



OPTO-ELECTRONIQUE

Travaux Pratiques

Caractériser un système linéaire

Bloc 2

Année universitaire 2024-2025

Caractérisation d'un système linéaire

A l'issue des séances de TP et de TD concernant le bloc 2, les étudiant·es seront capables de **caractériser un système linéaire** dans les domaines temporel et fréquentiel.

Les sujets de TD ne sont pas inclus dans ce document.

Pour cela, ils-elles devront être capable de :

- Calculer une fonction de transfert
 - Tracer l'allure d'une réponse en fréquence RF (balayage)
 - Tracer un digramme de Bode en gain à l'aide : :
 - d'un oscilloscope
 - d'un dB mètre
 - Mesurer un déphasage
 - Tracer une réponse indicielle
 - Modéliser un système à partir d'une réponse en fréquence ou d'une réponse indicielle
-

Liste des missions

- Mission 2.1** Tracer la réponse en fréquence d'un montage amplificateur inverseur et déterminer ses limites
- Mission 2.2** Mesurer la bande-passante d'un montage linéaire
- Mission 2.3** Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence
- Mission 2.4** Mesurer l'écart de phase entre deux signaux
- Mission 2.5** Tracer la réponse indicielle d'un système
-

Liste des autres ressources

- Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré (ALI)
- Fiche : ALI / Modèle
- Fiche : Régime Harmonique
- Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 1

Mission 2.1 / Tracer la réponse en fréquence d'un montage amplificateur inverseur et déterminer ses limites

Durée conseillée : 90 min / Séance 1

Objectif de la mission

On se propose de **caractériser en fréquence** un montage à amplificateur linéaire intégré de type inverseur, c'est à dire de **tracer la loi mathématique** qui lie le gain du montage à la fréquence du signal injecté.

Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- **Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré**
- **Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré / Modèle**
- **Fiche : Régime Harmonique**
- **Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 1**

Amplificateur Linéaire Intégré

Les **amplificateurs linéaires intégrés** (ALI) ou **amplificateurs opérationnels** (AOP) sont des composants actifs très largement utilisés dans le domaine de l'électronique pour **amplifier et mettre en forme** les signaux provenant de capteurs.

Nous allons étudier ici les deux principales limitations d'un ALI (ou circuit à AOP) en régime linéaire :

- la **bande passante** qui est la limitation en fréquence du circuit à ALI ;
- le **slew-rate** ou vitesse de balayage maximale (voir **paragraphe sur le slew-rate**).

→ **Q** Rechercher, dans la documentation technique du composant TL081, les valeurs du *slew-rate* et de la bande passante pour un gain unitaire (notée aussi produit "gain × bande passante", GBW).

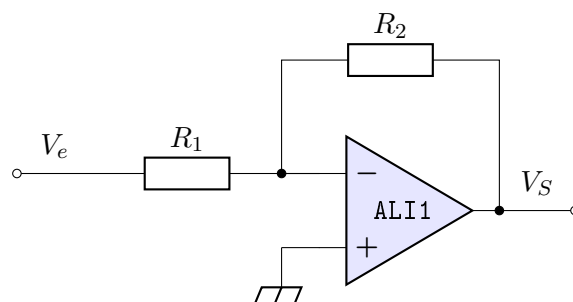
Montage amplificateur inverseur

On se propose d'étudier le montage suivant. *Tous les potentiels sont référencés par rapport à la masse.*

La fonction de transfert de ce montage, en supposant l'ALI idéal, est la suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

→ **Q** Quelles valeurs de résistances choisir pour obtenir un gain de 25 dB ? *La somme des résistances doit être comprise entre 10 kΩ et 50 kΩ.*



Alimentation symétrique

Certains composants, notamment les amplificateurs linéaires intégrés, sont capables de traiter des différences de potentiel positives et négatives. Pour cela, il est nécessaire de les alimenter de manière symétrique, c'est-à-dire, avec deux sources de tension fournissant des tensions opposées, souvent notées **+VCC**, pour l'alimentation positive, et **-VCC**, pour l'alimentation négative.

Vous pouvez vous aider du tutoriel suivant : **Générer des tensions stabilisées** (dans la rubrique *Démarche et méthodes* de la MInE).

→ **Q** A partir de la documentation technique, noter le câblage du composant TL081 et les tensions d'alimentation maximales.

→ **M** Réaliser une alimentation symétrique $+10\text{V} / -10\text{V}$ à partir des alimentations stabilisées disponibles et de mettre en place un système de contrôle de ces tensions.

Réponse en fréquence de ce montage

→ **M** Réaliser le montage précédent et alimenter le avec l'alimentation symétrique réalisée.

→ **M** Tracer le diagramme de Bode en gain de ce système pour des fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz, à l'aide de mesure réalisée à l'oscilloscope.

Vous pouvez vous aider des tutoriels suivants : **Tracer le diagramme de Bode d'un circuit** (Partie *Procédure "classique"*) et **Visualiser un signal à l'oscilloscope** (dans la rubrique *Démarche et méthodes* de la MInE).

→ **M** Mesurer le *slew-rate* de l'ALI.

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- les protocoles de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- un schéma de câblage de l'alimentation symétrique (et une photo)
- les tableaux de mesures et les courbes obtenues

Une **analyse** du résultat obtenu.

Validation

Les missions 2.1 et 2.2 doivent être validées par un·e encadrant·e lors de la séance 1 (ou 2).

Vous présenterez les résultats obtenus ainsi que l'ensemble des documents que vous avez rédigé (cahier de manipulation, courbes...) pour ces deux missions **à la fin de la mission 2.2**.

Autre ressource

A propos du *slew-rate* Le *slew-rate* est une limite d'utilisation des ALI en **régime linéaire**. Cette limitation se traduit par une déformation du signal de sortie comme illustrée par la figure 1.

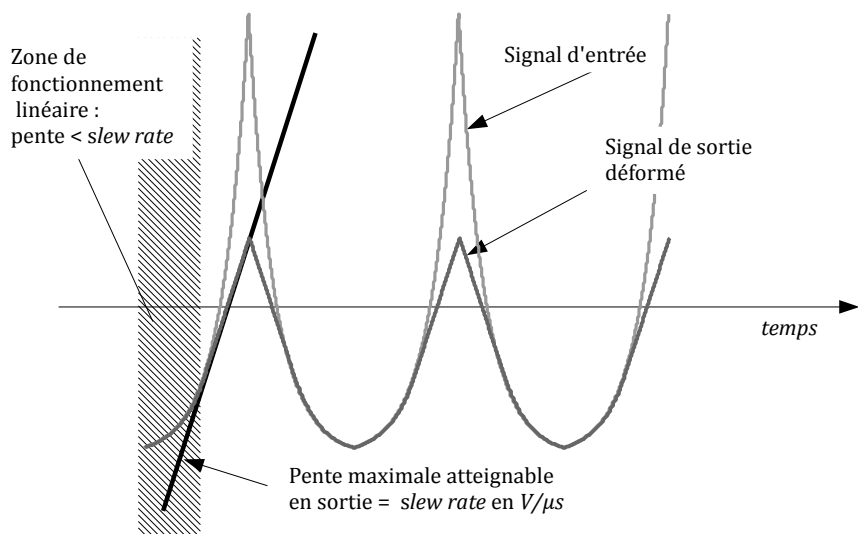


FIGURE 1 – Illustration de la déformation due à la limitation du slew-rate, pour un montage suiveur (gain unitaire)

Le *slew-rate*, SR, est donc quantifié par la pente maximale en V/μs que la tension de sortie peut atteindre.

$$SR = \max \left(\frac{dV_s}{dt} \right)$$

Attention aux conditions de mesures, en particulier, toujours s'assurer que le signal n'est pas déformé par le *slew-rate* lorsqu'on mesure la bande passante !

Mission 2.2 / Mesurer la bande-passante d'un montage linéaire

Durée conseillée : 30 min / Séance 1

Objectif de la mission

On se propose de **mesurer précisément la bande-passante** d'un montage à amplificateur linéaire intégré de type inverseur (voir montage en Mission 2.1).

Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- [Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré / Modèle](#)
- [Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 1](#)

Bande-passante d'un montage

La **bande-passante** est un **paramètre crucial** pour évaluer et concevoir des systèmes électroniques, des filtres, des amplificateurs et des circuits de communication.

Elle est définie comme l'**intervalle de fréquences** pour lequel le système peut **transmettre des signaux avec une atténuation minimale**.

D'une autre façon, c'est la gamme de fréquences dans laquelle l'amplitude de la réponse en fréquence du système reste au-dessus d'un certain seuil par rapport à sa valeur maximale.

Pour les systèmes linéaires et les filtres, la bande-passante est souvent mesurée entre les points où la puissance du signal de sortie est **réduite de 3dB** par rapport à la puissance du signal de sortie dans la bande-passante.

Cette réduction de 3dB peut aussi être interprétée comme une diminution de l'amplitude du signal d'un facteur $\sqrt{2}$ par rapport à l'amplitude du signal de sortie dans la bande-passante.

Travail à réaliser

- M Faire la mesure précise de la bande-passante du montage.
- M Faire la mesure précise de la bande-passante du montage pour un rapport $\frac{R_2}{R_1}$ dix fois plus faible.

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- le protocole de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- la valeur de la bande-passante d'un montage amplificateur inverseur (voir montage Mission 2.1).

Une **analyse** des résultats obtenus et l'impact du gain sur la bande-passante globale du montage.

Validation - voir mission 2.1

Mission 2.3 / Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence

Durée conseillée : 60 min / Séance 2

Objectif de la mission

On se propose de **tracer rapidement l'allure** de la réponse en fréquence d'un montage à amplificateur linéaire intégré de type inverseur (voir montage en Mission 2.1) et de montrer l'impact du gain du montage sur la bande-passante.

Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- **Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré / Modèle**
- **Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 1**

Réponse en fréquence de ce montage

- **M** Reprendre le montage de la mission 2.1.
- **M** Tracer l'allure rapide de la réponse en fréquence en gain de ce système pour des fréquences allant de 100 Hz à 1 MHz et pour différentes valeurs de rapport $\frac{R_2}{R_1}$.

- **M** Relever à l'aide du *marqueur en fréquence* les valeurs approchées de la fréquence de coupure.

Vous pouvez vous aider des tutoriels suivants : **Tracer le diagramme de Bode d'un circuit** (Partie *Allure "rapide"*) et **Visualiser un signal à l'oscilloscope** (dans la rubrique *Démarche et méthodes* de la MInE).

La somme des résistances $R_1 + R_2$ doit être comprise entre 10 k Ω et 50 k Ω .

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- le protocole de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- des captures d'écran de l'oscilloscope pour divers rapport $\frac{R_2}{R_1}$ contenant une mesure approchée de la fréquence de coupure

Une **analyse** du résultat obtenu et un bilan sur l'impact du gain du montage sur la bande-passante.

Mission 2.4 / Mesurer l'écart de phase entre deux signaux

Durée conseillée : 30 min / Séance 2

Objectif de la mission

On se propose de **mesurer la phase** séparant deux signaux électriques à l'aide de l'oscilloscope.
On reprendra le montage de la Mission 2.1.

Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- [Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré / Modèle](#)
- [Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 1](#)

Déphasage

En régime harmonique (à même fréquence), deux ondes sinusoïdales peuvent avoir des phases initiales différentes.

Soient $u_1(t) = A_1 \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_1)$ et $u_2(t) = A_2 \cdot \sin(2\pi ft + \varphi_2)$, le déphasage de l'une par rapport à l'autre à l'instant t vaut : $\Delta\varphi = (2\pi ft + \varphi_2) - (2\pi ft + \varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1$

Si $\Delta\varphi$ est positif, l'onde 2 est en avance de phase par rapport à l'onde 1. Sinon, l'onde 2 est en retard de phase par rapport à l'onde 1.

Phase et ordre d'un filtre

Lorsqu'on étudie des systèmes linéaires de type filtre, il est intéressant de relever le déphasage entre le signal de sortie et le signal d'entrée pour différents points remarquables :

- à la fréquence caractéristique du système, le déphasage est égal à $k \cdot \pi/2$ où k est un entier correspondant à l'ordre du filtre
- loin de cette fréquence caractéristique (au moins une décade avant et après), pour vérifier le caractère inverseur d'un système par exemple.

Travail à réaliser

→ **M** Mesurer l'écart de phase entre les signaux V_S et V_e pour des fréquences égales à $f_c/10$, f_c et $10f_c$ (où f_c est la fréquence caractéristique du système).

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

- le protocole de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- les mesures des phases

Une **analyse** du résultat obtenu.

Mission 2.5 / Tracer la réponse indicielle d'un système

Durée conseillée : 60 min / Séance 3 ou 4

Objectif de la mission

On se propose de **tracer la réponse indicielle** d'un montage et de montrer l'impact du gain du montage sur le temps de réponse du montage.

On reprendra le montage de la Mission 2.1.

Ressources

Vous pouvez utiliser les fiches résumées suivantes :

- **Fiche : Amplificateur Linéaire Intégré / Modèle**
- **Fiche : Analyse Harmonique / Ordre 1**

Réponse indicielle

La réponse indicielle fournit des informations essentielles sur les **caractéristiques dynamiques** d'un système.

Elle est aussi appelée **réponse à un échelon** unitaire. Elle correspond à la sortie d'un système lorsqu'un signal de type échelon est appliqué en entrée.

Un échelon unitaire est une fonction qui passe de 0 à 1 à un instant donné, généralement considéré à $t = 0$.

Elle permet d'analyser le comportement transitoire et le comportement à l'état stable d'un système. Par exemple, on peut observer le temps de montée, le temps de stabilisation, le dépassement (ordre supérieur à 2), et l'erreur en régime permanent.

Lien avec la réponse impulsionnelle et la réponse en fréquence

La réponse indicielle est liée à la réponse impulsionnelle $h(t)$ d'un système par la relation suivante :

$$u_S(t) = \int_0^t h(x) dx$$

Cela signifie que la réponse indicielle est l'intégrale de la réponse impulsionnelle.

On rappelle également que la réponse en fréquence, que l'on peut modéliser par la fonction de transfert d'un circuit en fonction de la fréquence $H(j\omega)$ est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle $h(t)$.

Travail à réaliser

→ **M** Tracer la réponse indicielle du système et relever le temps de réponse à 95% pour différentes valeurs de rapport $\frac{R_2}{R_1}$.

La somme des résistances $R_1 + R_2$ doit être comprise entre 10 k Ω et 50 k Ω .

Livrables

Une **fiche de manipulation** en ligne (partagée dans le cahier de laboratoire) rappelant :

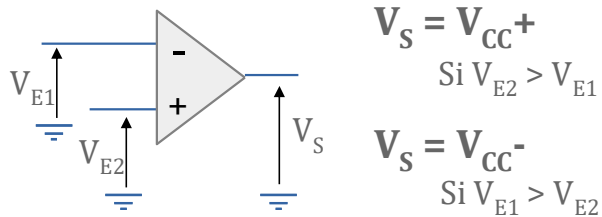
- le protocole de mesure et de réglage (schémas de mesure, de câblage)
- les mesures du temps de réponse à 95%
- les captures d'écran de l'oscilloscope pour les différentes réponses indicielles

Une **analyse** du résultat obtenu.

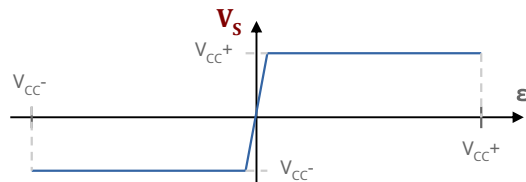
Amplificateur Linéaire Intégré / Principe et montages de base

MODE NON-LINÉAIRE

COMPARATEUR SIMPLE



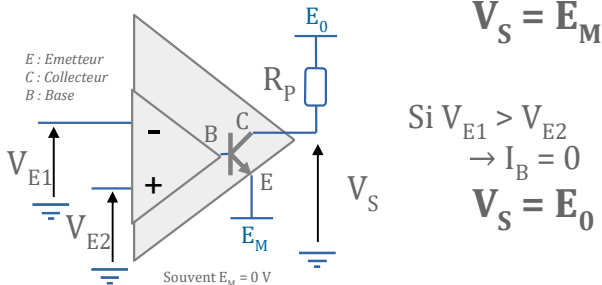
Caractéristique $V_S = f(\epsilon)$ avec $\epsilon = V_+ - V_-$



COLLECTEUR OUVERT / ÉMETTEUR OUVERT

Comparateur associé à un transistor

T :
 I_B : courant entrant dans la base
 I_C : courant entrant dans le collecteur
 \rightarrow si $I_B > 0$ alors $I_C > 0$, T = interrupteur fermé
 \rightarrow sinon $I_C = 0$, T = interrupteur ouvert



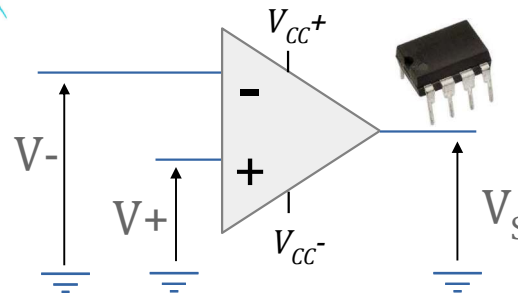
COMPOSANTS

- LM311 : asymétrique, CO, EO
- LM339 : asymétrique, CO, 4 comparateurs

NON

CONTRE-RÉACTION
NÉGATIVE ??

OUI



FONCTION DE TRANSFERT

$$V_S = A \cdot (V_+ - V_-)$$

avec $10^5 < A < 10^7$
 Saturation à $V_S = V_{CC+}$

CARACTÉRISTIQUES

- Slew Rate (SR) en V/μs
- Produit **Gain Bande Passante** en MHz
 $G \cdot BP = \text{constante}$
- Puissance** dissipable en W
- Courant maximal** en sortie en A

ALIMENTATION

- Symétrique** : $V_{CC+} = +U$ et $V_{CC-} = -U$
- Asymétrique** : $V_{CC+} = +U$ et $V_{CC-} = 0 \text{ V}$
 • avec $3 \text{ V} < U < 18 \text{ V}$

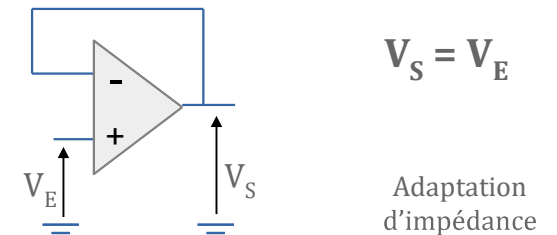
CHECK-LIST PRATIQUE

- Vérifier les alimentations
- Vérifier le signal d'entrée $V_{CC-} < V_E < V_{CC+}$
- Vérifier que $V_+ = V_-$ si mode linéaire
- Vérifier la tension de sortie, si $V_S = V_{CC+}$ ou V_{CC-}
 - modifier la tension d'entrée
 - modifier le gain du montage

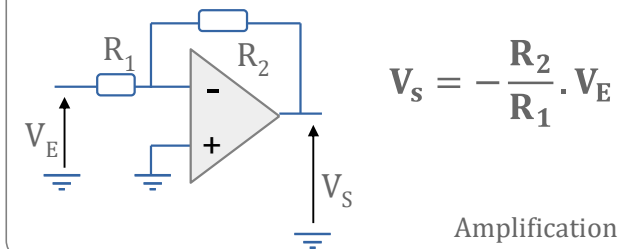
MODE LINÉAIRE

$$V_- = V_+$$

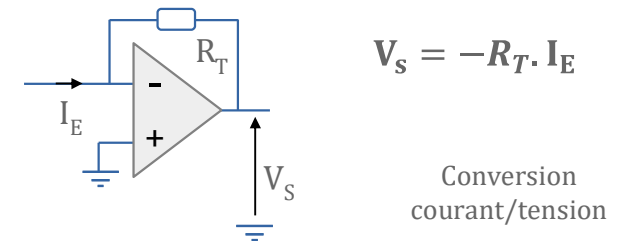
SUIVEUR



INVERSEUR



TRANSIMPEDANCE



COMPOSANTS

- TL071 / TL081 : symétrique, GBP = 3 MHz
- TL082 / TL084 = 2 x TL081 / 4 x TL081
- TLE2072 : symétrique, GBP = 9 MHz
- LM358 : asymétrique, GBP = 1 MHz

MODÈLE DU PREMIER ORDRE

LIMITATION EN FRÉQUENCE

Les **amplificateurs linéaires intégrés**, comme beaucoup d'autres composants, ont un comportement fréquentiel non constant.

Ils se comportent comme un **filtre de type passe-bas**, que l'on peut modéliser par un **système du premier ordre**.

NB : la **limitation en tension de l'amplitude du signal de sortie** est toujours effective, elle dépend de la tension d'alimentation.

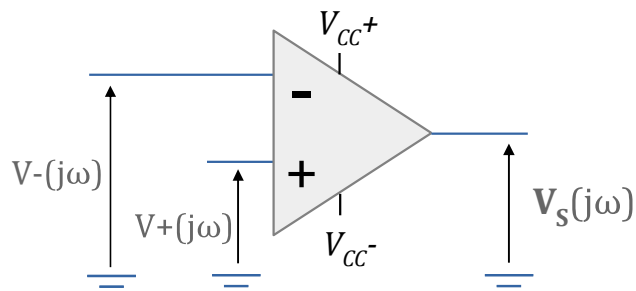
Le paramètre important à prendre en compte est le **gain unitaire**, aussi appelé **produit gain - bande-passante**.

Ce paramètre est donné en **Hz** et il est **constant**.

Exemple pour un produit gain - bande-passante GBW = 3 MHz

- pour une amplification de 1 du système, la bande-passante du système sera de 3 MHz (3 MHz / 1)
- pour une amplification de 1000 du système, la bande-passante du système sera de 3 kHz (3 MHz / 1000)

FONCTION DE TRANSFERT



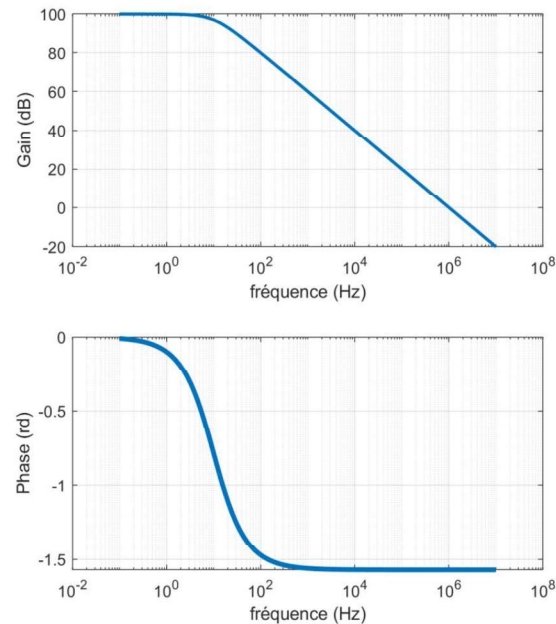
$$V_S(j\omega) = A(j\omega) \cdot [V_+(j\omega) - V_-(j\omega)]$$

$$\text{Où } \underline{A}(j\omega) = \frac{A_v}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}$$

A_v : amplification différentielle

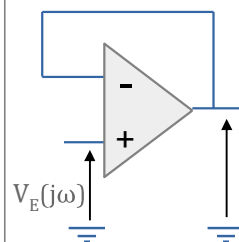
$$\omega_c = \text{GBW} / A_v$$

RÉPONSE EN FRÉQUENCE



Exemple d'un ALI ayant un produit gain - bande-passante GBW = 1 MHz et une amplification différentielle de 10^5

FONCTION DE TRANSFERT EN SUIVEUR



A partir de l'équation ci-contre, on obtient pour ce circuit (suiveur) :

$$V_S(j\omega) = A(j\omega) \cdot [V_E(j\omega) - V_S(j\omega)]$$

On obtient la fonction de transfert suivante :

$$T(j\omega) = \frac{V_S(j\omega)}{V_E(j\omega)} = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega)}$$

REBOUCLAGE

INTÉRÊT DU REBOUCLAGE / SUIVEUR

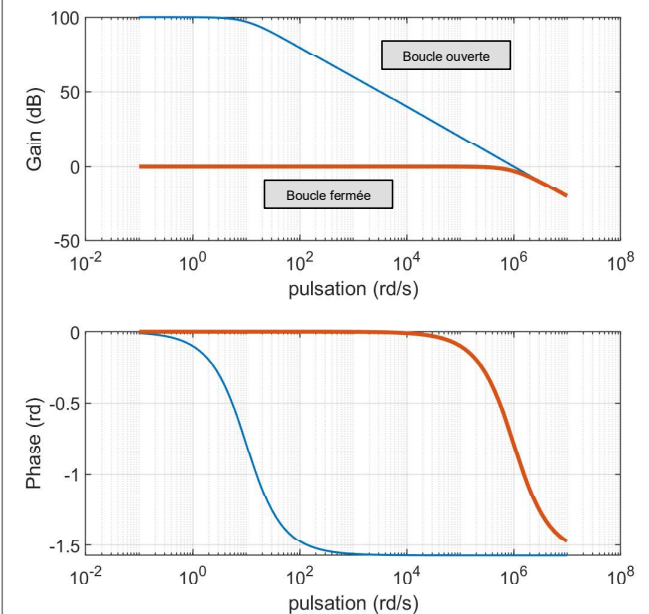
Le fait de **reboucler un système**, ou de le fermer, c'est-à-dire réinjecter une image de la valeur de sortie sur l'une de ses entrées (ici l'entrée négative), permet de **modifier son comportement fréquentiel**.

Un **ALI non rebouclé** a un **gain important** (minimum 100 dB) mais une **bande-passante très faible** (de l'ordre de la dizaine de Hz). *Ce fort gain entraîne malheureusement une saturation de la sortie assez rapidement.*

Un **ALI rebouclé** a une **meilleure bande-passante** (produit gain fois bande-passante constant) mais un **gain plus faible**.

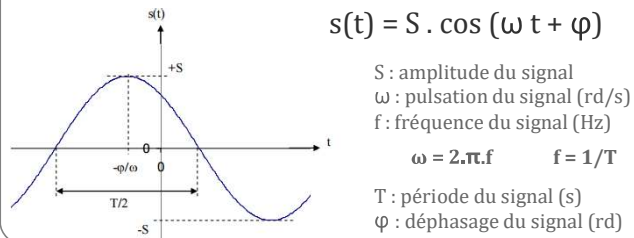
RÉPONSE EN FRÉQUENCE

Exemple d'un ALI ayant un produit gain - bande-passante GBW = 1 MHz et une amplification différentielle de 10^5 (identique ci-contre) et le rebouclage en mode suiveur.

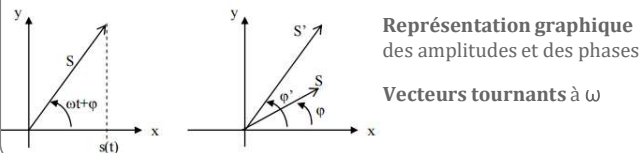


Régime Harmonique

REPRÉSENTATION TEMPORELLE



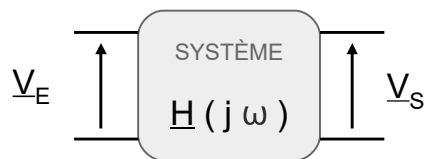
REPRÉSENTATION DE FRESNEL



En régime harmonique, linéaire, invariant, tous les signaux évoluent à la même pulsation ω

Pour des signaux plus élaborés, on décompose en somme de signaux sinusoïdaux, par application du théorème de superposition

FONCTION DE TRANSFERT



Un système peut être caractérisé par sa **réponse en fréquence**, qu'on appelle aussi **fonction de transfert** $H(j\omega)$

$$V_S(j\omega) = H(j\omega) \cdot V_E(j\omega) \quad \leftarrow \text{TF}$$

$$v_S(t) = h(t) * v_E(t) \quad \leftarrow \text{convolution}$$

Par application de la transformée de Fourier inverse, on obtient la **réponse impulsionnelle** du système notée $h(t)$

RÉPONSE IMPULSIONNELLE

REPRÉSENTATION COMPLEXE

$s_1(t) = S \cdot \cos(\omega t + \varphi)$
 Projection sur y : $s_2(t) = S \cdot \sin(\omega t + \varphi)$
 On pose : $s(t) = s_1(t) + j \cdot s_2(t)$ avec : $j^2 = -1$
 On a alors : $s(t) = S \cdot \exp(j(\omega t + \varphi))$
 $s(t) = S \cdot \exp(j\varphi) \cdot \exp(j\omega t)$
 $s(t) = \underline{S} \cdot \exp(j\omega t)$
AMPLITUDE COMPLEXE
 ne dépendant pas du temps

ANALYSE HARMONIQUE = COMPOURTEMENT FRÉQUENTIEL

IMPÉDANCE COMPLEXE

En régime harmonique : $v(t)$ et $i(t)$ ont la même pulsation

Ainsi :

$$\frac{v(t)}{i(t)} = \frac{V}{I} = Z$$

DIPÔLES LINÉAIRES

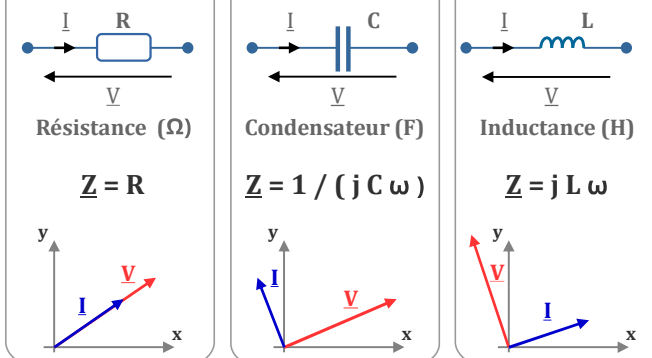


DIAGRAMME DE BODE

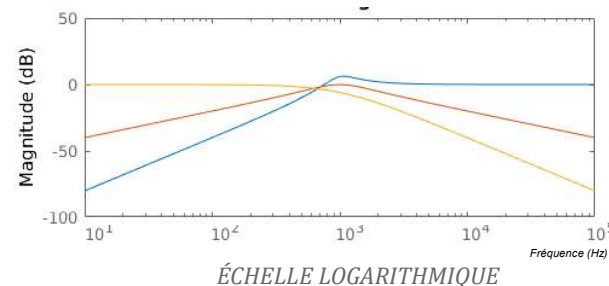
Un **diagramme de Bode** est une représentation graphique de l'évolution en fonction de la fréquence :

- du **gain de la fonction de transfert**, noté $G_{dB}(j\omega)$

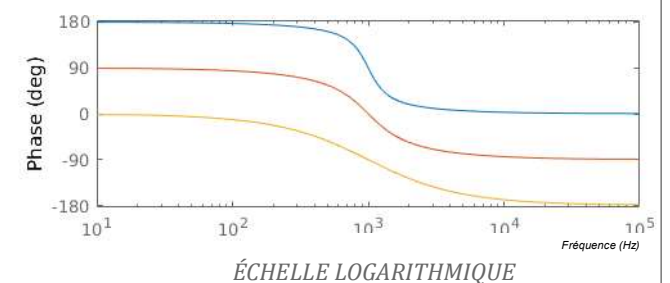
$$G_{dB}(j\omega) = 20 \cdot \log(|H(j\omega)|)$$

- de la **phase de la fonction de transfert**, notée $\arg(H(j\omega))$

GAIN EN DECIBEL

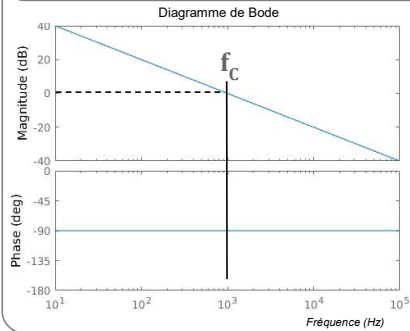


PHASE



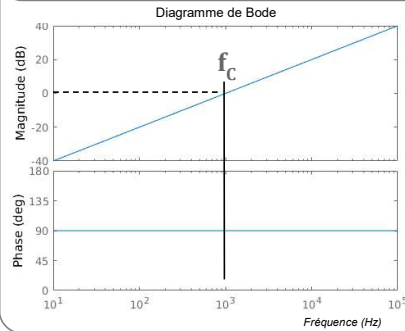
Filtrage / Analyse harmonique / Ordre 1

INTÉGRATEUR PARFAIT



$$\underline{T}(j\omega) = \frac{1}{j\omega\omega_c}$$

DÉRIVATEUR PARFAIT



$$\underline{T}(j\omega) = \frac{j\omega}{\omega_c}$$

MISE EN SÉRIE / CASCADE

EXEMPLE

$$\underline{T}(j\omega) = K \cdot \frac{1 + j\omega/\omega_{c1}}{1 + j\omega/\omega_{c2}}$$

PASSAGE EN DECIBEL

$$T_{dB} = 20 \cdot \log(|\underline{T}(j\omega)|)$$

$$= 20 \cdot \log(|1 + j\omega/\omega_{c1}|)$$

Modèle Dérivateur réel

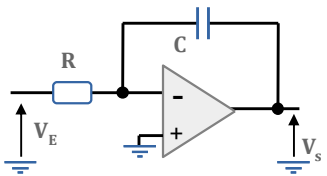
$$+ 20 \cdot \log(1 / |1 + j\omega/\omega_{c2}|)$$

Modèle Intégrateur réel

$$+ 20 \cdot \log(|K|)$$

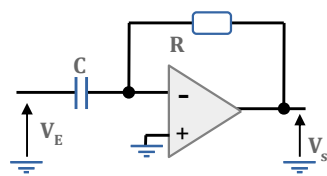
Gain Constant

EN PRATIQUE



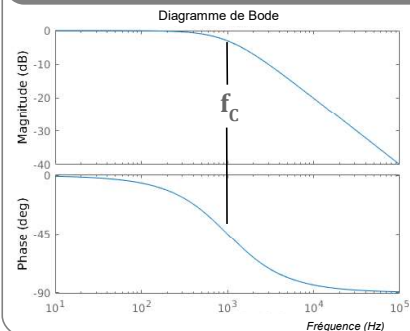
$$\omega_c = 1 / R \cdot C$$

EN PRATIQUE



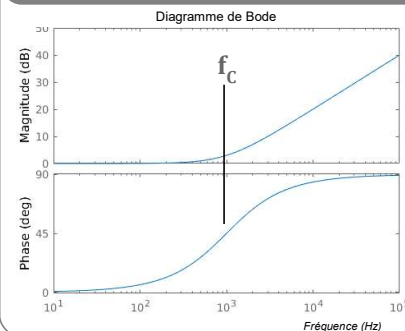
$$\omega_c = 1 / R \cdot C$$

INTÉGRATEUR RÉEL



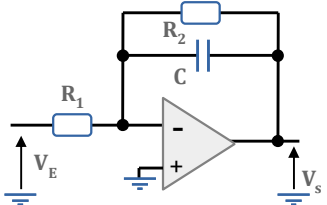
$$\underline{T}(j\omega) = \frac{A}{1 + j\omega\omega_c}$$

DÉRIVATEUR RÉEL



$$\underline{T}(j\omega) = 1 + j\omega\omega_c$$

EN PRATIQUE



$$A = -R_2 / R_1$$

$$\omega_c = 1 / R_2 \cdot C$$

CHECK-LIST PRATIQUE

- Vérifier les **alimentations**
- Vérifier le **signal d'entrée** $V_{CC^-} < V_E < V_{CC^+}$
- Vérifier que **V+ = V-** (mode linéaire)
- Vérifier la **tension de sortie**,
 - → si $V_S = V_{CC^+}$ ou V_{CC^-} , modifier la tension d'entrée
- Vérifier le comportement **rapidement** par un **balayage en fréquence** du signal d'entrée (mode sweep)

DIAGRAMME DE BODE

