une heure (éclairage de la Terre par le Soleil).*

## 9-3) propagation en ondes réfléchies

- La **ionosphère** est la zone la plus élevée de l'**atmosphère** terrestre. Sous l'influence du rayonnement UV du soleil (lié à l'activité solaire, flux solaire, tâches solaires), les gaz ionisés et les électrons libres (plasma) sont très abondants et influent sur les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques.
- La densité du plasma augmente avec l'altitude par paliers successifs, d'où la division de la ionosphère en 3 régions (ou **couches**) :
  - **D** (50 à 90 km) : peu ionisée, elle **atténue** les ondes qui la traversent
  - **E** (90 à 130 km) : **faiblement ionisée** sauf lors des « E sporadiques »
  - **F** (130 à 650 km) : **fortement ionisée**. Dans la journée, la ionisation augmente et la couche F **se scinde en 2 couches : F1 et F2**
- A l'approche de la **magnétosphère**, la densité du plasma diminue. L'activité magnétique terrestre influe sur la propagation.



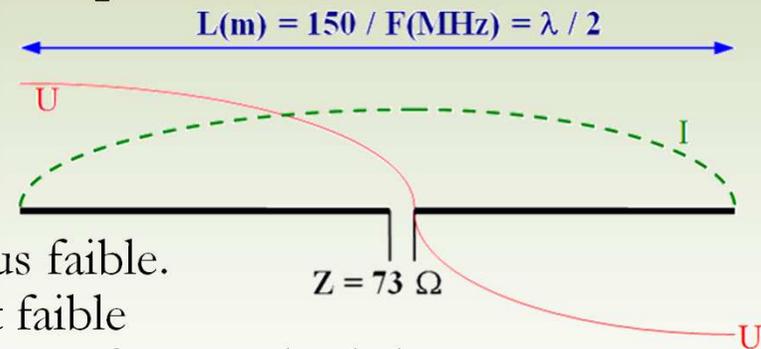
## 9-4) antenne doublet demi-onde alimenté au centre (dipôle)



- Une **antenne** est un dispositif assurant la **liaison** entre :
  - le milieu de propagation où les ondes sont des champs électromagnétiques
  - et une structure dans laquelle les ondes circulent sous forme de courant électrique (*en règle générale, le câble coaxial*)
- L'antenne de base est l'antenne **doublet demi-onde alimentée au centre** (appelée aussi **dipôle**).
  - Elle est constituée de **deux brins quart d'onde**
  - A chaque extrémité du dipôle,
    - l'intensité est nulle
    - la tension est maximum.
  - Au centre du dipôle,
    - I est maximum et U est au plus faible.
    - l'impédance (rapport U/I) est faible
    - et varie en fonction de l'angle que forment les brins :
      - **73 Ω** s'ils sont alignés (angle de 180°)
      - 52 Ω s'ils forment un angle de 120°
      - 36 Ω s'ils forment un angle droit (90°)
      - ces valeurs sont données en espace libre (loin de tout obstacle) mais peuvent varier selon l'environnement proche.



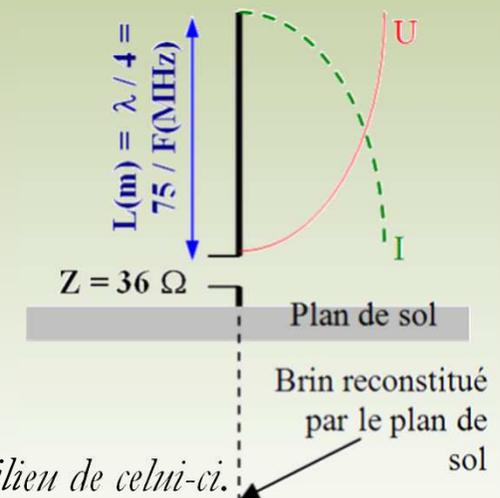
Alexandre Popov  
1859 - 1906  
Pour améliorer la  
sensibilité du récepteur  
de Lodge, Popov y  
raccorde le fil d'un  
paratonnerre - 1896



## 9-5) antenne quart d'onde (ground plane)



- L'**antenne verticale** (ou antenne GP) nécessite :
  - une **masse** (un piquet de terre ou la carrosserie d'un véhicule) afin de reconstituer électriquement le deuxième brin de l'antenne.
  - ou un **plan de sol** (**radiants** disposés à la base de l'antenne).
    - la longueur des radiants est souvent de  $\lambda/4$ ,
    - il faut moins 3 radiants pour reconstituer efficacement la terre.
    - l'angle que forment les radiants par rapport au brin rayonnant détermine l'impédance de l'antenne.
    - un brin rayonnant plus court que le quart d'onde peut être utilisé, l'antenne sera allongée grâce à :
      - un bobinage positionné à la base du brin ou au milieu de celui-ci.
      - ou un conducteur fixé au sommet (capacité terminale).
      - le quart d'onde raccourci aura une impédance plus faible à sa résonance
    - les antennes 5/8 et 7/8  $\lambda$  ont des lobes aplatis (dirigés vers l'horizon)
      - le nom de ces antennes donne leur longueur (elles sont plus longues que  $\lambda/4$ )
      - elles nécessitent un système d'adaptation spécifique (balun)



**Peu de questions recensées à l'épreuve de Technique (antenne GP et antenne 5/8)**

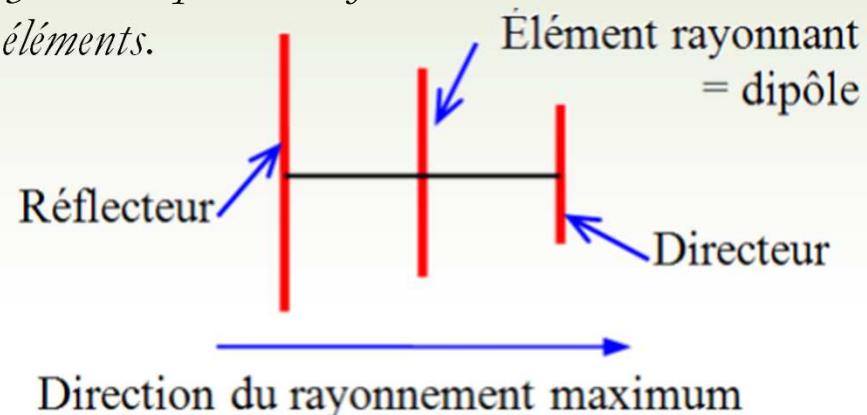
## 9-6) antenne Yagi

**Pas de  
questions  
recensées  
à  
l'épreuve  
de  
Technique**



Hidetsugu Yagi  
1886 - 1976  
Rédige plusieurs  
articles en anglais  
présentant les principes  
de l'antenne mise au  
point par Shintarō Uda  
(1926)

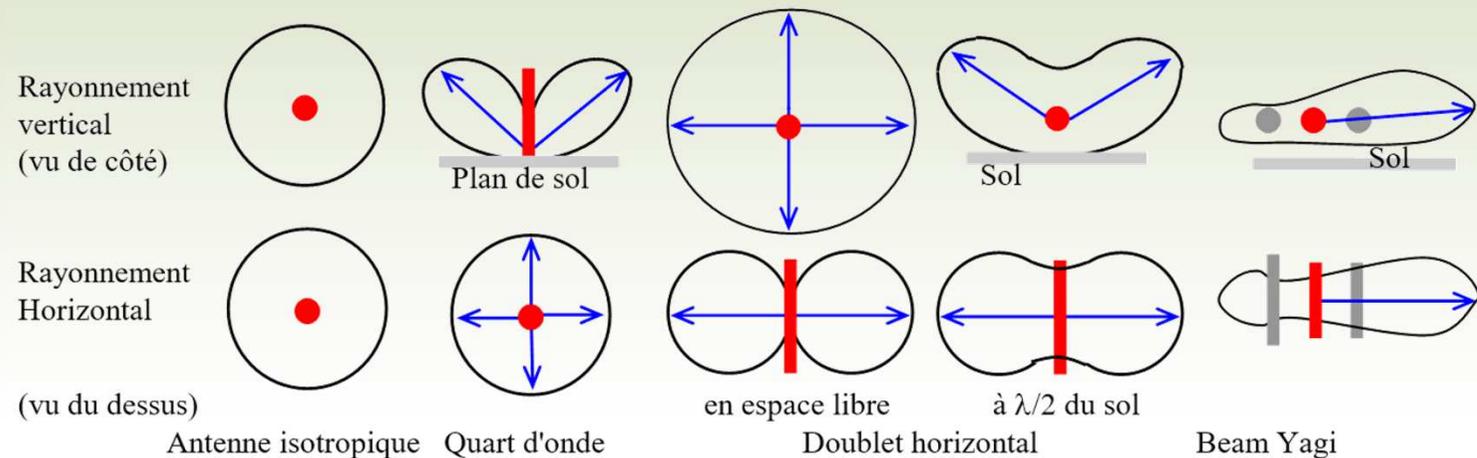
- *En ajoutant des éléments parasites près du dipôle (et si les éléments parasites sont bien positionnés et à la bonne dimension), on peut créer un lobe principal ce qui concentre l'énergie dans une direction*
  - les éléments directeurs sont plus courts que le dipôle,
  - les éléments réflecteurs sont plus longs.
    - lorsque le nombre d'éléments augmente, l'impédance du dipôle diminue et le gain de l'antenne (son effet directif) augmente.
    - le gain obtenu par ce système dépend à la fois du nombre d'éléments et de l'écartement entre les éléments.



## 9-7) gain d'une antenne

- Le gain d'une antenne se mesure dans la direction maximum de rayonnement.
  - le gain se calcule par rapport à l'antenne doublet ( $dB_d$ )
  - ou encore par rapport à l'antenne isotropique ( $dB_{iso}$ ).
- Le diagramme de rayonnement d'une antenne peut se représenter soit sur le plan horizontal ou le plan vertical :

**Peu de questions recensées à l'épreuve de Technique**



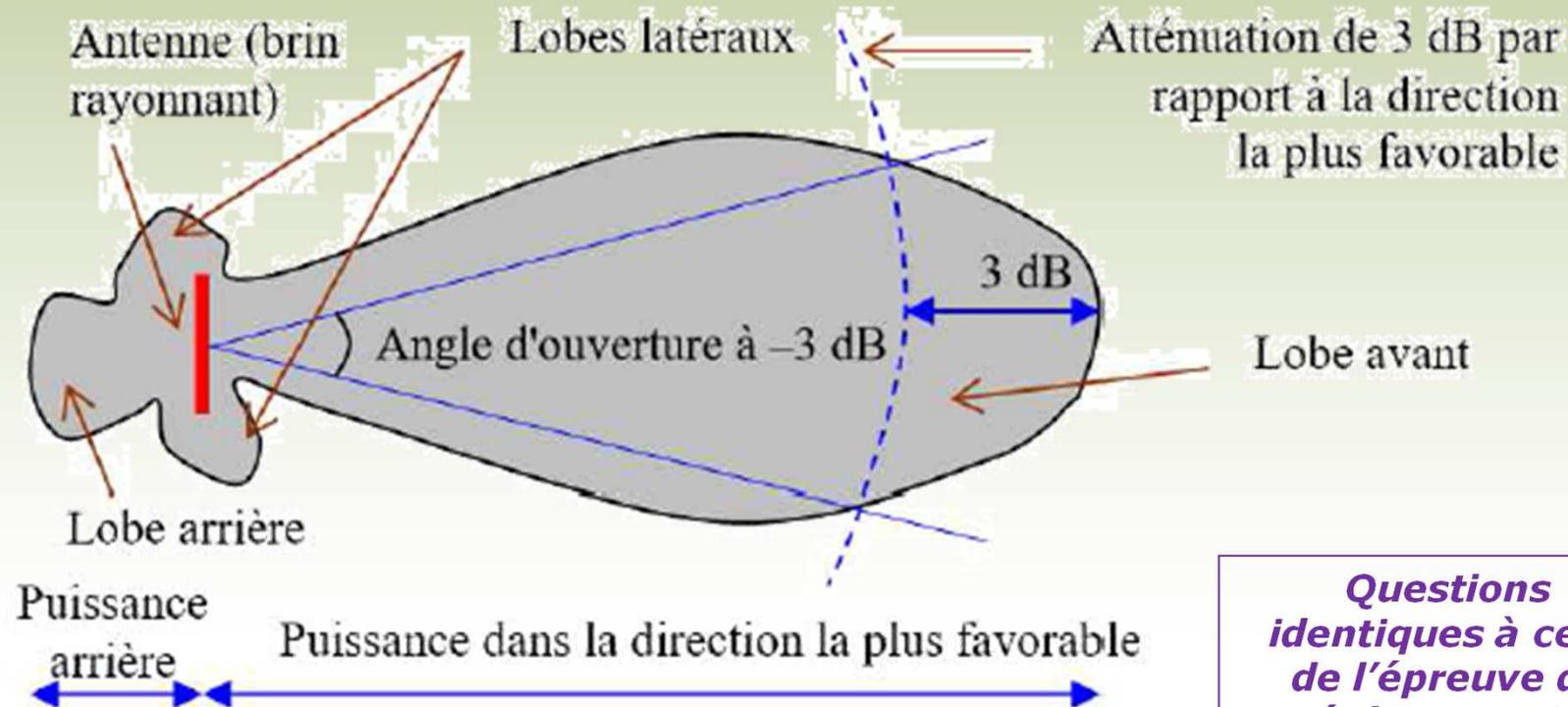
## 9-8) puissance apparente rayonnée

- **La puissance apparente rayonnée (PAR)** est :
  - la puissance d'alimentation de l'antenne
  - multipliée par le rapport arithmétique de celle-ci par rapport au doublet (pas en dB<sub>d</sub>).
  - cette puissance correspond à la puissance qu'il faudrait appliquer à un dipôle pour avoir la même puissance rayonnée dans la direction la plus favorable de l'antenne.
- **La puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE)** prend pour référence l'antenne isotropique.
  - *l'antenne doublet a un gain de 2,14 dB par rapport à l'antenne isotrope, soit un coefficient complémentaire de 1,64 (= 1 + 2/π).*
  - $PIRE = PAR + 2,14 \text{ dB} = PAR \times 1,64$

**Questions  
identiques à celle  
de l'épreuve de  
Réglementation**

## 9-9) angle d'ouverture

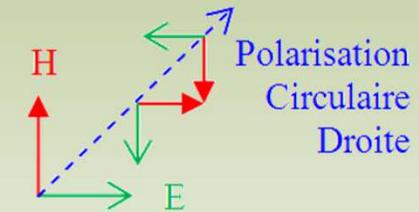
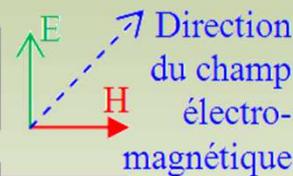
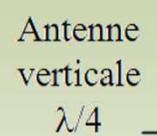
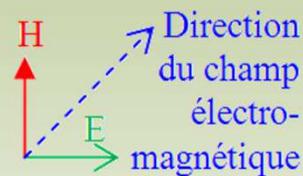
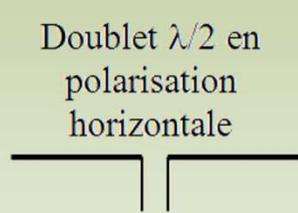
- **L'angle d'ouverture** d'une antenne est l'écart d'angle entre les directions pour lesquelles la puissance rayonnée est la moitié (-3 dB) de la puissance rayonnée dans la direction la plus favorable



**Questions  
identiques à celle  
de l'épreuve de  
Réglementation**

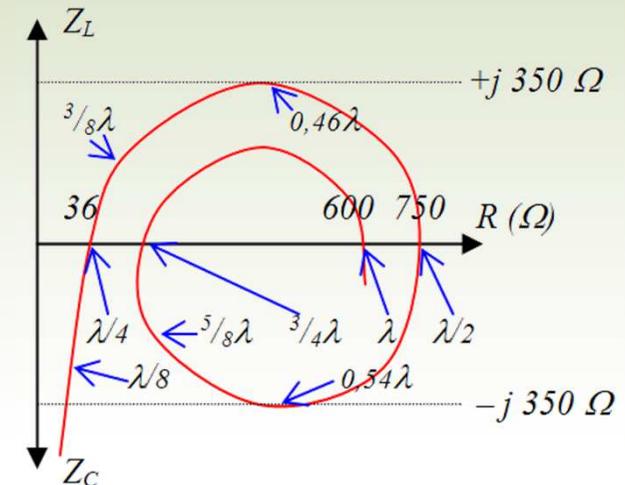
## 9-10) compléments sur les antennes

- *Position des ventres de tension et d'intensité dans une antenne ouverte*
- *Ventre d'intensité et lobe de rayonnement d'un brin rayonnant*
- *Polarisation et champ électrique*
  - *horizontale, verticale, circulaire (droite ou gauche)*



- *L'escargot de Smith : impédance et réactance d'un fouet vertical avec radiants à  $90^\circ$  ou plan de masse en fonction de la longueur du fil*
- *Rendement d'une antenne :*

$$R (\%) = \frac{\text{impédance de rayonnement}}{\text{impédance totale}}$$



## 10-1) lignes de transmissions (feeders)

- La ligne de transmission est utilisée pour transférer l'énergie

- de l'émetteur vers l'antenne
- ou de l'antenne vers le récepteur.

- La ligne de transmission peut être

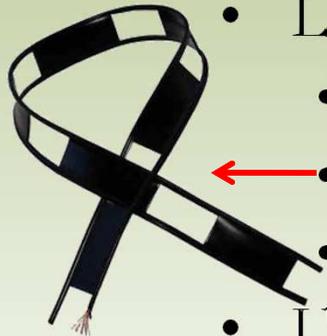
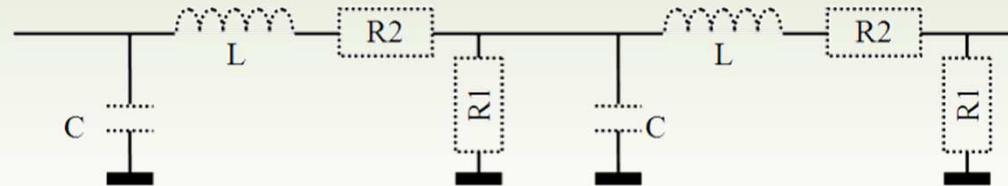
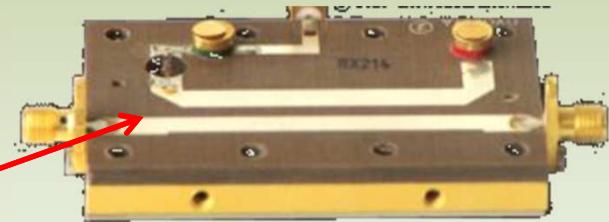
- asymétrique (câble coaxial)
- symétrique (ligne bifilaire)
- microstrip (gravée sur un circuit imprimé)

- Une ligne de transmission est équivalente à un circuit constitué

- d'une bobine,
- d'un condensateur

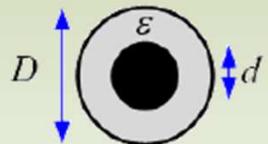
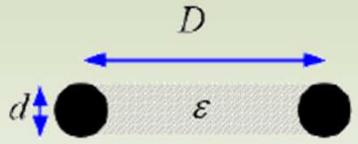
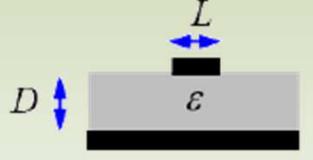
- le rapport  $\sqrt{L/C}$  fournit l'impédance caractéristique (en  $\Omega$ ),
- et de deux résistances (une en série, l'autre en parallèle)

- la valeur des résistances détermine la qualité de la ligne (affaiblissement linéique, perte en dB/m)



# 10-2) impédance et coefficient de vélocité

- Calcul de l'**impédance caractéristique de la ligne** :  
 $Z_{\text{ligne}}(\Omega) = \sqrt{Z_L \cdot Z_C} = \sqrt{(\omega L / \omega C)} = \sqrt{[L(\text{H/m}) / C(\text{F/m})]}$
- Autre manière de calculer l'impédance d'une ligne :
  - à partir des **dimensions des conducteurs** (D et d ou L)
  - et du **diélectrique employé** ( $\epsilon$ ) puisque  $Z_{\text{ligne}} = \sqrt{L / C}$

| $\epsilon$ = coeff. diélectrique utilisé<br>= 1,1 à 1,2: air avec écarteurs<br>= 2,3 pour le PE<br>= 2,1 pour le téflon<br>= 4,5 pour la fibre de verre<br>Impédance (valeur approchée)<br>Vélocité ( $v = 1 / \sqrt{\epsilon}$ ) | Coaxial rond  | Ligne bifilaire   | Strip line (circuit imprimé)   |
|---|---|---|--|
|   |    |  |       |
|   | $Z(\Omega) = (138 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(D/d)$<br>66% (PE) à 80% (semi-aéré) | $Z(\Omega) = (276 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(2D/d)$<br>95% (écarteurs espacés)   | $Z(\Omega) = (138 / \sqrt{\epsilon}) \cdot \log(4D/L)$<br>50% (bakélite, fibre de verre) |

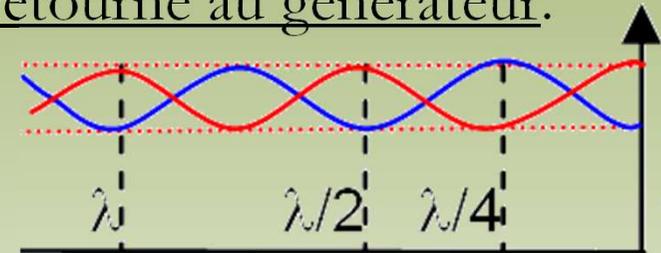
- Dans un fil ou dans un câble, la **vitesse de propagation** des ondes est plus faible que dans l'air ou dans le vide.
- La **vélocité** est la vitesse du courant dans le câble (*en % de la vitesse dans l'air ou le vide*) et dépend uniquement du diélectrique utilisé ( $\epsilon$ ).

$$v(\%) = 1 / \sqrt{\epsilon}$$

## 10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Lors de la **désadaptation des impédances**, une partie de la puissance émise (la puissance réfléchie) retourne au générateur.
  - deux courants en sens inverse se superposent dans la ligne et, à certains endroits, les tensions et les intensités s'additionnent (**ventres**) ou se soustraient (**nœuds**).
    - *si  $Z_{charge} < Z_{câble}$ , il y aura un nœud de tension au niveau de la charge*
    - *la tension (en bleu) et l'intensité (en rouge) sont déphasées de  $180^\circ$*
  - les endroits où se situent ces maxima et ces minima sont fixes (d'où le nom d'**ondes stationnaires**) par rapport à la charge et dépendent de la fréquence.
  - ils sont distants les uns des autres d'un quart d'onde. Le phénomène se répète donc toutes les demi-ondes.
    - *attention à la vitesse du câble dans le calcul des distances et des longueurs*
  - le rapport des tensions/intensités réfléchies est toujours égal à l'impédance caractéristique de la ligne.



## 10-3) adaptation, désadaptation et ondes stationnaires



- Le **TOS** et le **ROS** sont deux mesures de la désadaptation et sont liées par la loi d'Ohm :
  - par le coefficient de réflexion, nommé  $\rho$  (*rhô*) et égal au rapport du courant réfléchi divisé par le courant émis (en V ou en A).
 
$$\rho = U_R / U_E = (U_{maxi} - U_{mini}) / (U_{maxi} + U_{mini})$$

$$\rho = I_R / I_E = (I_{maxi} - I_{mini}) / (I_{maxi} + I_{mini})$$
  - le **TOS** (Taux d'Ondes Stationnaires) est égal à 100 fois  $\rho$ .
 
$$\text{TOS (\%)} = \rho \times 100$$
  - si les valeurs mesurées sont en Watts, la puissance réfléchie est égale à la puissance émise multipliée par le carré du coefficient de réflexion
 
$$\rho = \sqrt{(P_R / P_E)} \quad \text{ou} \quad P_{réfléchie} = P_{émise} \times \rho^2$$
- par le rapport des valeurs maxi/mini (en Ohms, Volts ou Ampères) appelé **ROS** (rapport d'ondes stationnaires).
 
$$\text{ROS (rapport / 1)} = Z_{maxi}(\Omega) / Z_{mini}(\Omega)$$
 ou 
$$\text{ROS (rapport / 1)} = U_{maxi} / U_{mini} = I_{maxi} / I_{mini}$$

## 10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

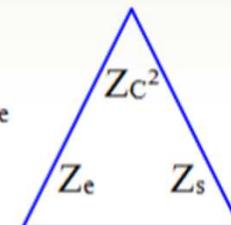
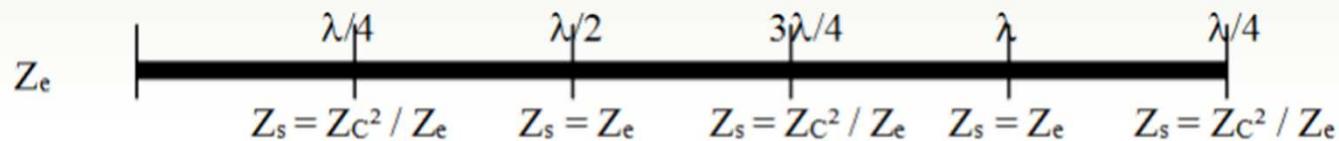
- Si les impédances de la charge et de la ligne ne sont pas égales, il y a des ondes stationnaires dans la ligne de transmission et l'impédance ramenée à l'entrée peut avoir des composantes réactives (inductives ou capacitives).
- Toutefois, pour certaines longueurs de ligne, **les composantes réactives s'annulent** :
  - à chaque demi-onde, on a

$$Z_e = Z_s$$

- à chaque nombre impair de quart d'onde, on a

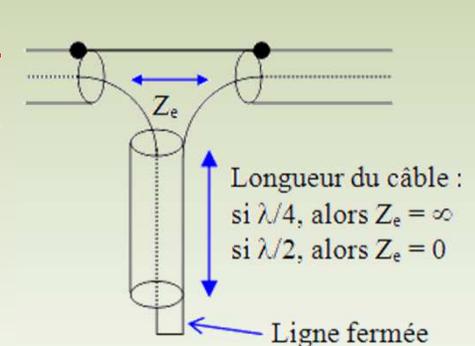
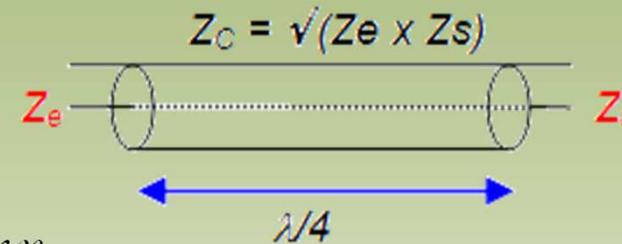
$$Z_C^2 = Z_e \times Z_s$$

$$\text{ou } Z_C = \sqrt{Z_e \cdot Z_s}$$



## 10-4) lignes d'adaptation et symétriseurs

- Une **ligne quart d'onde** pourra être utilisée pour **adapter des impédances**
  - *attention à la vitesse du câble pour calculer sa longueur*
  - *ne fonctionne que pour une bande de fréquence*
- Les propriétés des **lignes quart d'onde et demi-onde** permettent de **réaliser des filtres** en insérant des morceaux de câble coaxial (ou de ligne bifilaire) de longueur  $\lambda/4$  ou  $\lambda/2$  dans une ligne de transmission.



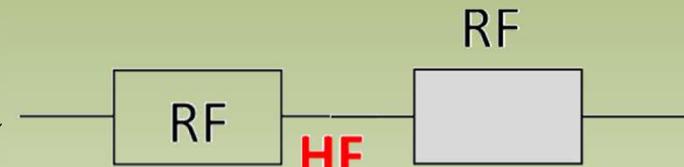
| Type de ligne / impédance de sortie      | schéma | quart d'onde ( $\lambda/4$ ) et nombre impair de $\lambda/4$<br>Inversion de l'impédance | demi-onde ( $\lambda/2$ ) et nombre entier de $\lambda/2$<br>Recopie de l'impédance |
|--|--------|--|---|
| Ligne ouverte<br>$Z_s = \infty$ (infini) |        | Impédance d'entrée nulle<br>$Z_e = Z_c^2 / Z_s = Z_c^2 / \infty = 0$                     | Impédance d'entrée infinie<br>$Z_e = Z_s = \infty$                                  |
| Ligne fermée<br>$Z_s = 0$                |        | Impédance d'entrée infinie<br>$Z_e = Z_c^2 / Z_s = Z_c^2 / 0 = \infty$                   | Impédance d'entrée nulle<br>$Z_e = Z_s = 0$   |

## 11-0) Préambule

- les étages sont représentés par des

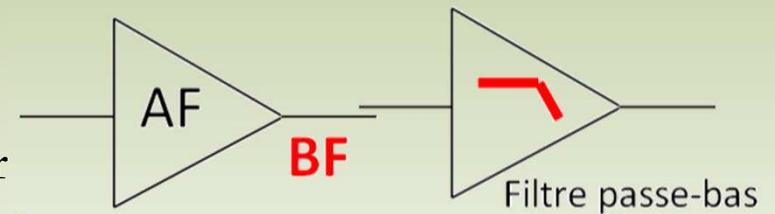
- **rectangles** (*cas général*)

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



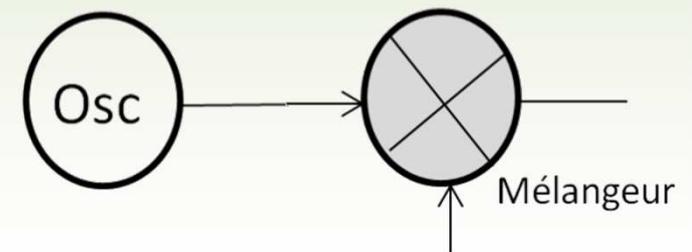
- **triangles** (*amplificateur*)

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



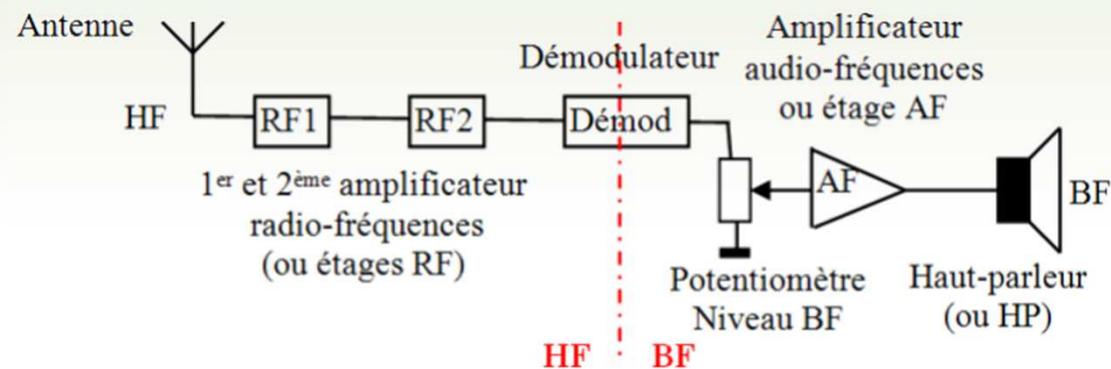
- **cercles** dans le cas suivants :

- 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.

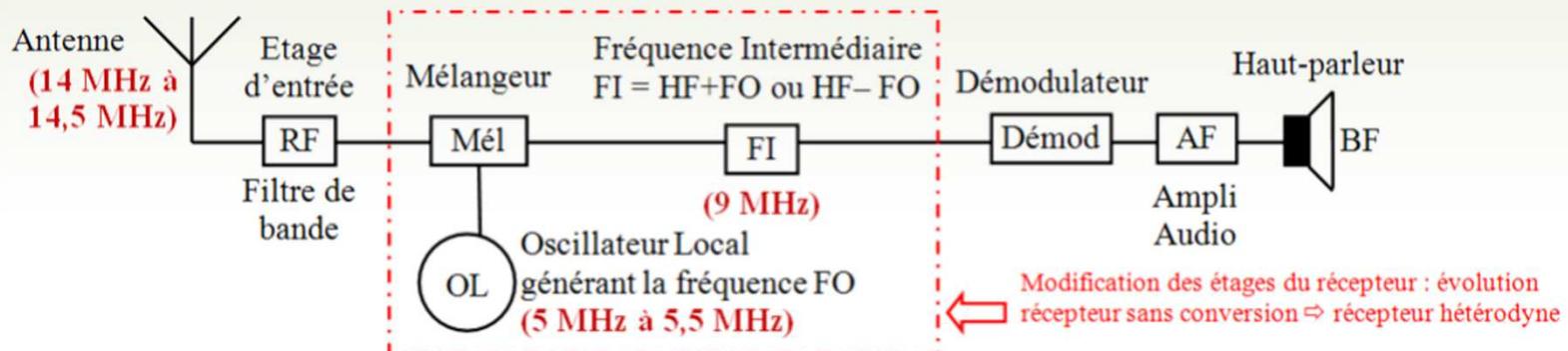


## 11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)



Sans conversion, un récepteur est difficile à accorder sur une bande, surtout si les étages RF sont nombreux. On contourne cette difficulté en intégrant une **fréquence intermédiaire**

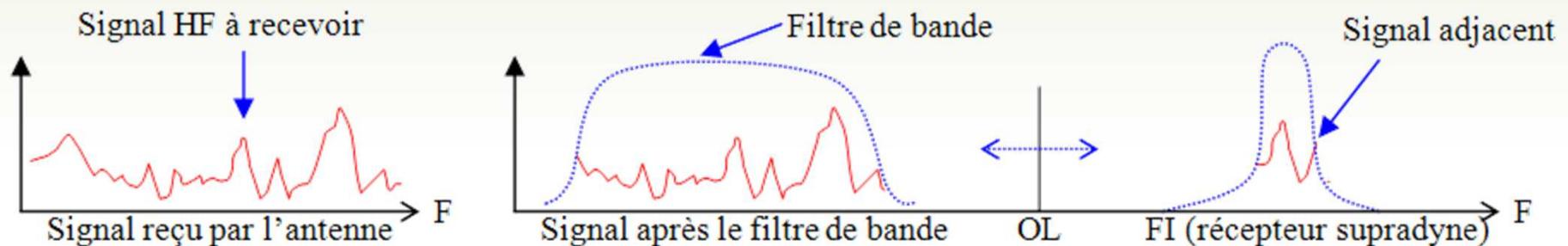
- Le récepteur est alors qualifié de **superhétérodyne**
- Le **rôle de l'étage FI** est d'**améliorer**
  - **la sélectivité**
    - *faculté d'un récepteur d'extraire la fréquence à recevoir du signal reçu à son entrée*
    - *utilisation de filtres dont les flancs seront les plus raides possible pour rejeter les signaux indésirables adjacents*
  - **la sensibilité**
    - *plusieurs étages amplificateurs le plus linéaire possible*



## 11-2) récepteur avec fréquence intermédiaire (FI)

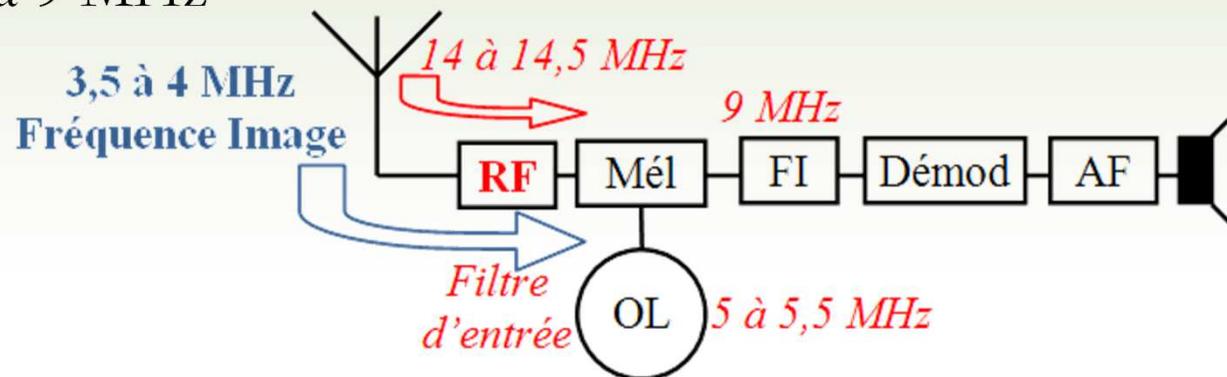


- L'antenne reçoit le signal HF que l'on souhaite recevoir mais aussi tous les autres.
- Le filtre de bande (*avant le mélangeur*) effectue un premier tri puis l'étage FI, grâce à sa sélectivité, extrait le signal désiré.
- Si la fréquence intermédiaire est plus basse que la fréquence à recevoir ( $FI < HF$ ), le récepteur est **infradyne**
  - pour recevoir une fréquence HF plus élevée, il faut augmenter FO
  - la fréquence à recevoir est translatée sur une fréquence inférieure et le spectre HF est inversé dans la FI (*effet de la soustraction*)
- Dans le cas contraire ( $FI > HF$ ), le récepteur est **supradyne**



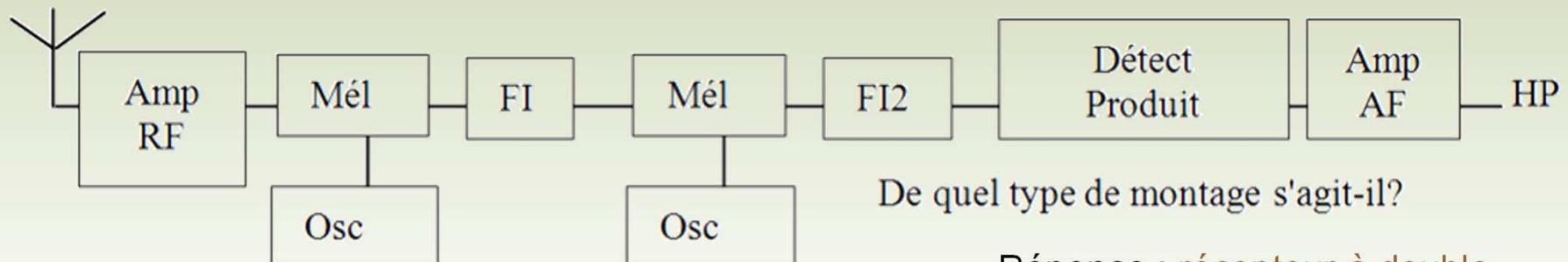
## 11-3) fréquence image

- 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*)
  - **Exemple** : récepteur pour la bande 14,0 à 14,5 MHz avec FI à 9 MHz



## 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 ( $F_{im} = HF + 2.FO$ ) et facilitant ainsi le filtrage d'entrée :



De quel type de montage s'agit-il?

Réponse : récepteur à double  
changement de fréquence

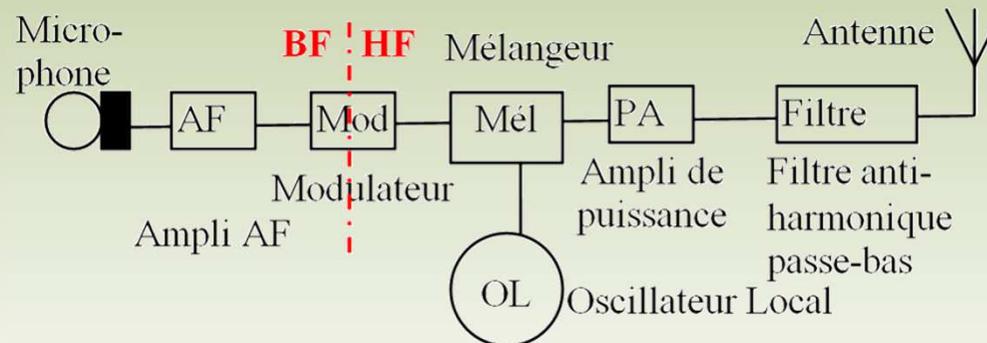
- la 1<sup>ère</sup> FI est supradyne (*élimination de la fréquence image*)
- l'oscillateur local utilisé pour la 2<sup>ème</sup> FI est fixe
- *sur la 2<sup>ème</sup> FI (ou sur l'étage AF) se trouvent les étages DSP*

## 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  $\mu$ V** à l'entrée du récepteur chargé par une impédance de 50  $\Omega$
    - **S9 correspond à -73 dBm** sur une charge de 50  $\Omega$
    - **S0 correspond à -127 dBm** sur une charge de 50  $\Omega$  (0,1  $\mu$ V / 50  $\Omega$ )
    - S0 est souvent la sensibilité annoncée des récepteurs modernes (0,1 à 0,2  $\mu$ 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)

## 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.
- 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,
- 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 :  **$P(W) = k \cdot T(^{\circ}K) \cdot B(Hz)$**

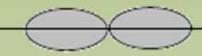
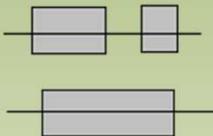
$k =$  constante de Boltzmann  $= 1,38 \cdot 10^{-23}$  ;

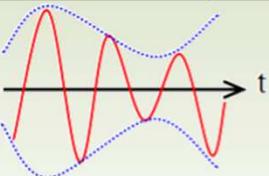
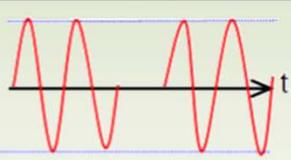
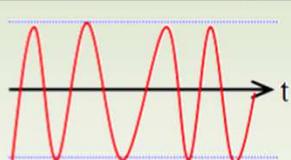
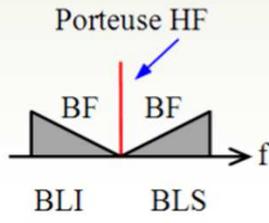
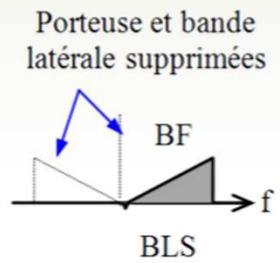
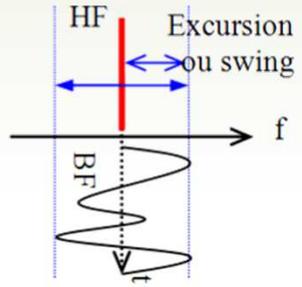
$T =$  température en  $^{\circ}K$  (soit  $^{\circ}C + 273$ ) ;  $B =$  bande passante en  $Hz$

# 12-1) schématisation des différents types de modulations



Oscillogrammes dans les questions d'examen

- Une modulation peut se représenter de deux manières :
  - en fonction du temps (**oscillogramme**):
    - en AM et CW, la partie grisée représente la HF ; 
    - en FM, la HF est représentée par un large rectangle grisé 
  - en fonction de la fréquence (**spectrogramme**):
    - moins courant (peu de questions recensées à l'épreuve de technique)

| Représentation                            | AM - A3E<br>Modulation d'Amplitude  | BLU - J3E<br>Bande Latérale Unique   | CW - A1A<br>Télégraphie  | FM - F3E<br>Modulation de Fréquence   |
|---|---|--|--|---|
| en fonction du temps/oscillogramme        |   | La BLU ne peut pas être représentée en fonction du temps                             |  |   |
| en fonction de la fréquence spectrogramme |  |  | La CW ne peut pas être représentée en fonction de la fréquence                       |  |

## 12-2) modulateurs et démodulateurs

- Seuls les **noms des étages**, selon le type de modulation, et **quelques termes techniques** sont à connaître :

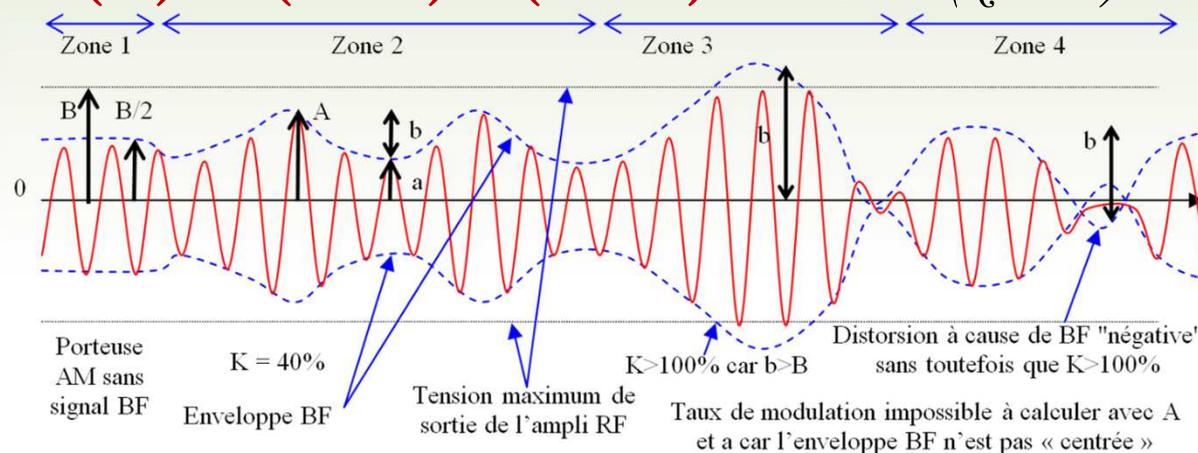
|               |                   | AM  | BLU   | CW   | FM   |
|---------------|-------------------|---|---|--|--|
| Démodulateurs | Nom               | <b>Détection</b> ou détecteur d'enveloppe   | Oscillateur de battement de fréquence ( <b>BFO</b> ) et <b>détecteur de produit (DP)</b> ou mélangeur |  | <b>Discriminateur</b> ou détecteur de pente                  |
|               | Schéma synoptique | FI — [Dét] → BF                             | FI — [DP ou Mél] → BF<br>BFO  |  | FI — [Disc] → BF   |
|               | Autres notions    | Contrôle Automatique de Gain ( <b>CAG</b> ) | Fréquence BFO ≈ Fréquence FI  |  | <b>Foster-Seeley ; Squelch ; limiteur et désaccentuateur</b> |
| Modulateurs   | Principe          | la HF de l'oscillateur est mélangée à la BF | Le mélange HF +/- BF donne de la DBL qui est fortement filtrée pour former la BLU                     | Coupure de l'alimentation d'un étage ou entre les étages | La BF est appliquée à un VCO (oscillateur à réactance)       |
|               | Schéma synoptique | BF — [Mél] → FI<br>Osc HF                   | BF — [Mél éq] → DBL → Q → FI<br>Osc HF  | + [Osc ou PA]  | BF — [VCO] → FI<br>δU δF                                     |
|               | Autres notions    | <b>Taux de Modulation et surmodulation</b>  | <b>Mélangeur équilibré et filtre à quartz (Q)</b>   | <b>Piaulements et claquements</b>                        | <b>Indice de Modulation Préaccentuateur</b>                  |

- Voyons en détail ces notions par type de modulation

## 12-3) modulation d'amplitude (AM)

- La **modulation d'amplitude (AM)** reste la modulation la plus simple à mettre en œuvre
  - L'étage de démodulation se nomme **détection** (ou détecteur d'enveloppe)
- Le **contrôle automatique de gain (CAG)** est un dispositif qui permet d'obtenir le même niveau B.F. quelle que soit la force du signal H.F. à l'entrée du récepteur.
  - la tension à l'entrée de l'étage CAG est prélevée sur la détection
- **Taux de modulation** ( $B = \text{tension maximum délivrée par l'émetteur}$ )

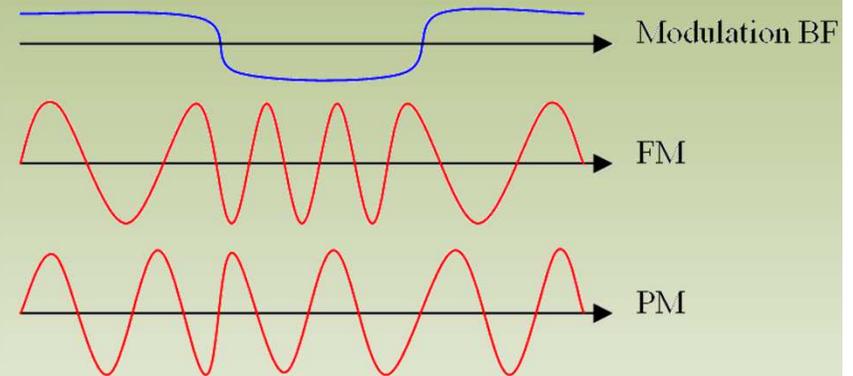
$$K(\%) = (A - a) / (A + a) = b / B \quad (\text{zone 2})$$



## 12-4) modulation de fréquence (FM)

- Les modulations de fréquence (**FM**) et de phase (**PM**) sont des modulations angulaires. Leurs caractéristiques sont très proches.

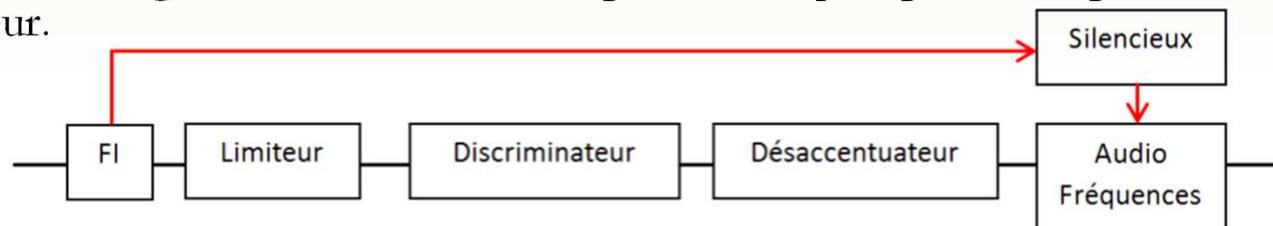
- les circuits de démodulation sont identiques
- nous parlons toujours de FM alors que nous avons souvent affaire à de la PM.



- L'étage de démodulation se nomme **discriminateur**
  - transforme les variations de fréquence HF en variations de BF.
  - *lorsque 2 signaux FM sont présents à l'entrée du démodulateur, seul le signal le plus fort sera démodulé (contrairement à l'AM et à la BLU)*
- Un modulateur FM est un **oscillateur à réactance** transformant les variations de la tension BF en variations de fréquence (*ou de phase*).

## 12-4) modulation de fréquence (FM)

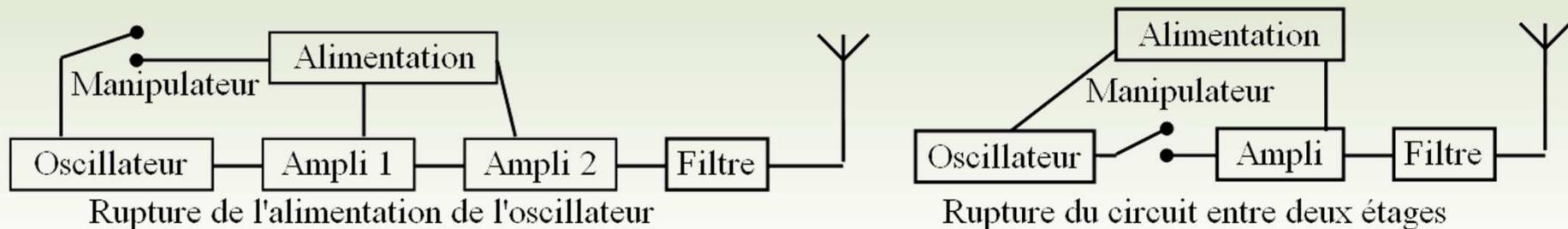
- L'**indice de modulation** ( $m$ ) est le rapport obtenu en divisant
  - l'**excursion** de fréquence (*soit la moitié de la bande passante du signal FM,  $\delta F$* )
  - par la fréquence maximum du **signal modulant** (BF)
$$m = \text{Excursion (Hz)} / \text{BF maxi (Hz)}$$
- Lorsque l'indice de modulation est trop faible ( $\ll 1$ ), la qualité de la transmission se dégrade (*bruit, surtout dans les aigus*). Pour réduire ce bruit, on renforce les aigus par deux filtres :
  - **En émission**, le **préaccentuateur** est situé avant le modulateur FM **En réception**, le **désaccentuateur** suit le démodulateur FM et restitue la BF envoyée à l'étage d'amplification AF.
- En l'absence de signal sur son entrée ou en cas de fortes variations d'amplitude, le discriminateur génère du bruit.
  - pour éviter le souffle en l'absence de signal, on utilise un **sqelch** (ou **silencieux**) qui coupe l'alimentation d'un étage AF en l'absence de HF (*ou en cas d'un niveau HF trop faible, à la limite de la sensibilité du récepteur*).
  - un circuit **limiteur** situé entre la FI et le discriminateur écrête les variations d'amplitude du signal FM dues aux parasites qui peuvent perturber le discriminateur.



# 12-5) manipulation par coupure de porteuse (CW)



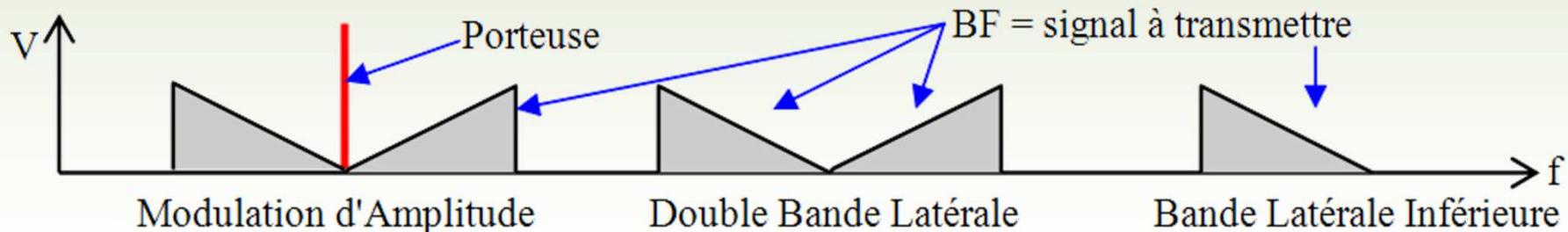
- La CW peut être **modulée** :
  - par **rupture d'alimentation** sur un ou plusieurs étages :
    - oscillateur
      - dans ce cas, la stabilité de l'oscillateur peut être détériorée ce qui génère des **piaulements** en réception
    - FI, étage d'amplification
    - amplificateur final
  - par **rupture de liaison** entre deux étages
    - dans ce cas, les variations d'impédance de charge peuvent générer des **claquements** en réception



- La CW se démodule comme la BLU (la différence entre la fréquence du BFO et la fréquence à recevoir génère un « battement » dont la fréquence est égale à la tonalité souhaitée qui est souvent autour de 800 Hz)

## 12-6) bande latérale unique (BLU)

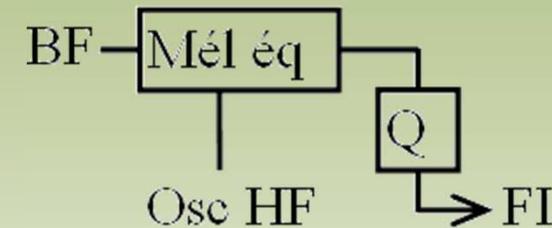
- La **BLU** est une forme de modulation d'amplitude
- En AM, si  $K = 100\%$  (cas extrême), la tension de la porteuse est le double de celle des deux bandes latérales.
  - la porteuse contient les deux tiers de la puissance émise
  - les deux bandes latérales contiennent le reste.
    - sur 150 W émis et avec  $K = 100\%$ , la porteuse contient 100 W et chaque bande latérale contient 25 W.
    - la puissance des bandes latérales est donc au mieux 6 dB en dessous de la puissance de la porteuse (4 fois moindre).



- les deux bandes latérales **ne sont pas** les enveloppes BF situées au dessus et au dessous de la représentation de l'AM en fonction du temps

## 12-6) bande latérale unique (BLU)

- **Pour générer de la BLU**, on peut utiliser deux systèmes :
  - un **mélangeur équilibré** suivi d'un **filtre à quartz**.
    - le mélangeur équilibré génère de la **double bande latérale** (DBL = BLI + BLS)
    - la bande latérale désirée est isolée grâce à un filtre à quartz. 2 montages sont courants :
      - avec 2 transistors MOS-FET
      - avec un pont de diodes en anneau (les diodes se suivent comme dans une boucle, montage différent du pont redresseur)
  - A la suite du mélangeur équilibré, la bande latérale désirée est filtrée grâce à un **filtre à quartz**
    - un filtre à quartz est composé de condensateurs à quartz montés en série et taillés pour une fréquence proche de celle du signal à filtrer.
    - ce type de filtre possède des pentés très raides car un signal adjacent à 200 Hz (*écart entre la BLI et la BLS*) doit pouvoir être ramené à - 60 dB par rapport au signal utile



## 12-6) bande latérale unique (BLU)

- Le **BFO** (Oscillateur de Battement de Fréquence) permet de démoduler la CW et la BLU.

- le BFO est un oscillateur fixe qui génère une fréquence proche de la fréquence à démoduler.

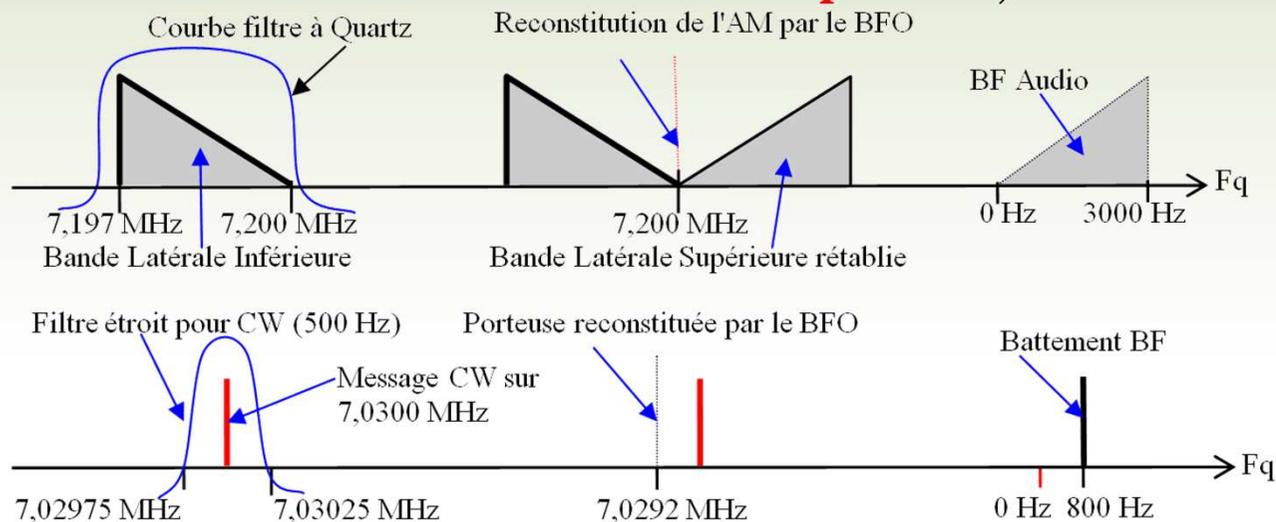


- il rétablit la porteuse supprimée à l'émission pour générer de l'AM ou une note audible en CW.

Fréquence BFO  $\approx$  Fréquence FI

- le mélangeur du BFO est suivi d'une détection AM (ensemble formant un détecteur de produit)

Démodulation BLU  
Démodulation CW



# Les principales formules à connaître

## Chapitre 0 : Rappel d'algèbre

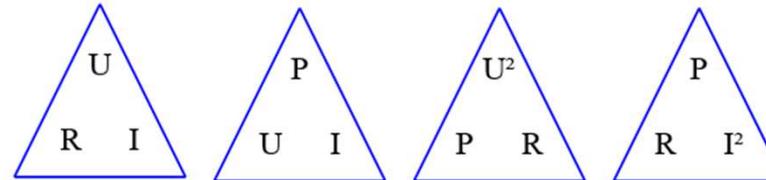
- Table de conversion



## Chapitre 1 : Lois d'Ohm et de Joule

- Lois d'Ohm et de Joule :
  - $U(V) = R(\Omega) \cdot I(A)$
  - $P(W) = U(V) \cdot I(A)$
  - $P(W) = U^2(V) / R(\Omega)$
  - $P(W) = R(\Omega) \cdot I^2(A)$

} voir triangles:



- $Q(C) = I(A) \cdot t(s)$
- $E$  ou  $W(J) = P(W) \cdot t(s) = U(V) \cdot Q(C)$
- Résistivité :  $R(\Omega) = \rho(\Omega/m) \cdot L(m) / s(m^2)$
- Code des couleurs des résistances : tableau mnémotechnique ci-contre :
- Groupements de résistances en série :
  - $R_t = R_1 + R_2 + \dots$
  - $U_{R1} = U_t \cdot (R_1 / R_t)$
  - $U_t = U_{R1} + U_{R2} + \dots$
- Groupements de résistances en parallèle :
  - $R_t = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$  ou  $1/R_t = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$ 
    - $I \div (I \div R_1 + I \div R_2 + \dots) = R_t$
  - $I_{R1} = I_t \cdot (R_t / R_1)$
  - $I_t = I_{R1} + I_{R2} + \dots$

| Code des couleurs |   |
|-------------------|---|
| Ne                | 0 |
| Mangez            | 1 |
| Rien              | 2 |
| Ou                | 3 |
| Je                | 4 |
| Vous              | 5 |
| Battrai           | 6 |
| VIOlemment        | 7 |
| Grand             | 8 |
| BOA               | 9 |

## Chapitre 2 : Courants alternatifs sinusoïdaux, bobines et condensateurs

- Courants alternatifs sinusoïdaux :
  - Durée d'une période (t) et fréquence (Fq) :  $t(s) = 1 / Fq(Hz)$
  - Pulsation :  $\omega(rad/s) = 2 \cdot \pi \cdot F(Hz)$
  - Valeurs efficaces / maximum :  $V_{eff} = 0,707 V_{max} = V_{max} / \sqrt{2}$  ou  $V_{max} = 1,414 V_{eff} = V_{eff} \cdot \sqrt{2}$
  - Valeurs crête à crête :  $V_{càc} = 2 V_{max} = 2,828 V_{eff}$

# Les principales formules à connaître



- Bobines :
  - Valeur d'une bobine :  $L(H) = F \cdot N^2 \cdot D^2$
  - Impédance :  $Z(\Omega) = \omega(\text{rad/s}) \cdot L(H) = 2 \cdot \pi \cdot F(\text{Hz}) \cdot L(H)$ 
    - *en écriture naturelle* :  $2 \times [\pi] \times F \times L = Z$
    - *formule simplifiée* :  $6,28 \times F(\text{MHz}) \times L(\mu\text{H}) = Z(\Omega)$
  - Montage série :  $L_t = L_1 + L_2 + M$
- Condensateurs :
  - Valeur de la capacité d'un condensateur :  $C(F) = d \cdot S(\text{m}^2) / E(\text{m})$
  - Quantité d'électricité emmagasinée :  $Q(C) = C(F) \cdot U(V)$
  - Quantité d'énergie emmagasinée :  $E(J) = \frac{1}{2} \cdot Q(C) \cdot U(V) = \frac{1}{2} C(F) \cdot U^2(V)$
  - Impédance :  $Z(\Omega) = 1 / [\omega(\text{rad/s}) \cdot C(F)] = 1 / [2 \cdot \pi \cdot F(\text{Hz}) \cdot C(F)]$ 
    - *en écriture naturelle* :  $1 \div (2 \times [\pi] \times F \times C) = Z$
    - *formule simplifiée* :  $159 \div F(\text{MHz}) \div C(\text{nF}) = Z(\Omega)$
  - Montage série :  $C_t = (C_1 \cdot C_2) / (C_1 + C_2)$  ou  $1/C_t = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$
  - Montage parallèle :  $C_t = C_1 + C_2 + \dots$
  - Constante de temps d'un condensateur :  $t(s) = R(\Omega) \cdot C(F)$  – Durée de charge (ou de décharge) =  $5 \cdot t$ 
    - *formule simplifiée* :  $t(\text{ms}) = R(k\Omega) \cdot C(\mu\text{F})$

## Chapitre 3 : Transformateurs, piles et galvanomètres

- Transformateur sans perte:
  - Rapport de transformation :  $N = n_s / n_p$
  - Transformation de tension :  $U_s = U_p \cdot N$
  - Transformation d'intensité :  $I_s = I_p / N$
  - Transformation d'impédance :  $Z_s = Z_p \cdot N^2$
  - Rendement :  $\eta = P_s / P_p$
- Piles et accumulateurs :
  - Résistance interne :  $R_i(\Omega) = [E(V) - U(V)] / I(A) = [E(V) / I(A)] - R(\Omega)$
  - Force électromotrice :  $E(V) = [R(\Omega) + R_i(\Omega)] \cdot I(A)$
  - Capacité :  $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$

|     |       |       |       |              |
|-----|-------|-------|-------|--------------|
| $N$ | $U_s$ | $I_p$ | $n_s$ | $\sqrt{Z_s}$ |
| 1   | $U_p$ | $I_s$ | $n_p$ | $\sqrt{Z_p}$ |

} voir tableau :

# Les principales formules à connaître



- Galvanomètres :
  - Voltmètre :  $U_T = U_R + U_g$  et  $R = (U_T / I_g) - R_i$
  - Ampèremètre :  $I_T = I_g + I_R$  et  $R = U / (I_T - I_g)$
  - Qualité des voltmètres :  $Q(\Omega/V) = (R + R_i) / U_{\text{calibre}} = 1 / I_g$

## Chapitre 4 : Décibels, circuits RC et L-C, loi de Thomson

- Décibels :
  - Gain :  $G(\text{dB}) = 10 \log (P_s / P_e)$  ;  $P_s / P_e = \text{Rapport de puissance}$ 
    - $\text{Rapport} \Rightarrow \text{dB} : \text{Rapport} [\text{LOG}] \times 10 = \text{dB}$  ;  $\text{dB} \Rightarrow \text{Rapport} : \text{dB} \div 10 [10^x] = \text{Rapport}$
    - ou  $10 \times [\text{LOG}] \text{ Rapport} = \text{dB}$  ;  $10 [^x] (\text{dB} \div 10) = \text{Rapport}$
    - table de conversion simplifiée : voir ci-contre :

| Rapport     | dB            |
|-------------|---------------|
| 1           | 0             |
| 2           | 3             |
| 4           | 6             |
| 8           | 9             |
| nombre de 0 | dizaine de dB |

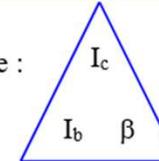
- Circuits RC :
  - Fréquence de coupure :  $F(\text{Hz}) = 1 / [2 \cdot \pi \cdot R(\Omega) \cdot C(\text{F})]$ 
    - en écriture naturelle :  $1 \div (2 \times [\pi] \times R \times C) = F$
    - formule simplifiée :  $159 \div R(k\Omega) \div C(\mu\text{F}) = F(\text{Hz})$
- Circuits LC et RLC :
  - Fréquence de coupure ou de résonance :  $F(\text{Hz}) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{[L(\text{H}) \cdot C(\text{F})]})$ 
    - en écriture naturelle :  $1 \div (2 \times [\pi] \times \sqrt{L \times C}) = F$
    - formule simplifiée :  $159 \div \sqrt{[L(\mu\text{H}) \times C(\text{pF})]} = F(\text{MHz})$
  - Impédance d'un circuit RLC série ou parallèle à la résonance :  $Z_{\text{série}}(\Omega) = Z_{\text{parallèle}}(\Omega) = R(\Omega)$
  - Impédance d'un circuit RLC bouchon à la résonance :  $Z_{\text{bouchon}}(\Omega) = L(\text{H}) / [R(\Omega) \cdot C(\text{F})]$ 
    - en écriture naturelle :  $L \div C \div R = Z$  ou  $L \div (C \times R) = Z$
    - formule simplifiée :  $L(\mu\text{H}) \div R(k\Omega) \div C(\text{pF}) = Z_{\text{bouchon}}(k\Omega)$
  - Facteur Q d'un circuit bouchon ou série :  $Q_{\text{bouchon}} = Q_{\text{série}} = \sqrt{[L(\text{H}) / C(\text{F})] / R(\Omega)}$ 
    - en écriture naturelle :  $\sqrt{(L \div C) \div R} = Q_{\text{bouchon}} = Q_{\text{série}}$
    - formule simplifiée :  $\sqrt{[L(\mu\text{H}) \div C(\text{pF})] \div R(k\Omega)} = Q_{\text{bouchon}} = Q_{\text{série}}$
  - Bande passante à -3dB d'un circuit RLC :  $B(\text{Hz}) = F_0(\text{Hz}) / Q$
  - Taux de sélectivité (%) = (bande passante à -3 dB / bande passante à -60 dB) x 100
  - Facteur de forme = bande passante à -60 dB / bande passante à -3 dB

# Les principales formules à connaître



## Chapitre 6 : Les transistors et leurs montages

- Gain d'un transistor monté en émetteur commun :  $I_c = \beta \cdot I_b$ , voir triangle ci-contre :
- Intensité dans l'émetteur d'un transistor :  $I_e = I_b + I_c$



## Chapitre 7 : Amplificateurs, oscillateurs et mélangeurs

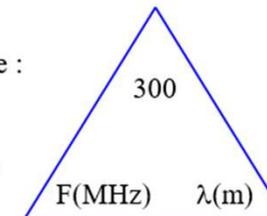
- Taux de distorsion harmonique (TDH en %) : (Tension parasite / Tension désirée) x 100
- Fréquences à la sortie d'un mélangeur :  $F_{max} = F1 + F2$  et  $F_{min} = F1 - F2$  (ou  $F2 - F1$ )
- Fréquences à l'entrée d'un mélangeur :  $F1 = (F_{max} - F_{min}) / 2$  et  $F2 = F_{max} - F1$

## Chapitre 8 : Amplificateurs opérationnels et circuits logiques

- Gain du montage fondamental :  $G = - (R2 / R1)$
- Tension de sortie du montage fondamental :  $U_s = U_E \times G = - [U_E \times (R2 / R1)]$

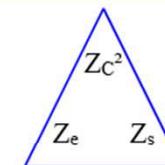
## Chapitre 9 : Propagation et antennes

- Relation longueur d'onde ( $\lambda$ ) / fréquence :  $\lambda(m) = 300 / F(MHz)$ , voir triangle ci-contre :
- Longueur théorique d'un doublet demi-onde :  $L(m) = 150 / F(MHz)$
- Longueur théorique d'une antenne quart d'onde :  $L(m) = 75 / F(MHz)$
- Puissance apparente rayonnée :  $PAR(W) = P_{\text{émetteur}}(W) \times G_{\text{antenne}}$  (rapport arithmétique)



## Chapitre 10 : Lignes de transmission et adaptations

- Impédance d'une ligne de transmission :  $Z(\Omega) = \sqrt{[L(H) / C(F)]}$ , voir triangle ci-contre :
- ROS = Z plus forte / Z plus faible =  $V_{maxi} / V_{mini}$
- TOS (%) =  $\rho \times 100$  ( $\rho$  = rapport d'ondes stationnaires)
- $\rho = (V_{maxi} - V_{mini}) / (V_{maxi} + V_{mini})$
- $\rho = U_{\text{réfléchi}}(V) / U_{\text{émise}}(V) = I_{\text{réfléchi}}(A) / I_{\text{émise}}(A) = \sqrt{[P_{\text{réfléchi}}(W) / P_{\text{émise}}(W)]}$
- $P_{\text{réfléchi}}(W) = P_{\text{émise}}(W) \times \rho^2$
- Impédance des lignes quart d'onde :  $Z_C^2 = Z_e \times Z_s$
- Impédance des lignes demi-onde :  $Z_e = Z_s$  quelle que soit  $Z_C$



## Chapitre 11 : Les synoptiques

- Fréquence image : le calcul varie selon le type du changement de fréquence du récepteur :  
Supradyne :  $F_{im} = HF + 2.FO$  ; infradyne et  $FO > FI$  :  $F_{im} = HF + 2.FI$  ; infradyne et  $FI > FO$  :  $F_{im} = HF - 2.FO$

## Chapitre 12 : Les différents types de modulation

- Taux de modulation AM :  $K(\%) = (A - a) / (A + a) = b / B$
- Indice de modulation FM :  $m = \text{Excursion FM (Hz)} / \text{BF maxi (Hz)}$

Radio-Club de la Haute Île



**F5KFF / F6KGL**

Port de Plaisance

F-93330 Neuilly sur Marne

# Les fiches de synthèse de F6KGL

**Bonne fin de préparation à l'  
Epreuve de Technique**

**N'oubliez pas de consulter également la liste des questions de l'épreuve de réglementation issues des comptes-rendus reçus et triées par chapitre du cours de F6KGL :**

**<http://f6kgl.f5kff.free.fr/Tech.pdf>**