
Bonjour à tous !

Philippe DONDON

<http://www.enseirb.fr/~dondon>

Un petit rappel

Pour se remettre dans le bain...

LA CONTRE REACTION

Principe de la rétroaction

- ◆ Prenons un exemple simple de la vie courante :

Vous souhaitez poser une casserole sur une plaque chauffante.

Vous disposez pour cela :

- d'un organe de décision (le cerveau),
- d'un actionneur (le bras),
- d'un capteur d'information (l'oeil).



LA CONTRE REACTION

Principe de la rétroaction

1° Votre cerveau donne l'ordre de déplacement de la casserole.

2° Votre bras agit pour déplacer celle-ci,

3° Votre oeil contrôle en permanence l'écart entre la position finale (la plaque chauffante) et la position actuelle de la casserole.

4° Lorsque cet écart devient nul (casserole correctement positionnée à "sa valeur de consigne"), votre cerveau décide d'arrêter le mouvement de votre bras...



LA CONTRE REACTION

Principe de la rétroaction

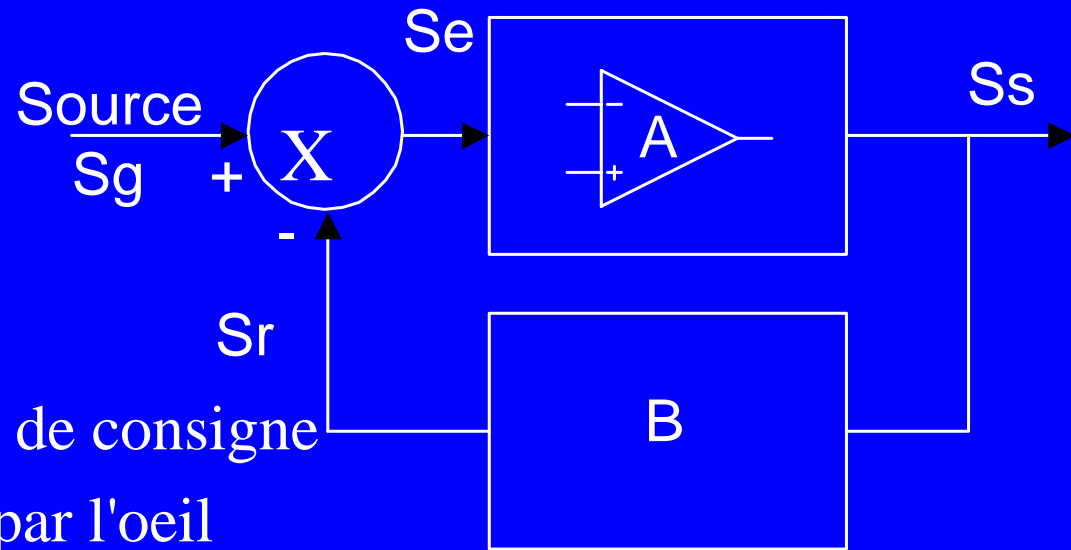
Vous avez agi (sans le savoir) comme un système asservi ou contre réactionné...



LA CONTRE REACTION

Principe de la rétroaction

- ◆ D'où le schéma classique d'un asservissement :



S_g : position finale ou valeur de consigne

S_e : écart ou erreur mesurée par l'oeil

A : actionneur " bras "

S_s : position instantanée de la casserole (sortie)

B : fonction de transfert du capteur "oeil"

S_r : information de retour vers le cerveau

X : organe de comparaison (votre cerveau)...

LA CONTRE REACTION

Principe de la rétroaction

Remarque :

L'organe de comparaison est généralement affecté d'un signe + sur l'entrée Se et d'un signe - sur l'entrée Sr. En effet, effectuer la comparaison de ces deux informations revient à mesurer l'écart donc à faire la différence algébrique des deux :

$$\text{ainsi } Se = Sg - Sr.$$

LA CONTRE REACTION

Intérêt de la rétroaction

- ◆ Reprenons notre exemple et supposons qu'un petit malin vous mette un bandeau sur les yeux ; le retour d'information est alors supprimé : on dit que vous travaillez "**en boucle ouverte**".

La vitesse d'exécution et la précision de votre mouvement risque d'être fortement dégradés (et la casserole se retrouver par terre)...

LA CONTRE REACTION

Intérêt de la rétroaction (suite)

- ◆ Otez le bandeau et ouvrez à nouveau les yeux : Que votre bras soit "petit et faible" ou "gros et costaud", la casserole arrivera sur la plaque chauffante grâce à l'action de surveillance constante exercée par l'œil
- ◆ Enfin, supposez que votre bras rencontre par malheur un obstacle sur son trajet. Toujours grâce à la chaîne de retour (l'œil), vous allez corriger la trajectoire.

En **boucle ouverte**, l'obstacle aurait eu un impact supérieur (arrêt du mouvement ou renversement de la casserole par exemple).

LA CONTRE REACTION

Intérêt de la rétroaction

◆ En résumé :

- l'asservissement rend le système (quasiment) insensible aux performances de la chaîne directe, (l'actionneur bras dans l'exemple),
- minimise l'effet de facteurs extérieurs (perturbations, parasites, etc),
- améliore la précision et la fiabilité du système. Dans l'idéal, la qualité de l'asservissement ne dépend que de celle de la chaîne retour.

LA CONTRE REACTION

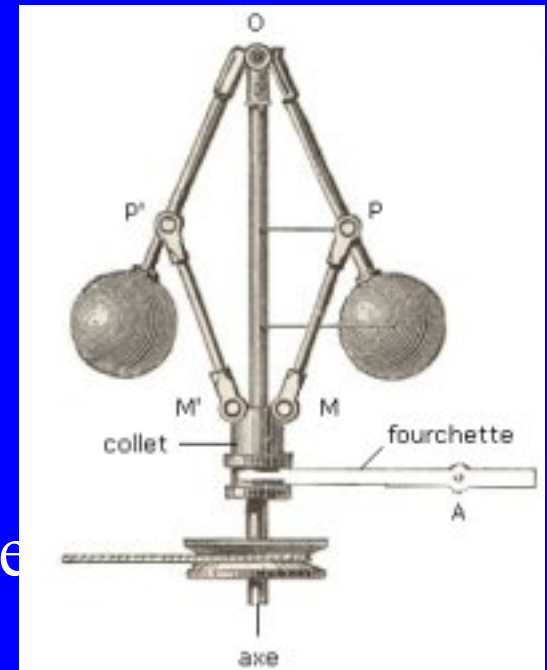
machine de Watt 1769

◆ Régulation de vitesse

machine au bon régime : fourchette horizontale.

vitesse trop élevée : la fourchette tourne autour de l'axe A, s'élève et les boules s'éloignent de l'axe.

vitesse trop faible : la fourchette s'abaisse et les boules se rapprochent de l'axe.



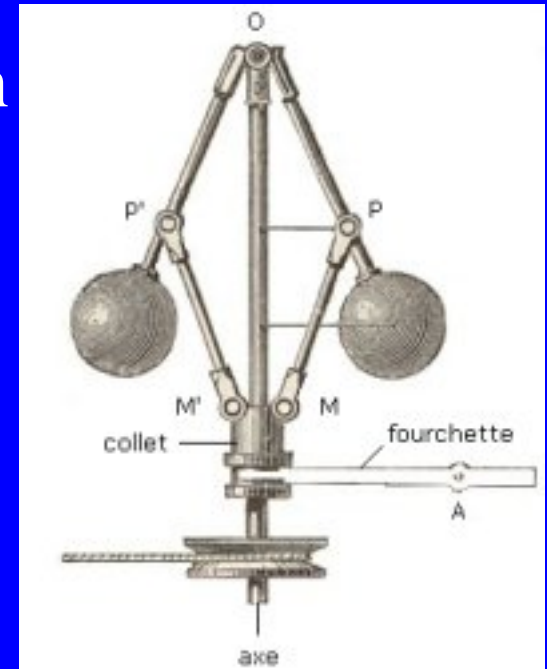
LA CONTRE REACTION

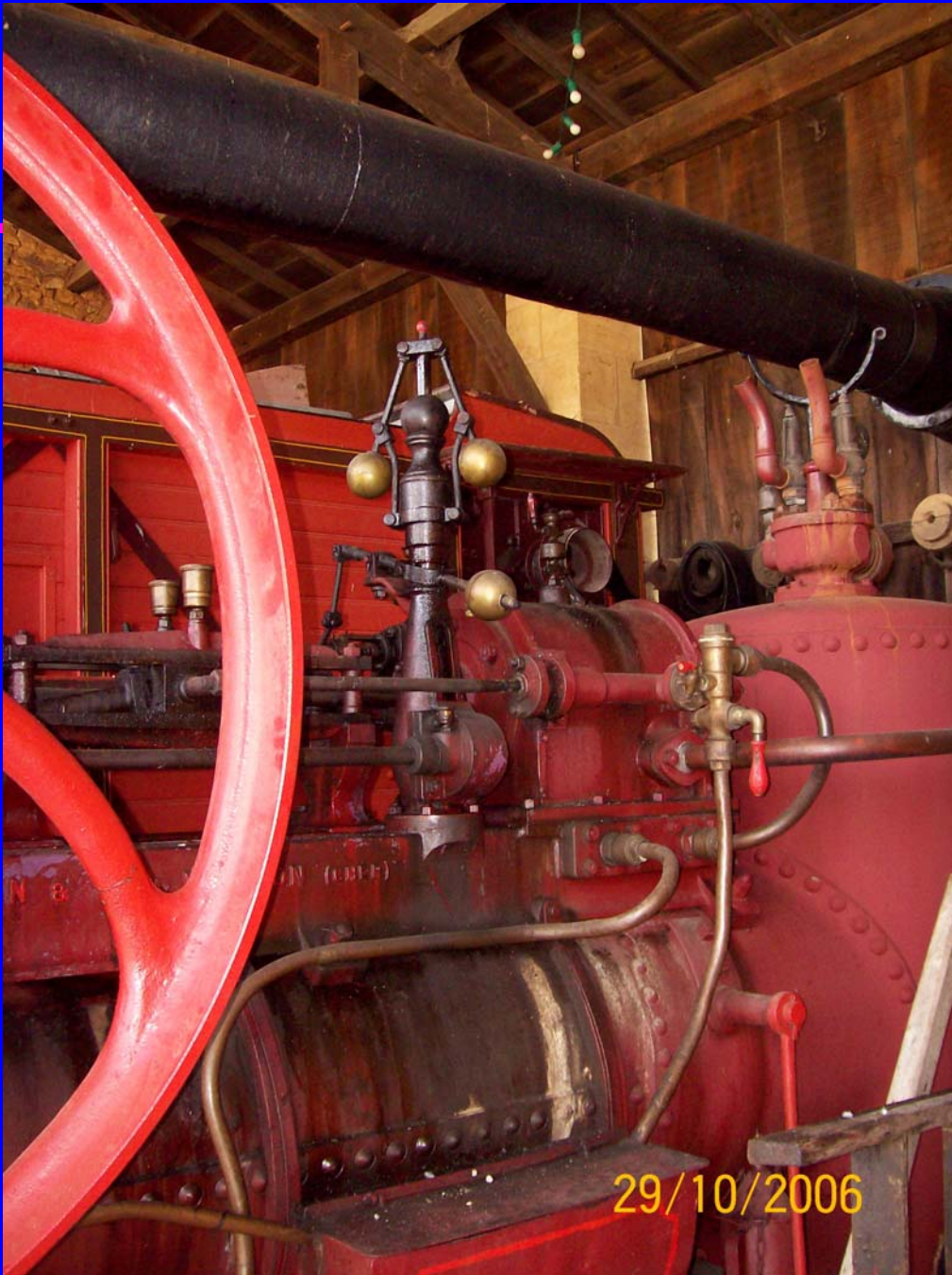
machine de Watt 1769

◆ Régulation de vitesse

fourchette reliée à une valve d'admission de la vapeur provenant de la chaudière.

> quand la machine tourne trop vite la quantité de vapeur diminue et inversement dans le cas contraire.





Machine à vapeur
Village du Bournat
(24- Le Bugue)

LA CONTRE REACTION

Théorie et méthode généralisée de calcul

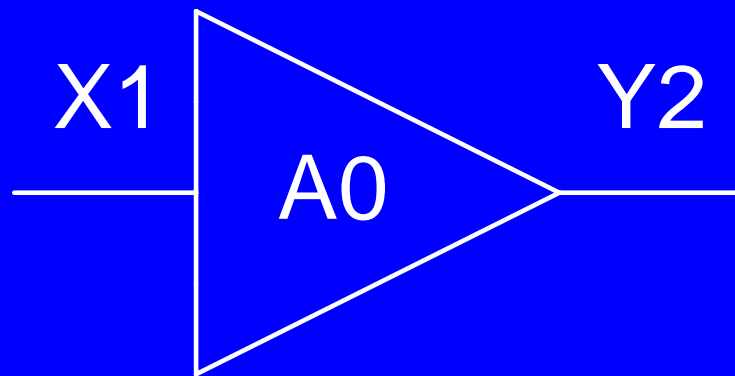
- ◆ *Généralités, définitions*
- ◆ *Méthode de calcul de la rétroaction*
- ◆ *Conclusion, mise en œuvre de la méthode*

sources : Ph Marchegay (professeur ENSEIRB)

LA CONTRE REACTION

Généralités

◆ Classification des amplificateurs



X1 : variable généralisée d'entrée

Y2 variable généralisée de sortie

X1 et Y2 peuvent être des tensions ou des courants

LA CONTRE REACTION

Généralités

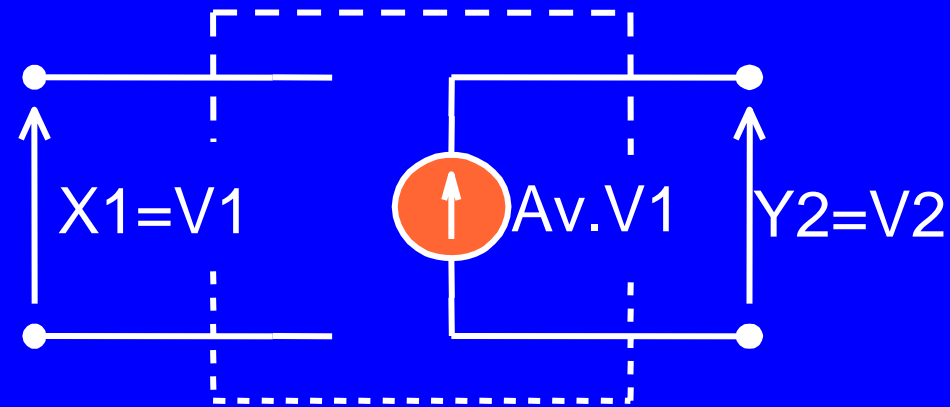
◆ Classification des amplificateurs

TYPE AMPLI.	AMPLI. DE TENSION	AMPLI. DE COURANT	AMPLI A TRANS-CONDUCTANCE	AMPLI A
				TRANS-RESISTANCE
X1	TENSION	COURANT	TENSION	COURANT
Y2	TENSION	COURANT	COURANT	TENSION
GAIN	GAIN EN TENSION	GAIN EN COURANT	TRANS-CONDUCTANCE	TRANS-RESISTANCE
A0	A_{v0}	A_{i0}	A_{y0}	A_{z0}

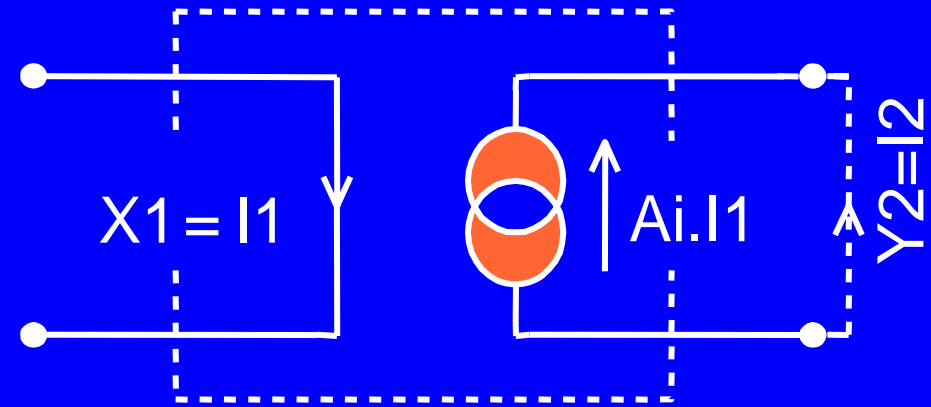
LA CONTRE REACTION

Généralités

◆ Classification des amplificateurs



(a) Amplificateur de tension

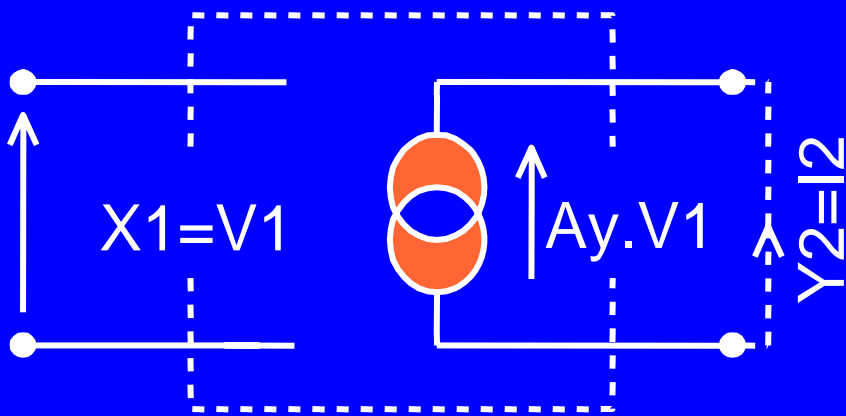


(b) Amplificateur de courant

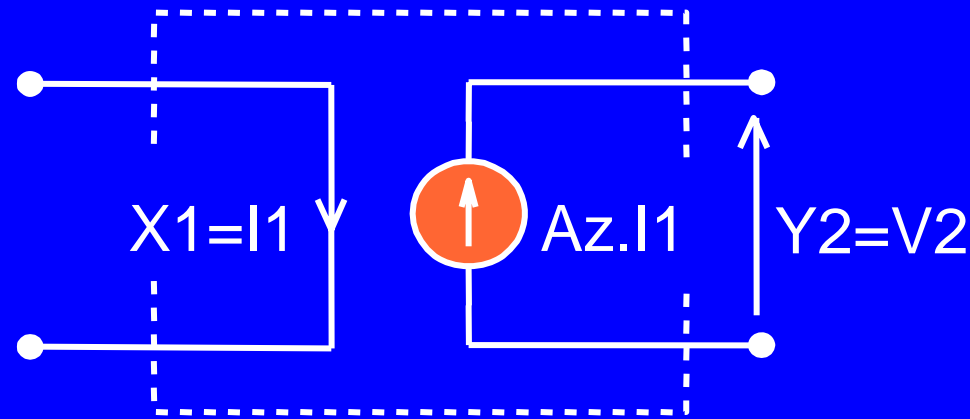
LA CONTRE REACTION

Généralités

◆ Classification des amplificateurs



(c) Amplificateur à transconductance



(d) Amplificateur à transrésistance

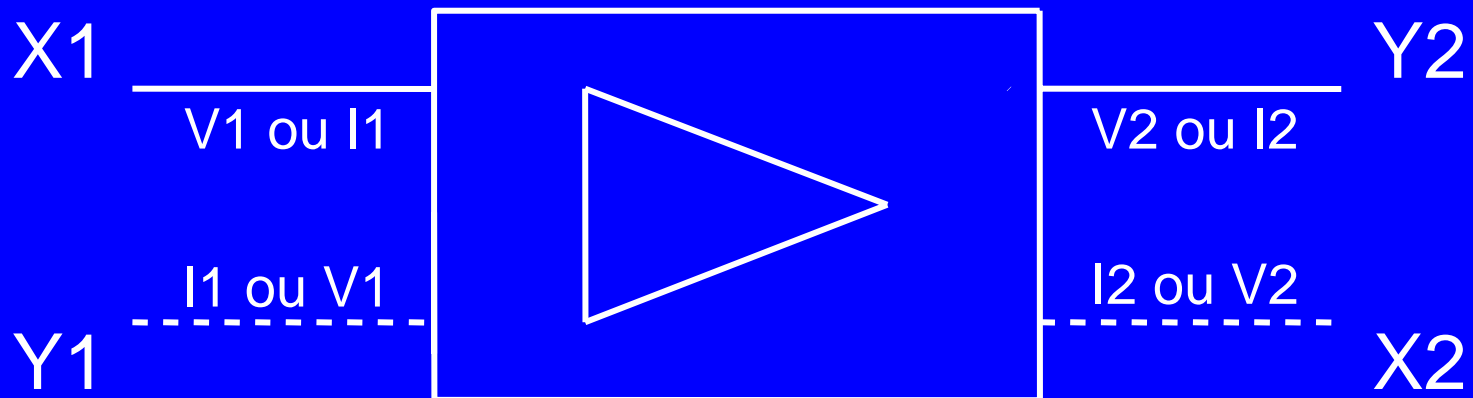
LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel

En fait, le schéma réel tient compte des 2 variables généralisées en entrée et sortie :

$$\begin{Bmatrix} X1 \\ X2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M11 & M12 \\ M21 & M22 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} Y1 \\ Y2 \end{Bmatrix}$$

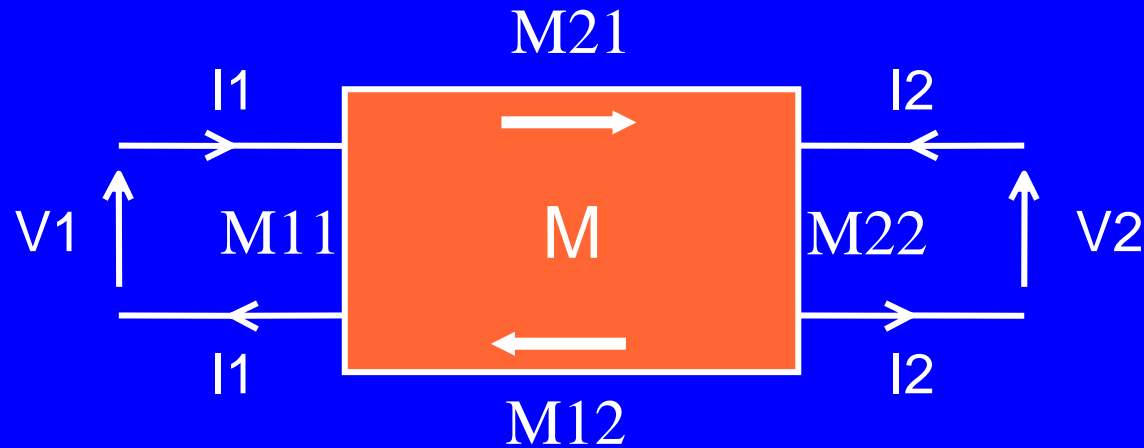


LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel

Avec les conventions de signe :



LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel

X1 : variable d'entrée principale

Y2 : variable de sortie principale

X2 : variable de sortie secondaire

Y1 : variable d'entrée secondaire

LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel

$$X1 = M11 \cdot Y1 + M12 \cdot Y2$$

$$X2 = M21 \cdot Y1 + M22 \cdot Y2$$

$M11=X1/Y1$ pour $Y2=0$: immittance spécifique d'entrée
(circuit de sortie ouvert ou court circuité)

$M22=X2/Y2$ pour $Y1=0$: immittance spécifique de sortie
(circuit d'entrée ouvert ou court circuité)

LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel

$$X1 = M11 \cdot Y1 + M12 \cdot Y2$$

$$X2 = M21 \cdot Y1 + M22 \cdot Y2$$

M12= coefficient de transfert inverse (de 2 vers 1)

M21= coefficient de transfert direct (de 1 vers 2)

(termes avec ou sans dimension)

LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel

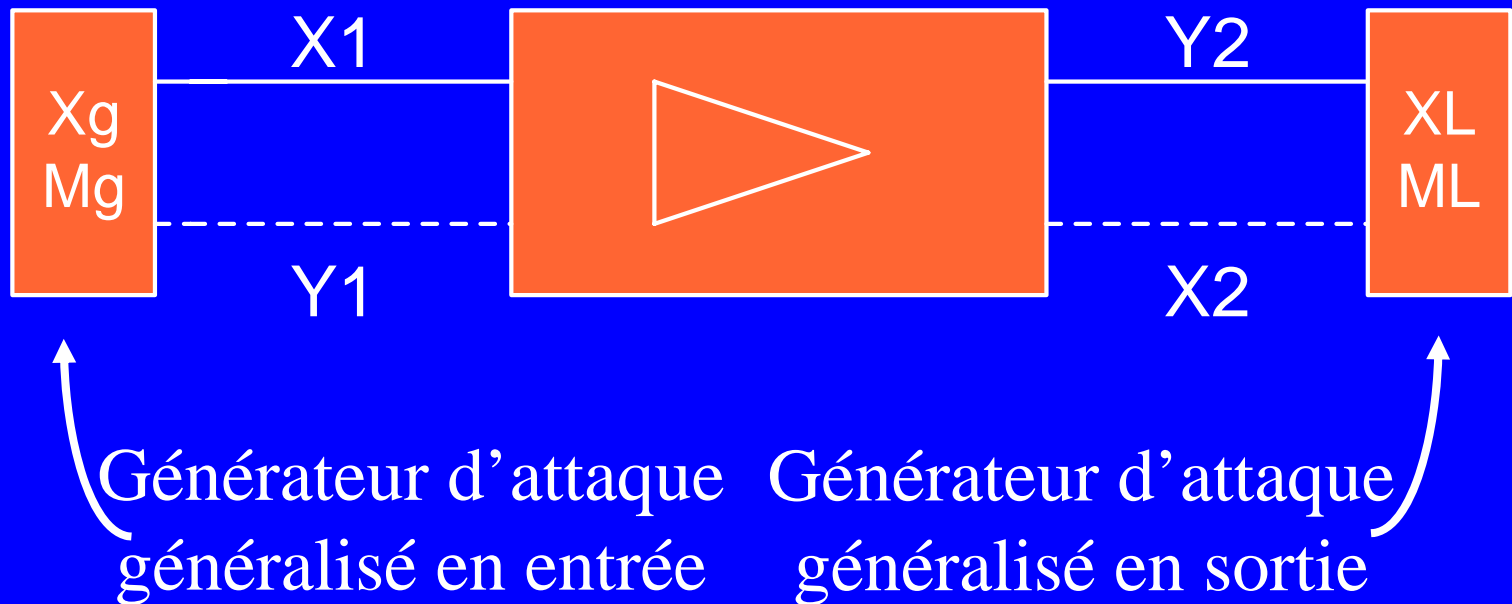
Selon le type de variables considérées,
la matrice M sera :

- la matrice impédance Z
- la matrice admittance Y
- la matrice hybride directe H
- la matrice hybride inverse G

LA CONTRE REACTION

Définitions

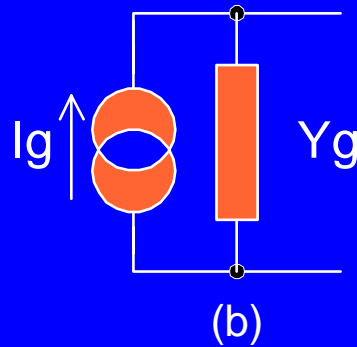
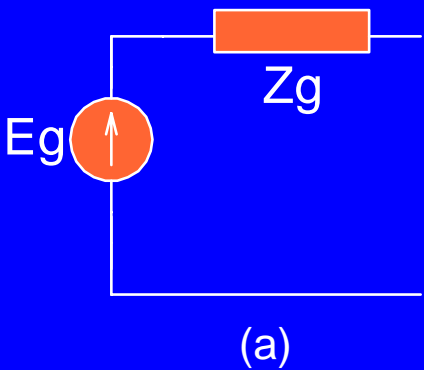
- ◆ Amplificateur réel dans son environnement



LA CONTRE REACTION

Définitions

◆ Amplificateur réel dans son environnement

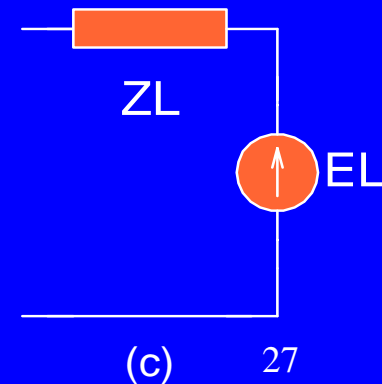
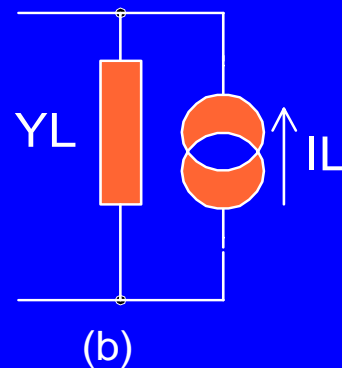


En entrée :

$$X1 = Xg - Mg \cdot Y1$$

En sortie :

$$X2 = XL - ML \cdot Y2$$



LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

En incluant l'effet de la source et de la charge :

$$\begin{vmatrix} X_g \\ XL \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M_{11} + M_g \\ M_{21} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} M_{12} \\ M_{22} + ML \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{vmatrix}$$

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Immittance de maille d'entrée : (M_g incluse, $X_L = 0$)

$$M_{ex} = \frac{X_g}{Y_1} = (M_{11} + M_g) - \frac{M_{12} \cdot M_{21}}{M_{22} + M_L}$$

Contribution de l'entrée

Contribution de la sortie si
ampli non unilatéral ($M_{12} \neq 0$)

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Immittance d'entrée : (vue par $X_g, M_g, X_L = 0$)

Il suffit de faire $M_g = 0$ dans la formule précédente

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Immittance de maille de sortie : (ML incluse, $X_g = 0$)

$$M_{sx} = \frac{XL}{Y_2} = M_{22} + ML - \frac{M_{12} \cdot M_{21}}{M_{11} + M_g}$$

Contribution de la sortie

Contribution de l'entrée si
ampli non unilatéral ($M_{12} \neq 0$)

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Immittance de sortie vue par $X_L, M_L, X_g = 0$)

Il suffit de faire $M_L = 0$ dans la formule précédente

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Gain composite : (entre Y_2 et X_g à $X_L = 0$)

Coefficient de transfert direct

$$A_{0x} = \frac{Y_2}{X_g} = - \frac{M_{21}}{(M_{11} + M_g) \cdot (M_{22} + M_L) - M_{21} \cdot M_{12}}$$

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Gain de l'amplificateur chargé par ML : (entre $X1$ et $Y2$ à $XL = 0$)

Il suffit de faire $Mg = 0$ dans la formule précédente

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Hypothèse d'unilatéralité :

- L'énergie traverse l'amplificateur de l'entrée vers la sortie
- Pas de retour d'énergie dans le sens contraire

$$\Rightarrow M_{12} = 0$$

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Alors :

$$\mathbf{M_{ex}} = \mathbf{M_{11}} + \mathbf{M_g}$$

(Immittances d'entrée indépendantes de ML)

$$\mathbf{M_{sx}} = \mathbf{M_{22}} + \mathbf{M_L}$$

(Immittances de sortie indépendantes de Mg)

LA CONTRE REACTION

Définitions

- ◆ Amplificateur réel dans son environnement

Et :

$$A_{0x} = - \frac{M_{21}}{M_{ex} \cdot M_{sx}}$$

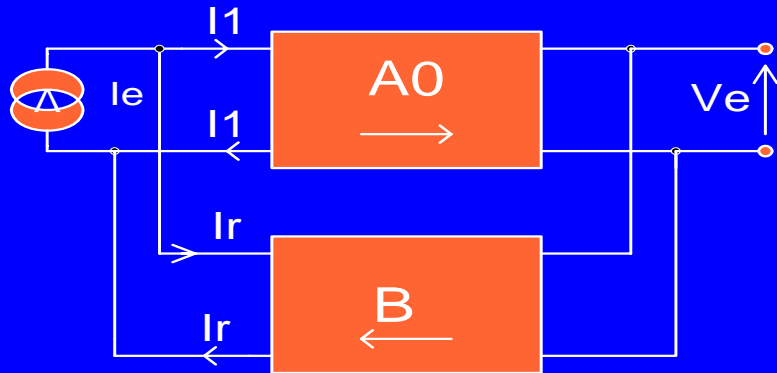
Et si amplificateur idéal, alors M_g et M_L négligeables devant M_{11} et M_{22} :

$$A_{0x} = A_0 = - \frac{M_{21}}{M_{11} \cdot M_{22}}$$



LA CONTRE REACTION

Les quatre types de rétroaction

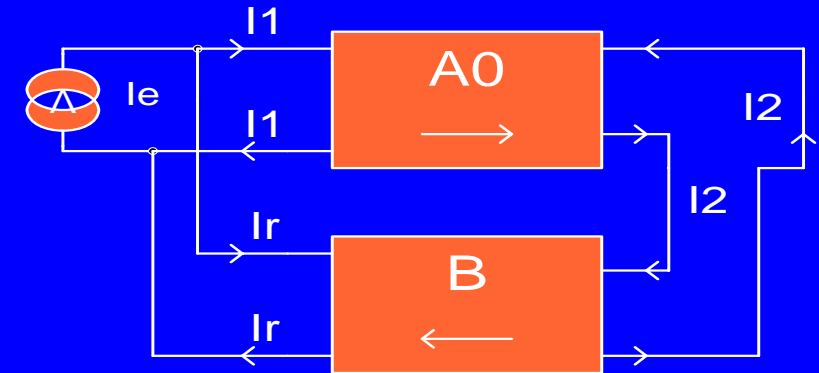


$$X1 = X_e - X_r$$

$$I1 = I_e - I_r$$

Tension - Parallèle

$$Y2 = V2$$

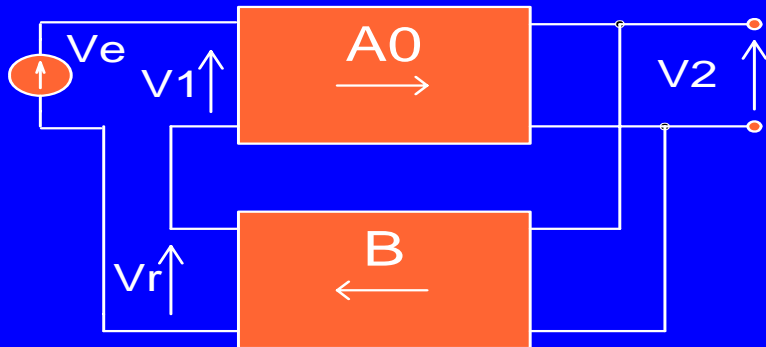


$$X1 = X_e - X_r$$

$$I1 = I_e - I_r$$

Courant - Parallèle

$$Y2 = I2$$

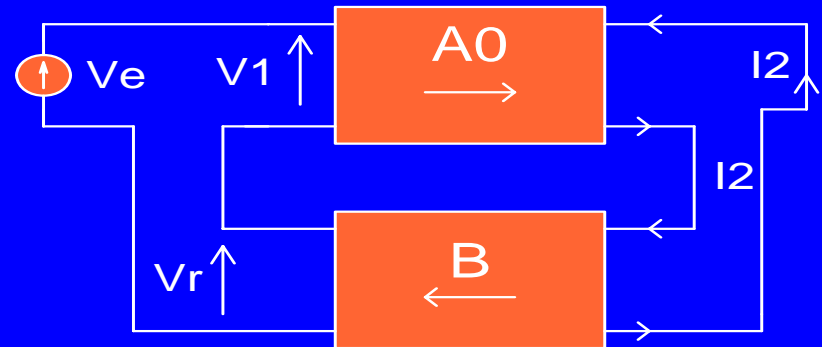


$$X1 = X_e - X_r$$

$$V1 = V_e - V_r$$

Tension - Série

$$Y2 = V2$$



$$X1 = X_e - X_r$$

$$V1 = V_e - V_r$$

Courant - Série

$$Y2 = I2$$

LA CONTRE REACTION

Les quatre types de rétroaction

◆ Nature des variables :

X1 : variable d'entrée principale (courant si CR //, tension si CR série)

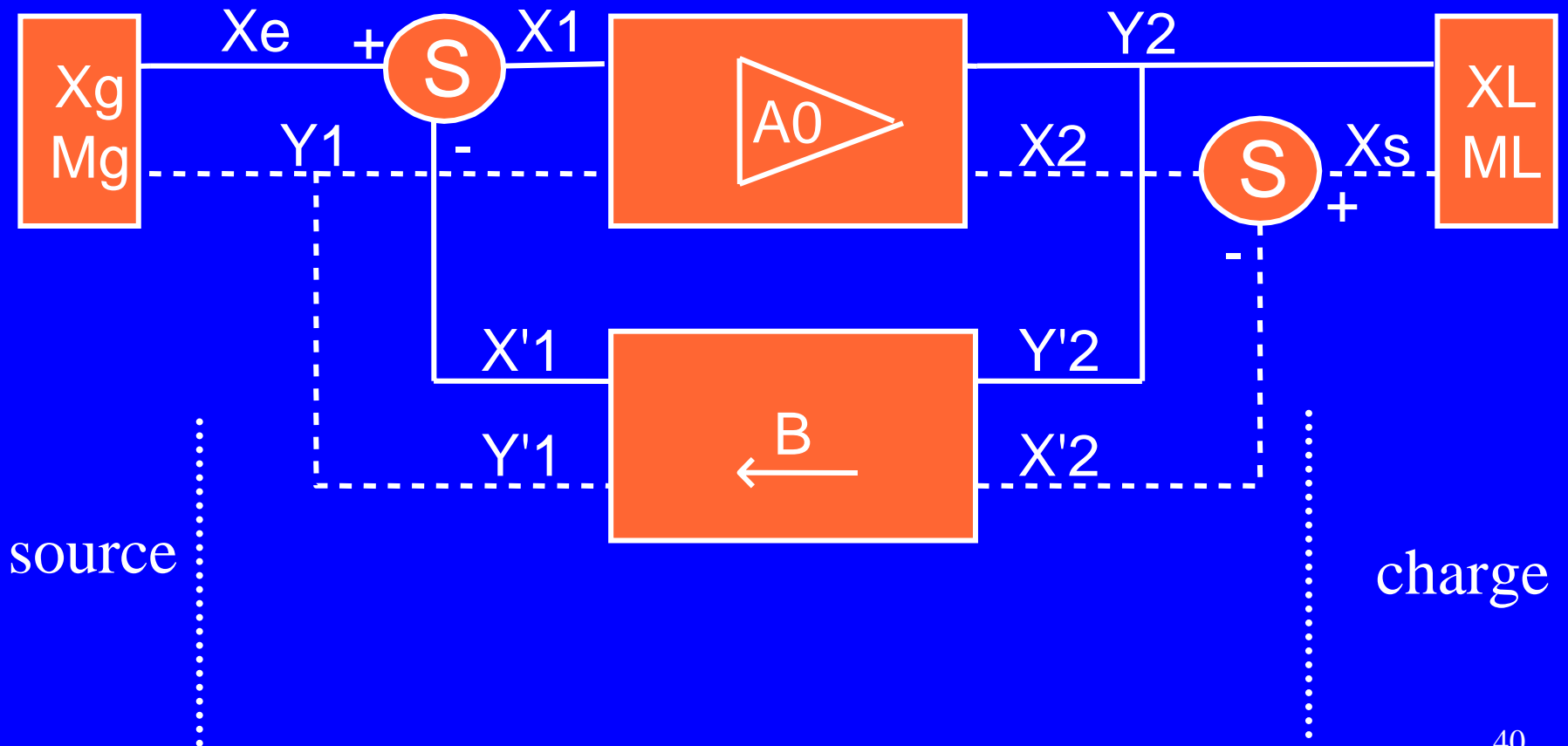
Y1 : variable d'entrée secondaire (tension si CR //, courant si CR série)

Y2 : variable de sortie principale (courant si CR de courant, tension si CR de tension)

X2 : variable de sortie secondaire (tension si CR de courant, courant si CR de tension)

LA CONTRE REACTION

Généralisation



LA CONTRE REACTION

Généralisation

RETROACTION	TENSION PARALLELE	TENSION SERIE	COURANT PARALLELE	COURANT SERIE
$X_g, X_1, X_e, X'1$	I	V	I	V
$Y_2 = Y'2$	V	V	I	I
$X_s, X_2, X_L, X'2$	I	I	V	V
$Y_1 = Y'1$	V	I	V	I
$A_0 = Y_2 / X_1$	Az	Av	Ai	Ay
$B = X'1 / Y'2$	By	Bv	Bi	Bz
$A_r = Y_2 / X_g$	Az	Av	Ai	Ay
matrice $\ M\ $	$\ Y\ $	$\ H\ $	$\ G\ $	$\ Z\ $
Mg	Yg	Zg	Yg	Zg
ML	YL	YL	ZL	ZL

LA CONTRE REACTION

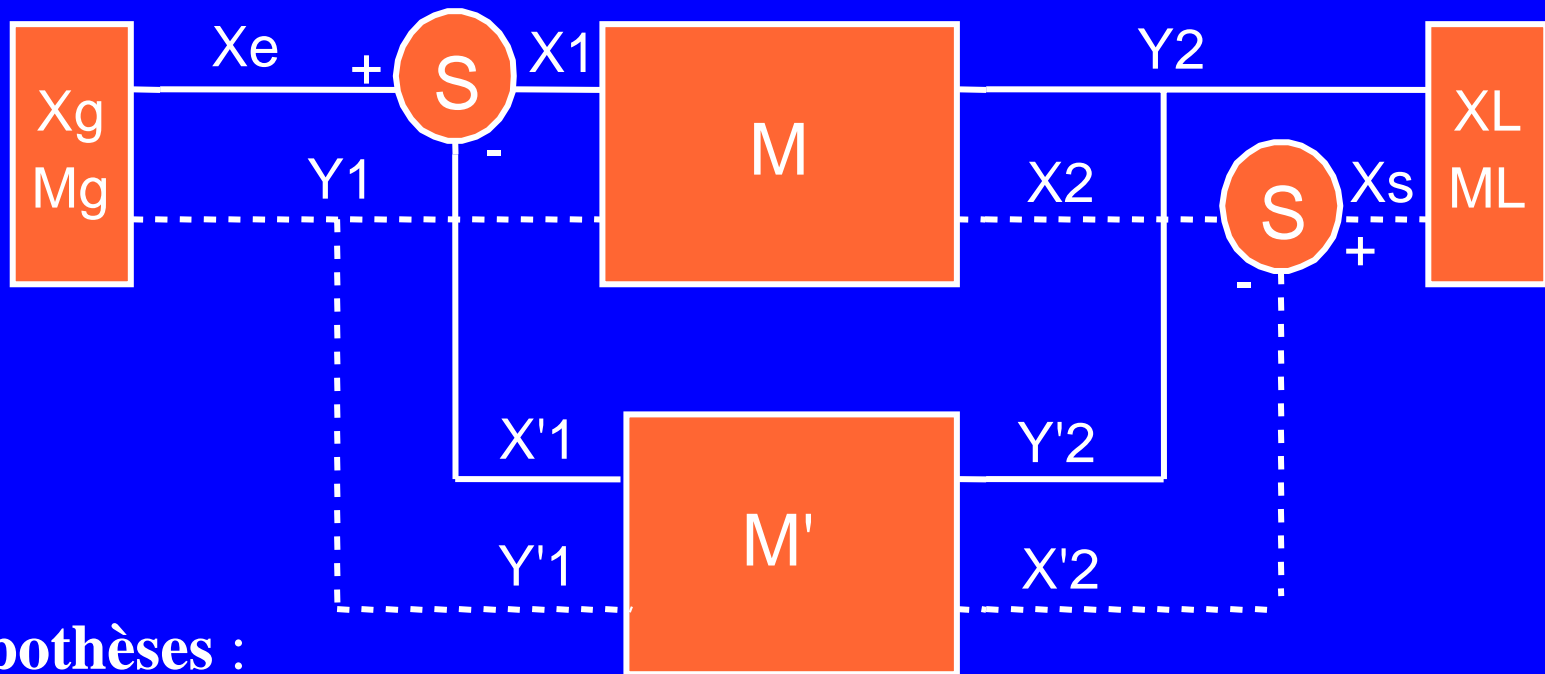
Théorie et méthode généralisée de calcul

- ◆ *Généralités, définitions*
- ◆ *Méthode de calcul de la rétroaction*
- ◆ *Conclusion, mise en œuvre de la méthode*

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

◆ Modèle d'étude de la contre réaction



Hypothèses :

amplificateur et réseau de rétroaction = biportes de matrices M et M'

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

◆ Modèle d'étude de la contre réaction

Hypothèses :

$$1) \text{ on pose : } \left\{ \begin{array}{l} \|M\| = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \quad \text{ampli de base} \\ \|M'\| = \begin{vmatrix} m'_{11} & m'_{12} \\ m'_{21} & m'_{22} \end{vmatrix} \quad \text{réseau de rétroaction} \end{array} \right.$$

2) Amplificateur de base unilatéral $\Rightarrow \mathbf{m_{12} = 0}$

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

Après calcul matriciel, il vient :

$$\begin{Bmatrix} Xg \\ XL \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M11 & M12 \\ M21 & M22 \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} Y1 \\ Y2 \end{Bmatrix}$$

Avec :

$$M11 = m11 + m'11 + Mg$$

$$M12 = m12 + m'12$$

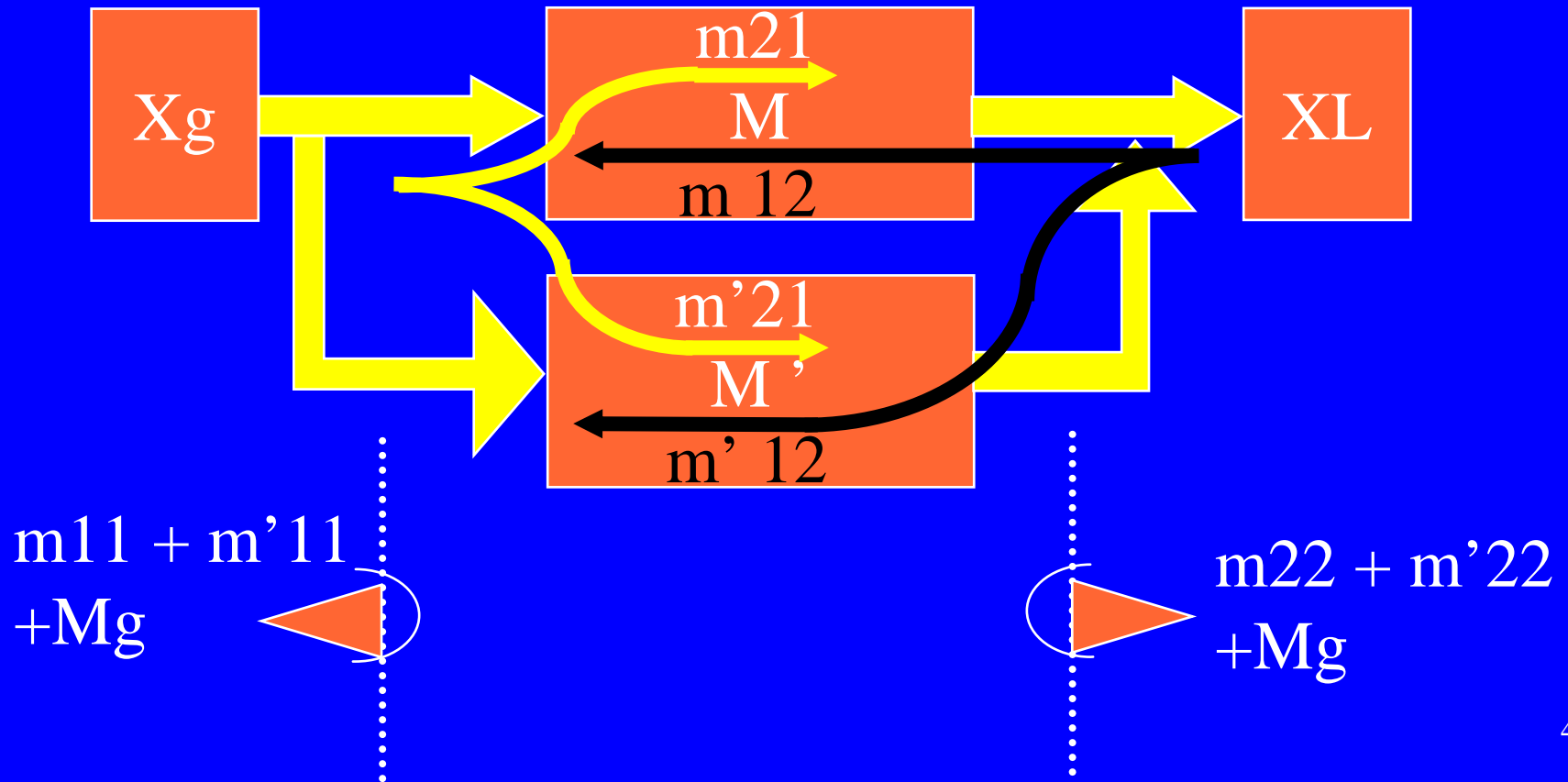
$$M21 = m21 + m'21$$

$$M22 = m22 + m'22 + ML$$

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

Tout se passe comme si...



LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

D'où le schéma équivalent global :



$$\begin{Bmatrix} X_g \\ X_L \end{Bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{Bmatrix}$$

L 'amplificateur à rétroaction englobe l 'amplificateur de base, le réseau de rétroaction, ainsi que les immittances de source et de charge

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

Comme pour l'amplificateur de base seul, on a :

$M_{11} = X_g / Y_1$ pour $Y_2 = 0$: immittance d'entrée avec CR
(circuit de sortie ouvert ou court circuité)

$M_{22} = X_L / Y_2$ pour $Y_1 = 0$: immittance de sortie avec CR
(circuit d'entrée ouvert ou court circuité)

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

D'où les paramètres avec rétroaction :

- gain composite ($X_L=0$)

$$A_{xr} = \frac{Y_2}{X_g} = - \frac{M_{21}}{M_{11} \cdot M_{22} - M_{12} \cdot M_{21}}$$

- immittance maille d'entrée ($X_L=0$)

$$M_{exr} = \frac{X_g}{Y_1} = M_{11} - \frac{M_{21} \cdot M_{12}}{M_{22}}$$

- immittance maille de sortie ($X_g=0$)

$$M_{sxr} = \frac{X_L}{Y_2} = M_{22} - \frac{M_{21} \cdot M_{12}}{M_{11}}$$

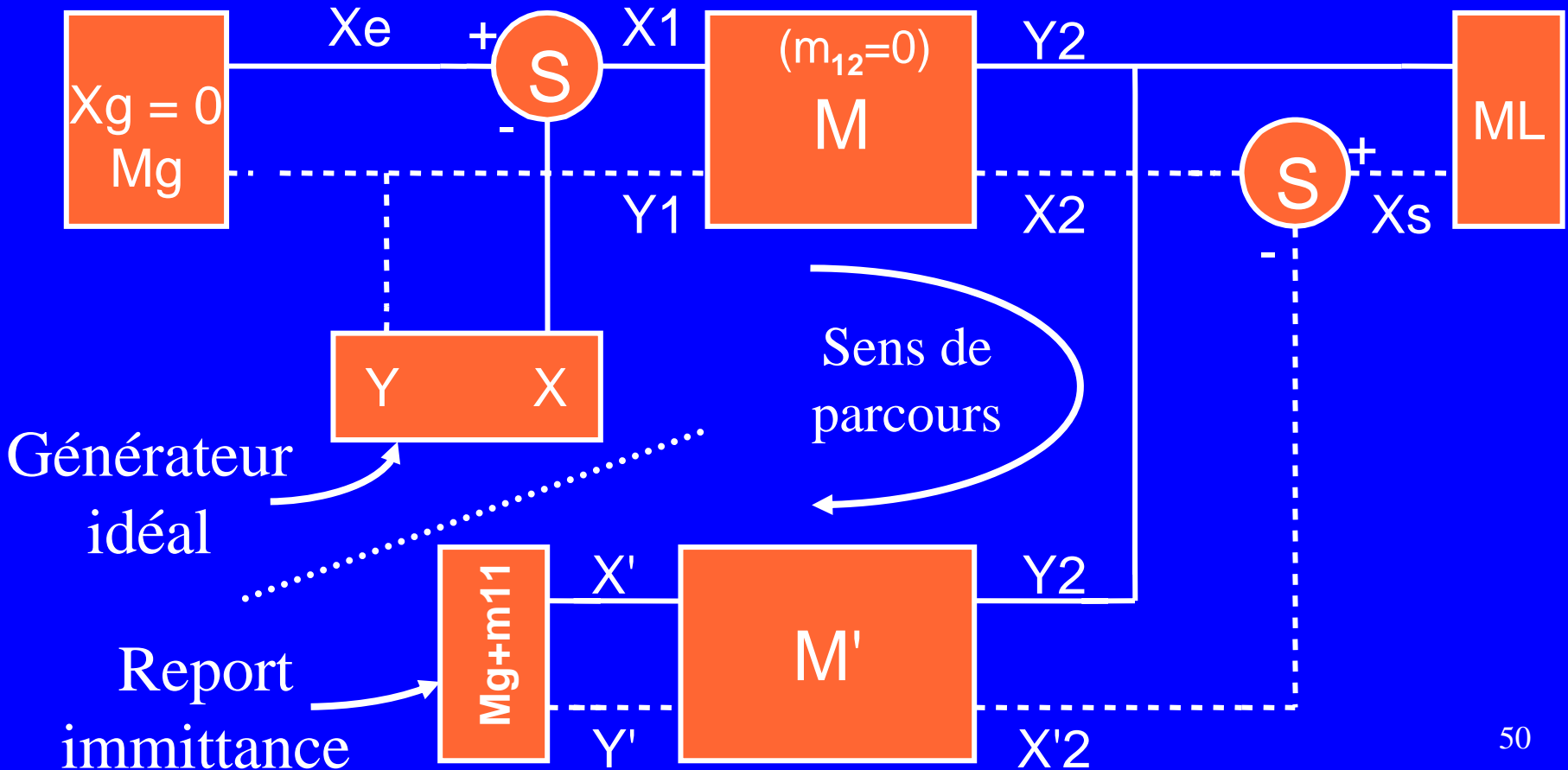
Symétrie
des
indices



LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte



LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

- ◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Produit des coefficients de transfert
dans le sens de parcours

$$T = \frac{X'}{X} = \frac{Y'}{Y} = \frac{m_{21}.m'_{12}}{M_{11}.M_{22} - m'_{12}.m'_{21}}$$

Prend en compte Mg

Prend en compte ML

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Conclusion :

Le gain de boucle est déterminé en faisant le rapport entre les variables de sortie et d'entrée de la boucle de même nature.

On peut donc faire indifféremment une analyse

« tout en tension » ou « tout en courant »

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Gain sans rétroaction A_x :

=>Gain de l'amplificateur de base chargé :

- **en sortie**, par l'immittance spécifique de sortie du biporte de rétroaction et l'immittance de charge.

[Cliquer ici pour
détails](#)

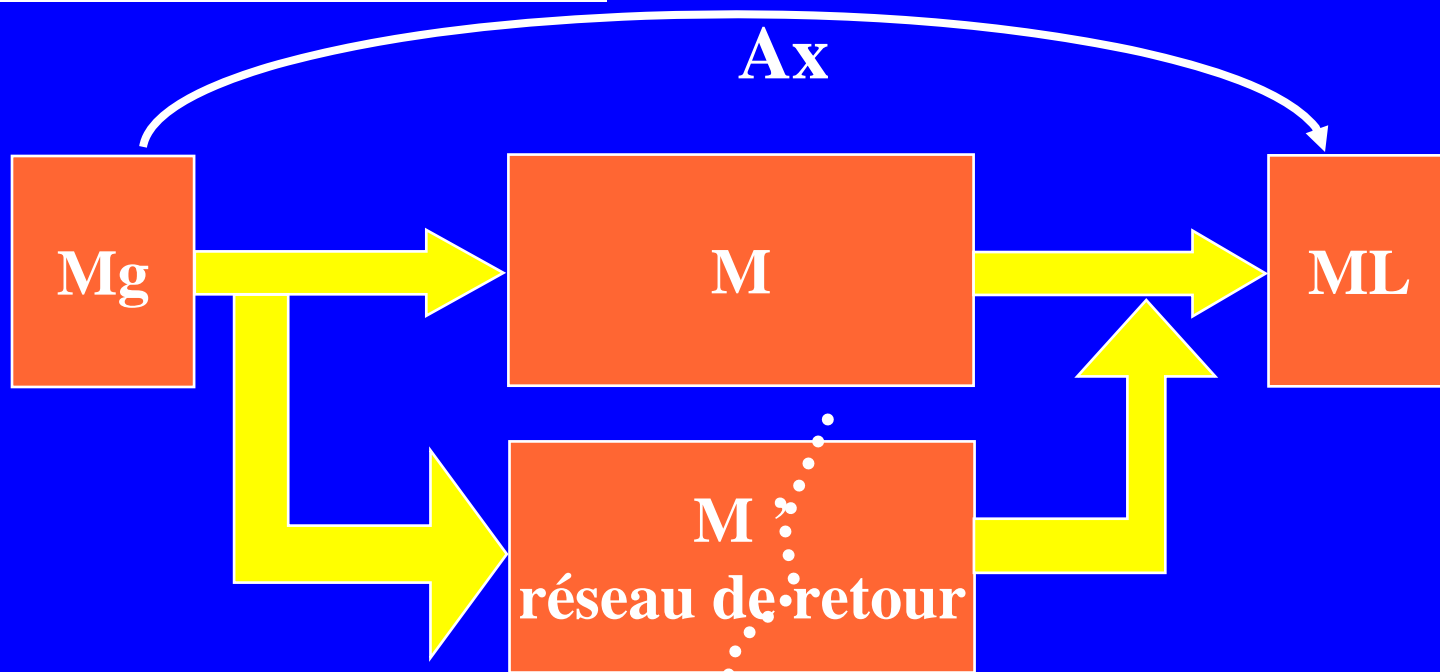
- **en entrée**, par l'immittance interne du générateur d'attaque et l'immittance d'entrée du biporte de rétroaction dans ses conditions d'utilisation, c-à-dire chargé par la sortie de l'amplificateur de base et par l'immittance M_L .

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

- ◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Gain sans rétroaction :



Retour désactivé mais immittances conservées

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

- ◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Gain sans rétroaction A_x :

de T et de A_{xr} , on déduit :

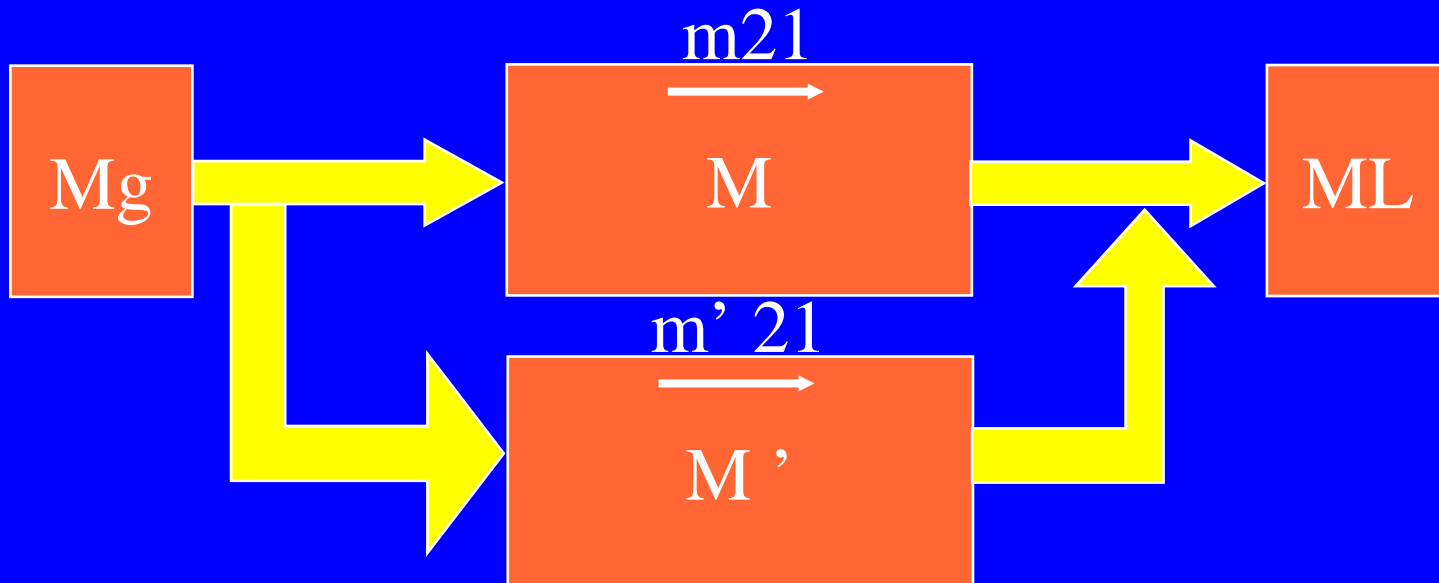
$$A_x = \frac{-(m_{21} + m'_{21})}{M_{11} \cdot M_{22} - m'_{12} \cdot m'_{21}}$$

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

Hypothèse :

Le transfert direct de la chaîne de retour est négligeable devant celui de la chaîne directe



LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

Hypothèse :

M et M ' étant « en parallèle », c 'est comme si le signal passait à travers l 'amplificateur mais essentiellement par le « chemin M »

Hypothèse légitime dans la plupart des cas
(AOP contreréactionné par exemple)

$$|m'_{21}| \ll |m_{21}|$$

LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Le gain sans rétroaction A_x devient :

Coefficient de transfert direct de l'ampli de base

$$A_x = \frac{-m_{21}}{\left(M_{11} - \frac{m'_{12} \cdot m'_{21}}{M_{22}} \right) \cdot M_{22}}$$

Contribution de l'entrée et de la source

Contribution ramenée à l'entrée, de la sortie à travers le réseau retour

Contribution de la sortie et de la charge

Cf diapo 23



LA CONTRE REACTION

Calcul de la rétroaction

- ◆ Modèle d'étude de la boucle ouverte

Alors, le taux de rétroaction B s'exprime par :

$$T = A_x \cdot B$$

D'où :

$$B = m'_{12}$$

(sous réserve que $|m'_{21}| \ll |m_{21}|$)

LA CONTRE REACTION

Analyse boucle ouverte

Plusieurs possibilités pour l'analyse de la B.O :

- Charger la sortie de la boucle par l'immittance vue avant la coupure et attaque de la boucle par un générateur idéal
- Sortie de la boucle non chargée et attaque par un générateur d'immittance interne égale à l'immittance de sortie de la boucle,
- Couper la boucle au niveau de l'amplificateur de base.

LA CONTRE REACTION

Relations de passage sans CR => Avec CR

M_{ex} : immittance de maille d'entrée sans rétroaction c -a-d immittance vue par la f. e. m. X_g dans le cas où le coefficient de transfert direct de l'amplificateur est nul ($m_{21} = 0$) mais avec ses immittances conservées.

$$M_{ex} = M_g + m_{11} + m'_{11} - \frac{m'_{12} \cdot m'_{21}}{M_{22}}$$

Immittance source

Immittance entrée ampli de base

Immittance entrée réseau de CR chargé par la sortie

LA CONTRE REACTION

Relations de passage sans CR => Avec CR

M_{sx} : immittance de maille de sortie sans rétroaction. attaqué dans les conditions d'utilisation c'est à dire par l'immittance ($m_{11} + M_g$).

$$M_{sx} = M_L + m_{22} + m'_{22} - \frac{m'_{12} \cdot m'_{21}}{M_{11}}$$

Immittance charge

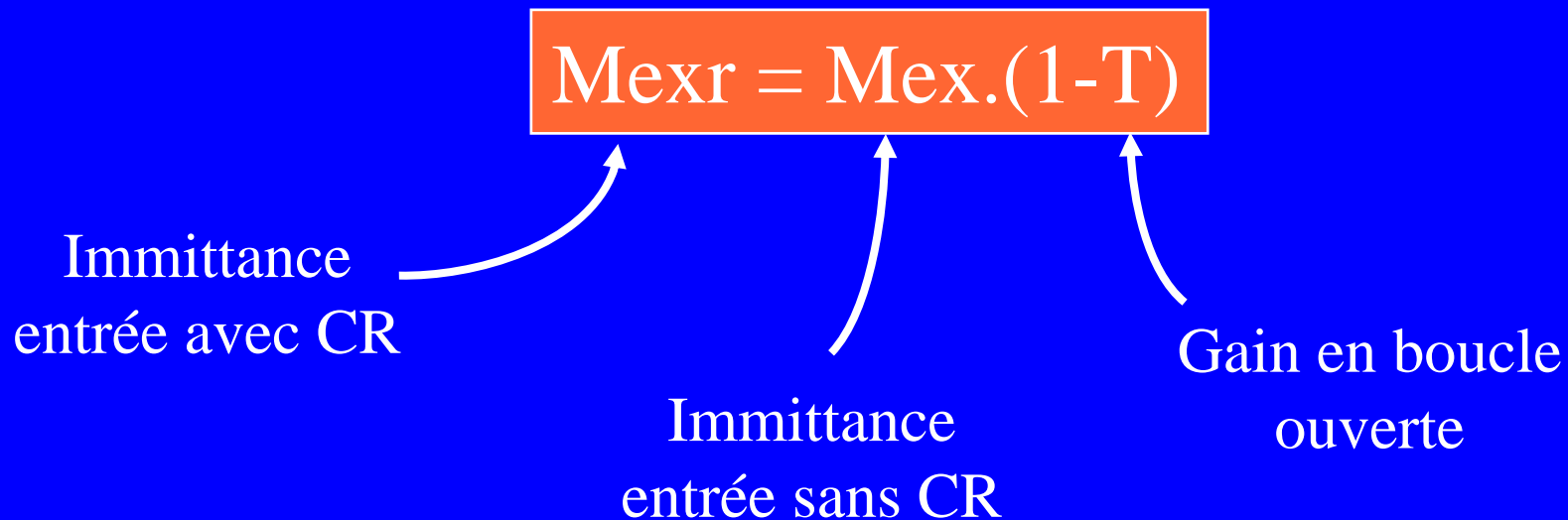
Immittance sortie ampli de base

Immittance sortie réseau de CR attaquée par l'entrée $m_{11} + M_g$ ($X_g=0$)

LA CONTRE REACTION

Relations de passage sans CR => Avec CR

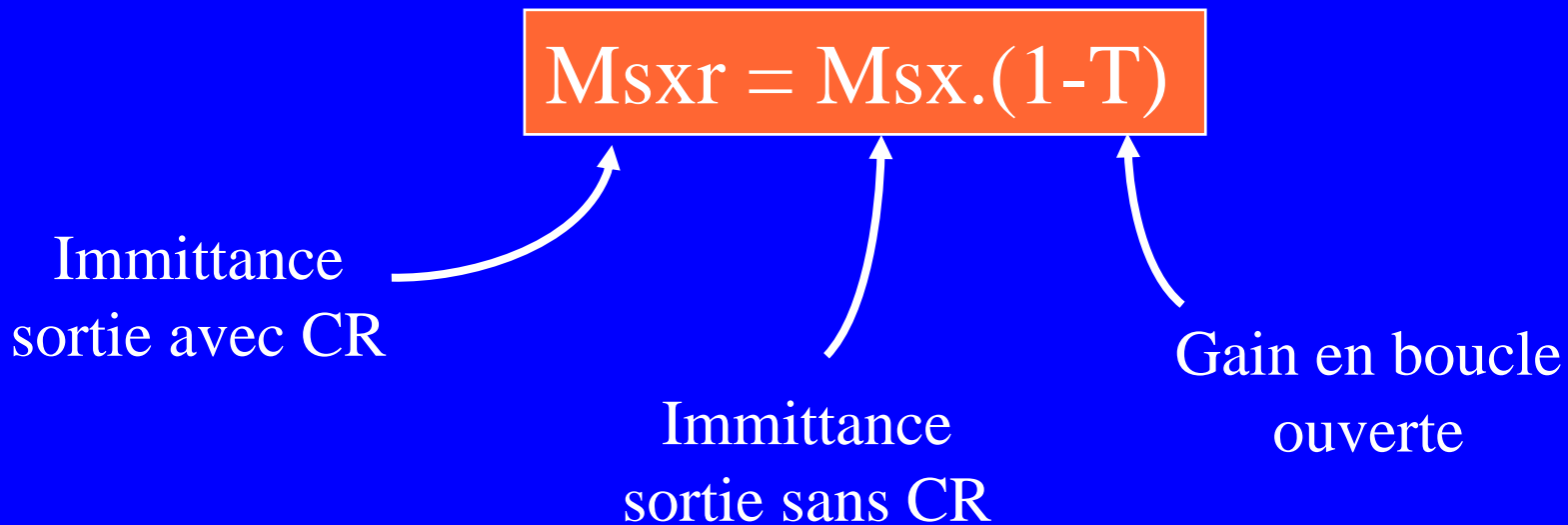
- Immittance de maille d'entrée



LA CONTRE REACTION

Relations de passage sans CR => Avec CR

- Immittance de maille de sortie



LA CONTRE REACTION

Relations de passage sans CR => Avec CR

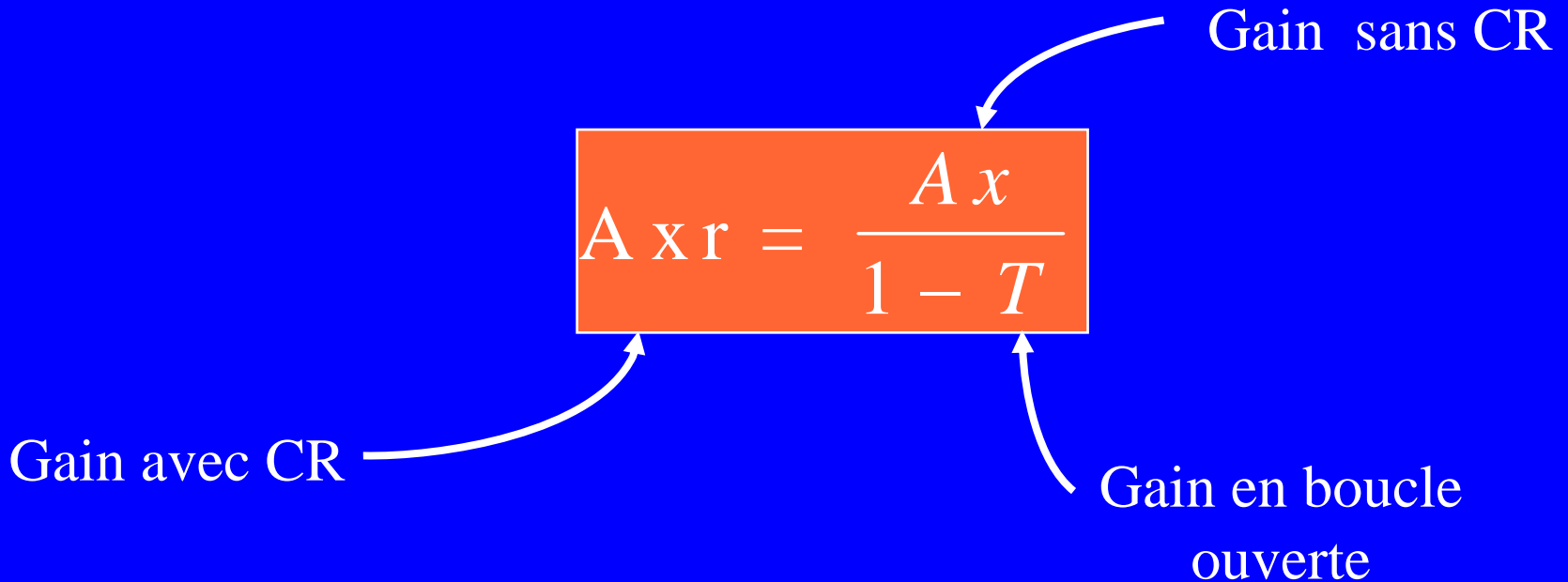
Remarques :

- Il suffit de faire $M_g=0$ dans l'expression de M_{exr} pour obtenir l'immittance d'entrée vue par le générateur X_g, M_g .
- Il suffit de faire $M_L=0$ dans l'expression de M_{sxr} pour obtenir l'immittance de sortie vue par la charge X_L, M_L .

LA CONTRE REACTION

Relations de passage sans CR => Avec CR

- Expression du Gain composite :



LA CONTRE REACTION

Théorie et méthode généralisée de calcul

- ◆ *Généralités, définitions*
- ◆ *Méthode de calcul de la rétroaction*
- ◆ *Conclusion, mise en œuvre de la méthode*

LA CONTRE REACTION

Mise en œuvre de la méthode

- 1 - Reconnaître les constituants de l'amplificateur à rétroaction et les mettre sous forme de dipôle ou quadripôle
- 2 - Vérifier l'unilatéralité de l'amplificateur de base
- 3 - Identifier le type de rétroaction parmi les quatre
- 4 - Réduire le générateur d'attaque et le circuit de charge (Thévenin ou Norton)

LA CONTRE REACTION

Mise en œuvre de la méthode

- 5 - Evaluer le gain de boucle ouverte
- 6 - Evaluer le taux de rétroaction B
- 7 - Evaluer les immittances de maille sans rétroaction
- 8 - Evaluer le gain composite sans rétroaction A_x
- 9 - Déduire les paramètres caractéristiques de l'amplificateur avec rétroaction : immittance et gain

LA CONTRE REACTION

Conclusion

- ◆ **Dans les cas simples**, utiliser la loi des mailles et des nœuds (plus rapide et plus intuitif)
- ◆ **Dans les cas complexes**, utiliser la méthode de calcul généralisée (après avoir vérifié les hypothèses)
- ◆ **Autre méthode d'analyse** : cf T.P 2A électronique

LA CONTRE REACTION

Attention aux immittances...

- ◆ Immittance spécifique de sortie du réseau de retour
(exemple de la CR Courant Parallèle)

