

ALI en régime linéaire

Électronique numérique

Ce bloc de révision aborde les montages à ALI, mais uniquement en régime linéaire. Même s'il est impossible de ne pas les évoquer ici, le comparateur à hystérésis et tous les montages à ALI en régime de saturation seront revus avec le bloc sur les oscillateurs électroniques.

Année	Chapitre		Ce qu'il faut réviser	Support	Prioritaire	😊
PT	10	ALI	Modèle de l'ALI de gain infini : courants de polarisation nuls, saturation en tension, savoir que $\epsilon = 0$ uniquement en régime linéaire mais non nul en saturation			
PT	10	ALI	Critère de fonctionnement linéaire : rétroaction sur la borne (-)			
PT	10	ALI	Exemples fondamentaux : suiveur, ampli non inverseur, ampli inverseur, intégrateur (Dfct de transfert au moins + reconnaître le montage au mieux)	Ex de cours	***	
PT	10	ALI	Étudier un montage à ALI en régime linéaire	TD ex 3, ex 5 + révisions ex 1	***	
PT	2	Élec numérique	Réplication de spectre lors de l'échantillonnage	TD ex 4		
PT	2	Élec numérique	Critère de Shannon	TD ex 4		

Plan de la fiche

I	Ressources en ligne	1
II	Rappels de cours	2
II.1	Régime linéaire vs. régime de saturation	2
II.2	Loi des nœuds en potentiel ou pont diviseur de tension ?	2
III	Questions de cours	3
IV	Pour compléter vos TD	3
1	Filtre actif amplificateur	3
2	Capacité réglable	4
V	Correction des exercices	4
1	Filtre actif amplificateur	4
2	Capacité réglable	5

I - Ressources en ligne

Scanner ou cliquer sur les QR-code pour accéder aux ressources.

- L'essentiel du cours sous forme de cartes mémo : cartes réalisées par Christophe Cayssiols.



Cartes utilisables pour ce bloc de révisions : toutes celles du bloc « ALI et rétroaction »

II - Rappels de cours

II.1 - Régime linéaire vs. régime de saturation

	Régime linéaire	Régime de saturation
Montage	Une unique rétroaction négative	Aucune rétroaction ; Une unique rétroaction positive
Ce que l'on sait	$\varepsilon = 0$	$v_s = \pm V_{\text{sat}}$
Ce que l'on cherche	Expression de v_s	Expression de ε
Outils d'étude	Représentation complexe ou temporelle	Représentation temporelle uniquement ; Disjonction de cas entre saturation haute et basse

Remarques diverses :

- ▷ dans le cas de montages à deux rétroactions, l'une positive et l'autre négative, on ne peut pas connaître a priori le régime de fonctionnement de l'ALI ;
- ▷ même avec une unique rétroaction négative, l'ALI peut fonctionner en régime de saturation si les signaux sont d'amplitude trop élevée : on a toujours $-V_{\text{sat}} \leq v_s \leq +V_{\text{sat}}$;
- ▷ lorsque c'est possible, il est généralement plus simple d'utiliser les représentations complexes que les représentations temporelles.

II.2 - Loi des nœuds en potentiel ou pont diviseur de tension ?

Lorsqu'elles sont écrites sans erreur (...), les deux méthodes de LNP et de pont diviseur sont équivalentes et conduisent au résultat. En revanche, la complexité du calcul peut parfois (mais pas toujours) fortement différer. Le choix de la méthode est guidé par la structure du montage. Illustrons-le sur deux exemples.

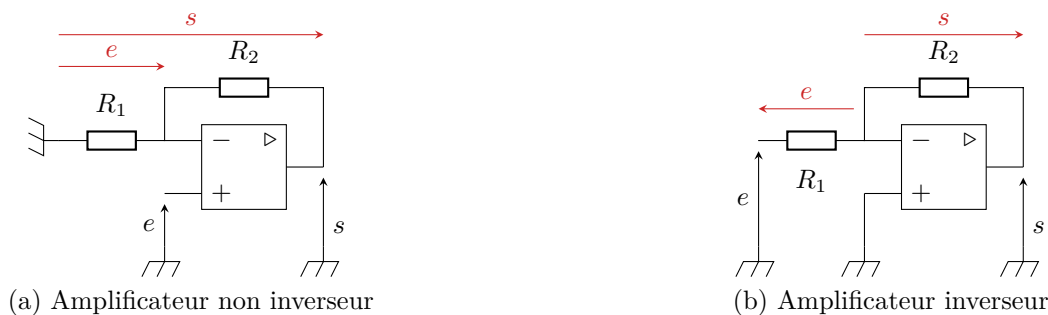


Figure 1 – Montages amplificateurs inverseur et non-inverseur.

Dans les deux montages, l'ALI fonctionne en régime linéaire, donc $v_- = v_+$.

- **Amplificateur non-inverseur** : les différentes positions de la masse dans le montage permettent de représenter s et e « sur une même ligne », en rouge sur la figure 1. La structure du pont diviseur apparaît clairement, d'où

$$\frac{e}{s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{d'où} \quad s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} e = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e.$$

Le même montage étudié par la loi des nœuds en potentiel appliquée à l'entrée \ominus de l'ALI donne

$$\frac{0 - e}{R_1} + \frac{s - e}{R_2} = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{s}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) e = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} e \quad \text{d'où} \quad s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e.$$

Ici, passer par un pont diviseur est un peu plus rapide et sans doute un peu moins risqué que la loi des nœuds en potentiel, mais elle demeure tout à fait efficace.

Plus généralement, « on voit bien que » le pont diviseur est efficace car la tension de sortie s est prise entre les deux extrémités du montage (sortie de l'ALI et masse) et la tension d'entrée e entre le centre du montage et une extrémité.

- **Amplificateur inverseur** : en représentant de même les tensions « sur une même ligne », on voit qu'il n'apparaît pas de structure de type pont diviseur mais que e et s sont directement des tensions aux bornes des résistances, qu'il est immédiat de relier aux intensités ... d'où l'intérêt de la loi des nœuds. Ainsi, le calcul par LNP s'écrit

$$\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2} = 0 \quad \text{d'où} \quad s = -\frac{R_2}{R_1} e.$$

Le même montage étudié par un pont diviseur donnerait

$$\frac{-e}{s-e} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \quad \text{soit} \quad -(R_1+R_2)e = R_1(s-e) \quad \text{et} \quad -R_1e - R_2e = R_1s - R_1e \quad \text{d'où} \quad s = -\frac{R_2}{R_1}e$$

Ici, opter pour la LNP est nettement plus rapide et plus simple que de passer par un pont diviseur.

Plus généralement, « on voit bien que » la LNP est plus efficace car les tensions de sortie s et e sont prises aux deux extrémités du montage alors que la tension au centre est connue.

• **Et si on n'est pas sûr ?** Mieux vaut alors passer par la LNP, mais en faisant très attention à exprimer de façon cohérente les tensions et les impédances des dipôles.

III - Questions de cours

1 - Rappeler les hypothèses du modèle d'ALI idéal de gain infini. Représenter sa caractéristique statique. Rappeler les ordres de grandeur de V_{sat} (tension de saturation) et I_{sat} (courant de saturation). Expérimentalement, comment distinguer une saturation en tension d'une saturation en courant ? Dans le cas d'un montage suiveur débitant dans une résistance R_0 , comment procéder expérimentalement pour observer une saturation en tension ? une saturation en courant ?

▮ **Note aux étudiants :** Une partie de cette question se rapporte au TP 9 « Premiers montages à ALI ».

2 - Établir la relation entrée-sortie du montage amplificateur non-inverseur OU amplificateur inverseur OU intégrateur idéal (= sans résistance en parallèle du condensateur). Même s'il serait mieux que les étudiants le connaissent, le montage pourra être rappelé par l'interrogateur si besoin.

3 - Établir et représenter le cycle du comparateur à hystérésis. Même s'il serait mieux que les étudiants le connaissent, le montage pourra être rappelé par l'interrogateur si besoin. J'ai traité en cours le cas du non-inverseur (entrée du montage sur R_1 , entrée \ominus de l'ALI à la masse).

4 - Sur un exemple donné par l'interrogateur, construire le spectre d'un signal échantillonné connaissant le spectre du signal analogique et la fréquence d'échantillonnage.

IV - Pour compléter vos TD

🔥🔥🔥 **Attention !** Tous ces exercices ne sont pas « à faire », concentrez-vous sur ce qui vous pose des difficultés.

Signification des pictogrammes :

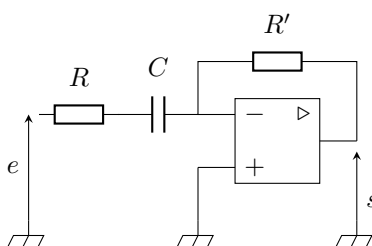
- 💡 Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
- ✂ Difficulté technique et calculatoire ;
- ⊗ Exercice important.

Je vous recommande de retravailler sérieusement des exercices divers et variés du TD recouvrant plusieurs aspects des montages à ALI, en particulier le cas des montages à plusieurs entrées et celui des simulateurs de dipôles dans lesquels la grandeur pertinente est l'impédance d'entrée plus que la relation entrée-sortie. Concrètement, les montages à ALI sont tellement importants en vue du concours que les exercices 1 à 6 du TD mériteraient tous d'être (re)faits, ainsi que les deux exercices complémentaires proposés ci-dessous.

Exercice 1 : Filtre actif amplificateur

[💡 2 | ✂ 2 | ⊗]

▮ Une exercice pas très compliqué, qui reprend les méthodes classiques sur les ALI en régime linéaire et les filtres. Vous devriez normalement le dévorer sans difficulté.



- 1 - Identifier sans calcul la nature du filtre ci-contre.
- 2 - Établir sa fonction de transfert sous forme canonique

$$\underline{H} = \frac{H_0}{1 - j\frac{\omega_c}{\omega}}$$

3 - On souhaite une pulsation de coupure $\omega_c = 1 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et un gain de 20 dB en haute fréquence. Déterminer

les valeurs à donner à R' et C pour $R = 1 \text{ k}\Omega$.

4 - Tracer le diagramme de Bode du filtre.

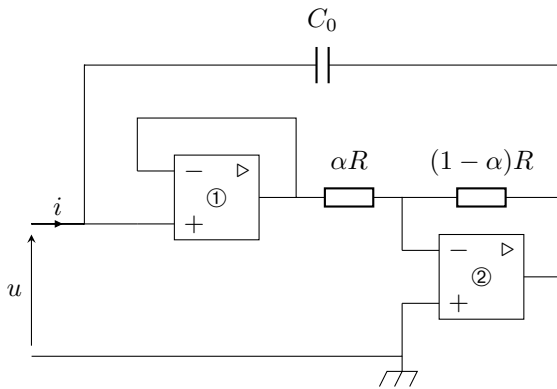
5 - On envoie en entrée du filtre une tension sinusoïdale $e(t) = E_0 \cos(\omega t)$. Donner l'allure de la tension de sortie et de son spectre dans les quatre cas suivants :

- ▷ $E_0 = 1 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ▷ $E_0 = 3 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;

- ▷ $E_0 = 1 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ▷ $E_0 = 3 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice 2 : Capacité réglable

[💡 2 | ✂ 1]



Les deux ALI du montage ci-contre fonctionnent en régime linéaire. Montrer que ce montage équivaut à un condensateur de capacité C que l'on exprimera en fonction de C_0 et α . Quel est son intérêt ?

V - Correction des exercices

Exercice 1 : Filtre actif amplificateur

[💡 2 | ✂ 2 | ⚡]

Le montage ne compte qu'une seule rétroaction négative, on fait donc l'hypothèse que l'ALI fonctionne en régime linéaire.

1 • **Dans la limite des basses fréquences** : Le condensateur équivaut à un interrupteur ouvert, et aucun courant ne peut traverser les résistances. Comme s est la tension aux bornes de R' on en déduit $s = 0$ c'est-à-dire que les basses fréquences sont **coupées**.

• **Dans la limite des hautes fréquences** : Le condensateur équivaut à un fil, le montage s'apparente alors à un amplificateur inverseur. On en déduit que les hautes fréquences sont **transmises**, et potentiellement amplifiées.

• **Conclusion** : le filtre est un passe-haut.

2 L'association R, C a pour impédance équivalente

$$\underline{Z} = R + \frac{1}{jC\omega}$$

D'après la loi des nœuds en potentiel appliquée à l'entrée \ominus de l'ALI avec $v_- = v_+ = 0$,

$$\frac{e - 0}{\underline{Z}} + \frac{s - 0}{R'} = 0$$

On en déduit

$$\underline{H} = \frac{s}{e} = -\frac{R'}{\underline{Z}} = -\frac{R'}{R + \frac{1}{jC\omega}} = \frac{-R'/R}{1 + \frac{1}{jRC\omega}}$$

On peut ainsi identifier à la forme canonique donnée,

$$\underline{H} = \frac{H_0}{1 - j\frac{\omega_c}{\omega}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} H_0 = -R'/R \\ \omega_c = 1/RC \end{cases}$$

3 La capacité doit valoir

$$C = \frac{1}{R\omega_c} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ F}$$

En haute fréquence, $\underline{H} \sim \underline{H}_0$. Ainsi, si le gain est de 20 dB alors

$$|\underline{H}_0| = \frac{R'}{R} = 10^{20/20} = 10 \quad \text{d'où} \quad \boxed{R' = 10 \text{ k}\Omega.}$$

4 Dans la limite des hautes fréquences, d'après la question précédente,

$$G_{\text{dB}} = 20 \log |\underline{H}_0| = 40 \text{ dB}.$$

Dans la limite des basses fréquences,

$$\underline{H} \sim \frac{\underline{H}_0}{-j \frac{\omega_c}{\omega}} = \frac{j\omega H_0}{\omega_c} \quad \text{soit} \quad G_{\text{dB}} = 20 \log |\underline{H}| = 20 \log \omega + 20 \log \frac{|\underline{H}_0|}{\omega_c}.$$

Comme toujours avec les filtres du premier ordre, les deux asymptotes se coupent en $\omega = \omega_c$. On en déduit le diagramme est représenté figure 2.

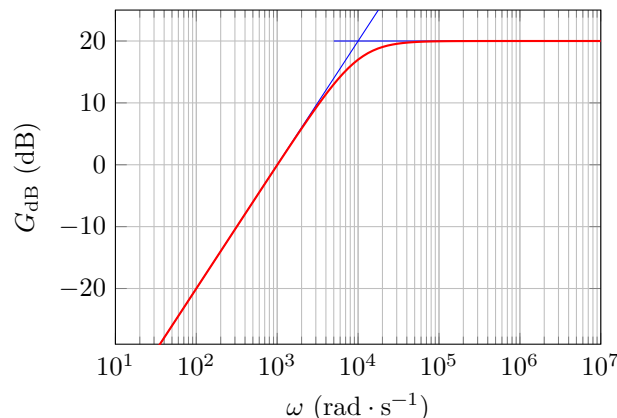


Figure 2 – Diagramme de Bode.

5 Le plus simple est de raisonner sur le diagramme de Bode, seul le dernier cas n'est pas évident.

- ▷ $E_0 = 1 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$: on calcule (ou on constate sur le diagramme) que $G_{\text{dB}} = -20 \text{ dB}$ donc $|\underline{H}| = 10^{-20/20} = 1/10$, le signal de sortie est donc sinusoïdal d'amplitude $E_0/10 = 0,1 \text{ V}$ et le spectre identique à celui de l'entrée, à l'amplitude près.
- ▷ $E_0 = 3 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$: de même, le signal de sortie est sinusoïdal d'amplitude $0,3 \text{ V}$.
- ▷ $E_0 = 1 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$: à cette pulsation, $G_{\text{dB}} = 20 \text{ dB}$ donc $|\underline{H}| = 10^{20/20} = 10$, le signal de sortie est donc sinusoïdal d'amplitude $10E_0 = 10 \text{ V}$.
- ▷ $E_0 = 3 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$: en reprenant le raisonnement précédent, le signal de sortie devrait avoir une amplitude de 30 V ... ce qui est impossible, car la tension de sortie doit rester inférieure à la tension de saturation de l'ALI. Le signal de sortie est donc un sinus écrété, qui conserve la valeur de $\pm 15 \text{ V}$ dès que l'ALI est en saturation. Cela se traduit par un enrichissement spectral : outre le fondamental à $1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, des harmoniques apparaissent dans le spectre à $2 \cdot 10^5, 3 \cdot 10^5, 4 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ etc. mais prévoir leur amplitude n'est pas simple.

Exercice 2 : Capacité réglable

[💡 2 | ✂ 1]

On veut montrer que le montage équivaut à un condensateur : ce n'est donc pas une fonction de transfert qui nous intéresse ici, mais l'impédance d'entrée du montage. Concrètement, on cherche donc à établir une relation entre i et u qui soit celle d'un condensateur, soit

$$u = \frac{1}{jC\omega} i.$$

On note v_1 et v_2 les tensions de sortie des deux ALI, qui fonctionnent tous les deux en régime linéaire. Le premier ALI est un suiveur donc $v_1 = u$. La LNP à l'entrée \ominus de l'ALI \otimes , combinée avec l'hypothèse de fonctionnement linéaire, donne

$$\frac{v_1 - 0}{\alpha R} + \frac{v_2 - 0}{(1 - \alpha R)} = 0 \quad \text{d'où} \quad v_2 = \frac{\alpha - 1}{\alpha} u.$$

Enfin, comme l'ALI ① est idéal, alors les courants de polarisation sont nuls. Le courant i est donc également celui qui traverse le condensateur. En convention récepteur, on a donc

$$i = jC_0\omega(u - v_2)$$

En remplaçant l'expression de v_2 ,

$$i = j\frac{C_0}{\alpha}\omega u \quad \text{d'où} \quad \boxed{C = \frac{C_0}{\alpha}}$$

L'intérêt du montage est qu'il est très simple de faire varier α (il suffit de faire tourner le curseur d'un potentiomètre) pour adapter la capacité à la volonté, ce qui est infiniment (et même plus!) plus simple que de changer le condensateur du montage.