

# Principes de la réaction

## 1 – Structure d'un montage à réaction

Il est possible de modifier les performances d'un système en superposant au signal d'entrée tout ou partie du signal de sortie. On constitue ainsi un montage à « réaction ». Si le signal ramené sur l'entrée a le même signe, la réaction est positive ; sinon, on a une réaction négative ou *contre-réaction* ou *rétroaction* (en anglais feed-back). Dans un montage à réaction, on distingue trois parties :

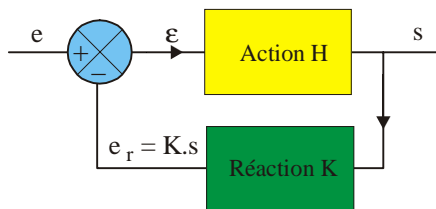


Fig. 1

- une *chaîne d'action* qui commande la charge ; elle est en général peu fidèle et sensible aux perturbations. Sa fonction de transfert est H.
- la *chaîne de réaction* de gain K.
- le *mélangeur*.

L'ensemble forme un **circuit bouclé**.

## 2 – Formule de Black

On se limitera ici à l'étude des signaux sinusoïdaux. Toutes les grandeurs sont complexes et fonction de  $\omega$  ( $s = s(j\omega)$ ...). La tension à la sortie du mélangeur est :

$$\varepsilon = e - e_R.$$

Soit H la fonction de transfert ou gain en « boucle ouverte » de la chaîne d'action.

La tension de sortie est :  $s = H.\varepsilon$

S'il n'y a pas de réaction :  $e_R = 0$   $s = H.e$

S'il y a réaction :  $e_R = K.s$   $s = H.\varepsilon = H.(e - e_R) = H.(e - K.s)$

On en déduit :  $s = e.H/(1 + HK).$

Si l'on pose  $s/e = H'$ , on tire la relation connue sous le nom de formule de Black<sup>1</sup>.

$$H' = \frac{H}{1 + K.H}$$

□ Si  $1 + KH < 1 \Rightarrow H' > H$ . La réaction est positive.

Un système à réaction positive est instable : quand le signal d'entrée croît, la croissance du signal de sortie induit une nouvelle augmentation du signal d'entrée : le signal de sortie diverge jusqu'à ce que la saturation ou le blocage viennent limiter son amplitude.

CAS PARTICULIER :  $1 + H.K = 0$

$H'$  est alors infini : on obtient un système oscillateur qui fournit un signal de sortie en l'absence de signal d'entrée. Pour obtenir un oscillateur stable, il faut trouver une méthode

<sup>1</sup> Quand en 1928 S. A. Black a voulu faire breveter le principe de la réaction négative, sa demande a été rejetée, car son idée estimée sans intérêt !

qui rend le produit  $H.K$  rigoureusement égal à  $-1$  une fois que les oscillations sont déclenchées. Cette condition est nommée « critère de Barkhausen ».

- Si  $1 + K.H > 1 \Rightarrow H' < H$ . La réaction est négative. *A priori* il n'y a pas de problèmes de stabilité. Nous allons examiner les conséquences de la contre-réaction sur le fonctionnement des circuits.

CAS PARTICULIER :  $K.H \gg 1$

Le gain du système bouclé devient alors  $H' \approx 1/K$ . Le gain ne dépend plus de la chaîne d'action mais seulement de la chaîne de contre-réaction. *Si la réponse de celle-ci est linéaire, la réponse du système bouclé est linéaire.*

### 3 – Améliorations induites par la contre-réaction

La contre-réaction permet d'améliorer les performances globales d'un système. Elle permet d'assurer la constance du gain à une valeur indépendante des constituants de la chaîne d'action, elle réduit les distorsions et améliore la bande passante.

#### 3.1 – Distorsion d'amplitude

C'est la *variation du gain* avec  $\omega$ . Elle est caractérisée par le rapport  $dH/H$ .

En boucle fermée et si  $K$  est indépendant de  $\omega$ , on peut écrire :

$$\frac{dH'}{H'} = \frac{dH}{H} - \frac{d(1 + KH)}{1 + KH} = \frac{dH}{H} - \frac{KdH}{1 + KH}$$

$$\frac{dH'}{H'} = \frac{1 + KH - KH}{1 + KH} \frac{dH}{H} = \frac{1}{1 + KH} \frac{dH}{H}$$

Dans le cas d'une contre-réaction, on a :  $(1 + KH) > 1$  :



La contre-réaction diminue la distorsion d'amplitude..

#### 3.2 – Distorsion de phase

Si le déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie varie avec  $\omega$ , il y a *distorsion de phase*.

On suppose que  $H = a + jb = A \cdot \exp(j \cdot \varphi) = A \cdot \cos \varphi + j \cdot A \cdot \sin \varphi$  et que  $K$  est réel. Sans contre-réaction, on a :  $\varphi = \arctg(b/a)$ .

$$H' = \frac{H}{1 + KH} = \frac{a + jb}{1 + Ka + jKb}$$

Donc :  $\varphi' = \arctg(b/a) - \arctg(Kb/(1 + Ka))$

Si le terme  $b$  varie avec  $\omega$ ,  $\varphi'$  varie moins vite que  $\varphi$  :



La contre-réaction diminue la distorsion de phase.

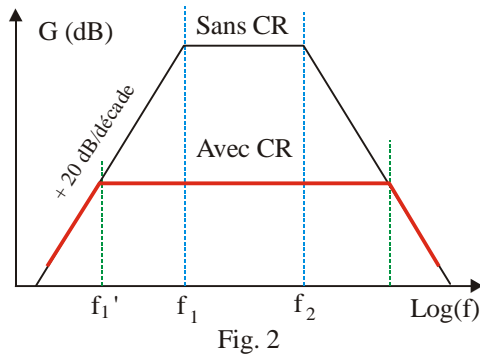
#### 3.3 – Bande passante

L'étude sera faite dans le cas d'un système du second ordre ayant une fréquence de coupure basse  $f_1$  et une fréquence de coupure haute  $f_2$  suffisamment distinctes pour que l'on puisse écrire la fonction de transfert sous la forme d'un produit de fonctions du premier ordre. Les expressions des fonctions de transfert en boucle ouverte, c'est-à-dire sans contre-réaction, sont donc :

$$\text{passe - haut : } H_{BF} = \frac{H_0}{1 - jf_1/f}; \quad \text{passe - bas : } H_{HF} = \frac{H_0}{1 + jf/f_2}$$

Avec contre-réaction, en basse fréquence, on a :

$$H' = \frac{H}{1 + KH} = \frac{\frac{H_0}{1 - jf_1/f}}{1 + K \cdot \frac{H_0}{1 - jf_1/f}} = \frac{H_0}{1 + KH_0 - jf_1/f}$$



Si on pose :

$$H'_0 = \frac{H_0}{1 + KH_0} < H_0$$

$$f'_1 = \frac{f_1}{1 + KH_0} < f_1$$

On peut écrire :  $H' = \frac{H'_0}{1 - j \frac{f'_1}{f}}$

On obtient à nouveau un système du premier ordre mais dont la fréquence de coupure est plus petite. Le gain du système bouclé est diminué.

En effectuant le même calcul en haute fréquence, on tire :

$$H' = \frac{H'_0}{1 + j \frac{f}{f'_2}} \quad \text{avec} \quad H'_0 = \frac{H_0}{1 + KH_0} < H_0 \quad \text{et} \quad f'_2 = f_2(1 + KH_0) > f_2$$

Cette fois la fréquence de coupure augmente.



La contre-réaction diminue le gain mais augmente la bande passante.

#### ☐ REMARQUE :

En général on a :  $f_1 \ll f_2$ . Soit GB le produit du gain par la bande passante.

Sans la contre-réaction :  $GB = H_0 \cdot (f_2 - f_1) \approx H_0 \cdot f_2$

Avec la contre-réaction :  $GB \approx H'_0 \cdot f'_2 = H_0 \cdot f_2$



Pour les systèmes bouclés du *premier* ordre, le produit gain-bande passante est pratiquement indépendant du taux de contre-réaction

### 3.4 – Autres effets de la contre-réaction

La réaction négative diminue également la *distorsion harmonique*. Celle-ci résulte de la présence, dans le signal de sortie, de fréquences qui ne sont pas présentes dans le signal d'entrée. Cet effet provient du comportement non linéaire de certains composants du système. Supposons par exemple que le courant collecteur d'un transistor soit relié à la tension d'entrée par une relation du type :

$i_C = A \cdot v_{BE} + B \cdot v_{BE}^2 + \dots$  Si la tension d'entrée est de la forme  $v_{BE} = V \cos \omega t$ , le courant de sortie va contenir des termes en  $\omega^2$  donc de pulsation  $2\omega$ .

En règle générale, la tension de sortie  $s$  peut s'exprimer comme la somme d'une tension utile  $H \cdot (e - K \cdot s)$  et d'une tension de « défauts »  $d$ . On en déduit que :

$$s = \frac{H \cdot e}{1 + K \cdot H} + \frac{d}{1 + K \cdot H}$$

La rétroaction diminue la tension parasite en sortie.

## 4 – Les différents types de contre-réaction

On peut envisager de réaliser la contre-réaction en tension ou en courant avec un couplage parallèle ou série. On aboutit aux quatre montages suivants :

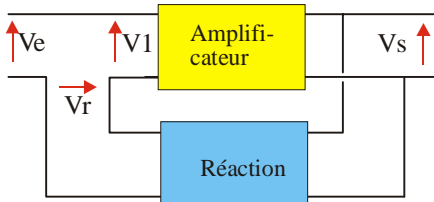


Fig. 3-a : Tension-série

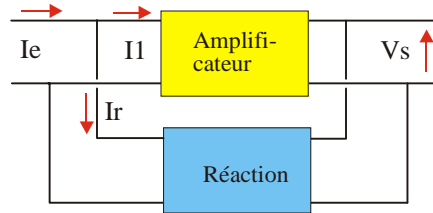


Fig. 3-b : Tension-parallèle

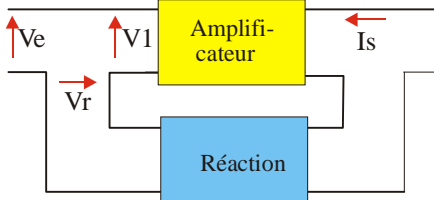


Fig. 3-c : Courant-série

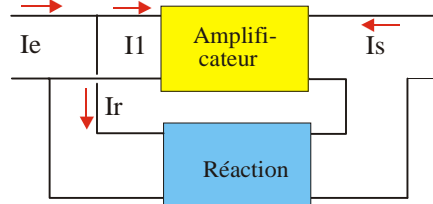


Fig. 3-d : Courant-parallèle

On peut aussi envisager des configurations plus complexes avec plusieurs étages d'amplification et des boucles de réaction partielles, totales ou mixtes dont l'analyse peut se révéler délicate. Globalement les avantages apportés par la contre-réaction compensent largement la diminution du gain.

## 4.1 – Le montage tension-série

Ce mode de contre-réaction étant très souvent utilisé dans les amplificateurs sera étudié plus en détail afin de montrer comment ce type de couplage modifie les performances du système.

### 4.1.1 – Amplificateur sans réaction

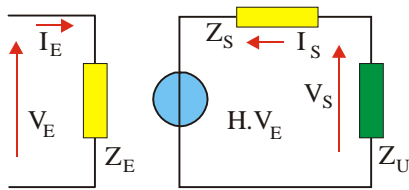


Fig. 4

L'amplificateur est modélisé par une impédance d'entrée  $Z_E$  et en sortie par un générateur de gain  $H$  et d'impédance  $Z_S$  :

$$V_E = Z_E \cdot I_E$$

$$V_S = H \cdot V_E + Z_S \cdot I_S$$

### 4.1.2 – Amplificateur avec réaction

On suppose que le courant prélevé par la chaîne de réaction est négligeable.

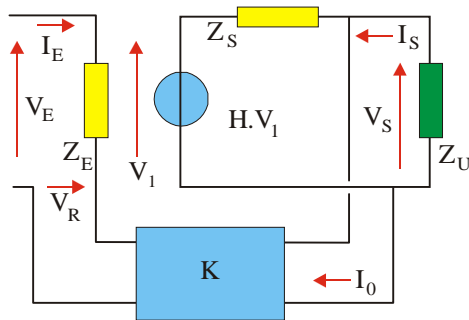


Fig. 5

$$V_S = H \cdot V_1 + Z_S \cdot (I_S - I_0) \approx H \cdot V_1 + Z_S \cdot I_S$$

$$V_S = -Z_U \cdot I_S \Rightarrow I_S = -V_S / Z_U$$

$$V_S = H \cdot V_1 - Z_S \cdot V_S / Z_U$$

$$\text{On pose : } \varepsilon = Z_S / Z_U$$

$$V_S = H \cdot V_1 / (1 + \varepsilon)$$

$$V_R = K \cdot V_S = K \cdot H \cdot V_1 / (1 + \varepsilon)$$

$$V_E = V_1 + V_R = V_1 \cdot \{1 + K \cdot H / (1 + \varepsilon)\}$$

$$V_E = Z'_E \cdot I_E \text{ or } V_1 = Z_E \cdot I_E$$

L'impédance d'entrée vaut :  $Z'_E = \left(1 + \frac{K \cdot H}{1 + \varepsilon}\right) Z_E$

♦  $\varepsilon = Z_S / Z_U$  vaut un pour un système adapté en puissance et zéro pour un système adapté en tension.

$$V_1 = V_E - V_R = V_E - K \cdot V_S.$$

Or :  $V_S = H.V_1 + Z_S.I_S = H.(V_E - K.V_S) + Z_S.I_S$

$$V_S = \frac{H}{1 + K.H} V_E + \frac{Z_S}{1 + K.H} I_S = H'.V_E + Z'_S.I_S$$

Le schéma équivalent du système bouclé est donc :

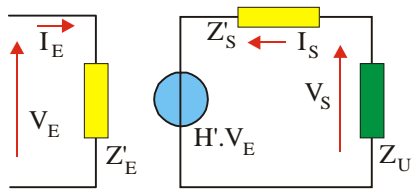


Fig 6

Avec ce type de contre-réaction, le gain en tension décroît, l'impédance d'entrée augmente et l'impédance de sortie diminue.

**Ce montage réalise donc une adaptation d'impédance entre l'entrée et la sortie.**

## 4.2 – Autres montages

Comme exercice, on pourra reprendre le calcul précédent pour les trois autres types de montage. En utilisant pour les gains H et K les expressions du tableau, montrer que le gain du système bouclé est toujours  $H/(1 + K.H)$  et retrouver les valeurs des impédances d'entrée et de sortie.

Couplage	$Z_{\text{Entrée}}$	$Z_{\text{Sortie}}$	H	K	Système résultant
Tension-série	$Z_E(1 + K.H)$	$Z_S/(1 + K.H)$	$V_S/V_1$	$V_R/V_S$	Amplificateur de tension
Tension //	$Z_E/(1 + K.H)$	$Z_S/(1 + K.H)$	$V_S/I_1$	$I_R/V_S$	Convertisseur courant-tension
Courant-série	$Z_E(1 + K.H)$	$Z_S(1 + K.H)$	$I_S/V_1$	$V_R/I_S$	Convertisseur tension-courant
Courant //	$Z_E/(1 + K.H)$	$Z_S(1 + K.H)$	$I_S/I_1$	$I_R/I_S$	Amplificateur de courant

[Retour au menu ↗](#)