



Electronique des Systèmes d'acquisition et de calcul

ELEC101 - ESAC: Amplification

Institut Mines Telecom
Année scolaire 2023-2024





Outline

Introduction

Amplificateur Elementaire

Source d'erreur et métrique d'évaluation



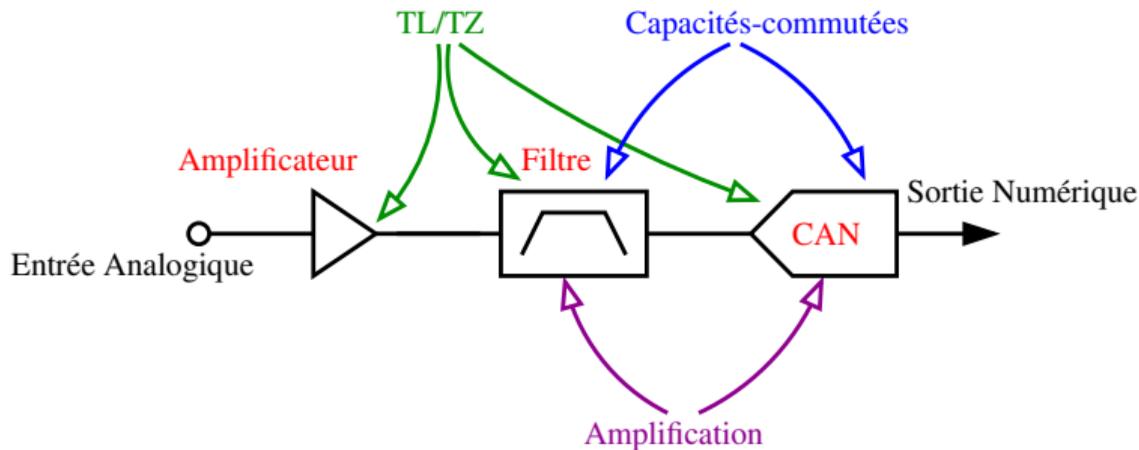
Outline

Introduction

Amplificateur Elementaire

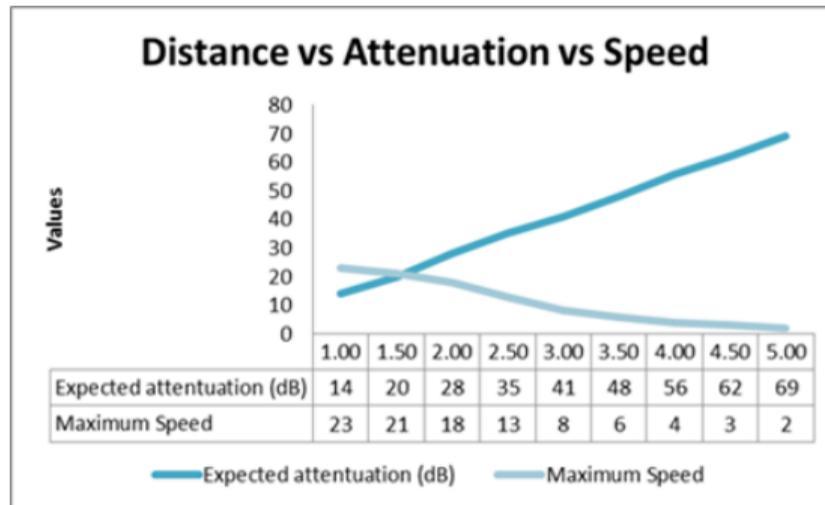
Source d'erreur et métrique d'évaluation

Les amplificateurs ça sert à quoi



- Les amplificateurs sont nécessaires pour amplifier les signaux de faible amplitude
- Les amplificateurs sont aussi nécessaires pour créer les fonctions de base dans les filtres et les CANs

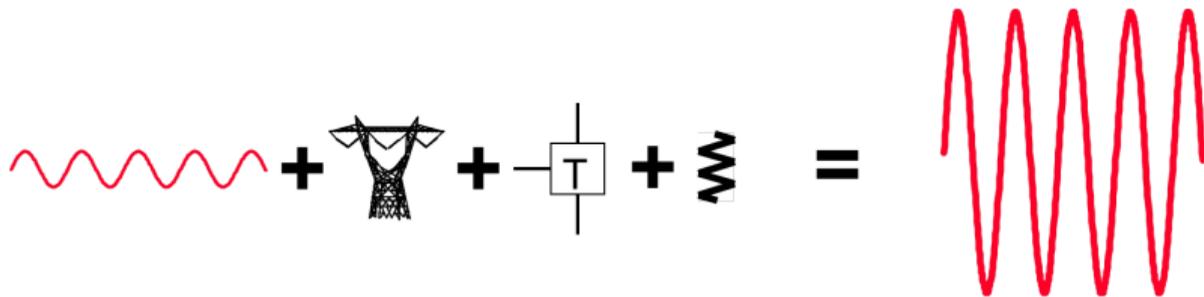
Les amplificateurs ça sert à quoi



69 dB d'atténuation à 5 kms

Un signal émis de 1 V arrive au niveau du récepteur avec une amplitude 0.36 mV

Amplification : les ingrédients



Pour réaliser une amplification en tension, l'approche classique nécessite :

- Une source d'alimentation (une pile, un redresseur ...)
- Un modulateur tension/courant (transistor)
- Une charge qui convertit le courant en tension (résistance, inductance, un autre transistor ...)



Outline

Introduction

Amplificateur Elementaire

Source d'erreur et métrique d'évaluation

Amplicateur Idéal

Pour une source de courant idéal avec :

$$I_T = g_m V_e$$

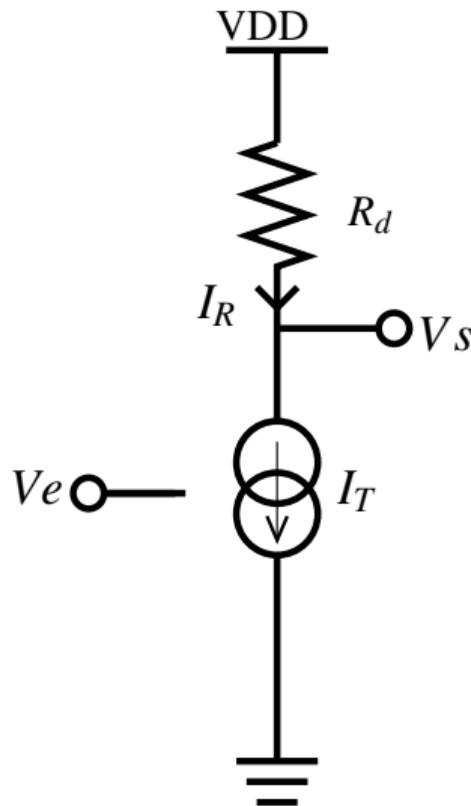
V_s est donnée par

$$V_s = VDD - R_d \cdot I_T$$

$$V_s = VDD - R_d \cdot g_m \cdot V_e$$

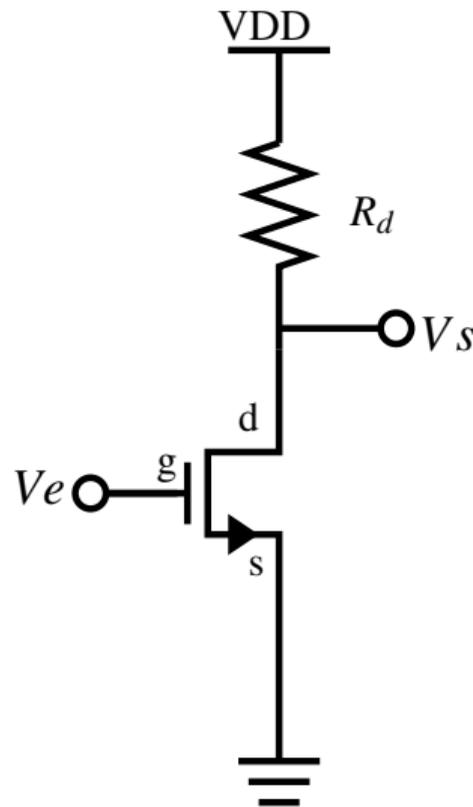
Et donc le gain de cette architecture est donné par :

$$A = \frac{\partial V_s}{\partial V_e} = -R_d \cdot g_m$$

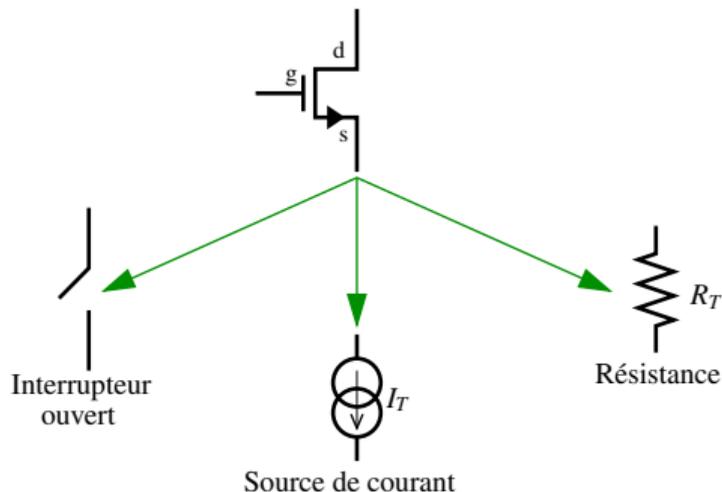


Amplificateur Réel

- En pratique, nous n'avons pas de composant permettant de réaliser une source de courant linéaire
- Le composant qui s'en rapproche le plus est le transistor
- Mais il ne se comporte pas toujours en source de courant et la source de courant réalisée n'est pas linéaire



Transistor NMOS



- Interrupteur ouvert pour $V_{gs} < V_T$ où V_T est la tension de seuil du transistor
- Source de courant pour $(V_{gs} > V_T)$ & $(V_{ds} > V_{gs} - V_T)$ avec $I_T = K(V_{gs} - V_T)^2$
- Résistance pour $(V_{gs} > V_T)$ & $(V_{ds} < V_{gs} - V_T)$ avec $R_T = \frac{K'}{V_{gs} - V_T}$

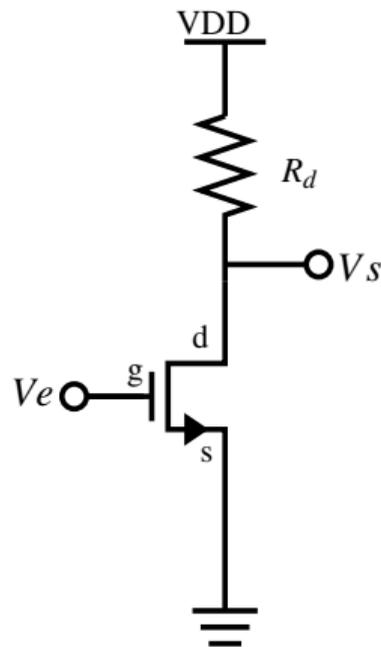
Amplificateur Réel

Pour un transistor NMOS :

$$I_T = K(V_e - V_T)^2$$

V_S est alors donnée par

$$V_S = VDD - R_d K (V_e - V_T)^2$$



Problème

La relation entre V_S et V_e est quadratique

Analyse statique - Fonction de transfert

Zone 1 :

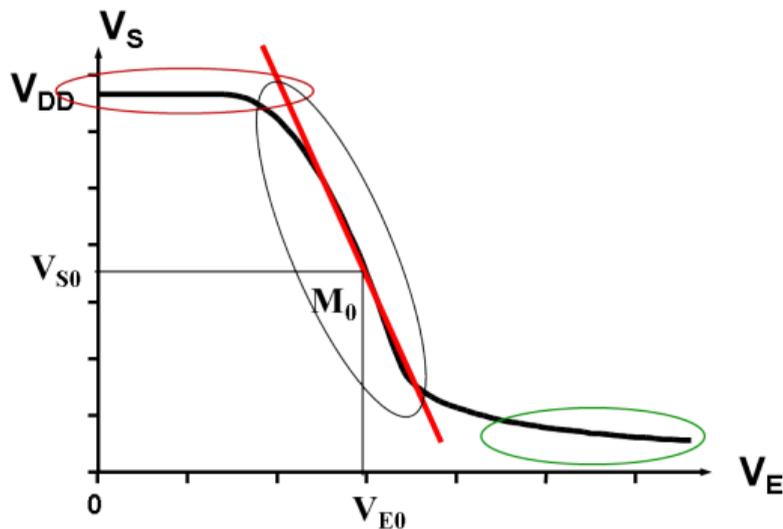
Interrupteur ouvert

Zone 2 :

Source de courant

Zone 3 :

Résistance

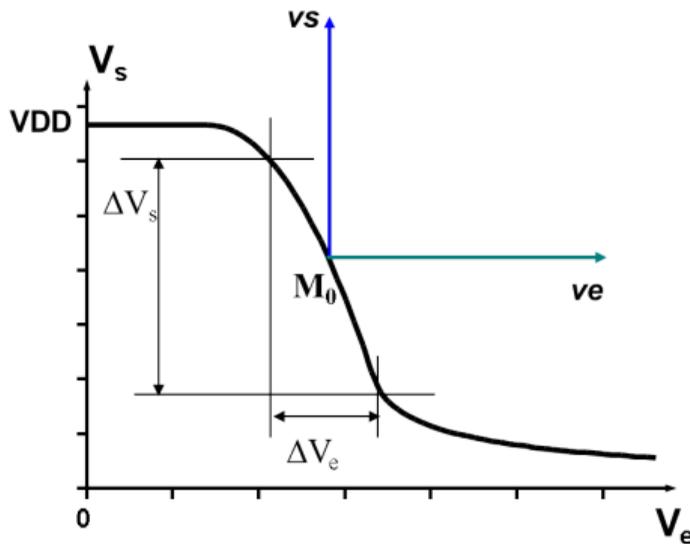


Au tour du point M_0 , on peut définir v_e et v_s

$$v_e = V_e - V_{E0} ; v_s = V_s - V_{S0}$$

$v_s \simeq A \cdot v_e \implies A$ est la pente de tangente autour de M_0

Dynamique d'entrée et sortie



- La dynamique d'entrée ΔV_e est la plage d'entrée autour de V_{E0} sur laquelle la caractéristique $V_s = f(V_e)$ peut être approximée linéaire.
- La dynamique de sortie ΔV_s est la plage de sortie autour de V_{S0} correspondante à ΔV_e .

Analyse petit signal

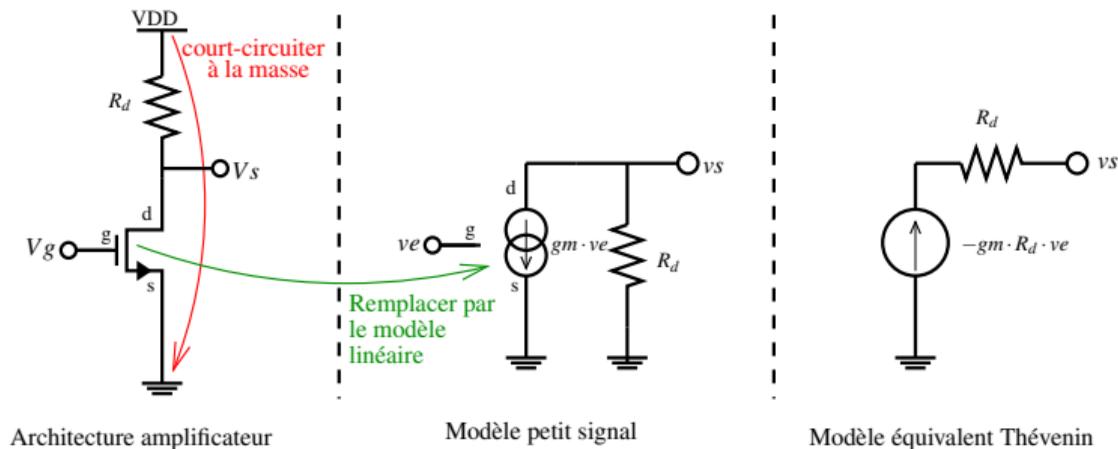
Analyse petit signal

L'analyse petit signal consiste à étudier le comportement d'un circuit en réponse à des signaux infiniment petit autour du point de fonctionnement. Elle permet de déterminer rapidement certaines caractéristiques d'une architecture. (gain, impédances d'entrée/sortie, fréquence de coupure ...)

Pour réaliser une analyse petit signal,

- Linéariser tous les éléments non linéaires du circuit, le transistor sera remplacé par une source linéaire $i_t = gm \cdot v_e$
- Court-circuiter toutes les tensions non-concernées par l'analyse notamment les tensions continues (Alimentation, polarisation) à la masse.

Modèle petit signal de l'amplificateur



En analysant le modèle petit signal, on facilement trouver le gain de l'amplificateur

$$v_s = -g_m \cdot R_d \cdot v_e \implies A = -g_m \cdot R_d$$

Réponse en fréquence de l'amplificateur

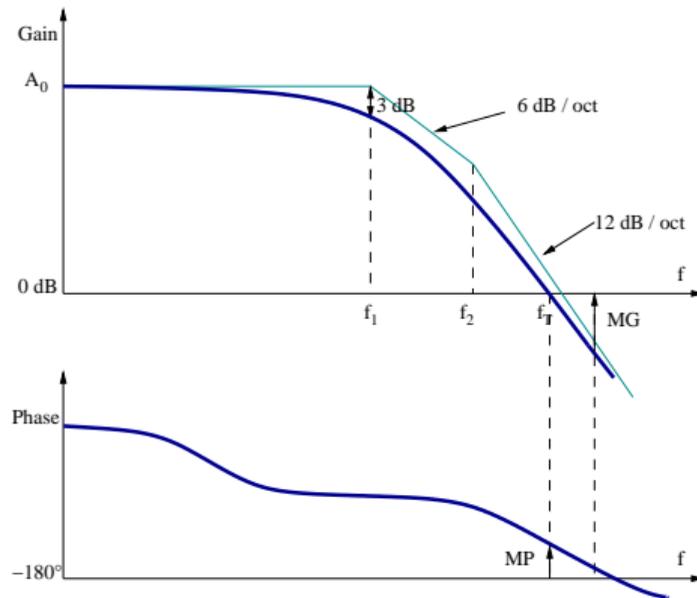
Fonction de transfert

$$A(j\omega) = \frac{V_s(j\omega)}{V_e(j\omega)}$$

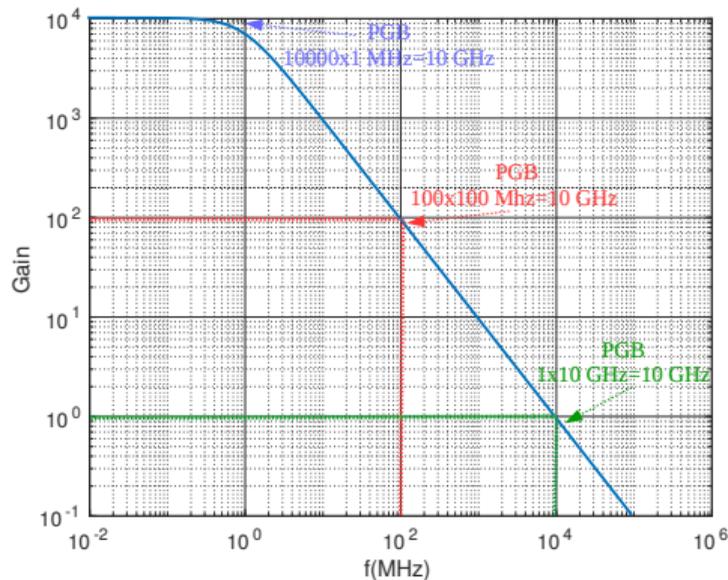
La fréquence de transition f_T correspond à $A(f_T)=1$ ou 0 dB.

Le produit gain bande

$$PGB = A_0 \cdot f_c$$



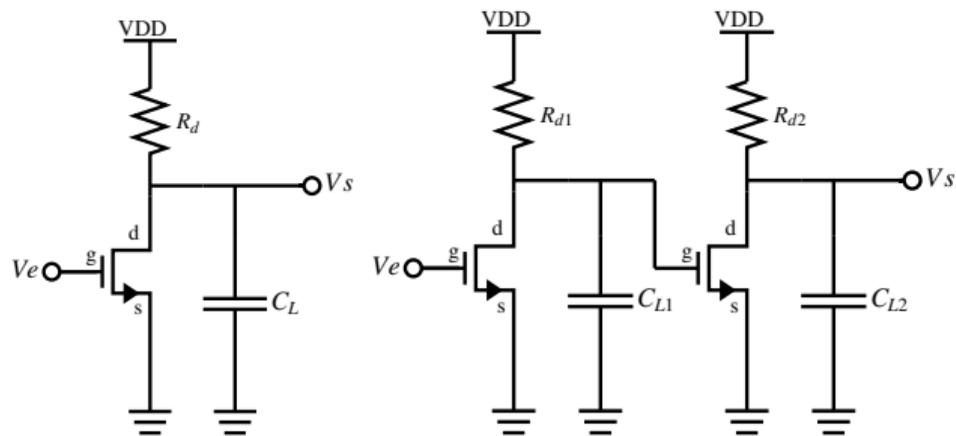
Conservation du produit gain bande



$$A(j2\pi f) = A_0 \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

$$\text{Pour } f \gg f_c \quad \underbrace{|A(f_T)|}_1 \cdot f_T \simeq A_0 \cdot f_c \implies f_T \simeq A_0 \cdot f_c$$

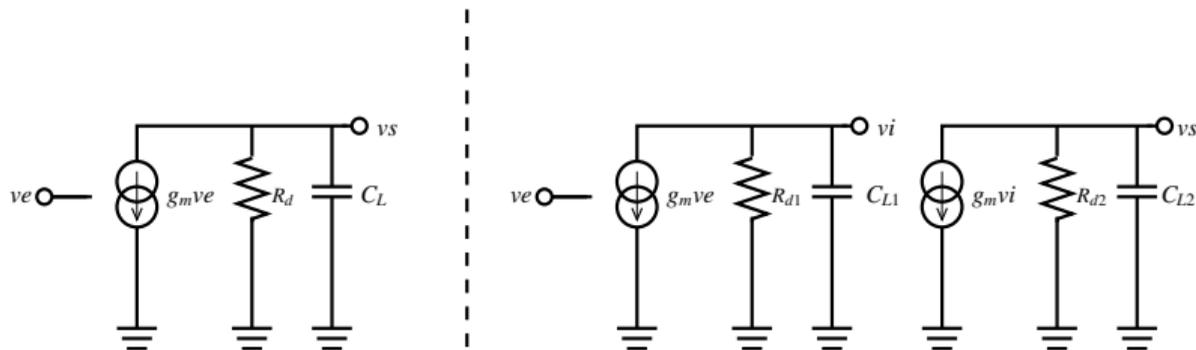
Exercice



- Déterminer la fonction de transfert du montage 1-étage
- Déterminer la fonction de transfert du montage 2-étages
- Quelles sont les conditions sur R_{d1} , R_{d2} , C_{L1} et C_{L2} qui permettent de garantir la stabilité de l'amplificateur 2 étages.

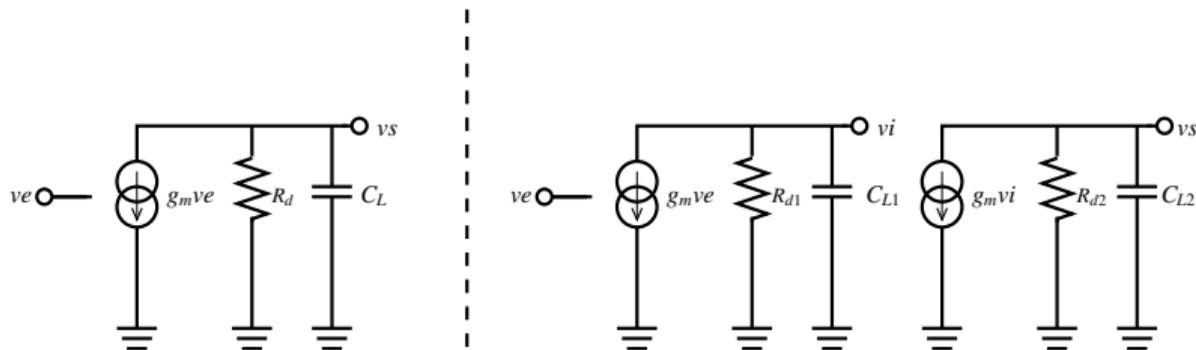
Solution -Exo1

1-Le montage petit signal est illustré ci -dessous à gauche



Solution -Exo1

1-Le montage petit signal est illustré ci -dessous à gauche



$$G_{1-et}(p) = \frac{-g_m \cdot R_d}{R_d \cdot C_L \cdot p + 1}$$

Solution -Exo1

2- Pour calculer la réponse fréquentielle, il suffit de passer dans le domaine de Fourier

$$|G_1(\omega)| = \frac{g_m \cdot R_d}{\sqrt{1 + R_d^2 \cdot C_L^2 \cdot \omega^2}}$$

Filtrage passe bas. Gain-DC-1 et $R_d \cdot g_m = 30$

Solution -Exo1

2- Pour calculer la réponse fréquentielle, il suffit de passer dans le domaine de Fourier

$$|G_1(\omega)| = \frac{g_m \cdot R_d}{\sqrt{1 + R_d^2 \cdot C_L^2 \cdot \omega^2}}$$

Filtrage passe bas. Gain-DC-1 et $= R_d \cdot g_m = 30$

3- Le gain total est la multiplication des 2 réponses

$$G_{tot}(p) = \frac{g_m^2 \cdot R_{d1} \cdot R_{d2}}{R_{d1} \cdot R_{d2} \cdot C_{L1} \cdot C_{L2} \cdot p^2 + (R_{d1} \cdot C_{L1} + R_{d2} \cdot C_{L2})p + 1}$$

Gain-DC-2 et $= R_1 \cdot R_2 \cdot g_m^2 = 900$

Solution -Exo1

2- Pour calculer la réponse fréquentielle, il suffit de passer dans le domaine de Fourier

$$|G_1(\omega)| = \frac{g_m \cdot R_d}{\sqrt{1 + R_d^2 \cdot C_L^2 \cdot \omega^2}}$$

Filtrage passe bas. Gain-DC-1 et $= R_d \cdot g_m = 30$

3- Le gain total est la multiplication des 2 réponses

$$G_{tot}(p) = \frac{g_m^2 \cdot R_{d1} \cdot R_{d2}}{R_{d1} \cdot R_{d2} \cdot C_{L1} \cdot C_{L2} \cdot p^2 + (R_{d1} \cdot C_{L1} + R_{d2} \cdot C_{L2})p + 1}$$

Gain-DC-2 et $= R_1 \cdot R_2 \cdot g_m^2 = 900$

4- 2 pôles : $-\frac{1}{R_{d1} \cdot C_{L1}}$ et $-\frac{1}{R_{d2} \cdot C_{L2}}$.

Les 2 sont réels et négatifs pour toutes valeurs de R_{d1} , R_{d2} , C_{L1} et C_{L2} .

Donc l'amplificateur est toujours stable



Outline

Introduction

Amplificateur Elementaire

Source d'erreur et métrique d'évaluation

Source d'erreur

La précision des amplificateurs (et de tous les systèmes électroniques) est dégradée par deux sources principales :

- Le bruit modélisé par un signal aléatoire ajouté au signal utile
 - Bruit blanc : Densité Spectrale de Puissance (DSP) constante ou uniforme
 - Bruit coloré : DSP non uniforme
- Les distorsions sont des erreurs dont l'amplitude dépend du signal d'entrée
 - Distorsion linéaire assimilable à du filtrage
 - Distorsion non linéaire

■ Bruits blancs :

- Bruit thermique dû à l'agitation des porteurs dans les résistances et transistors
- Bruit de quantification
- Bruit de phase qui cause la gigue d'horloge ou *jitter*

■ Bruits colorés

- Bruit de scintillement, *Flicker noise* ou bruit $1/f$
- Pop corn noise

Distorsions non linéaires

Les causes des distorsions non linéaires sont diverses :

- Saturation
- Interférence entre symbole
- Désappariements des composants ou *mismatch*

Les non-linéarités causent :

- Une dégradation de la résolution
- L'apparition de nouvelles composantes dans le spectre aux multiples de la fréquence d'entrée.

Distorsion non linéaires

Une modélisation plus réaliste d'un amplificateur est donné par un polynôme non-linéaire

$$V_{s-rl} = \alpha + \beta \cdot V_e + \gamma \cdot V_e^2,$$

Pour une entrée sinusoïdale $V_e = Amp \cdot \cos(\omega t)$, la sortie est donnée par

$$V_{s-rl} = \underbrace{\alpha + \frac{\gamma \cdot Amp^2}{2}}_{V_0} + \underbrace{\beta \cdot Amp}_{V_1} \cdot \cos(\omega t) + \underbrace{\frac{\gamma \cdot Amp^2}{2}}_{V_2} \cdot \cos(2\omega t)$$

On ainsi constater que les distorsions engendrent l'apparition de nouvelles composantes aux multiples de la fréquence d'entrée

Métriques principales

Le rapport Signal à Bruit SNR permet d'évaluer les dégradations dues au bruit :

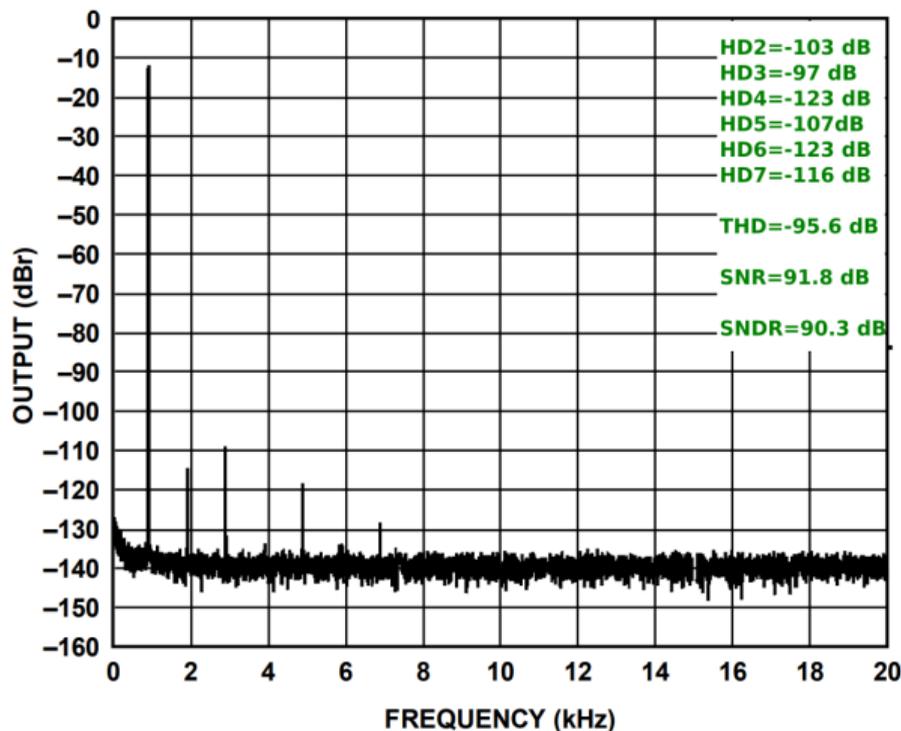
$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{Bruit}} \right)$$

Le SNDR ou SINAD (*Signal to noise and distortion ratio*) permet d'évaluer les dégradations dues aux 2

$$SNDR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{Signal}}{P_{Bruit} + P_{Distorsion}} \right)$$

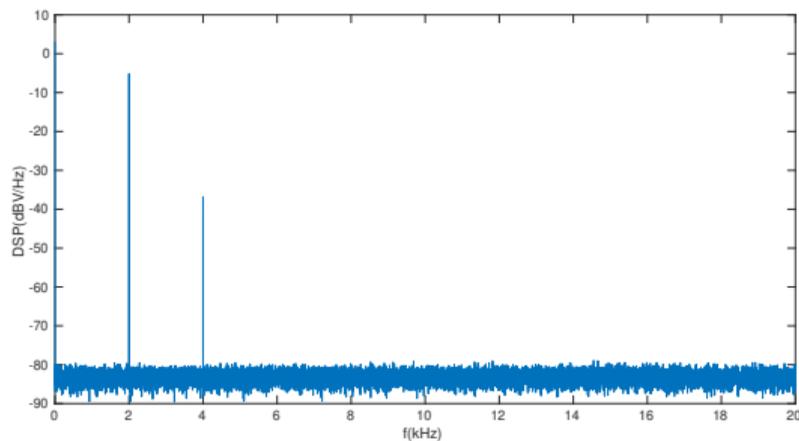
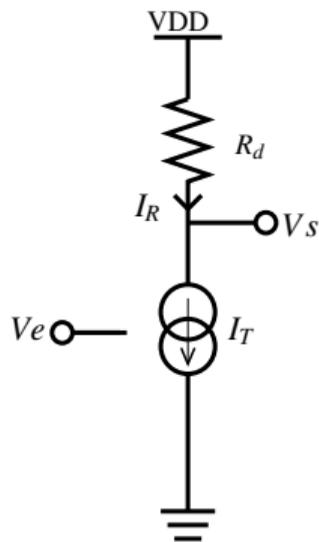
$$SNDR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Pour une sinusoïde} \quad \overbrace{\frac{V_1^2}{2}}}{\frac{1}{2}(V_2^2 + V_3^2 + \dots) + V_{rms-bruit}^2} \right)$$

Spectre amplificateur



Spectre de sortie de l'amplificateur Audio ADAU1592

Exercice 2



- Déterminer l'expression linéarisée du signal de sortie V_S
- Calculer le gain, la puissance du signal utile en sortie ainsi que celle de la deuxième harmonique.
- Calculer le SNR et du SNDR pour $A=0.1$ et $A=0.01$ V.

Solution Exo 2

1- Selon la loi des mailles, nous avons :

$$V_s = V_{dd} - RI_T$$

En remplaçant l'expression de I_T dans cette équation, nous obtenons :

$$V_s = V_{dd} - RK(V_e - V_T)^2$$

Solution Exo 2

1- Selon la loi des mailles, nous avons :

$$V_s = V_{dd} - RI_T$$

En remplaçant l'expression de I_T dans cette équation, nous obtenons :

$$V_s = V_{dd} - RK(V_e - V_T)^2$$

Si le signal d'entrée $V_e = B + A \cos(\omega t)$, alors V_s devient

$$V_s = V_{dd} - RK(B - V_T + A \cos(\omega t))^2$$

Solution Exo 2

1- Selon la loi des mailles, nous avons :

$$V_s = V_{dd} - RI_T$$

En remplaçant l'expression de I_T dans cette équation, nous obtenons :

$$V_s = V_{dd} - RK(V_e - V_T)^2$$

Si le signal d'entrée $V_e = B + A \cos(\omega t)$, alors V_s devient

$$V_s = V_{dd} - RK(B - V_T + A \cos(\omega t))^2$$

$$V_s = V_{dd} - RK(B - V_T)^2 - 2KRA(B - V_T) \cos(\omega t) - KRA^2 \cos^2(\omega t)$$

$$V_s = \alpha_0 + \alpha_1 \cos(\omega t) + \alpha_2 \cos(2\omega t)$$

Avec $\alpha_0 = V_{dd} - RK(B - V_T)^2 - RK \frac{A^2}{2}$, $\alpha_1 = -2KRA(B - V_T)$, $\alpha_2 = -RK \frac{A^2}{2}$.

Solution Exo 2

2-Le gain de l'amplificateur est donné par :

$$G = \left| \frac{\alpha_1}{A} \right| = 2KR(B - V_T)$$

La puissance d'une sinusoïde est donnée par $\frac{\text{Amplitude}^2_{\text{crete}}}{2}$.

$$P_S = \frac{G^2 A^2}{2}$$

La puissance de la deuxième harmonique est donnée par

$$P_{\text{harm2}} = \frac{\alpha_2^2}{2} = R^2 K^2 \frac{A^4}{8}$$

A. N.

$$G = 9,5, P_S = 0,45 \text{ V}^2 \text{ et } P_{\text{harm2}} = 3,12510^{-4} \text{ V}^2$$

SNDR, SNR, THD vs A

La puissance du bruit est donnée par

$$P_B = DSP \cdot Bande = 5 \cdot 10^{-9} \times 20000 = 10^{-4} \text{ V}^2$$

$$P_S = \frac{G^2 A^2}{2}$$

Donc le SNR et SNDR sont donnés par

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_B} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{G^2 A^2}{2}}{P_B} \right)$$

$$SNDR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_B + P_{D2}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{G^2 A^2}{2}}{P_B + P_{D2}} \right)$$

A. N.

pour $A = 0,1 \text{ V}$, $P_S = 0,45 \text{ V}^2$, $P_{D2} = 3,125 \cdot 10^{-4} \text{ V}^2$, $SNR = 36,5 \text{ dB}$, $SNDR = 30,4 \text{ dB}$

pour $A = 0,01 \text{ V}$, $P_S = 0,0045 \text{ V}^2$, $P_{D2} = 3,125 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2$, $SNR = 16,5 \text{ dB}$,

$SNDR = 16,5 \text{ dB}$

Merci pour votre attention

Questions ?