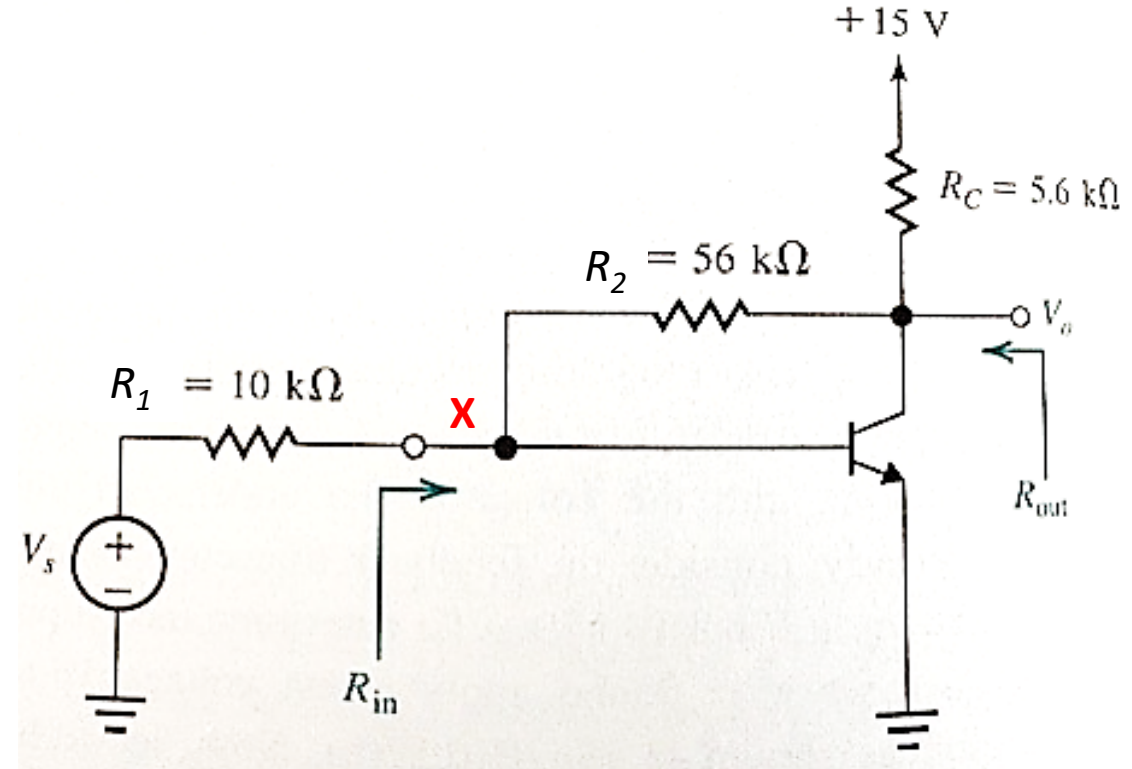
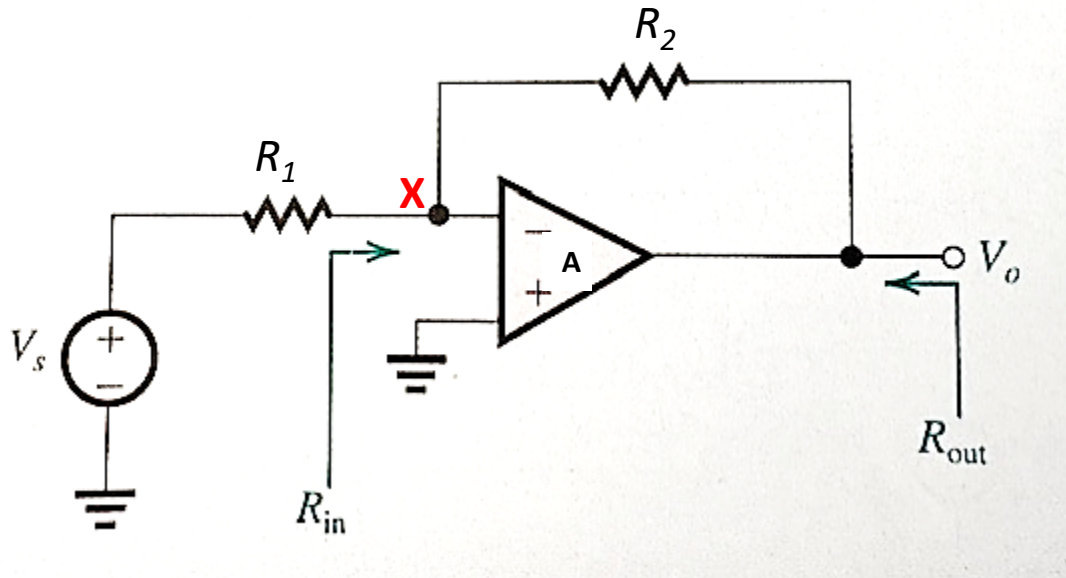


1. Connexions et types de RN susceptibles de prêter à confusion

Question : Un simple circuit avec RN qui, en fait, prête souvent à confusion est l'amplificateur inverseur à base d'ampli-op ou sa version seule transistor. **De quel type de contre-réaction s'agit-il ici ?**

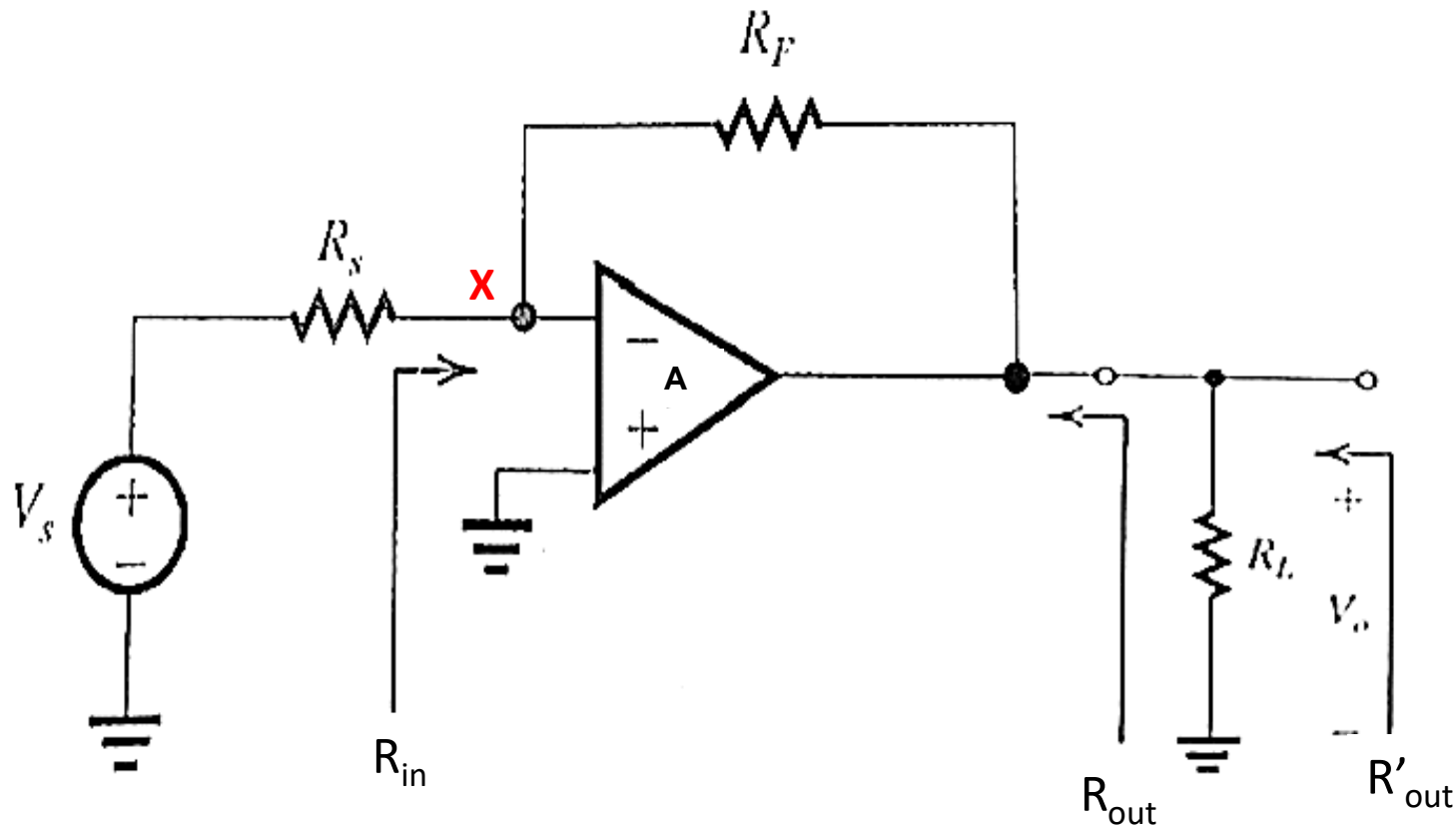


La grandeur détectée en sortie est une tension, mais qu'est-ce qui est renvoyé à l'entrée ?

Puisque le signal d'entrée, V_s , est une grandeur de tension, on pourrait penser que le **réseau de réaction** (R_2) renvoie une tension.

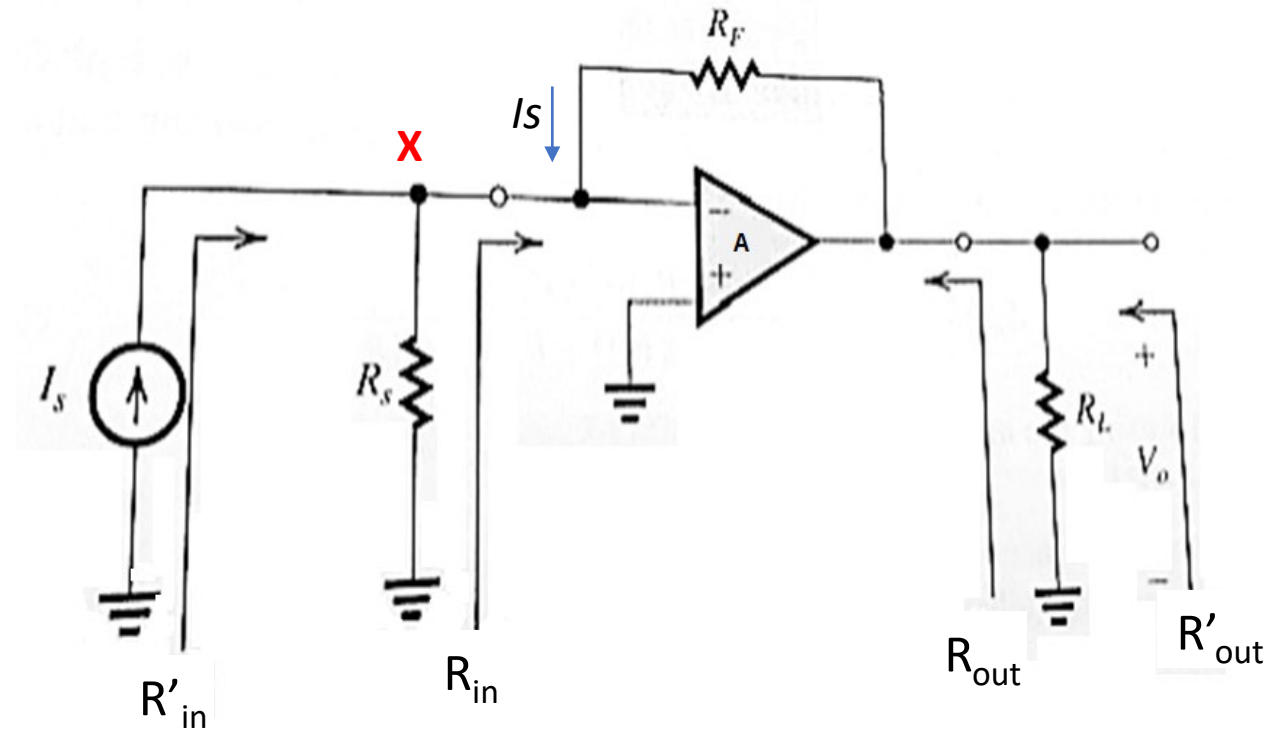
L'interprétation correcte est la suivante : R_1 et R_2 convertissent respectivement V_s et V_o en courants, et ces courants sont sommés au nœud **X** → Réseau de réaction: $R_2 = R_F$; Type de connexion: **Parallèle** à l'entrée, **Parallèle** à la sortie

Question : Pour le circuit ci-dessous, nous souhaitons utiliser le modèle de réaction négative (RN) idéale afin de pouvoir ensuite l'appliquer pour une RN non-idéale pour le calcul des paramètres. Quelle est la première étape à réaliser pour ce circuit ? **(réfléchissez à la représentation de la source et le type de connexion à l'entrée)**



Réponse: Commencez par effectuer la conversion de Thévenin–Norton de la source de tension d'entrée (V_s, R_s) vue depuis le nœud **X**.

- Équivalent de Thévenin :
- $V_{Th} = V_s$
- $R_{Th} = R_s$
- Équivalent de Norton :
- $I_N = I_s = V_s / R_s$ (source de courant)
- $R_N = R_s$ (en parallèle avec la source de courant)

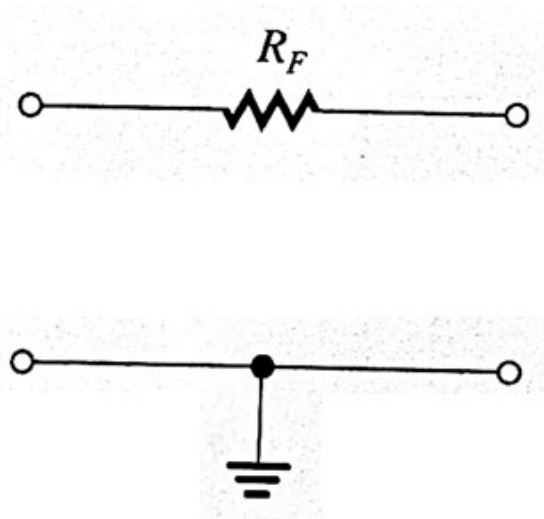


Remarque. Le calcul du gain en boucle fermée **AF** doit être réalisé en tenant compte du caractère non idéal du circuit, introduit par les résistances **R_s** , **R_L** , ainsi que par **$R_{in}\beta$** et **$R_{out}\beta$** . Une représentation inadéquate, qui néglige le type de connexion, conduit à des erreurs. En recourant à la conversion de source de tension en source de courant, il devient possible d'intégrer correctement **R_s** et **$R_{out}\beta$** dans le quadripôle modifié **A'** (voir slides suivantes, ce circuit en exercice).

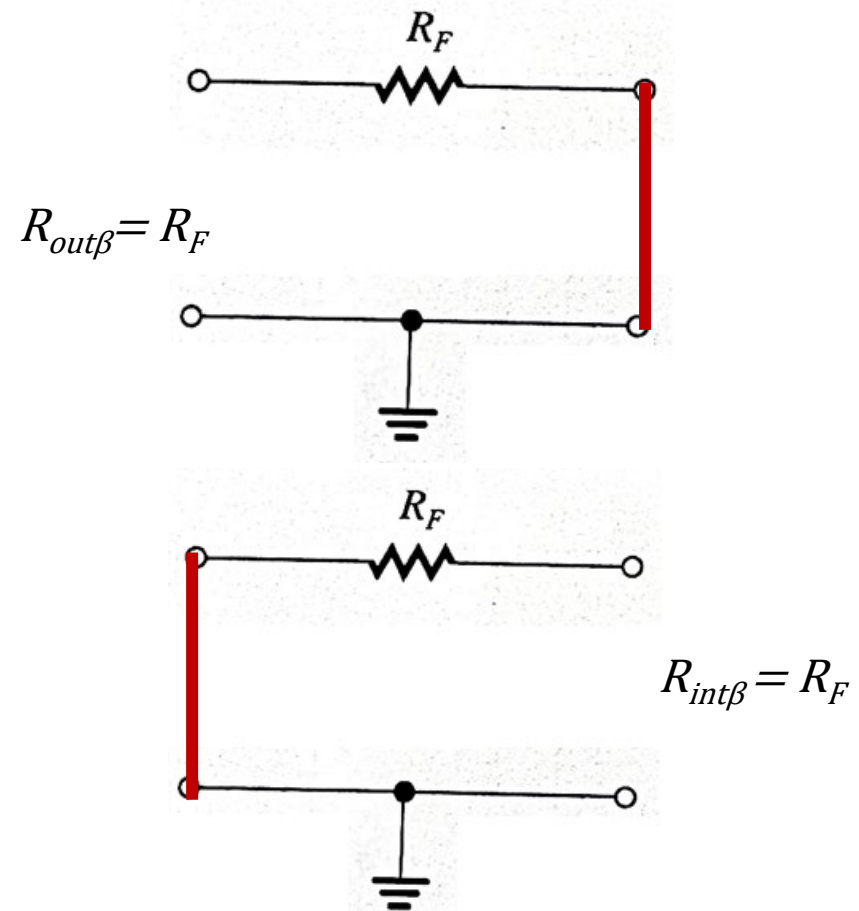
Exercice: Calcul de A_F , R_{inF} et R_{outF}

Étape 1: Identifier les éléments responsables du caractère « non idéal » (cf. slide #45). Remarque : le cours considère le cas d'une connexion série à l'entrée.

Étape 2: Calculez les résistances d'entrée et de sortie du **quadripôle de réaction** conforme au slide suivant (ou #51 cours)



Représentation quadripôle du circuit/réseau/composant de réaction



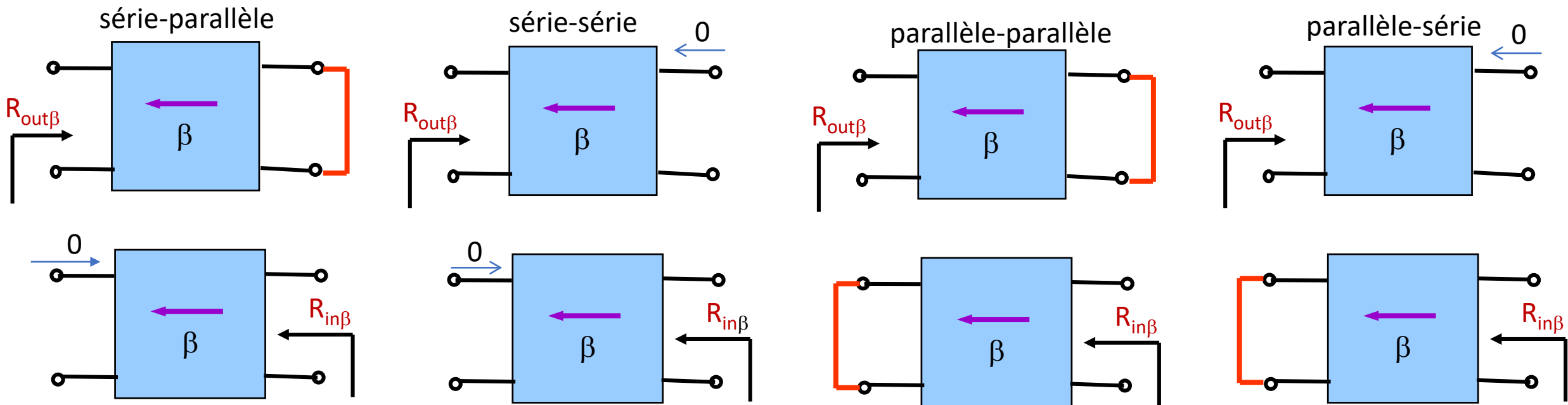
LA REACTION NEGATIVE NON-IDEALE, OU REELLE

❑ MÉTHODE PRATIQUE POUR DÉTERMINER LES RESISTANCES $R_{out\beta}$, $R_{in\beta}$ DU QUADRIPÔLE/RESEAU DE REACTION β

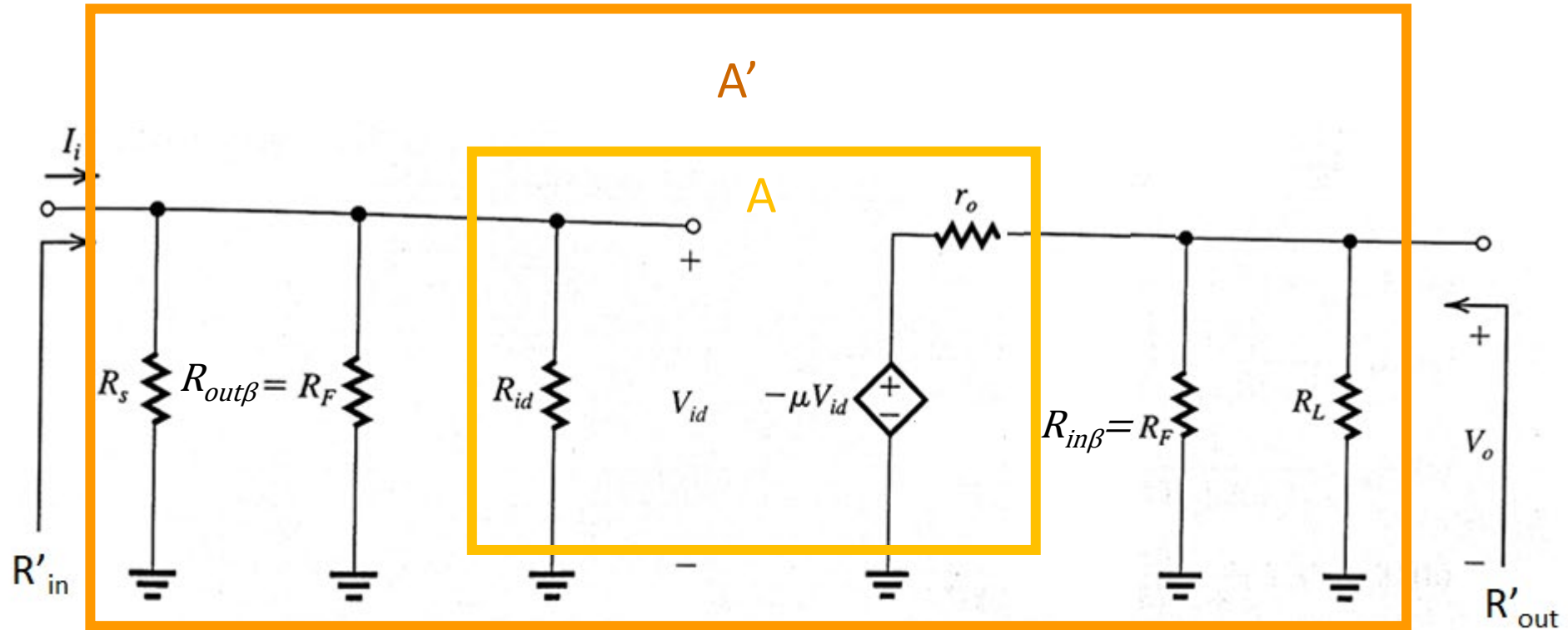
On peut déterminer l'effet de chargement de la boucle de réaction sur l'amplificateur **A** en examinant le port concerné (entrée ou sortie), tandis que le signal appliqué à l'autre port est soit mis en circuit ouvert, soit court-circuité afin de supprimer la réaction.

Règle simple : En fonction du type de réaction (connexions de l'ampli **A** avec le réseau/élément de réaction identifié en préalable), la règle simple est la suivante:

Quant on regarde d'un côté sur l'autre : si connexion parallèle court-circuitez-la ; si série ouvrez-la.



Etape 3: Intégrez les résistances **qui charge l'ampli A** (càd ceux qui définissent le cas non-idéal) dans l'ampli A' et calculez les résistances d'entrée et de sortie du A', càd R'_{in} et R'_{out}



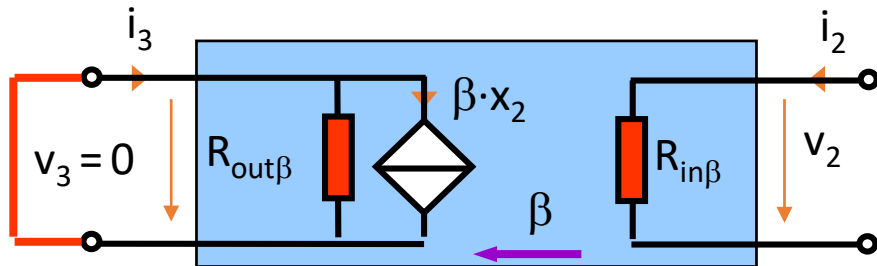
$$R'_{in} = R_s // R_{out\beta} // R_{id}$$

$$R'_{out} = R_L // R_{in\beta} // r_o$$

Étape 4 : Calculez le facteur de réaction β .

Pour cela, on regarde si la sortie du réseau/bloc de réaction est un courant ou une tension, et on choisit la configuration correspondante montrée sur le slide suivant (ou #52 du cours).

Pour le circuit analysé on doit choisir la configuration suivante:



Dans le cas d'une connexion parallèle à l'entrée de A_F , le courant $\beta \cdot x_2$ se mesure directement à la sortie de β lorsque celle-ci est en court-circuit :

$$\beta = \frac{i_3}{v_2} \Big|_{v_3=0} \quad \text{ou} \quad \beta = \frac{i_3}{i_2} \Big|_{v_3=0}$$

On remarque que β a la dimension d'une conductance, ce qui est correct car A a la dimension d'une résistance (sortie tension, entrée courant)

Astuce: Si A est grand (ce qui est nécessaire pour que la RN soit efficace) on peut déduire β directement :

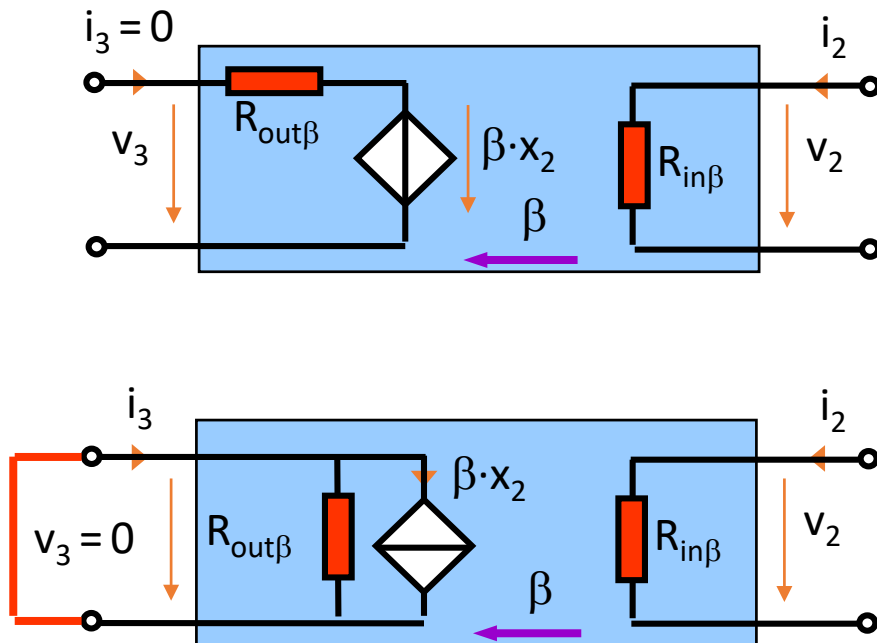
$$A_F|_{\text{ideal}} = V_o/I_s = -R_F = 1/\beta \quad \rightarrow \quad \beta = -1/A_F|_{\text{ideal}} = -1/R_F$$

LA REACTION NEGATIVE NON-IDEALE, OU REELLE

METHODE D'ANALYSE

❑ MÉTHODE PRATIQUE POUR DÉTERMINER LE PARAMETRE β DU QUADRIPOLE DE REACTION

Dans le cas de la réaction négative, on considère le quadripôle de réaction unidirectionnel, il n'y a que deux configurations, chacune correspondant à deux définitions possibles de β , selon que la source est contrôlée par v_2 ou i_2 .



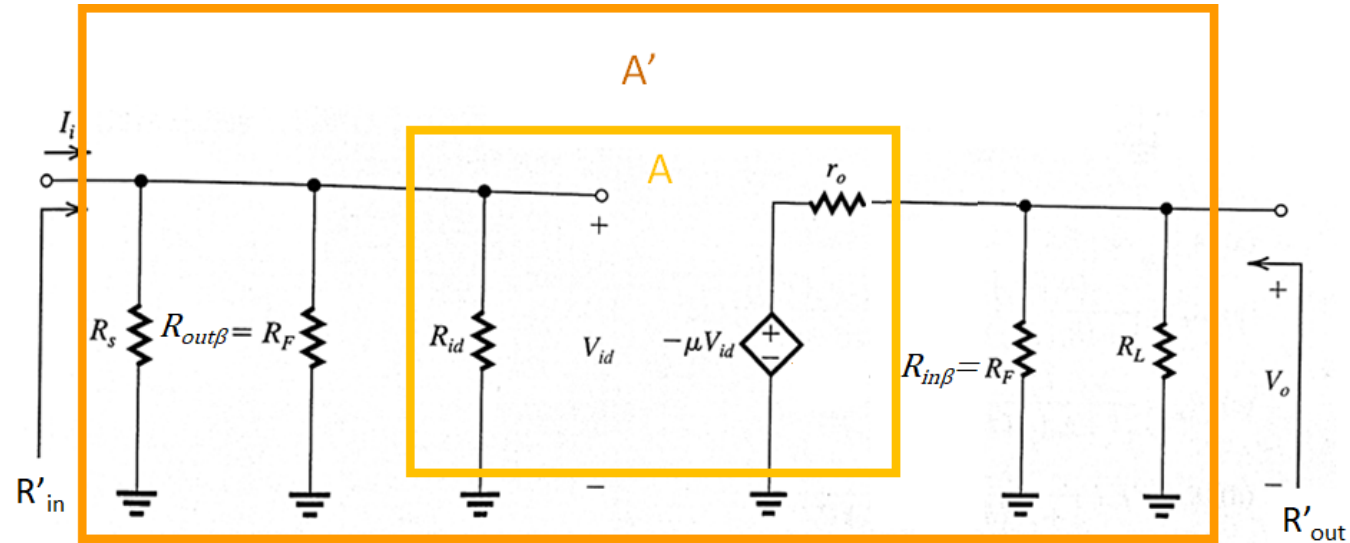
Dans le cas d'une connexion série à l'entrée de A_F , la tension $\beta \cdot x_2$ se mesure directement à la sortie de β lorsque celle-ci est en circuit ouvert :

$$\beta = \frac{v_3}{v_2} \Big|_{i_3=0} \quad \text{ou} \quad \beta = \frac{v_3}{i_2} \Big|_{i_3=0}$$

Dans le cas d'une connexion parallèle à l'entrée de A_F , le courant $\beta \cdot x_2$ se mesure directement à la sortie de β lorsque celle-ci est en court-circuit :

$$\beta = \frac{i_3}{v_2} \Big|_{v_3=0} \quad \text{ou} \quad \beta = \frac{i_3}{i_2} \Big|_{v_3=0}$$

Étape 5 : Calculez le gain en boucle ouverte de l'ampli A' et après le gain A'_F et résistances R'_{inF} et R'_{outF}



$$R'_{in} = R_s // R_{out\beta} // R_{id}$$

$$R'_{out} = R_L // R_{in\beta} // r_o$$

$$V_{id} = I_i R'_{in}$$

$$V_o = \mu V_{id} = I_i R'_{in} \left(\frac{R_L // R_F}{R_L // R_F + r_o} \right)$$

$$A' = V_o / I_i$$

$$A'_F = \frac{A'}{1 + A' \cdot \beta}$$

$$R'_{inF} = \frac{R'_{in}}{1 + A' \cdot \beta}$$

$$R'_{outF} = \frac{R'_{out}}{1 + A' \cdot \beta}$$

Voir slide #48 cours
(attention dans le cours
l'exemple est pour connexion
série-parallèle)

Étape 6 : Extraction des résistances R_s et R_L car elles sont externe au ampli (on fait une 'correction' pour obtenir les 'vrais' résistances d'entrée et sortie de l'ampli en boucle fermé

$$\frac{1}{R_{inF}} = \frac{1}{R'_{inF}} - \frac{1}{R_s} \qquad \frac{1}{R_{outF}} = \frac{1}{R'_{outF}} - \frac{1}{R_L}$$

Remarque : Le fait que le gain en boucle ouverte A' dépende de R_s et R_L , et malgré cela il n'est pas "corrigée", n'est pas problématique. En effet, la réaction négative va corriger toutes les variations du gain de l'amplificateur en boucle ouverte. C'est précisément le rôle de la RN: stabiliser le gain A_F .

Exercice d'entraînement pour vous : identifiez ces étapes dans le calcul de l'exercice 2, série 1.

2. Terminology susceptibles de prêter à confusion

Question : Quelle est la différence entre « réseau/bloc de réaction » (le matériel) et « β » (un coefficient/paramètre) presque comme des synonymes, alors qu'ils ne le sont pas? (voir exercice 5 comme exemple- slides 16-18)

Reponse :

Deux notions différentes

ou 'bloc' de réaction β

Réseau de réaction (feedback network)

- C'est le sous-circuit physique qui relie la sortie au nœud de sommation de l'entrée.

β (facteur de réaction)

ou paramètre de réaction

- C'est un nombre qui relie la grandeur de sortie choisie à la grandeur de retour.
- Il dépend de la manière dont on a défini le bloc A

Example 1:

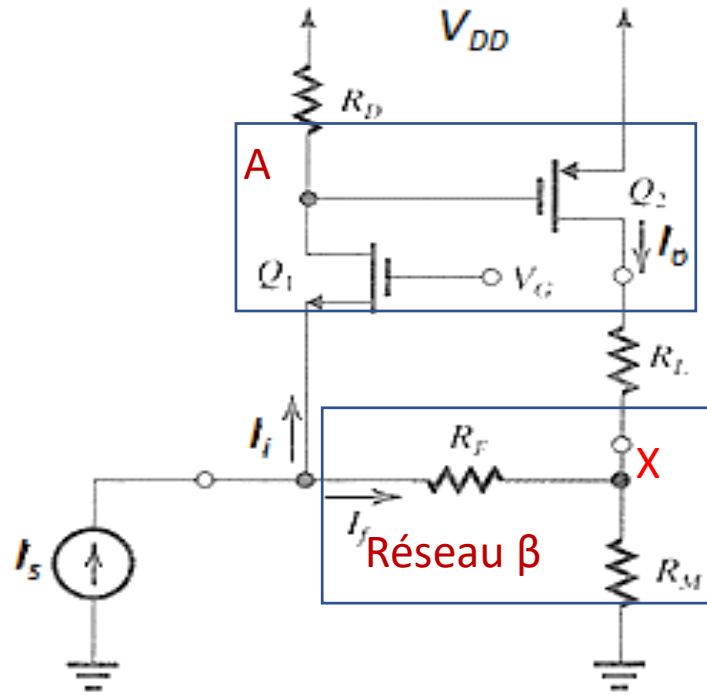
(f)

Éléments de réaction / Réseau de réaction: R_M — résistance de *détection* de courant en série (capteur). Le courant de sortie I_O y crée une tension de mesure $v_s \approx I_O \cdot R_M$. R_F — résistance de *retour*. Elle achemine le courant de rétroaction I_f depuis le nœud de mesure (jonction R_L – R_M - notée X) vers le nœud d'entrée (où I_s est injecté). Comme pour l'exemple (b), c'est **l'ensemble de ces deux résistances réalisent la tâche de réaction.**

Topologie : Parallèle–Série.

Explication : L'entrée est une source de courant I_s ; le courant de retour via R_f revient sur le même nœud d'entrée : mélange en parallèle (faible R_{in}). À la sortie, R_M est en série avec la charge et produit une tension proportionnelle à I_O renvoyée par R_f : échantillonnage en série de courant.

Type réalisé : Amplificateur de courant



(f)

Comment calculer β (si A_{ideal} n'est pas connu, on ne peut pas le calculer directement comme $\beta = 1/A_{ideal}$)
 Voir slide 9, connexion parallèle à l'entrée de A_f (ou sortie du réseau de réaction qui doit être court-circuitée selon la procédure décrite)

$$I_O = \frac{V_X}{R_M} + \frac{V_X}{R_F}, \quad I_F = \frac{V_X}{R_F}$$

d'où

$$I_F = \frac{R_M}{R_M + R_F} I_O \quad \Rightarrow \quad \beta_X = \frac{I_F}{I_O} = \frac{R_M}{R_M + R_F} \text{ [sans dimension]}$$

Remarque: : $A\beta$ doit être toujours sans unité

3. Situation plus 'troublante' quand le même réseau de réaction, dans la même topologie convient pour une sortie en tension comme en courant (voir exemplification avec l'exercice 5)

Exemple 2 (exercice 5, série 2):

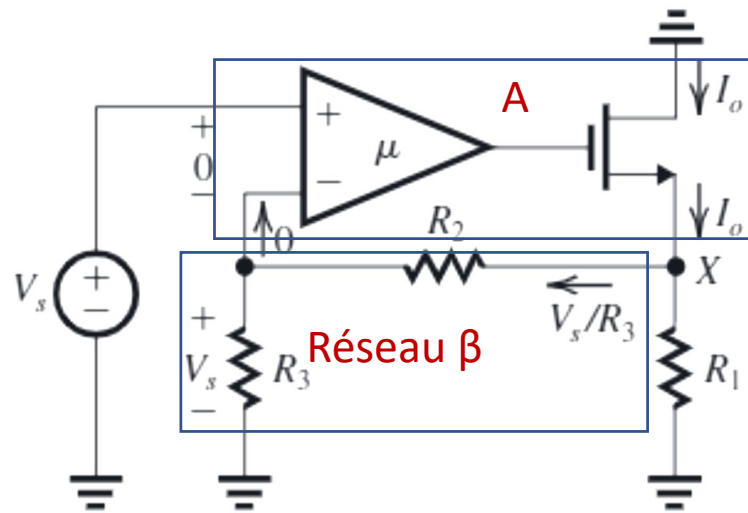


Figure 2

- a) La particularité de ce montage est que **le même réseau de contre-réaction, dans la même topologie série-parallèle et réseau de réaction composé de R2 et R3 convient pour une sortie en tension comme en courant** ; selon le choix, on calcule β **sans dimension (V/V)** ou en **trans-résistance (V/A)**.

Méthode (choix) 1: Sortie en tension $V_x \rightarrow$ ampli de tension

On modélise l'AOP + MOS par un transconducteur G_m suivi de la résistance de sortie vue au nœud X lorsque la source V_s est ouverte (mélange en série):

$$R_{\text{sortie}} = R_1 \parallel (R_2 + R_3) = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Le gain direct en tension vaut alors

$$A_v = G_m R_{\text{sortie}}.$$

Le réseau de **réaction** est le diviseur $R_2 - R_3$ (prélevé en parallèle sur la sortie); son facteur est **sans dimension** :

$$\beta_{V \rightarrow V} = \frac{V_f}{V_X} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}.$$

Le gain de boucle devient

$$A_v \beta_{V \rightarrow V} = G_m R_{\text{sortie}} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = G_m \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Exemple 2 (exercice 5, série 2):

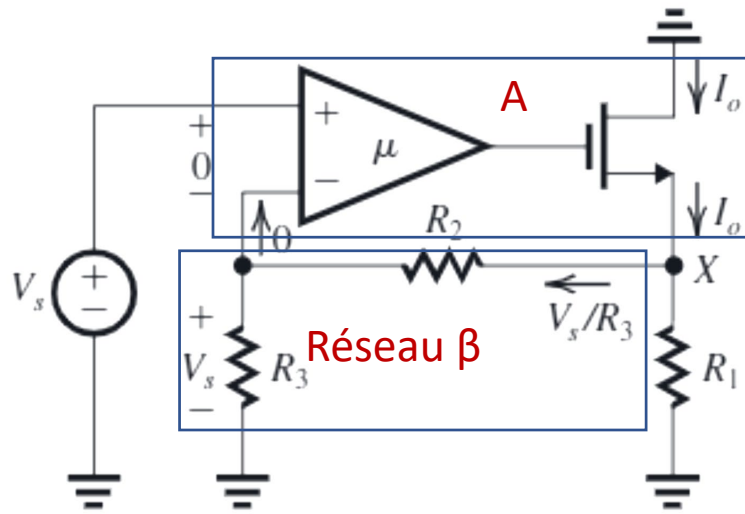


Figure 2

Remarque: Les points b) à h) correspondent au choix 2 car dans l'énoncé du problème c'est spécifié qu'on utilise l'ampli A en transconductance.

Méthode (choix) 2: Sortie en courant I_o

On garde la même topologie et le même réseau physique, mais on choisit la voie directe comme transconductance pure $I_O = G_m V_{in}$.

Le bloc de réaction doit alors convertir le courant de sortie I_O en tension V_f au nœud du diviseur.

Pour calculer β , on annule V_S (source de Thévenin ouverte) et on injecte un courant d'essai I_O en X . Le réseau passif est alors deux branches en parallèle: R_1 et $R_2 + R_3$. Le courant dans la branche $R_2 + R_3$ vaut

$$I_{(R_2+R_3)} = I_O \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

La tension de retour est la chute dans R_3 :

$$V_f = I_{(R_2+R_3)} R_3 = I_O \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Ainsi, le facteur de réaction est une trans-résistance :

$$\beta_{I \rightarrow V} = \frac{V_f}{I_O} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \text{ [V/A]}.$$

Le gain de boucle est identique à la méthode 1 :

$$G_m \beta_{I \rightarrow V} = G_m \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Calcul détaillé résistances à l'entrée et sortie de A (résistances qui charge l'ampli en boucle ouverte ou éléments responsables du caractère « non idéal »)

Pour les résistances « vues » par A

- Charge d'entrée de A :

$$R_{11} = R_{\text{out}\beta}$$

$$\Rightarrow R_{11} = R_3 \parallel (R_2 + R_1)$$

- Charge de sortie de A :

$$R_{22} = R_{\text{in}\beta}$$

$$\Rightarrow R_{22} = R_1 \parallel (R_2 + R_3)$$

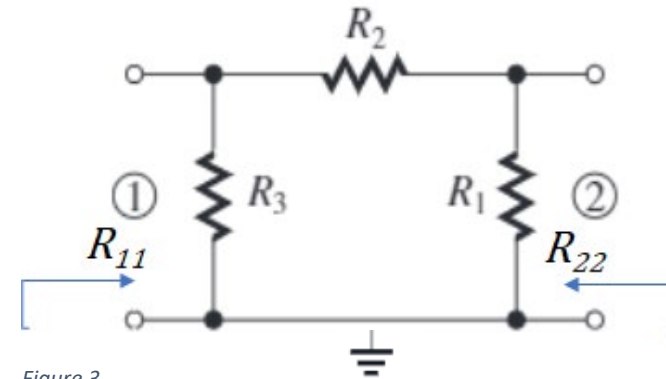


Figure 3

Voir slide # 9, réseau en configuration série-série car le choix est ampli transconductance

4. Utiliser schéma petits signaux ou résistances à l'accès?

Réponse: Pour consistence avec le cours l'Electronique vous pouvez utiliser la méthode 'résistances à l'accès

Estimation de la difference en valeurs numériques pour les 2 méthodes (exercice 5)

$$R_{eq} = \frac{1}{g_m + g_{ds}}$$

en série entre V_g et X , avec source de Thévenin = V_g (sans la réduction α_S).

On obtient alors, par simple diviseur:

$$V_X \approx \frac{R_{22}}{R_{eq} + R_{22}} V_g, \quad I_o^{\text{approx}} = \frac{V_g}{R_{eq} + R_{22}} = \frac{(g_m + g_{ds}) V_g}{1 + R_{22}(g_m + g_{ds})}.$$

Comparaison avec la formule exacte (section 1c) :

$$I_o^{\text{exact}} = \frac{g_m V_g}{1 + R_{22}(g_m + g_{ds})}.$$

Exemple numérique

$$g_m = 2 \text{ mS}, g_{ds} = 50 \mu\text{S}, R_{22} = 90 \Omega \Rightarrow$$

$$I_o^{\text{exact}} = \frac{0,002 V_g}{1 + 90 \times 0,00205} = 1,688 \text{ mS} \cdot V_g,$$

$$I_o^{\text{approx}} = \frac{0,00205 V_g}{1 + 90 \times 0,00205} = 1,731 \text{ mS} \cdot V_g.$$

Erreur $\approx 2,5\%$ (car $g_{ds}/g_m = 0,00005/0,002 = 2,5\%$).

En reportant la chaîne d'entrée $V_g = \mu V_{id} = \mu V_i \frac{R_{id}}{R_{id} + R_{11}}$, on obtient :

$$A^{\text{exact}} = \mu \frac{R_{id}}{R_{id} + R_{11}} \frac{g_m}{1 + R_{22}(g_m + g_{ds})},$$

$$A^{\text{approx}} = \mu \frac{R_{id}}{R_{id} + R_{11}} \frac{g_m + g_{ds}}{1 + R_{22}(g_m + g_{ds})},$$

soit la même surestimation ($\approx 2,5\%$).

L'erreur n'est pas trop importante, donc acceptable!

5. Si on veut réaliser des amplis en boucle fermé, A_F transrésistance/transconductance/courant – quel type de l'AOP utiliser en boucle ouverte ?

Réponse: On peut toujours utiliser un **ampli op de tension** (circuit intégré standard) et c'est d'ailleurs ce qui est utilisé en pratique

- En réaction négative, c'est le réseau de réaction — pas le type de ampli op — qui fixe le comportement en boucle fermée aux bornes d'entrée/sortie
- On utilise, en général, pour toute les types des amplis en boucle fermée A_F , des l'AOPs (A) de tension (en ajoutant éventuellement d'autres composants – e.g., un transistor en sortie..)
- Les résistances R_{inF} et R_{outF} seront amélioré selon le type d'amplificateur en boucle fermé (voir tableau)

Topologie de la RN	Signal source	Signal de sortie	Impédance d'entrée	Impédance de sortie
Série- Parallèle	Tension	Tension	$R_{inF} = R_{in} (1 + A\beta)$	$R_{outF} = R_{out} / (1 + A\beta)$
Parallèle- Parallèle	Courant	Tension	$R_{inF} = R_{in} / (1 + A\beta)$	$R_{outF} = R_{out} / (1 + A\beta)$
Série- Série	Tension	Courant	$R_{inF} = R_{in} (1 + A\beta)$	$R_{outF} = R_{out} (1 + A\beta)$
Parallèle- Série	Courant	Courant	$R_{inF} = R_{in} / (1 + A\beta)$	$R_{outF} = R_{out} (1 + A\beta)$