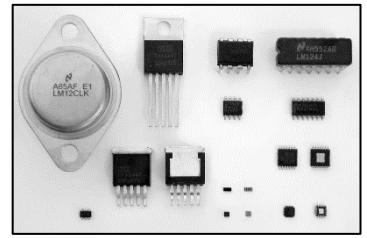


## Chapitre 19 : Amplificateurs linéaires intégrés ALI

### I. Introduction

Inventés en 1965, les amplificateurs linéaires intégrés (ALI) sont devenus les circuits intégrés analogiques les plus utilisés en raison de leur capacité à exécuter une large gamme de fonctions linéaires, allant de la simple amplification aux calculs analogiques complexes tels que l'intégration, la dérivation, la multiplication, ou encore l'élevation à une puissance. Ils peuvent également être utilisés dans des montages non linéaires tels que les redresseurs sans seuil, les comparateurs, et les multivibrateurs astables.

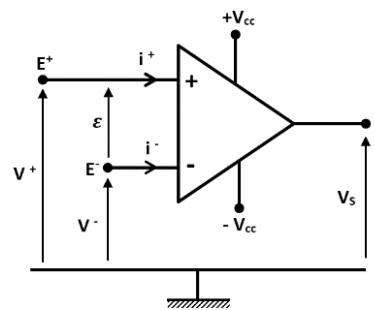


L'objectif de ce cours est de se familiariser avec l'étude des lois entrée/sortie d'un amplificateur, en explorant son comportement en régime linéaire, non linéaire, ainsi qu'en régime fréquentiel, tout en définissant un modèle pour l'amplificateur opérationnel. ;

### 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



#### 1.1. Alimentation

Un amplificateur opérationnel peut être alimenté de deux manières différentes :

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

#### 1.2. Deux bornes d'entrée

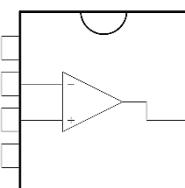
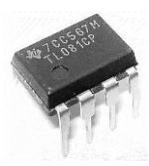
- o  $E^+$  : Entrée non inverseuse (+)
- o  $E^-$  : Entrée inverseuse (-)

#### 1.3. Une borne de sortie S

- o La tension de sortie, notée  $V_s$ , est limitée à l'intervalle  $[+V_{cc}, -V_{cc}]$ .
- o Dans un amplificateur opérationnel réel,  $V_s$  évolue dans l'intervalle  $[+V_{sat}, -V_{sat}]$ , où  $V_{sat}$  est inférieur à  $V_{cc}$ .

#### 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 :

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

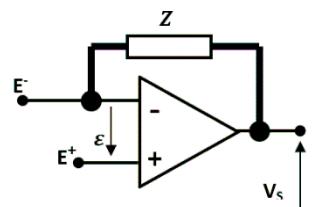
#### 3- Régime de fonctionnement.

- o **Régime linéaire** : amplification (l'ALI permet d'amplifier la différence de tension entre ses entrées)
- o **Régime non linéaire** : saturation (l'amplificateur opérationnel fonctionne comme un comparateur des tensions d'entrée).

### III. Montages d'ALI en régime linéaire

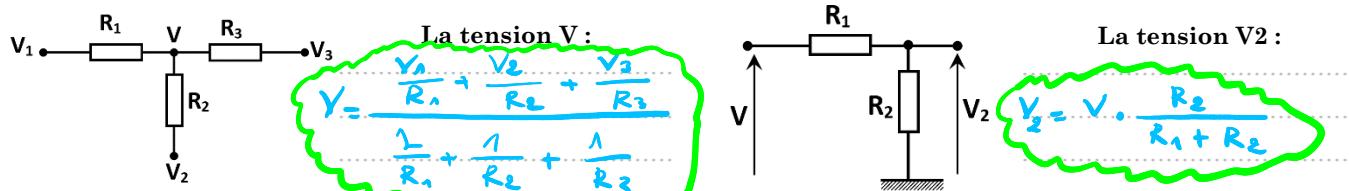
#### 1- Caractéristique de l'ALI en régime linéaire

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.



#### 2- Outil de calcul

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

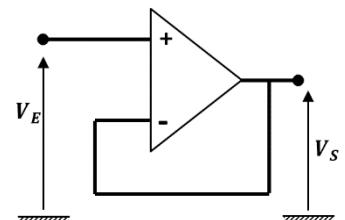


#### 3- Les montages amplificateurs fondamentaux

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

##### 3.1. Amplificateur suiveur

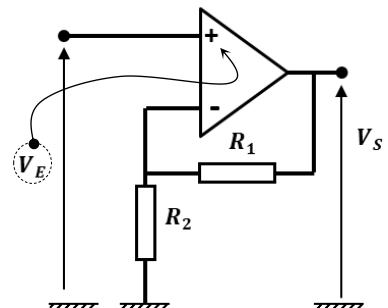
- L'ALI est supposé idéal :  $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI est fonctionné en régime linéaire :  $V^+ = V^-$   
On a :  $V^- = V_S$  et  $V^+ = V_E$   
Sachant que :  $V^+ = V^- \Rightarrow$  la relation finale :  $V_S = V_E$



**Remarque :** 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

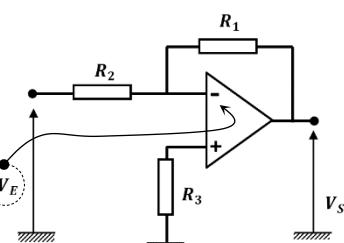
- L'ALI est supposé idéal :  $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI est fonctionné en régime linéaire  $\Rightarrow \varepsilon = 0 \Rightarrow V^+ = V^-$   
Expression de  $V^+$  :  $V^+ = V_E$   
Expression de  $V^-$  :  $V^- = V_S - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_E$  (diviseur de tension)  
Sachant que :  $V^+ = V^- \Rightarrow$  la relation finale :  $V_E = V_S - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_E$   
 $\Rightarrow V_S = V_E \frac{R_1 + R_2}{R_2}$   
d'où :  $V_S = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_E$



##### 3.3. Amplificateur inverseur

- L'ALI est supposé idéal :  $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI est fonctionné en régime linéaire  $\Rightarrow \varepsilon = 0 \Rightarrow V^+ = V^-$   
Expression de  $V^+$  :  $V^+ = 0$   
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 :  $\frac{V_E \cdot R_1 + V_S \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 0$   
 $\Rightarrow V_E \cdot R_1 + V_S \cdot R_2 = 0$   
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 non inverseur avec un amplificateur opérationnel.



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

### 3.4. Amplificateur de différence (ou soustracteur)

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

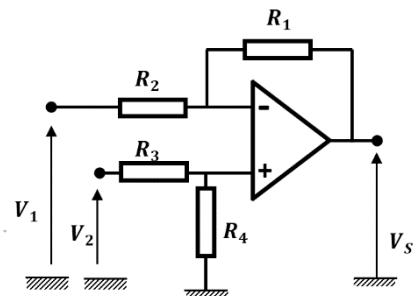
$$\Rightarrow V^- = \frac{V_1 \cdot R_2 + V_2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} ; \quad V^+ = V_2 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

comme  $V^+ = V^-$

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

d'où :

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



### 3.5. Amplificateur de somme (ou sommateur)

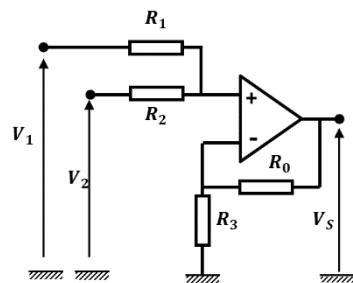
- L'ALI est supposé idéal :  $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI est fonctionné en régime linéaire :  $V^+ = V^-$

$$\text{on a: } V^+ = \frac{V_1 \cdot R_2 + V_2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} ; \quad V^- = V_s \cdot \frac{R_3}{R_0 + R_3}$$

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

d'où :

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

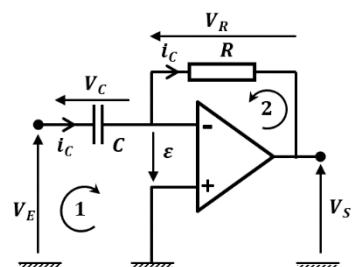


### 3.6. Les montages dérivateur et intégrateur

Les montages que nous allons étudier maintenant 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.

#### 3.6.1. Montage dérivateur

- L'ALI est supposé idéal :  $i^+ = i^- = 0$
- L'ALI 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 :
 $\rightarrow v_s(t) + v_R(t) + \varepsilon(t) = 0$ 
 $\rightarrow v_s(t) = -v_R(t) = -R \cdot i_C(t) \text{ Avec } i_C(t) = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt} \rightarrow v_s(t) = -RC \cdot \frac{dv_E(t)}{dt}$



#### 3.6.2. Montage intégrateur

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

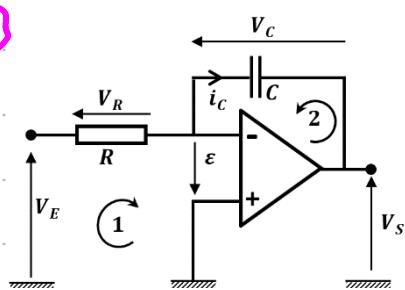
(1) dans la maille 1 :  $V_E(t) - V_R(t) + \varepsilon(t) = 0 \Rightarrow V_E(t) = R \cdot i_C(t) \quad (1)$

(2) dans la maille 2 :  $V_R(t) + V_c(t) + \varepsilon(t) = 0 \Rightarrow V_c(t) = -V_R(t) \quad (2)$

$$\Rightarrow i_C(t) = C \cdot \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow i_C(t) = -C \cdot \frac{dV_R}{dt} \quad (2)$$

de (1) et (2)  $\Rightarrow V_R(t) = -RC \cdot \frac{dV_s}{dt}$

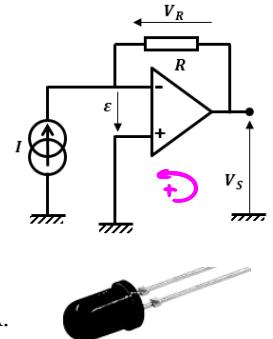
d'où :  $V_s(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t V_R(t) dt$



### 3.7. Amplificateur courant – tension

- L'ALI est supposé idéal et fonctionne en régime linéaire :  $V^+ = V^-$
- Appliquons la loi des mailles :  $V_s + V_R + \epsilon = 0 \Rightarrow V_s = -V_R$
- Expression finale de  $V_s$  :  $I = \frac{V_s}{R} \Rightarrow V_s = R \cdot I$

*Donc  $V_s = -R \cdot I$*



Un tel montage peut être utilisé pour amplifier le courant d'une photodiode ou convertisseur CNA.

## 4- Dimensionnement des éléments du montage à ALI

Les éléments du montage à amplificateur opérationnel (résistances) sont dimensionnés selon un cahier des charges définissant un gain en tension, afin que la tension amplifiée soit adaptée au circuit de traitement numérique.

### Exemple : Système à exosquelette

L'exosquelette est un appareil qui aide une personne à soulever des charges lourdes et à réduire considérablement les efforts sans fatigue.

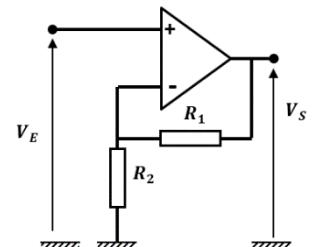


#### o Objet d'étude : Amplification du signal électromyogramme (EMG)

L'électromyogramme (EMG) est un potentiel électrique généré par les fibres musculaires lors de la contraction. Il fournit des informations sur l'état des muscles. Les électrodes de surface, fixées sur la peau au niveau du muscle ciblé, détectent ces signaux, qui sont généralement fortement bruités et de faible amplitude (10 mV maximum).

#### o Exigence d'amplification

Le signal EMG est amplifié par un amplificateur opérationnel pour obtenir une tension de sortie maximale de 3V, afin de ne pas dépasser la tension du convertisseur CAN.



- Question 1 :** Calculer le gain en tension que l'amplificateur à ALI doit fournir pour satisfaire les exigences du cahier des charges.

$$V_{s\max} = 3V \text{ et } V_{em\max} = 10 \text{ mV} \Rightarrow G = \frac{V_s}{V_E} = \frac{V_{s\max}}{V_{em\max}} \Rightarrow G = 300$$

- Question 2 :** En vous basant sur l'expression du montage déterminée précédemment, déduisez l'expression du gain  $G$ .

On a AD non inversant :  $V_s = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_E = G \cdot V_E$ ; donc :  $G = 1 + \frac{R_1}{R_2}$

- Question 3 :** Calculez le rapport  $R_1 / R_2$ , puis déduisez la valeur de  $R_1$  en supposant que  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ .

$$\text{On a : } G = 1 + \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = G - 1 \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = 299$$

Si  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_1 = 299 \text{ k}\Omega$

- Question 4 :** Calculez le rapport  $R_1/R_2$ , puis déduisez la valeur de  $R_1$  en supposant que  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ .

La valeur normale est de  $R_1 = 299 \text{ k}\Omega$  !!!!  $\Rightarrow R_{an} = 270 \text{ k}\Omega + 27 \text{ k}\Omega + 1.8 \text{ k}\Omega + 220 \text{ }\Omega$



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.

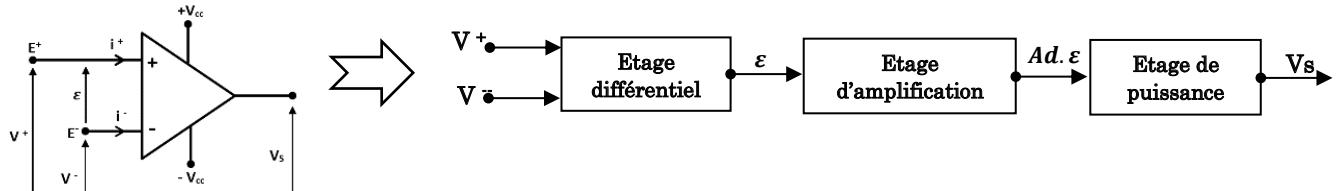
Exemple :  $R_a=13\Omega$ ,  $R_b=550\Omega$ ,  $R_c=8,24\text{k}\Omega$ ,

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.

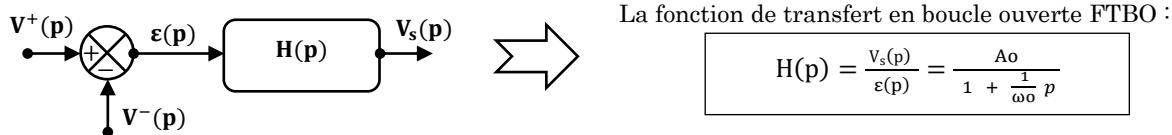
##### 1- Modèle fréquentiel de l'amplificateur linéaire intégré

La réponse en fréquence d'un 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 de l'amplificateur opérationnel équivaut à celle d'un filtre passe-bas de premier ordre, où  $Ao$  représente le gain différentiel (ou  $Ad$ ) et  $\omega_0$  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, 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  $V_{O\text{ UT}} = V_S / 2$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	TEST CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNIT
<b>OPEN-LOOP GAIN</b>						
A <sub>O</sub> L	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 <sub>O</sub> L	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
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>						
GBW	Gain-bandwidth product			5.25		MHz
SR	Slew rate	$V_S = 40 \text{ V}$ , $G = +1$ , $C_L = 20 \text{ pF}$		20		V/ $\mu$ s

A partir de document constructeur :

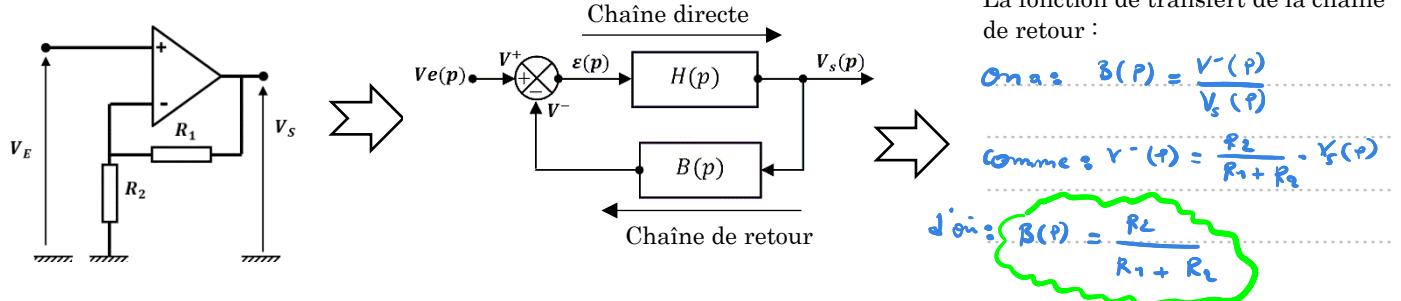
- Le gain différentiel  $Ao$  :  $\text{on a } G_o = 125 \text{ dB} \text{ avec } G_o = 20 \log(A) \Rightarrow A_o = 10^{\frac{G_o}{20}} \Rightarrow A_o = 1.77 \cdot 10^6$
- Le produit gain bande GB :  $\text{on a : } G \cdot B = 5.25 \text{ MHz}$

Alors la fréquence de coupure en boucle ouverte  $f_{co}$  :  $f_{co} = \frac{G \cdot B}{A_o} \Rightarrow \text{on a : } f_{co} = 1.26 \text{ Hz}$

**Remarque :** La bande passante de la plupart des amplificateurs est très limitée en boucle ouverte (B.O.), ce qui rend essentiel de les utiliser en boucle fermée (B.F.) pour étendre cette bande passante.

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

Soit le montage non inverseur suivant :



- 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 se 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  $f_{c1} = f_{c1} \cdot A_o \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  sachant que  $A_o \gg 1$

$$\text{On a : } F(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p) \cdot \beta(p)}$$

$$\Leftrightarrow F(p) = \frac{\frac{A_o}{1 + \frac{p}{\omega_1}}}{1 + \frac{A_o}{1 + \frac{p}{\omega_1}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}$$

$$\Leftrightarrow F(p) = \frac{A_o (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) \left( 1 + \frac{p}{\omega_1} \right) + R_2 \cdot A_o}$$

$$\Leftrightarrow F(p) = \frac{A_o (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) + R_2 A_o + \frac{p}{\omega_1} (R_1 + R_2)}$$

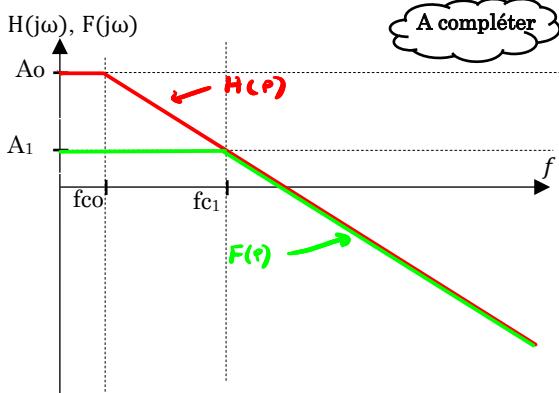
$$\text{Comme : } A_o \gg 1 \Rightarrow F(p) = \frac{A_o (R_1 + R_2)}{R_2 A_o + \frac{p}{\omega_1} (R_1 + R_2)}$$

$$\Leftrightarrow F(p) = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{p}{A_o \cdot \omega_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}}} = \frac{A_1}{1 + \frac{p}{\omega_1}}$$

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

$$\text{et } \omega_1 = A_o \cdot \omega_0 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

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 à l'entrée de l'AOP soit plus petite que cette limite pour ne pas l'altérer  $\Rightarrow f_{sig} \ll f_{c1}$

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

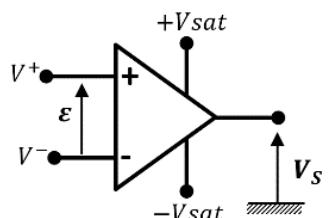
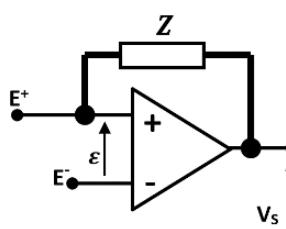
### 1. Conditions de fonctionnement en régime saturé

Un ALI est fonctionné en régime non linéaire si :

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

La sortie ne prend que deux valeurs :

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



## 2. Fonctions des montages à ALI en Régime Non Linéaire

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

## 3. Comparateur à ALI

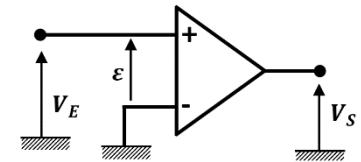
On distingue deux types de comparateurs :

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

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

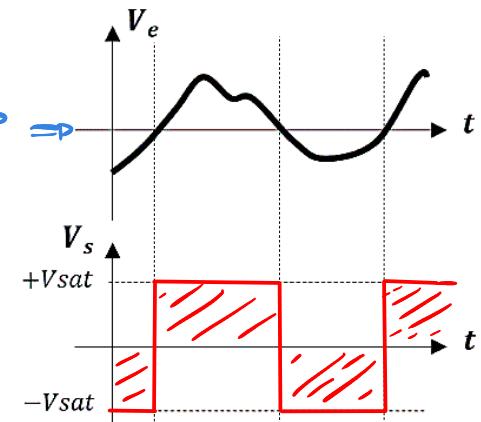
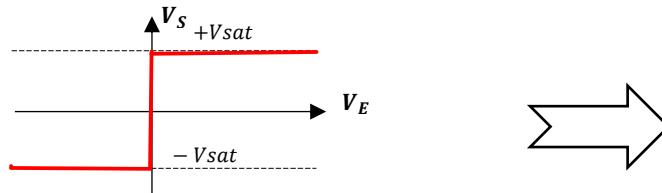
- L'ALI parfait :  $i^+ = i^- = 0$  et il fonctionne en régime de saturation :  $\varepsilon \neq 0$

V+	V-	$\varepsilon$
$V_e$	0	$\varepsilon = V_e - 0 \Rightarrow \varepsilon = V_e$



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

- Caractéristique  $V_s = f(V_e)$

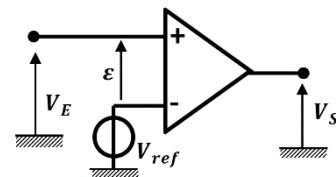


- Le seuil de basculement du montage précédent est :  $S = 0$

### 3.2. Comparateur simple (ou un seul seuil) : Comparateur non inverseur avec $V_{ref} > 0$

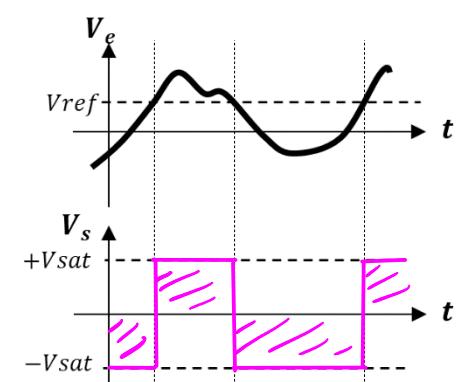
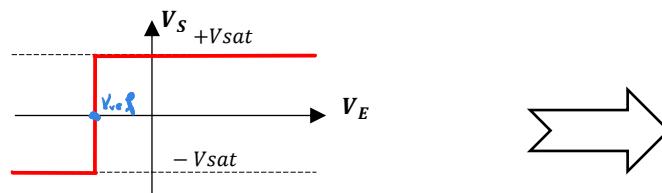
- L'ALI parfait :  $i^+ = i^- = 0$  et il fonctionne en régime de saturation :  $\varepsilon \neq 0$

V+	V-	$\varepsilon$
$V_e$	$V_{ref}$	$V_e - V_{ref}$



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

- 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

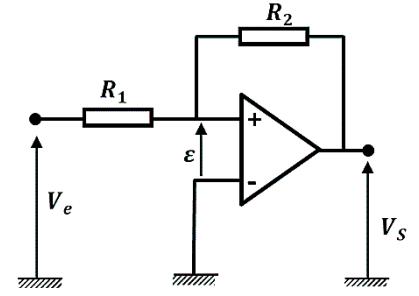
L'ALI parfait :  $i^+ = i^- = 0$  (je peux appliquer la loi de Millman) et fonctionne en régime de saturation :  $\varepsilon \neq 0$ .

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

$$\text{Donc : } V^+ = \frac{V_e \cdot R_2 + V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2} ; \quad V^- = 0$$

*d'où :*

$$\varepsilon = \frac{V_e \cdot R_2 + V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$



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

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

Finalement  $V_s = +V_{sat}$  tant que :  $\varepsilon > 0$

$$\Rightarrow \frac{V_e \cdot R_2 + V_{sat} \cdot R_1}{R_1 + R_2} > 0 \Rightarrow V_e > -V_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow V_b = V_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

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

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

Finalement  $V_s = -V_{sat}$  tant que :  $\varepsilon < 0$

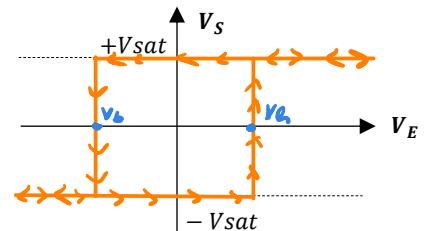
$$\Rightarrow \frac{V_e \cdot R_2 - V_{sat} \cdot R_1}{R_1 + R_2} < 0 \Rightarrow V_e < V_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow V_H = V_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

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

Les seuils de basculement de ce montage :

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

- Seuil haut :  $V_H = V_{sat} \cdot \frac{R_1}{R_2}$



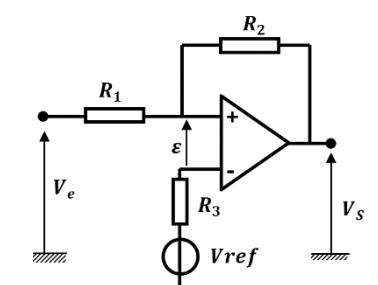
### Montage comparateur à hystérésis non inverseur

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

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

$$\text{Donc : } V^- = V_{ref} , \quad V^+ = \frac{V_e \cdot R_2 + V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{d'où : } \varepsilon = \frac{V_e \cdot R_2 + V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2} - V_{ref}$$



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

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

Finalement  $V_s = +V_{sat}$  tant que :  $\varepsilon > 0$

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

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

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

Finalement  $V_s = -V_{sat}$  tant que :  $\varepsilon < 0$

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

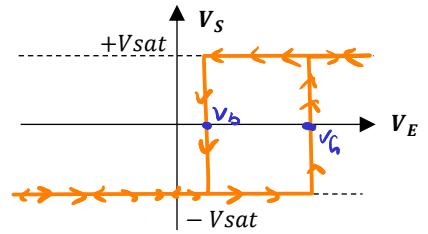
### Caractéristique entrée/sortie $V_S = f(V_E)$

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 :

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



Notes :