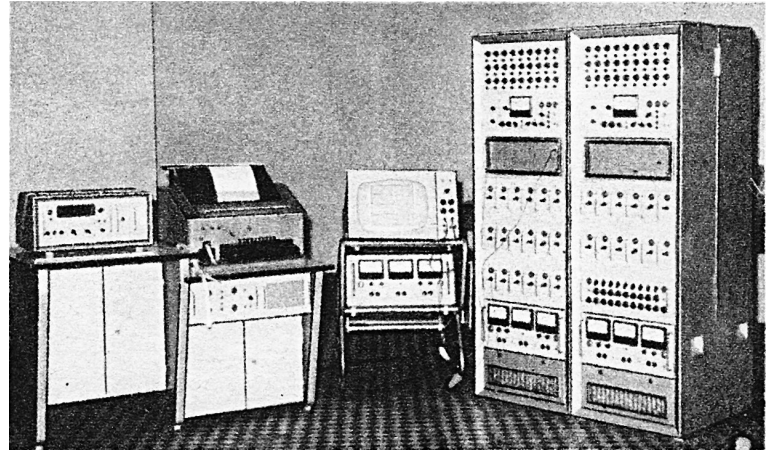




Thème I. Ondes et signaux (Électricité)

Chapitre n°9 Amplificateurs Linéaires Intégrés Filtres actifs – Complété

On doit le terme d'amplificateur opérationnel (Operational Amplifier en anglais) à John R. Ragazzini en 1947. L'invention originale vient d'un de ses étudiants, Loebe Julie. Les amplificateurs opérationnels ont été initialement développés à l'ère des tubes électroniques, ils étaient alors utilisés **dans les calculateurs analogiques**. Actuellement, les amplificateurs opérationnels sont disponibles sous forme de circuits intégrés.



Le calculateur analogique ELWAT

Le premier AOP disponible en grande série fut le K2-W de la société GAP/R en janvier 1953. À l'époque, le K2-W était vendu pour une vingtaine de dollars.



Le premier AOP intégré disponible en grande quantité, à la fin des années 1960, fut l'AOP bipolaire Fairchild $\mu A709$.

En six ans, le prix des AOP a été divisé par plus de cent tandis qu'ils sont de plus en plus performants, robustes et simples d'utilisation.

Le $\mu A741$ (amélioration du $\mu A709$) est encore fabriqué de nos jours et il est devenu omniprésent en électronique.

Les amplificateurs opérationnels sont disponibles sous des formats, brochages, et niveaux de tensions d'alimentation standardisés. Avec quelques composants externes, ils peuvent réaliser une **grande variété de fonctionnalités utiles en traitement du signal**. La plupart des AOP standard ne coûtent que quelques dizaines de centimes d'euro.



Pré-requis

- PCSI : Thème Ondes et signaux.
 - Chapitre n°7. Oscillateurs amortis en RSF
 - Chapitre n°8. Filtrage linéaire

Objectifs du chapitre

- Décrire les amplificateurs linéaires intégrés en fonctionnement linéaire.
- Étudier les montages de base utilisant un ALI.
- Déterminer les impédances d'entrée de ces montages.

Plan du cours

I Présentation de l'ALI	2	II.2.c) Impédance d'entrée et intérêt . . .	6
I.1 Présentation	2	II.3 Montage amplificateur non inverseur . . .	7
I.2 Régimes linéaire et de saturation	3	II.3.a) Montage	7
I.3 Modèle de l'ALI idéal	4	II.3.b) Relation entrée-sortie	7
I.4 Fonctionnement linéaire	4	II.3.c) Impédance d'entrée	8
II Différents montages	5	II.4 Montage amplificateur inverseur	8
II.1 Méthodes	5	II.4.a) Montage	8
II.1.a) Établir la relation entrée-sortie	5	II.4.b) Relation entrée-sortie	8
II.1.b) Impédance d'entrée	5	II.4.c) Impédance d'entrée	9
II.2 Montage suiveur	5	II.5 Montage intégrateur	10
II.2.a) Montage	5	II.5.a) Montage	10
II.2.b) Relation entrée-sortie	5	II.5.b) Relation entrée-sortie	10
		II.5.c) Impédance d'entrée	11
		III Filtre actif	12

Ai-je bien appris mon cours ?

- 1 – 😊 – 😞 – Donner le modèle de l'ALI idéal.
- 2 – 😊 – 😞 – Quelle relation a-t-on entre V^+ et V^- pour un ALI idéal en fonctionnement linéaire ?
- 3 – 😊 – 😞 – Sur quelle entrée doit se faire la rétroaction pour qu'un fonctionnement en régime linéaire soit possible ?
- 4 – 😊 – 😞 – Pour les montages suiveur, non inverseur, inverseur et intégrateur, établir la relation entrée-sortie.
- 5 – 😊 – 😞 – Pour chacun de ces montages, établir l'impédance d'entrée. Commenter sa valeur.
- 6 – 😊 – 😞 – Quel est l'intérêt d'une impédance d'entrée infinie ? Quand est-ce utile ?
- 7 – 😊 – 😞 – À quoi peut servir un montage suiveur alors que sa sortie est égale à l'entrée ?



I Présentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré

I.1 Présentation

Un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI) est un **amplificateur différentiel** : il **amplifie la différence de potentiel entre ses deux entrées** appelées entrée non inverseuse \oplus et entrée inverseuse \ominus .

C'est un quadripôle qui ne fonctionne que s'il est alimenté par une source de tension symétrique ± 15 V.

REMARQUES



On rencontre également le nom de « Amplificateur opérationnel », « AO », « AOp ». Ce sont les anciens noms utilisés dans les programmes avant 2013.

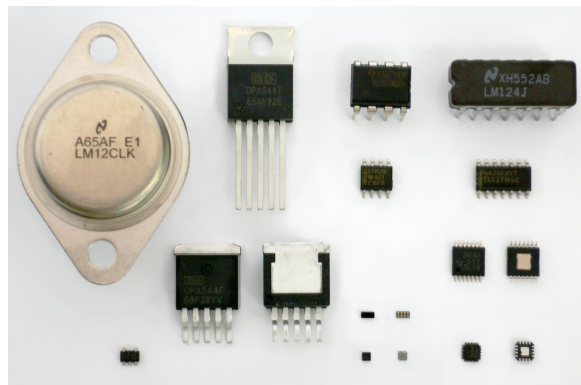
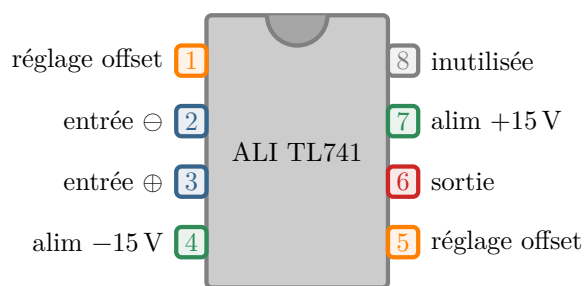


FIGURE 1 – ALI vu de l'extérieur

En TP, nos ALI sont déjà branchés sur des plaquettes sur lesquelles on n'accède qu'aux deux entrées et à la sortie, bornes qui sont clairement identifiées.

Un ALI est un circuit intégré, c'est-à-dire qu'il contient d'autres composants élémentaires. Nous l'étudierons en « boîte noire », sans faire référence à sa constitution interne.

♥ À retenir : Représentation conventionnelle d'un ALI

On ne représente que les deux entrées et la sortie.

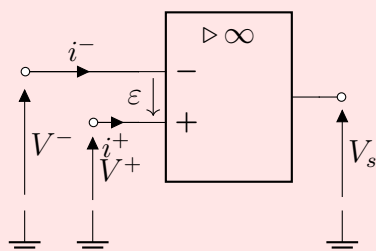


Schéma européen

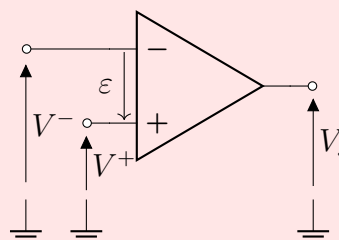


Schéma américain

L'ALI a **deux entrées** : l'**entrée inverseuse** ($-$), de potentiel V^- et l'**entrée non inverseuse** ($+$), de potentiel V^+ .

On définit la **tension différentielle en entrée** par : $\varepsilon = V^+ - V^-$

L'ALI a **une sortie**, dont on note le potentiel V_s .

Les courants entrant sont appelés **courants de polarisation** et valent $i^- \sim i^+ \sim 1 \text{ pA}$

⚠ Attention – Erreur à ne pas commettre

- Il ne faut pas confondre les deux bornes d'entrée (\oplus et \ominus) et les deux bornes d'alimentation.
- Il ne faut pas confondre les deux bornes d'entrée entre elles, elles ont des rôles très différents.

1.2 Régimes linéaire et de saturation

La relation entrée-sortie est un peu plus compliquée qu'une simple fonction de transfert de filtre.

On représente ci-dessous la **caractéristique statique de l'ALI** qui représente la **tension de sortie V_s** en fonction de la **tension différentielle $\varepsilon = V^+ - V^-$** en régime permanent continu.

La tension de sortie V_s ne peut pas sortir de l'intervalle $[-V_{\text{sat}}, +V_{\text{sat}}]$, où V_{sat} est légèrement inférieure à la tension d'alimentation.

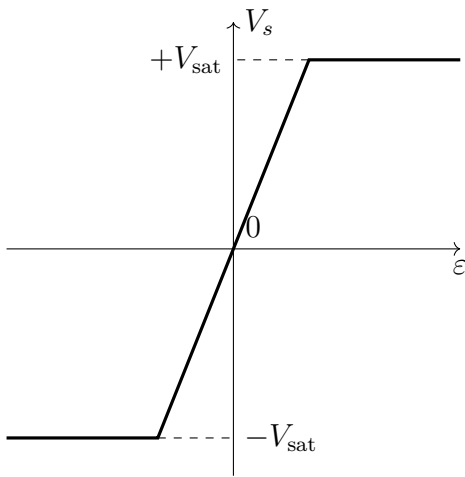
On distingue deux régimes :

■ Si $-V_{\text{sat}} < V_s < +V_{\text{sat}}$: **régime linéaire**.

- En statique, V_s est proportionnel à ε , en notant μ_0 le gain statique : $V_s = \mu_0 \varepsilon$, avec $\mu_0 \sim 2.10^5$ pour les ALI usuels.
- En régime variable, l'ALI se comporte comme un filtre passe-bas du 1^{er} ordre de fréquence de coupure de l'ordre de 20 Hz, de fonction de transfert : $\underline{\mu} = \frac{V_s}{\varepsilon} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}$

■ Si $V_s = \pm V_{\text{sat}}$: **régime de saturation**, avec $V_{\text{sat}} \sim 15 \text{ V}$

V_s n'évolue plus même si ε évolue, la relation entrée-sortie n'est plus linéaire.



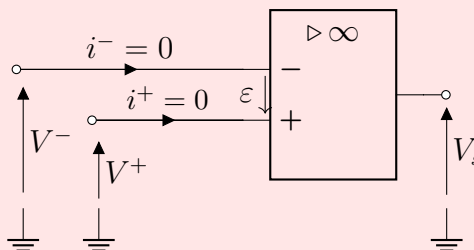
Dans le cadre du programme de PCSI, nous nous intéresserons uniquement à des montages pour lesquels l'ALI fonctionne en régime linéaire.

I.3 Modèle de l'ALI idéal

Compte-tenu des ordres de grandeur des ALI rencontrés, nous utilisons le **modèle de l'ALI idéal**.

♥ À retenir : Modèle de l'ALI idéal

- Les courants de polarisation en entrée i^+ et i^- sont nuls. L'impédance d'entrée de l'ALI est infinie.
- L'impédance de sortie de l'ALI est nulle : la tension V_s et l'intensité de sortie i_s sont indépendantes.
- Le gain statique μ_0 est infini.



I.4 Fonctionnement linéaire

♥ À retenir : Fonctionnement linéaire

De façon générale, une rétroaction liant la sortie de l'ALI à la borne inverseuse \ominus a un effet stabilisant permettant le régime linéaire, ainsi **tous les ALI fonctionnant en régime linéaire ont une rétroaction négative entre la sortie et l'entrée inverseuse \ominus** .

♥ À retenir : ALI idéal en régime linéaire

Pour un **ALI idéal fonctionnant en régime linéaire**, la tension différentielle en entrée est nulle :

$$\varepsilon = 0 \Leftrightarrow V^+ = V^-$$

REMARQUES

- À l'inverse, une rétroaction sur la borne \oplus a un effet déstabilisant : tous les ALI qui n'ont qu'une rétroaction positive fonctionnent en régime de saturation.
- Sans rétroaction, un ALI fonctionne en régime de saturation.
- Certains montages possèdent deux boucles de rétroaction sur les deux bornes \oplus et \ominus : on dit alors qu'il y a compétition de rétroaction, et on ne peut pas prévoir simplement le régime de fonctionnement de l'ALI.

Dans la suite du cours et des exercices, tous les ALI seront supposés idéaux fonctionnant en régime linéaire.

II Différents montages

Capacités exigibles : Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur, intégrateur. Déterminer les impédances d'entrée de ces montages.

Dans cette partie, nous allons étudier différents montages de base. Les méthodes mises en œuvre ici seront adaptées à d'autres montages en TD.

II.1 Méthodes

II.1.a) Établir la relation entrée-sortie

💡 Méthode : Comment établir la relation entrée-sortie ?

- Représenter le circuit et définir une tension aux bornes de chaque dipôle et une intensité à travers chaque dipôle.
- Utiliser le fait que les courants de polarisation i^+ et i^- sont nuls pour un ALI idéal.
- Écrire que pour un ALI idéal en régime linéaire : $V^- = V^+$
- Il faut ensuite exprimer V^+ et V^- en fonction de V_s et V_e . Pour cela :
 - Écrire la loi des nœuds au niveau des entrées \ominus et \oplus et les relations courant/tension des différents dipôles.
 - Identifier les points du circuit où on trouve les potentiels V_s et V_e
- Utiliser ces relations dans $V^- = V^+$.
- Manipuler les relations pour obtenir l'expression de V_s en fonction de V_e ou $\frac{V_s}{V_e}$.

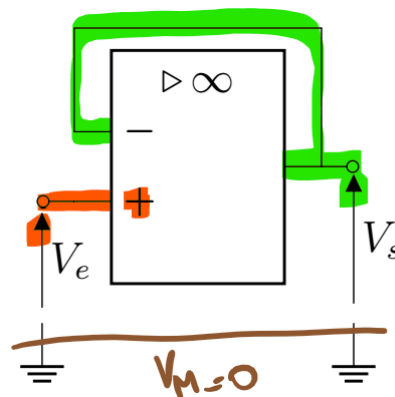
II.1.b) Impédance d'entrée

💡 Méthode : Comment déterminer l'impédance d'entrée d'un montage ?

- Exprimer la relation entre la tension V_e en entrée du montage, et le courant d'intensité i_e entrant dans le montage.
- Si besoin, utiliser $V^- = V^+$ pour un ALI idéal en régime linéaire.
- Conclure en utilisant la définition de l'impédance d'entrée : $\underline{Z}_e = \frac{V_e}{i_e}$.

II.2 Montage suiveur

II.2.a) Montage



II.2.b) Relation entrée-sortie

Exercice à maîtriser n°1 – Relation entrée-sortie du montage suiveur

R1. Exprimer le potentiel V^- de l'entrée inverseuse.

Exprimer de même le potentiel V^+ de l'entrée non inverseuse.

Solution: L'entrée inverseuse est reliée à la sortie par un fil, donc $V_s = V^-$

$$V^+ = V_e$$

R2. En utilisant le modèle de l'ALI idéal en fonctionnement linéaire, relier V^+ à V^- . En déduire la relation entre V_s et V_e .

Solution: Pour un ALI idéal en fonctionnement linéaire : $V^- = V^+$

Ainsi $V_s = V_e$

R3. Justifier le nom de « montage suiveur » .

Solution: La tension de sortie est égale à la tension d'entrée, d'où le nom de suiveur. Mais à quoi peut servir un tel montage ?? C'est ses impédances de sortie et d'entrée qui justifient son utilisation.

II.2.c) Impédance d'entrée et intérêt

Exercice à maîtriser n°2 – Impédance d'entrée

R1. Que vaut i_e le courant d'entrée entrant par l'entrée non inverseuse ?

Solution: Les courants d'entrée au niveau de l'entrée inverseuse et de l'entrée non inverseuse sont nuls dans le cadre du modèle de l'ALI idéal.

Ainsi $i_e = i^+ = 0$

R2. En utilisant la définition de l'impédance d'entrée $Z_e = \frac{V_e}{i_e}$ du montage suiveur.

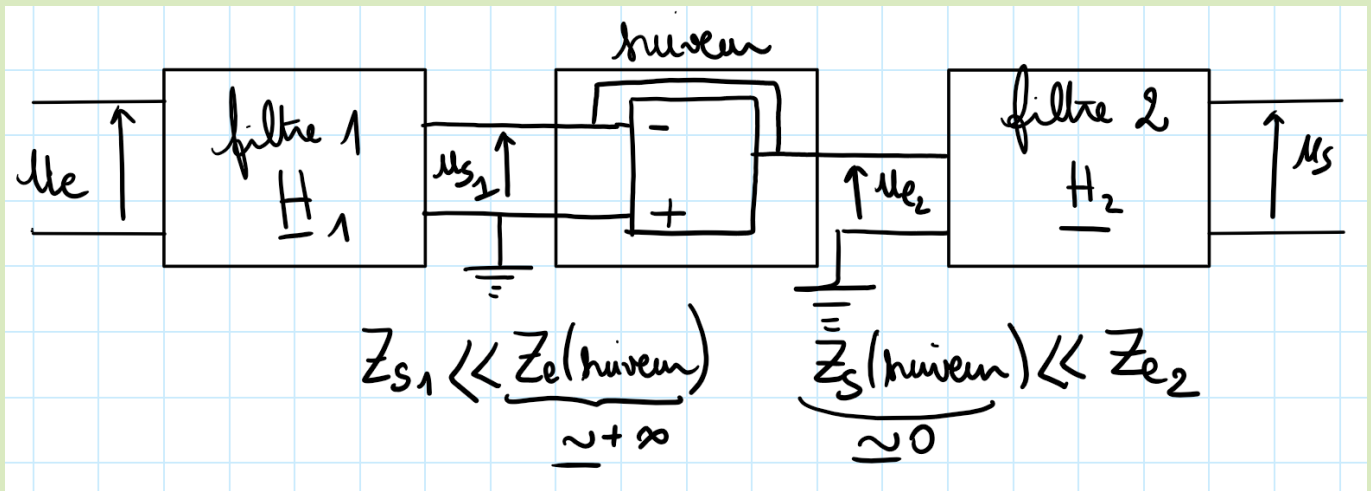
Solution: L'impédance d'entrée $Z_e = \frac{V_e}{i_e}$ est donc infinie.

R3. Quelle est l'impédance de sortie de l'ALI idéal ?

Solution: L'impédance de sortie de l'ALI idéal est nulle car le courant de sortie est indépendant de la tension de sortie.

R4. En déduire l'intérêt du montage suiveur.

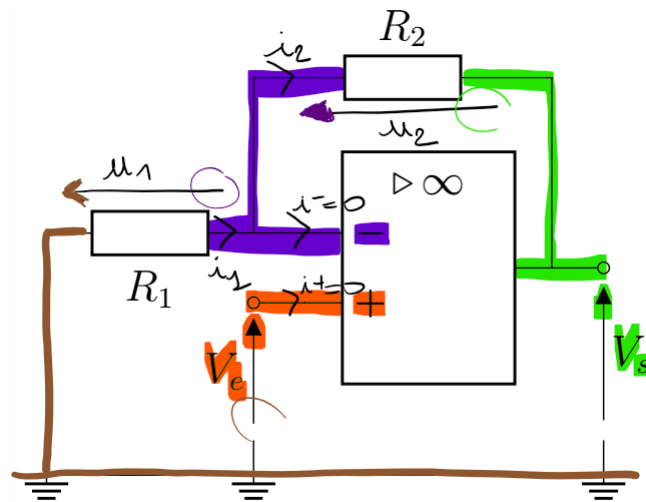
Solution: Filtres en cascade



Nous avons vu dans le chapitre précédent que pour mettre en cascade des filtres sans modifier leurs fonctionnements, il faut avoir des filtres de grande impédance d'entrée et d'impédance de sortie faible. Le montage suiveur répond à ces deux contraintes, et peut être intercalé entre deux filtres n'ayant pas ces deux conditions.

II.3 Montage amplificateur non inverseur

II.3.a) Montage



II.3.b) Relation entrée-sortie

Exercice à maîtriser n°3 – Relation entrée-sortie du montage amplificateur non inverseur

R1. Que vaut le courant i^- ? Que peut-on dire des deux résistances R_1 et R_2 ?

Solution: Dans le modèle de l'ALI idéal : $i^- = 0$
Les deux résistances R_1 et R_2 sont donc en série.

R2. Exprimer le potentiel V^- de l'entrée inverseuse.

Solution: On cherche à déterminer la tension aux bornes de la résistances R_1 en série avec la résistance R_2 .

La relation du pont diviseur de tension permet d'écrire : $V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$

R3. En utilisant le modèle de l'ALI idéal en fonctionnement linéaire, relier V^+ à V^- .

Solution: Dans le modèle de l'ALI idéal en fonctionnement linéaire : $V^+ = V^-$

R4. En déduire la relation entre V_s et V_e .

Solution:

Or $V^+ = V_e$, donc $V_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$, soit $V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e$

R5. Justifier le terme de « montage amplificateur non inverseur ».

Solution: $1 + \frac{R_2}{R_1} > 1$, donc $|V_s| > |V_e|$, et V_s et V_e sont de même signe. On en déduit que ce montage amplifie la tension d'entrée sans changer de signe.

II.3.c) Impédance d'entrée

Exercice à maîtriser n°4 – Impédance d'entrée

R1. Que vaut i_e le courant d'entrée entrant par l'entrée non inverseuse ?

Solution: $i_e = i^+$, or dans le modèle de l'ALI idéal, $i^+ = 0$, donc $i_e = 0$

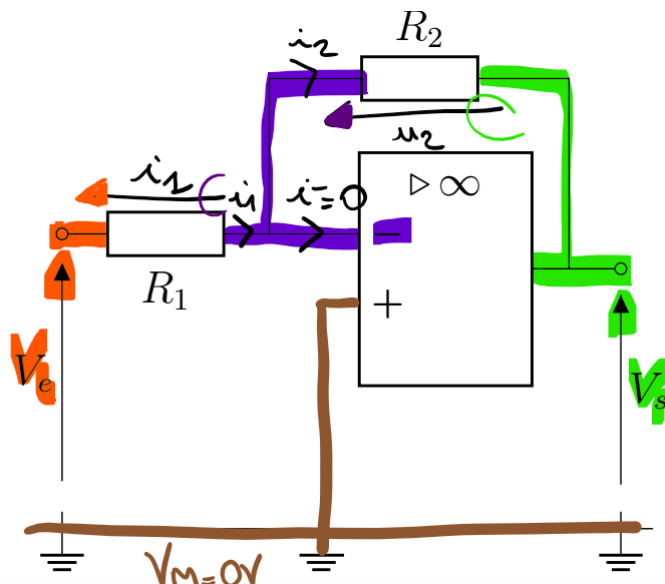
R2. En déduire l'impédance d'entrée du montage amplificateur non inverseur.

Solution: L'impédance d'entrée est donc infinie.

Ce montage permet donc d'amplifier la tension d'entrée, sans modifier les montages placés avant et après (car son impédance de sortie est nulle). Il peut être mis en cascade avec d'autres montages.

II.4 Montage amplificateur inverseur

II.4.a) Montage



II.4.b) Relation entrée-sortie

Exercice à maîtriser n°5 – Relation entrée-sortie du montage amplificateur inverseur

R1. Que vaut le courant i^- ? Que peut-on dire des deux résistances R_1 et R_2 ?

Solution: Dans le modèle de l'ALI idéal, $i^- = 0$, donc les résistances R_1 et R_2 sont en série.

R2. Établir une relation entre V_e , V^- , V_s et les résistances.

Solution:

R_1 est soumise à la tension $V_e - V^-$ et l'ensemble des deux résistances en série est soumis à la tension $V_e - V_s$.

On peut écrire la relation du pont diviseur de tension : $V_e - V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(V_e - V_s)$

On peut aussi utiliser les lois d'Ohm, en notant i l'intensité du courant circulant dans les deux résistances :

$$i = \frac{V_e - V^-}{R_1} \text{ et } i = \frac{V^- - V_s}{R_2}$$

Ainsi $\frac{V_e - V^-}{R_1} = \frac{V^- - V_s}{R_2}$

R3. En utilisant le modèle de l'ALI idéal en fonctionnement linéaire, relier V^+ à V^- .

Solution:

Dans le modèle de l'ALI idéal en fonctionnement linéaire : $V^+ = V^-$

Or $V^+ = 0$, donc $V^- = 0$

R4. En déduire la relation entre V_s et V_e .

Solution:

On en déduit : $V_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2}(V_e - V_s)$, soit $R_1 V_e - R_2 V_e = R_1 V_e - R_1 V_s$, soit $V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e$

R5. À quelle condition ce montage réalise-t-il une amplification ?

Solution: V_s et V_e sont de signes opposés, d'où le nom « inverseur ».

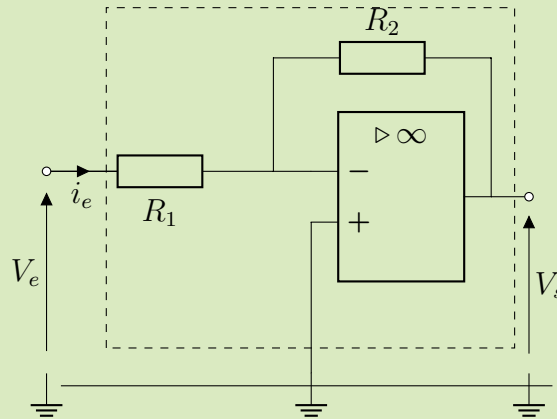
Ce montage réalise une amplification si $R_2 > R_1$.

II.4.c) Impédance d'entrée

Exercice à maîtriser n°6 – Impédance d'entrée

R1. Exprimer l'intensité i_e du courant entrant dans le montage et qui traverse la résistance R_1 .

Solution:



La loi d'Ohm appliquée à R_1 s'écrit $V_e - V^- = R_1 i_e$
Ainsi $i_e = \frac{V_e}{R_1}$

R2. En déduire l'expression de l'impédance d'entrée de ce montage.

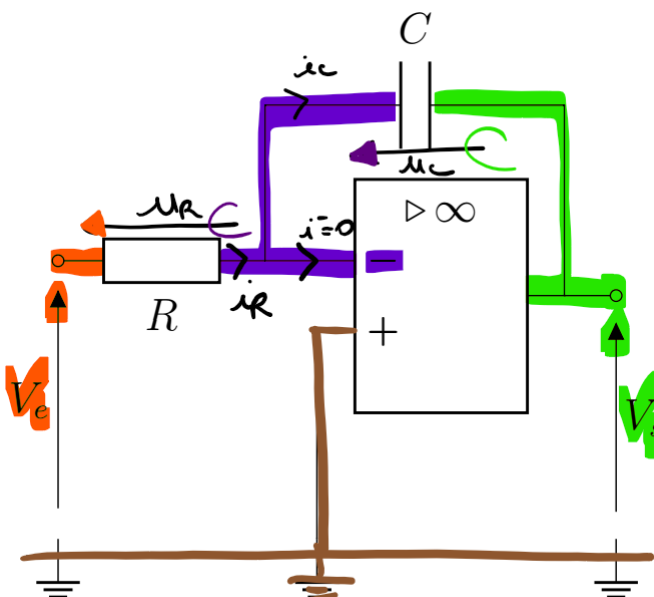
Solution: L'impédance d'entrée s'écrit $Z_e = \frac{V_e}{i_e} = R_1$

R3. Quel problème cela peut-il poser ?

Solution: L'impédance d'entrée n'est pas a priori très grande, sauf si la résistance R_1 est choisie très grande. Ainsi, si on met ce montage en cascade avec un autre montage placé avant, il modifiera le fonctionnement du montage placé avant.

II.5 Montage intégrateur

II.5.a) Montage



II.5.b) Relation entrée-sortie

Exercice à maîtriser n°7 – Relation entrée-sortie du montage amplificateur intégrateur

On peut mener ce raisonnement de deux façons : temporellement ou en représentation complexe en raisonnant sur une entrée sinusoïdale.

Raisonnement temporel

R1. Que vaut le courant i^- ? Que peut-on dire de la résistance et du condensateur ?

Solution: Dans le modèle de l'ALI idéal, $i^- = 0$, donc la résistance et le condensateur sont en série.

R2. Établir une relation entre V_e et V_s .

Solution:

$$\text{Loi d'Ohm : } i = \frac{V_e - V^-}{R}$$

$$\text{Relation du condensateur : } i = C \frac{d(V^- - V_s)}{dt}$$

Or dans le modèle de l'ALI idéal en régime linéaire $V^- = V^+$, et $V^+ = 0$, donc $V^- = 0$.

$$\text{Ainsi } \boxed{\frac{V_e}{R} = -C \frac{dV_s}{dt}}$$

R3. En déduire l'expression de V_s en fonction de V_e .

Solution: En intégrant la relation précédente entre $t = 0$ et t quelconque :

$$\begin{aligned} \frac{V_e}{R} &= -C \frac{dV_s}{dt} \\ \int_0^t \frac{V_e}{R} dt' &= -C \int_0^t \frac{dV_s}{dt'} dt' \\ \frac{1}{R} \int_0^t V_e(t') dt' &= -C(V_s(t) - V_s(0)) \\ V_s(t) &= V_s(0) - \frac{1}{RC} \int_0^t V_e(t') dt' \end{aligned}$$

Raisonnement en complexe

Supposons que V_e est sinusoïdal de pulsation ω , et utilisons la représentation complexe.

R4. Établir l'expression de \underline{V}_s en fonction de \underline{V}_e , R , C , et $j\omega$.

Repasser en réel pour obtenir l'expression de V_s en fonction de V_e .

Solution:

$$\underline{V}_e = R\underline{i} \text{ et } \underline{V}_s = -\frac{\underline{i}}{Cj\omega}$$

$$\text{Ainsi } \underline{V}_s = -\frac{\underline{V}_e}{RCj\omega}$$

$$\text{soit, en réel : } V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$

II.5.c) Impédance d'entrée

Exercice à maîtriser n°8 – Impédance d'entrée

R1. Déterminer l'expression de l'impédance d'entrée de ce montage.

Solution: De la même façon que pour le montage amplificateur inverseur : $V_e = Ri_e$, soit $Z_e = R$

R2. Quel problème cela peut-il poser ?

Solution: Si on met le montage intégrateur en sortie d'un montage d'impédance de sortie qui n'est pas petite devant R , le montage intégrateur perturbera son fonctionnement.

III Filtre actif

Un filtre passif est un filtre qui ne dispose pas de source d'énergie extérieure. C'est le cas des filtres constitués uniquement de résistances, condensateurs, bobines, étudiés dans le chapitre précédent.

À l'inverse, un filtre actif dispose d'une source d'énergie extérieure, et c'est le cas par exemple s'il contient un ALI.

Dans la feuille de TD, nous étudierons quelques montages utilisant des ALI et notamment des filtres actifs. Pour la détermination de la fonction de transfert, on utilisera la méthode du § II.1.a). Les autres méthodes mises en œuvre dans le chapitre précédent restent bien évidemment utilisables pour étudier les filtres actifs.

L'avantage de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs est qu'ils peuvent également amplifier une bande de fréquence. De plus, en choisissant bien le montage son impédance d'entrée peut être très très grande et ainsi on peut le placer après d'autres filtres sans modification de leur fonctionnement.