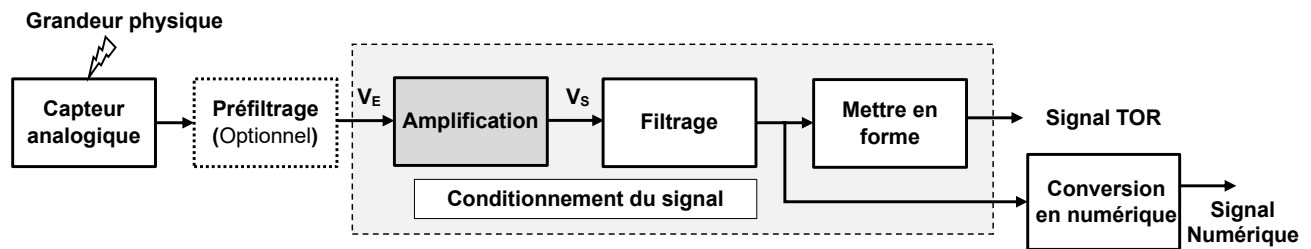
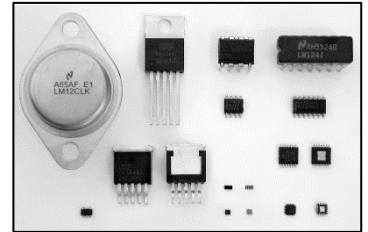


Chapitre 17 : Amplificateurs linéaires intégrés (ALI)

I. Introduction

Les amplificateurs linéaires intégrés, appelés **ALI** ou amplificateurs **opérationnels**, sont des circuits électroniques très utilisés dans le **conditionnement des signaux** issus des capteurs. Ces signaux étant souvent **faibles et sensibles aux perturbations**, l'ALI permet de **les amplifier** et après des opérations de filtrage, d'adaptation avant leur traitement par un microcontrôleur ou un convertisseur analogique-numérique CAN.



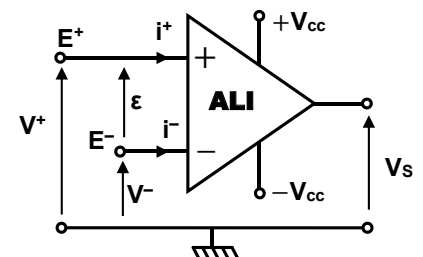
Grâce à son gain élevé et à l'emploi d'une contre-réaction, il peut réaliser de **nombreuses fonctions** : amplification inverseuse ou non-inverseuse, sommation, soustraction, intégration, dérivation, comparaison et filtrage actif. Son fonctionnement peut être étudié en **régime linéaire**, lorsque la sortie reste proportionnelle à l'entrée, ou en **régime saturé**.

L'ALI constitue ainsi un élément essentiel des **chaînes d'acquisition** et des **systèmes analogiques modernes** de mesure, de commande et d'instrumentation.

II. Présentation de l'amplificateur ALI

1. Symbole et brochage

Inventé vers **1965**, l'**Amplificateur Linéaire Intégré**, appelé **ALI** ou **AOP**, était principalement destiné à réaliser des opérations mathématiques analogiques telles que l'addition, la soustraction, l'intégration et la dérivation, d'où son appellation d'**Amplificateur OPérationnel**. Il s'agit d'un circuit intégré constitué principalement de **transistors**, de résistances et d'autres composants électroniques élémentaires.

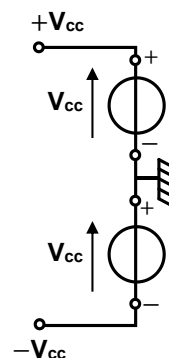


Alimentation en tension :

Un amplificateur opérationnel peut être alimenté selon deux configurations :

- **Alimentation symétrique** : deux tensions opposées par rapport à la masse, par exemple $+V_{CC} = +15\text{ V}$ et $-V_{CC} = -15\text{ V}$.
- **Alimentation asymétrique** ou mono-tension : une seule tension d'alimentation, par exemple entre 0 V et $+15\text{ V}$, ou entre 0 V et -15 V .

Exemple : La tension admissible dépend du **modèle** : environ **1,8 à 5,5 V** pour le **MCP6001**, **3 à 36 V** pour le **LM358B**, jusqu'à **±22 V** pour le **LM741** et **±75 V** pour l'**OPA455**. Ainsi, les AOP existants couvrent approximativement **1,8 à 150 V** d'alimentation totale.



Deux bornes d'entrée E^+ et E^-

L'ALI possède deux entrées : l'**entrée non-inverseuse E^+** , repérée par le signe (+), et l'**entrée inverseuse E^-** , repérée par le signe (-). Leurs tensions sont notées V^+ et V^- , et leurs courants i^+ et i^- .

La tension différentielle d'entrée est définie par : $\varepsilon = V^+ - V^-$.

Une borne de sortie S

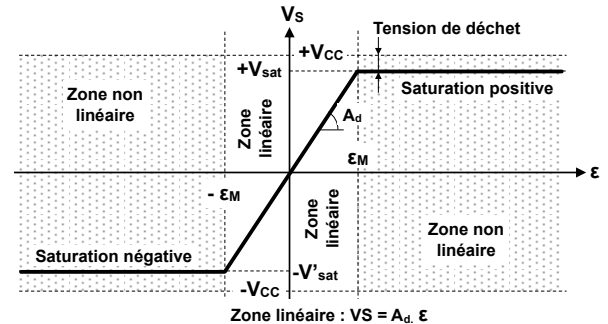
- La tension de sortie, notée V_s , est théoriquement comprise entre les tensions d'alimentation : $-V_{CC} \leq V_s \leq +V_{CC}$
- Pour un amplificateur opérationnel réel, elle reste limitée par les tensions de saturation : $-V_{sat} \leq V_s \leq +V_{sat}$ avec $V_{sat} < V_{CC}$.

2. Caractéristique d'un ALI

En **boucle ouverte (BO)**, le gain différentiel A_d étant très élevé (d'ordre 10^5), l'ALI ne reste linéaire que pour une très faible tension différentielle ε : $V_s = A_d \cdot \varepsilon$

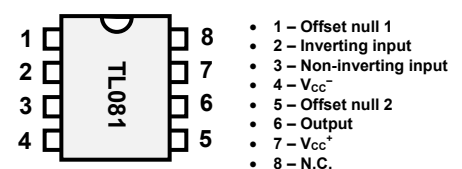
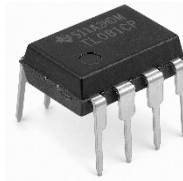
Au-delà, la sortie se sature et l'ALI fonctionne en mode Tout Ou Rien : Si $\varepsilon > 0 \Rightarrow V_s \approx +V_{sat}$ et si $\varepsilon < 0 \Rightarrow V_s \approx -V_{sat}$

Pour l'utiliser comme amplificateur, on applique une contre-réaction négative (**Boucle fermée BF**) reliant la sortie à l'entrée inverseuse, afin de maintenir ε très faible.



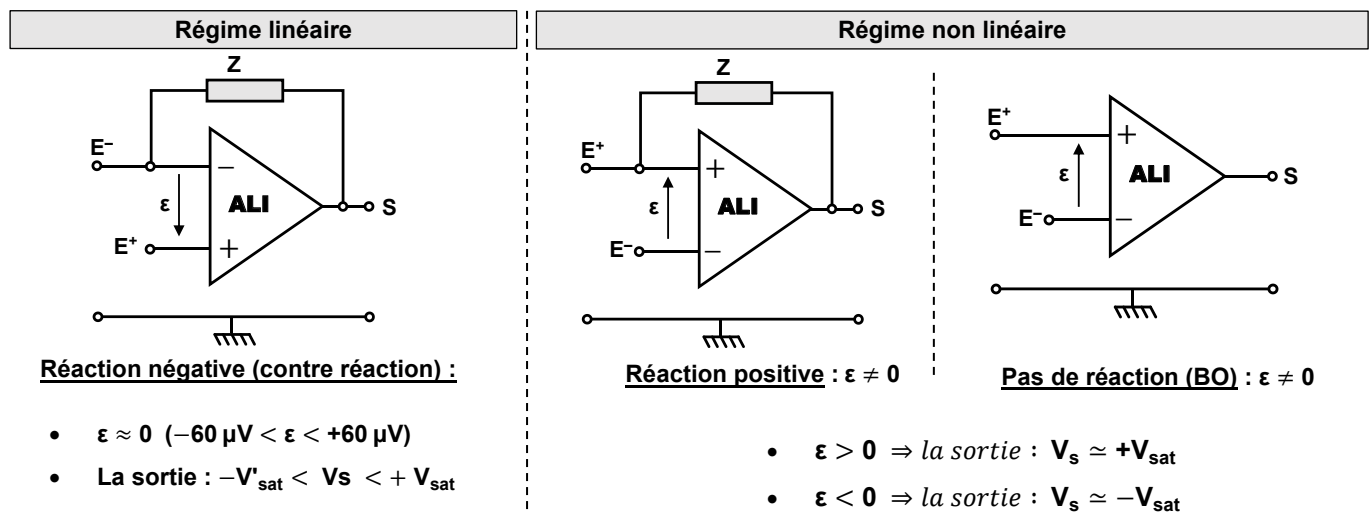
Exemple : ALI TL081

Gain en tension (boucle ouverte)	200000
Tension différentielle ε	$-60 \mu V < \varepsilon < +60 \mu V$
Tensions de saturation Pour $V_{CC} = \pm 15 V$	$+V_{SAT} \approx 13 V$ $-V'_{SAT} \approx -12,5 V$
Alimentation maximale	18V



3. Régimes de fonctionnement

Un moyen simple permettant de savoir si un ALI fonctionne en **régime linéaire** ou **régime non linéaire** consiste à vérifier s'il y a bien **réaction** (par un composant ou un simple fil) de la sortie **S** vers l'entrée **E⁺** ou **E⁻**. On parle alors de **réaction positive** ou **réaction négative** (ou contre-réaction).



➤ **Régime linéaire** : Fonctionnement en **amplification** (l'ALI amplifie la différence de tension entre ses entrées)

➤ **Régime non linéaire** : **saturation** (l'amplificateur ALI fonctionne comme un comparateur des tensions d'entrée).

4. Amplificateur parfait (ou idéal)

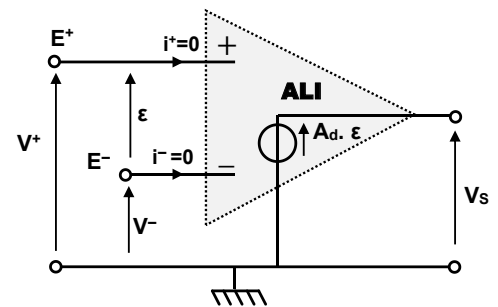
Dans ce cours, nous nous intéresserons à l'amplificateur ALI idéal (ALI parfait). Bien qu'il soit un modèle théorique, ses hypothèses sont suffisamment proches du comportement des amplificateurs réels pour être valides dans la plupart des applications pratiques.

Ce modèle permet de simplifier l'étude des montages et d'appliquer directement les lois fondamentales de l'électricité afin d'analyser leur fonctionnement. Un amplificateur idéal possède les caractéristiques suivantes :

- Une **résistance d'entrée infinie** : les courants d'entrée sont nuls

$$i^+ = i^- = 0$$

- Une **résistance de sortie nulle** : la tension de sortie est indépendante de la charge.
- Un **gain différentiel en boucle ouverte A_d infini**, quelle que soit la fréquence.
- Une **tension d'offset nulle** : lorsque les deux entrées sont au même potentiel, la tension de sortie est également nulle.



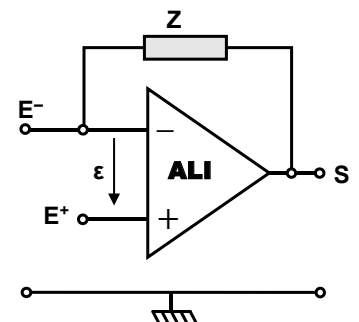
III. Amplification : ALI en régime linéaire

1. Caractéristique de l'ALI en régime linéaire

Un moyen simple permettant de savoir si un ALI fonctionne ou non en régime linéaire consiste à vérifier s'il y a bien réaction (par un composant ou un simple fil) de la sortie S vers l'entrée inverseuse E^- . On parle alors de réaction négative ou contre-réaction.

En régime linéaire ($|V_s| < V_{CC}$), la tension différentielle est alors nulle :

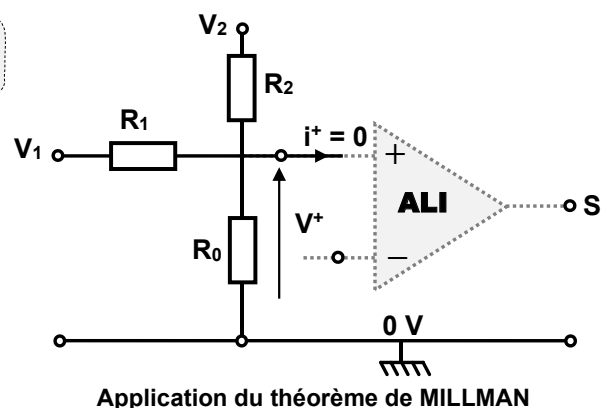
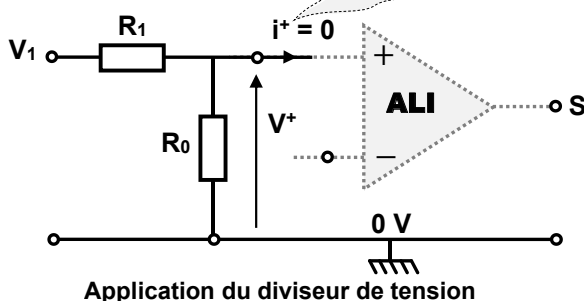
$$\epsilon = v^+ - v^- = 0 \Rightarrow v^+ = v^-$$



2. Outils de calcul : Théorèmes à appliquer

L'étude de ce régime repose sur la maîtrise de deux théorèmes fondamentaux : le théorème du diviseur de tension et le théorème de Millman.

Ce courant est nul donc vous avez le droit d'appliquer le diviseur de tension 😊



$$V^+ = V_2 \frac{R_0}{R_0 + R_1}$$

$$V^+ = \frac{\frac{0}{R_0} + \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Remarque : Comme le courant d'entrée i^+ est nul, aucun courant ne circule dans l'entrée de l'ALI. Le réseau résistif n'est donc pas chargé, ce qui permet d'appliquer directement les théorèmes sans intervenir dans les calculs complexes.

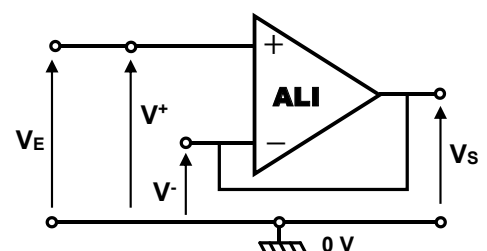
3. Montages de base élémentaire à ALI

🌀 Montage suiveur

- L'ALI est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI fonctionne en régime linéaire (Contre-réaction) : $V^+ = V^-$

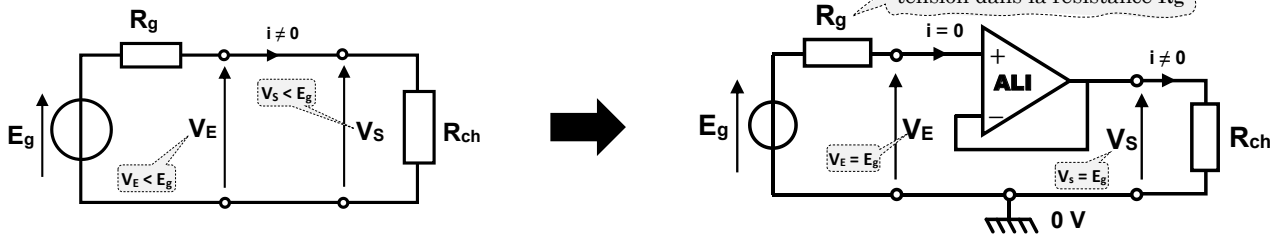
On a : $V^- = V_s$ et $V^+ = V_E$

Sachant que : $V^+ = V^- \rightarrow$ la relation finale : $V_s = V_E$



Ce montage présente une résistance d'entrée infinie et une résistance de sortie nulle, garantissant une parfaite adaptation entre l'entrée et la sortie.

Application : Adaptation d'impédance



Le montage (2) est utilisé comme **adaptateur d'impédance** entre un générateur et une charge. Il permet de connecter une charge R_{ch} à un générateur de résistance interne élevée R_g ($R_g \gg R_{ch}$) tout en préservant la tension E_g aux bornes de la charge et en rendant le fonctionnement du générateur pratiquement indépendant de la charge.

Montage à amplificateur non-inverseur

- L'ALI est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$

- L'ALI fonctionne en *régime linéaire* $\Rightarrow \epsilon = 0 \Rightarrow V^+ = V^-$

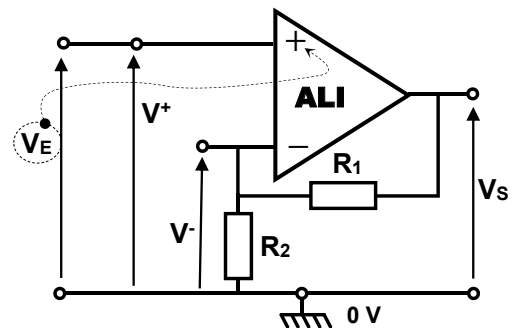
Expression de V^+ : $V^+ = V_E$ (tension des mailles)

Expression de V^- : $V^- = V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (diviseur de tension)

Sachant que : $V^+ = V^- \rightarrow$ la relation finale : $V_s \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_E$

$$\Leftrightarrow V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_E \Leftrightarrow$$

$$\text{d'où : } V_s = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_E$$



L'entrée V_E est appliquée à la borne (+), ce qui indique clairement qu'il s'agit d'un montage à ALI non-inverseur.

Montage à amplificateur inverseur

- L'ALI est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$

- L'ALI fonctionne en *régime linéaire* $\Rightarrow \epsilon = 0 \Rightarrow V^+ = V^-$

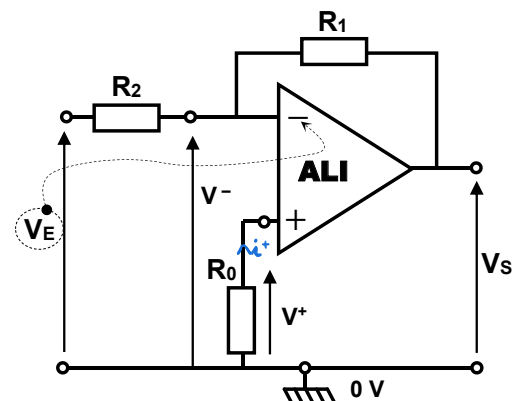
Expression de V^+ : $V^+ = R_0 \cdot i^+ \Rightarrow V^+ = 0$

Expression de V^- : $V^- = \frac{V_E \cdot R_1 + V_s \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ (superposition)

Sachant que : $V^+ = V^- \rightarrow$ la relation finale : $\frac{V_E R_1 + V_s R_2}{R_1 + R_2} = 0$

$$\Leftrightarrow V_E \cdot R_1 + V_s \cdot R_2 = 0$$

$$\text{d'où : } V_s = -\frac{R_1}{R_2} \cdot V_E$$



L'entrée V_E est appliquée à la borne (-), ce qui indique clairement qu'il s'agit d'un montage à ALI inverseur.

4. Fonctions (Opérations) analogiques avancées

Les amplificateurs opérationnels (ALI) permettent de réaliser de nombreuses opérations analogiques. En plus des fonctions linéaires élémentaires, telles que la sommation, la soustraction, l'inversion ou l'amplification, ils peuvent également effectuer des opérations plus élaborées, comme l'intégration, la dérivation, la multiplication et d'autres traitements analogiques. Grâce aux progrès technologiques, les performances des ALI actuels sont très proches de celles du modèle idéal, ce qui simplifie leur étude et leur mise en œuvre dans de nombreuses applications.

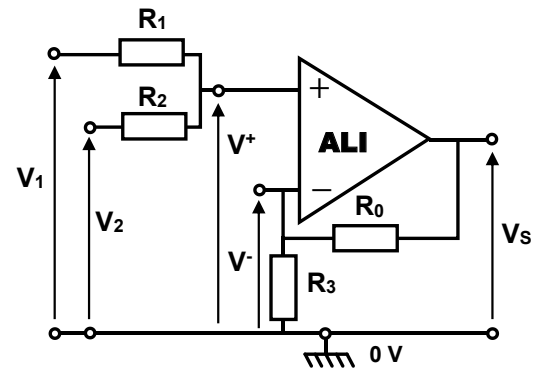
Montage sommateur à ALI

- L'ALI est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI fonctionne en régime linéaire : $V^+ = V^-$
- Comme l'entrée de l'ALI est idéale ($i^+ = 0$), on applique le théorème de Millman : $V^+ = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$, d'où : $V^+ = \frac{R_2 V_1 + R_1 V_2}{R_1 + R_2}$
- Comme $i^- = 0$, on applique le diviseur de tension : $V^- = \frac{R_3}{R_0 + R_3} \cdot V_s$
- En régime linéaire d'un ALI parfait : $V^+ = V^-$, cette égalité permet ensuite de déterminer directement l'expression de la tension de sortie :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_0}{R_3}\right) \frac{R_2 V_1 + R_1 V_2}{R_1 + R_2}$$



Sommateur non inverseur



Remarque : Si $R_0 = R_3$ et $R_1 = R_2$, On obtient : $V_s = V_1 + V_2$

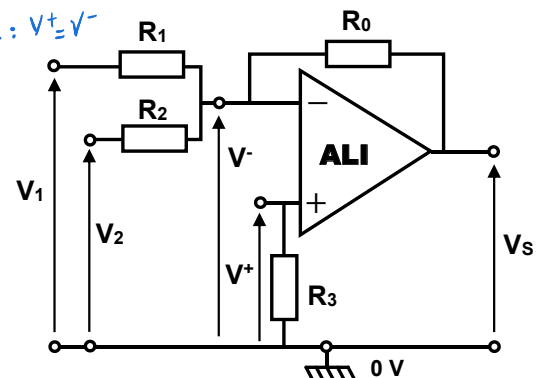
* ALI parfait $\Rightarrow i^+ = i^- = 0$ et fonctionne en régime linéaire : $V^+ = V^-$

$\Rightarrow V^+ ? \Rightarrow V^+ = R_3 \cdot i^+ = 0$ (loi d'ohm)

$$\Rightarrow V^- ? \Rightarrow V^- = \frac{\frac{V_s}{R_0} + \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (\text{MILMAN})$$

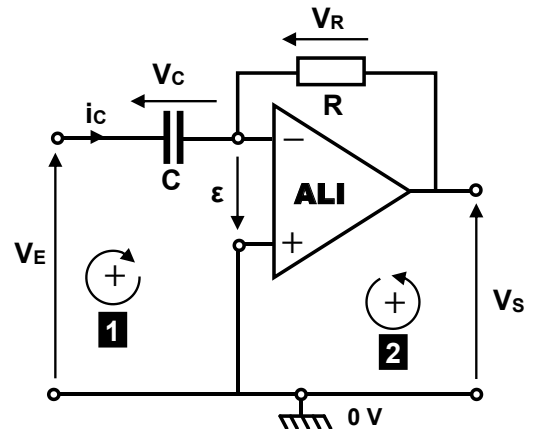
sachant que : $V^+ = V^- \Rightarrow \frac{V_s}{R_0} + \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = 0$

d'où : $V_s = -R_0 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$ / si $R_0 = R_1 = R_2 \Rightarrow V_s = -(V_1 + V_2) \Rightarrow$ sommateur inverseur



Montage dérivateur

- L'ALI est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI fonctionne en régime linéaire : $V^+ = V^- \Rightarrow \varepsilon(t) = 0$
- Appliquons la loi des mailles en (1) : $v_E(t) - v_C(t) + \varepsilon(t) = 0 \Rightarrow v_E(t) = v_C(t)$
- Appliquons la loi des mailles en (2) : $\Rightarrow v_s(t) + v_R(t) + \varepsilon(t) = 0$
 $\Rightarrow v_s(t) = -v_R(t) = -R \cdot i_C(t)$ Avec $i_C(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt}$
- D'où : $v_s(t) = -R \cdot C \cdot \frac{dv_E(t)}{dt}$



Montage intégrateur

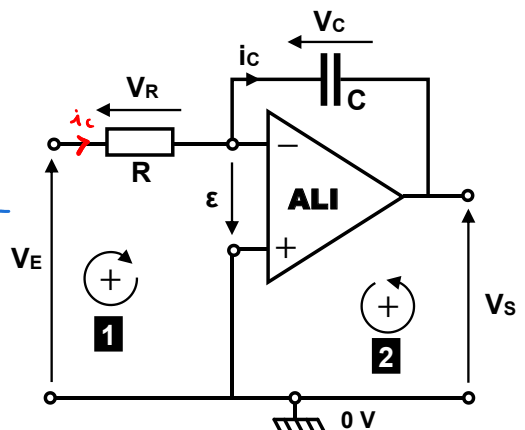
- L'ALI est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI fonctionne en régime linéaire : $V^+ = V^- \Rightarrow \varepsilon(t) = 0$

* maille 1 : $V_E - V_R + \varepsilon = 0 \Rightarrow V_E = R \cdot i_C$

* maille 2 : $V_s + V_C + \varepsilon = 0 \Rightarrow V_C = -V_s$ avec : $i_C = C \cdot \frac{dV_C}{dt} = -C \cdot \frac{dV_s}{dt}$

Or : $V_E = R \cdot i_C = -RC \cdot \frac{dV_s}{dt} \Rightarrow \frac{dV_s}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot V_E$

d'où : $V_s(t) = -\frac{1}{RC} \int V_E(t) \cdot dt$



Remarque : Les montages que nous avons étudiés influenceront la **forme des signaux** qui leur sont appliqués, car leur action variera en fonction de la **fréquence**. Dans ce contexte, on dit que ces montages sont des **filtres fréquentiels**, car leur réponse dépend de la fréquence des signaux d'entrée, **modifiant ainsi leur forme** en dérivant ou intégrant les signaux appliqués.

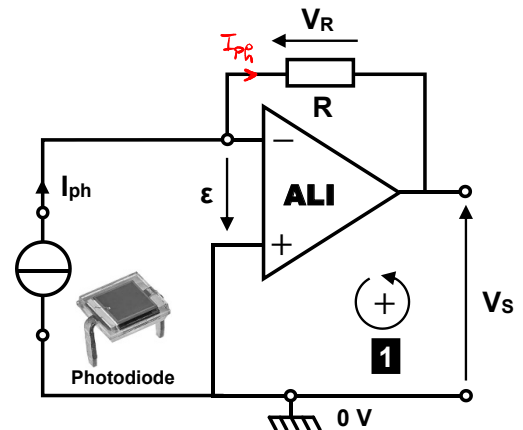


Montage de convertisseur courant – tension à ALI

- L'ALI est supposé idéal et fonctionne en régime linéaire : $V^+ = V^-$
- Appliquons la loi des mailles en (1) : $V_s + V_R + \varepsilon = 0$
- Expression finale de V_s : $\varepsilon = 0 \Rightarrow V_s = -V_R$

d'où : $V_s = -R \cdot I_{ph}$

Utilisation : Un tel montage peut être utilisé pour **amplifier** et **convertir** le faible courant délivré par une **photodiode** en une tension exploitable, ou comme **étage de conversion courant-tension** à la sortie d'un **convertisseur numérique-analogique (CNA)**.



Note : Il existe également d'autres montages à base d'ALI, non étudiés dans ce cours, tels que les **amplificateurs logarithmiques** et **exponentiels**, utilisés notamment pour réaliser des **multiplieurs analogiques**, ainsi que les **redresseurs de précision sans seuil**, largement employés en électronique.

5. Les amplificateurs d'instrumentation

Les amplificateurs d'instrumentation sont destinés à amplifier avec une **grande précision** de très faibles **tensions différentielles** (de l'ordre du μV ou du mV), généralement issues de capteurs ou de ponts de mesure, comme **le pont de Wheatstone**.

Ils sont constitués de **plusieurs ALI** associés à des résistances de précision et présentent une grande résistance d'entrée, un gain élevé et réglable et surtout un fort **taux de réjection du mode commun (TRMC)**, permettant d'éliminer efficacement les perturbations **communes aux deux entrées**.

En pratique, ils sont souvent disponibles sous forme de **circuits intégrés**, dont le gain peut être réglé à l'aide d'une seule résistance externe : **INA114, INA128, AD620, ...**

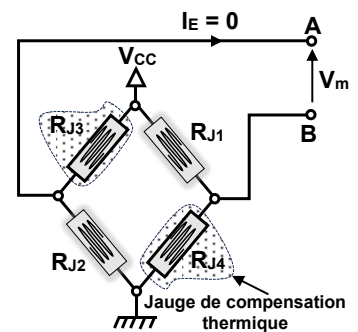


Figure : Capteur de poids à jauge

Amplificateur d'instrumentation à seul ALI

L'**amplificateur d'instrumentation** peut être réalisée à partir d'un **amplificateur différentiel à ALI**, comme indiqué sur le schéma de la **page 7**. Pour simplifier son étude, l'ALI est supposé **parfait** et fonctionne en **régime linéaire**. On a alors : $i^+ = i^- = 0$ et $V^+ = V^-$

V^- ? Appliquons le théorème de superposition

$$V^- = \frac{V_2 \cdot R_1 + V_s \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

V^+ ? Appliquons le diviseur de tension : $V^+ = V_2 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$

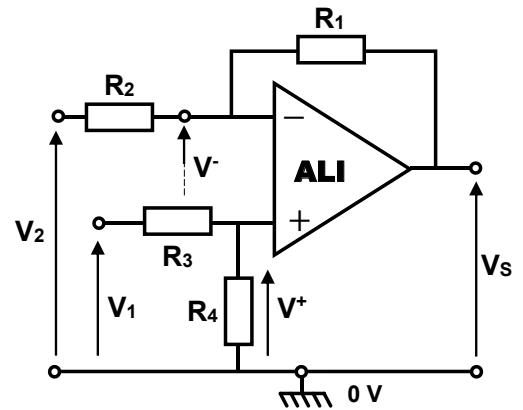
d'où : $V^+ = V^-$

$$\frac{V_2 \cdot R_1 + V_s \cdot R_2}{R_1 + R_2} = V_1 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Finalement : $V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \frac{R_4}{R_2} V_1 - \frac{R_1}{R_2} V_2$

Pour obtenir un amplificateur différentiel équilibré, les rapports des résistances des deux branches doivent être identiques. Un choix simple consiste à prendre $R_1 = R_4$ et $R_2 = R_3$. Cette condition permet d'amplifier uniquement la différence $V_1 - V_2$ et améliore le rejet du mode commun.

$$V_s = \frac{R_1}{R_2} (V_1 - V_2)$$



Limitation : déconseiller de l'utiliser en pratique

Le montage différentiel simple est peu adapté aux mesures d'instrumentation de précision pour plusieurs raisons : ses impédances d'entrée sont dissymétriques, le réglage du gain nécessite de conserver un appariement précis des résistances, et son taux de rejet du mode commun (TRMC) est fortement dépendant du TRMC de l'ALI et de la précision des rapports de résistances.

Amplificateur d'instrumentation à deux ALI

L'amplificateur d'instrumentation à **deux ALI** permet d'amplifier précisément la faible différence entre deux tensions V_1 et V_2 , tout en rejetant le mode commun. Il offre une **forte impédance d'entrée** et un **gain réglable** ajustable à partir d'une **seule résistance à l'extérieur R_g** . Cette structure existe sous forme **monolithique** à des résistances R bien précises, comme le amplificateur d'instrumentation **INA122**, adaptée au conditionnement des capteurs.



Tous les ALI sont supposés **parfaits** et fonctionnent en **régime linéaire**. On a donc $i^+ = i^- = 0$ et $V^+ = V^-$.

- Pour l'ALI1, l'application du théorème de Millman à l'entrée inverseuse donne :

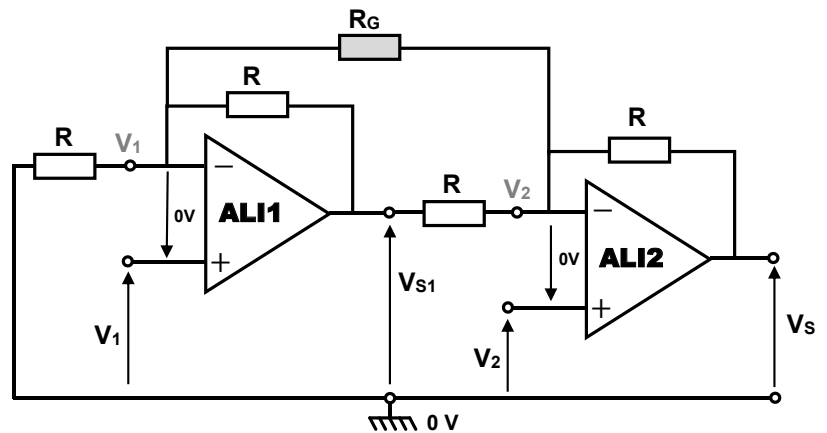
$$V^- = \frac{\frac{V_{s1}}{R} + \frac{V_2}{R_g}}{\frac{2}{R} + \frac{1}{R_g}} = V^+ = V_1$$

On en déduit : $V_{s1} = \left(2 + \frac{R}{R_g}\right) V_1 - \frac{R}{R_g} V_2$

- Pour l'ALI2, le théorème de Millman donne :

$$V^- = \frac{\frac{V_{s1}}{R} + \frac{V_1}{R_g} + \frac{V_s}{R}}{\frac{2}{R} + \frac{1}{R_g}} = V^+ = V_2$$

D'où : $V_s = \left(2 + \frac{R}{R_g}\right) V_2 - V_{s1} - \frac{R}{R_g} V_1$



En remplaçant V_{s1} par son expression précédente et après simplification, on obtient : $V_s = 2 \left(1 + \frac{R}{R_g}\right) (V_2 - V_1)$

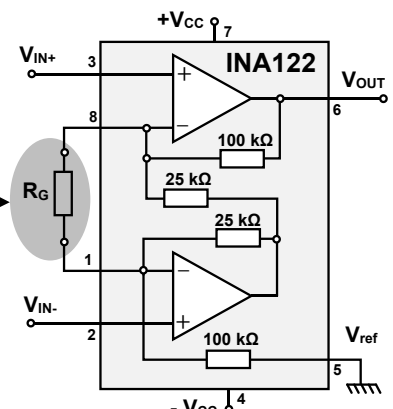
Ainsi, le gain différentiel de l'amplificateur d'instrumentation est : $A_d = 2 \left(1 + \frac{R}{R_g}\right)$

Exemple : Amplificateur d'instrumentation INA122

Le gain est ajustable par la résistance externe R_g , l'expression de sortie V_{OUT} :

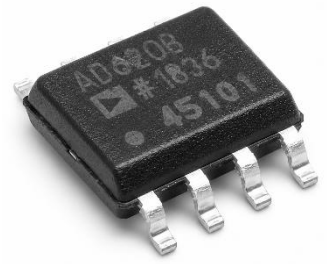
$$V_{OUT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \cdot G \quad \text{Avec} \quad G = 5 + \frac{200 \text{ k}\Omega}{R_g}$$

Limitation : L'amplificateur d'instrumentation à deux ALI présente certaines limitations : sa structure est **moins symétrique** et son **rejet du mode commun** est généralement **moins performant**, notamment lorsque la fréquence augmente. Sa plage de fonctionnement peut également être plus limitée. Cependant, cette structure reste intéressante pour les applications nécessitant **simplicité**, **faible consommation** et **coût** réduit, comme certains conditionnements de capteurs.



Amplificateur d'instrumentation à trois ALI

L'amplificateur d'instrumentation à trois ALI est une structure **entièrement symétrique** destinée à amplifier avec précision une **faible différence de tension** entre V_1 et V_2 . Les deux premiers ALI assurent une forte impédance d'entrée, tandis que le troisième réalise la soustraction différentielle. Cette architecture offre un excellent rejet du mode commun, un gain réglable et de meilleures performances en précision. Elle est largement utilisée dans des circuits intégrés comme l'INA114 et l'AD620.



Hypothèses : Tous les ALI sont supposés **parfaits** et fonctionnent en **régime linéaire**. On a donc $i^+ = i^- = 0$ et $V^+ = V^-$.

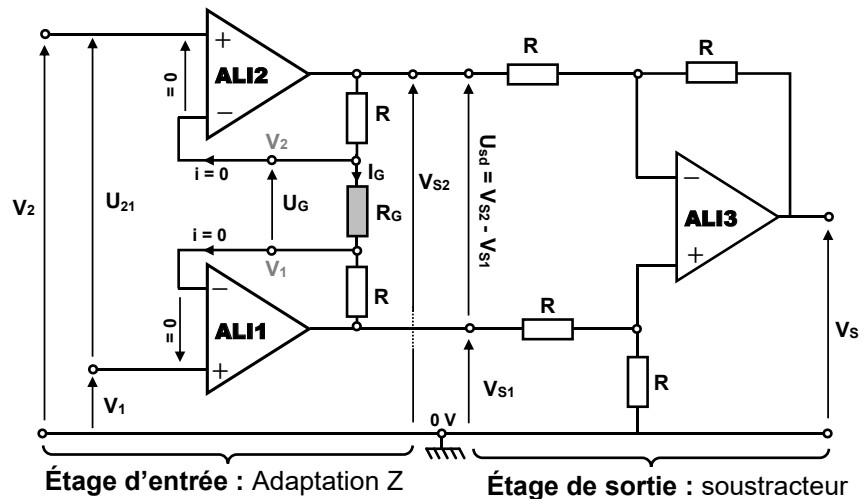
Etude de l'étage de sortie

L'objectif est d'exprimer la tension V_s de sortie en fonction de la tension différentielle à la sortie des deux ALI 1&2 notée U_{sd} :

On remarque que l'étage de sortie est un montage soustraction (déjà étudié) donc V_s :

$$V^- = \frac{V_{s2} + V_s}{2} \text{ et } V^+ = \frac{V_{s1}}{2}$$

Comme $V^+ = V^- \Rightarrow V_s = V_{s1} - V_{s2}$



Etude de l'étage de sortie

L'objectif est d'exprimer la tension différentielle ($V_{s2} - V_{s1}$) en fonction de la tension U_G et puis en fonction des tensions d'entrée V_1 et V_2

- Expression de Courant i_G en fonction de R_G et U_G :

On a d'après la loi d'ohm : $U_G = R_G \cdot i_G$

d'où : $i_G = \frac{U_G}{R_G}$ avec : $U_G = V_2 - V_1$

- Expression de la tension U_{sd} en fonction de R , R_G , et i_G puis en fonction de R , R_G , et U_G :

On a : $U_{sd} = V_{s2} - V_{s1} \Rightarrow U_{sd} = (2R + R_G) \cdot i_G$ (loi d'ohm)

Comme $i_G = \frac{U_G}{R_G} \Rightarrow U_{sd} = (2R + R_G) \cdot \frac{U_G}{R_G}$ d'où :

$$U_{sd} = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \cdot U_G$$

- Expression de tension différentielle $V_{s2} - V_{s1}$ en fonction de R , R_G , V_1 et V_2

On a : $U_{sd} = V_{s2} - V_{s1} = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \cdot U_G$ et $U_G = V_2 - V_1$

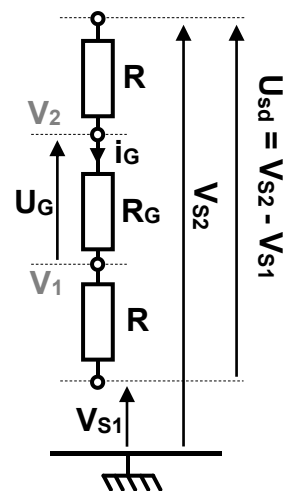
d'où : $V_{s2} - V_{s1} = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \cdot (V_2 - V_1)$

Expression finale $V_s = f(V_1 \text{ et } V_2)$

A partir des relations trouvées dans les deux étages, l'expression de la tension de sortie V_s devient :

On a : $V_s = V_{s1} - V_{s2} \Rightarrow V_s = -\left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) (V_2 - V_1)$

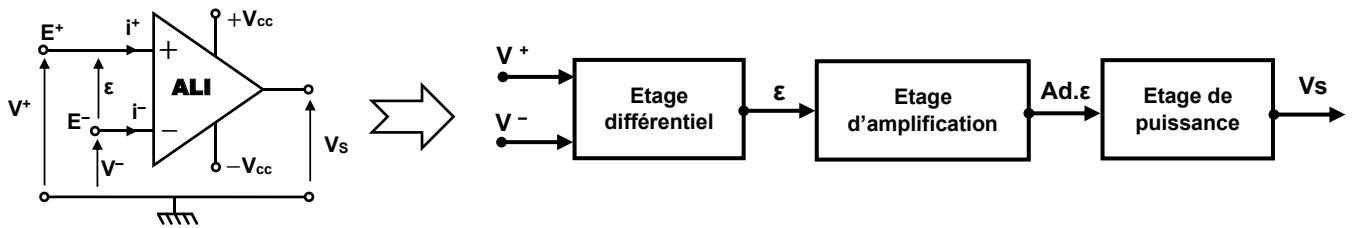
d'où : $V_s = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \cdot (V_1 - V_2) \Rightarrow V_s = G \cdot (V_1 - V_2)$ avec : $G = 1 + \frac{2R}{R_G}$



IV. Etude fréquentielle des amplificateurs linéaires intégrés en régime linéaire.

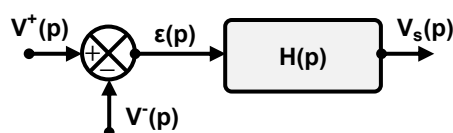
1. Modèle fréquentiel de l'amplificateur linéaire intégré

La réponse en fréquence d'un amplificateur opérationnel en boucle ouverte dépend des éléments internes, tels que les capacités parasites présentes à différents étages, ainsi que de l'effet Miller. Un amplificateur réel peut être représenté par le schéma bloc suivant :



Les trois étages de l'amplificateur forment un filtre de troisième ordre, ce qui entraîne un déphasage maximum de **270°**. Un tel système peut devenir instable en présence d'une contre-réaction (boucle fermée).

Pour simplifier l'étude, la plupart des amplificateurs opérationnels sont compensés en fréquence, c'est-à-dire qu'un condensateur interne permet d'obtenir une réponse globalement de premier ordre. L'amplificateur opérationnel peut ainsi être modélisé par :



La fonction de transfert en boucle ouverte FTBO :

$$H(p) = \frac{V_s(p)}{\varepsilon(p)} = \frac{A_o}{1 + \frac{1}{\omega_o} p}$$

La fonction de transfert de l'amplificateur opérationnel équivaut à celle d'un filtre passe-bas de premier ordre, où **Ao** représente le **gain différentiel** (ou **Ad**) et **ωo** la **pulsation de coupure** en boucle ouverte. Ces deux paramètres, appelés **produit gain-bande (GBW)** et **gain en boucle ouverte (AOL)**, sont fournis par le fabricant de l'amplificateur.

2. Gain différentiel et produit gain-bande

Dans cette partie, l'étude est basée sur l'amplificateur opérationnel **TL081**, dont les principales caractéristiques sont présentées ci-dessous.

For $V_S = (V_{CC+}) - (V_{CC-}) = 4.5 \text{ V to } 40 \text{ V } (\pm 2.25 \text{ V to } \pm 20 \text{ V})$ at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ connected to $V_S / 2$, $V_{CM} = V_S / 2$, and $V_{OUT} = V_S / 2$, unless otherwise noted.

PARAMETER		TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
OPEN-LOOP GAIN							
A _{OL}	Open-loop voltage gain	V _S = 40 V, V _{CM} = V _S / 2, (V _{CC+}) + 0.3 V < V _O < (V _{CC+}) – 0.3 V	T _A = –40°C to 125°C	118	125		dB
A _{OL}	Open-loop voltage gain	V _S = 40 V, V _{CM} = V _S / 2, R _L = 2 kΩ, (V _{CC+}) + 1.2 V < V _O < (V _{CC+}) – 1.2 V	T _A = –40°C to 125°C	115	120		dB
FREQUENCY RESPONSE							
GBW	Gain-bandwidth product				5.25		MHz
SR	Slew rate	V _S = 40 V, G = +1, C _L = 20 pF			20		V/μs

À partir de document constructeur, relever :

- Le gain différentiel en boucle ouverte **Ao** : $m_a: G_o = 125 \text{ dB} \Rightarrow G_o = 20 \log(A_o) \Rightarrow A_o = 10^{\frac{G_o}{20}} \Rightarrow A_o = 1,77 \cdot 10^6$
- Le produit gain-bande **G.B** : $m_a: G.B = 5,25 \text{ MHz}$

On en déduit la fréquence de coupure en boucle ouverte **Fco** : $F_{co} = \frac{GB}{A_o}$

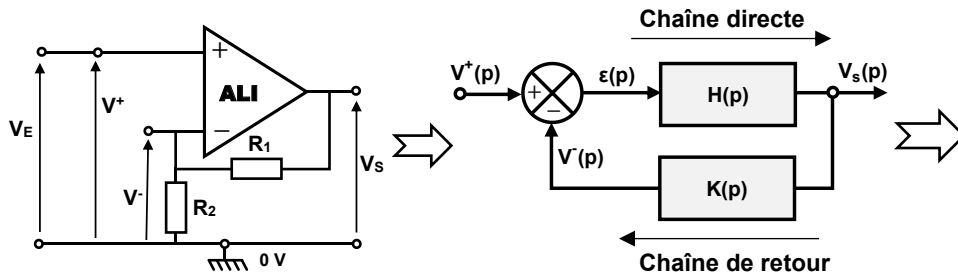
d'où : $F_{co} = 1,26 \text{ Hz}$

$G.B = A_o \cdot f_{co}$

Remarque : En boucle ouverte (B.O), la bande passante d'un amplificateur opérationnel est généralement très faible. Son utilisation en boucle fermée (B.F) permet d'augmenter considérablement la bande passante, au prix d'une diminution du gain.

3. La réponse en fréquence en boucle fermée (le cas d'un montage non inverseur)

Soit le montage non inverseur suivant :



La fonction de transfert de la chaîne de retour :

On a : $K(p) = \frac{V^-(p)}{V_S(p)}$
 donc : $V^-(p) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_S(p)$
 d'où : $\frac{V^-(p)}{V_S(p)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = K(p)$

- o **Question :** démontrer à partir du schéma bloc que la fonction du transfert en boucle fermée $F(p) = \frac{V_S(p)}{V_E(p)}$, peut le mettre

sous la forme : $F(p) = \frac{A_1}{1 + \frac{1}{\omega_1} p}$ avec $A_1 = 1 + \frac{R_1}{R_2}$ et $f_{c1} = f_{co} \cdot A_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ sachant que $A_0 \gg 1$

On a : $F(p) = \frac{H(p)}{1 + K(p) \cdot H(p)} = \frac{\frac{A_0}{1 + \frac{1}{\omega_0} p}}{1 + \frac{A_0}{1 + \frac{1}{\omega_0} p} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$

$\Leftrightarrow F(p) = \frac{A_0 (R_1 + R_2)}{(1 + \frac{1}{\omega_0} p)(R_1 + R_2) + A_0 \cdot R_2}$

$\Leftrightarrow F(p) = \frac{A_0 (R_1 + R_2)}{A_0 \cdot R_2 + (R_1 + R_2) + \frac{R_1 + R_2}{\omega_0} p}$

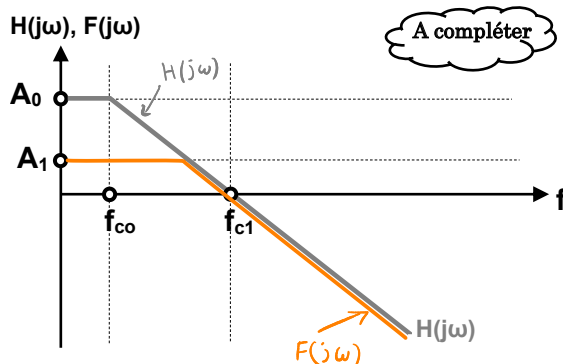
Or : $A_0 \gg 1 \Rightarrow A_0 R_2 \gg R_1 + R_2$
 $\hookrightarrow F(p) \approx \frac{A_0 (R_1 + R_2)}{A_0 R_2 + \frac{R_1 + R_2}{\omega_0} p} \approx \frac{\frac{A_0 (R_1 + R_2)}{A_0 R_2}}{1 + \frac{1}{\frac{A_0 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \omega_0} p}$

d'où : $F(p) \approx \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{1}{\frac{A_0 R_2}{R_1 + R_2} \cdot \omega_0} p} = \frac{A_1}{1 + \frac{1}{\omega_1} p}$

avec : $\omega_1 = A_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \omega_0$ et $A_1 = 1 + \frac{R_1}{R_2}$

d'où : $f_{c1} = f_{co} \cdot A_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Le diagramme du gain des deux fonctions de transfert $H(p)$ et $F(p)$



Remarque :

En boucle fermée, la bande passante est plus grande qu'en boucle ouverte. Il faut donc faire attention à ce que la fréquence du signal appliqué à l'entrée du montage à ALI sera inférieure à cette fréquence de coupure f_{c1} pour ne l'atténuer pas :

$f_{sig} \ll f_{c1}$