STABILITÉ
DES AMPLIFICATEURS
EN RÉACTION NEGATIVE

A Ionescu

EPFL

STABILITÉ DES AMPLIFICATEURS EN RÉACTION NEGATIVE

1. INTRODUCTION: Problématique

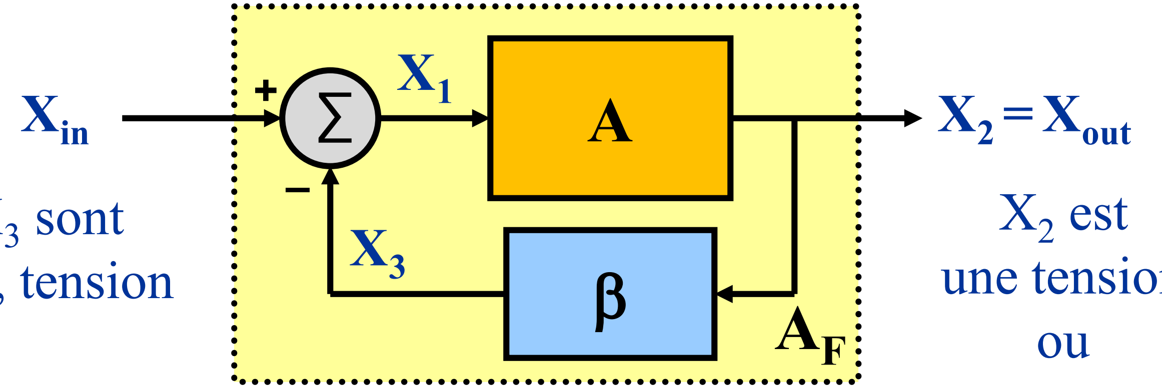
Un amplificateur stable en boucle ouverte peut devenir instable lorsqu'il est soumis à une réaction négative.

Les avantages de la réaction négative perdent tout intérêt si l'amplificateur devient un ‘oscillateur’. Une l'oscillation visible, bien qu’indésirable, sera mieux gérable en pratique qu’une ‘stabilité marginale’. Un circuit marginalement stable peut sembler fonctionner correctement lors des tests mais échouer dans des conditions opérationnelles ou environnementales plus complexes. Il est donc essentiel de comprendre pourquoi la réaction négative peut provoquer une oscillation et d'appliquer des techniques garantissant la stabilité, afin de s'assurer que l'amplificateur amplifie sans provoquer d'oscillations indésirables.

1. INTRODUCTION

AMPLIFICATEUR TYPIQUE EN RÉACTION NÉGATIVE

❑ PRINCIPE



X_{in}, X_1 et X_3 sont du même type, tension ou courant

X_2 est une tension ou un courant

$$A_F = \frac{x_{out}}{x_{in}} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta}$$

Cette formule suppose que Aβ est un nombre positif (car un Aβ positif signifie que la réaction est négative). Que se passe-t-il lorsque Aβ n'est pas positif ? Considérez le cas où Aβ = -1 :

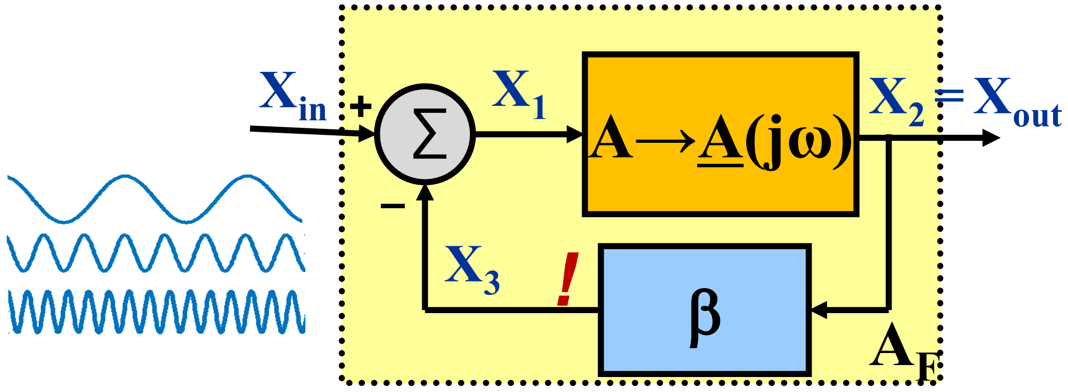
$$A_F = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} = \frac{A}{1 + (-1)} = \frac{1}{0} = \infty$$

Un gain en boucle fermée infini correspond à un **oscillateur**, même avec une entrée nulle, la sortie est saturée. **Ainsi, la grandeur critique dans l'analyse de la stabilité est le gain en boucle Aβ.**

1. INTRODUCTION

AMPLIFICATEUR TYPIQUE EN RÉACTION NÉGATIVE

❑ PROBLÈME POTENTIEL: LA STABILITÉ



$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1+\frac{j\omega}{\omega_{p1}}\right)\cdot\left(1+\frac{j\omega}{\omega_{p2}}\right)\cdot\left(1+\frac{j\omega}{\omega_{p3}}\right)}$$

β réel ≤ 1, indépendant de ω

$$\underline{A}_F(j\omega) = \frac{\underline{A}(j\omega)}{1+\underline{A}(j\omega)\cdot\beta}$$

- En basse frequence

$\underline{A}(j\omega) = A_0 \quad => \quad \underline{A}(j\omega)\cdot\beta = A_0\cdot\beta$ est réel positif (car la réaction est voulue négative)

- A fréquence plus élevée

$\underline{A}(j\omega) \quad => \quad \underline{A}(j\omega)\cdot\beta$ est complexe avec apparition d'un déphasage croissant lorsque la fréquence augmente

S'il existe une fréquence telle que : $\arg\left(\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta\right) = -\pi$

$\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta$ est alors réel négatif => réaction positive => oscillations possibles

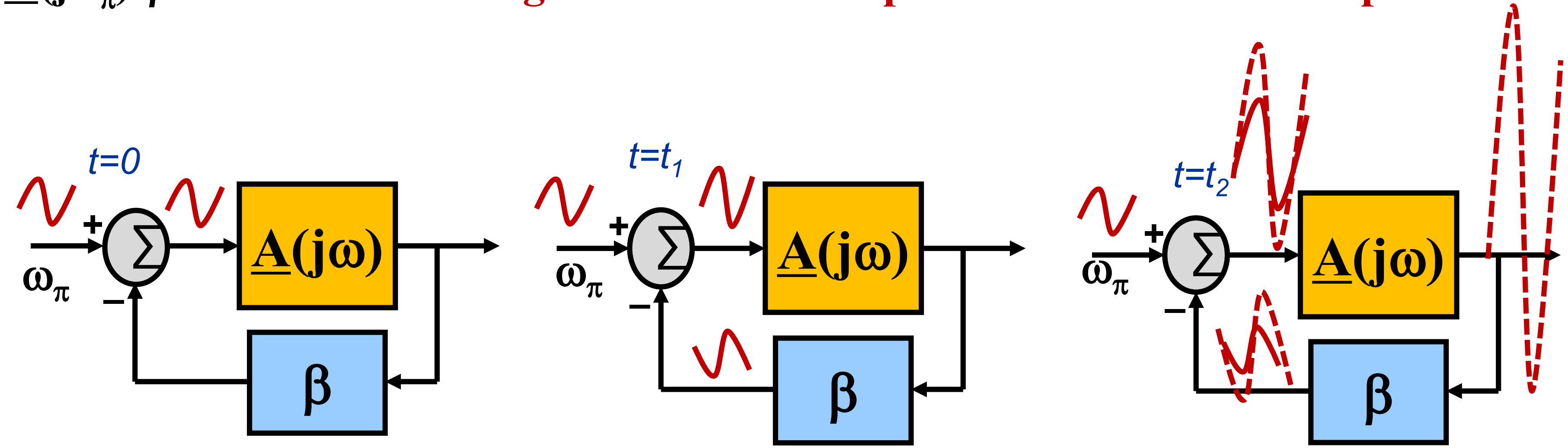
1. INTRODUCTION

AMPLIFICATEUR TYPIQUE EN RÉACTION NÉGATIVE

❑ **PROBLÈME POTENTIEL: INSTABILITÉ - quand la réaction négative devient positive**

S'il existe une fréquence telle que : $\arg\left(\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta\right) = -\pi$

$\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta$ **est alors réel négatif => réaction positive => oscillations possibles**



- Si un signal alternatif subit un déphasage de 180° avant d'être réinjecté, opération de soustraction va en fait additionner les deux signaux à l'entrée de l'ampli A. Le circuit sera en réaction positive, donc instable !

- Les figures décrivent clairement une situation "instable" - la sortie augmentera rapidement jusqu'à ce qu'elle soit limitée par une condition externe (généralement les tensions d'alimentation).

1. INTRODUCTION

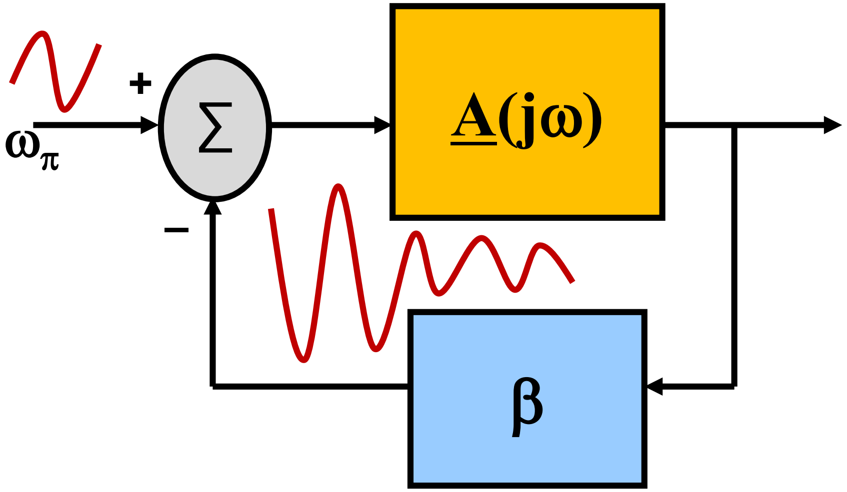
AMPLIFICATEUR TYPIQUE EN RÉACTION NÉGATIVE

❑ CRITÈRE DE STABILITÉ

La stabilité est garantie si à la fréquence f_π (existe dès qu'il y a plus de deux pôles) **telle que**

$\arg(\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta) = -\pi$

$|\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta| < 1$ ***critère de Nyquist***



Si $|\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta|<1$ les signaux seront progressivement atténués jusqu'à devenir insignifiants, malgré le fait qu'ils se renforcent mutuellement au niveau du nœud de soustraction.

1. INTRODUCTION

AMPLIFICATEUR TYPIQUE EN RÉACTION NÉGATIVE

❑ CRITÈRE DE STABILITÉ, MARGE DE GAIN ET DE PHASE

Afin d'assurer une stabilité en boucle fermée, on cherchera à conserver à la fonction de transfert en boucle ouverte $\underline{A}(j\omega)$, une distance minimale par rapport au point critique. On utilise alors des marges.

Pour que l'ampli en réaction négative soit non seulement stable, mais que son comportement dynamique soit correctement amorti, il faut:

une marge de gain:

$\Delta G = 1/|\underline{A}(j\omega_\pi)\cdot\beta|$, **à la fréquence f_π où** $\arg\big(\underline{A}(j\omega_\pi)\big) = -\pi$

ou une marge de phase:

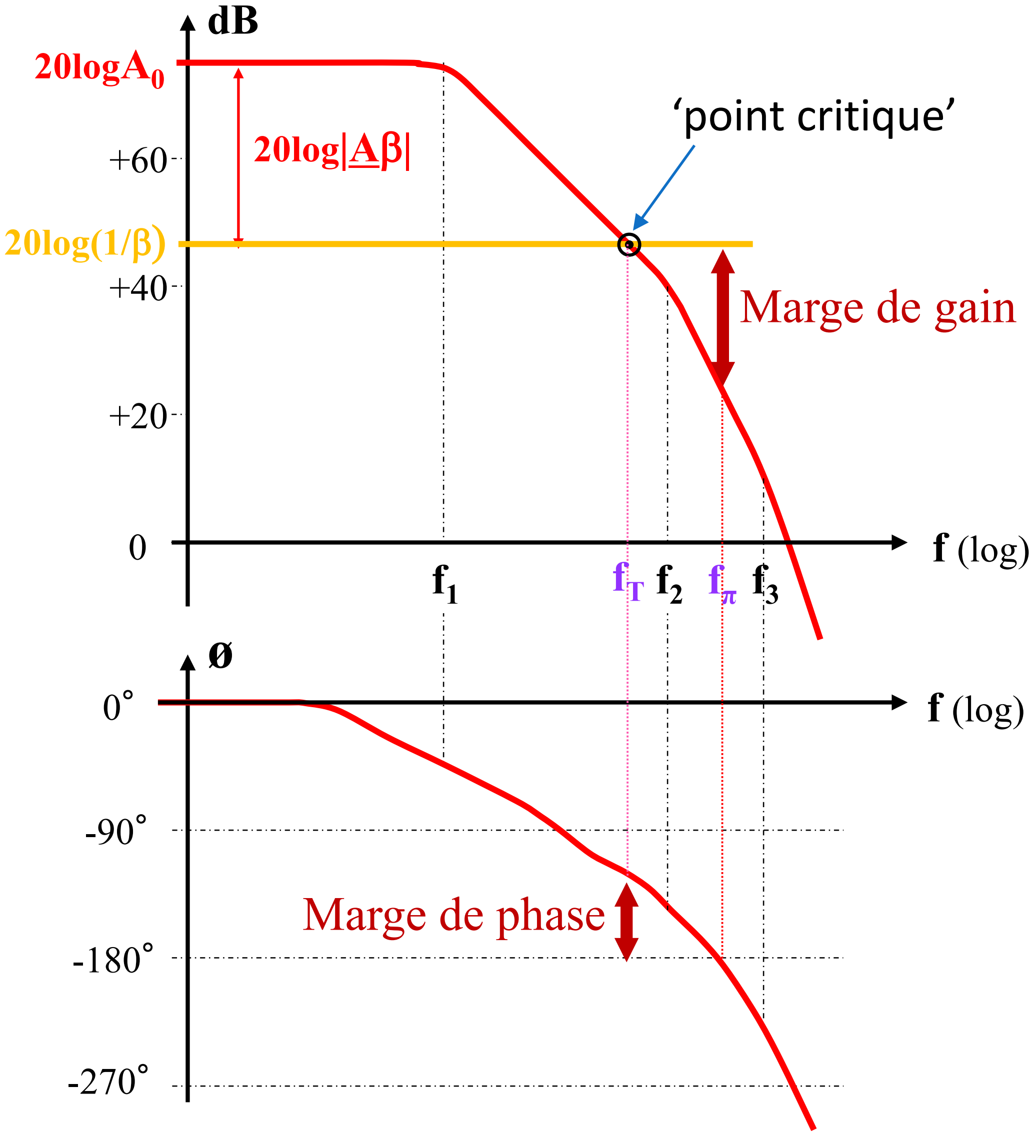
$\Delta\phi = \pi + \arg\big(\underline{A}(j\omega_T)\big)$, **à la fréquence f_T où** $|\underline{A}(j\omega_T)\cdot\beta| = 1$

Paramètres qui mesurent le degré de stabilité d'un système

*En électronique on utilise surtout la **marge de phase**, que l'on détermine à partir d'une étude des diagrammes de Bode de $\underline{A}(j\omega)$.*

2. USAGE DES DIAGRAMES DE BODE

ANALYSE D'UN AMPLI EN REACTION NEGATIVE



$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{(1+\frac{j\omega}{\omega_{p1}})\cdot(1+\frac{j\omega}{\omega_{p2}})\cdot(1+\frac{j\omega}{\omega_{p3}})}$$

β réel ≤ 1, indépendant de ω

$$20\log|\underline{A}\cdot\beta| = 20\log|\underline{A}| + 20\log\beta$$
$$= 20\log|\underline{A}| - 20\log(1/\beta)$$

$$\odot \Leftrightarrow |\underline{A}\cdot\beta| = 1 \Leftrightarrow 20\log|\underline{A}\cdot\beta| = 0$$

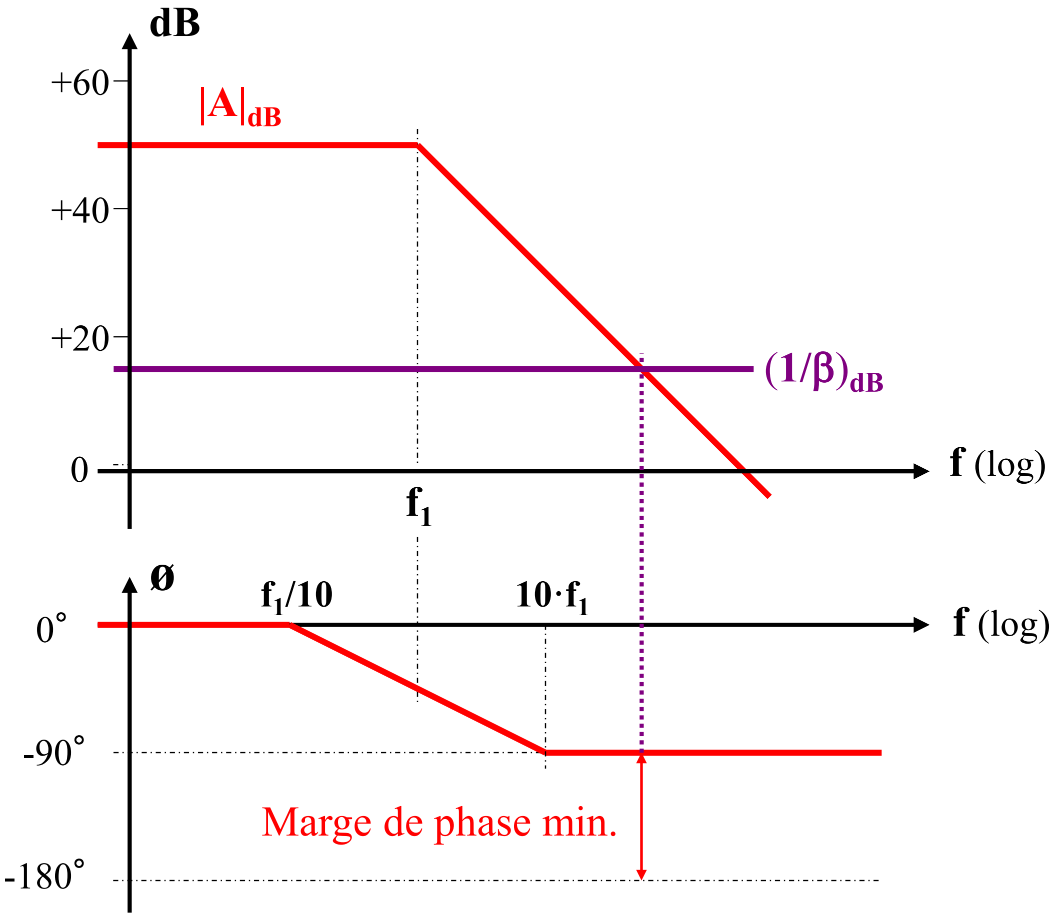
Marge de phase: A la fréquence correspondant au point de croisement de $\underline{A}$ et de 1/β dans le diagramme de Bode en amplitude, le déphasage introduit par $\underline{A}$ doit être inférieur à 180°

En pratique une marge de phase minimum de 45° est requise, et 60° ou plus serait préférable.

Note: Cette technique d'analyse, ou le produit Aβ est analyse avec les trace de A et 1/β (sur l'échelle log) est **très utile en pratique** parce que cela nous **permet d'analyser la stabilité en fonction du gain en boucle fermé souhaite** pour notre application

2. USAGE DES DIAGRAMES DE BODE

ANALYSE D'UN AMPLI D'ORDRE 1 EN REACTION NEGATIVE



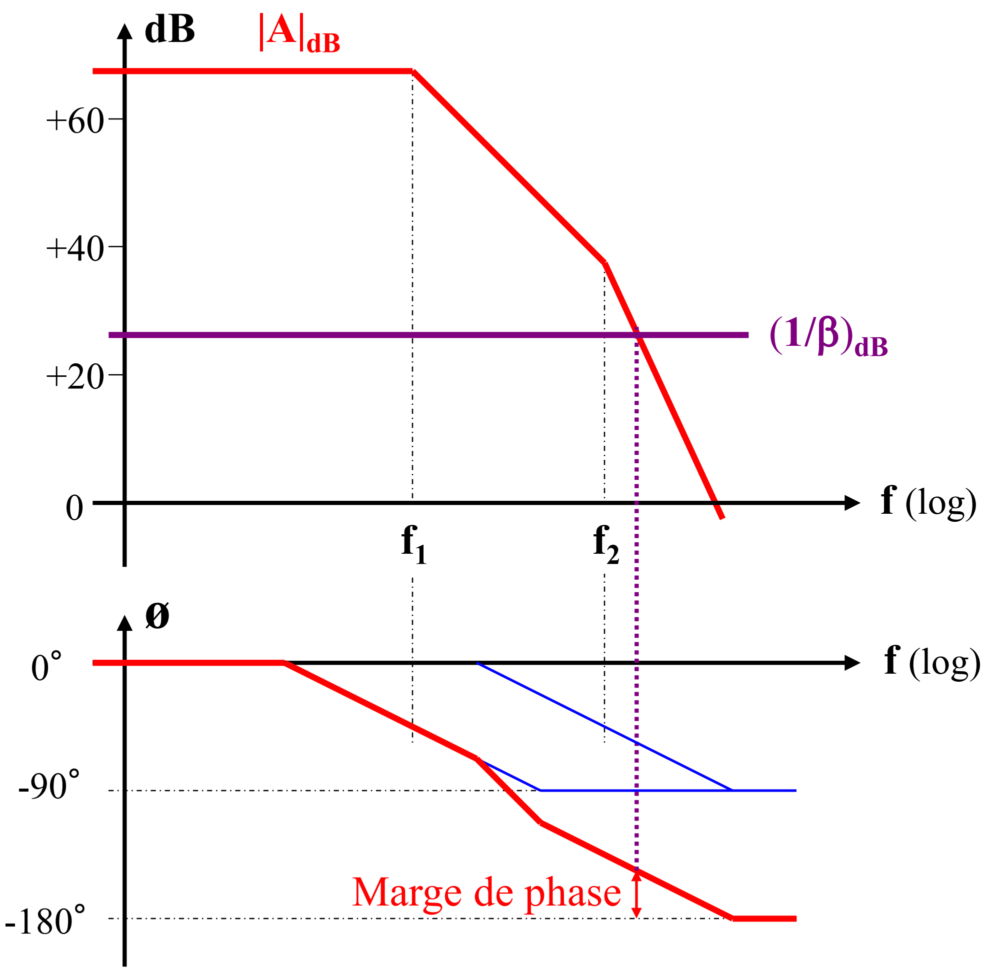
$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{(1 + \frac{j\omega}{\omega_1})}$$

Toujours stable et bien amorti

On peut utiliser un tel ampli avec un gain en boucle fermée aussi bas que désiré, y compris en suiveur de tension, et donc une réaction maximale: $\beta_{max} = 1$

2. USAGE DES DIAGRAMES DE BODE

ANALYSE D'UNE BOUCLE DE REACTION NEGATIVE D'ORDRE 2



$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{(1 + \frac{j\omega}{\omega_1}) \cdot (1 + \frac{j\omega}{\omega_2})}$$

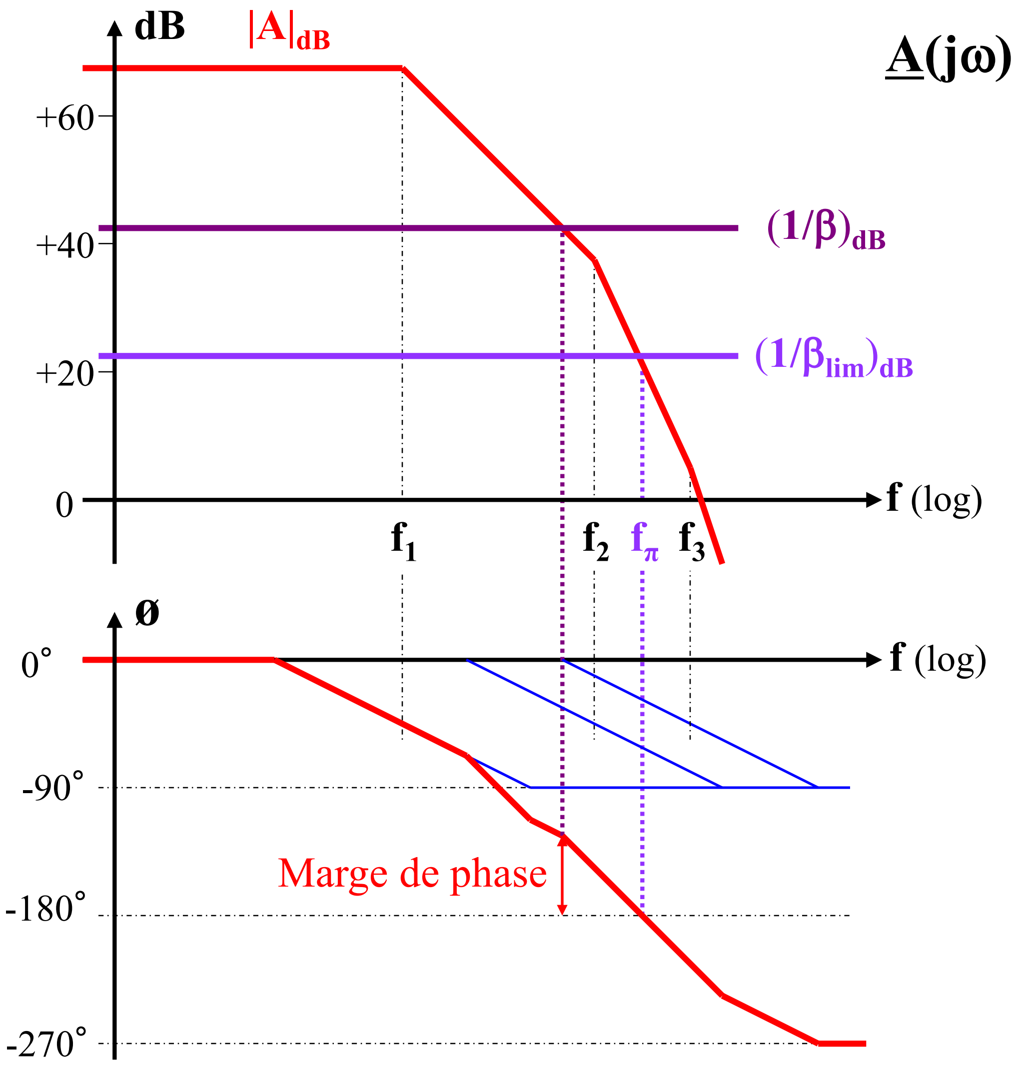
Toujours stable

Mais la marge de phase peut être insuffisante pour β au dessus d'une certaine valeur

En pratique, il faudra compenser cet ampli pour pouvoir l'utiliser avec un gain en boucle fermée aussi bas que désiré, p. ex. en suiveur de tension, et donc avec une réaction maximale: $\beta_{max} = 1$

2. USAGE DES DIAGRAMES DE BODE

ANALYSE D'UNE BOUCLE DE REACTION NEGATIVE D'ORDRE 3



$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{(1+\frac{j\omega}{\omega_1})\cdot(1+\frac{j\omega}{\omega_2})\cdot(1+\frac{j\omega}{\omega_3})}$$

Stable si : $\beta < \beta_{lim}$

En pratique, il faudra compenser un tel ampli en fonction du gain en boucle fermée désiré.

Si l'on veut une liberté totale dans le choix du gain en boucle fermée, il faudra le rendre stable pour une réaction maximale: $\beta_{max} = 1$

2. USAGE DES DIAGRAMES DE BODE

COMPENSATION EN FRÉQUENCE

Pour obtenir un circuit stable en boucle fermée, avec le gain A_F spécifié, malgré l'inévitable déphasage dans la boucle provoqué par les pôles de l'amplificateur en boucle ouverte A, on va modifier la fonction de transfert de ce dernier, de façon à satisfaire les critères de stabilité.

Ce principe est appelé "*compensation en fréquence*" d'un amplificateur.

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

DEFINITION

Compenser en fréquence un amplificateur consiste à modifier sa fonction de transfert, donc sa réponse en fréquence, tant en phase qu'en amplitude.

Il est évident qu'il n'est pas possible de supprimer les pôles de la fonction de transfert originale, puisqu'ils sont causés par les inévitables capacités parasites des composants (à l'interieur de l'ampli).

BUT

Obtenir un circuit stable en boucle fermée avec le gain spécifié.
En général, une réponse en fréquence sans "résonance" est désirée, ce qui correspond à une marge de phase de 60 ou plus.

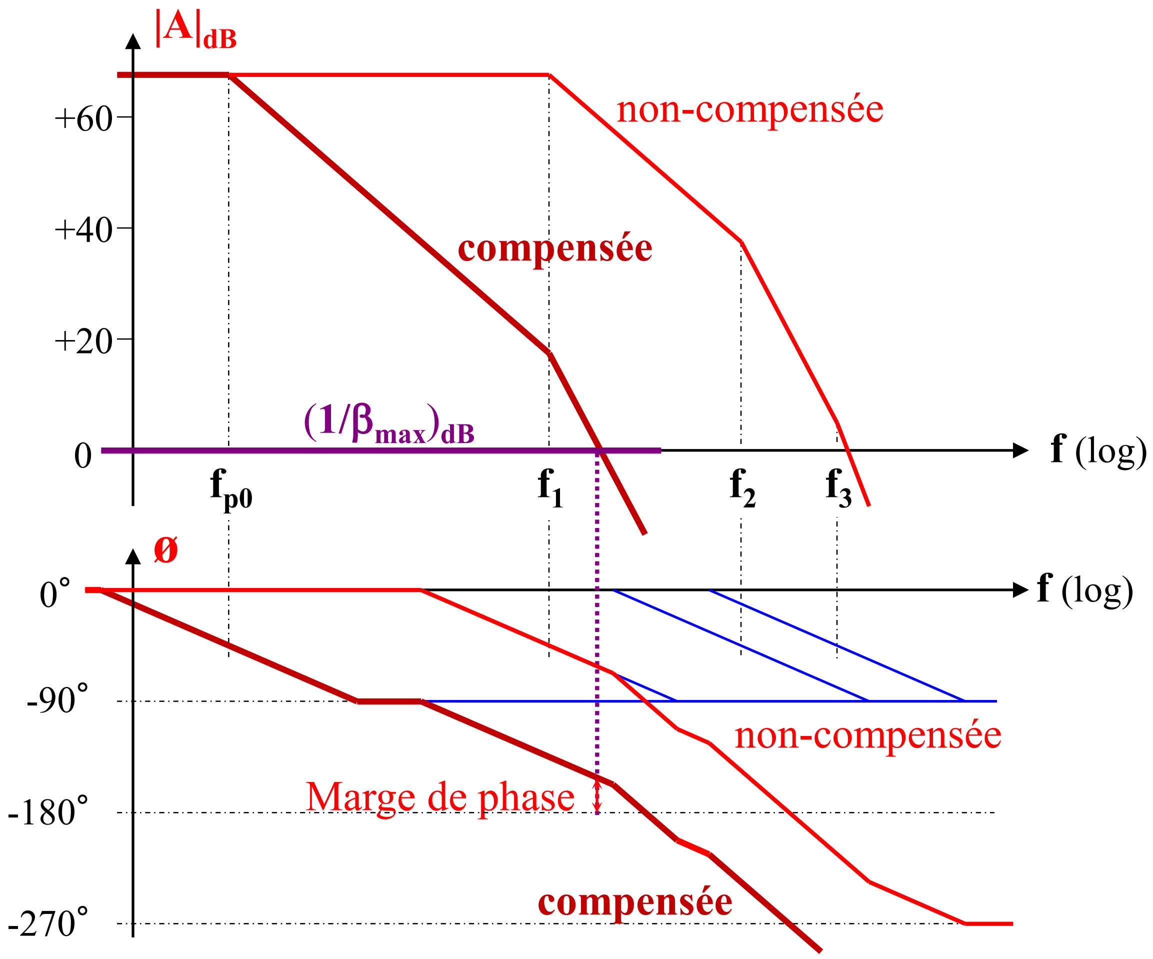
Dans le cas où l'ampli est destiné à un usage général et non spécifique, (typiquement un ampli op) la compensation sera faite pour une réaction totale: $\beta_{max} = 1$ (marge de phase plus critique). En effet, les suiveurs de tension sont plus susceptibles de subir des oscillations que les circuits avec un gain plus élevé.

Gain en boucle fermée plus élevé =	β plus bas =	Plus de stabilité
Gain en boucle fermée plus faible =	β plus élevé =	Moins de stabilité

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

1) COMPENSATION PAR AJOUT D'UN POLE DOMINANT

- ❑ Ajout du pôle dominant en f_{p0}



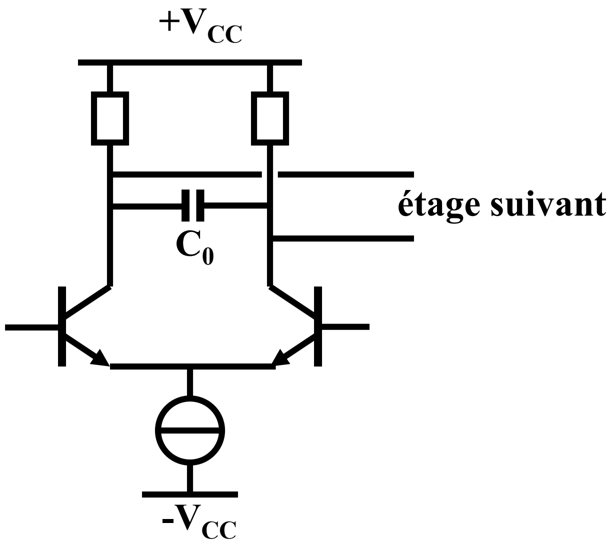
Compensation très simple à réaliser

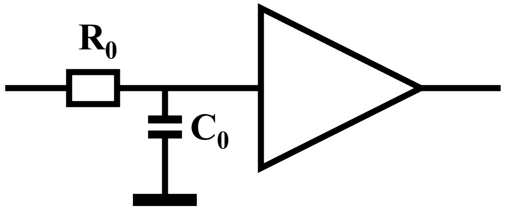
Mais entraine une forte réduction de la bande passante.

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

COMPENSATION PAR AJOUT D'UN POLE DOMINANT

❑ Exemples de réalisations





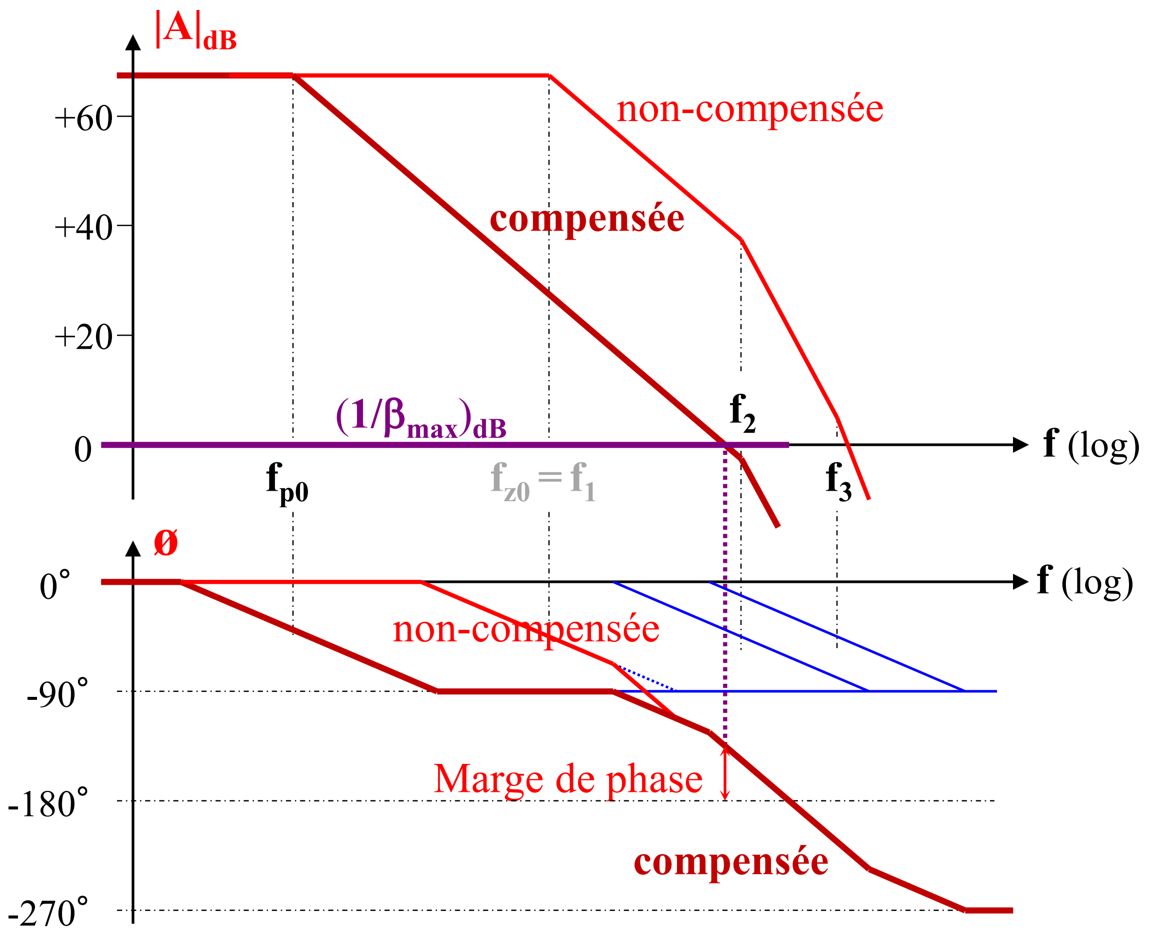
Paire différentielle (e.g., circuit discret):
on ajoute une cap C_0 -> pole dans $1/2RC_0$
(R résistance équivalente de tout ce qui est connecté aux sorties)

Ampli op (circuit intégré):
on ajoute un circuit passe bas à l'entrée, qui va introduire un pôle $1/R_0C_0$

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

2) COMPENSATION PAR AJOUT D'UN POLE DOMINANT ET D'UN ZERO

❑ Ajout du pôle dominant en f_{p0} et d'un zéro confondu avec le pôle dominant original en f_1



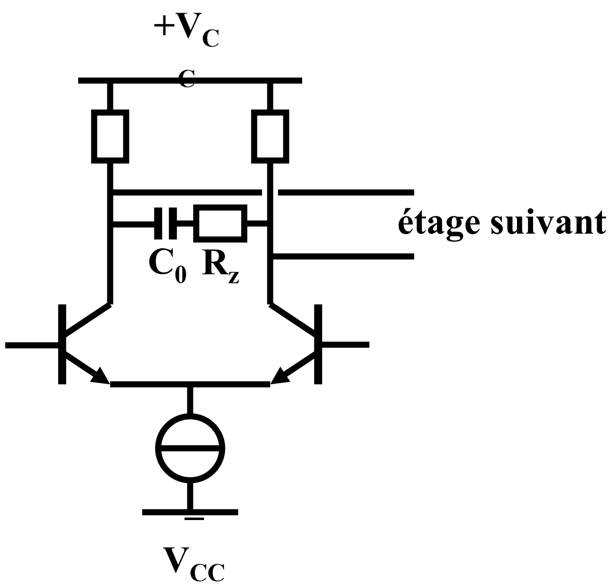
Méthode donnant une meilleure bande passante que par l'ajout simple d'un pôle

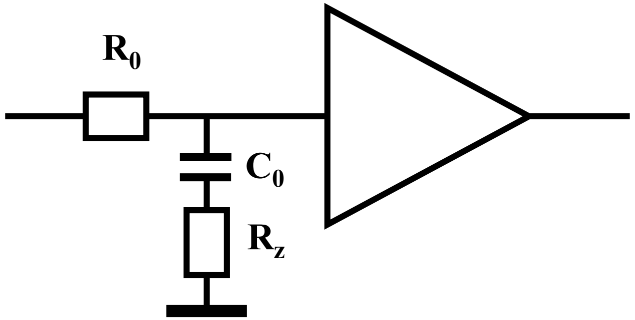
Difficulté d'obtenir une correspondance précise de f_{z0} et f_1

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

COMPENSATION PAR AJOUT D'UN POLE DOMINANT ET D'UN ZERO

❑ Exemples de réalisations





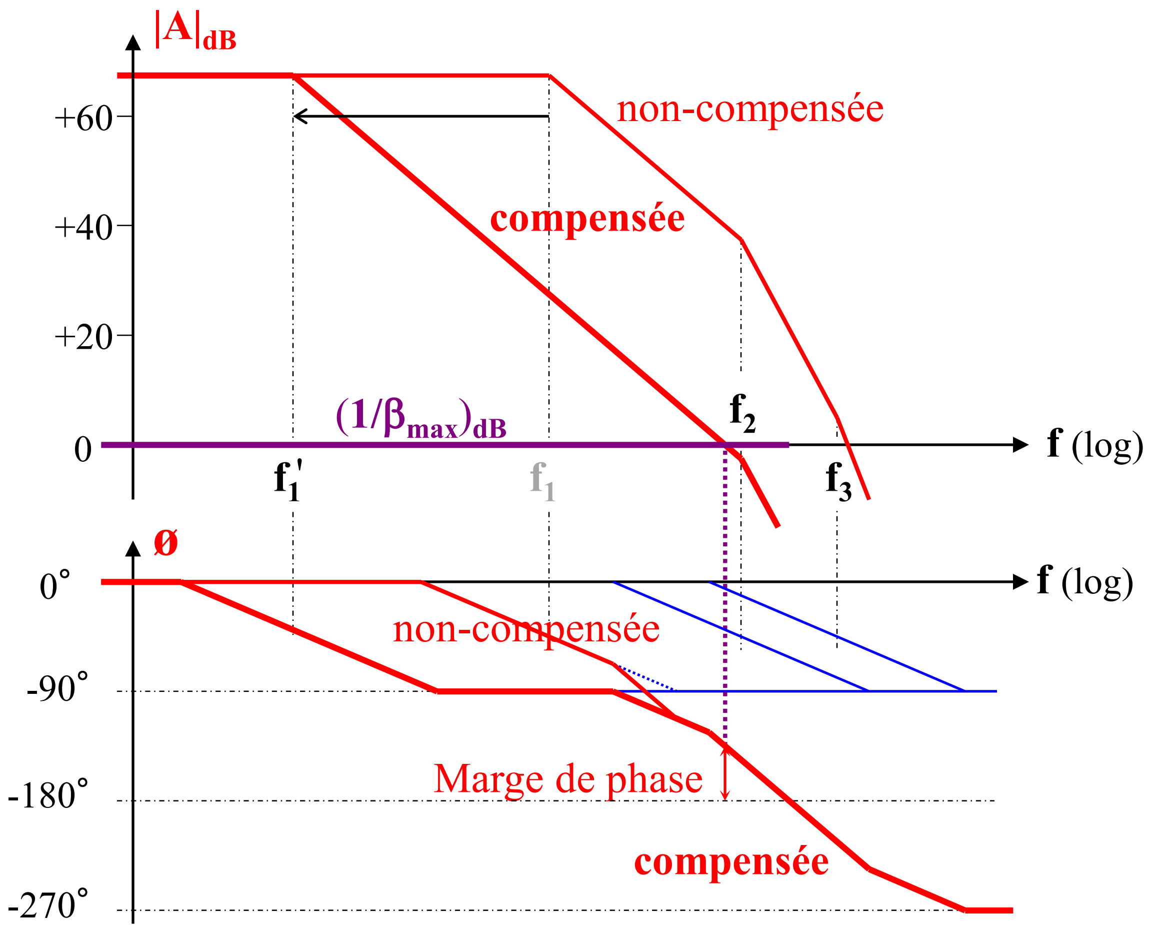
Paire différentielle (circuit discret):
C_0 avec R et R_z - > pole
C_0 avec R_z -> zéro

Ampli op (circuit intégré):
C_0 avec R_0 et R_z - > pole
C_0 avec R_z -> zéro

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

3) COMPENSATION PAR DEPLACEMENT DU POLE DOMINANT

- Déplacement du pôle dominant en f_1 vers une fréquence inférieure



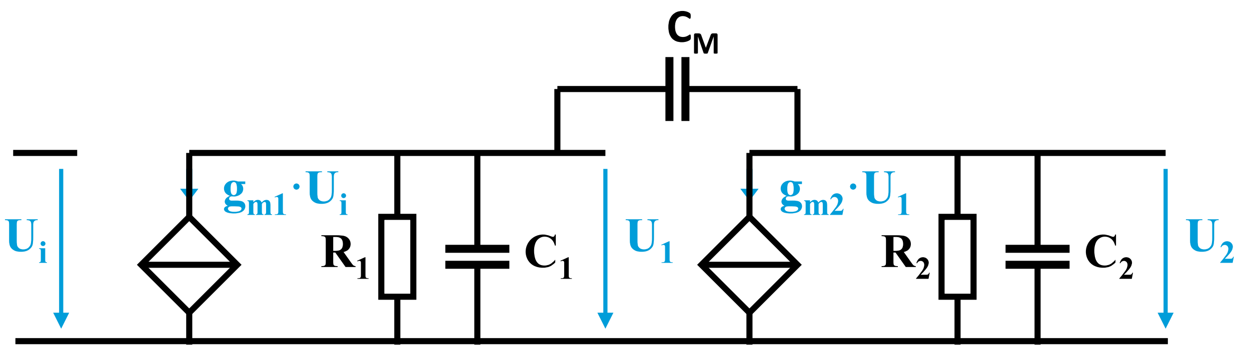
Méthode donnant une meilleure bande passante que par l'ajout simple d'un pôle

Nécessité d'identifier la capacité parasite responsable du pôle dominant pour en augmenter la valeur

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

4) COMPENSATION PAR DEPLACEMENT DU POLE DOMINANT ET DU POLE SECONDAIRE (POLES SPLITTING) PAR CAPACITE MILLER

- ❑ Effet d'une capacité Miller: illustration on a multistage amplifier



$$\frac{\underline{U_2}}{\underline{U_i}}=\frac{g_{m1}\cdot R_1\cdot g_{m2}\cdot R_2\cdot(1-p\cdot C_M/g_{m2})}{1+p\cdot\left(R_1\cdot(C_1+C_M)+R_2\cdot(C_2+C_M)+g_{m2}\cdot R_1\cdot R_2\cdot C_M\right)+p^2\cdot R_1\cdot R_2\cdot\left(C_1\cdot C_2+C_M\cdot(C_1+C_2)\right)}$$

Si: $g_{m2}\cdot R_2\cdot R_1\cdot C_M >> R_1\cdot(C_1+C_M)+R_2\cdot(C_2+C_M)$

$$\frac{\underline{U_2}}{\underline{U_i}}\cong\frac{g_{m1}\cdot R_1\cdot g_{m2}\cdot R_2\cdot(1-p\cdot C_M/g_{m2})}{\left(1+p\cdot R_1\cdot C_M\cdot g_{m2}\cdot R_2\right)\cdot\left(1+p\cdot(C_1+C_2+C_1\cdot C_2/C_M)/g_{m2}\right)}$$

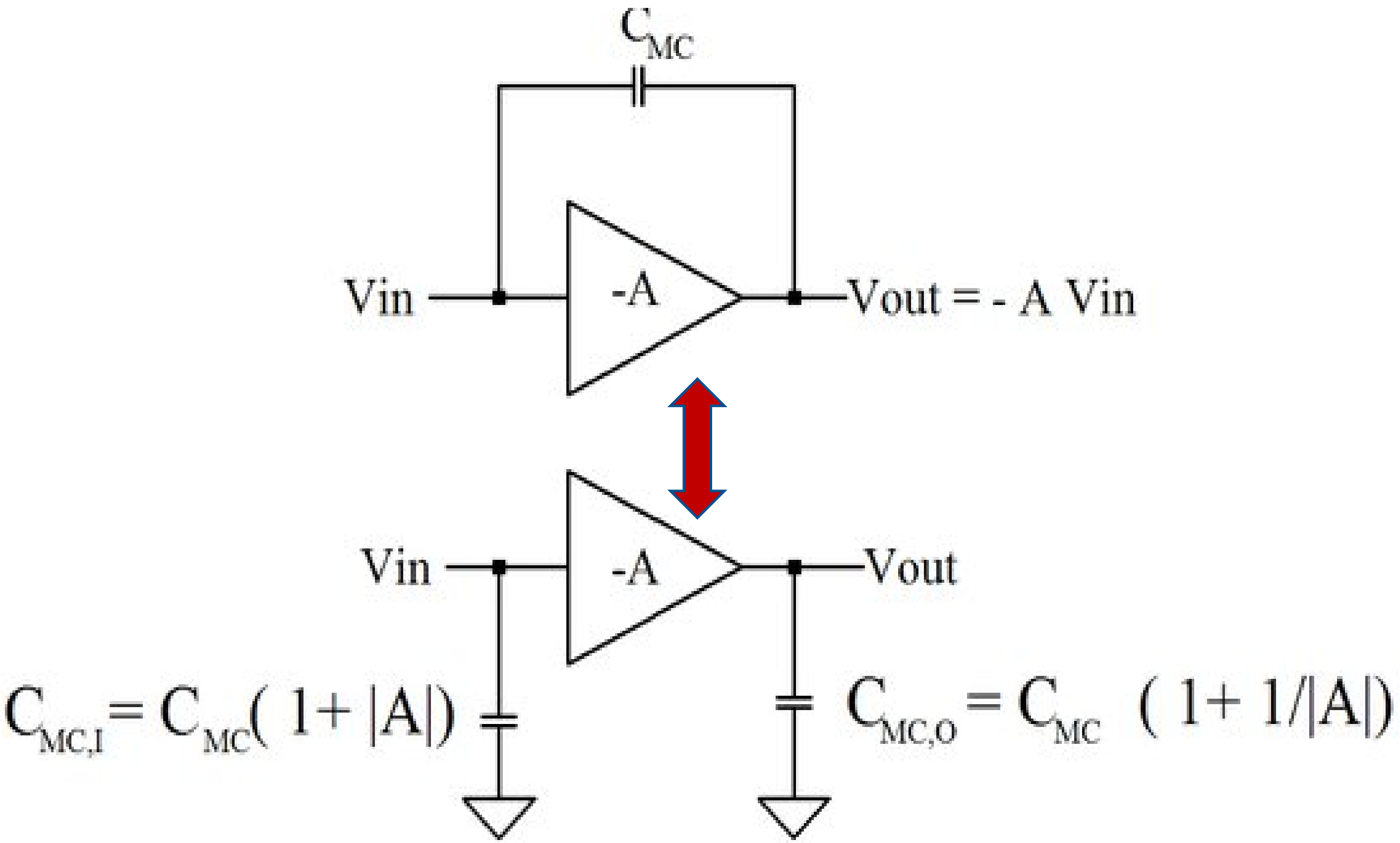
zéro réel positif en haute fréquence

pôle dominant en basse fréquence

pôle secondaire repoussé en haute fréquence

'spiltting'

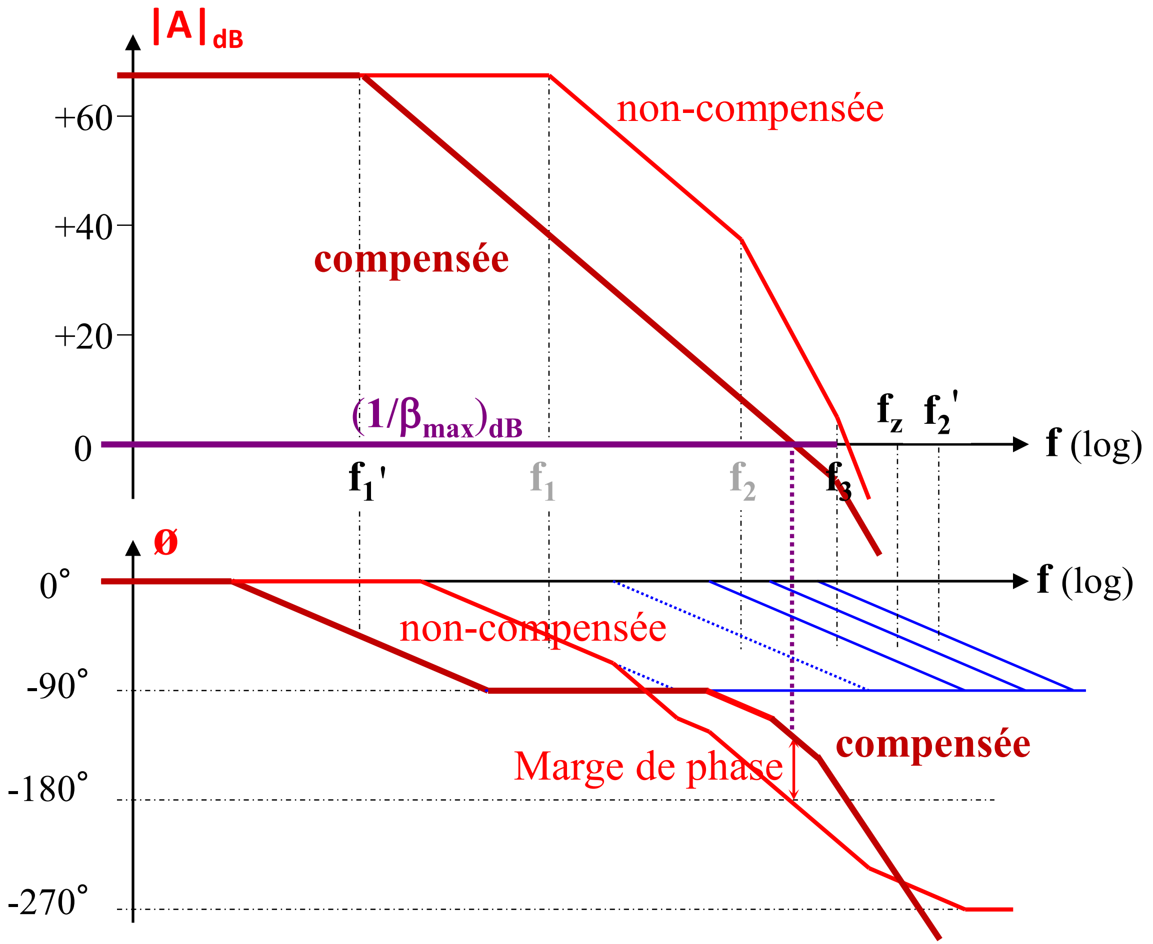
Théorème de Miller pour capacitance



3. COMPENSATION EN FREQUENCE

COMPENSATION PAR DEPLACEMENT DU POLE DOMINANT ET DU POLE SECONDAIRE (POLES SPLITTING) PAR CAPACITE MILLER

- Déplacement du pôle dominant vers une fréquence inférieure et du pôle secondaire vers une fréquence supérieure



Méthode donnant une meilleure bande passante que les précédantes

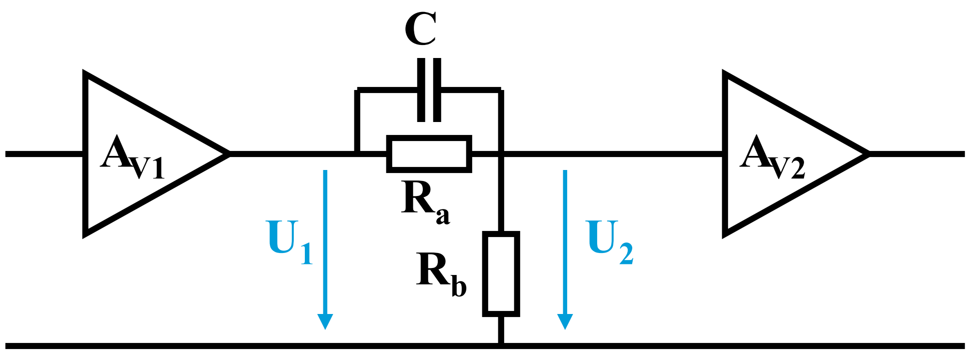
Solution de choix pour une intégration, la capacité Miller requise est assez petite, car elle est multipliée par le gain de l'étage

Le zéro réel positif <u>ajoute du déphasage</u> et peut poser problème

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

5) COMPENSATION DITE A AVANCE DE PHASE PAR AJOUT D'UN ZERO ET D'UN POLE

❑ Création du zéro (et de l'inévitable pôle associé)



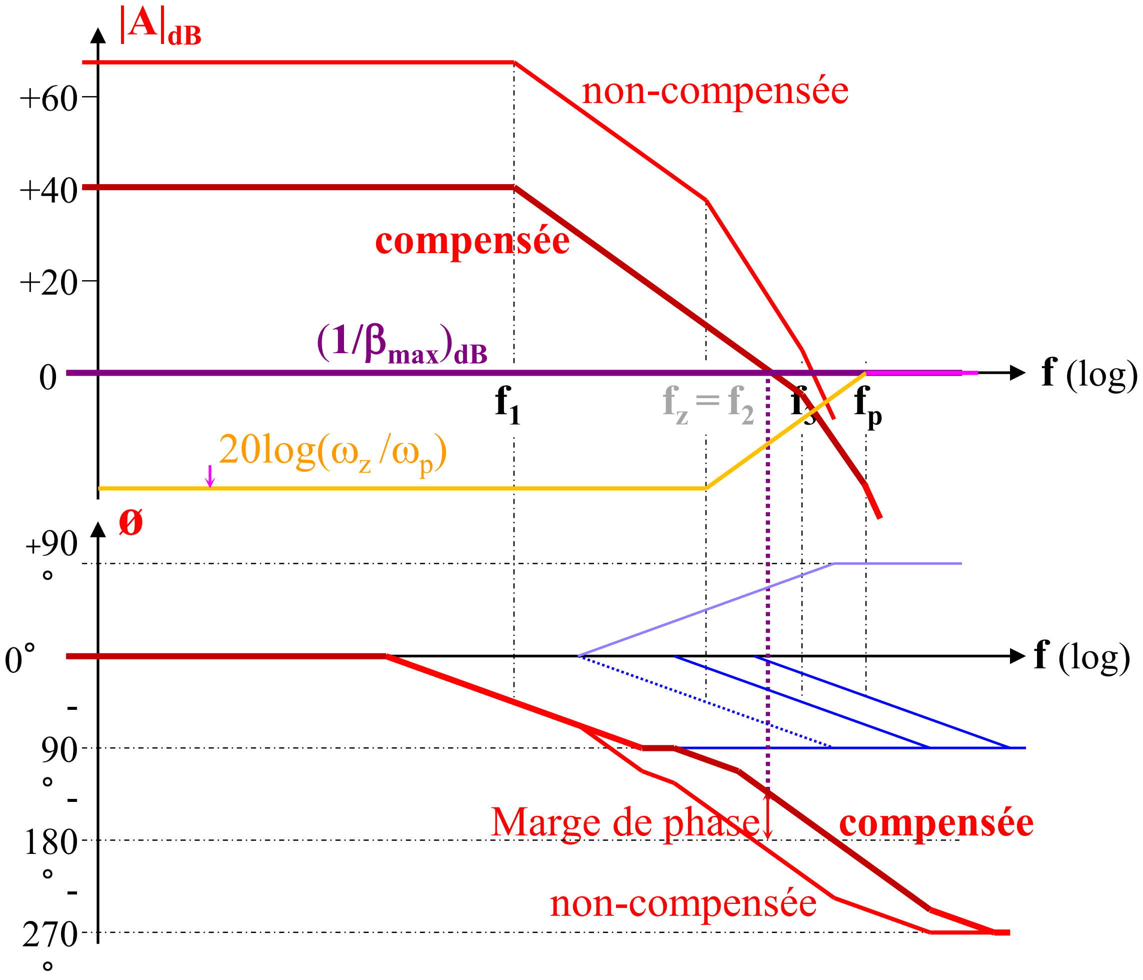
$$\frac{\underline{U_2}}{\underline{U_1}} = \frac{R_b}{R_b + R_a} \cdot \frac{1 + p \cdot C \cdot R_a}{1 + p \cdot C \cdot \dfrac{R_b \cdot R_a}{R_b + R_a}} = \frac{\omega_z}{\omega_p} \cdot \frac{1 + p/\omega_z}{1 + p/\omega_p} \qquad \text{avec } \omega_z < \omega_p$$

On observe que aux hautes fréquences, C vient shunter Ra, et U_2 tend vers la valeur de U_1 : le pont diviseur passe de la valeur Rb/(Ra+Rb) à 1.

3. COMPENSATION EN FREQUENCE

COMPENSATION PAR AJOUT D'UN ZERO ET D'UN POLE, DITE A AVANCE DE PHASE

- Ajout d'un zéro confondu avec le second pôle original



Méthode donnant une meilleure bande passante que les précédantes

Gain de boucle en basse fréquence réduit de f_p/f_z , donc une efficacité moindre de la contre-réaction