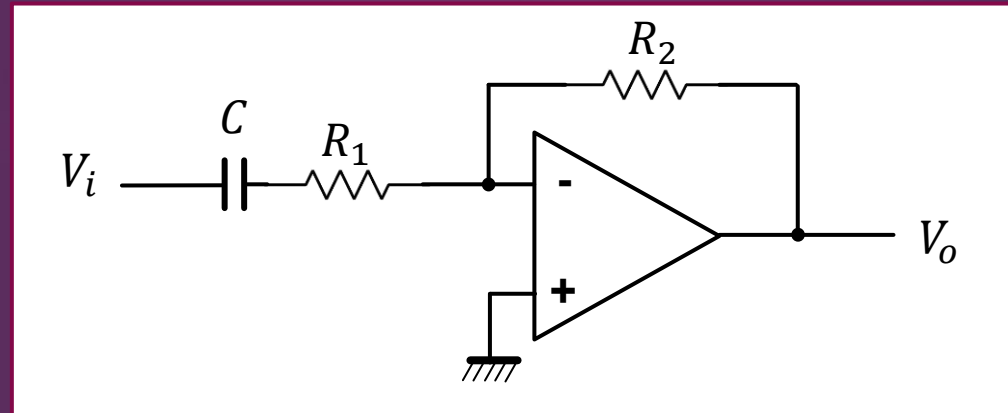


# Projet d'électronique

F. SENNY & D. CAPPELLE



Limite en fréquence  
d'un montage AOp

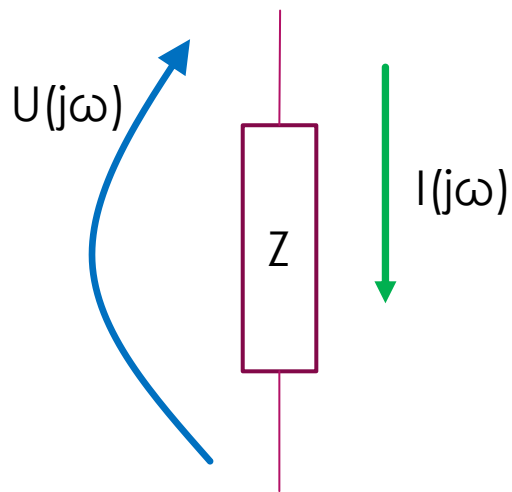
# Sommaire

- ▶ Rappel Impédance, AOp en AC et Bode
- ▶ Schéma « système bouclé » d'un montage AOp
- ▶ Non-idéalité d'un montage Aop : limite en fréquence et compromis gain –  
bande passante

# Rappel - Loi d'Ohm alternatif

L'impédance est le rapport entre la tension ( $U \sin(\omega t + \varphi_U)$ ) et le courant ( $I \sin(\omega t + \varphi_I)$ )

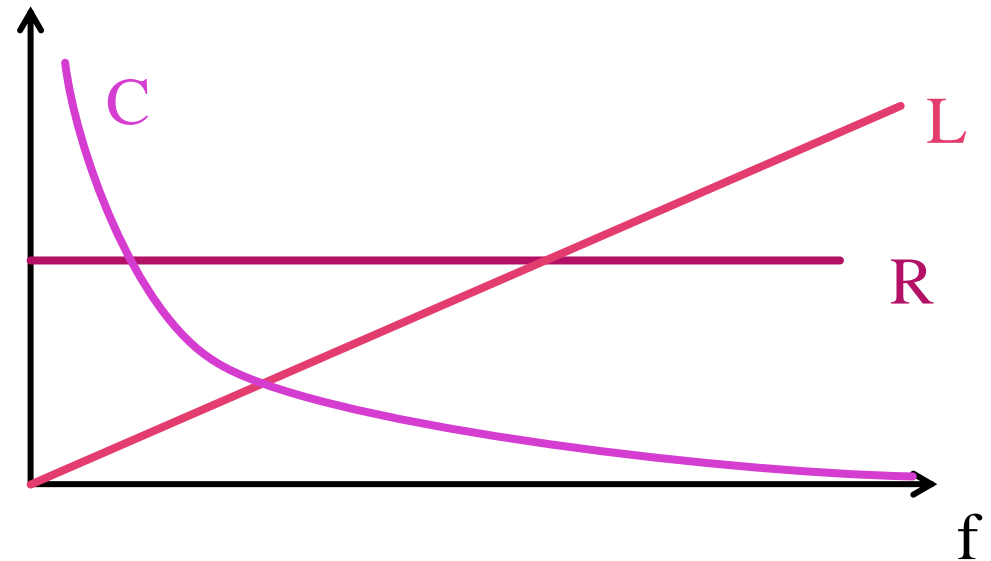
Par Fourier (plus simple) ça donne :  $U(j\omega) = Z(j\omega)I(j\omega)$



**Impédance  $Z$  selon la fréquence :**

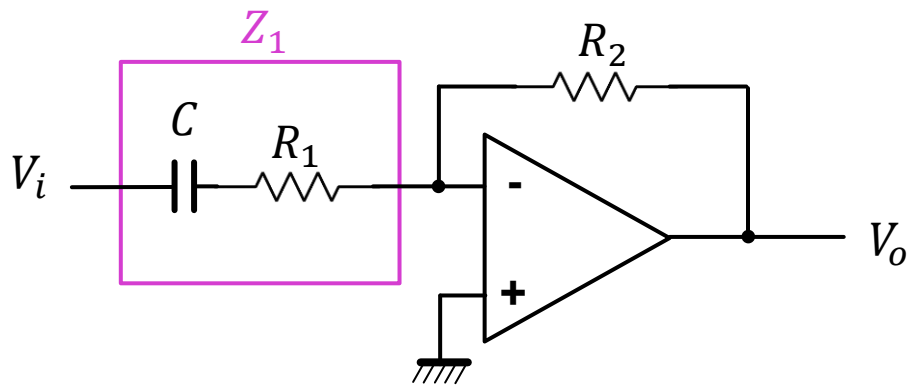
- **Résistance**  $Z_R = R$
- **Condensateur**  $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$
- **Inductance** ('self')  $Z_L = j\omega L$

$|Z|$   
( $\Omega$ )



Un signal peut être composé de plusieurs sinus ...  $u(t) = \sum U_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$

# Rappel - Fonction de transfert en AC



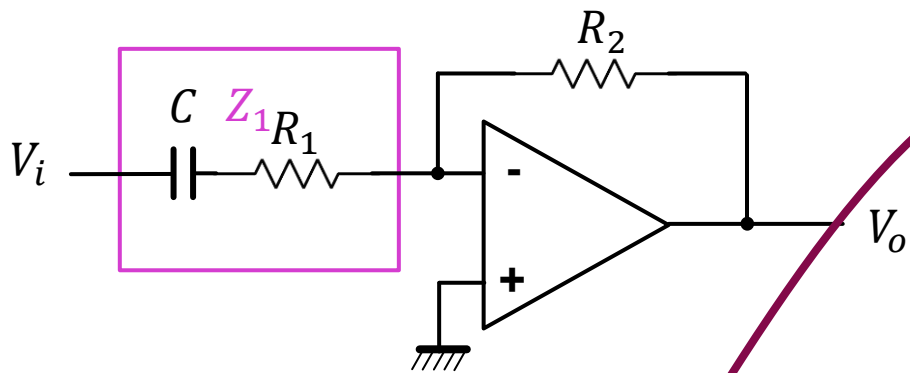
Fixons  $Z_1$  l'impédance équivalente de  $R_1$  série  $C$

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C} = \frac{j\omega R_1 C + 1}{j\omega C}$$

On tombe sur un montage type amplificateur inverseur

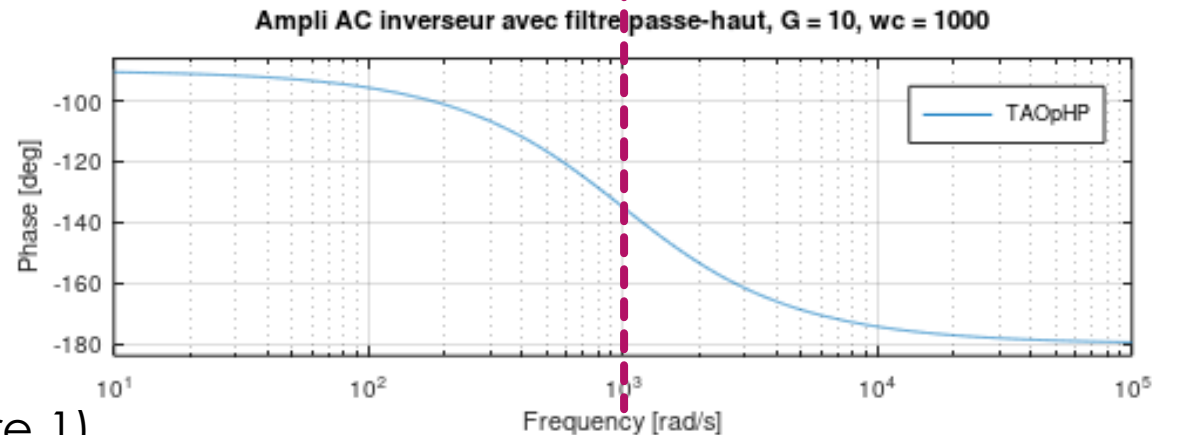
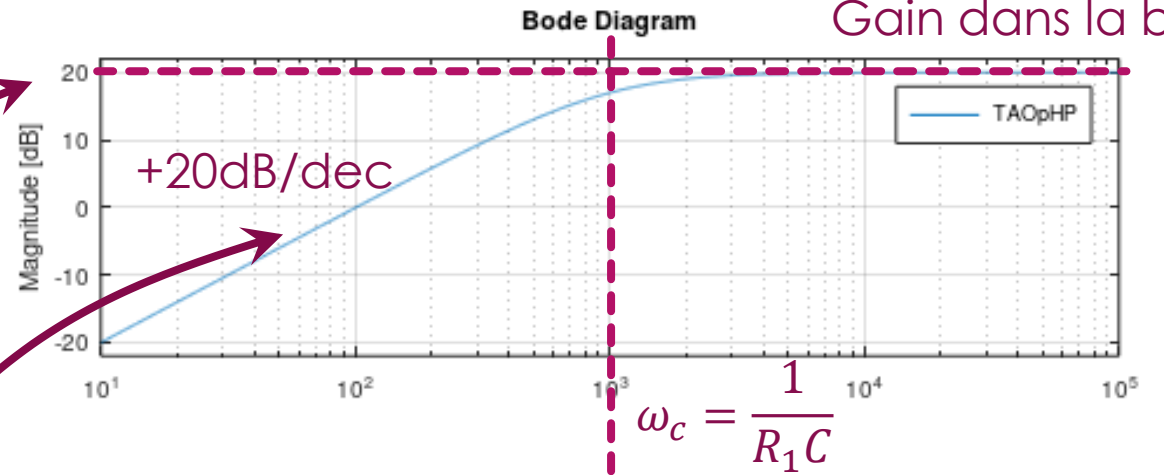
$$T = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2 j\omega C}{j\omega R_1 C + 1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega R_1 C}{j\omega R_1 C + 1}$$

# Rappel – Bode de $T(j\omega) = |T(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$




$$T = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2 j\omega C}{j\omega R_1 C + 1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{j\omega R_1 C}{j\omega R_1 C + 1}$$

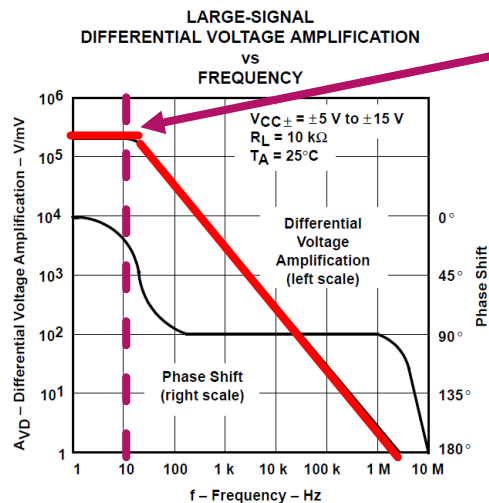
Filtre passe-haut (ordre 1)



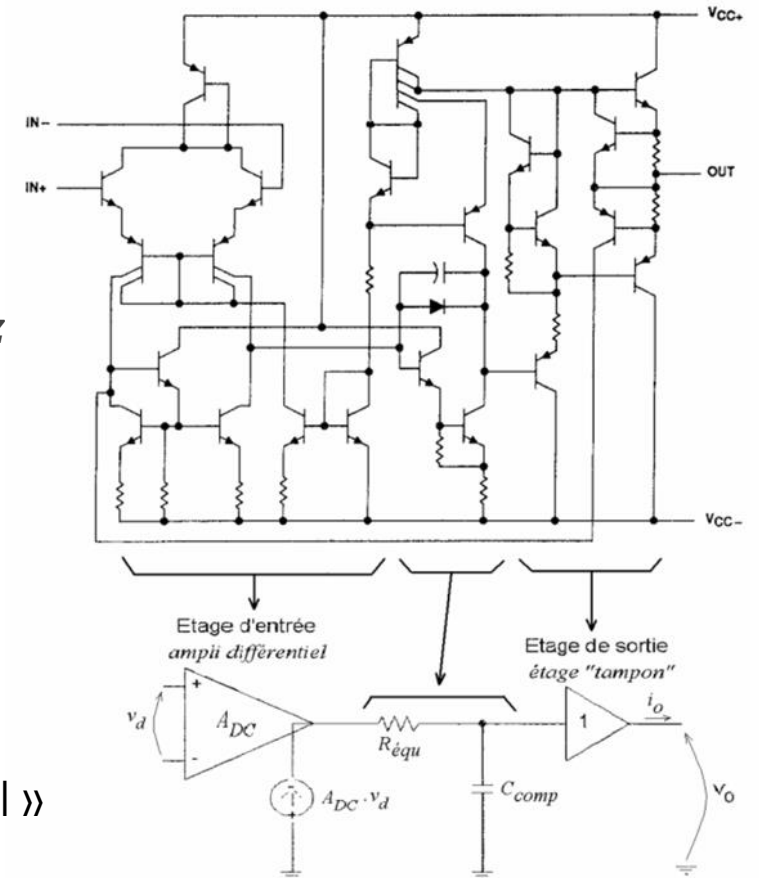
# Limite en fréquence d'un montage AOp

- ▶ La fonction T calculée est la **fonction idéale** (Aop « idéal »)
  - ▶ Gain interne  $A = A_{DC}$  ( $\sim 10^5$ )
- ▶ **Risque d'instabilité dans système avec feedback** 

=> Gain interne **compensé**  $A = A_{DC} \frac{1}{1+jf/f_{comp}}$  avec  $f_{comp} \sim 10\text{Hz}$



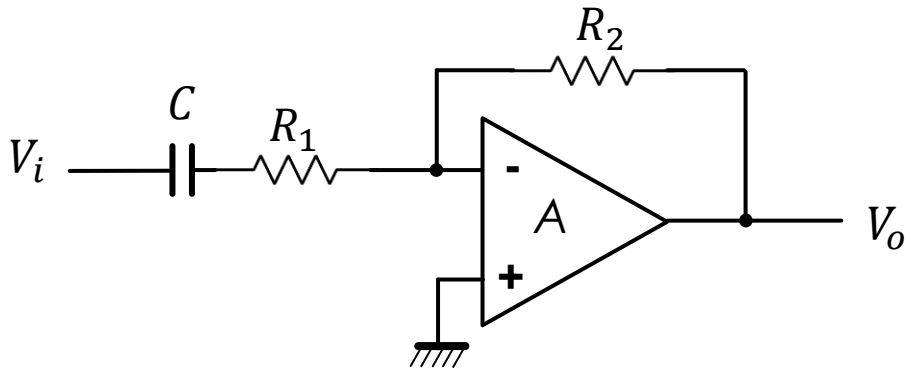
Ainsi, l'Aop n'est plus « idéal »  
... et donc ?



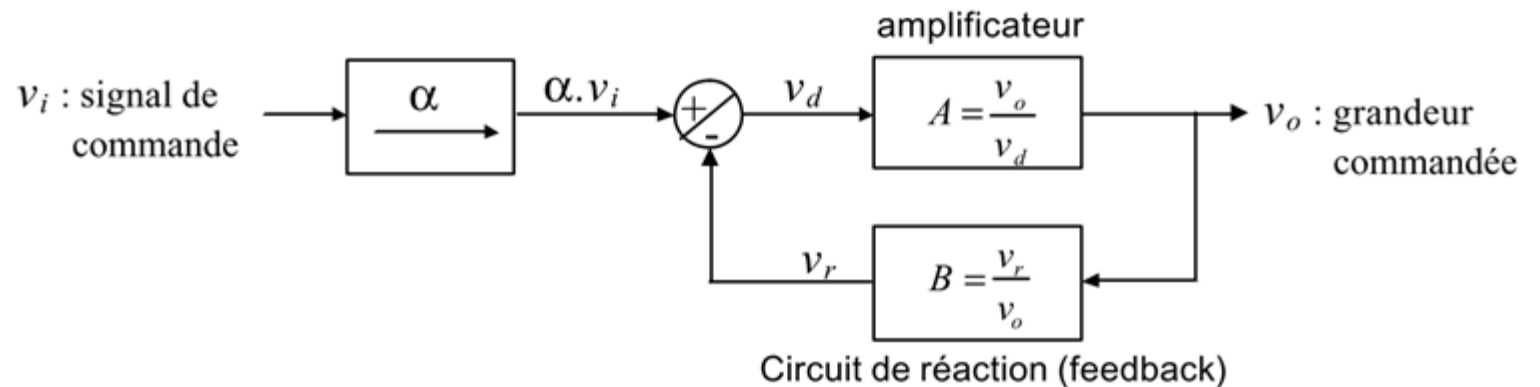
# Limite en fréquence d'un montage Aop

- **Impact sur la fonction T ?!** Oui, il faut prendre du recul, ne plus considérer l'Aop comme idéal ( $v_d \neq 0$ ) et avoir une approche « système »

Montage ampli-inverseur



Montage générique « vue système »



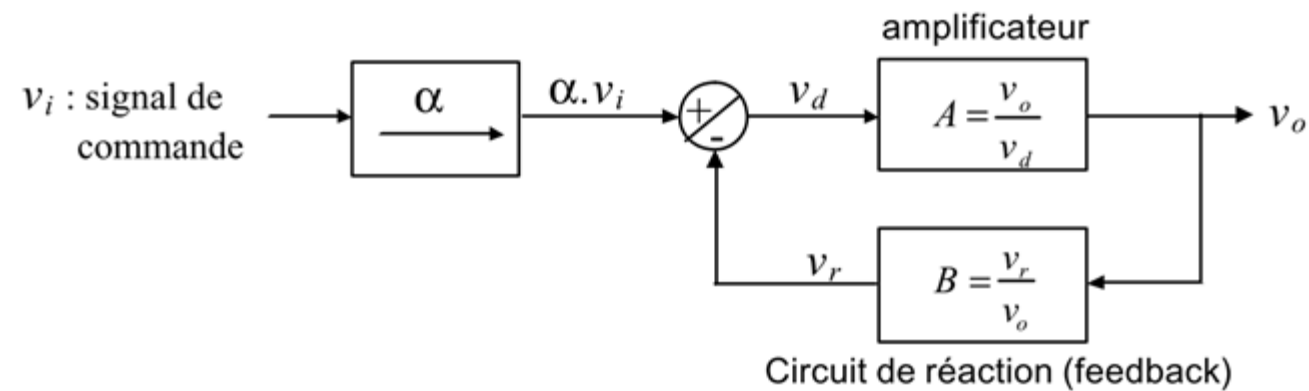
avec  $v_d = \alpha \cdot v_i - B \cdot v_o$

et le taux de contre-réaction  $B = \left( \frac{-v_d}{v_o} \right)_{\text{à } v_i=0}$

# Limite en fréquence d'un montage Aop

- **Impact sur la fonction T ?!** Oui, il faut prendre du recul, ne plus considérer l'Aop comme idéal ( $v_d \neq 0$ ) et avoir une approche « système »

Montage générique « vue système »



avec  $v_d = \alpha \cdot v_i - B \cdot v_o$

et le taux de contre-réaction  $B = \left( \frac{-v_d}{v_o} \right)_{\text{à } v_i=0}$

$$v_o = A v_d = A (\alpha v_i - B v_o) \rightarrow v_o (1 + AB) = A \alpha v_i$$

Il vient  $\frac{v_o}{v_i} = \frac{A}{1+AB} \alpha = \frac{\alpha}{B} \frac{1}{1+\frac{1}{AB}}$

$$\text{Or } 1 + \frac{1}{AB} = 1 + \frac{1+jf/f_{comp}}{A_{DC} B} = 1 + \frac{1}{A_{DC} B} + \frac{jf/f_{comp}}{A_{DC} B}$$

Avec  $A_{DC} B \gg 1$ , on obtient

$$1 + \frac{1}{AB} \approx 1 + \frac{jf}{A_{DC} f_{comp} B} = 1 + \frac{jf}{f_{TA} B} = 1 + \frac{jf}{f_{CT}}$$

$$\text{Et donc } T_{réelle} = \frac{\alpha}{B} \frac{1}{1+jf/f_{CT}} = T_{idéale} \frac{1}{1+jf/f_{CT}}$$

avec  $f_{CT} = B f_{TA}$  ( $f_{TA}$  = constante = bande passante à gain unitaire -> datasheet)



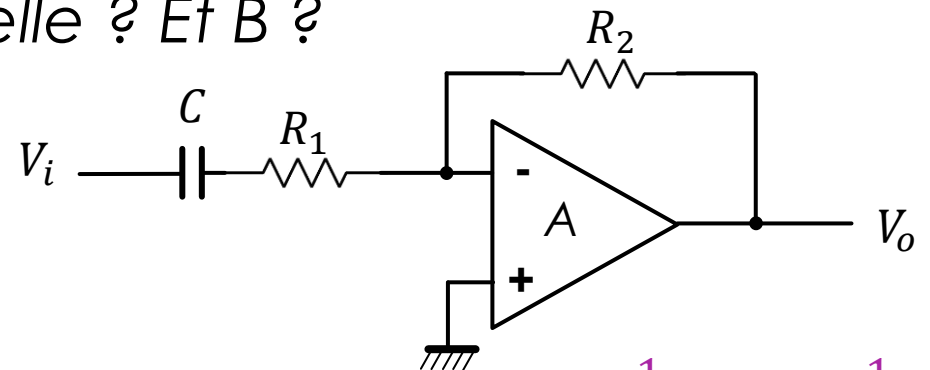
# Limite en fréquence d'un montage Aop

- **Impact sur la fonction T ?!** Oui, on vient de montrer que le gain interne compensé (nécessaire à la stabilité du circuit) impacte la fonction de transfert par un filtre passe-bas de fréquence de coupure  $f_{CT}$

$$T_{réelle} = T_{idéale} \frac{1}{1+jf/f_{CT}} \text{ avec } f_{CT} = B f_{TA}$$

$f_{TA} = \text{constante} \rightarrow \text{datasheet} \dots \text{laquelle ? Et } B ?$

$$B = \left( \frac{-v_d}{v_o} \right)_{\text{à } v_i=0}$$



Appliquons la formule  
à notre montage

... au tableau ☺ ...

$$B = \frac{1}{1 + R_2/R_1} = \frac{1}{1 + G} \leq 1$$

# Limite en fréquence d'un montage Aop

- ▶ **Impact sur la fonction T ?!** Oui, on vient de montrer que la fonction de transfert est impactée d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure  $f_{CT}$  et que  $f_{CT}$  dépend d'une constante  $f_{TA}$  et de  $B$ , qui lui est inversement proportionnel au **gain G**

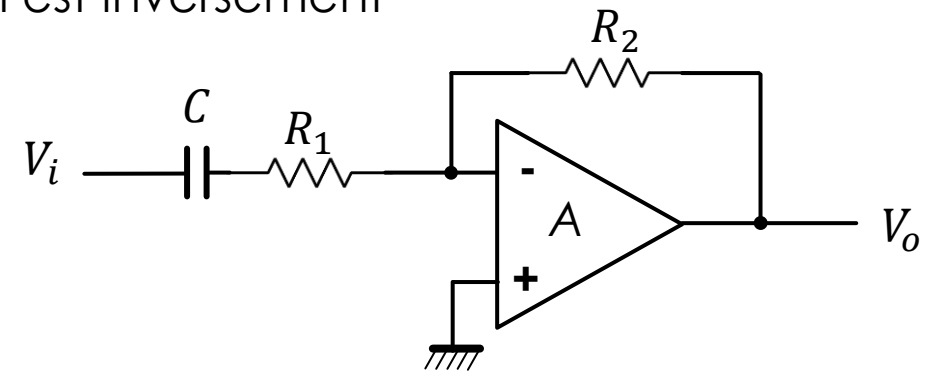
$$T_{réelle} = T_{idéale} \frac{1}{1+jf/f_{CT}} \quad \text{avec } f_{CT} = B f_{TA}$$

▶ Si  $G \nearrow$ ,  $B \searrow$  et  $f_{CT} \searrow$

▶ Si  $G \searrow$ ,  $B \nearrow$  et  $f_{CT} \nearrow$

- ▶ Moralité : **compromis gain – bande passante**

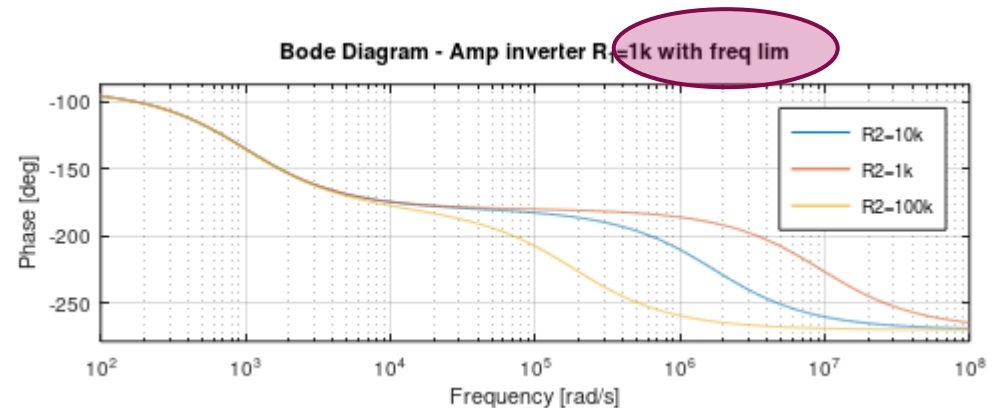
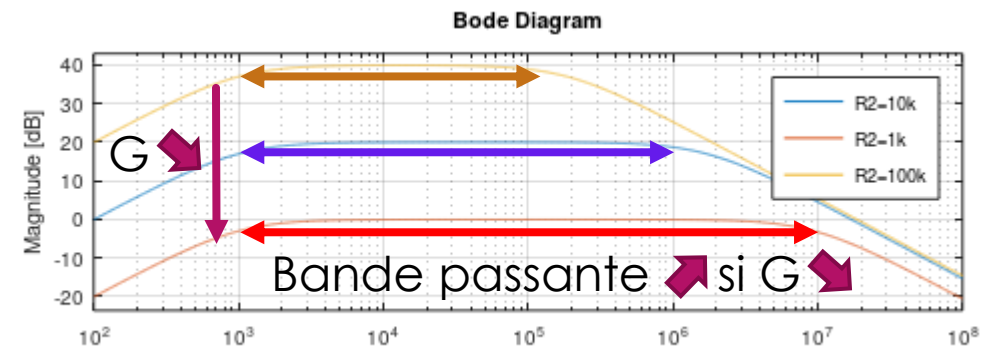
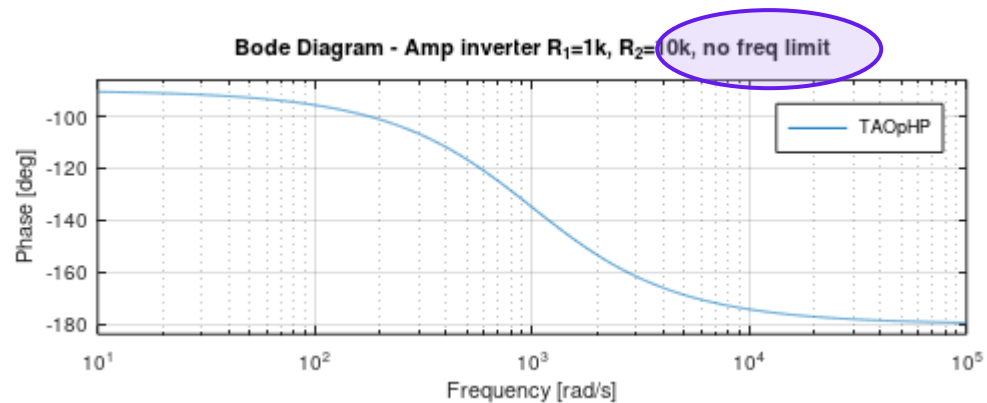
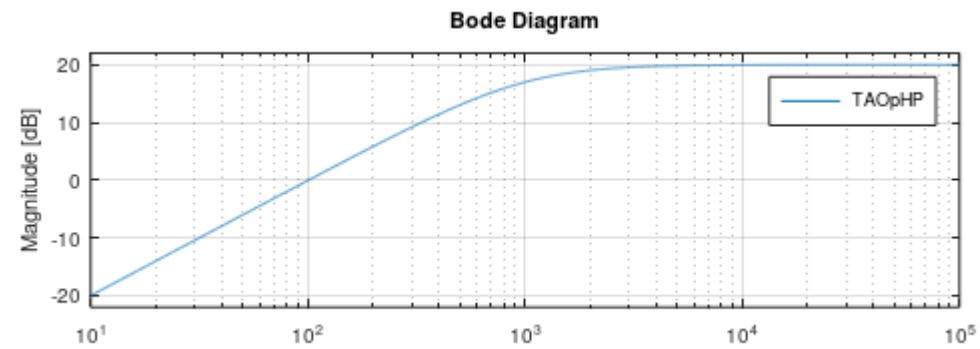
- ▶  $f_{TA}$  est une **constante, propre à l'Aop**, équivalent à la **bande passante à gain unitaire** (pour un montage suiveur où  $B = 1 = B_{max}$ )



$$B = \frac{1}{1 + R_2/R_1} = \frac{1}{1 + G} \leq 1$$

# Limite en fréquence d'un montage Aop

- ▶ Illustration avec le diagramme de Bode du montage ampli inverseur



# Exercice compromis gain-bande-passante

Nous souhaitons réaliser un montage amplificateur pour amplifier un signal triangulaire de 100 mV c-c d'une fréquence de 800Hz pour avoir une tension de crête de 5V. Pour ne pas déformer trop le signal nous souhaitons conserver jusqu'à la 5<sup>ième</sup> harmonique.

Peut-on le réaliser avec un seul montage à Aop ?

Si oui, quel(s) est/sont les critères de choix de cet AOp ?

Si non, quel stratégie adopter ?

# Exercice compromis gain-bande-passante

Nous souhaitons réaliser un montage amplificateur pour amplifier un signal triangulaire de 100 mV c-c d'une fréquence de 800Hz pour avoir une tension de crête de 5V. Pour ne pas déformer trop le signal nous souhaitons conserver jusqu'à la 5<sup>ème</sup> harmonique.

- ▶ 100 mV c-c signifie  $V_{i|\max} = 50 \text{ mV}$  et  $G = \frac{V_{o|\max}}{V_{i|\max}} = \frac{5}{0.05} = 100$
- ▶ Si nous souhaitons que la 5<sup>ème</sup> harmonique ne soit pas trop abimée, il faudrait que  $f_{cH} \cong 10 f_5$  donc la fréquence de coupure haute aux alentours de 40kHz.

Note : prendre  $f_{cH} \cong 10 f_5$  assure qu'à  $f_5$  la chute du gain se soit que de 0,45%

Il est possible dans certain cas d'admettre une chute plus grande, il faut alors utiliser la formule approximée suivante :  $f_{cH} \cong \frac{f_{\text{travail}}}{1,5 \sqrt{\text{erreur}}}$  (valable uniquement si erreur < 0,1).

# Exercice compromis gain-bande-passante

Nous souhaitons réaliser un montage amplificateur pour amplifier un signal triangulaire de 100 mV c-c d'une fréquence de 800Hz pour avoir une tension de crête de 5V. Pour ne pas déformer trop le signal nous souhaitons conserver jusqu'à la 5<sup>ème</sup> harmonique.

- ▶  $G = 100$  et  $f_{cH} \cong 40$  kHz
- ▶ Si nous faisons un seul montage en amplificateur non-inverseur :  
 $B = \frac{1}{G}$  et  $f_{cH} = B f_{TA}$  donc il faudrait un AOp qui a  $f_{TA} \geq G f_{cH}$  donc  $f_{TA} \geq 4$  MHz
- ▶ Voir les datasheets.. Ex : LM358  $f_{TA} = 1,1$  MHz => KO  
TL081  $f_{TA} = 3$  MHz => KO (quoique par Bode à  $f_5$  on a 0,8% d'erreur seulement)  
Problème, le TL081 est déjà à ~ 1€ l'unité ! Imaginez celui à 4MHz...

# Exercice compromis gain-bande-passante

Nous souhaitons réaliser un montage amplificateur pour amplifier un signal triangulaire de 100 mV c-c d'une fréquence de 800Hz pour avoir une tension de crête de 5V. Pour ne pas déformer trop le signal nous souhaitons conserver jusqu'à la 5<sup>ième</sup> harmonique.

- ▶  $G = 100$  et  $f_{cH} \cong 40$  kHz
- ▶ Nous pouvons répartir le gain en deux montages AOp (non-)inverseur pour réduire la  $f_{TA}$  minimale. Ceci permettrait de trouver un montage bien moins cher et même on pourrait intégrer d'autres harmoniques !
- ▶ Choisissons une répartition uniforme de sorte que le gain total soit toujours respecté :  
 $G_1 = G_2 = 10$

# Exercice compromis gain-bande-passante

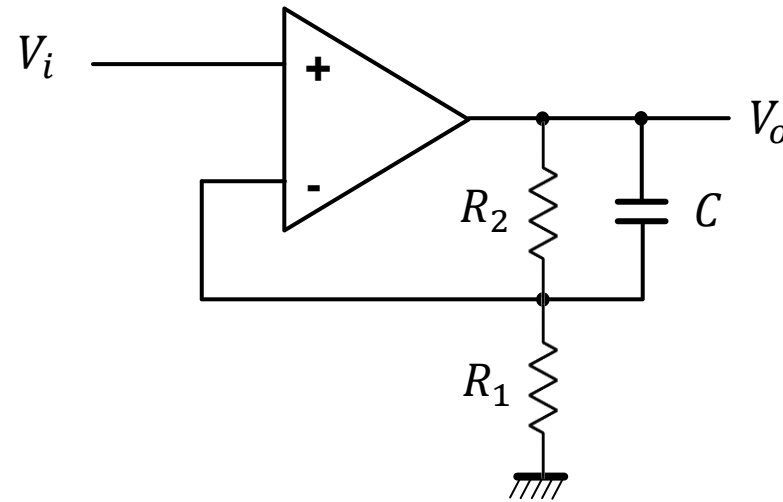
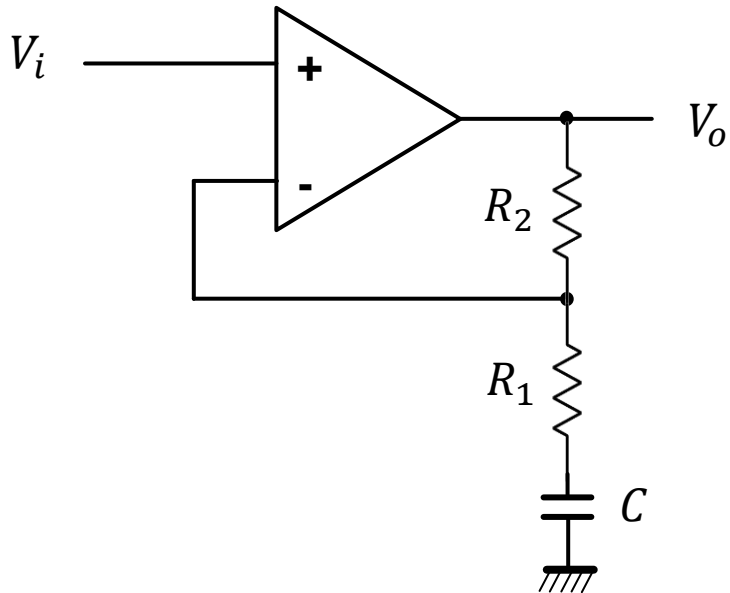
Nous souhaitons réaliser un montage amplificateur pour amplifier un signal triangulaire de 100 mV c-c d'une fréquence de 800Hz pour avoir une tension de crête de 5V. Pour ne pas déformer trop le signal nous souhaitons conserver jusqu'à la 5<sup>ième</sup> harmonique.

- ▶  $G_1 = G_2 = 10$  et  $f_{cH} \cong 40$  kHz
- ▶  $B_1 = B_2 = \frac{1}{G} = 0,1$  ou  $B_1 = B_2 = \frac{1}{1+G} = 0,091$
- ▶  $f_{TA} \geq 400$  kHz ou  $f_{TA} \geq 440$  kHz
- ▶ Ce critère AOp est valable pour bon nombre d'AOp car même pour les AOp bas de gamme  $f_{TA}$  est autour de 1MHz.  
Ex: LM358,  $f_{TA} = 1,1$  MHz et coûte ~0,5€ pour 2 AOp dedans.



# Exercices

Calculez la fonction de transfert et esquissez le diagramme de Bode des montages suivants. Puis ajoutez l'effet de limite en fréquence. Considérez  $C=1\mu\text{F}$ ,  $R_1=1\text{k}$ , avec  $R_2 = 1\text{k}$ ,  $10\text{k}$  puis  $100\text{k}$ .



# Synthèse

- ▶ Analyse en **AC** -> effet de la **fréquence** ( $\omega$  ou  $f$ )
- ▶ Loi d'Ohm en AC :  $\mathbf{U}(\omega) = \mathbf{Z}(\omega) \mathbf{I}(\omega)$
- ▶ **Aop non-idéal** => **limite en fréquence**

$$T_{réelle} = T_{idéale} \frac{1}{1+jf/f_{CT}} \text{ avec } f_{CT} = B f_{TA} \text{ et } B = \left( \frac{-v_d}{v_o} \right)_{\text{à } v_i=0}$$

- ▶ **B** est le taux de **contre-réaction**, il est  $\leq 1$  et **inversement proportionnel au gain**
- ▶  **$f_{TA}$**  est une **constante, propre à l'Aop**, équivalent à la **bande passante à gain unitaire** (pour un montage suiveur où  $B = 1 = B_{max}$ )
- ▶ **Compromis gain – bande passante**