

Les amplificateurs linéaires intégrés

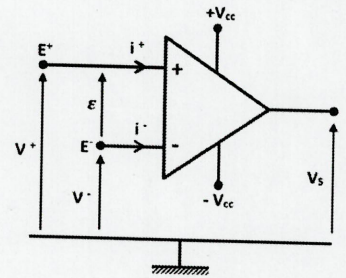
I. Introduction

Lors de son invention en 1965. Les ALI sont les circuits intégrés analogique les plus utilisés car ils permettent d'exécuter une large gamme de fonctions linéaires depuis la simple amplification jusqu'au calcul analogique complexe (intégration, dérivation, multiplication, puissance,). On peut aussi l'exploiter dans des montages non linéaires tels que : redresseurs sans seuil, comparateurs, multivibrateur astable.

II. Présentation de l'amplificateur opérationnel

1- Symbole et brochage

Lors de son invention en 1965, l'amplificateur « ALI ou AOP » servait surtout à faire des opérations arithmétiques (addition, soustraction, intégration, dérivation,), d'où son nom. C'est composant réalisé à base des transistors et des composants de l'électronique de base



Alimentation

Un ALI peut alimenter par deux types d'alimentations :

- Alimentation symétrique : par exemple $+V_{cc} = 15\text{ V}$ et $-V_{cc} = -15\text{ V}$.
- Alimentation asymétrique (ou mono tension) : $-V_{cc} = 0\text{ V}$ et $+V_{cc} = 15\text{ V}$ ou inversement

Deux bornes d'entrée

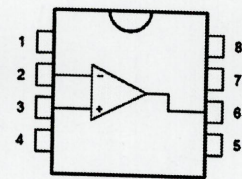
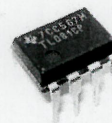
- $E+$: Entrée non inverseuse (+)
- $E-$: Entrée inverseuse (-)

Une borne de sortie S

- La tension de sortie est notée V_s est limitée à l'intervalle $[+V_{cc}, -V_{cc}]$.
- ALI réel : V_s évolue dans l'intervalle $[+V_{sat}, -V_{sat}]$ avec $V_{sat} < V_{cc}$

Exemple : TL081

Caractéristiques d'amplificateurs	
Gain en tension (boucle ouverte)	200000
Courant d'entrée	30 pA
Résistance d'entrée	$10^{12}\ \Omega$



- 1 - Offset Null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 - $-V_{cc}$
- 5 - Offset Null 2
- 6 - Output
- 7 - $+V_{cc}$
- 8 - N.C.

2- Amplificateur opérationnel parfait ou idéal

Hypothèses issues du comportement parfait :

- Une résistance d'entrée différentielle infinie, implique des courants d'entrée nuls : $i^+ = i^- = 0$
- Une résistance de sortie nulle
- Une amplification différentielle en boucle ouverte A_d infinie quelle que soit la fréquence

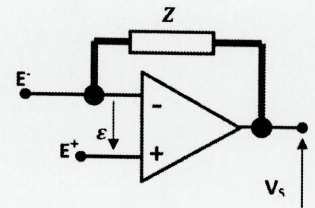
3- Régime de fonctionnement d'un AOP

- **Régime linéaire** : amplification (l'ALI permet d'amplifier le différentiel de tension à l'entrée)
- **Régime non linéaire** : saturation (l'ALI est utilisé comme comparateur des entrées).

III. Montages d'ALI en régime linéaire

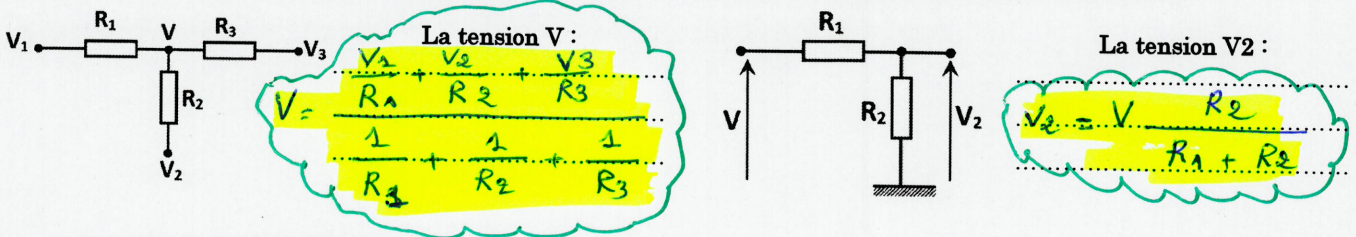
1- Caractéristique de l'AOP en régime linéaire

Un moyen simple permettant de savoir si un AOP 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**.



2- Outil de calcul

Ce régime exige la connaissance de deux théorèmes à savoir le diviseur de tension et théorème de MILMAN.

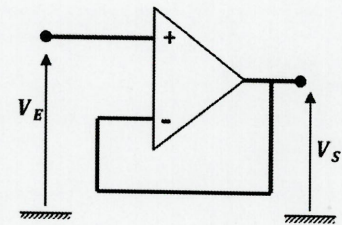


3- Les montages amplificateurs fondamentaux

Dans ce régime le but est de chercher la **relation entrée - sortie** $V_S = f(V_E)$

3.1. Amplificateur suiveur

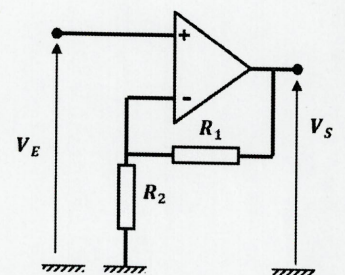
- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné en régime linéaire : $V^+ = V^-$
- On a : $V^- = V_S$ et $V^+ = V_E$
- Sachant que : $V^+ = V^- \rightarrow$ la relation finale : $V_S = V_E$



Le gain de ce montage est égal à 1 mais présente l'avantage que la résistance d'entrée est infinie et la résistance de sortie, il réalise également **l'adaptation de l'impédance**, que la résistance de sortie de générateur n'influence pas sur la tension appliquée à la charge.

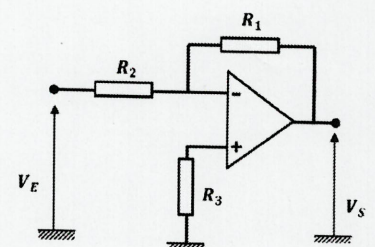
3.2. Amplificateur non-inverseur

- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné en régime linéaire
- Expression de V^+ : $V^+ = V_E$
- Expression de V^- : $V^- = V_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ (diviseur de tension)
- Sachant que : $V^+ = V^- \rightarrow$ la relation finale :
- $V^+ = V^- \Rightarrow V_S = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_E$
- La fonction réalisée : amplificateur non inverseur



3.3. Amplificateur inverseur

- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné en régime linéaire
- Expression de V^+ : $V^+ = 0$
- Expression de V^- : $V^- = \frac{V_E R_1 + V_S R_2}{R_1 + R_2}$
- Sachant que : $V^+ = V^- \rightarrow$ la relation finale :
- $V^+ = V^- \Rightarrow V_S = -\frac{R_1}{R_2} V_E$
- La fonction réalisée : Amplificateur inverseur



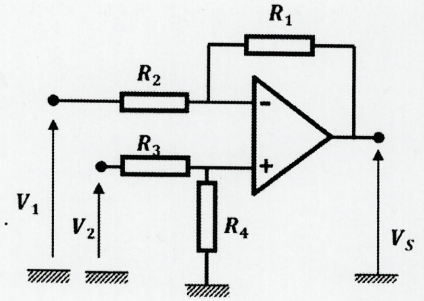
3.4. Amplificateur de différence (ou soustracteur)

- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné en régime linéaire : $V^+ = V^-$

$V^+ = \frac{V_2 R_4}{R_3 + R_4}$ (Diviseur de tension)

$V^- = \frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2}$ (superposition)

$V^+ = V^- \Rightarrow V_1 = \frac{R_4}{R_2} \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_1}{R_2} V_2$



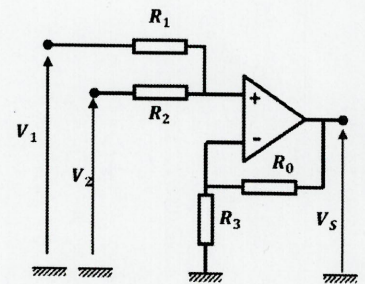
3.5. Amplificateur de somme (ou sommateur)

- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné en régime linéaire : $V^+ = V^-$

$V^- = V_s \frac{R_3}{R_0 + R_3}$ / $V^- = \frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2}$

$V_s \frac{R_3}{R_0 + R_3} = \frac{V_1 R_2 + V_2 R_1}{R_1 + R_2}$

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



3.6. Les montages dérivateur et intégrateur

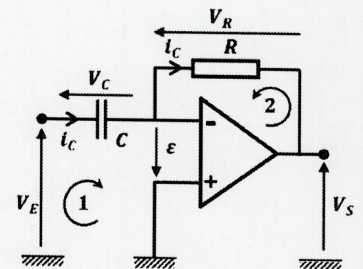
Les montages étudiés maintenant vont avoir un effet sur la forme des signaux qui leur seront appliqués, car leur action ne sera pas la même suivant la fréquence. On dit dans ce cas que les montages

3.6.1. Montage dérivateur

- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné 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 $i_C(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} \rightarrow v_s(t) = -RC \cdot \frac{dv_E(t)}{dt}$



3.6.2. Montage intégrateur

- L'AOP est supposé idéal : $i^+ = i^- = 0$
- L'AOP est fonctionné en régime linéaire : $V^+ = V^- \rightarrow \varepsilon(t) = 0$

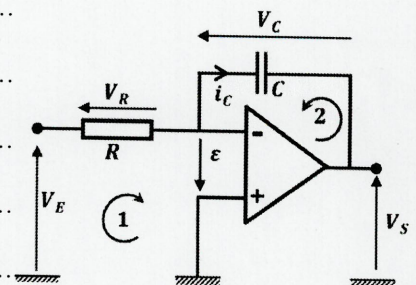
* d'après la maille 1 : $v_E - R i_C = 0 \Rightarrow i_C = \frac{v_E}{R}$

* d'après maille 2 : $V_s + v_C = 0 \Rightarrow v_C = -V_s$

et par $i_C = \frac{dv_C}{dt} \times C = -C \frac{dV_s}{dt}$

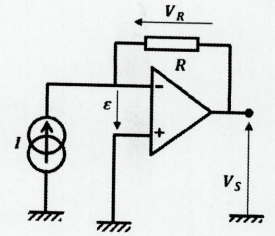
donc : $i_C = \frac{v_E}{R} = -C \frac{dV_s}{dt} \Rightarrow \frac{dV_s}{dt} = -\frac{v_E}{RC}$

d'où : $V_s(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t v_E(t) dt$



3.7. Amplificateur courant – tension

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



Un tel montage peut être utilisé pour amplifier le courant d'une photodiode

4- Dimensionnement des éléments du montage à ALI

Les éléments du montage à ALI (Résistance) sont dimensionnés à partir d'un cahier des charges qui fixe un gain en tension pour que la tension amplifiée soit adaptée au circuit de traitement numérique.

Exemple : système exosquelette (Acquérir l'intention de la mise en mouvement)

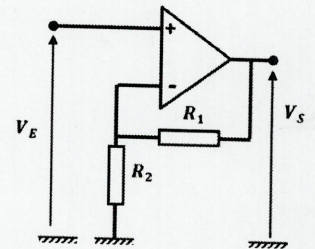
L'exosquelette est un appareil qui permet à une personne de soulever des charges lourdes et diminuer considérablement les efforts à fournir sans la moindre fatigue.



❖ **Objet d'étude** : amplification de signal électromyogramme EMG

Un électromyogramme (EMG) est un potentiel électrique généré au niveau des fibres musculaires quand les muscles sont contractés. Il permet d'obtenir des informations sur l'état des muscles. Pour détecter ces signaux, on utilise les électrodes de surface sont fixées sur la peau au niveau du muscle ciblé. Elles fournissent le signal électrique est fortement bruité et de faible amplitude de **10mV maximum**.

Pour cette raison, le signal EMG est amplifié par un amplificateur à ALI donnée ci-après :



❖ **Exigence d'amplification**

La tension de sortie d'amplificateur doit être au maximum de 3V, pour ne pas dépasser la tension de convertisseur CAN.

Question 1 : calculer le gain en tension que doit réaliser l'amplificateur à ALI pour répondre au cahier des charges.

..... $G = \frac{V_s}{V_e} \Rightarrow G = \frac{3}{10 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow G = 300$

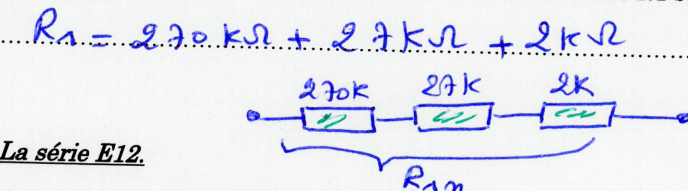
Question 2 : en se basant sur l'expression du montage trouvée précédemment, déduire l'expression du gain G.

..... sachant que : $V^- = (1 + \frac{R_1}{R_2}) V_e \Rightarrow G = \frac{V_s}{V_e} \Rightarrow G = 1 + \frac{R_1}{R_2}$

Question 3 : calculer le rapport R_1/R_2 puis déduire la valeur de R_1 si $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$;

..... on $G = 300 \Rightarrow 1 + \frac{R_1}{R_2} = 300 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 299$
 si $R_2 = 1 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_1 = 299 R_2 \Rightarrow R_1 = 299 \text{ k}\Omega$

Question 4 : donner la valeur normalisée de la résistance R_1 suivant la série E12.



La série E12.

1,0 ; 1,2 ; 1,5 ; 1,8 ; 2,2 ; 2,7 ; 3,3 ; 3,9 ; 4,7 ; 5,6 ; 6,8 ; et 8,2.

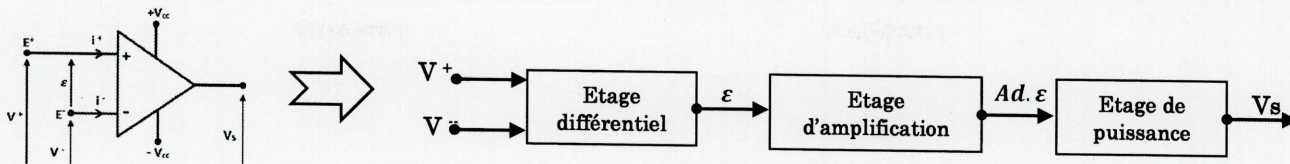
Exemple : $R_a = 13\Omega$, $R_b = 550\Omega$, $R_c = 8,24 \text{ k}\Omega$,

Les valeurs normalisées choisies : $R_{an} = 12\Omega$, $R_{bn} = 560\Omega$, $R_{cn} = 8,2 \text{ k}\Omega$

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

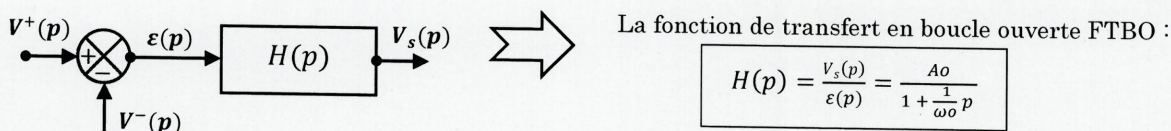
1. Modèle fréquentiel de l'amplificateur linéaire intégré

La réponse en fréquence d'un ALI en boucle ouverte dépend des éléments internes comme les parasites capacitifs situés aux différents étages et ainsi à l'effet de Miller. Un amplificateur réel peut schématiser par le schéma bloc suivante :



Les trois étages correspondent à un filtre de troisième ordre et qui donne, par conséquent un déphasage maximum de 270°. Un tel système peut devenir instable avec 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 donne une réponse globalement du premier ordre, donc l'ALI peut modéliser par :



La fonction de transfert de l'ALI est équivalente à une fonction de transfert d'un filtre passe bas premier ordre avec Ao est le gain différentiel (ou Ad) et ωo la pulsation de coupure de l'ALI en BO. Les deux paramètres sont donnés par le constructeur de l'ALI, ils sont nommés par le produit gain-bande **GBW** et le gain en boucle ouverte **AoL**.

2. Gain différentiel et Produit gain bande

Dans cette partie, on va baser l'étude sur l'amplificateur ALI TL081, et leurs caractéristiques sont présentées en bas :

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	$V_S = 40 \text{ V}, V_{CM} = V_S / 2, (V_{CC-}) + 0.3 \text{ V} < V_O < (V_{CC+}) - 0.3 \text{ V}$	$T_A = -40^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	118	125	dB
A_{oL}	Open-loop voltage gain	$V_S = 40 \text{ V}, V_{CM} = V_S / 2, R_L = 2 \text{ k}\Omega, (V_{CC-}) + 1.2 \text{ V} < V_O < (V_{CC+}) - 1.2 \text{ V}$	$T_A = -40^\circ\text{C to } 125^\circ\text{C}$	115	120	dB
FREQUENCY RESPONSE						
GBW	Gain-bandwidth product		5.25		MHz	
SR	Slew rate	$V_S = 40 \text{ V}, G = +1, C_L = 20 \text{ pF}$	20		V/ μs	

A partir de document constructeur :

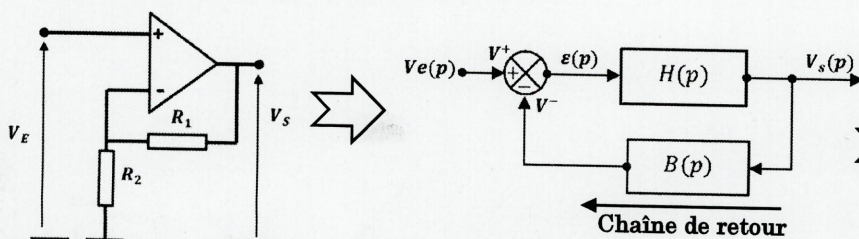
- Le gain différentiel Ao: *ln. range ε. Ao? ⇒ G_o = 120dB ⇒ Ao = 10^{6/20} = 10⁶*
- Le produit gain bande GB: *G × B = 5.25 MHz*

Alors la fréquence de coupure en boucle ouverte fco : *f_{co} = GB / Ao ⇒ f_{co} = 5.25 MHz*

Remarque : *La bande passante de l'AOP en B.O. est très courte!*

3. La réponse en fréquence en boucle fermée (montage non inverseur)

Soit le montage non inverseur suivant :



La fonction de transfert de la chaîne de retour :

$B(p) = \frac{V^-}{V_S}$
 $\Rightarrow V^- = V_S \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
 d'où : $B(p) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

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 : $F(p) = \frac{A1}{1 + \frac{1}{\omega_1} p}$ avec $A1 = 1 + \frac{R1}{R2}$ et $f_{c1} = f_c \cdot A_0 \cdot \frac{R2}{R1+R2}$ sachant que $A_0 \gg 1$??

$$F(p) = \frac{H(p)}{1 + B(p) \cdot H(p)}$$

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

$$\Leftrightarrow F(p) = \frac{A_0 (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) (1 + \frac{p}{\omega_0}) + R_2 A_1}$$

$A_0 \gg 1 \Rightarrow$ on néglige $(R_1 + R_2)$ devant $R_2 A_0$

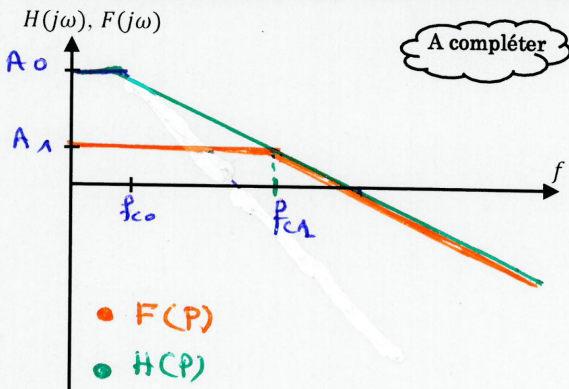
$$\Rightarrow F(p) = \frac{A_0 (R_1 + R_2)}{R_2 A_0 + \frac{p}{\omega_0} (R_1 + R_2)}$$

$$\Rightarrow F(p) = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{p}{\omega_0 \times A_0 \times R_2}} = \frac{A_1}{1 + \frac{p}{\omega_1}}$$

donc : $A_1 = 1 + \frac{R_1}{R_2}$

$\omega_1 = \omega_0 \cdot A_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

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



Remarque :

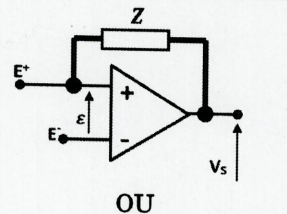
la bande passante en boucle fermée est importante que en B.O., donc en pratique il faut faire attention à la fréquence de signal à l'entrée de l'AOP, cette fréquence $f_{\text{signal}} < f_{c1}$

V. Les montages à ALI en régime saturé (non linéaire)

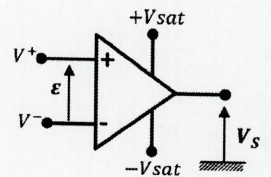
1. Conditions de fonctionnement en régime saturé

Un AOP est fonctionné en régime non linéaire si :

- o L'AOP ne présente pas de réaction, il est donc monté en boucle ouverte
- o L'AOP présente une réaction positive (bouclage de la sortie S sur l'entrée E+)
- o La tension différentielle n'est plus nulle $V^+ \neq V^-$



OU



La sortie ne prend que deux valeurs :

- o Si $\epsilon > 0$ donc $V_s = +V_{sat}$
- o Si $\epsilon < 0$ donc $V_s = -V_{sat}$

2. Fonctions des montages à ALI en Régime Non Linéaire

- o **Comparateurs :** Permettent de comparer un signal à une ou plusieurs tensions de références.
- o **Multivibrateurs :** Permettent de générer des signaux périodiques ou non.

3. Comparateur à ALI

On distingue deux types de comparateurs :

- o **Comparateurs simple :** Seuil de comparaison unique ;
- o **Comparateurs à hystérésis :** deux seuils de comparaison ;

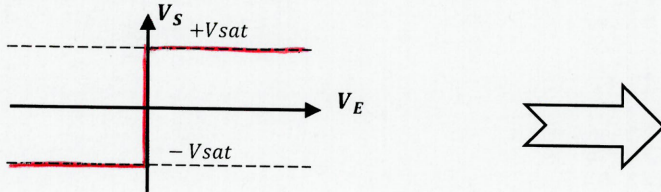
3.1. Comparateur simple (ou un seul seuil) : Comparateur non inverseur

- L'ALI parfait : $i^+ = i^- = 0$ et il fonctionne en régime de saturation : $\epsilon \neq 0$

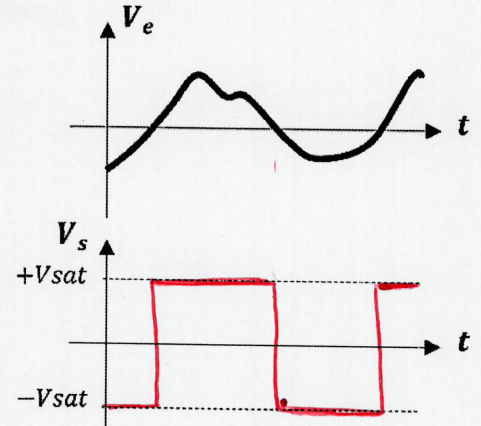
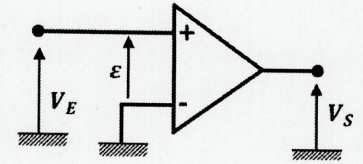
V+	V-	ϵ
V_e	0	V_e

- Analyse de la problématique :
 - Si $V_e > 0 \Rightarrow \epsilon > 0 \Rightarrow V_s = +V_{sat}$
 - Si $V_e < 0 \Rightarrow \epsilon < 0 \Rightarrow V_s = -V_{sat}$

- Caractéristique $V_s = f(V_e)$



- Le seuil de basculement du montage précédent est : $S = 0$



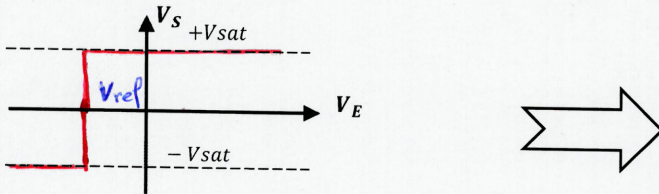
3.2. Comparateur simple (ou un seul seuil) : Comparateur non inverseur avec Vref > 0

- L'ALI parfait : $i^+ = i^- = 0$ et il fonctionne en régime de saturation : $\epsilon \neq 0$

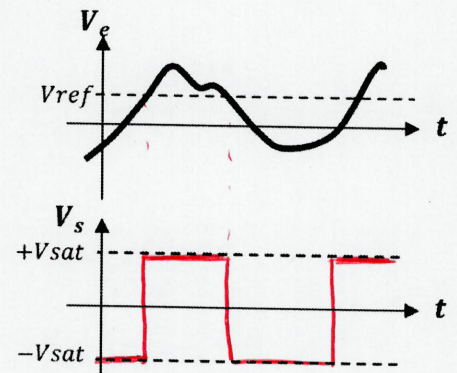
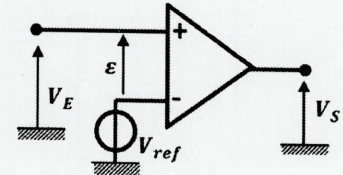
V+	V-	ϵ
V_e	V_{ref}	$V_e - V_{ref}$

- Analyse de la problématique :
 - Si $V_e > V_{ref} \Rightarrow \epsilon > 0 \Rightarrow V_s = +V_{sat}$
 - Si $V_e < V_{ref} \Rightarrow \epsilon < 0 \Rightarrow V_s = -V_{sat}$

- Caractéristique $V_s = f(V_e)$



- Le seuil de basculement du montage précédent est : $S = V_{ref}$



3.3. Comparateurs à hystérésis (ou triggers de schmitt)

Un Trigger de Schmitt est basé sur un amplificateur opérationnel comprenant une contre-réaction positive sur la borne d'entrée (+).

Méthode de résolution

- En se basant sur deux hypothèses successives lorsque $V_s = V_{sat}$ puis $V_s = -V_{sat}$.
- On détermine pour chacune des hypothèses la valeur de V_e qui est équivalente un seuil bas V_b ou un seuil haut V_h

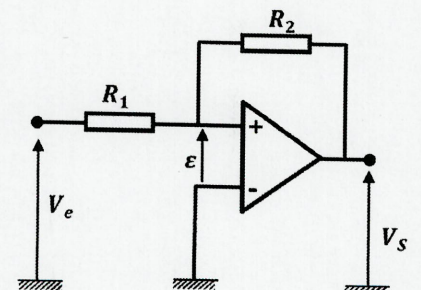
Montage comparateur à hystérésis non inverseur

L'ALI parfait : $i^+ = i^- = 0$ (je peux appliquer la loi de Millman) et fonctionne en régime de saturation : $\epsilon \neq 0$.

- Expression de $\epsilon = V^+ - V^-$:

$$V^+ = \frac{V_s R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2}, \quad V^- = 0$$

$$\epsilon = \frac{V_s R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2}$$



Hypothèse 1 : supposons que $V_s = +V_{sat}$.

La sortie $V_s = +V_{sat}$ tant que $\epsilon > 0$, Cela conduit donc à : $\epsilon = \frac{+V_{sat} R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2}$

Finalement $V_s = +V_{sat}$ tant que :

$\epsilon > 0 \Rightarrow V_e > -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

Hypothèse 2 : supposons que $V_s = -V_{sat}$.

La sortie $V_s = -V_{sat}$ tant que $\epsilon < 0$, Cela conduit donc à : $\epsilon = \frac{-V_{sat} R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2}$

Finalement $V_s = -V_{sat}$ tant que :

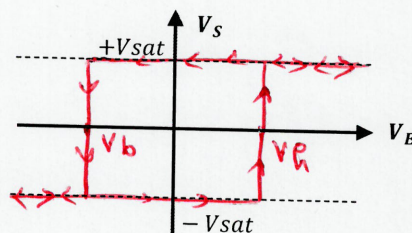
$\epsilon < 0 \Rightarrow V_e < \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

Caractéristique entrée/sortie $V_s=f(V_e)$

Les seuils de basculement de ce montage :

Seuil bas : $V_b = -\frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

Seuil haut : $V_h = \frac{R_1}{R_2} V_{sat} \Rightarrow V_h = -V_b$
seuils symétriques



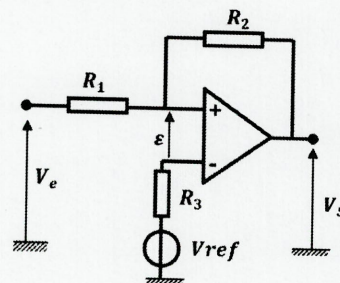
Montage comparateur à hystérésis non inverseur

L'ALI parfait : $i^+ = i^- = 0$ (je peux appliquer la loi de Millman) et fonctionne en régime de saturation : $\epsilon \neq 0$.

Expression de $\epsilon = V^+ - V^-$:

$V^+ = \frac{V_s R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2}$, $V^- = V_{ref}$

$\epsilon = V^+ - V^- \Rightarrow \epsilon = \frac{V_s R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2} - V_{ref}$



Hypothèse 1 : supposons que $V_s = +V_{sat}$.

La sortie $V_s = +V_{sat}$ tant que $\epsilon > 0$, Cela conduit donc à : $\epsilon = \frac{V_{sat} R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2} - V_{ref}$

Finalement $V_s = +V_{sat}$ tant que :

$\epsilon > 0 \Rightarrow \frac{V_{sat} R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2} - V_{ref} > 0 \Rightarrow V_e > V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

Hypothèse 2 : supposons que $V_s = -V_{sat}$.

La sortie $V_s = -V_{sat}$ tant que $\epsilon < 0$, Cela conduit donc à : $\epsilon = \frac{-V_{sat} R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2} - V_{ref}$

Finalement $V_s = -V_{sat}$ tant que :

$\epsilon < 0 \Rightarrow \frac{-V_{sat} R_1 + V_e R_2}{R_1 + R_2} - V_{ref} < 0 \Rightarrow V_e < V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

Caractéristique entrée/sortie $V_s=f(V_e)$

Les seuils de basculement de ce montage :

Seuil bas : $V_b = V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

Seuil haut : $V_h = V_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{R_1}{R_2} V_{sat}$

