UNIVERSITE MOHAMMED V

Faculté des Sciences de Rabat

Amplificateurs à Contre réaction

Chapitre 4

A. MAAOUNI, SMP5 2015-2016 Sections A/B/C

Contre- réaction

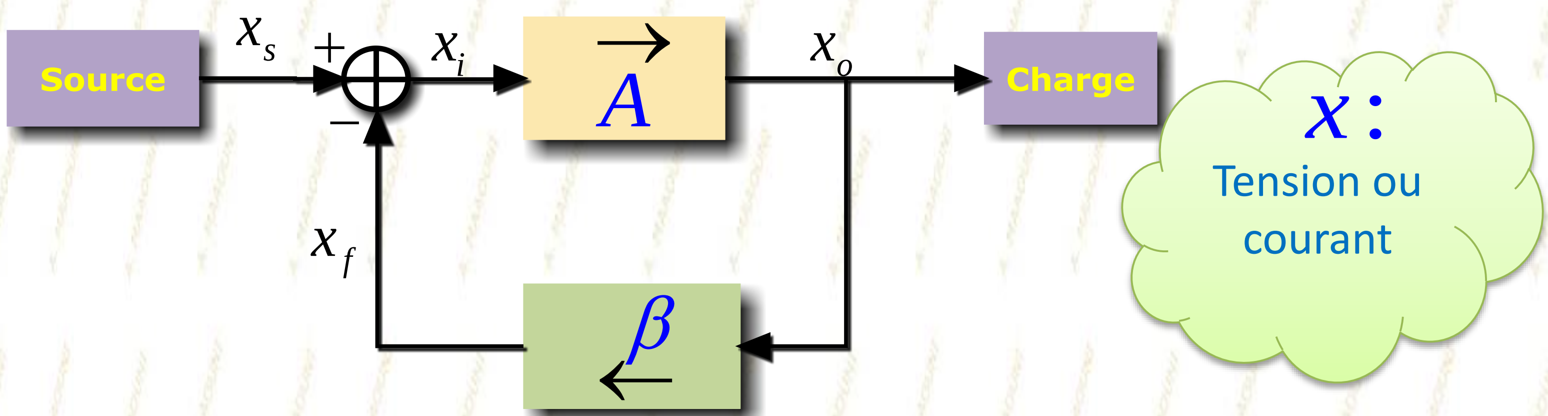
La plupart des systèmes physique incorporent certaines formes de réaction. La réaction peut être négative ou positive. La réaction négative, objet de cette partie du cours, est souvent appelée contre réaction. Elle est utilisée dans le but de garantir pour un amplificateur les propriétés suivantes :

1. Stabilité du gain: rendre la valeur du gain moins sensible aux variations tel que l'effet de la température.
2. Réduire la distorsion non linéaire : rendre la sortie proportionnelle à l'entrée.
3. Réduire l'effet du bruit : rendre minimal la contribution à la sortie de signaux indésirable générés par les composants électroniques eux-mêmes.
4. Contrôle de l'impédance d'entrée et celle de sortie : augmenter ou diminuer ces impédances par un choix approprié des topologies.
5. Augmenter la bande passante

N.B : Tous les avantages énumérés par ces propriétés sont obtenus en dépit d'une réduction du gain.

Structure générale de la réaction

La structure de base d'un amplificateur à réaction est représentée ci dessous



Structure de base d'un Amplificateur à réaction

Conditions

Maaouni

1. Le signal d'entrée est transmis à la sortie par l'ampli ***A*** et non par le réseau de réaction **β (le réseau de réaction est unilatéral)**

2. Le signal de sortie est transmis à l'entrée par **β** et non par l'ampli **A** **(Ampli unilatéral)**

3. Le rapport de transfert **β** est indépendant des résistances source et charge

Gain en boucle fermée (BF)

$$\left.\begin{aligned} x_o &= A x_i \\ x_i &= x_s - x_f \\ x_f &= \beta x_o \end{aligned}\right\} A_f = \frac{A}{1+\beta A}$$

βA est appelé gain de boucle.

$\beta A > 0$ La rétroaction est négative

$\beta A < 0$ La rétroaction est positive

Quelques propriétés de la réaction négative

Dé sensibilité du gain

$$\left.\begin{aligned} &\ln(A_f) = \ln(A) - \ln(1+\beta A) \\ &\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{A} - \frac{\beta dA}{1+\beta A} = \frac{dA}{A}\frac{1}{1+\beta A} \end{aligned}\right\} \xrightarrow{\beta A \gg 1} \left|\frac{dA_f}{A_f}\right| \ll \left|\frac{dA}{A}\right|$$

La variation relative du gain en BF est très faible par rapport à celle de gain A.

Élargissement de la Bande passante

La réponse en hautes fréquences de l'amplificateur A, quand elle est approximée par une fonction de transfert à un pôle, est de la forme :

$$A = \frac{A_M}{1 + p/\omega_h}$$

A_M Gain en bande médiane

ω_h Pulsation haute

En boucle fermée, la gain s'écrit :

$$A_f = \frac{A}{1+\beta A} = \frac{A_M/(1+p/\omega_h)}{1+\beta A_M/(1+p/\omega_h)} = \frac{A_M/(1+\beta A_M)}{1+\dfrac{p}{\omega_h(1+\beta A_M)}}$$

La pulsation haute en BF est donc

$$\omega_{hf} = \omega_h(1+\beta A_M) \gg \omega_h$$

En basses fréquences, on peut approximer la réponse de l 'ampli A à celle d'un filtre passe haut sous la forme :

$$A = \frac{A_M}{1 + \omega_b / p}$$

La réponse de l'amplificateur avec rétroaction négative s'écrit donc :

$$A_f = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{\dfrac{A_M}{1 + \omega_b / p}}{1 + \beta \dfrac{A_M}{1 + \omega_b / p}} = \frac{A_M / \left(1 + \beta A_M\right)}{1 + \dfrac{\omega_b}{\left(1 + \beta A_M\right)} / p}$$

On obtient, pour la fréquence basse de l'ampli en BF une valeur très inférieur à celle de Ampli A

$$\omega_{bf} = \frac{\omega_b}{\left(1 + \beta A_M\right)} \ll \omega_b$$

En conclusion la bande passante

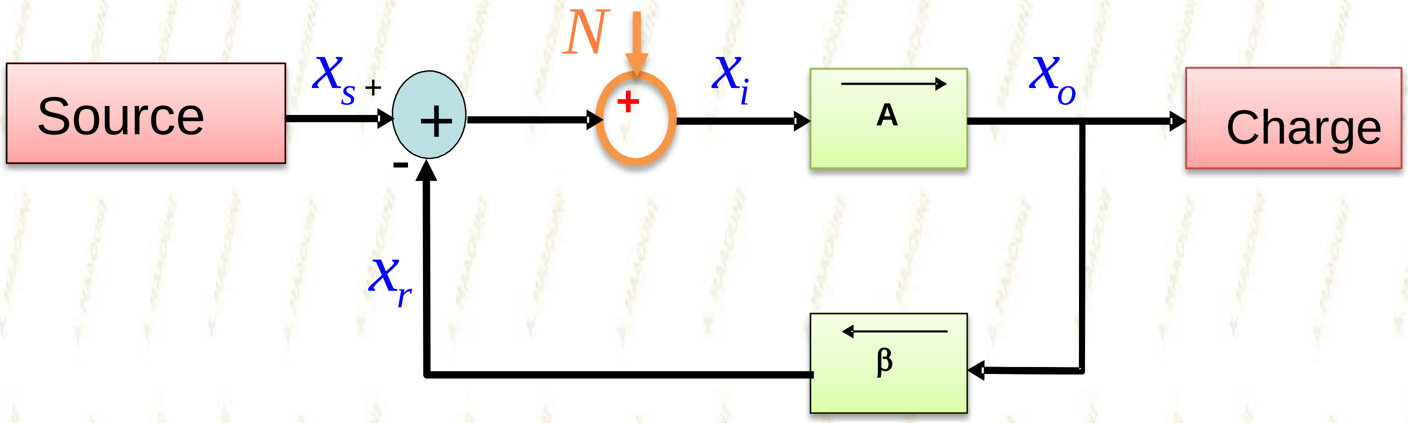
$$\mathbf{BP} = \omega_{\mathbf{Hf}} - \omega_{\mathbf{bf}}$$

devient plus large

Réduction de bruit

Source de bruit à l'entrée

Considérons un Bruit N additif à l'entrée de l'amplificateur



Par application du théorème de superposition, le signal de sortie peut se mettre sous la forme :

$$x_o = \frac{A}{1+\beta A} x_s + A_N N$$

L'amplification du bruit s'obtient en annulant le signal d'entrée ($x_s = 0$)

$$x_o = Ax_i = A(N - x_r) = A(N - \beta x_o)$$

Soit :

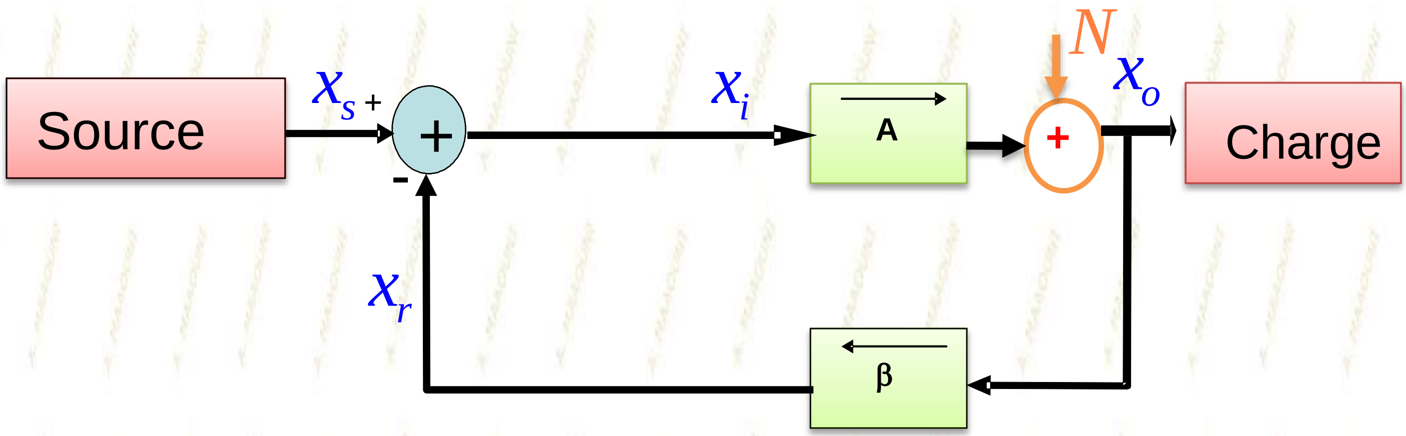
$$x_o = \underbrace{\left\{\frac{A}{1+\beta A}\right\}}_{A_N} N$$

Maaouni

On remarque que dans ce cas le rapport signal sur bruit ne peut pas être amélioré puisque le signal d'entrée et le bruit sont amplifiés de la même manière.

Source de bruit à la sortie

Considérons un bruit additif en sortie de l'ampli A :



En appliquant le principe de superposition, il vient que :

$$x_o = \frac{A}{1+\beta A} x_s + \frac{1}{1+\beta A} N$$

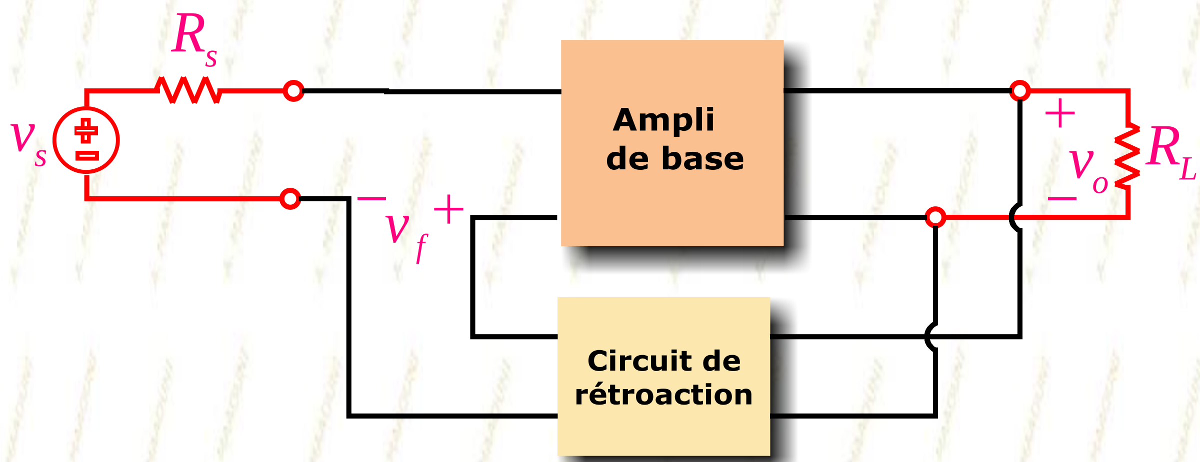
Dans ce cas le rapport signal sur bruit est directement amélioré par le gain A de l'amplificateur car l'amplification du signal x_s est A fois plus grande que celle du bruit N

Remarque

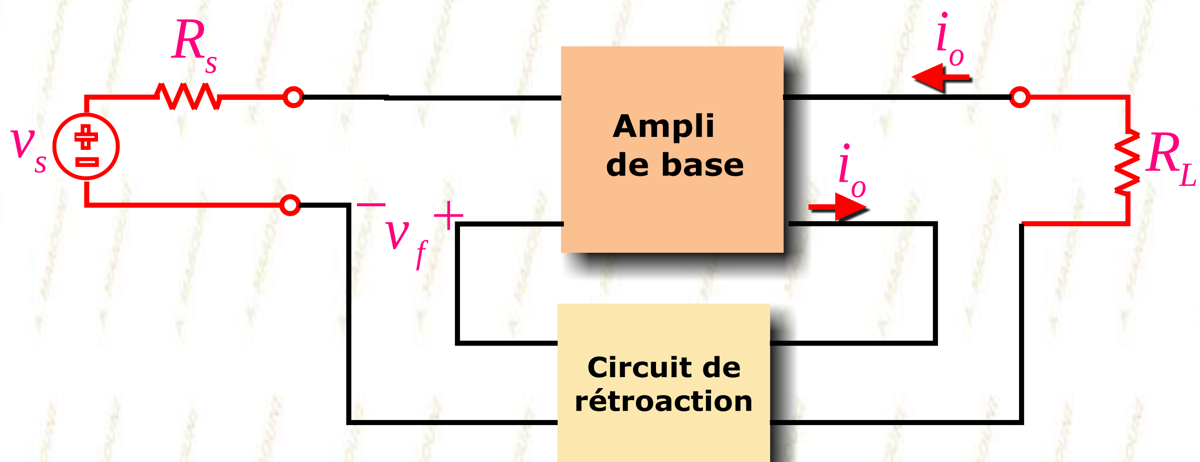
Dans la réalité, le premier cas est le plus fréquent et la contre-réaction ne peut pas, dans ce cas, améliorer le rapport signal sur bruit. Cela oblige donc le concepteur à construire des amplificateurs à faible niveau de bruit.

Topologies de base des amplificateurs à contre-réaction

Basé sur la quantité à amplifier (tension ou courant) et sur la sortie souhaité (tension ou courant), on distingue les quatre types de contre-réaction suivants :

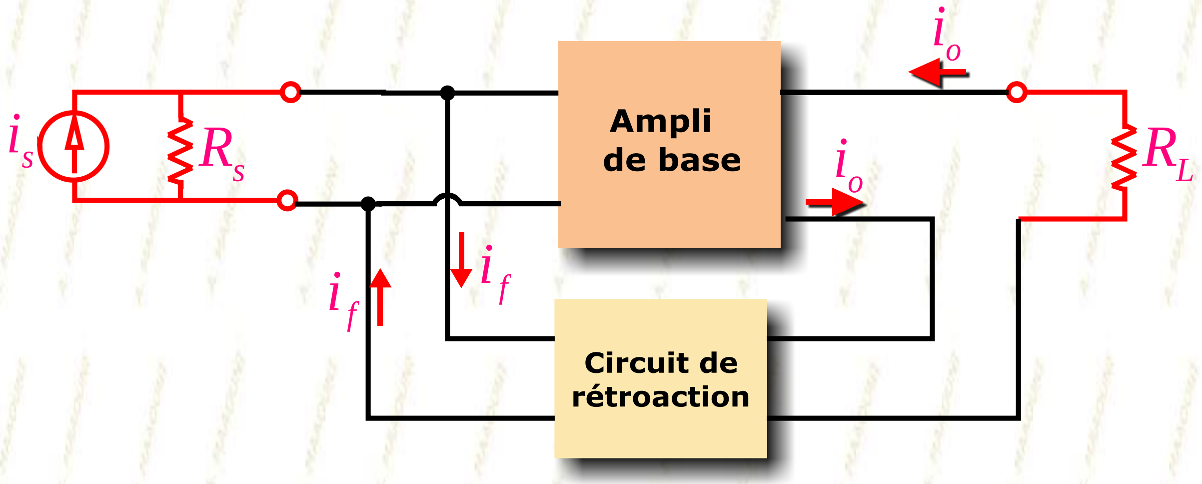


Topologie série-shunt

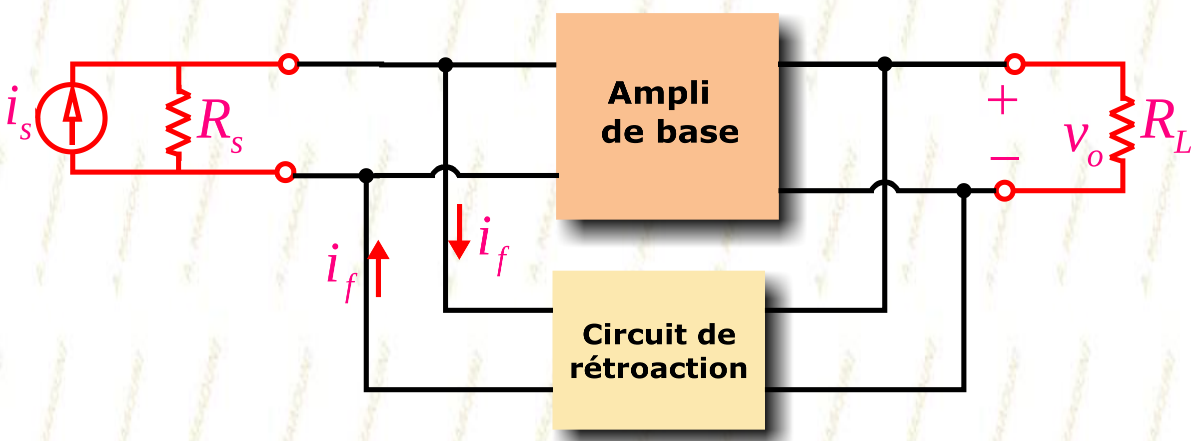


Topologie série-série

Maaouni



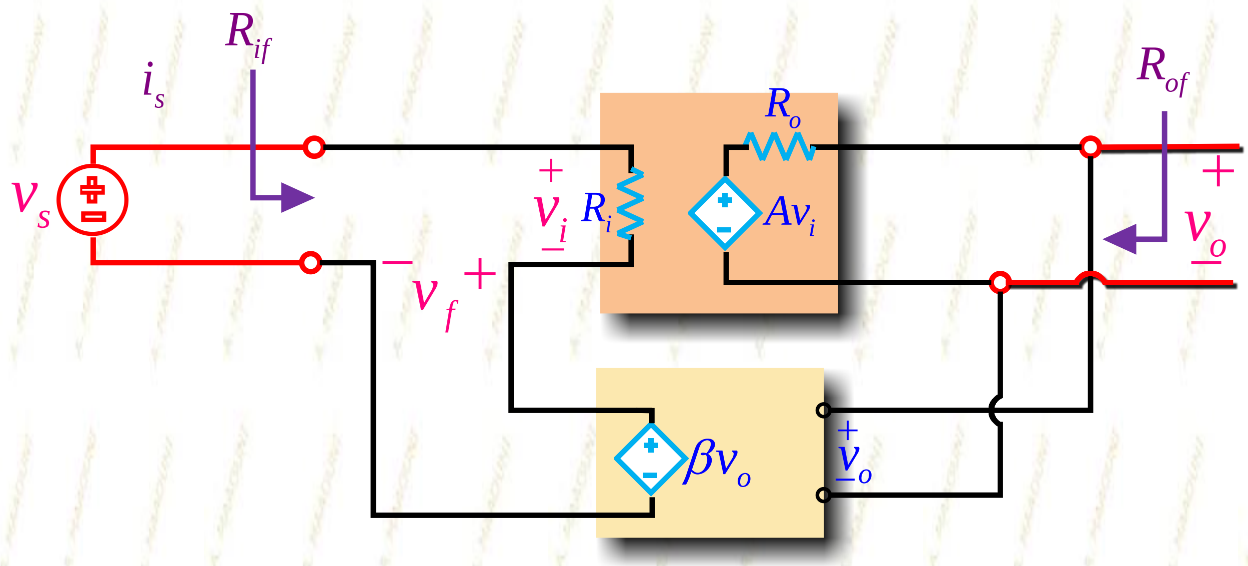
Topologie shunt-série



Topologie shunt-shunt

Configurations idéales/pratiques

Topologie série-shunt idéale



Il s’agit dans cette configuration d’un prélèvement de tension et de réinjection à l’entrée d’une tension. L’amplificateur bouclé est un amplificateur de tension, ici β est sans unité.

Gain en tension en boucle fermée

$$\left.\begin{aligned} v_o &= Av_i = A(v_s - v_f) \\ v_f &= \beta v_o \end{aligned}\right\} \quad A_f = \frac{v_o}{v_s} = \frac{A}{1+\beta A}$$

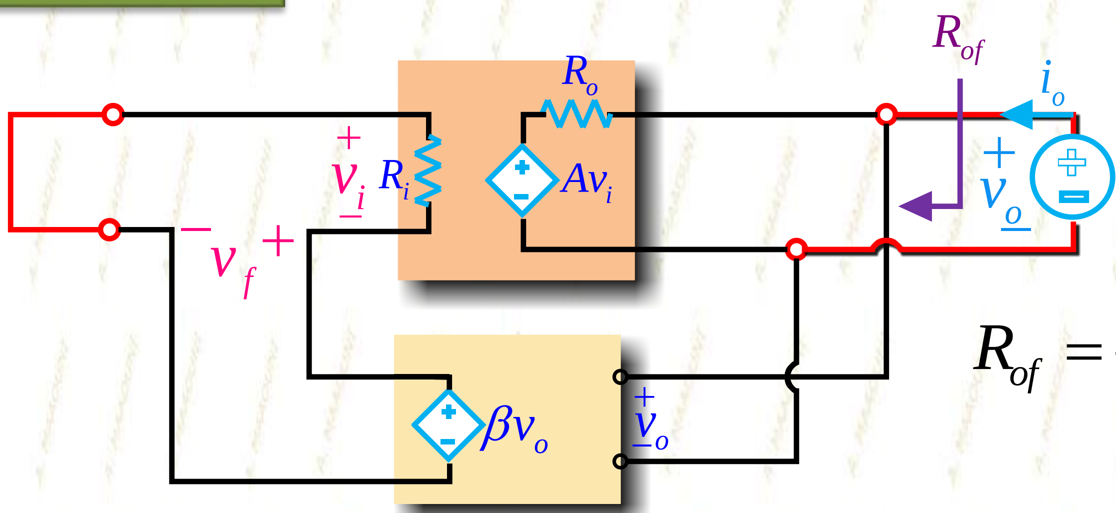
Résistance d'entrée

$$R_{if} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{v_i}{i_s} + \frac{v_f}{i_s} = R_i + \frac{\beta v_o}{i_s} = R_i + \beta \frac{A v_i}{i_s}$$

Soit :

$$R_{if} = R_i(1+\beta A)$$

Résistance de sortie



$$R_{of} = \frac{v_o}{i_o}$$

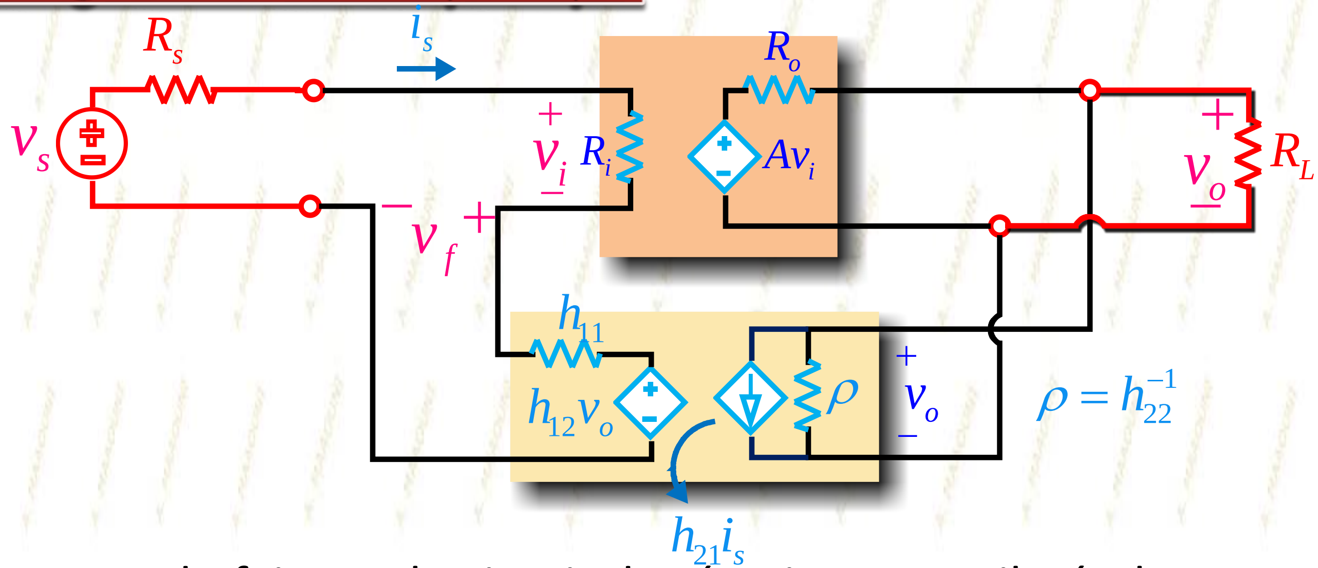
$$R_{of} = \frac{A v_i}{i_o} + R_o = A\frac{-v_f}{i_o} + R_o$$

$$R_{of} = A\frac{-\beta v_o}{i_o} + R_o = -\beta A R_{of} + R_o \rightarrow R_{of} = \frac{R_o}{1+\beta A}$$

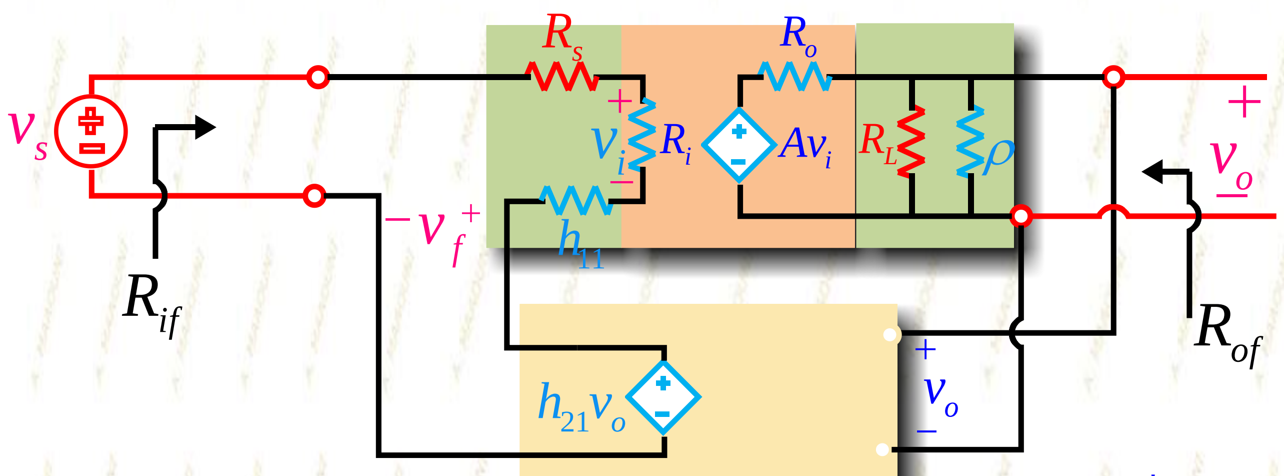
La contre réaction série-shunt améliore d'avantage les caractéristiques de l'amplificateur : elle rend l'impédance d'entrée grande et l'impédance de sortie faible

Maaouni

Topologie série-shunt pratique



Compte tenu du fait que le circuit de réaction est unilatéral, $h_{21}i_s$ est une composante négligeable (circuit ouvert), il s'ensuit que l'on peut retracer le schéma de sorte à exploiter le résultat de la configuration idéale :



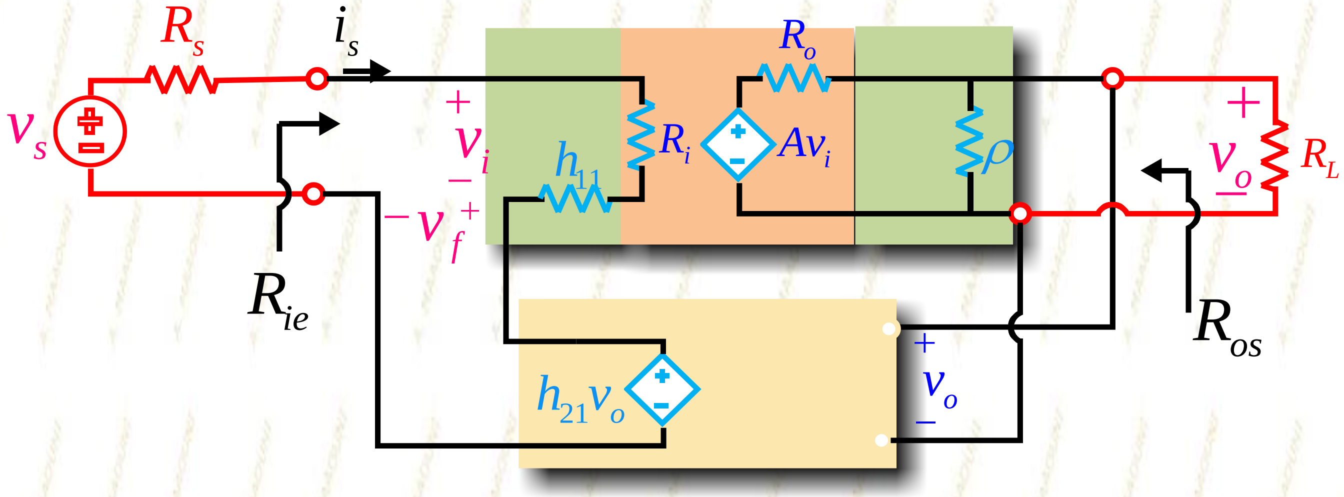
$$R_o' = \rho \,||\, R_o \,||\, R_L$$

$$A' = \frac{\rho \,||\, R_L}{\rho \,||\, R_L + R_o} A$$

$$\beta = h_{12} = \left.\frac{v_f}{v_o}\right|_{i_s=0}$$

$$R_{if} = (1+\beta A')R_i + h_{11} + R_s \ , \quad R_{of} = \frac{R_o'}{1+\beta A'} \ , A_f = \frac{A'}{1+\beta A'}$$

Dans le cas de la **topologie série-shunt**, on peut déduire les résistances d'entrée et de sortie excluant les résistances de source et de charge (cf. fig.) ainsi :



$$R_{ie} = R_{if} - R_s$$

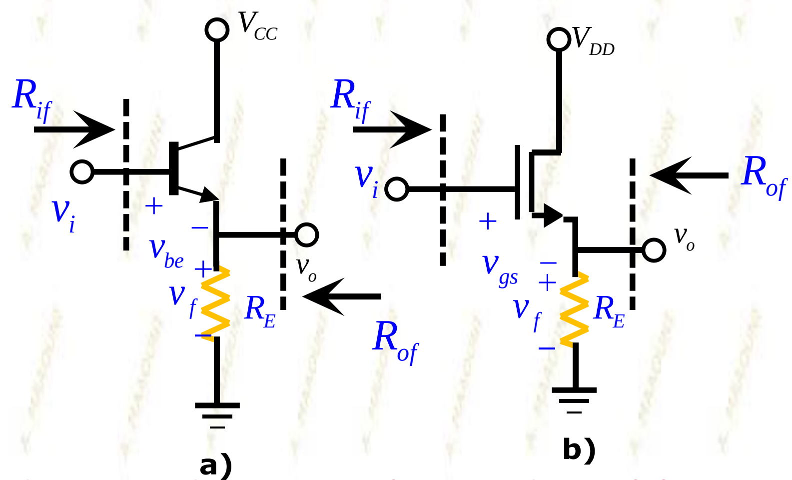
$$R_{os}^{-1} = R_{of}^{-1} - R_L^{-1}$$

β du circuit de réaction est déterminé par la relation :

$$\beta = \left.\frac{v_f}{v_o}\right|_{i_s=0}$$

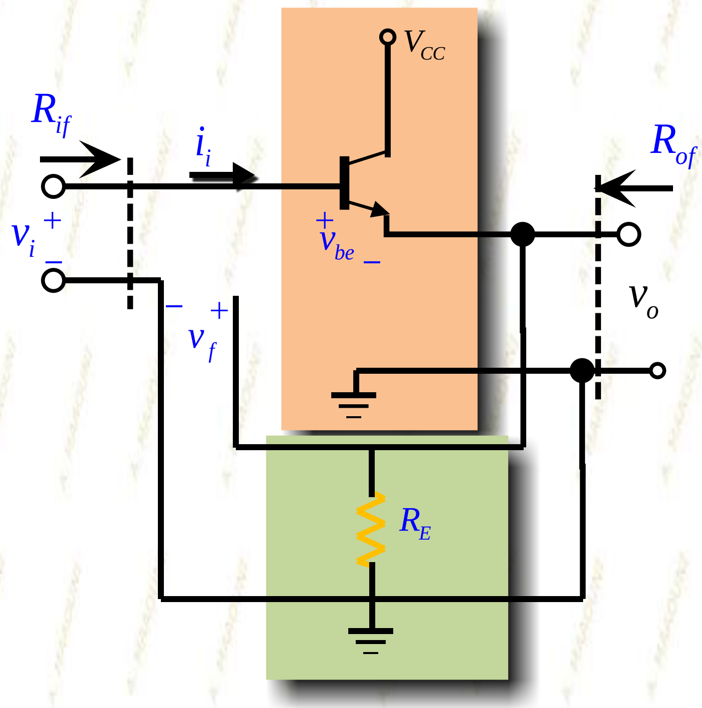
Exemple d'application

On considère les amplificateurs suivants :



Identifier la topologie de réaction et scinder ces deux amplis en deux blocs : L'amplificateur de base et le circuit de réaction, puis déterminer : A_f, R_{if}, R_{of}

Sol.



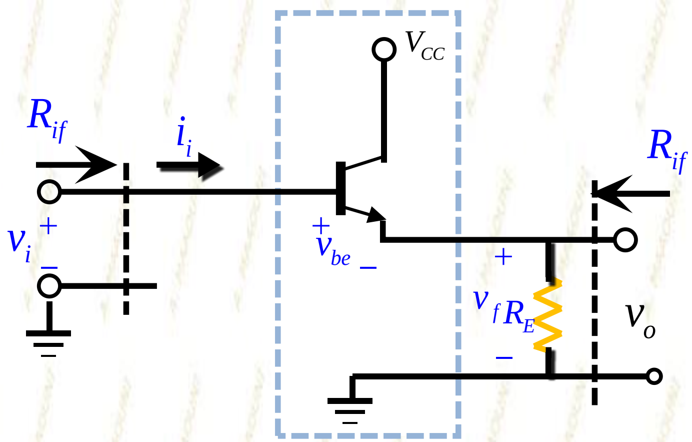
Le réarrangement du circuit a) sous La forme représenté ci contre Montre que :

La résistance RE introduit Une contre réaction type Série-shunt.

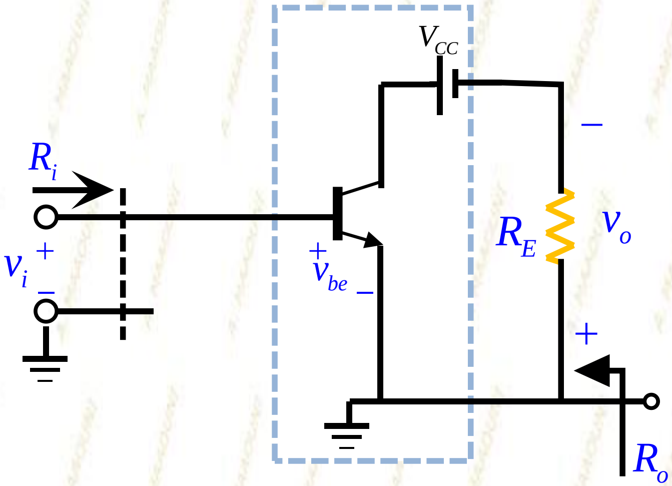
La détermination de l'amplificateur en boucle ouverte (BO) s'obtient, pour la Topologie série shunt, en appliquant la règle suivante :

- Pour déterminer le circuit d'entrée, on court-circuite la tension de sortie.
- Pour déterminer le circuit de sortie, on annule le courant d'entrée.

En annulant i_i la résistance R_E fait partie du circuit de sortie. En annulant la tension de sortie, $v_f = 0$ et $R_E = 0\,(fil)$ on obtient donc l'ampli sans réaction suivant:

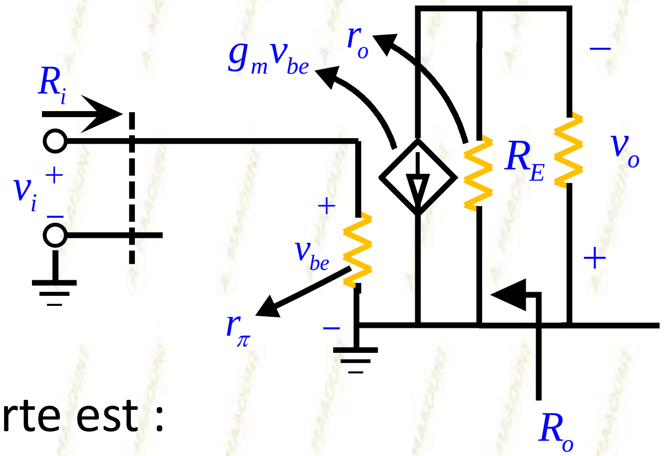


Amplificateur avec réaction



Amplificateur sans réaction

En dynamique :



Le gain en boucle ouverte est :

$$A = \frac{v_o}{v_i} = g_m R_E \,||\, r_o$$

Les résistances d'entrée et de sortie de l'ampli A sont données par la relation suivante :

$$R_i = r_\pi \ , \quad R_o = r_o$$

et le rapport de transfert du circuit de réaction β vaut 1.

En BO, on peut donc écrire :

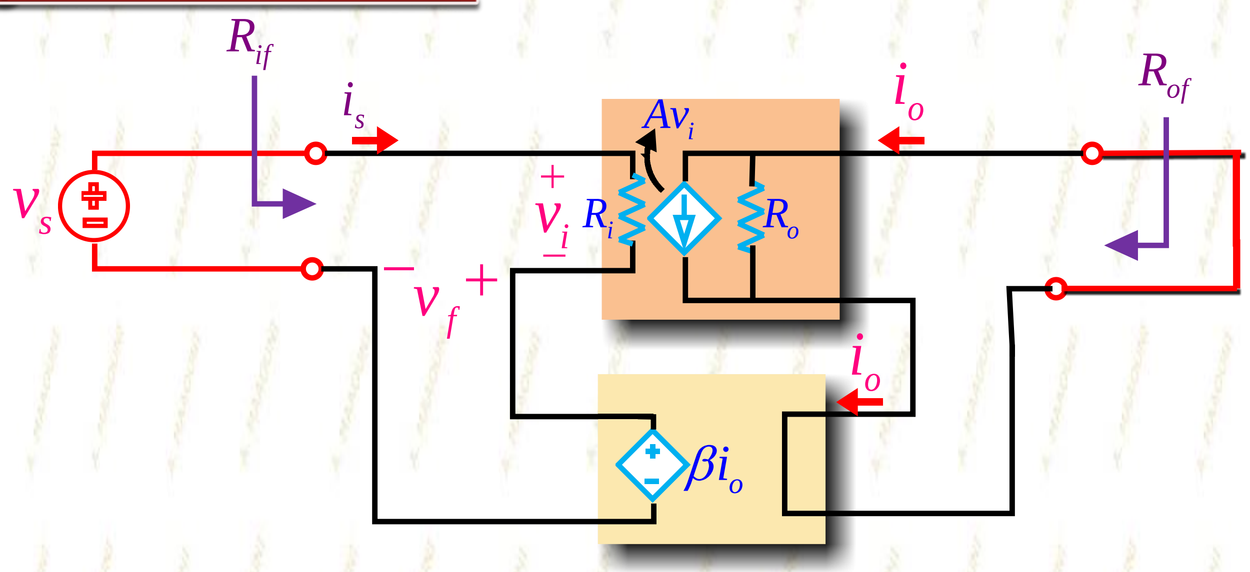
$$A_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R_E \,||\, r_o}{g_m R_E \,||\, r_o + 1}$$

$$R_{of} = \frac{r_o \,||\, R_E}{1 + g_m r_o \,||\, R_E} = \left(r_o \,||\, R_E\right) || \frac{r_\pi}{\beta}$$

$$R_{if} = R_i (1 + g_m R_E \,||\, r_o) = r_\pi + \beta R_E \,||\, r_o$$

$$g_m = \frac{\beta}{r_\pi}$$

Topologie série-série idéale



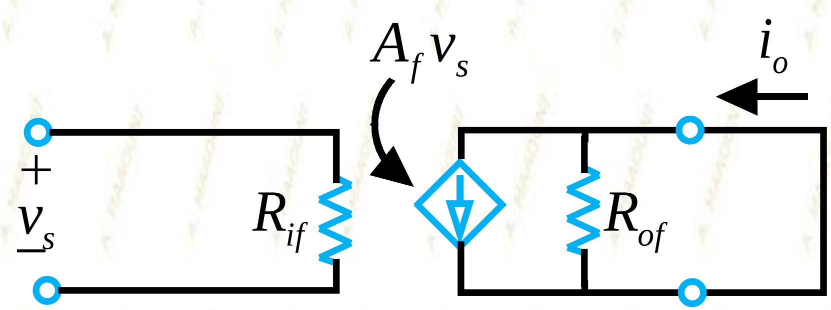
Dans cette configuration, l 'amplificateur A est un amplificateur de Transconductance. On prélève un courant et on réinjecte à l'entrée une tension.

Nature des grandeurs :

$A = \dfrac{i_o}{v_i}$: Conductance

β : impédance

L'amplificateur en BF peut se mettre sous la forme équivalente suivante :



Gain en boucle fermée

$$\left.\begin{aligned} i_o = Av_i = A(v_s - v_f) \\ v_f = \beta i_o \end{aligned}\right\} \quad A_f = \frac{i_o}{v_s} = \frac{A}{1+\beta A}$$

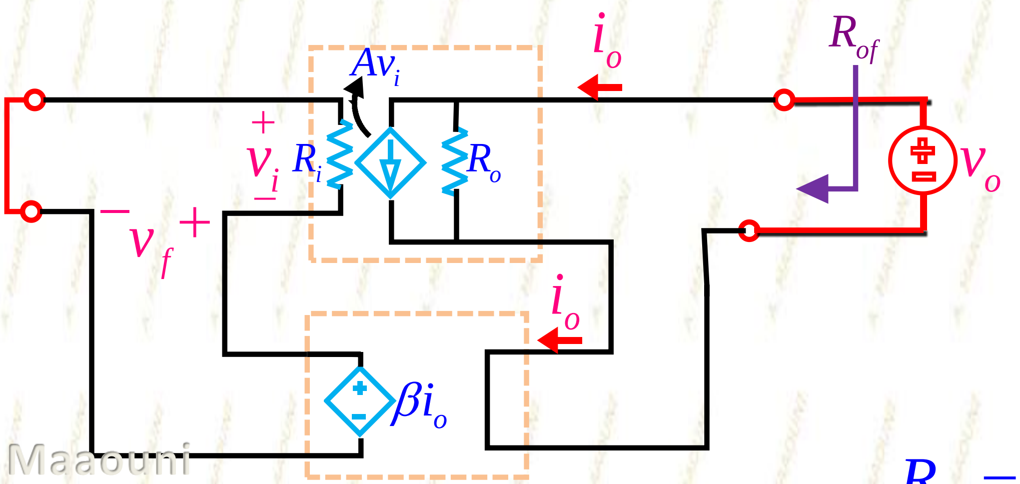
Résistance d'entrée

$$R_{if} = \frac{v_s}{i_s} = \frac{v_i}{i_s} + \frac{v_f}{i_s} = R_i + \frac{\beta i_o}{i_s} = R_i + \beta\frac{Av_i}{i_s}$$

Soit :

$$R_{if} = R_i(1+\beta A)$$

Résistance de sortie



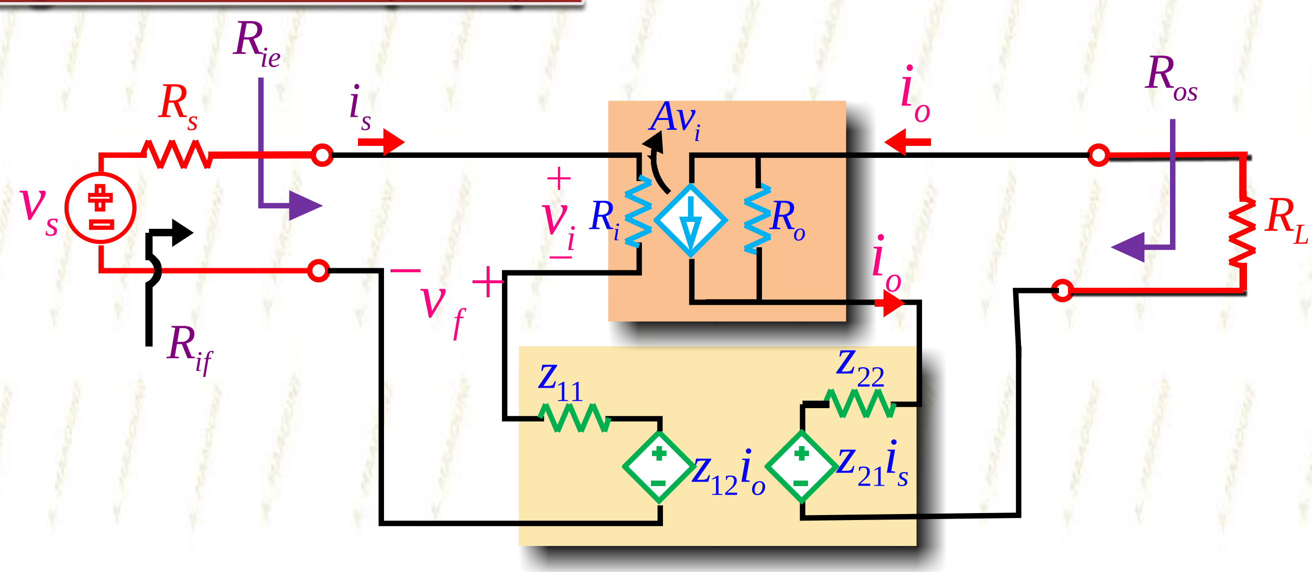
$$R_{of} = \frac{v_o}{i_o}$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_o} + Av_i = \frac{v_o}{R_o} - Av_f$$

$$i_o = \frac{v_o}{R_o} - A\beta i_o$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1+\beta A}$$

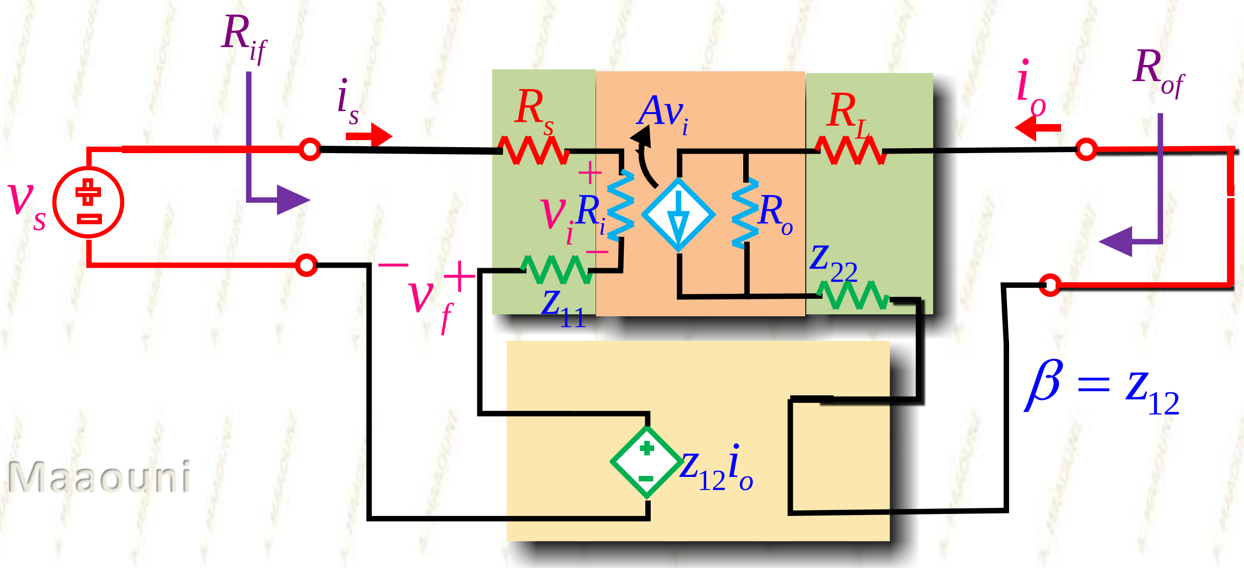
Topologie série-série pratique



De la même manière que pour la topologie série-shunt, on suppose ici que :

$$\left|z_{21}\right|_{circuit\ \ réaction} \ll \left|z_{21}\right|_{Ampli\ base}$$

On ramène la structure réelle ci-dessus à la structure idéale équivalente suivante :



$$\beta = z_{12}$$

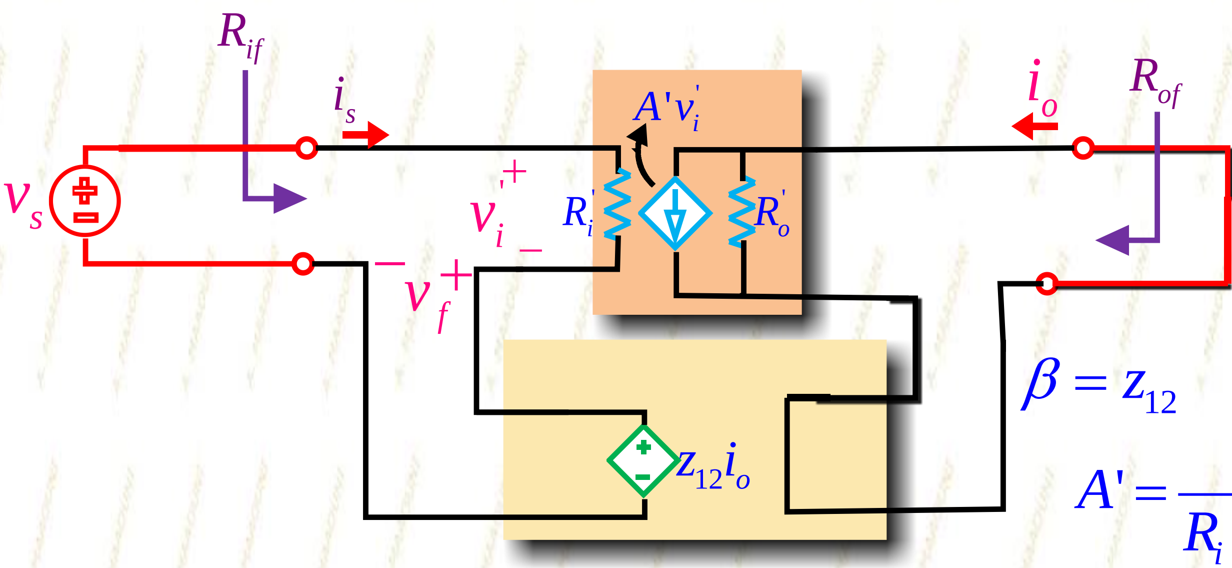
Désignons par $R_i^{'}$:

$$R_i^{'} = R_i + R_s + z_{11}$$

et par $R_o^{'}$:

$$R_o^{'} = R_o + R_L + z_{22}$$

On déduit facilement, par utilisation du diviseur de tension à l'entrée et de la transformation Norton-Thévenin à la sortie, le circuit équivalent ci-dessous :



$$\beta = z_{12}$$

$$A' = \frac{R_i}{R_i + z_{11} + R_s}\frac{R_o}{R_o + R_L + z_{22}}A$$

$$\begin{cases} A_f = \dfrac{i_o}{v_s} = \dfrac{A'}{1+\beta A'} \\ R_{if} = R_i'(1+\beta A') = R_s + z_{11} + R_i\left(1+\beta\dfrac{R_o}{R_o + R_L + z_{22}}A\right) \\ R_{of} = R_o'(1+\beta A') = R_L + z_{22} + R_o(1+\beta\dfrac{R_i}{R_i + z_{11} + R_s}A) \end{cases}$$

Les résistances d'entrée et de sortie R_{ie}, R_{os} sont définies par la relation :

Maaouni

$$R_{os} = R_{of} - R_L,\ R_{ie} = R_{if} - R_s$$

Exercice d'application

Dire le type de topologie de l'amplificateur ci-dessous

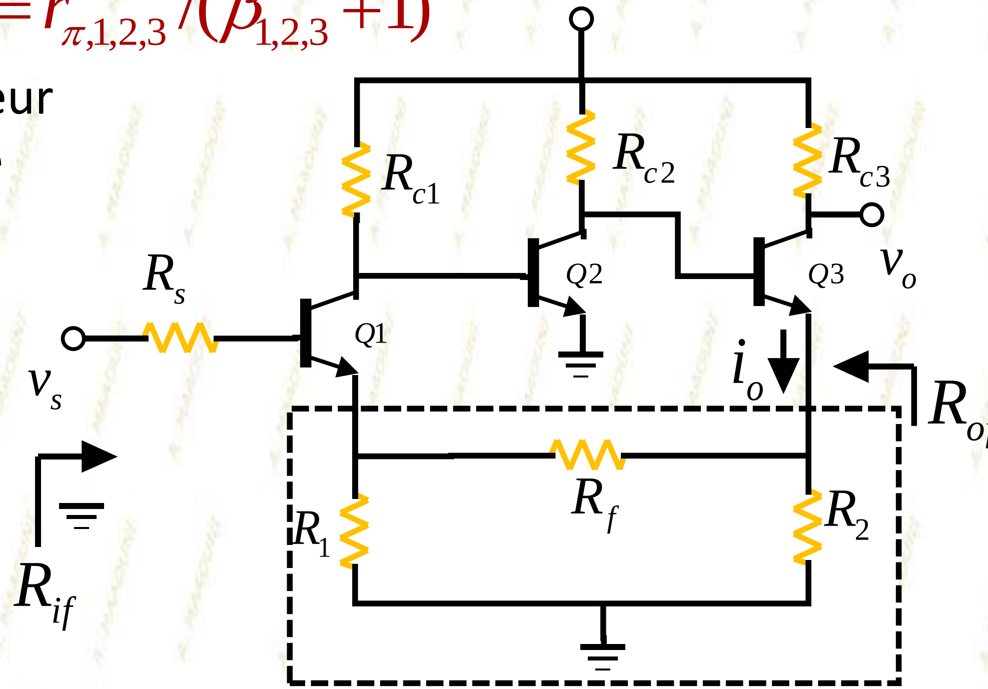
Les transistors sont caractérisés par :

$$\beta_{1,2,3},\ r_{\pi1,2,3},\ r_{o1,2,3}=\infty, r_{e1,2,3}=r_{\pi,1,2,3}/(\beta_{1,2,3}+1)$$

Sol.

A l'entrée, on a un comparateur de tension (série) et en sortie Un prélèvement de courant.

Il s'agit donc d'une topologie série-série.



Pour déterminer l'amplificateur en BO, on doit annuler le courant de sortie i_o et le courant d'entrée de la chaîne de retour i_{e1}

En fait, cela provient de la procédure du calcul des résistances z_{11} et z_{22}

$$z_{11}=\left.\frac{v_{e_1}}{i_{e1}}\right|_{i_o=0}\quad,\quad z_{22}=\left.\frac{v_{e_3}}{i_o}\right|_{i_{e_1}=0}$$

Maaouni

$$\beta = \frac{v_f}{i_o} = \frac{R_2}{R_1 + R_f + R_2} R_1$$

$$z_{11} = R_1 \,||\, (R_f + R_2)$$

$$z_{22} = R_2 \,||\, (R_f + R_1)$$

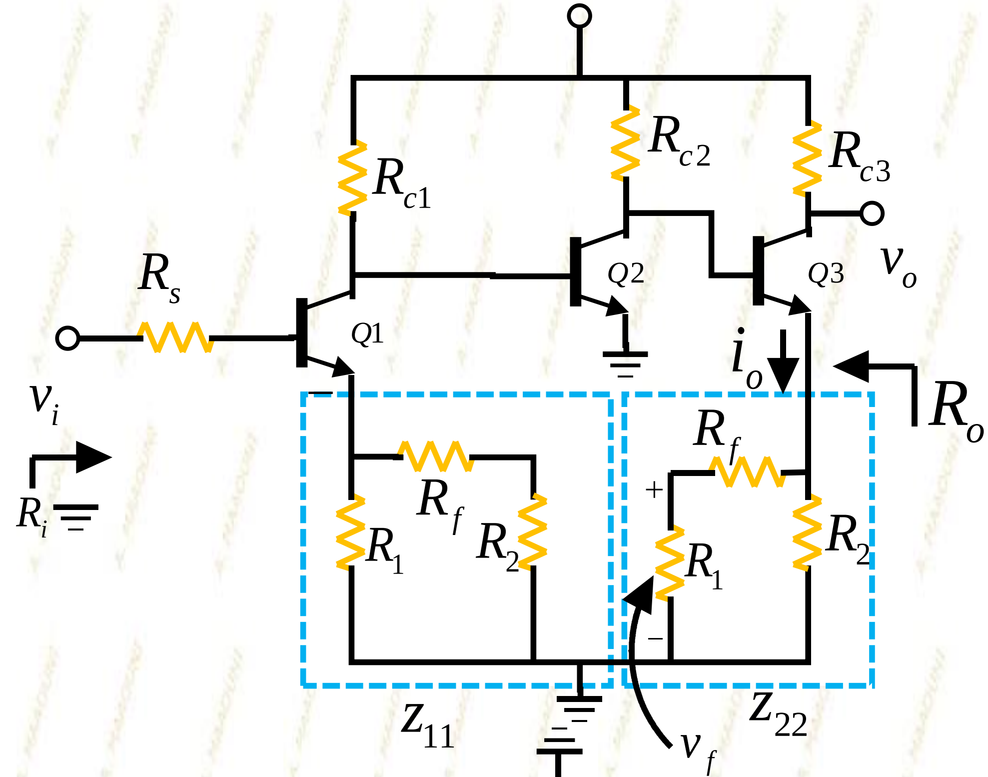
- ***Gain A de l'amplificateur BO***

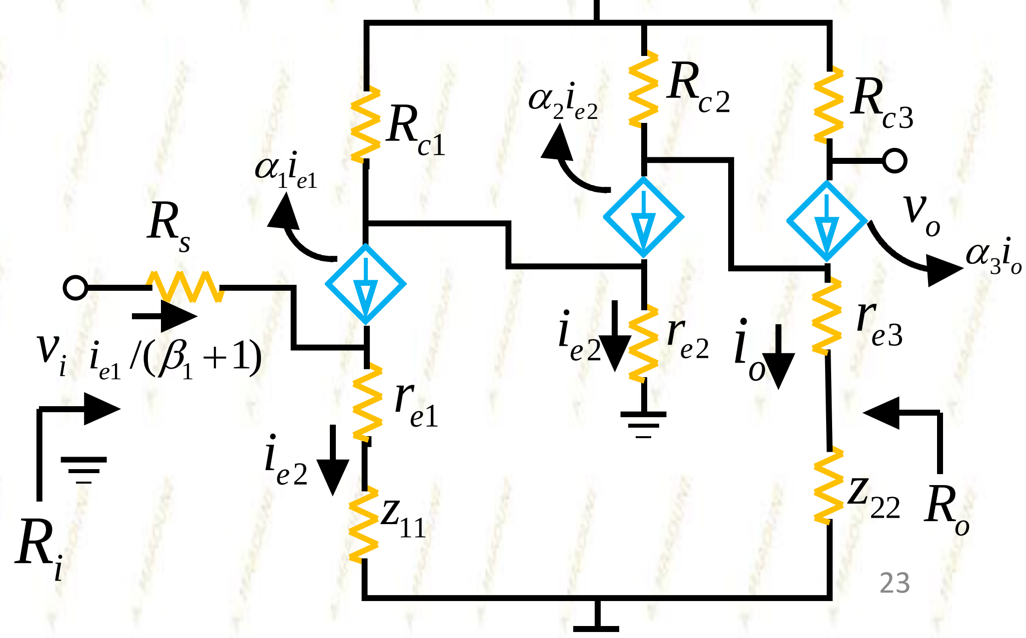
Le schéma en dynamique de l'ampli est représentée

$$-(z_{22} + r_{e3})i_o - R_{c2}\left(\frac{i_o}{\beta_3 + 1} + \alpha_2 i_{e2}\right) = 0$$

$$-r_{e2} i_{e2} - R_{c1}\left(\frac{i_{e_2}}{\beta_2 + 1} + \alpha_1 i_{e1}\right) = 0$$

$$-(r_{e1} + z_{11})i_{e1} - R_s \frac{i_{e_1}}{\beta_1 + 1} + v_i = 0$$



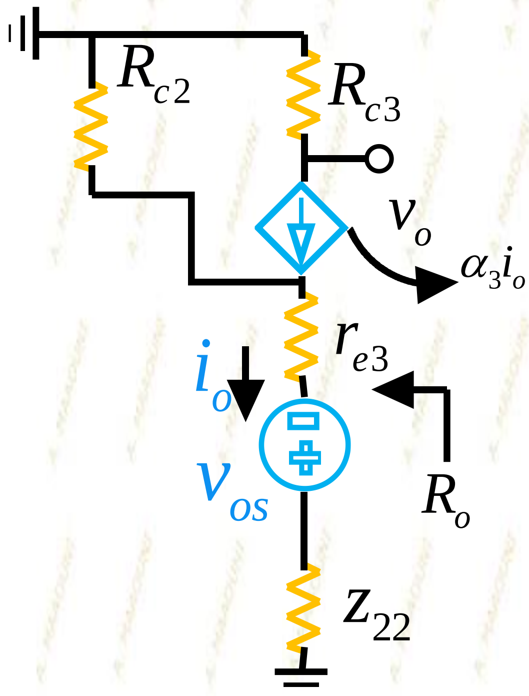


$$\left.\begin{aligned}
\frac{i_{e1}}{v_i} &= \frac{1}{\dfrac{R_s}{\beta_1+1} + r_{e1} + z_{11}} \\
\frac{i_{e2}}{i_{e1}} &= -\frac{\alpha_1 R_{c1}}{r_{e2} + \dfrac{R_{c1}}{\beta_2+1}} \\
\frac{i_o}{i_{e2}} &= -\frac{R_{c2}\alpha_2}{z_{22} + r_{e3} + \dfrac{R_{c2}}{\beta_3+1}}
\end{aligned}\right\}$$

$$A = \frac{i_o}{v_i} = \frac{\alpha_1\alpha_2 R_{c1} R_{c2}}{\left(\dfrac{R_s}{\beta_1+1} + r_{e1} + z_{11}\right)\left(r_{e2} + \dfrac{R_{c1}}{\beta_2+1}\right)\left(z_{22} + r_{e3} + \dfrac{R_{c2}}{\beta_3+1}\right)}$$

$$R_i = R_s + (\beta_1+1)(z_{11} + r_{e1}) = \frac{v_i}{i_{b1}}$$

Pour l’impédance de sortie, le schéma se réduit à celui de la figure suivante :



$$R_o = \frac{v_{os}}{i_o}$$

La loi des mailles entraîne :

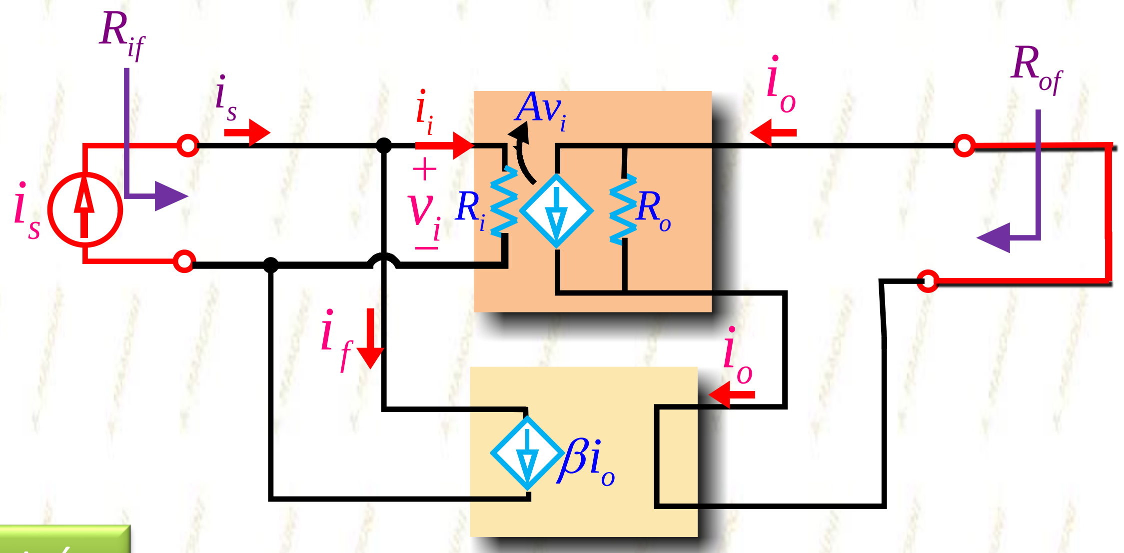
$$-z_{22} i_o + v_{os} - r_{e3} i_o - R_{c_2} \frac{i_o}{\beta_3 + 1} = 0$$

$$R_o = \frac{v_{os}}{i_o} = r_{e3} + z_{22} + \frac{R_{c_2}}{\beta_3 + 1}$$

La Topologie série-série implique donc :

$$R_{of} = R_o(1+\beta A),\; R_{if} = R_i(1+\beta A)$$

Topologie shunt-série idéale



Résistance d'entrée

$$R_{if} = \frac{R_i}{1+\beta A}$$

Résistance de sortie

$$R_{of} = R_o\left(1+\beta A\right)$$

Gain en BF

$$A_f = \frac{A}{1+\beta A},$$

Gain en courant

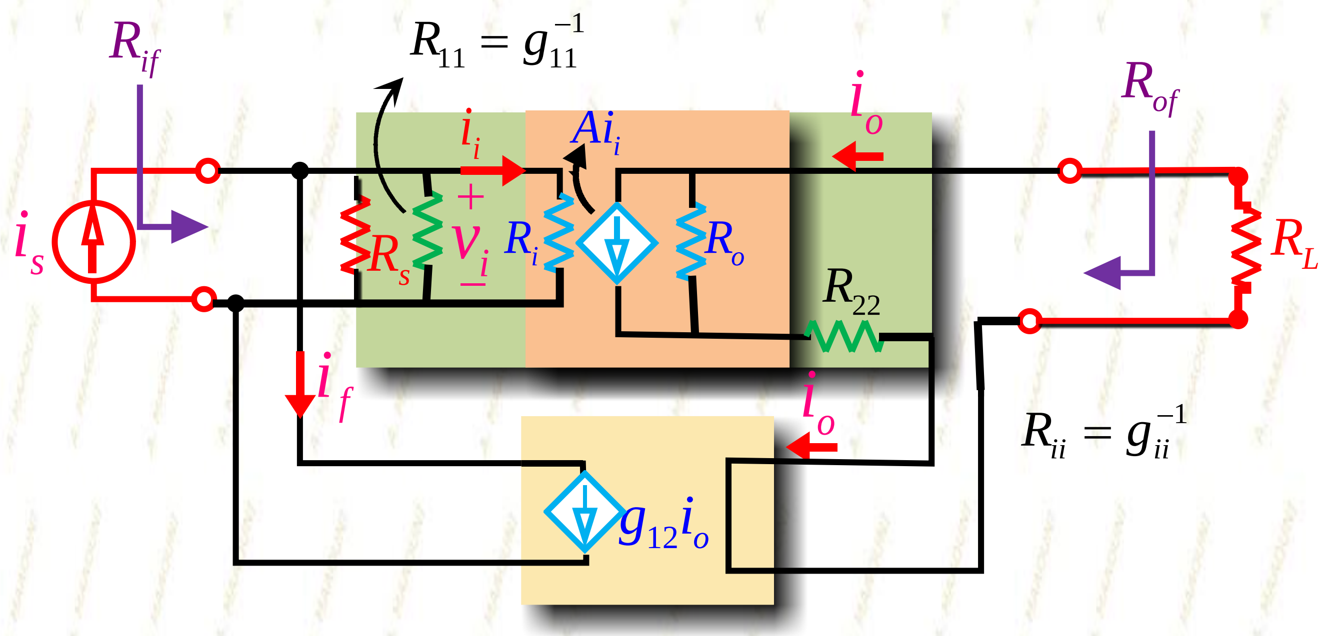
β: Sans unité

Maaouni

Topologie shunt-série pratique

Le quadripôle de retour est caractérisé, cette fois ci, par sa matrice hybride inverse **g**. Compte tenu de l'hypothèse d'un amplificateur A unilatéral, $g_{21}v_i$ est négligeable.

On peut donc ramener la structure réelle à la structure idéale suivante où l'ampli de base a changé par l'adjonction des résistance R_{ii}



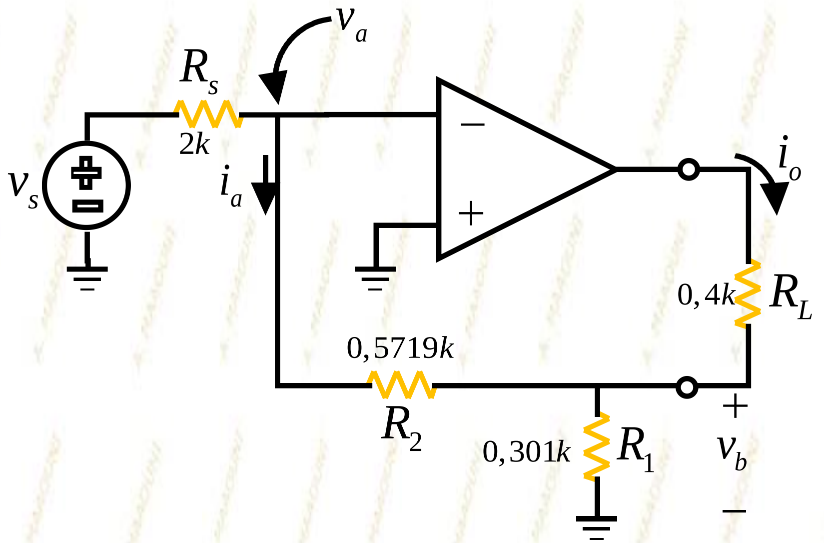
$$\beta = g_{12}$$

Maaouni

Exercice d'application

L'amplificateur de base du circuit suivant est caractérisé par :

$$R_e = 5k\Omega,\ R_{sor} = 100\Omega,\ A_v = 10^4$$



Identifier la topologie de réaction et Déterminer : R_{of}, R_{if}, A_f

Sol.

Il s'agit d'un prélèvement de courant et réinjection de courant (shunt-série)

Calcul de g_{11}, g_{22}

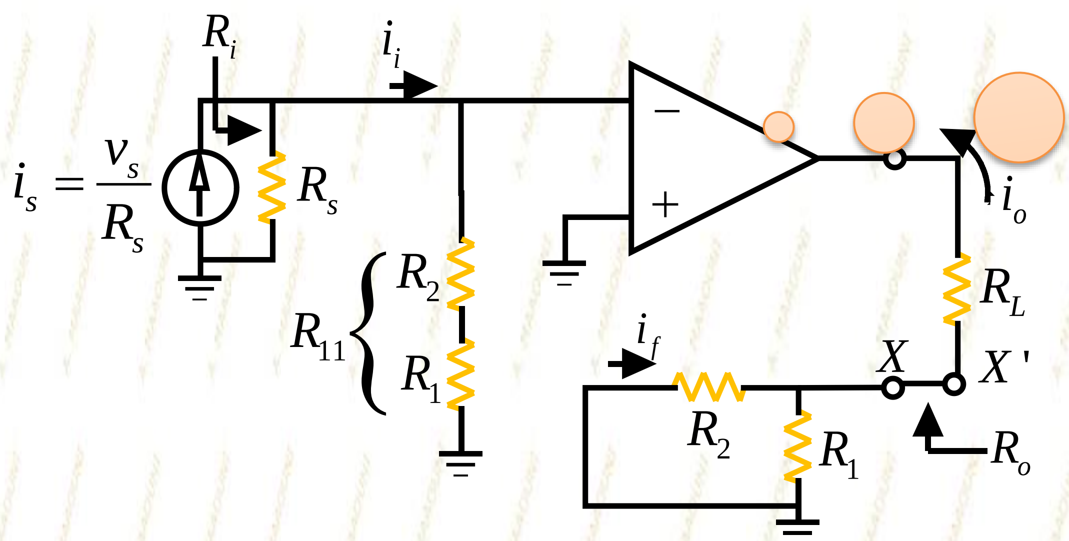
$$g_{11} = \left.\frac{i_a}{v_a}\right|_{i_o=0} = (R_1 + R_2)^{-1} = R_{11}^{-1}$$

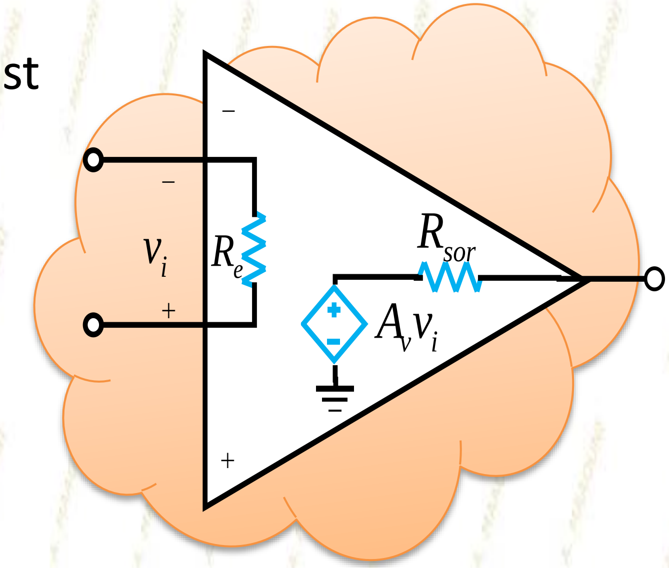
$$g_{22} = \left.\frac{i_o}{v_b}\right|_{v_a=0} = (R_1 \,||\, R_2)^{-1} = R_{22}^{-1}$$

$$\beta = g_{12} = \frac{i_f}{i_o} = \left.\frac{i_a}{i_o}\right|_{v_a=0} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Maaouni

Le schéma de l’amplificateur en Boucle ouverte est représenté ainsi :





- ***Résistance d’entrée***

$$R_i = R_s \,||\, R_{11} \,||\, R_e$$

- ***Résistance de sortie***

Pour calculer la résistance de sortie, on place entre X et X’ une source de tension fictive v_{os} qui débite le courant i_o et on calcul le rapport v_{os}/i_o à entrée nulle :

$$R_o = \left.\frac{v_{os}}{i_o}\right|_{i_s=0} = R_L + R_{sor} + R_{22}$$

- ***Gain de l'amplificateur en BO (A)***

$$A = \frac{i_o}{i_s} = \frac{i_o}{v_i}\frac{v_i}{i_s} = A_v \frac{1}{R_{22} + R_L + R_o} \times R_e \,||\, R_{11} \,||\, R_s$$

La topologie shunt-série nous permet de déduire :

$$R_{of} = R_o(1+\beta A)$$

$$R_{if} = \frac{R_i}{1+\beta A}$$

Note

On obtient les résistances R_{ie} et R_{os} à partir des relations :

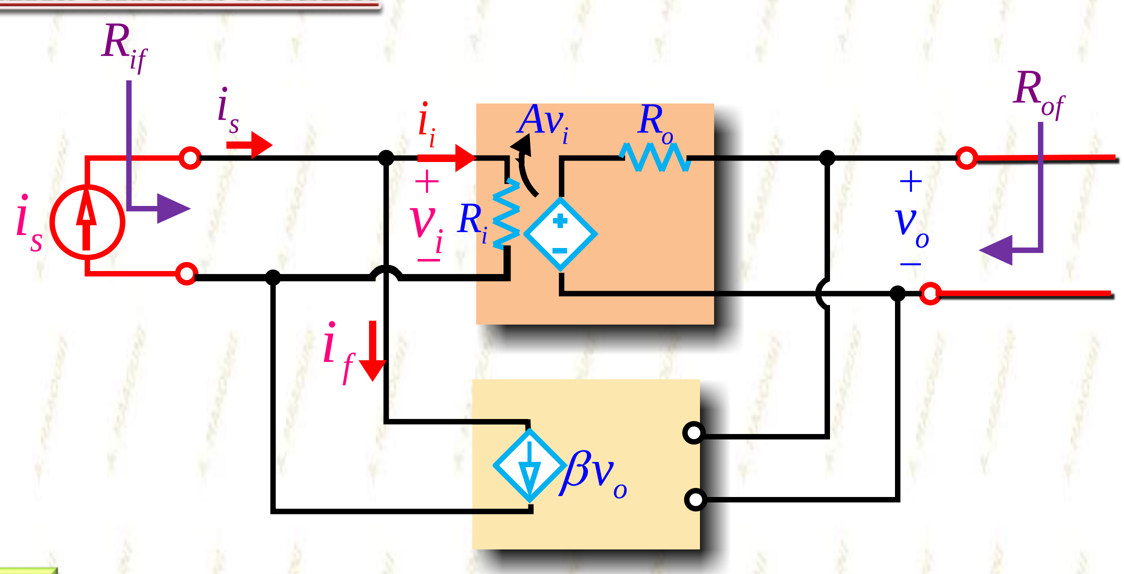
$$R_{ie}^{-1} = R_{if}^{-1} - R_s^{-1}$$

$$R_{os} = R_{of} - R_L$$

A.N. :

$$A_{if} = 20,\ R_{os} = 577,7k\Omega,\ R_{ie} = 1,57\Omega$$

Topologie shunt-shunt idéale



Résistance d'entrée

$$R_{if} = \frac{R_i}{1+\beta A}$$

Résistance de sortie

$$R_{of} = \frac{R_o}{1+\beta A}$$

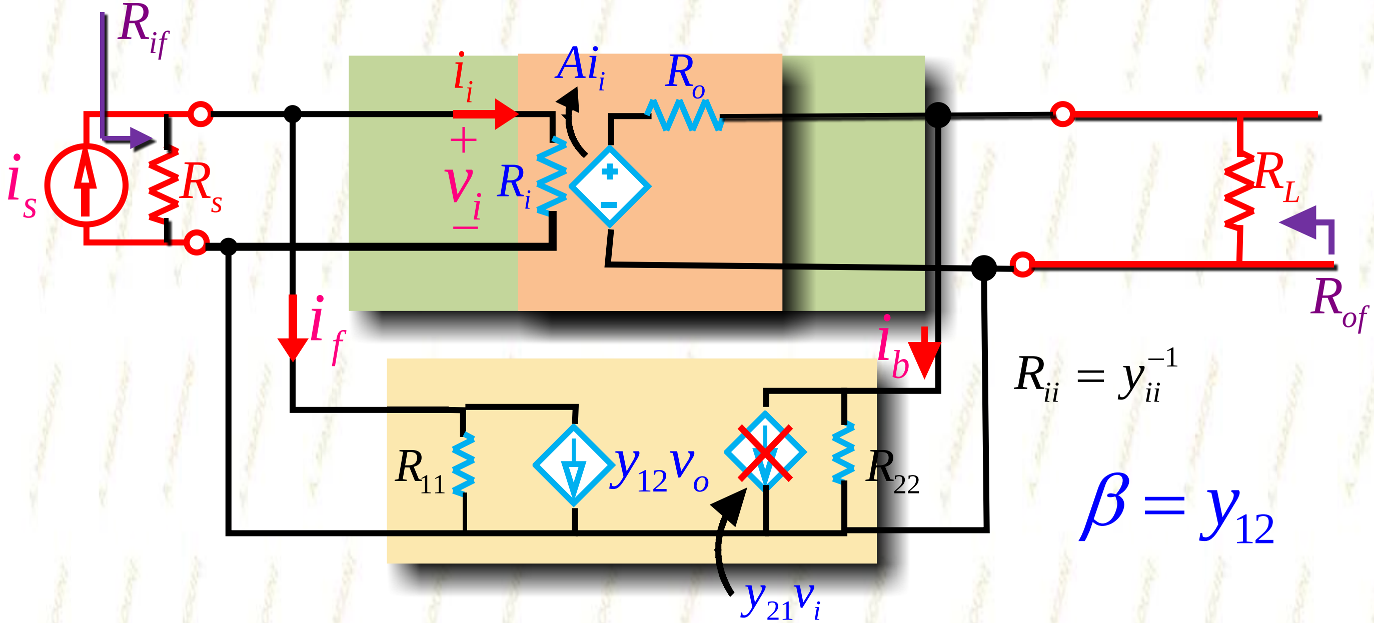
Gain en BF

$$A_f = \frac{v_o}{i_s} = \frac{A}{1+\beta A},$$ Gain trans-impédance

β: Une admittance

Topologie shunt-shunt pratique

Le quadripôle de retour est caractérisé par sa matrice admittance **y**.
Compte tenu de l'hypothèse d'un amplificateur A unilatéral, $y_{21}v_i$ est négligeable.



$R_{ii} = y_{ii}^{-1}$

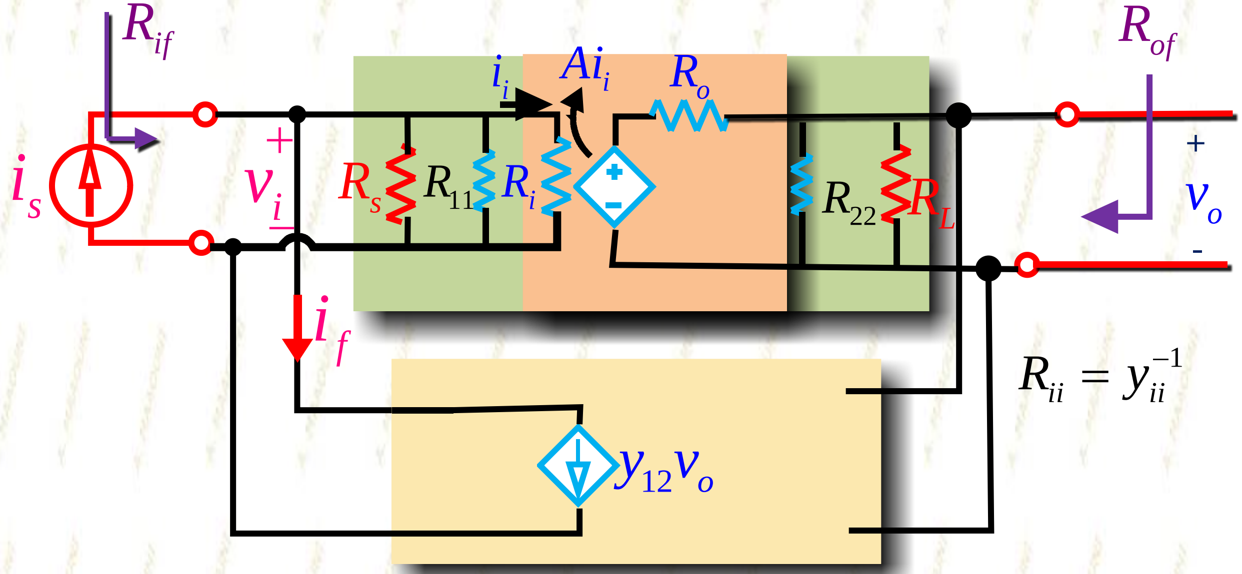
$\beta = y_{12}$

la structure réelle ci-dessus se réduit à la structure idéale où l'ampli de base a changé par l'ajout des résistances R_{ii}. La source de tension commandée en tension $y_{21}v_i$ est un CO.

$$\beta = y_{12} = \left.\frac{i_f}{v_o}\right|_{v_i=0}$$

Maaouni

L'amplificateur de base est modifié selon la forme ci-dessous :



- ***Calcul des résistances*** R_{ii}

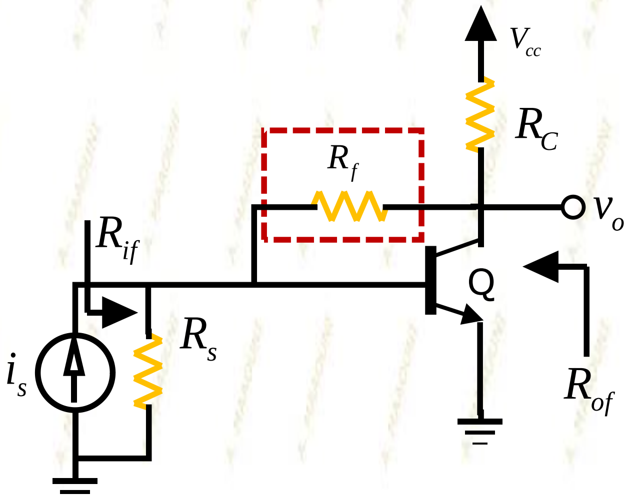
$$R_{11} = \left.\frac{v_i}{i_f}\right|_{v_o=0}$$

$$R_{22} = \left.\frac{v_o}{i_b}\right|_{v_i=0}$$

Maaouni

Exercice

Le transistor de l'amplificateur ci contre est Caractérisé par : $\beta, r_\pi, r_o = \infty$



Etablir le type de topologie de réaction Introduite par la résistance R_f .

Etablir l'amplificateur sans réaction.

Déterminer

$$\beta, A, A_f, R_{if},\ R_{of}$$