

SE 2 : Systèmes électroniques

Introduction au traitement et à la transmission de l'information

Valentin Gies

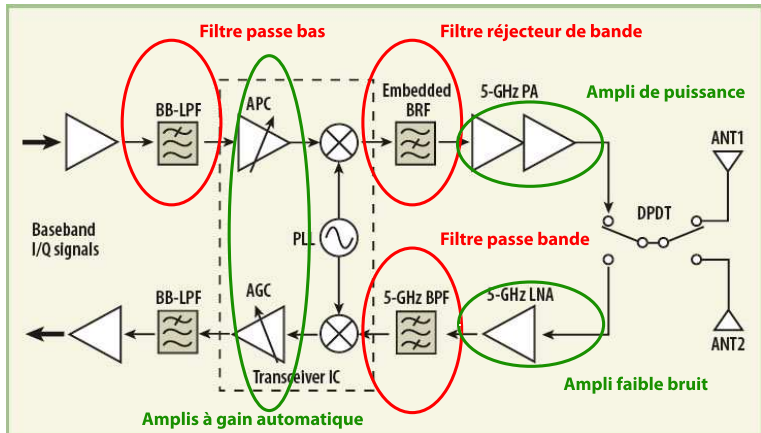
IUT de Toulon - département GEII
Université de Toulon (UTLN)

Electronique

Introduction au traitement
et à la transmission de l'information

Contenu du cours

Un exemple : chaîne de transmission radio BWA (Broadband Wireless Access)



Objectifs du cours

Objectifs :

- Comprendre les principes de base de la transmission de l'information : modulation - amplification - filtrage
- Apprendre à associer des fonctions électroniques élémentaires pour réaliser une chaîne de traitement et de transmission de l'information.
- Maîtriser la dualité temps/fréquence.

Compétences minimales :

- Amplification en petits signaux et en puissance
- Modulation et opérations de traitement fréquentiel du signal
- Filtrage

Plan du Chapitre introductif

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension

- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale

- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Pourquoi amplifier un signal ?

- **Pourquoi amplifier un signal ?**

- **Entrée** : Enregistrement numérique, signal radio, signal médical (ECG...) : signal en mV ou μV et $mA \Rightarrow \mu W$.
- **Sortie** : Haut parleur (100W), Emetteur HF...

Pourquoi amplifier un signal ?

- **Pourquoi amplifier un signal ?**

- **Entrée** : Enregistrement numérique, signal radio, signal médical (ECG...) : signal en mV ou μV et $mA \Rightarrow \mu W$.
- **Sortie** : Haut parleur (100W), Emetteur HF...
- Il faut selon les cas, **augmenter la tension ou/et le courant** du signal d'entrée, et donc sa **puissance** :
 $\Rightarrow$ c'est le rôle principal d'un amplificateur.
- Un amplificateur doit également **éviter d'amplifier le bruit.**

Comment amplifier un signal ?

- **Différents types d'amplificateurs :**
 - **Petits signaux** : à l'intérieur de la chaîne de traitement électronique.
 - **Petits signaux différentiels** : idem en réduisant le bruit.
 - **De puissance** : permet de piloter des actionneurs électriques ou électromécanique en sortie. Différentes classes : **A, AB, B, C, D, E, F, G** et **H**.

Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire (1)

On appelle **montage** à émetteur, base, collecteur **commun**, un montage dans lequel l'émetteur, resp. la base ou le collecteur **sont reliés à la masse en petits signaux**.

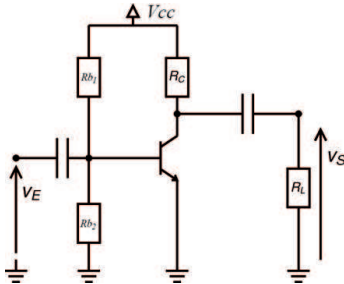
Montage classiques et utiles :

- **Montage émetteur commun**
 - Montage universel
 - $\Rightarrow$ **Amplificateur de puissance**
- **Montage base commune**
 - $\Rightarrow$ **Amplificateur de tension**
- **Montage collecteur commun**
 - $\Rightarrow$ **Amplificateur de courant**

Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : montage émetteur commun

Montage **émetteur commun**

Schéma petits signaux



Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : montage émetteur commun

Montage **émetteur commun**

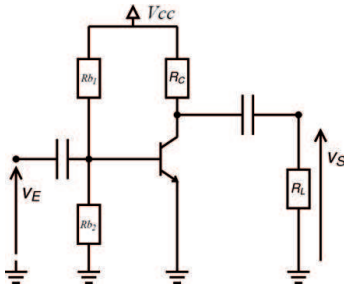
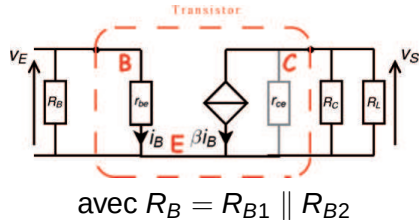
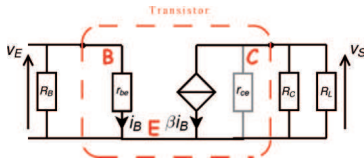


Schéma petits signaux



Amplification petits signaux : montage EC

Montage **émetteur commun** petits signaux



A noter que :
 $R_B \gg R_C \parallel R_L \gg r_{be}$

Propriétés :

- **Bonne amplification en tension :**

$$v_S \simeq - \frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{r_{be}} v_E$$

- **Bonne amplification en courant :**

$$i_S \simeq - \frac{\beta R_C}{R_L + R_C} i_E$$

- **Impédance d'entrée :**

$$Z_e = \frac{R_B r_{be}}{R_B + r_{be}} \simeq r_{be}$$

- **Impédance de sortie : $Z_S = R_C$**

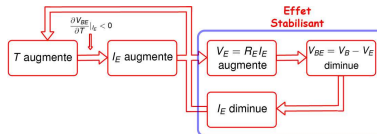
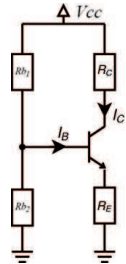
- $\Rightarrow$ **Amplificateur à "tout faire".**

- **Pb : emballement thermique**
(I_E polar. élevé)

Risque d'emballement thermique dans un montage à émetteur commun

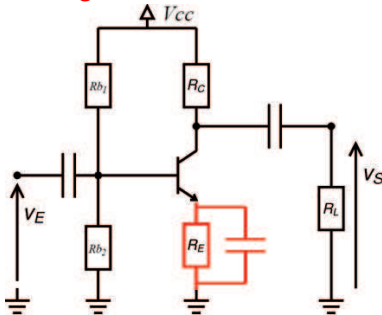
Risque d'emballement thermique dans un montage amplificateur :

- **Propriété nuisible** des bipolaires : $\frac{\partial V_{BE}}{\partial T} \Big|_{I_E} < 0$
La **tension** V_{BE} correspondant à un courant I_E fixé **diminue** quand la **température** T **augmente**.
- R_E contribue à stabiliser le courant I_E :



Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire (3)

Montage **émetteur commun corrigé**



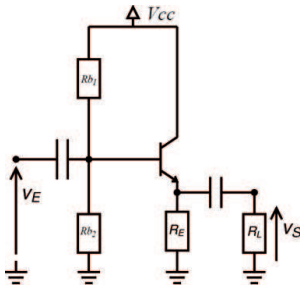
Propriétés :

- Rôle de R_E : éviter l'emballage thermique.
- Rôle de C : ne pas modifier le schéma petits signaux, et donc l'amplification.
- Bonne amplification en tension et en courant $\Rightarrow$ **montage amplificateur "universel"**.

Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : montage collecteur commun

Montage **collecteur commun**

Schéma petits signaux



Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : montage collecteur commun

Montage **collecteur commun**

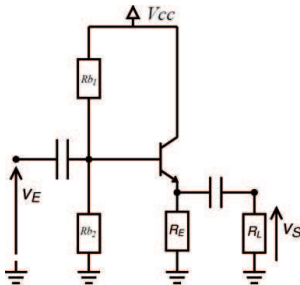
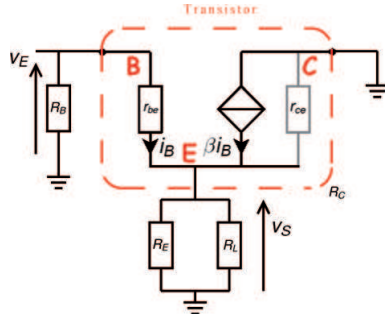


Schéma petits signaux

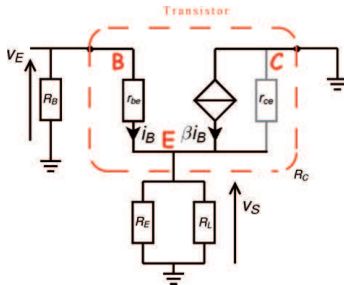


avec $R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$

Amplification petits signaux : montage CC

Montage **collecteur commun**

Propriétés



A noter que :
 $R_B \gg R_E \parallel R_L \gg r_{be}$

- **Gain $\simeq 1$ en tension :**

$$v_S \simeq \frac{\beta(R_E \parallel R_L)}{r_{be} + \beta(R_E \parallel R_L)} v_E \simeq v_E$$

- **Impédance d'entrée forte**

$$Z_e \simeq R_B \parallel (\beta(R_E \parallel R_L) + r_{be})$$

$$Z_e \simeq \beta(R_E \parallel R_L)$$

- **Bonne amplification en courant :**

$$i_S = \frac{i_L}{i_E} = \frac{v_S}{R_L} / \frac{v_E}{Z_E} \simeq \frac{Z_E}{R_L} \simeq \frac{\beta R_E}{R_E + R_L}$$

- **Impédance de sortie faible :**

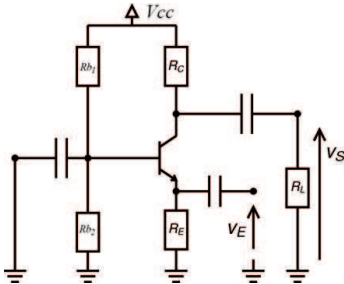
$$Z_s = \frac{V_0}{I_{CC}} = \frac{\beta R_E v_E}{r_{be} + \beta R_E} * \frac{r_{be}}{\beta v_E} \simeq \frac{r_{be}}{\beta}$$

- $\Rightarrow$ **Adaptation d'impédance et amplification de courant.**

Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : montage base commune

Montage **base commune**

Schéma petits signaux



Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : montage base commune

Montage **base commune**

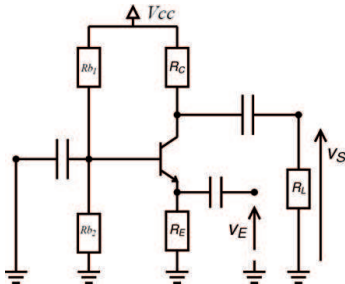
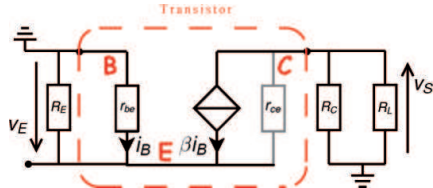
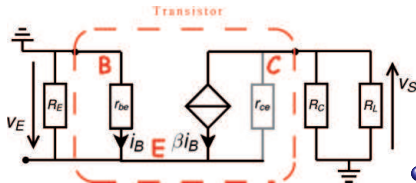


Schéma petits signaux



Amplification petits signaux : montage BC

Montage **base commune**



A noter que : $R_C \parallel R_L \gg r_{be}$

Propriétés

- **Bonne amplification en tension :**

$$v_S \simeq + \frac{\beta(R_C \parallel R_L)}{r_{be}} v_E$$

- **Gain < 1 en courant :**

$$i_S \simeq \frac{R_C \beta}{(R_C + R_L) \left(\frac{r_{be}}{R_E} + \beta + 1 \right)} i_E$$

$$\Rightarrow i_S \simeq \frac{R_C}{R_C + R_L} i_E$$

- **Impédance d'entrée :**

$$Z_e = \frac{v_E}{i_E} = \frac{v_E}{\frac{v_E}{R_E} + (\beta + 1) \frac{v_E}{r_{be}}} \simeq \frac{r_{be}}{\beta + 1}$$

- **Impédance de sortie : $Z_s \simeq R_C$**

- **$\Rightarrow$ conversion courant-tension et**

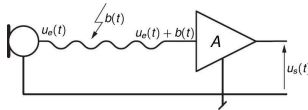
Amplification petits signaux à l'aide d'un transistor bipolaire : synthèse

	Emetteur Commun	Base Commune	Collecteur Commun
Impédance d'entrée	Moyenne <i>variable selon la polarisation, de l'ordre de quelques $k\Omega$</i>	Basse <i>ordre de grandeur : quelques dizaines Ω</i>	Elevée <i>Plus élevée qu'un montage émetteur commun</i>
Impédance de sortie	Moyenne <i>égale à R_c</i>	Moyenne <i>égale à R_c</i>	Basse <i>ordre de grandeur : quelques dizaines Ω</i>
Phase entrée/sortie	180°	Phase	Phase
Gain en tension	Elevé	Elevé	Très légèrement inférieur à 1
Utilisation	C'est le montage de base, on le retrouve partout.	Montage utilisé en HF du fait de sa bande passante supérieure à l'émetteur commun	C'est l'adaptateur d'impédance par définition

Amplification différentielle en petits signaux (1)

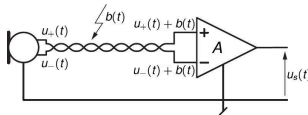
Pourquoi utiliser un amplificateur différentiel ?

- Un amplificateur normal amplifie le **signal** et le **bruit** :



$$u_s(t) = A(u_e + b)$$

- Un amplificateur différentiel amplifie la **différence** entre 2 signaux, le **bruit n'est donc pas amplifié** :



$$u_s(t) = A((u_+ + b) - (u_- + b)) = A(u_+ - u_-)$$

Amplification différentielle en petits signaux (2)

Mode différentiel et mode commun :

- Malheureusement, en pratique les gains sur chacune des entrées sont différents :

$$u_s(t) = Au_+ - (A + \epsilon)u_-$$

- On définit les tensions **différentielles** et **communes** :

$$u_{diff} = u_+ - u_- \text{ (correspond à deux fois le signal)}$$

$$u_{com} = \frac{u_+ + u_-}{2} \text{ (correspond au bruit)}$$

- Ce qui donne :

$$u_+ = u_{com} + \frac{u_{diff}}{2}$$

$$u_- = u_{com} - \frac{u_{diff}}{2}$$

Amplification différentielle en petits signaux (3)

On obtient donc en sortie :

$$\begin{aligned} u_s(t) &= Au_+ - (A + \epsilon)u_- \\ &= \epsilon u_{com} + \frac{(2A + \epsilon)}{2} u_{diff} \\ &\simeq \epsilon u_{com} + Au_{diff} \end{aligned}$$

- La **tension différentielle** $u_{diff} = u_+ - u_-$ correspond au **signal** est amplifiée d'un facteur $A_{diff} = A$
- La **tension commune** $u_{diff} = u_+ + u_- + 2b(t) = 2b(t)$ correspond au **bruit** est amplifiée d'un facteur $A_{com} = \epsilon$.

Amplification différentielle en petits signaux (4)

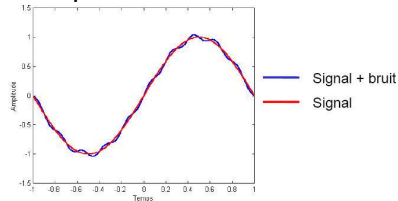
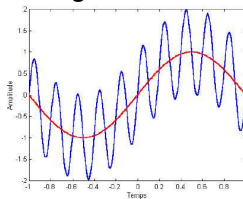
- On définit le **taux de réjection de mode commun** :

$$TRMC = \left| \frac{A_{diff}}{A_{com}} \right|$$

- En dB, cela donne :

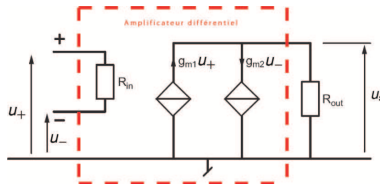
$$TRMC_{dB} = 20 \log \left(\left| \frac{A_{diff}}{A_{com}} \right| \right)$$

Signal avant et après amplification différentielle



Amplification différentielle en petits signaux : Application (1)

Amplificateur différentiel à transconductances :



- Caractéristiques de l'amplificateur : $g_{m1} = 100mA.V^{-1}$,
 $g_{m2} = 100.1mA.V^{-1}$, $R_{in} = 1M\Omega$
Caractéristiques de la charge : $R_{out} = 1k\Omega$
Tensions d'entrée : $u_+ = 6.1V$, $u_- = 6V$
- Déterminer le **TRMC** et la **tension de sortie**.

Amplification différentielle en petits signaux : Application (2)

- **Tension en sortie :**

$$\begin{aligned}u_s &= g_{m1}R_{out}u_+ - g_{m1}R_{out}u_- \\&= 100u_+ - 100.1u_- \\&= Au_+ - (A + \epsilon)u_-\end{aligned}$$

On obtient donc $A = 100$ et $\epsilon = 0.1$

- **Amplification différentielle :**

$$A_{diff} = A = 100$$

- **Amplification mode commun :**

$$A_{com} = \epsilon = 0.1$$

- **Taux de réjection de mode commun :**

$$TRMC = \left| \frac{A_{diff}}{A_{com}} \right| \simeq 1000 \Rightarrow TRMC_{dB} = 20\log(1000) = 60dB$$

Amplification différentielle en petits signaux : Application (3)

- **Tension en sortie :**

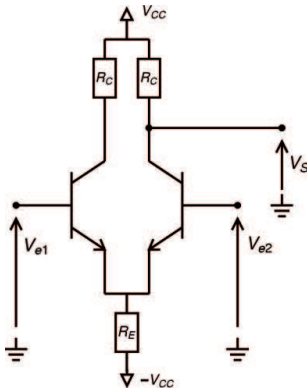
$$\begin{aligned}u_s &= A_{diff}(u_+ - u_-) + A_{com}\frac{u_+ + u_-}{2} \\&= 100 \times 0.1 - 0.1 \times 6.05 \\&= 10|_{diff} - 0.6|_{com} \\&= 9.4V\end{aligned}$$

- **Conclusions :**

- Malgré un TRMC de 60 dB, le **mode commun** n'est **pas rejeté intégralement** (loin de là !).
- Le **mode commun** amplifie la tension **commune** qui peut être très **grande** ($V_C > 1000V_D$) devant la tension **différentielle** : par exemple le bruit 50/60Hz dans les signaux médicaux (électrocardiogramme...).

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (1)

Paire différentielle



- **Entrées** : V_{e1} et V_{e2} .
- **Sortie** : collecteur d'un des transistors
- **Hypothèse forte** : T_1 et T_2 appariés $\Leftrightarrow$ même circuit : β identiques.

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (2)

Paire différentielle : polarisation

- Pour le calcul de la polarisation : $V_{e1} = V_{e2} = 0$
- Par symétrie : $I_{E1} = I_{E2} = I_E$
- Dans une maille $\{masse - E - B\}$, on a : $I_E = \frac{V_{CC} - 0.7}{2R_E}$
- Tension continue en sortie : $V_S = V_{CC} - R_C I_E$

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (3)

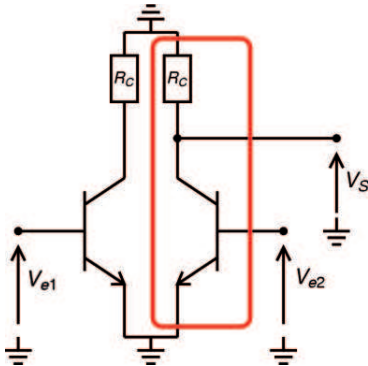
Paire différentielle : petits signaux

Mode différentiel : $v_{e1} = -v_{e2} = v_e$

- $I_{E1} = I_E + i_{e1}$
 $I_{E2} = I_E - i_{e2}$ avec I_E le courant en continu.
- Pour des signaux de faible amplitude : $i_{e1} = i_{e2}$ et donc :
 $I_{R_E} = I_{E1} + I_{E2} = 2I_E = cte$
- On a donc $U_{R_E} = 2R_E I_E = cte \Rightarrow E$ a donc un potentiel fixe $\Rightarrow$ **en petit signaux, c'est une masse**

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (4)

Schéma équivalent en mode différentiel petits signaux



- Equivalent à 2 montages **émetteur commun** découplés.

- $$v_S = -\frac{\beta R_C}{r_{be}}(-v_E) = \frac{\beta R_C}{r_{be}} v_E$$

- **Amplification différentielle :**

$$A_{diff} = \frac{\beta R_C}{r_{be}} \gg 1$$

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (5)

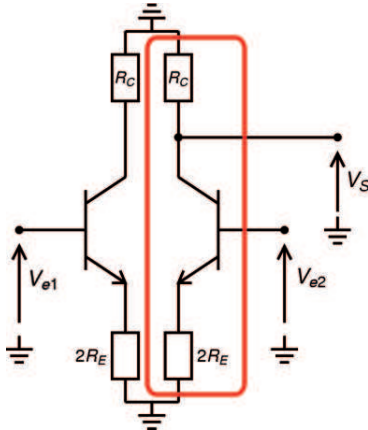
Paire différentielle : petits signaux

Mode commun : $v_{e1} = v_{e2} = v_e$

- $I_{E1} = I_E + i_{e1}$
 $I_{E2} = I_E + i_{e2}$ avec I_E le courant en continu.
- Pour des signaux de faible amplitude : $i_{e1} = i_{e2}$ et donc :
 $I_{R_E} = I_{E1} + I_{E2} = 2I_E + 2i_e$
- On a donc $U_{R_E} = 2R_E I_E + 2R_E i_e \Rightarrow$ **en petit signaux (i_e), on obtient une résistance $2R_E$ reliée à la masse.**

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (6)

Schéma équivalent en mode commun petits signaux



- Equivalent à 2 montages **émetteur commun stabilisé** découplés.

- $$V_S = -\frac{R_C}{2R_E} V_E$$

- **Amplification différentielle :**

$$A_{com} = -\frac{R_C}{2R_E} \ll 1$$

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle (7)

Taux de Réjection de Mode Commun (TRMC) :

$$TRMC = \left| \frac{A_{diff}}{A_{com}} \right| = \frac{2\beta R_E}{r_{be}}$$

Intérêt de la paire différentielle :

- Impédance d'entrée élevée.
- TRMC élevé (> 60dB).
- Rq : on peut les augmenter encore si on place un transistor Darlington à chaque entrée.

⇒ Utilisation comme étage d'entrée des ampli-op.

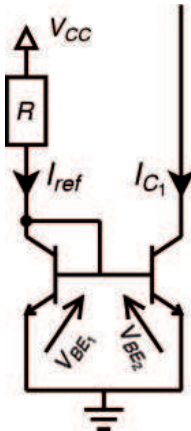
Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle - améliorations

Limitations de la paire différentielle :

- **TRMC** : pas assez élevée $\Rightarrow R_E \nearrow \Rightarrow V_{CC} \nearrow$ (statique) $\Rightarrow$ **Impossible !**
 $\Rightarrow R_E \nearrow$ en **dynamique** : on utilise à la place de R_E une source de courant constituée de 2 transistors appelée : **miroir de courant**.
- **Impédance d'entrée** : pas assez élevée $\Rightarrow$ on cascade 2 transistors.
 $\Rightarrow$ **montage Darlington**.

Miroir de courant

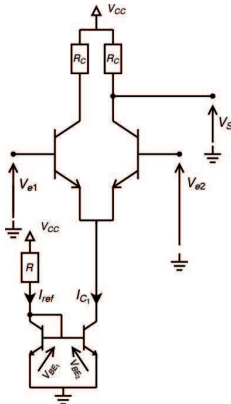
Miroir de courant



- le transistor T_2 fonctionne en diode.
- $V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2} \simeq I_{ref}$
- **Le miroir de courant recopie le courant I_{ref} fixé par R :**
$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - 0.6}{R}$$
- Résistance interne du miroir de courant : r_{ce} (très grande).

Amplification différentielle en petits signaux : Paire différentielle - améliorations

Paire différentielle avec source de courant



- r_{ce} (de T_1) joue le rôle de R_E .
- $\Rightarrow TRMC = \left| \frac{A_{diff}}{A_{com}} \right| = \frac{2\beta r_{ce}}{r_{be}}$
- $TRMC \simeq 90dB$: **bien meilleur**

Plan

1 Fonctions électroniques

- Amplification en petits signaux
- **Amplification de puissance**
- Sources de courant et tension

2 Dualité temps-fréquence

- Analyse temps-fréquence
- Outils d'analyse spectrale

3 Filtrage

- Filtrage du premier ordre
- Filtrage du second ordre

Classification des amplificateurs de puissance

On classe les amplificateurs en fonction de l'**angle de conduction** des transistors : les caractéristiques essentielles sont le **rendement** et la **distortion**.

- **Classe A** : $\alpha = 360^\circ$, (T conduit tout le temps)
⇒ **très faible distortion - mauvais rendement**
- **Classe B push-pull** : $\alpha = 180^\circ$, (T conduit la moitié du temps)
⇒ **distortion importante - bon rendement**
- **Classe AB push-pull** : $\alpha = 180^\circ + \varepsilon$, (T conduit un peu plus de la moitié du temps)
⇒ **distortion faible - bon rendement**
- **Classe C** : $\alpha < 180^\circ$, (T conduit moi de la moitié du temps)
⇒ **distortion très importante - très bon rendement**

Rendement et distortion dans un montage amplificateur

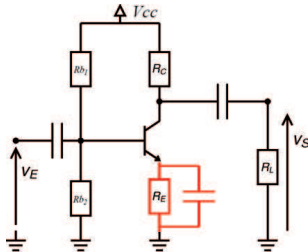
- Le **rendement** d'un amplificateur est le rapport de la puissance utile sur la puissance d'alimentation :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{alim}}$$

- La **distortion** mesure la déformation du signal de sortie par rapport au signal d'entrée correspondant amplifié (de manière parfaite).

Amplificateur de classe A

Amplificateur de classe A : $\alpha = 360^\circ$ (T conduit tout le temps). Exemple : montage à émetteur commun.



- **Autour du point de repos :**

$$v_S(t) = U_{S0} + \hat{U}_S \sin(\omega t)$$

$$i_S(t) = I_{S0} + \hat{I}_S \sin(\omega t)$$

- **Si la polarisation est optimale :**

$$U_{S0} = \hat{U}_S = \frac{V_{CC}}{2}$$

$$I_{S0} = \hat{I}_S$$

- **Puissance utile :**

$$P_u = \overline{\hat{U}_S \hat{I}_S \sin^2(\omega t)} = \frac{\hat{U}_S \hat{I}_S}{2} = \frac{V_{CC} I_{S0}}{2}$$

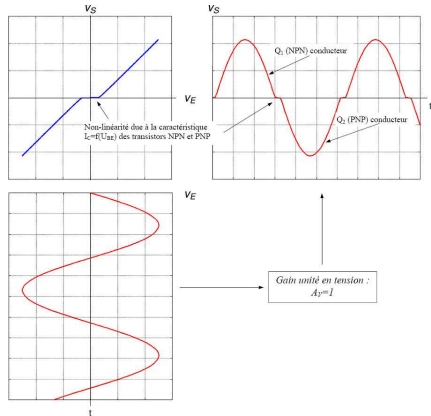
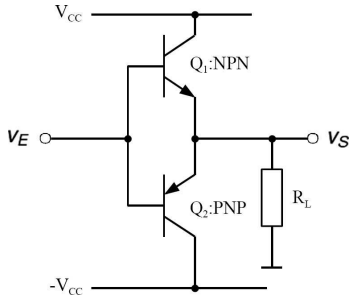
- **Puissance absorbée :** $P_a = V_{CC} I_{S0}$

- **Rendement :**

$$\eta_{max} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{1}{2} = 25\% \Rightarrow \text{faible}$$

Amplificateur push-pull de classe B

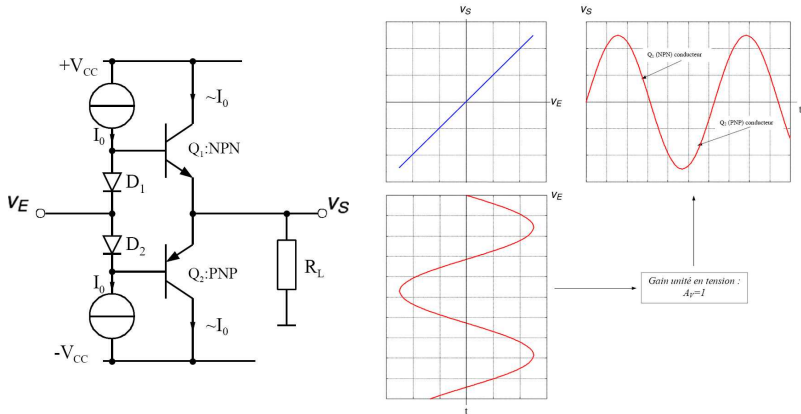
Fonctionnement du push-pull de classe B : $\alpha = 180^\circ$



⇒ **grosse distorsion** : peu utilisé tel quel...

Amplificateur push-pull de classe AB

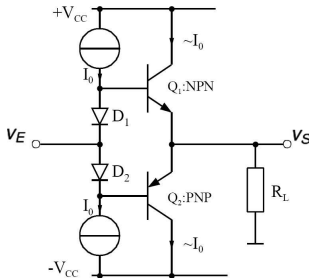
Fonctionnement du push-pull de classe AB : $\alpha = 180^\circ + \varepsilon$



⇒ **peu de distorsion** : gain en courant uniquement

Amplificateur push-pull de classe AB

Fonctionnement du push-pull de classe AB : $\alpha = 180^\circ + \varepsilon$



- **Autour du point de repos (nul) :**
 $v_S(t) = \widehat{U}_S \sin(\omega t)$ et $i_S(t) = \widehat{I}_S \sin(\omega t)$

- **Si la polarisation est optimale :**
 $\widehat{U}_S = V_{CC}$ et $\widehat{I}_S = \frac{V_{CC}}{R_L}$

- **Puissance utile :**
 $P_u = \overline{\widehat{U}_S \widehat{I}_S \sin^2(\omega t)} = \frac{\widehat{U}_S \widehat{I}_S}{2} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L}$

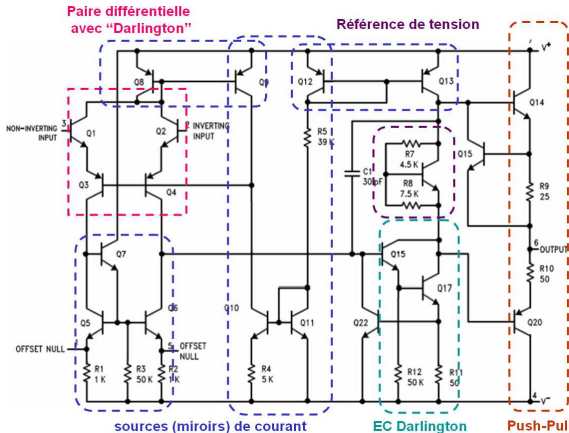
- **Puissance absorbée : $P_a = \frac{2V_{CC}^2}{\pi R_L}$**

- **Rendement :**
 $\eta_{max} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\pi}{4} = 78.5\% \Rightarrow \text{bon}$

Exemple de chaîne d'amplification

Schéma d'un amplificateur opérationnel (LM 741)

A.O. = Paire différentielle + Émetteur commun + Push-Pull



Plan

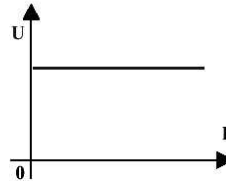
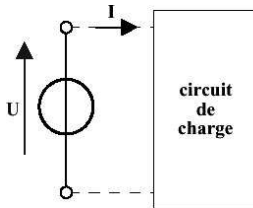
- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension

- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale

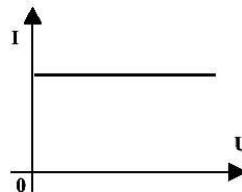
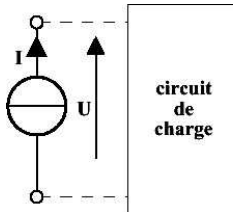
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Sources parfaites

- Source de tension idéale :

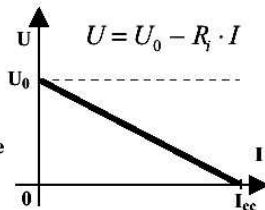
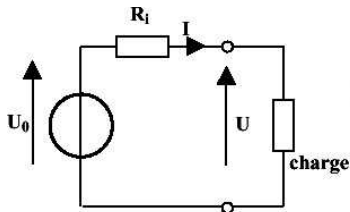


- Source de courant idéale :

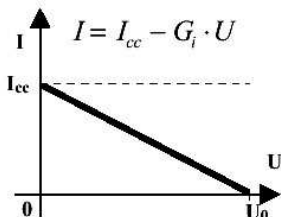
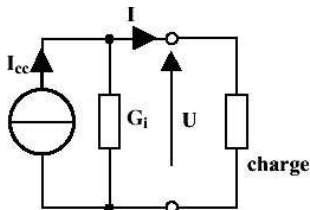


Sources non parfaites

• Source de tension réelle :



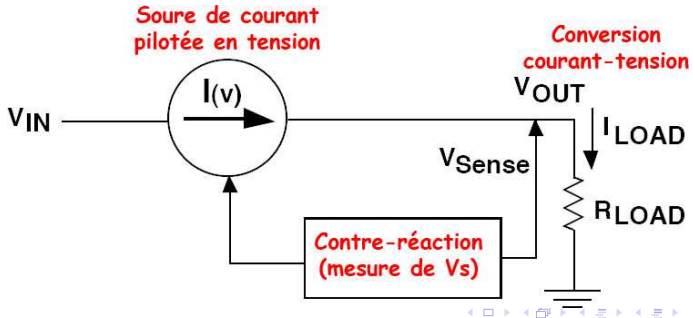
• Source de courant réelle :



Principe de fonctionnement

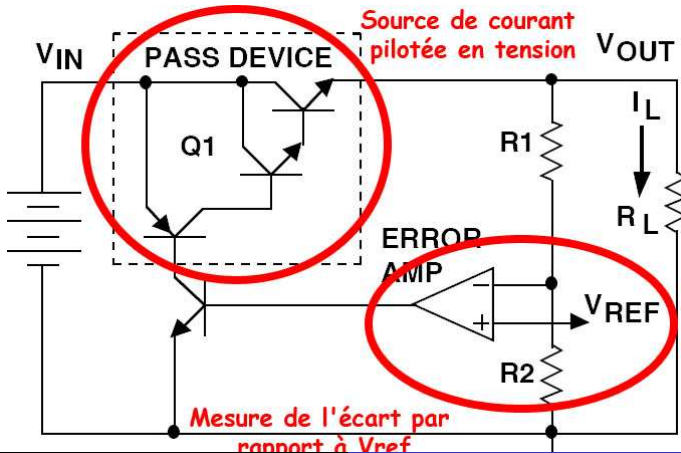
En pratique, il n'existe que des sources de courant régulées

- **Régulateur de courant** = Source de courant asservie.
- **Régulateur de tension** = Source de courant asservie et pilotée en tension + conversion courant/tension.



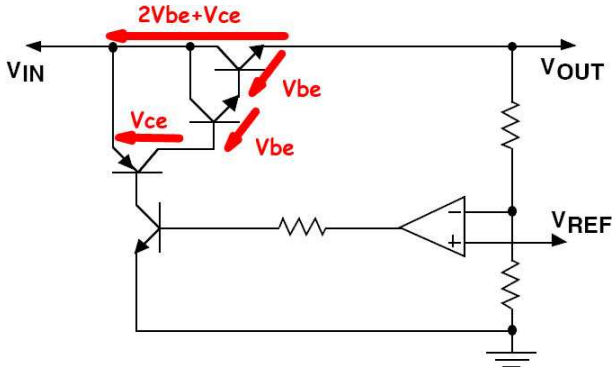
Principe de fonctionnement

Source de courant asservie et pilotée en tension



Principe de fonctionnement

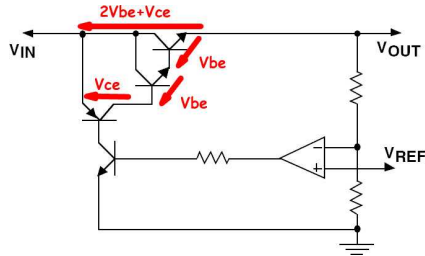
Conversion tension/courant contre-réactionnée



Principe de fonctionnement

Conversion tension/courant contre-réactionnée

- La contre réaction est violente : fort gain
 $I_{load} = \beta_1 \beta_2 \beta_3 I_{diff} \rightarrow$ peu d'erreur sur V_{out}
- Grosse chute de tension (dropout) :
 $\Delta V = 2V_{BE} + V_{CE} \simeq 2.5V$

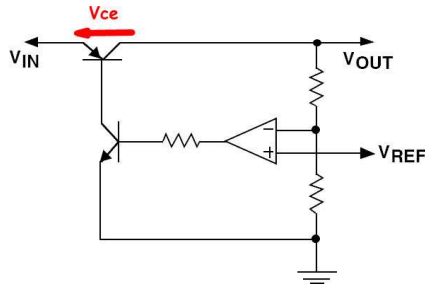


Pour avoir 5V en sortie il faut alimenter au moins sous 7.5V

Principe de fonctionnement

Conversion tension/courant (low dropout)

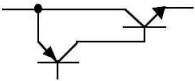
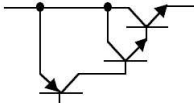
- La contre réaction est douce : gain moyen $I_{load} = \beta_1 I_{diff}$
-> **plus d'erreur** sur V_{out}
- **Faible chute de tension** (low dropout) :
 $\Delta V = V_{CE} \simeq 0.7V$



En contrepartie, le courant dans la pin de masse est plus fort.

Principe de fonctionnement

Comparaison des types de régulateurs

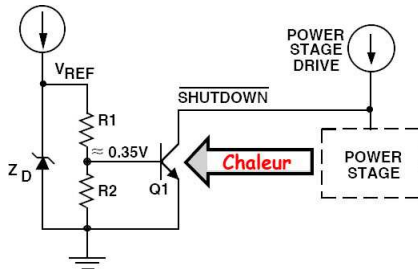
LDO	QUASI-LDO	STD
		
$V_D = \text{PNP SAT}$ $\sim 0.1\text{V to } 0.7\text{V}$	$V_D = V_{BE} + \text{PNP SAT}$ $\sim 0.9\text{V to } 1.5\text{V}$	$V_D = 2 V_{BE} + \text{PNP SAT}$ $\sim 1.7\text{V to } 2.5\text{V}$
$I_G \leq 20 - 40 \text{ mA}$	$I_G \leq 10 \text{ mA}$	$I_G \leq 10 \text{ mA}$
$I_{L(\text{MAX})} = 1\text{A}$	$I_{L(\text{MAX})} = 7.5\text{A}$	$I_{L(\text{MAX})} = 10\text{A}$

- Fonctionnement sur **batterie** : LDO (dropout faible)
- Fonctionnement sur **secteur** : STD (plus de puissance)

Fonctionnalités additionnelles

Protection des régulateurs régulateurs

- Limitation en **tension**.
- Limitation **thermique** : Circuit de protection thermique
Si la chaleur augmente, Q1 devient passant et l'étage puissance n'est plus alimenté.

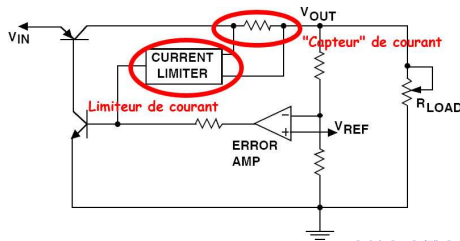


Fonctionnalités additionnelles

Protection des régulateurs régulés

- Limitation en **courant** : Circuit de protection contre les sur-intensités

Si l'**intensité** dans la charge est trop **grande**, le limiteur de courant détourne une partie du courant de contre-réaction :
⇒ le **courant de base diminue** et le **courant de charge** aussi.



Régulateur linéaire commercial

Régulateur linéaire de type 78XX (5V pour le 7805)

78XX

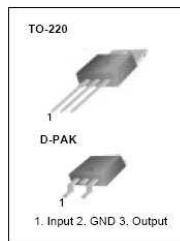
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

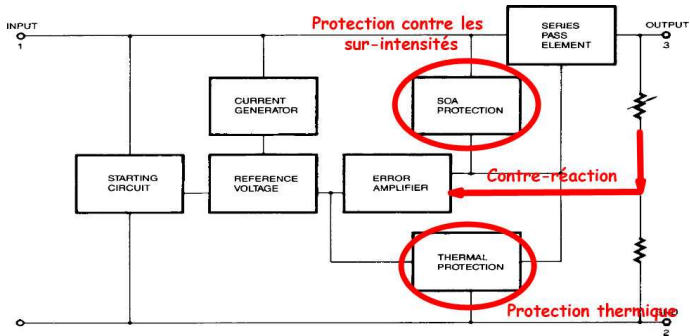
Description

The KA78XX/KA78XXA series of three-terminal positive regulator are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



Régulateur linéaire commercial

Régulateur linéaire de type 78XX : Schéma bloc interne



Le circuit est compensé et protégé.

Régulateur linéaire commercial

Régulateur linéaire de type 78XX : Caractéristiques

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input Voltage (for $V_O = 5V$ to $18V$)	V_I	35	V
(for $V_O = 24V$)	V_I	40	V
Thermal Resistance Junction-Cases (TO-220)	$R_{\theta JC}$	5	$^{\circ}C/W$
Thermal Resistance Junction-Air (TO-220)	$R_{\theta JA}$	65	$^{\circ}C/W$
Operating Temperature Range (KA78XXA/R)	T_{OPR}	$0 \sim +125$	$^{\circ}C$
Storage Temperature Range	T_{STG}	$-65 \sim +150$	$^{\circ}C$

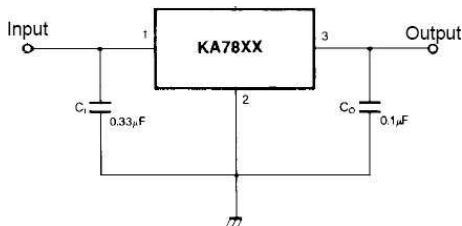
Electrical Characteristics (KA7805/KA7805R)

(Refer to test circuit, $0^{\circ}C < T_J < 125^{\circ}C$, $I_O = 500mA$, $V_I = 10V$, $C_I = 0.33\mu F$, $C_O = 0.1\mu F$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	KA7805			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}C$ $5.0mA \leq I_O \leq 1.0A$, $P_O \leq 15W$ $V_I = 7V$ to $20V$	4.8	5.0	5.2	V
		$V_O = 7V$ to $25V$	4.75	5.0	5.25	V
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $V_O = 8V$ to $18V$	62	73	-	dB
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1A$, $T_J = +25^{\circ}C$	-	2	-	V
Output Resistance	r_O	$f = 1KHz$	-	15	-	$m\Omega$
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35V$, $T_A = +25^{\circ}C$	-	230	-	mA
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}C$	-	2.2	-	A

Régulateur linéaire commercial

Régulateur linéaire de type 78XX : Schéma d'application



En régulation de tension, l'entrée et la sortie du 78XX sont couplées à la masse à l'aide de condensateurs (destinées à fournir l'énergie en cas de pic de consommation).

Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Dualité Temps-Fréquence

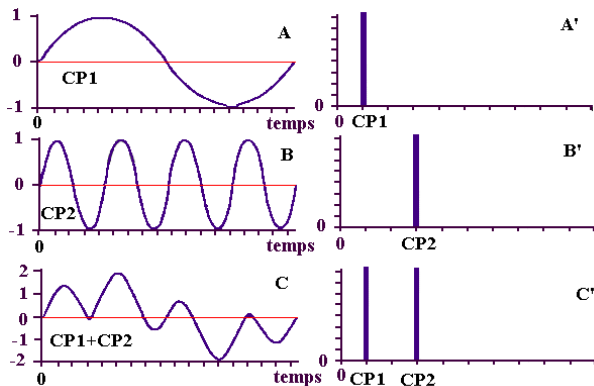


fig: Dualité temps-fréquence

Dualité Temps-Fréquence

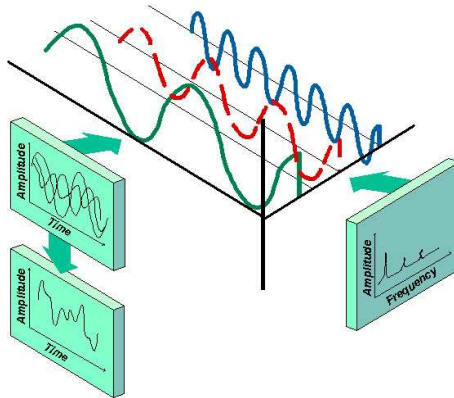


fig: Dualité temps-fréquence

Dualité Temps-Fréquence

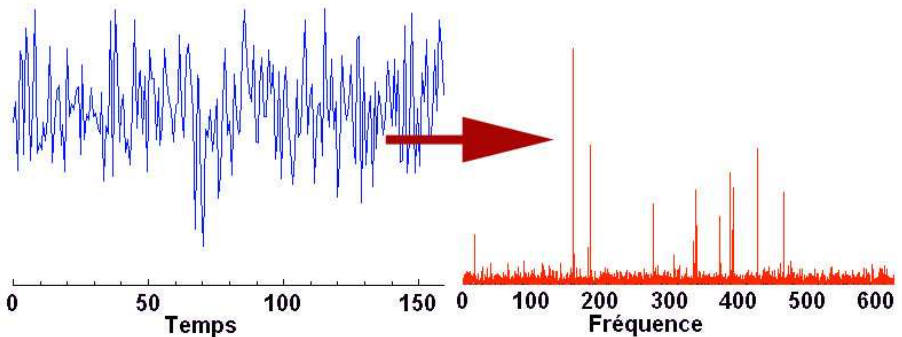


fig: Dualité temps-fréquence sur un signal réel

Pourquoi utiliser la représentation fréquentielle

En pratique, on rencontre de nombreux signaux **périodiques** : ils peuvent se décomposer (voir cours sur la décomposition en série de Fourier) en **sinusoïdes** de la forme :

$$u(t) = A \sin(\omega_0 t + \Phi)$$

- La description temporelle (sinusoïde) est redondante : il n'est pas utile de connaître la valeur de U à tout instant pour caractériser le signal.
- La connaissance de la **fréquence** ω_0 et de la **phase** Φ est suffisante $\Rightarrow$ **représentation fréquentielle** ou **complexe** du signal.

$$u(t) = A \sin(\omega_0 t + \Phi) \quad \Rightarrow \quad \underline{U} = A e^{j\Phi}$$

Représentation fréquentielle : Impédances

Le tableau suivant récapitule pour les 2 composants de base, les expressions des relations courant-tension en temporel et en complexe en **convention récepteur** :

	Relation U-I (temporel)	Relation U-I (complexe)	Impédance (Ohm)
Résistance	$U = RI$	$\underline{U} = R\underline{I}$	R
Condensateur	$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{d(u_C)}{dt}$	$\underline{U_C} = \frac{1}{jC\omega} \underline{I}$	$\frac{1}{jC\omega}$
Inductance	$u_L = L \frac{di}{dt}$	$\underline{U_L} = jL\omega \underline{I}$	$jL\omega$

Représentation fréquentielle : Fonction de transfert

Considérons à présent un bloc (quadripôle) constitué de composants linéaires. Pour le caractériser, il faut déterminer :

- **L'amplification A :**

égale au rapport de l'amplitude du signal de sortie sur celle du signal d'entrée pour chacune des fréquences possibles du signal.

$$A(j\omega) = \frac{|U_s(j\omega)|}{|U_e(j\omega)|}$$

- **Le déphasage φ :**

égal à la différence entre la phase (argument) du signal de sortie et la phase du signal d'entrée pour chacune des fréquences possibles du signal.

$$\varphi(j\omega) = \arg U_s(j\omega) - \arg U_e(j\omega)$$

Représentation fréquentielle : Fonction de transfert

Pour simplifier, on utilise la **fonction de transfert** : **Rapport de l'amplitude complexe de la sortie sur celle de l'entrée** :

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{U}_s(j\omega)}{\underline{U}_e(j\omega)}$$

A partir de la fonction de transfert, on obtient :

- **L'amplification** :

$$A(j\omega) = |\underline{H}(j\omega)| = \left| \frac{\underline{U}_s(j\omega)}{\underline{U}_e(j\omega)} \right|$$

- **La phase** :

$$\varphi(j\omega) = \arg \underline{H}(j\omega) = \arg \frac{\underline{U}_s(j\omega)}{\underline{U}_e(j\omega)} = \arg \underline{U}_s(j\omega) - \arg \underline{U}_e(j\omega)$$

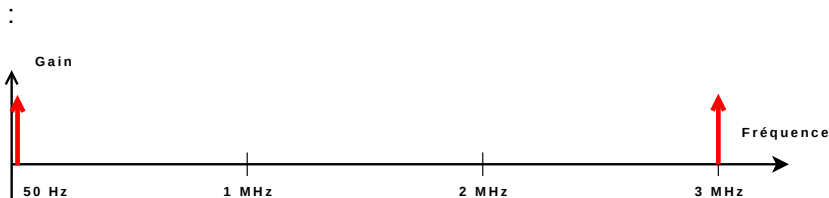
Représentation fréquentielle : Fonction de transfert

Comment représenter une fonction de transfert ?

Echelle des fréquences (Abscisse du graphe) :

Question : Comment représenter sur un même graphe les fréquences correspondant par exemple au secteur (50Hz) et à un oscillateur à quartz de 3MHz ?

Représentation avec échelle linéaire



Problème : la représentation de la composante à 50Hz est très écrasée.

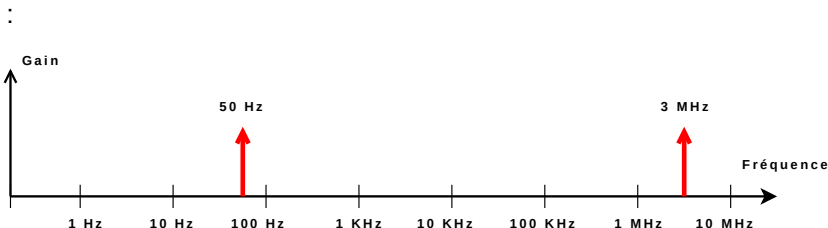
Représentation fréquentielle : Fonction de transfert

Comment représenter une fonction de transfert ?

Echelle des fréquences (Abscisse du graphe) :

Idée : espacer les fréquences de la même distance à chaque fois qu'on les multiplie par 10 $\Rightarrow$ **Echelle logarithmique**

Représentation avec échelle logarithmique



Intérêt : On peut représenter de manière **claire** une **large** gamme de fréquence.

Représentation fréquentielle : Fonction de transfert

Comment représenter une fonction de transfert ?

Echelle des amplifications (Ordonnée du graphe) :

On a le même problème que pour les fréquences : le graphe doit faire apparaître une dynamique d'amplification importante, typiquement un facteur 10000 ou plus. On a donc recours à l'**échelle logarithmique**.

On définit le **gain en décibel** par :

$$G_{dB} = 20 \log A$$

Représentation fréquentielle : Fréquence de coupure

La **fréquence de coupure** f_c est la fréquence pour laquelle le quadripôle a une amplification en **tension ou courant** linéaire égale à son **amplification maximale divisée par $\sqrt{2}$** .

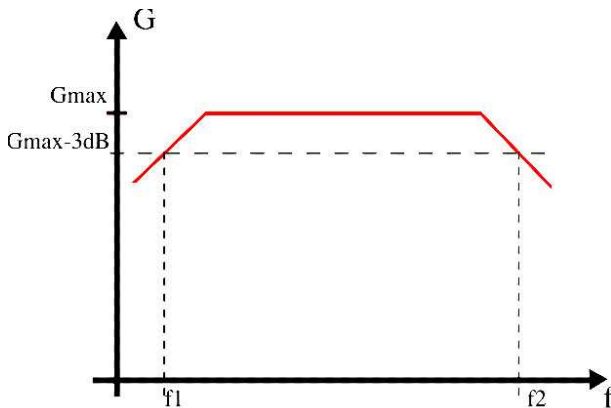
$$A(f_c) = \frac{A_{max}}{\sqrt{2}}$$

En dB, cela correspond à :

$$\begin{aligned} G_{dB}(f_c) &= 20 \log \left(\frac{A_{max}}{\sqrt{2}} \right) = 20(\log A_{max} - \log \sqrt{2}) \\ &= G_{max_{dB}} - 10 \log 2 \\ G_{dB}(f_c) &= G_{max_{dB}} - 3dB \end{aligned}$$

La **bande passante à $-3dB$** est la plage de fréquences pour lesquelles le gain est compris entre $G_{max_{dB}} - 3dB$ et $G_{max_{dB}}$.

Représentation fréquentielle : Fréquence de coupure



La **bande passante à -3dB** est la plage de fréquences pour lesquelles le gain est compris entre $G_{\max_{\text{dB}}} - 3\text{dB}$ et $G_{\max_{\text{dB}}}$.

Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

L'analyse spectrale

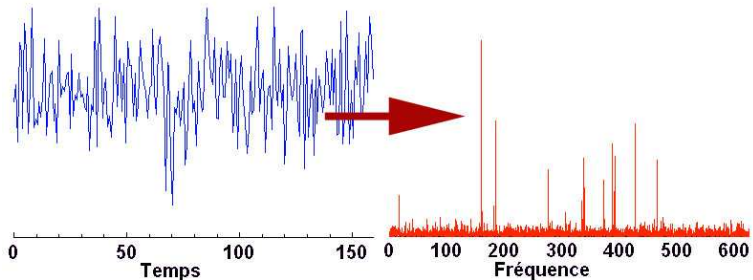


fig: Comment passer du domaine temporel au domaine fréquentiel ?

Un exemple : sonogramme d'une gamme au piano

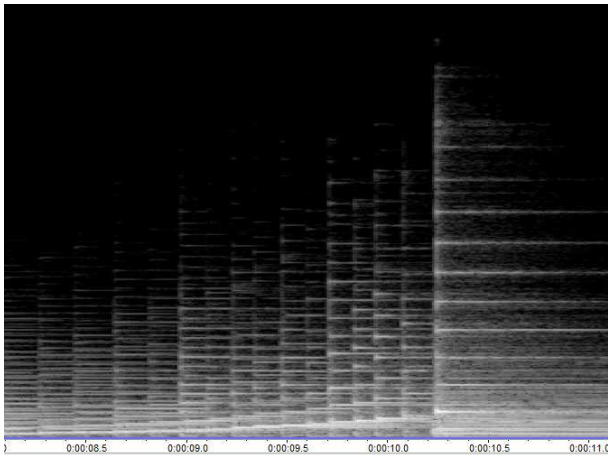
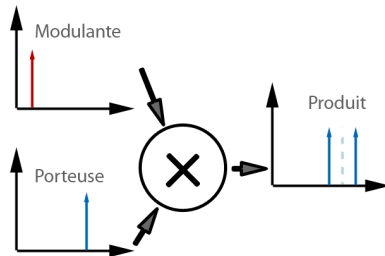


fig: Gamme au piano

Bases de l'analyse spectrale : la multiplication de signaux - transposition de fréquence idéale

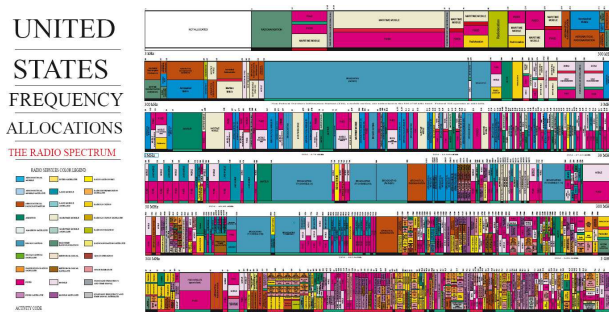
- **Signal** : $s(t) = A \sin(Bt)$
- **Porteuse** : $p(t) = P_0 \sin(\omega_0 t)$
- **Produit** : $s(t) * p(t) = A \sin(Bt) * P_0 \sin(\omega_0 t)$

$$s(t) * p(t) = \frac{1}{2}AP_0 [\cos(\omega_0 - B)t - \cos(\omega_0 + B)t]$$



Pourquoi moduler un signal ?

- Le canal de transmission n'est pas adapté à la fréquence du signal.
- Le signal n'est pas dans les bandes de fréquences autorisées.



Bases de l'analyse spectrale : application à la modulation

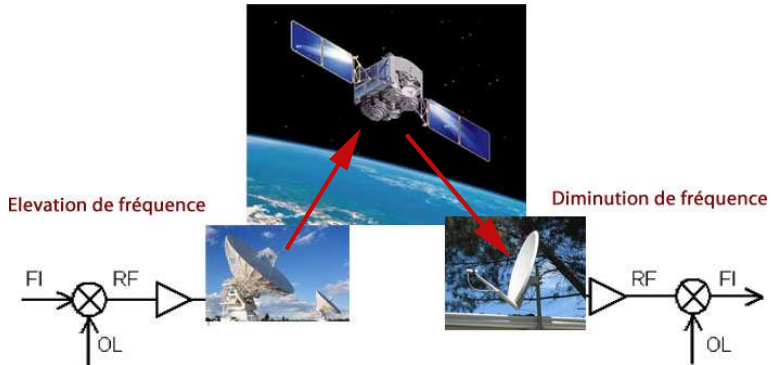
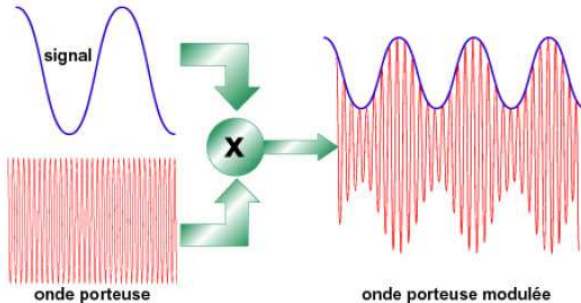


fig: Principe de la transmission satellite (12-13 GHz)

Bases de l'analyse spectrale : application à la modulation d'amplitude

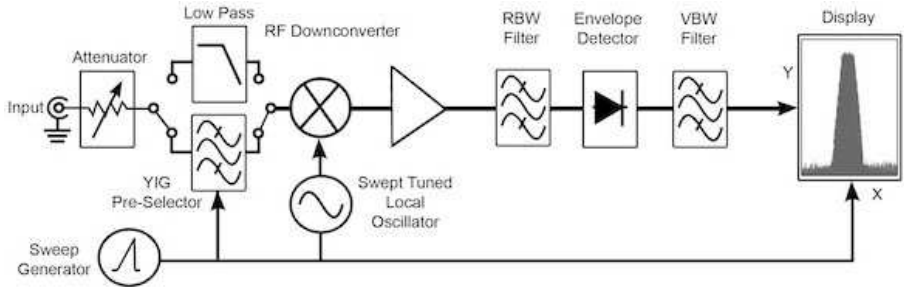
modulation d'amplitude (MA)



Modulation AM radiodiffusion :

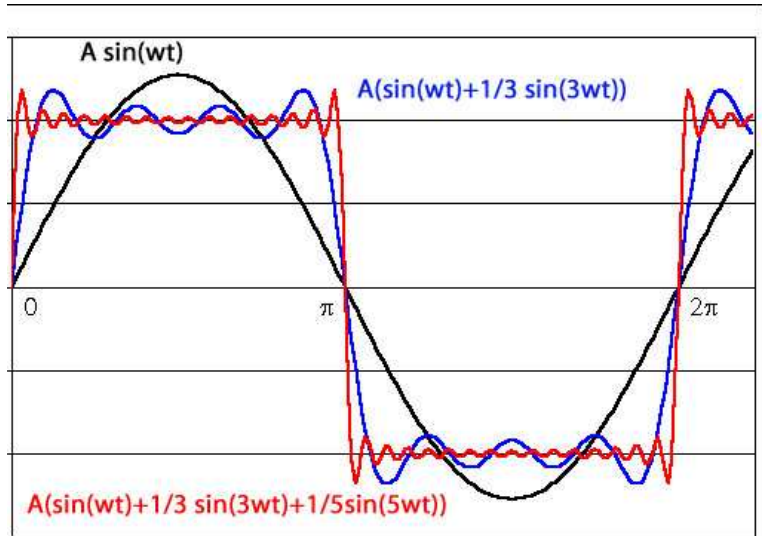
- Grandes ondes : 150 kHz - 260 kHz
- Ondes courtes : 2.3 MHz - 26 MHz

Bases de l'analyse spectrale : application à l'analyseur de spectre par balayage



- Transposition de fréquence à l'aide d'un oscillateur de fréquence pilotée.
- Y : amplitude de l'enveloppe du signal transposé et filtré.
- X : fréquence du signal sélectionné.

Un outil performant : la transformée de Fourier



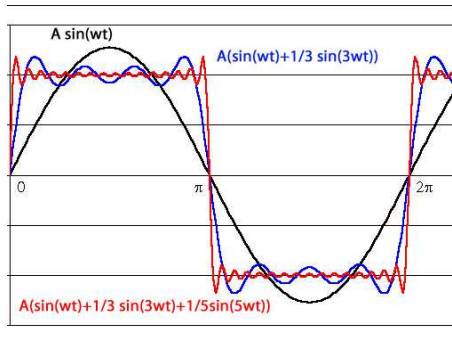
Un outil performant : la transformée de Fourier

Transformée de Fourier du signal $f(t)$:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{i\omega t} dt$$

- Opération à temps continu
- Assez difficile à calculer

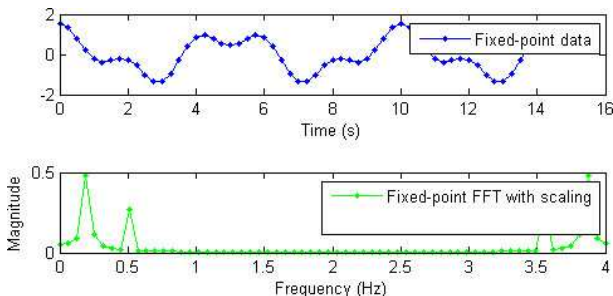
Un outil performant : la transformée de Fourier



Exemple du signal créneau d'amplitude A :

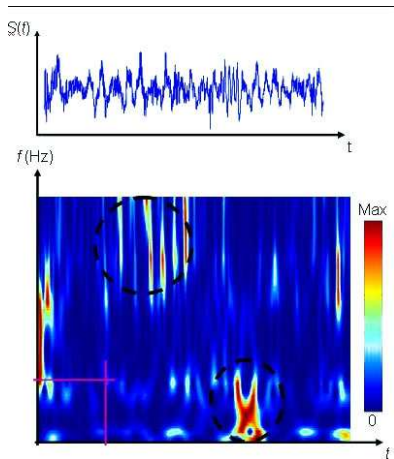
$$F(\omega) = \frac{4A}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin((2n+1)\omega t)}{2n+1}$$

La FFT : une version rapide de la transformée de Fourier



- Une transformée de Fourier à temps discret.
- Calculable sur des processeurs embarqués (DSP).

Les ondelettes : une amélioration de la FFT



Transformée en ondelettes :

- Permet une analyse temps fréquence
- Calculs complexes (et hors programme)
- Il existe des versions à temps discret et rapides(ex : fast Symlet)

Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

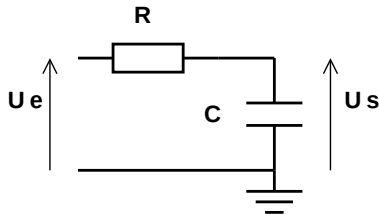
Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 1er ordre

On étudie le circuit suivant :



$$\begin{aligned}\underline{H}(j\omega) &= \frac{\underline{U}_s(j\omega)}{\underline{U}_e(j\omega)} = \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_C} \\ &= \frac{\frac{1}{jC\omega}}{R + \frac{1}{jC\omega}} = \frac{1}{1 + jRC\omega}\end{aligned}$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 1er ordre

On en déduit les grandeurs caractéristiques :

- Amplification :

$$\begin{aligned} A = |\underline{H}(j\omega)| &= \left| \frac{1}{1 + jRC\omega} \right| \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \end{aligned}$$

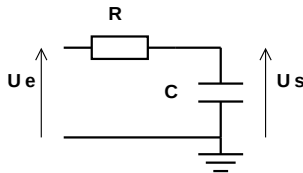
- Phase :

$$\begin{aligned} \varphi = \arg \underline{H}(j\omega) &= \arg 1 - \arg (1 + jRC\omega) \\ &= 0 - \tan^{-1} \left(\frac{RC\omega}{1} \right) \\ &= -\tan^{-1}(RC\omega) \end{aligned}$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 1er ordre

Représentation de la fonction de transfert du filtre du premier ordre étudié :



- Gain en décibels :

$$G = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}} \right)$$

- Phase :

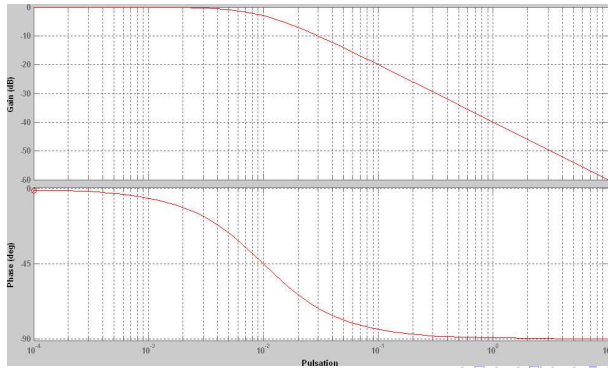
$$\varphi = -\tan^{-1}(RC\omega)$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 1er ordre

Représentation de la fonction de transfert du filtre du premier ordre étudié :

On choisit ici $\tau = RC = 0.01s$



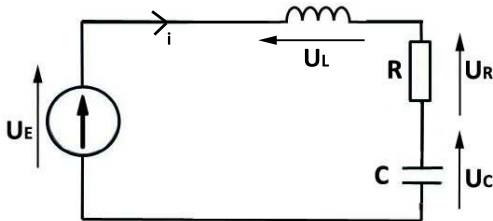
Plan

- 1 Fonctions électroniques
 - Amplification en petits signaux
 - Amplification de puissance
 - Sources de courant et tension
- 2 Dualité temps-fréquence
 - Analyse temps-fréquence
 - Outils d'analyse spectrale
- 3 Filtrage
 - Filtrage du premier ordre
 - Filtrage du second ordre

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 2e ordre

On étudie le circuit suivant :



$$\begin{aligned}\underline{H}(j\omega) &= \frac{\underline{U}_C(j\omega)}{\underline{U}_E(j\omega)} = \frac{\underline{Z}_C}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_C + \underline{Z}_L} \\ &= \frac{\frac{1}{jC\omega}}{R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega}} = \frac{1}{1 + jRC\omega - LC\omega^2}\end{aligned}$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 2e ordre

On en déduit les grandeurs caractéristiques :

- Amplification :

$$\begin{aligned} A = |\underline{H}(j\omega)| &= \left| \frac{1}{1 + jRC\omega - LC\omega^2} \right| \\ &= \frac{1}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} \end{aligned}$$

- Phase :

$$\begin{aligned} \varphi = \arg \underline{H}(j\omega) &= \arg 1 - \arg (1 + jRC\omega - LC\omega^2) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{RC\omega}{1 - LC\omega^2} \right) \end{aligned}$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 2e ordre

Asymptotes de la fonction de transfert du filtre du second ordre étudié :

- Aux hautes fréquences : $\omega \rightarrow +\infty$

$$G = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} \right) \simeq 20 \log \left(\frac{1}{LC\omega^2} \right)$$

$$\simeq -40 \log(\sqrt{LC}\omega)$$

$$\varphi = -\pi$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 2e ordre

Asymptotes de la fonction de transfert du filtre du second ordre étudié :

- Aux basses fréquences : $\omega \rightarrow 0$

$$G = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} \right) \simeq 20 \log 1 \simeq 0$$

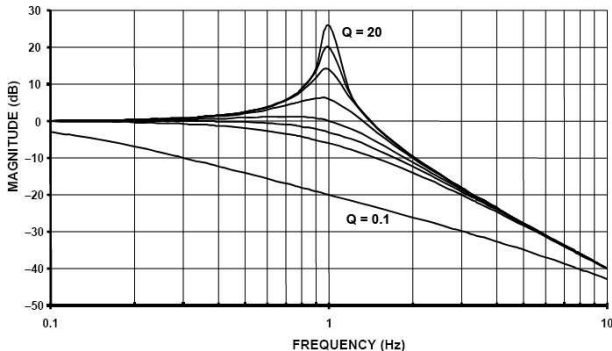
$$\varphi = 0$$

Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 2e ordre

Représentation de la fonction de transfert du filtre du second ordre étudié :

On choisit ici $LC = 1s$



Utilisation de la représentation fréquentielle

Filtre passe-bas passif du 2e ordre

Résonance du filtre du second ordre étudié :

- Au voisinage de la fréquence $\omega_0 \simeq \frac{1}{\sqrt{LC}}$:

$$\begin{aligned} G &= 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{(1 - LC\omega_0^2)^2 + (RC\omega)^2}} \right) \\ &= 20 \log \left(\frac{1}{RC\omega_0} \right) \\ &= 20 \log \left(\frac{1}{R\sqrt{\frac{C}{L}}} \right) \\ &= 20 \log \left(\frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) = 20 \log Q \end{aligned}$$