

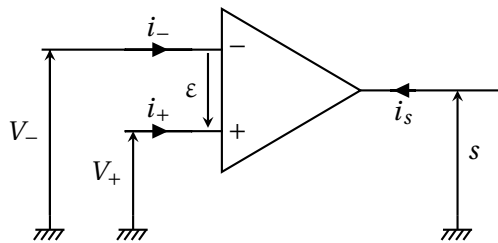
Chapitre 17 : ALI, Filtrage actif

On a vu dans le chapitre précédent que des circuits contenant un petit nombre de composants passifs (résistors, condensateurs, bobines) peuvent réaliser des opérations simples sur des signaux analogiques (filtrage, dérivation, intégration, moyennage, etc). Ceux-ci présentent malgré des inconvénients : leurs applications sont limitées et leurs impédances d'entrée/de sortie ne permettent généralement pas de les associer en cascade. Dans ce chapitre, nous allons découvrir un composant actif omniprésent en électronique, appelé amplificateur linéaire intégré (ou ALI). Nous verrons qu'il permet de réaliser certaines fonctions utiles comme l'amplification d'un signal, mais aussi qu'il permet de construire des filtres bien plus avantageux en termes d'impédances que les filtres passifs.

1 Modèle de l'ALI idéal en régime linéaire

1.1 Présentation de l'ALI

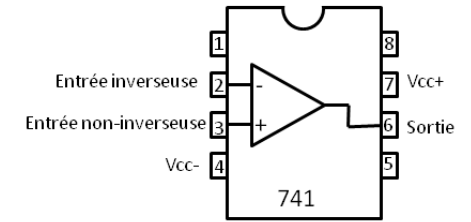
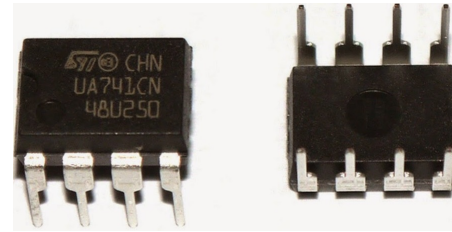
Un ALI est un circuit intégré, fabriqué en associant des composants électroniques élémentaires tels que des transistors, des résistors et des condensateurs. Dans ce chapitre, nous allons étudier son comportement dans un circuit électrique en s'appuyant sur quelques lois simples qui seront admises, sans se préoccuper de sa structure interne (on le verra comme une sorte de "boîte noire"). On représente ci-dessous le symbole de l'ALI :



Comme on peut le voir, l'ALI est caractérisé par **trois bornes** :

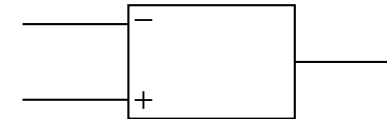
- la borne - s'appelle **l'entrée inverseuse**,
- la borne + s'appelle **l'entrée non-inverseuse**,
- la dernière s'appelle **la sortie**.

La différence entre les deux tensions d'entrée $\epsilon = V_+ - V_-$ s'appelle la **tension différentielle**. En pratique, un ALI possède d'autres bornes qui ne seront pas représentées sur les schémas électriques. On retiendra que deux d'entre elles sont destinées à l'alimentation puisqu'**un ALI est un composant actif, ce qui signifie qu'il a besoin d'être alimenté pour fonctionner**. Les images suivantes vous montrent un modèle très classique d'ALI que l'on trouve au laboratoire : $\mu A741$, qui est composé de "huit pattes". Un schéma vous montre comment sont disposées les deux entrées, la sortie et les bornes d'alimentation (V_{CC+} et V_{CC-}).



Au laboratoire, vous utiliserez un générateur de tension continue $+15V/0V/-15V$ pour alimenter l'ALI, ce qui signifie que $V_{CC+} = 15V$ et $V_{CC-} = -15V$. Vous aurez remarqué sur le symbole de l'ALI que les potentiels électriques des trois bornes sont mesurés par rapport à une **masse commune**. C'est la borne 0V du générateur qui joue ce rôle.

Rq : Le symbole triangulaire pour l'ALI est standard, mais il en existe un autre, assez courant, sous forme rectangulaire (voir ci-dessous).

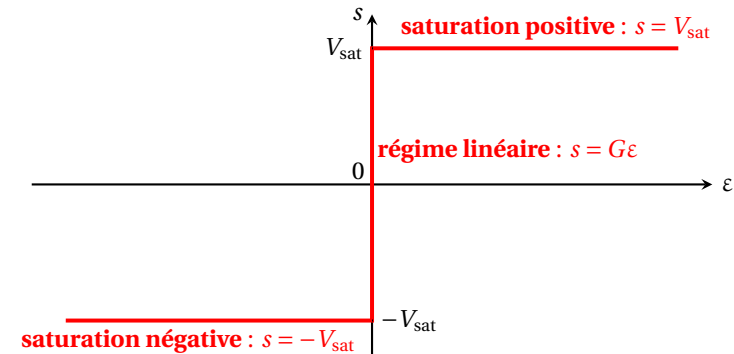


1.2 Caractéristique de transfert statique de l'ALI idéal

L'ALI est un amplificateur différentiel, c'est-à-dire qu'il amplifie la tension différentielle ϵ :

$$s = G\epsilon \text{ avec } G = \infty$$

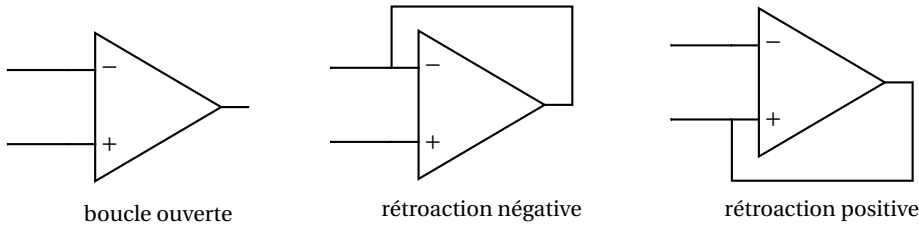
Le facteur de gain est supposé infini, ce qui signifie que le fonctionnement en **régime linéaire** (c'est-à-dire lorsque $s = G\epsilon$) n'est possible que pour une tension différentielle rigoureusement nulle. Pour toute tension différentielle non nulle, l'ALI est en **régime saturé** (la tension de sortie est limitée par des valeurs de saturation positive et négative). La caractéristique de transfert statique illustre sous forme graphique la tension de sortie $s = f(\epsilon)$ lorsque l'on impose une tension différentielle ϵ **stationnaire** en entrée de l'ALI.



Les tensions de saturation dépendent principalement des valeurs choisies pour les tensions d'alimentation. On retiendra que le plus souvent l'alimentation est symétrique ($V_{CC+} = 15V$, $V_{CC-} = -15V$) et que les tensions de saturation sont elles aussi symétriques, du même ordre de grandeur que les tensions d'alimentation : $V_{sat} \sim 15V$.

1.3 Fonctionnement en régime linéaire : rétroaction négative

Dans un montage, un ALI fonctionne le plus souvent avec une boucle de rétroaction. On parle de **rétroaction positive** lorsque la sortie est bouclée sur l'entrée non-inverseuse, de **rétroaction négative** lorsqu'elle est bouclée sur l'entrée inverseuse. Quand il n'y a pas de rétroaction, on dit que l'ALI est en **boucle ouverte**.



Dans un montage en boucle ouverte, il est impossible de travailler avec une tension différentielle rigoureusement nulle (un simple bruit thermique est amplifié jusqu'à saturation). Par conséquent, **un ALI idéal fonctionne toujours en régime saturé lorsqu'il est en boucle ouverte**. Pour connaître la tension de saturation, il faut déterminer le signe de ϵ .

Nous admettrons également qu'**un ALI idéal fonctionne toujours en régime saturé lorsqu'il y a une rétroaction positive**.

En revanche, l'ALI peut fonctionner en régime linéaire quand il y a une rétroaction négative (à condition que la tension de sortie ne dépasse pas les valeurs de saturation). Cela est possible car la boucle de rétroaction négative permet de stabiliser le montage sur la partie verticale de la caractéristique de transfert ($\epsilon = 0$). Cette année, nous étudierons exclusivement de type de montage.

Un ALI idéal peut fonctionner en régime linéaire s'il y a une boucle de rétroaction négative. Dans ce cas, la tension différentielle est nulle, autrement dit :

$$V_+ = V_-$$

1.4 Impédances d'entrée, impédance de sortie

L'un des principaux avantages de l'ALI idéal tient dans la valeur de ses impédances d'entrée et de sortie.

- les impédances d'entrée (inverseuse et non-inverseuse) sont **infinies**, ce qui signifie qu'en toutes circonstances, on pourra considérer que **les deux courants d'entrée sont nuls** :

$$i_+ = i_- = 0$$

- l'impédance de sortie est **nulle**, autrement dit la tension de sortie s est indépendante de la valeur du courant de sortie i_s .

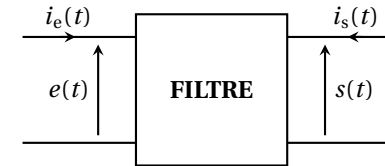
Comme nous en avons discuté au dernier chapitre, cela permet d'envisager d'utiliser plusieurs montages à ALI en cascade.

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

Dans le dernier chapitre, nous avons abordé la notion d'impédance d'entrée et de sortie pour voir leur rôle dans la réalisation de montages en cascade. Nous allons ici présenter la définition mathématique de ces impédances afin de déterminer leur expression dans quelques cas simples.

2.1 Définitions

On rappelle schématiquement les conventions d'orientation des courants d'entrée/de sortie pour un quadripôle.



L'impédance d'entrée d'un quadripôle est l'impédance, vue depuis les bornes d'entrée, lorsque le quadripôle est en sortie ouverte ($i_s = 0$) :

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{E}{I_e} \right)_{I_s=0}$$

L'impédance de sortie d'un quadripôle est l'impédance, vue depuis les bornes de sortie, lorsque le quadripôle est court-circuité en entrée ($e = 0$) :

$$\underline{Z}_s = \left(\frac{S}{I_s} \right)_{E=0}$$

2.2 Application : filtre passe-bas RC série

On obtient rapidement les expressions suivantes pour les impédances d'entrée et de sortie de ce filtre très classique :

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

$$\underline{Z}_s = \underline{Z}_R \parallel \underline{Z}_C = \frac{R}{1+jRC\omega}$$

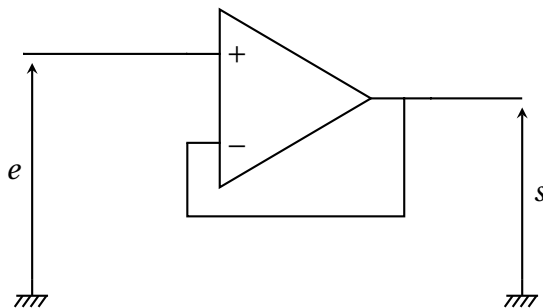
On notera que les valeurs des impédances d'entrée et de sortie dépendent de la fréquence. L'impédance d'entrée devient très élevée en BF et l'impédance de sortie très faible en HF. Il n'y a aucune bande de fréquence pour laquelle ces deux propriétés sont vérifiées en même temps.

3 Montage suiveur

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).

3.1 Schéma du montage

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



3.2 Fonction de transfert

Le montage suiveur transmet la tension d'entrée sans la modifier : $e(t) = s(t)$, par conséquent sa fonction de transfert est unitaire :

$$\underline{H} = 1$$

3.3 Impédances d'entrée, de sortie

L'intérêt du montage suiveur réside dans la valeur de ses impédances :

$$\underline{Z}_e = \infty$$

$$\underline{Z}_s = 0$$

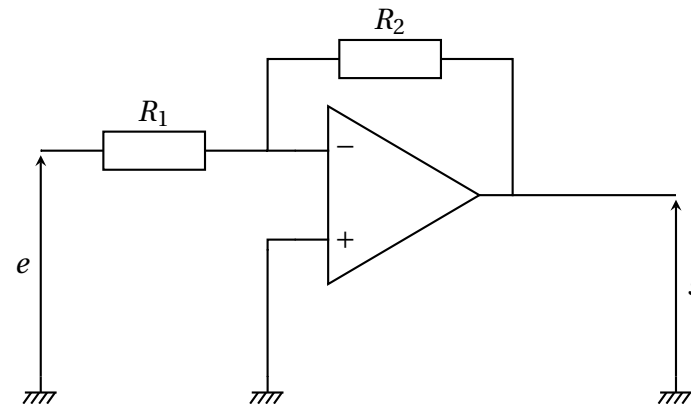
On utilise généralement le montage suiveur pour effectuer de l'**adaptation d'impédance**, c'est-à-dire qu'on l'insère dans une chaîne de commande (quadripôles en cascade) entre deux quadripôles dont les impédances d'entrée et de sortie ne sont pas bien adaptées. Cela peut servir à :

- éviter une chute de tension trop importante entre deux quadripôles,
- éviter que deux quadripôles ne s'influencent l'un l'autre lorsqu'on les place en cascade.

4 Montage amplificateur inverseur

4.1 Schéma du montage

Dans ce montage, la boucle de rétroaction négative contient une résistance. L'entrée non-inverseuse est connectée à la masse.



4.2 Fonction de transfert

La fonction de transfert de ce montage est indépendante de la fréquence, elle vaut :

$$\underline{H} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Contrairement à un filtre passif, ce montage permet d'amplifier le signal à **n'importe quelle fréquence** (à condition de choisir $R_2 > R_1$). On dit qu'il est inverseur car la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée (cela revient à dire que ce montage produit un déphasage égal à π à toute fréquence).

4.3 Impédances d'entrée, de sortie

Bien que l'ALI ait des impédances d'entrée infinies, la présence de la résistance R_1 fait que l'impédance d'entrée du montage amplificateur inverseur n'est pas infinie. On montre que :

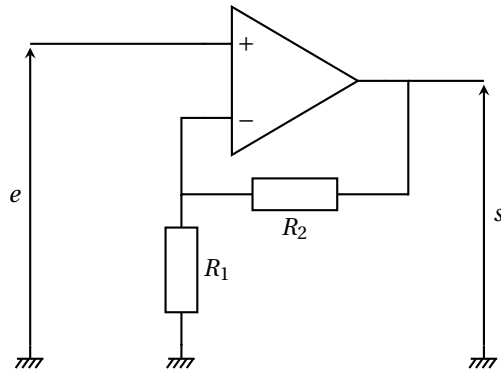
$$\underline{Z}_e = R_1$$

$$\underline{Z}_s = 0$$

On peut toutefois rendre l'impédance d'entrée infinie en plaçant un suiveur en amont de l'amplificateur inverseur.

5 Montage amplificateur non inverseur

5.1 Schéma du montage



5.2 Fonction de transfert

La fonction de transfert de ce montage est encore indépendante de la fréquence, elle vaut :

$$\underline{H} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Ce montage permet lui-aussi d'amplifier le signal **à n'importe quelle fréquence** (quelles que soient les valeurs de R_1 et R_2). On dit qu'il est non inverseur car la tension de sortie est de même signe que la tension d'entrée (cela revient à dire que ce montage produit un déphasage nul à toute fréquence).

5.3 Impédances d'entrée, de sortie

Contrairement au montage inverseur, l'impédance d'entrée de l'amplificateur non inverseur est infinie car l'entrée du quadripôle est branchée directement sur l'entrée non inverseuse (comme pour le suiveur) :

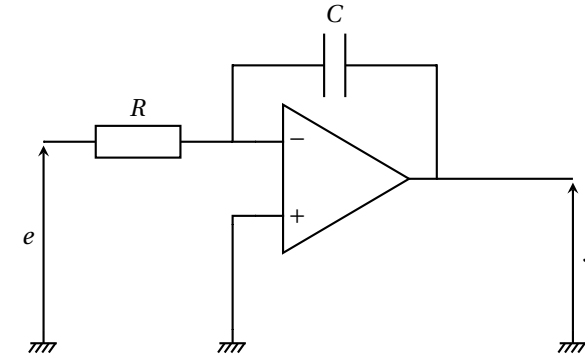
$$\underline{Z}_e = \infty$$

$$\underline{Z}_s = 0$$

6 Montage intégrateur

6.1 Schéma du montage

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.



6.2 Fonction de transfert

La fonction de transfert de ce montage dépend de la fréquence, elle s'exprime sous la forme :

$$\underline{H} = -\frac{1}{jRC\omega}$$

Contrairement aux filtres passifs pseudo-intégrateur que l'on a pu voir dans le chapitre précédent, ce montage permet d'intégrer le signal **à toute fréquence**. En effet, la relation réelle entre la tension d'entrée et la tension de sortie s'écrit :

$$s(t) = -\frac{1}{RC} \int e(t) dt$$

Rq : En réalité, il y a des limitations à ce comportement. :

- Lorsque la fréquence devient très élevée, le modèle que l'on a vu pour l'ALI idéal ne convient plus (notamment le gain différentiel ne peut plus être considéré comme infini et dépend de la fréquence).
- Si le signal d'entrée possède une composante continue non nulle, celle-ci provoque une variation affine de la tension de sortie qui amène inévitablement l'ALI à saturation. Pour éviter ce problème, on place généralement une résistance R' très élevée en dérivation avec le condensateur.

6.3 Impédances d'entrée, de sortie

Les impédances d'entrée et de sortie sont analogues à celles du montage amplificateur inverseur :

$$\underline{Z}_e = R$$

$$\underline{Z}_s = 0$$