

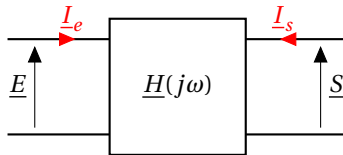
Chapitre 15 : ALI, Filtrage actif

1 Impédance d'entrée/de sortie d'un quadripôle

1.1 Définitions

Impédances d'entrée et de sortie d'un quadripôle

Considérons un quadripôle caractérisé dans l'espace complexe par ses tensions d'entrée \underline{E} et de sortie \underline{S} ainsi que ses courants d'entrée \underline{I}_e et de sortie \underline{I}_s .



L'impédance d'entrée du quadripôle \underline{Z}_e est définie comme l'impédance du quadripôle, vue depuis les bornes d'entrée, lorsque la sortie est ouverte ($\underline{I}_s = 0$). L'impédance de sortie du quadripôle \underline{Z}_s est définie comme l'impédance du quadripôle, vue depuis les bornes de sortie, lorsque l'entrée est-court-circuitée ($\underline{E} = 0$).

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{\underline{E}}{\underline{I}_e} \right)_{\underline{I}_s=0} \quad ; \quad \underline{Z}_s = \left(\frac{\underline{S}}{\underline{I}_s} \right)_{\underline{E}=0}$$

1.2 Quadripôle idéal

Impédances d'entrée et de sortie d'un quadripôle idéal

Un quadripôle idéal possède :

- une impédance d'entrée infinie : $\underline{Z}_e = \infty$;
- une impédance de sortie nulle : $\underline{Z}_s = 0$.

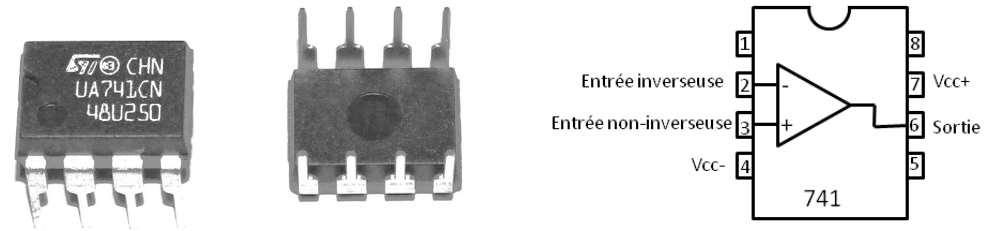
Ces propriétés permettent, entre autres, d'associer des quadripôles en cascade de sorte qu'ils se comportent indépendamment les uns des autres :

$$\underline{H}(j\omega) = \underline{H}_1(j\omega) \times \underline{H}_2(j\omega) \times \dots$$

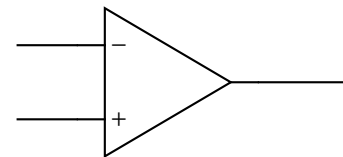
2 Présentation de l'amplificateur linéaire intégré (ALI)

2.1 Schéma-modèle

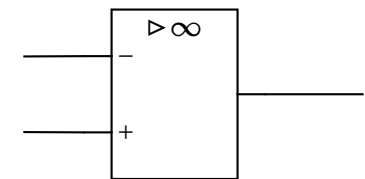
L'ALI, connu également sous le nom d'*amplificateur opérationnel*, est un circuit intégré que l'on trouve généralement monté sur un boîtier à huit broches (ou huit "pattes", voir images ci-dessous, à gauche). Ces broches sont numérotées et une gravure semi-circulaire permet de distinguer les deux côtés du boîtier. La figure ci-dessous à droite montre le rôle joué par certaines des broches ; nous détaillerons ces indications un peu plus tard dans ce paragraphe.



L'ALI a une structure interne (réalisée entre autres avec des transistors) que nous ne détaillerons pas. Par la suite nous envisagerons ce composant comme une boîte noire dont les propriétés générales seront admises. On représente ci-dessous le schéma-modèle d'un ALI dans sa version américaine et européenne. Sur cette dernière le triangle suivi du symbole infini signifie que l'ALI est **idéal**, nous reviendrons plus tard sur la signification de ce terme.



Symbole américain



Symbole européen

On distingue trois connexions sur ce schéma simplifié :

- l'entrée inverseuse (notée -, broche 2) ;
- l'entrée non-inverseuse (notée +, broche 3) ;
- la sortie (côté droit du schéma, broche 6).

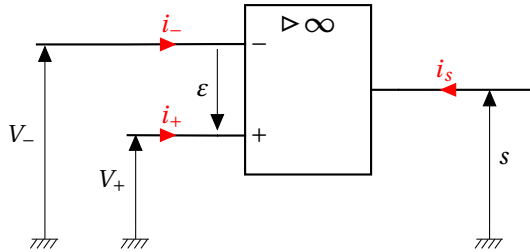
L'ALI est un composant actif, ce qui signifie qu'il doit être alimenté à l'aide d'une source extérieure pour fonctionner normalement. Cette alimentation s'effectue *via* deux bornes de connexions :

- la borne d'alimentation positive (notée V_{cc+} , broche 7) ;
- la borne d'alimentation négative (notée V_{cc-} , broche 4).

On s'arrange généralement pour que les potentiels électriques des deux bornes d'alimentation soient opposés. Les valeurs typiques sont : $V_{cc+} = 15V$ et $V_{cc-} = -15V$. Pour alléger les schémas on ne représente pas les bornes d'alimentation sur le schéma-modèle.

2.2 Vocabulaire et notations

Le schéma ci-dessous introduit les notations utiles.



La tension V_- à l'entrée inverseuse, la tension V_+ à l'entrée non-inverseuse et la tension de sortie s sont mesurées par rapport à une même *masse* (Celle-ci correspond à la borne centrale de l'alimentation $-15V/0V/+15V$), qui est elle-même connectée à la Terre.

La tension entre les deux bornes d'entrée $\varepsilon = V_+ - V_-$ est appelée *tension différentielle*.

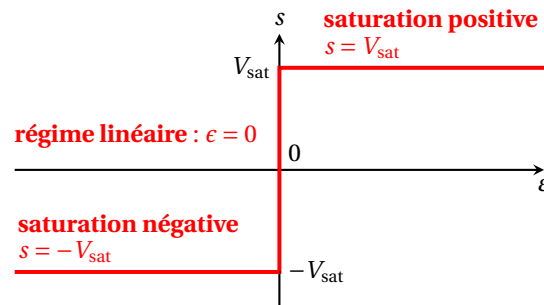
Les intensités i_- et i_+ sont appelés *courants de polarisation*, tandis que i_s est appelée *courant de sortie*.

2.3 Modèle de l'ALI idéal

Nous étudions dans ce chapitre un modèle simplifié et idéalisé de l'ALI, qui néglige la plupart de ses limitations. Il permet de comprendre dans les grandes lignes l'intérêt que peut présenter ce composant pour réaliser certaines fonctions en électronique. En pratique il est important de connaître les conditions dans lesquelles ce modèle simple s'applique, autrement dit il faut en connaître les limites. Cela relève du programme de deuxième année en filière PSI.

2.3.1 Deux types de fonctionnement : régime linéaire et régime saturé

On représente sur la figure ci-dessous la *caractéristique de transfert statique* d'un ALI idéal, c'est-à-dire le graphe qui indique la valeur de la tension de sortie s en fonction de celle de la tension différentielle, en régime stationnaire.

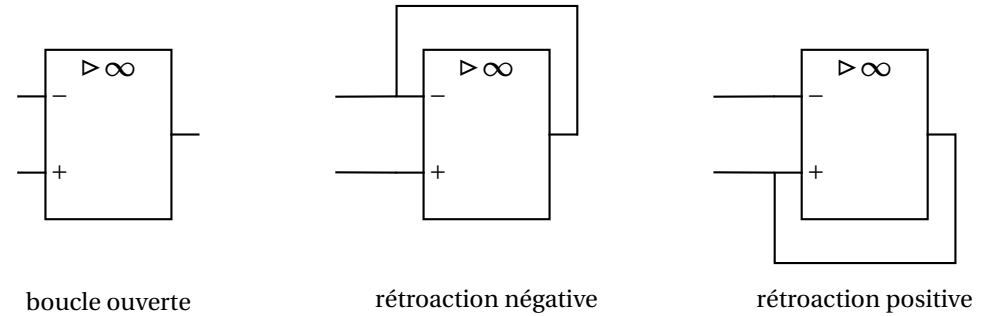


Suivant les circonstances un ALI idéal peut fonctionner :

- en *régime linéaire* : dans ce cas $\varepsilon = 0 \iff V_+ = V_-$ et la tension de sortie est bornées par deux *tensions de saturation* $\pm V_{\text{sat}}$, avec V_{sat} typiquement égale à 15V ;
- en *régime saturé* : dans ce cas la tension de sortie est égale à V_{sat} (saturation positive : $\varepsilon > 0$) ou bien $-V_{\text{sat}}$ (saturation négative : $\varepsilon < 0$).

2.3.2 Rétroaction

Dans un montage, la sortie d'un ALI est souvent connectée à l'une des voies d'entrée *via* une boucle de rétroaction. Cette boucle peut être un simple court-circuit mais elle peut également contenir des dipôles. En l'absence de rétroaction on dit que l'ALI est en *boucle ouverte*.



Par la suite nous admettrons la propriété suivante :

Condition de fonctionnement en régime linéaire

Un ALI idéal ne peut fonctionner en régime linéaire qu'en présence d'une **rétroaction négative**. Dans le cas contraire (boucle ouverte ou rétroaction positive), on se trouve nécessairement en régime saturé.

Dans ce chapitre nous étudierons uniquement des montages dans lesquels l'ALI fonctionne en régime linéaire.

2.3.3 Courants de polarisation

Les courants de polarisation d'un ALI réel sont très faibles (de l'ordre du nanoampère). Dans le modèle idéal on fait l'approximation que les courants de polarisation **sont nuls**, quelque soit son régime de fonctionnement.

2.3.4 Bilan

Modèle de l'ALI idéal

Un ALI idéal est caractérisé par :

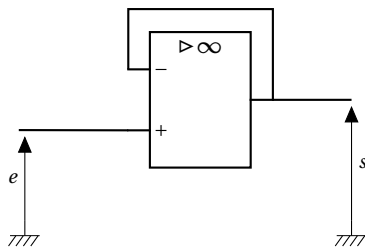
- des courants de polarisation nuls : $i_- = i_+ = 0$;
- $\varepsilon = 0 \iff V_+ = V_-$ en régime linéaire (présence d'une rétroaction négative) ;
- $-V_{\text{sat}} < s < V_{\text{sat}}$ en régime linéaire.

3 Montages à ALI

Dans les parties suivantes, nous admettrons que les propriétés de l'ALI idéal ne sont pas modifiées lorsqu'on l'alimente en régime variable (c'est une bonne approximation tant que la fréquence est suffisamment faible). Dans le programme de PCSI il y a quatre montages à connaître.

3.1 Montage suiveur

Le montage suiveur est un **quadripôle** constitué d'un ALI avec un simple court-circuit comme rétroaction négative.

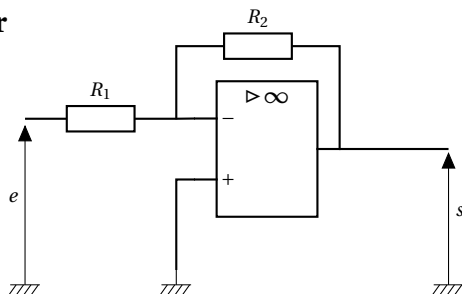


Propriétés du montage suiveur

- Un suiveur a une fonction de transfert unitaire : $\underline{H} = 1$. Il transmet tout signal sans aucune modification.
- L'intérêt du suiveur tient aux valeurs de ses impédances : $\underline{Z}_e = \infty$ et $\underline{Z}_s = 0$. On l'utilise généralement en complément d'un autre quadripôle, pour éviter un éventuel effet diviseur de tension (on dit qu'il permet d'effectuer de l'*adaptation d'impédance*).

3.2 Montage amplificateur inverseur

Dans ce montage, la boucle de rétroaction négative contient une résistance R_2 . L'entrée du montage est connectée à la borne inverseuse via une résistance R_1 , tandis que la borne non-inverseuse est connectée à la masse.

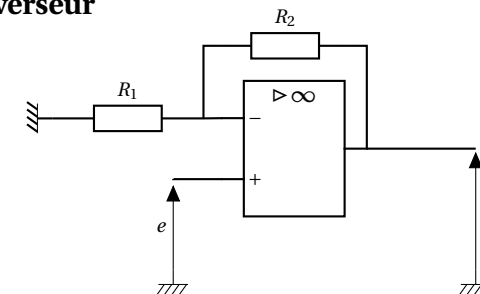


Propriétés du montage amplificateur inverseur

- La fonction de transfert vaut : $\underline{H} = -\frac{R_2}{R_1}$, elle ne dépend pas de la fréquence. Ce montage amplifie à condition que $R_2 > R_1$. On note qu'il déphase le signal d'entrée de π (car \underline{H} est réel négatif).
- Les impédances sont : $\underline{Z}_e = R_1$ et $\underline{Z}_s = 0$. L'impédance d'entrée n'est pas infinie, il y a donc potentiellement un risque d'effet diviseur de tension à l'entrée de ce montage.

3.3 Montage amplificateur non inverseur

Ce montage ressemble à l'amplificateur non inverseur mais désormais l'entrée est connectée à la borne non-inverseuse.

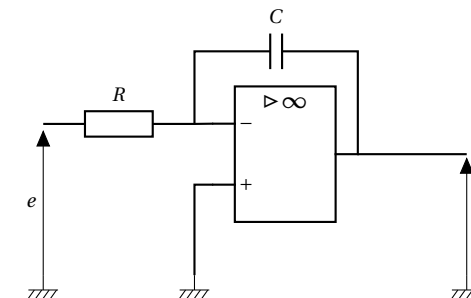


Propriétés du montage amplificateur non inverseur

- La fonction de transfert vaut : $\underline{H} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$, elle ne dépend pas de la fréquence. Ce montage amplifie sans déphasage (car \underline{H} est réel positif).
- Les impédances sont : $\underline{Z}_e = \infty$ et $\underline{Z}_s = 0$. C'est idéal !

3.4 Montage intégrateur

Ce montage ressemble à l'amplificateur inverseur, à la différence que l'on place un condensateur idéal à la place d'une résistance dans la boucle de rétroaction.



Propriétés du montage intégrateur

- La fonction de transfert vaut : $\underline{H} = -\frac{1}{jRC\omega}$. Ce montage se comporte comme un intégrateur à toute fréquence (contrairement à un pseudo-intégrateur qui n'intègre que dans un certain intervalle de fréquence). Cela pose toutefois problème si le signal d'entrée possède une composante continue car l'ALI atteint alors rapidement la saturation.
- Les impédances sont : $\underline{Z}_e = R$ et $\underline{Z}_s = 0$. Là encore il y a donc potentiellement un risque d'effet diviseur de tension à l'entrée de ce montage.