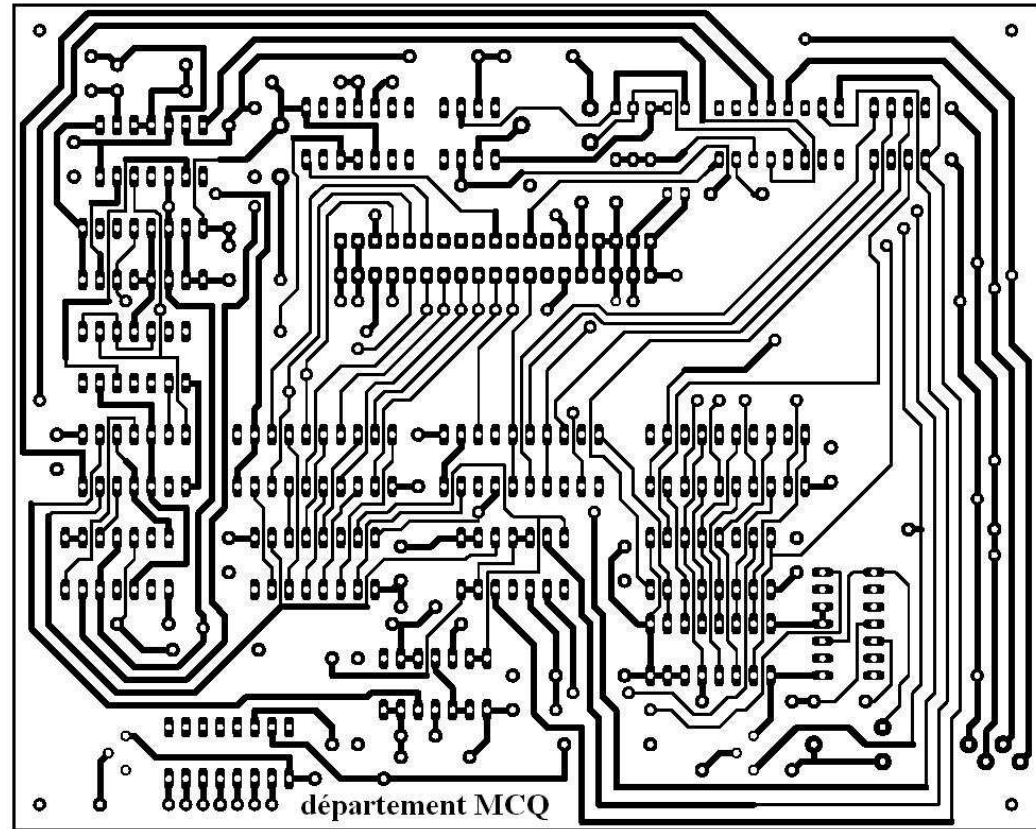




IUT qualité,
logistique industrielle et organisation



Module d'Electronique

1^{ère} partie : Electronique analogique

© Fabrice Sincère ; version 3.0.6

<http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere>

Sommaire du chapitre 2 : L'amplificateur opérationnel

Introduction : les circuits intégrés

1- L'amplificateur opérationnel

1-1- Brochage

1-2- Symboles

1-3- Alimentation

2- Caractéristiques électriques

2-1- Courants d'entrée

2-2- Tension différentielle d'entrée

2-3- Caractéristique de transfert

2-4- Courant de sortie

2-5- Réaction positive et contre-réaction

Sommaire du chapitre 2 : L'amplificateur opérationnel

3- L'amplificateur opérationnel en régime linéaire

3-1- Montage amplificateur de tension

3-1-1- Introduction

3-1-2- Montage « amplificateur inverseur »

3-2- Fonctions mathématiques

3-2-1- Montage « additionneur non inverseur »

3-2-2- Montage « soustracteur »

4- L'amplificateur opérationnel en régime de saturation

4-1- Montage comparateur simple

4-2- Montage « comparateur à deux seuils » ou « trigger de Schmitt » ou « comparateur à hystérésis »

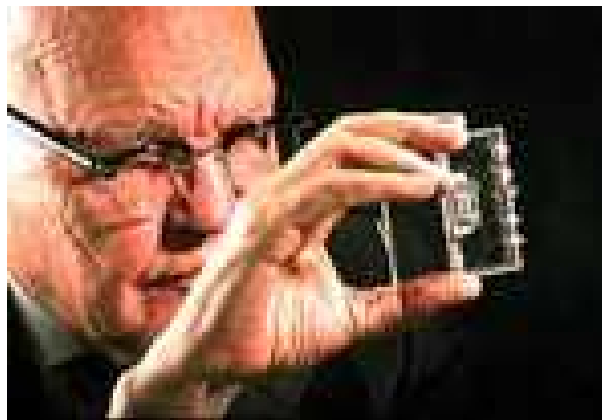
Chapitre 2

L'amplificateur opérationnel

Introduction : les circuits intégrés

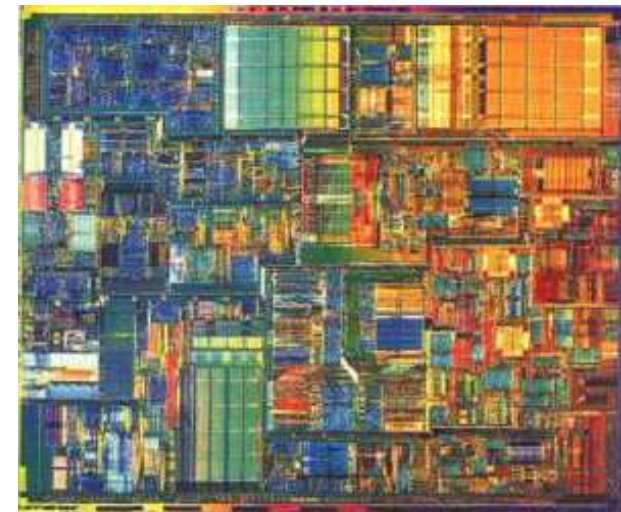
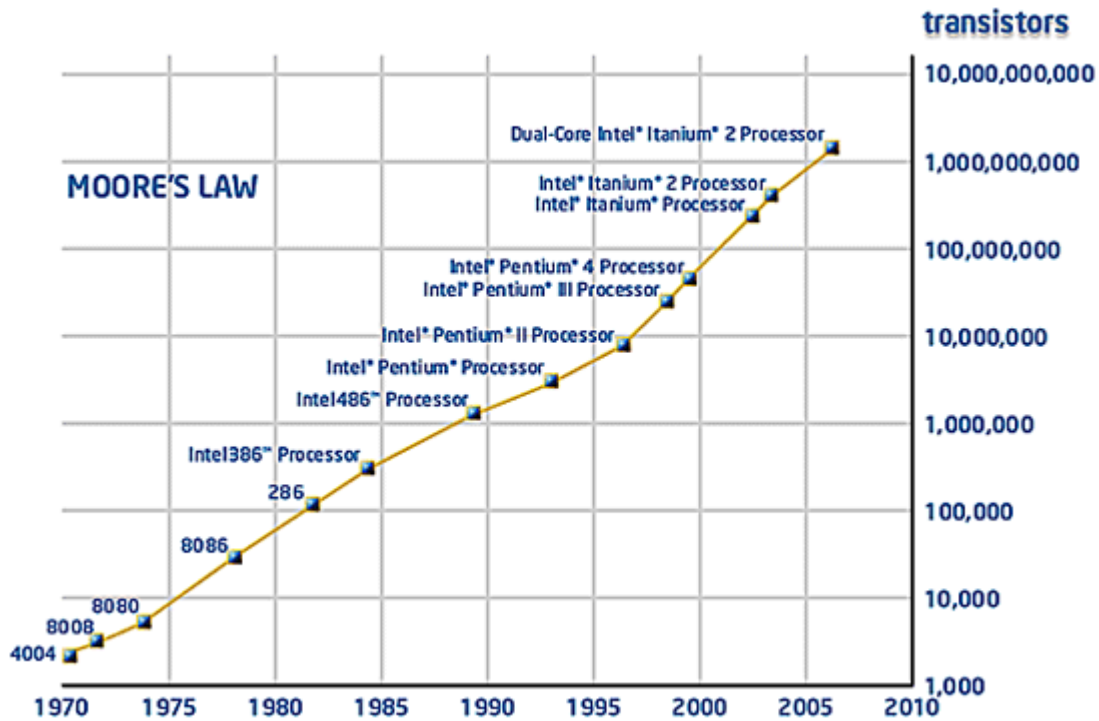
Un C.I. est un circuit électronique miniaturisé, principalement constitué de transistors.

- 1958 : 1^{er} C.I. (Texas Instruments, Jack Kilby)



- Loi de Moore

« *Le nombre de composants par circuit intégré double tous les deux ans.* »



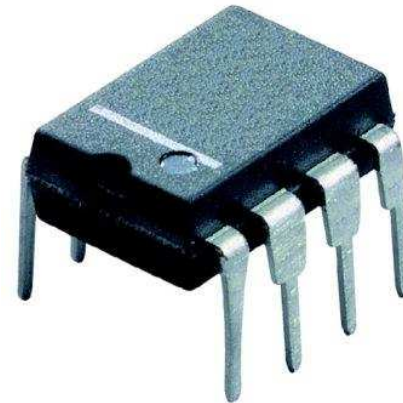
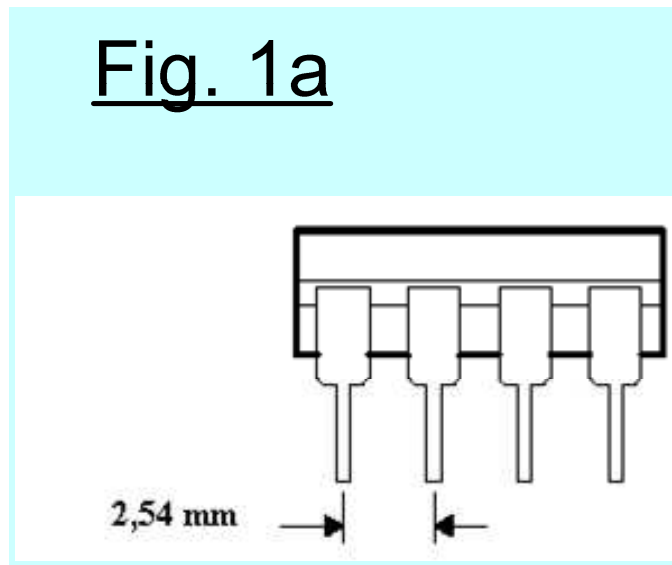
1- L'Amplificateur Opérationnel (A.O.)

Il s'agit d'un C.I. analogique « multifonctions ».

- Exemple : μ A741 (Texas Instruments)

Il se présente sous la forme d'un boîtier à 8 broches (DIL 8) :

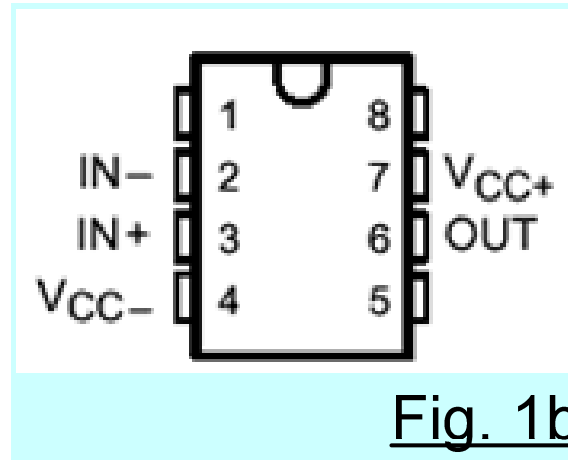
Fig. 1a



1-1- Brochage

L'A.O. possède :

- deux entrées :



broche IN+ (ou e+) : entrée « non inverseuse »

broche IN- (ou e-) : entrée « inverseuse »

- une sortie :

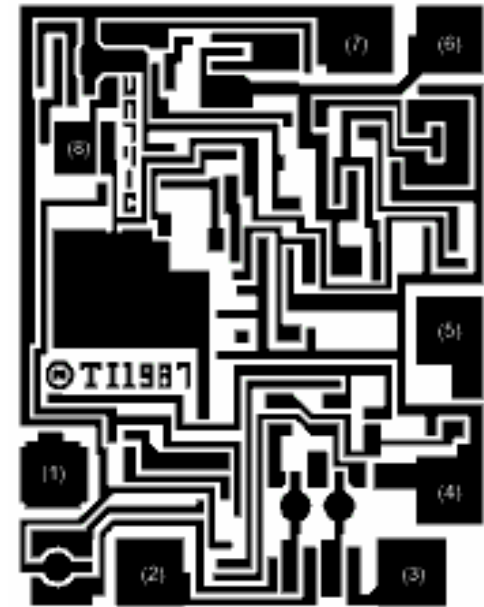
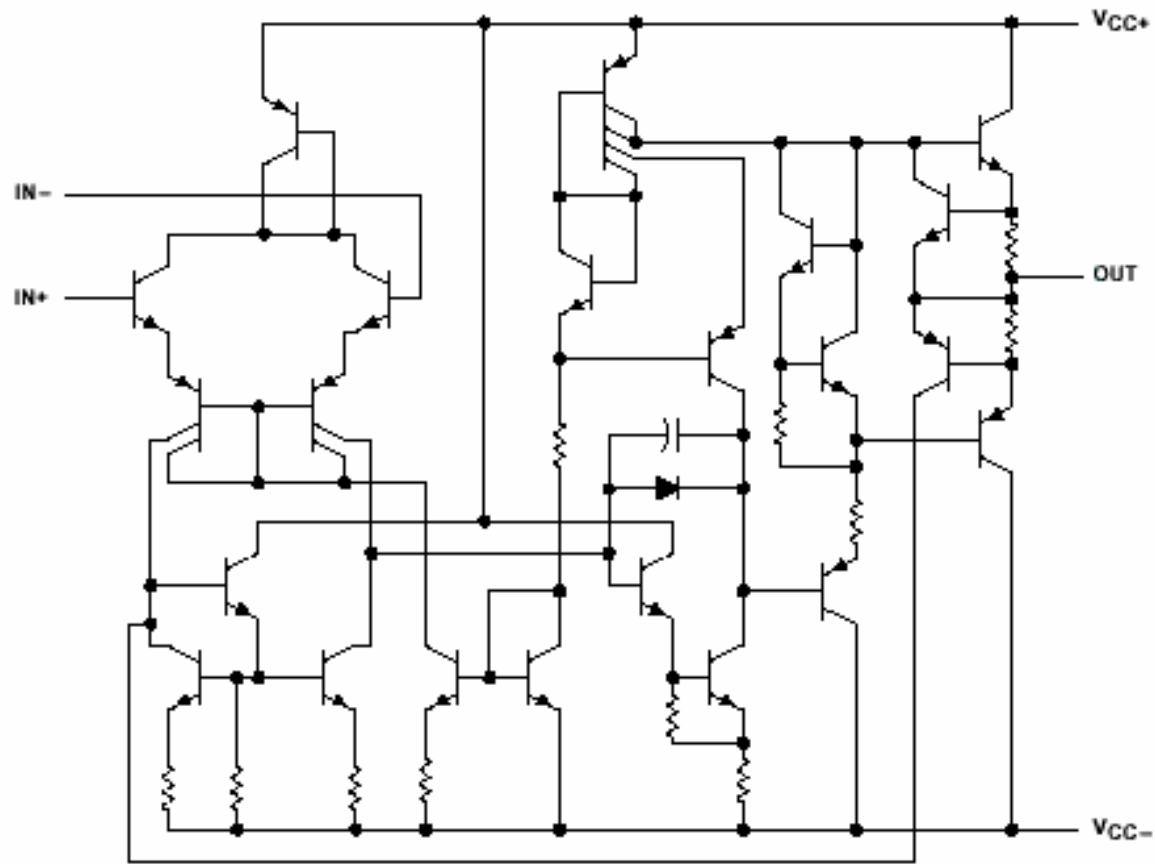
broche OUT (ou s)

- deux broches d'alimentation :

broche Vcc+ : alimentation en tension continue positive

broche Vcc- : « « négative

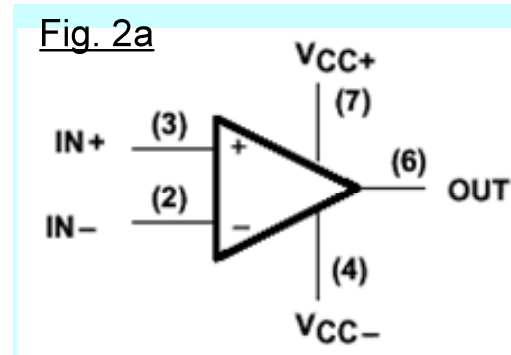
- Schéma interne du $\mu A741$



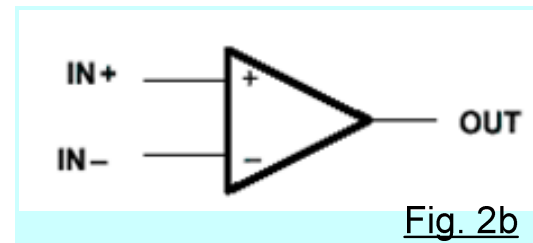
1 mm²

1-2- Symboles

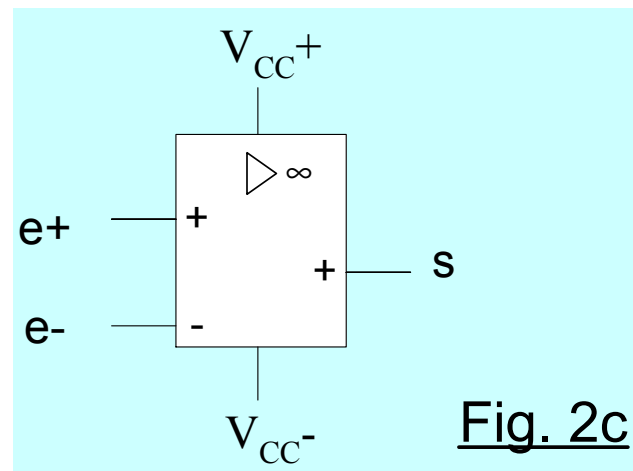
- symbole américain :



- symbole simplifié :

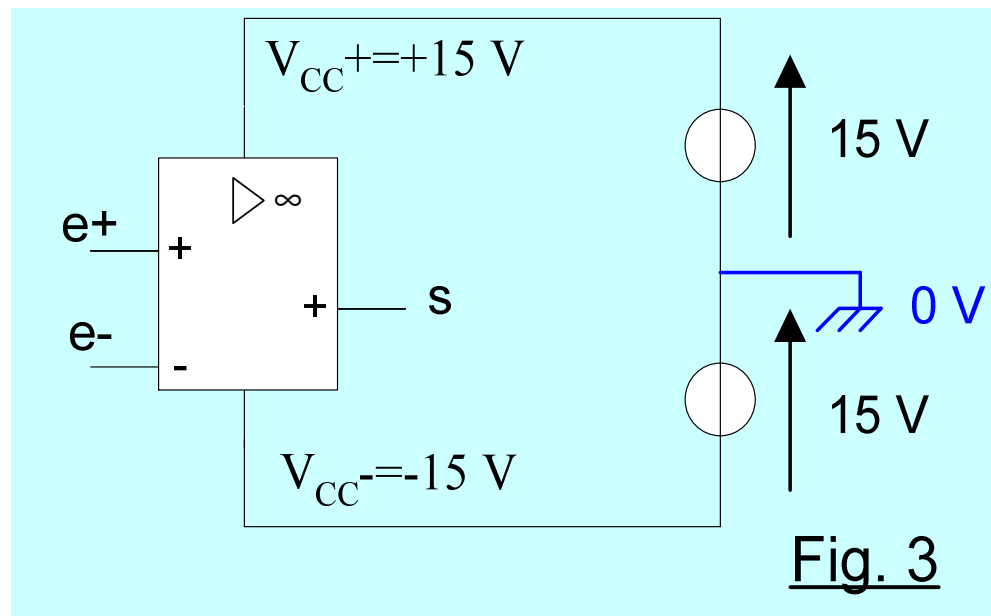


- symbole européen :



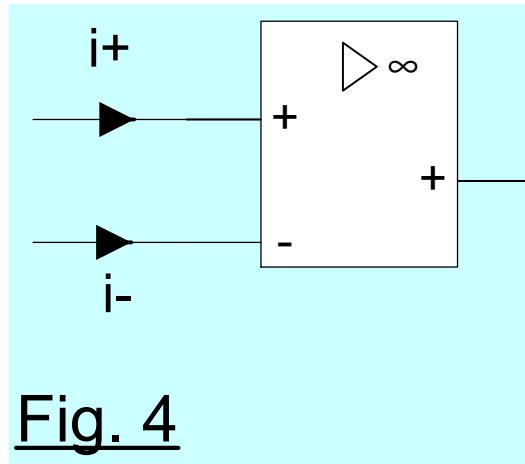
1-3- Alimentation de l'A.O.

Un A.O. nécessite une alimentation constituée de deux générateurs de tension continue symétriques :



2- Caractéristiques électriques

2-1- Courants d'entrée



En pratique, les courants d'entrée peuvent être négligés :

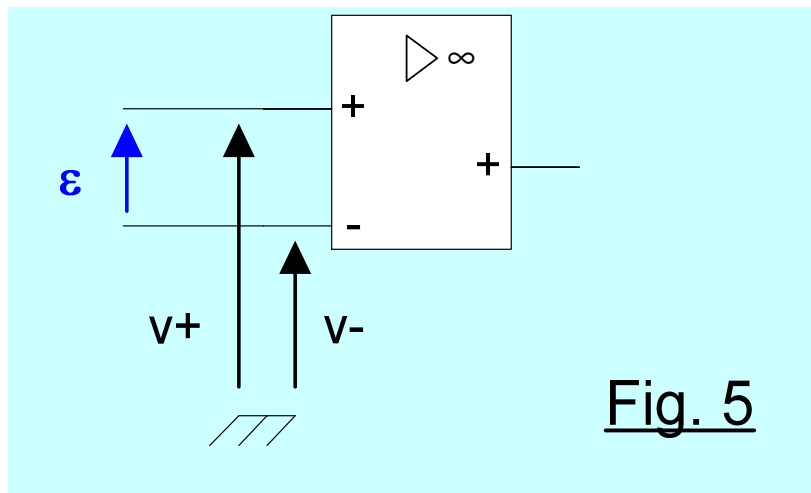
$$i+ \approx 0$$

$$i- \approx 0$$

2-2- Tension différentielle d'entrée : ε

- Définition :

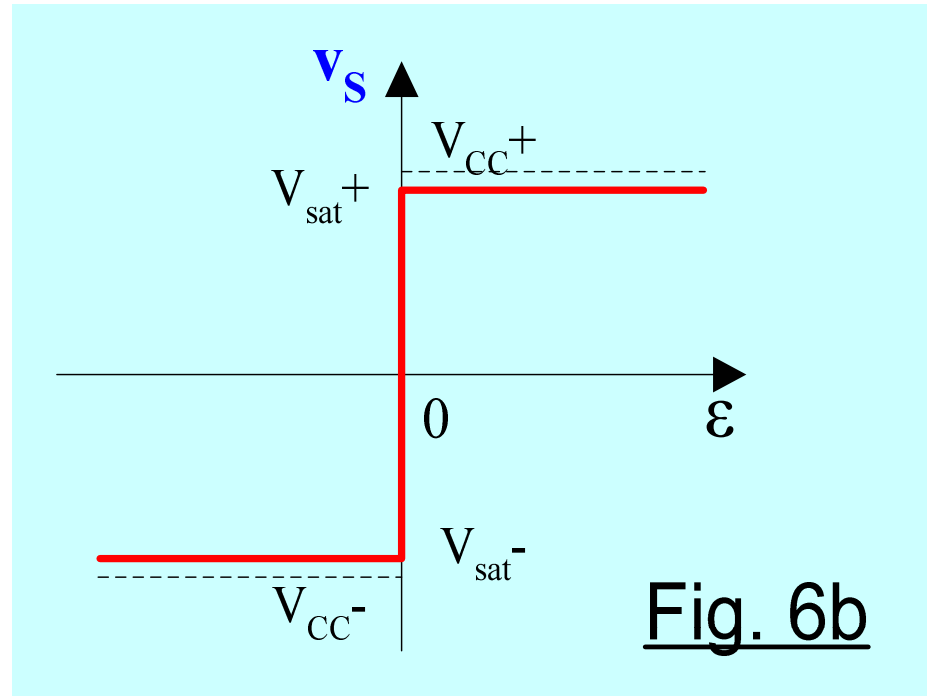
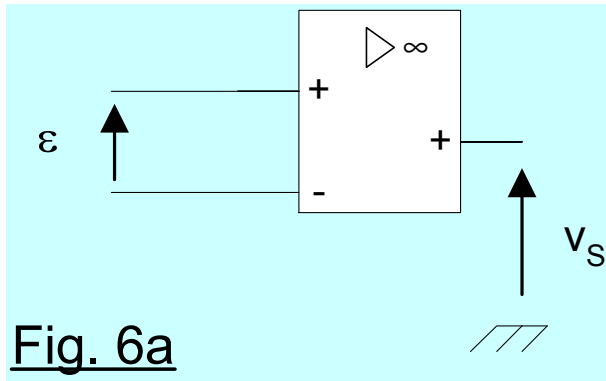
La tension différentielle d'entrée est la différence de potentiels entre l'entrée non inverseuse et l'entrée inverseuse.



$$\varepsilon = v+ - v-$$

2-3- Caractéristique de transfert : $v_S(\epsilon)$

La tension de sortie dépend directement de la tension différentielle d'entrée :

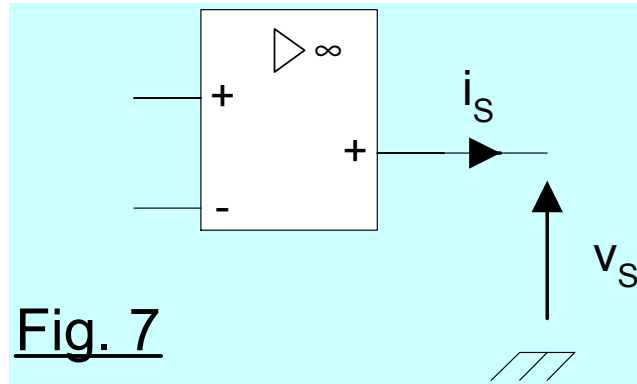


On distingue trois zones :

- zone de linéarité : $\epsilon \approx 0 \text{ V} ; V_{\text{sat-}} < v_S < V_{\text{sat+}}$
- zone de saturation haute : $\epsilon > 0 \text{ V} ; v_S = V_{\text{sat+}}$
- « « basse : $\epsilon < 0 \text{ V} ; v_S = V_{\text{sat-}}$

Remarque : si $V_{\text{cc}\pm} = \pm 15 \text{ V} : V_{\text{sat}\pm}$ est de l'ordre de $\pm 14 \text{ V}$. 13

2-4- Courant de sortie



La sortie se comporte comme un générateur de tension.

$|i_s \text{ max}|$ est faible ☹️ : de l'ordre de 25 mA pour le $\mu\text{A}741$

2-5- Réaction positive et contre-réaction

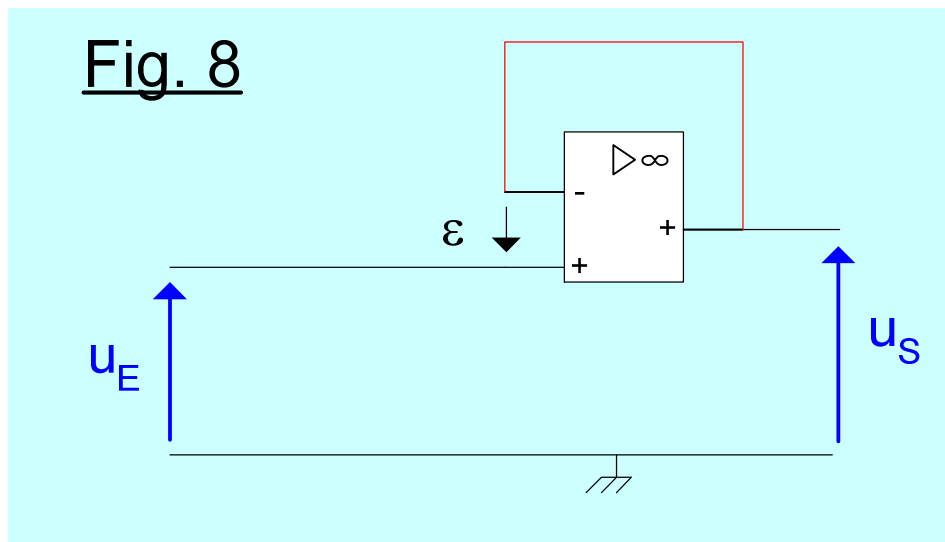
- Définitions :

On dit qu'il y a *réaction positive* quand la sortie est reliée à l'entrée non inverseuse.

On dit qu'il y a *contre-réaction* (ou réaction négative) quand la sortie est reliée à l'entrée inverseuse.

- Conséquences importantes :
- **Une contre-réaction assure un fonctionnement linéaire de l'A.O. : $\varepsilon \approx 0 \text{ V}$**

Exemple : montage « suiveur de tension »



Loi des branches :

$$u_S = u_E - \varepsilon$$

L'A.O. possède une contre-réaction

$$\Rightarrow \varepsilon \approx 0 \text{ V}$$

Enfin : **$u_S = u_E$**

- **Une réaction positive provoque la saturation de l'A.O.**

3- L'A.O. en régime linéaire

L'A.O. doit avoir une contre-réaction (condition nécessaire mais pas toujours suffisante).

On sait qu'en régime linéaire : $\varepsilon \approx 0 \text{ V}$

3-1- Montage amplificateur de tension

3-1-1- Introduction

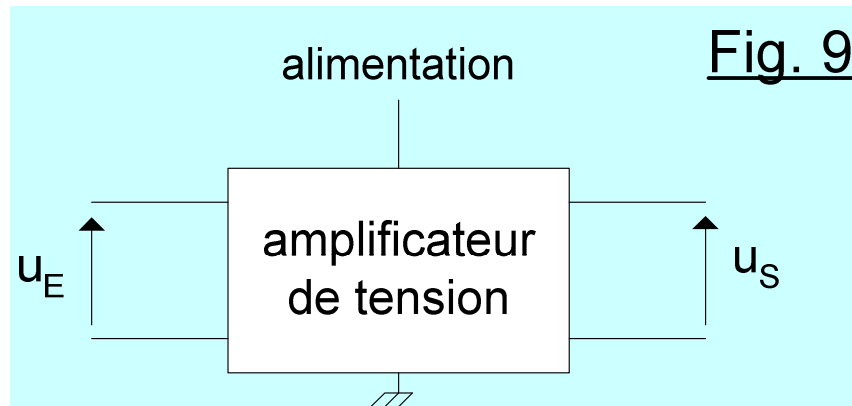


Fig. 9

Par définition, l'amplification en tension est :

$$A_v = \frac{\text{tension de sortie}}{\text{tension d'entrée}}$$

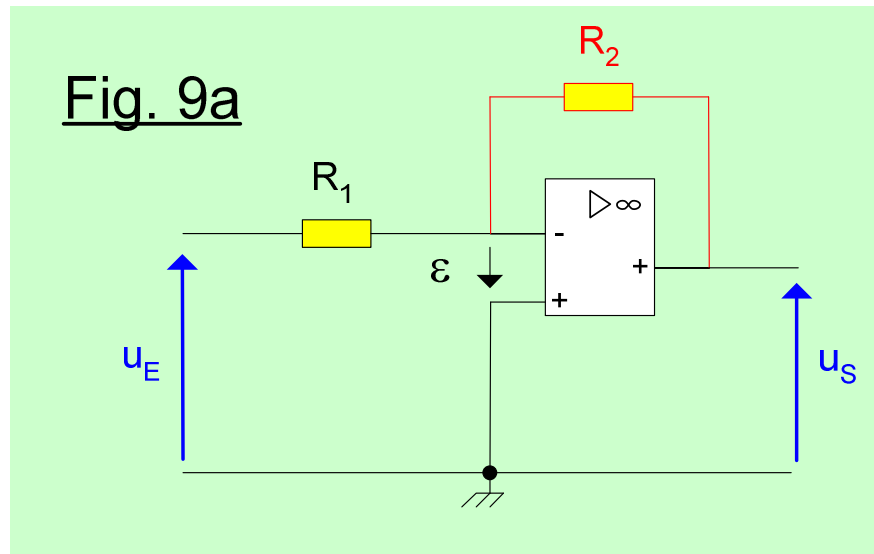
Par définition, le gain en tension est :

$$G_v = 20 \log_{10} |A_v| \quad (\text{en décibels dB})$$

Tableau 1

Amplification $ A_v $	Gain G_v (dB)	Atténuation (dB)
0	$-\infty$	$+\infty$
0,1	- 20	+20
0,5	- 6	+6
$1/\sqrt{2}$	-3	+3
1	0	0
10	+20	-20
100	+40	-40
1000	+60	-60

3-1-2- Montage « amplificateur inverseur »



A.O. $\mu A741$
 $V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$
 $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$

- Cherchons la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie :

(1) $\varepsilon = v_+ - v_- = 0$ (en régime linéaire)

(2) $v_+ = 0$ (entrée non inverseuse reliée à la masse)

(3) Appliquons le théorème de Millman à l'entrée inverseuse :

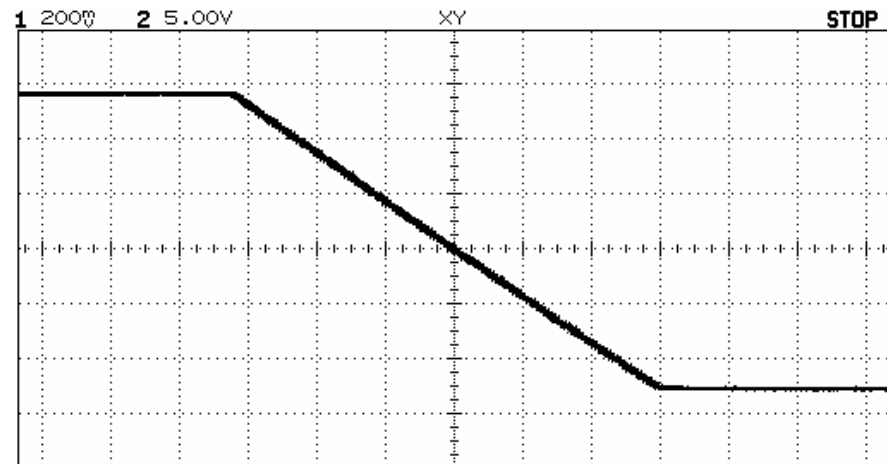
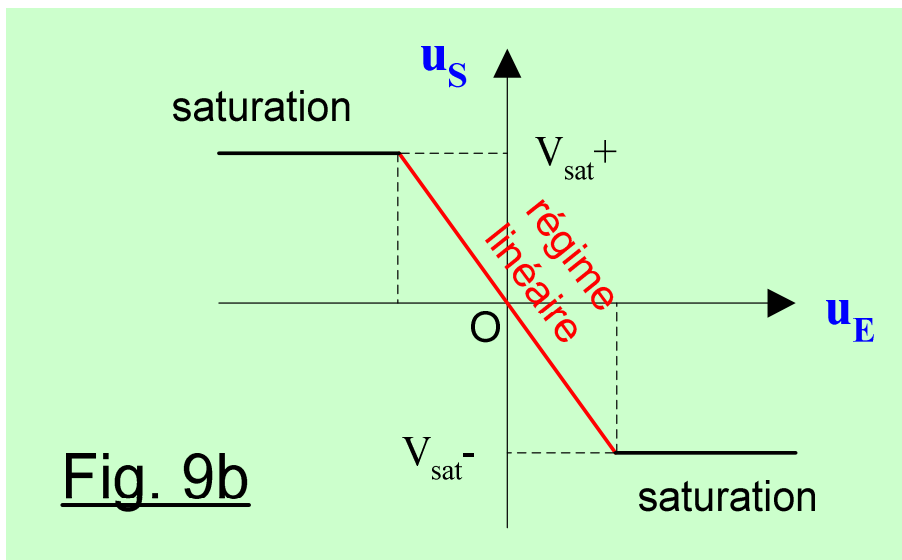
$$v_- = \frac{\frac{u_E}{R_1} + \frac{u_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$v_- = 0 \Rightarrow \frac{u_E}{R_1} + \frac{u_S}{R_2} = 0$$

$$A_V = \frac{u_S}{u_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$\text{A.N.} \quad \begin{cases} A_V = -\frac{100}{4,7} = -21,3 \\ G_V = +26,6 \text{ dB} \end{cases}$$

- Caractéristique de transfert $u_S(u_E)$



- fonctionnement en régime linéaire :

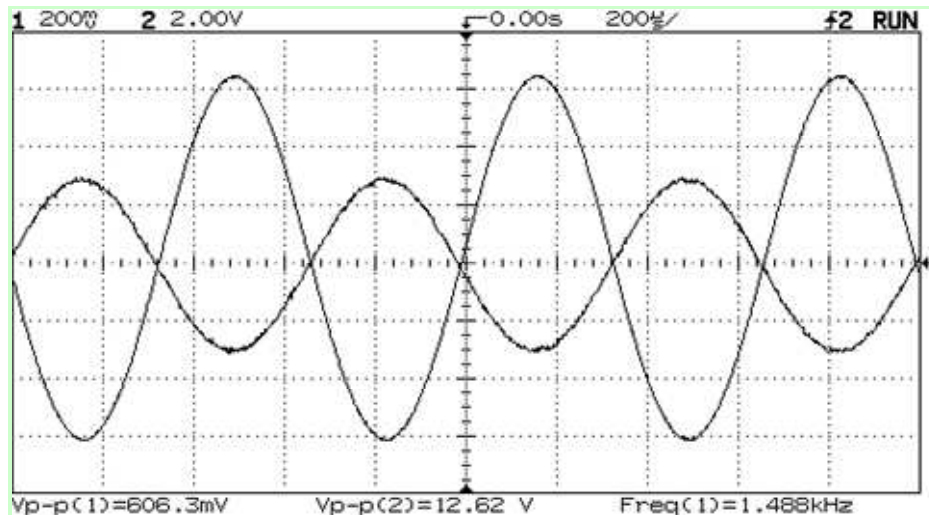


Fig. 9c

u_S est proportionnelle à u_E :

$$A_V = -12,62 / 0,6063 = -20,8$$

- fonctionnement en saturation :

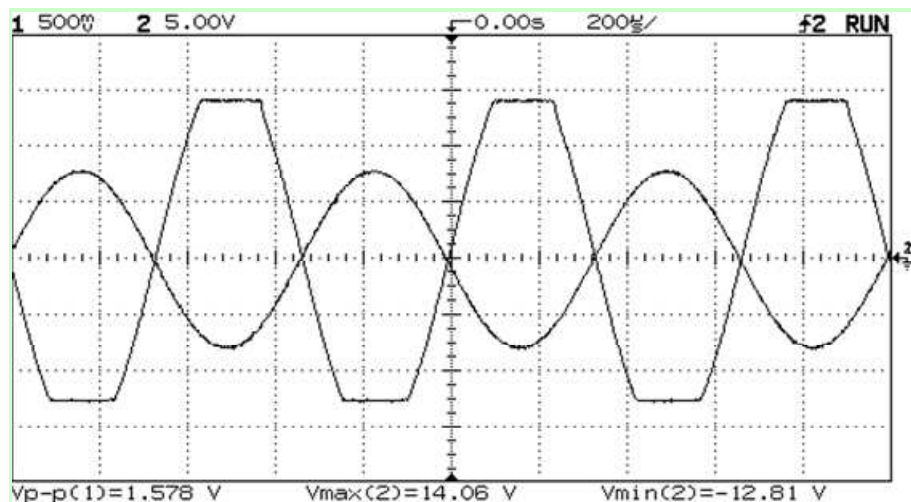
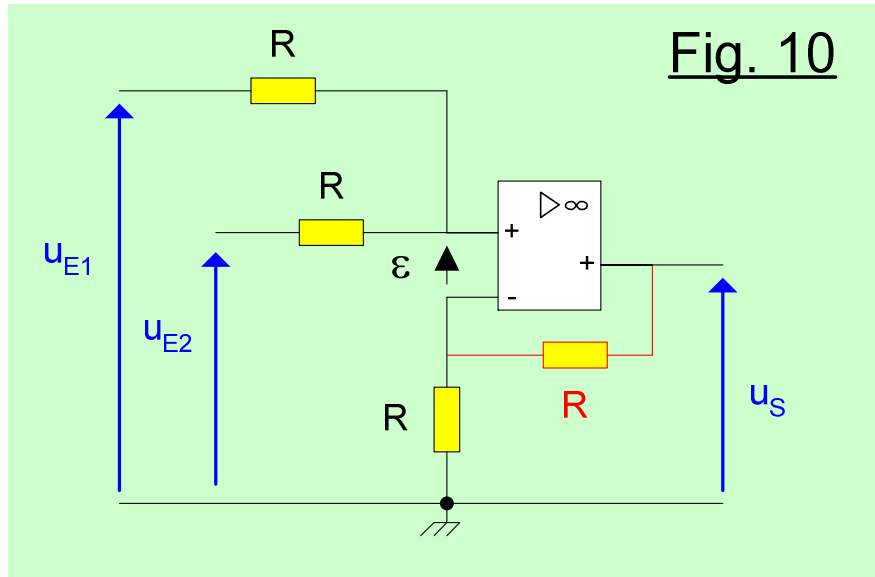


Fig. 9d

niveau d'entrée trop important :
la sortie sature 😞

3-2- Fonctions mathématiques

3-2-1- Montage « additionneur non inverseur »



- (1) $\varepsilon = v_+ - v_- = 0$ (régime linéaire)
- (2) Appliquons le théorème de Millman à l'entrée e+:

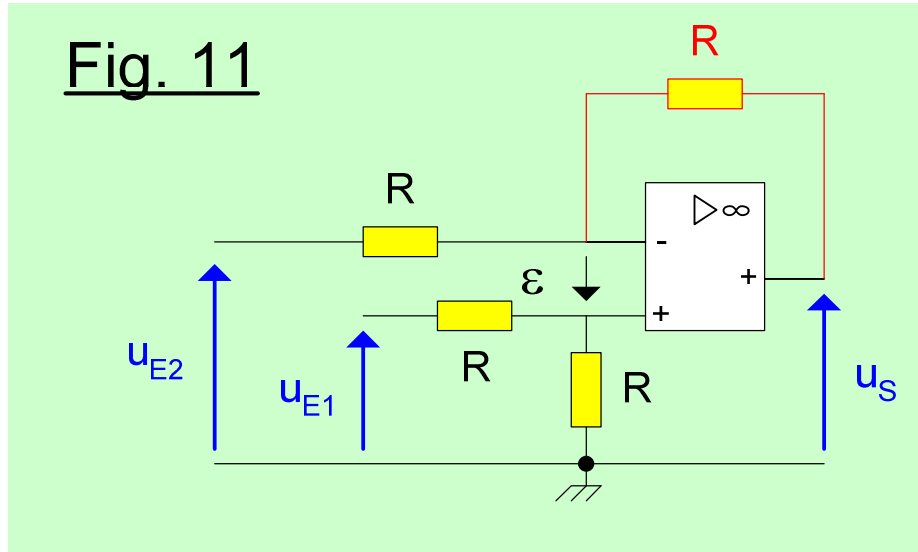
$$v_+ = \frac{\frac{u_{E1}}{R} + \frac{u_{E2}}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{u_{E1} + u_{E2}}{2}$$

- (3) Appliquons la formule du diviseur de tension à l'entrée e- :

$$v_- = \frac{R}{R + R} u_S = \frac{u_S}{2}$$

$$\Rightarrow \quad u_S = u_{E1} + u_{E2}$$

3-2-2- Montage « soustracteur »



$$v- = \frac{\frac{u_{E2}}{R} + \frac{u_S}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{u_{E2} + u_S}{2}$$

$$v+ = \frac{R}{R + R} u_{E1} = \frac{u_{E1}}{2}$$

En régime linéaire : $v+ = v-$

$$u_S = u_{E1} - u_{E2}$$

4- L'A.O. en régime de saturation

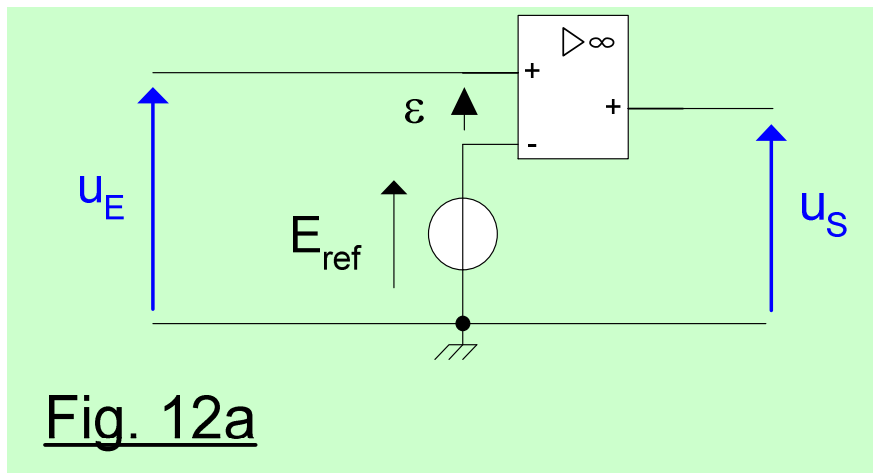
L'A.O. ne possède pas de contre-réaction.

La sortie de l'A.O. peut prendre *deux* états :

$$\begin{aligned} & V_{\text{sat}+} \quad \text{si } \varepsilon > 0 \text{ V} \\ \text{ou } & V_{\text{sat}-} \quad \text{si } \varepsilon < 0 \text{ V} \end{aligned}$$

4-1- Montage comparateur simple

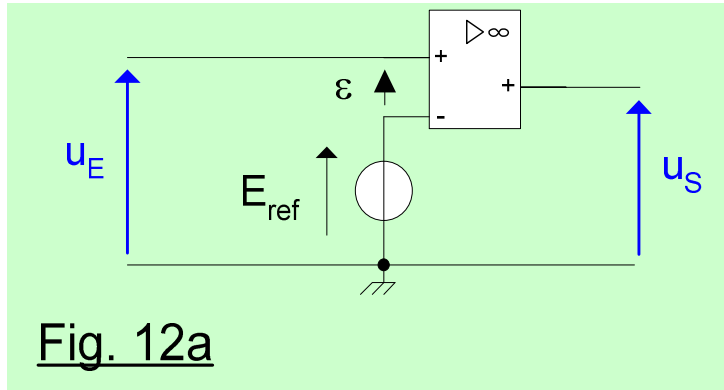
- comparateur simple « non inverseur »



A.O. $\mu\text{A}741$
 $V_{\text{cc}\pm} = \pm 15 \text{ V}$

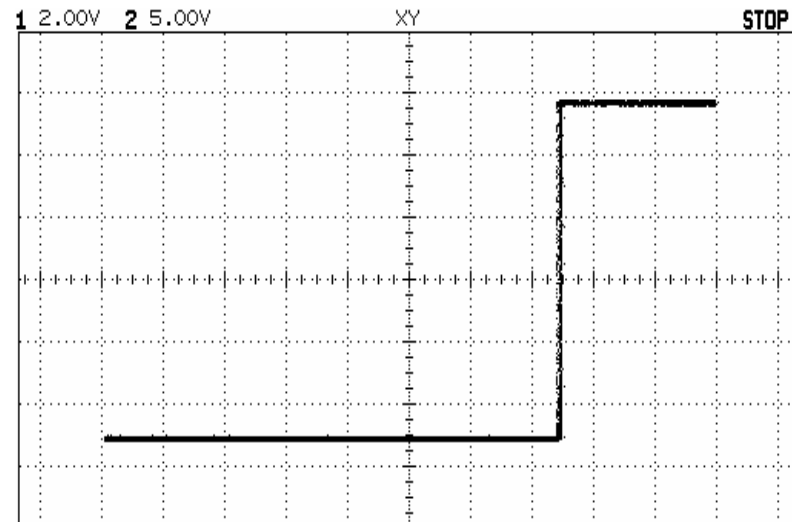
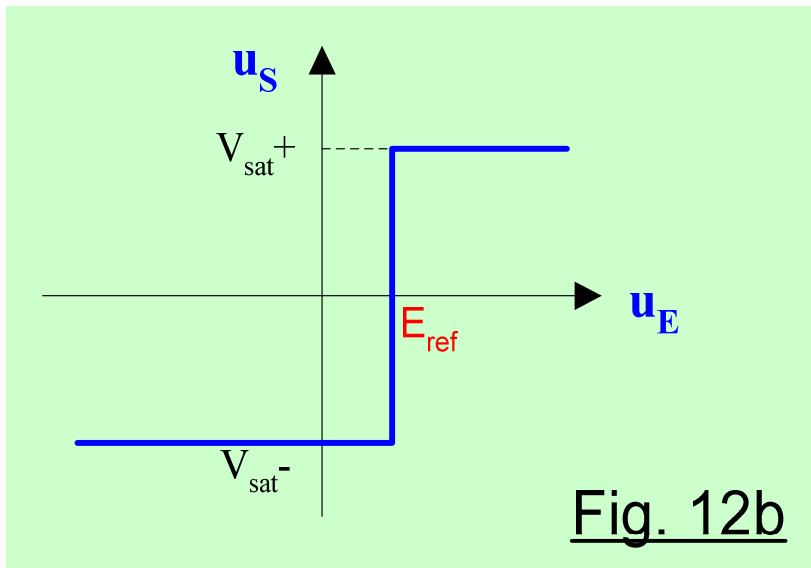
$$E_{\text{ref}} = +5 \text{ V}$$

- Caractéristique de transfert $u_S(u_E)$



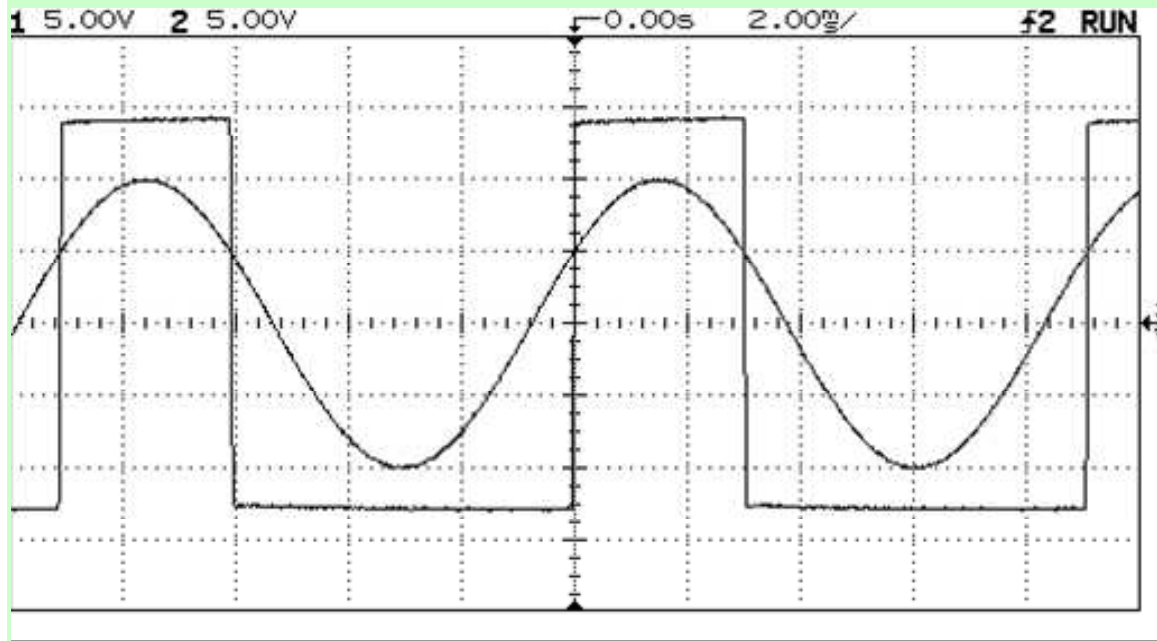
Loi des branches : $\varepsilon = u_E - E_{ref}$

si $u_E > E_{ref}$ alors $\varepsilon > 0$ et $u_S = V_{sat+}$
 si $u_E < E_{ref}$ alors $\varepsilon < 0$ et $u_S = V_{sat-}$



Le niveau d'entrée ($u_E = E_{ref}$) qui provoque le basculement de la sortie est appelé ***tension de seuil***.

Fig. 12c :

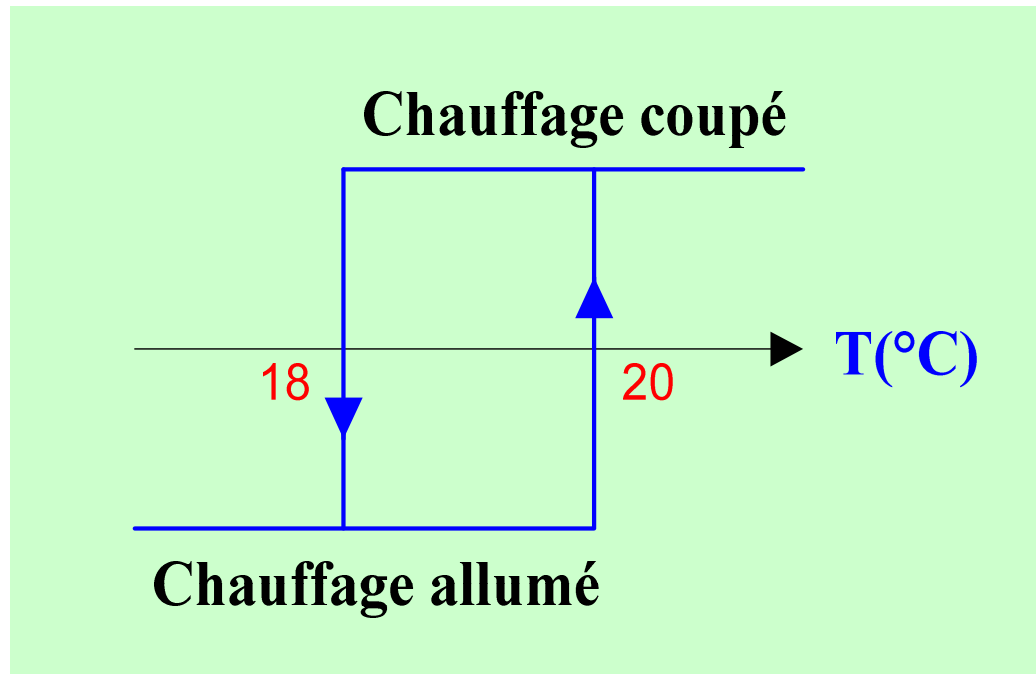


Ce montage compare la tension d'entrée à une tension de référence (E_{ref}).

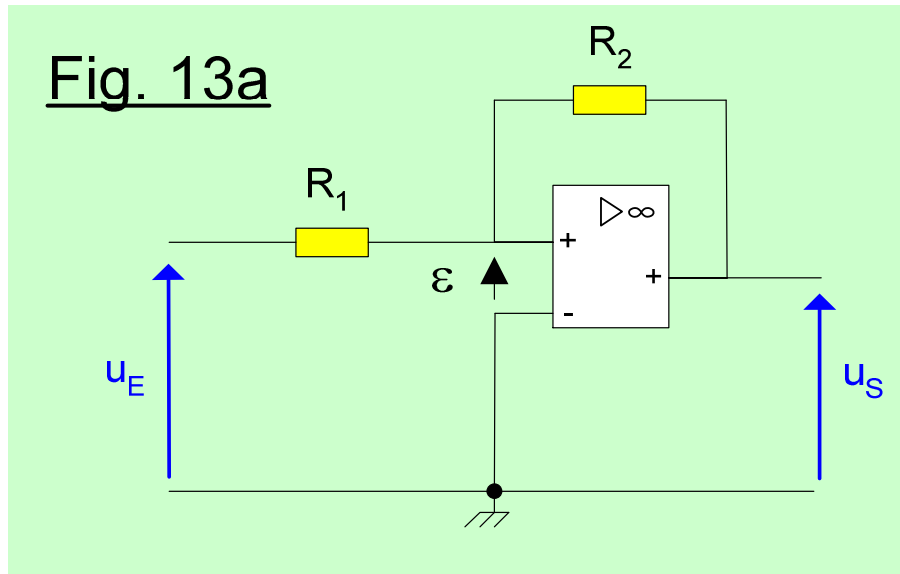
L'état de la sortie donne le résultat de la comparaison.

4-2- Montage « comparateur à deux seuils » ou « trigger de Schmitt » ou « comparateur à hystérésis »

- Exemple d'application : régulation de température
 $T > 20\text{ °C}$: on coupe le chauffage
 $T < 18\text{ °C}$: on met le chauffage



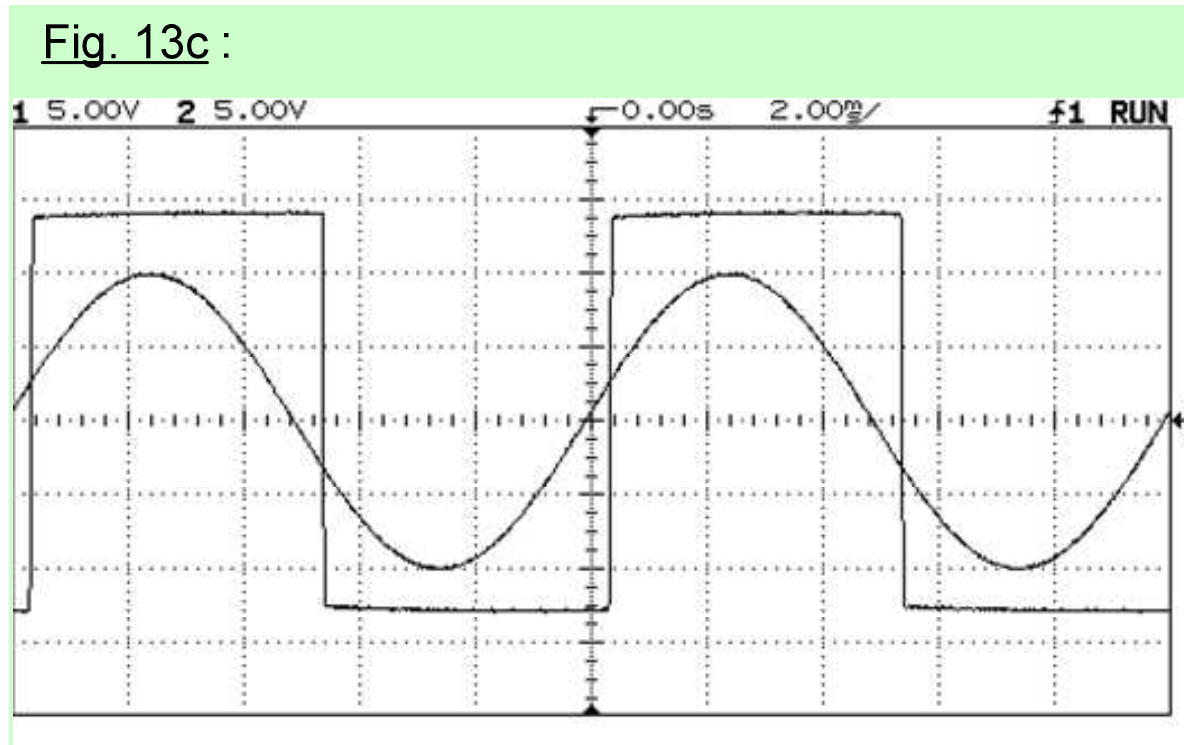
- Trigger « non inverseur symétrique »



A.O. $\mu A741$
 $V_{CC\pm} = \pm 15 \text{ V}$

$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$

Ce montage possède deux tensions de seuil : U_B et U_H



- Caractéristique de transfert $u_S(u_E)$

si $u_E > U_H$ alors $\varepsilon > 0$ et $u_S = V_{sat+}$

si $u_E < U_B$ alors $\varepsilon < 0$ et $u_S = V_{sat-}$

si $U_B < u_E < U_H$: phénomène d'hystérésis

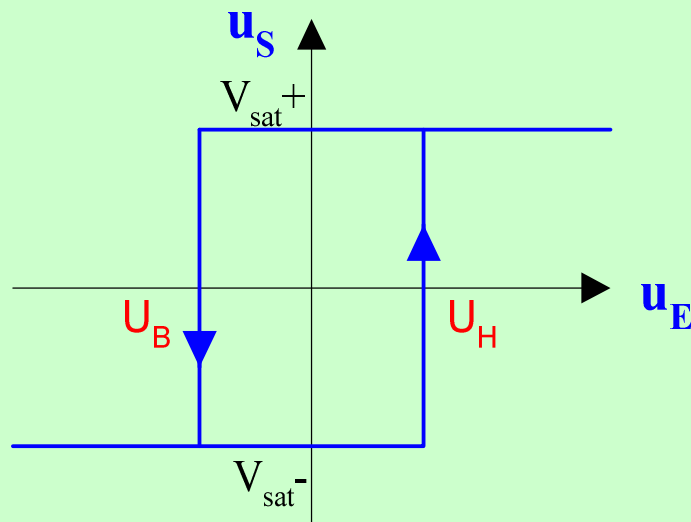
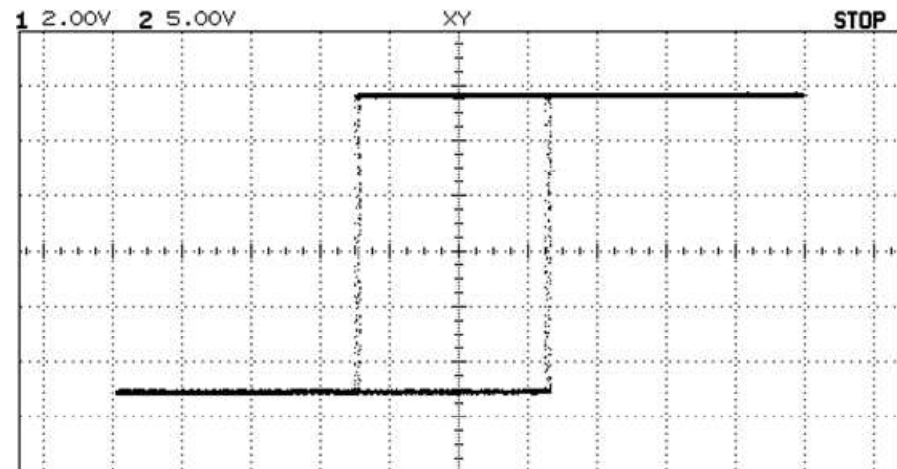


Fig. 13b

Fig. 13d :



- Calcul des tensions de seuil

A l'instant du basculement de la sortie : $\varepsilon = 0 \text{ V}$

$$\Rightarrow v_+ = 0$$

Théorème de Millman :

$$v_+ = \frac{\frac{u_E}{R_1} + \frac{u_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \Rightarrow \quad u_E = -\frac{R_1}{R_2} u_S$$

$$\text{si } u_S = V_{\text{sat}} - \Rightarrow u_E = U_H = -\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}} -$$

$$\text{si } u_S = V_{\text{sat}} + \Rightarrow u_E = U_B = -\frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}} +$$

$$\text{A.N.} \quad U_H \approx -\frac{10}{47} \cdot (-14) \approx +3 \text{ V}$$

$$U_B \approx -\frac{10}{47} \cdot (+14) \approx -3 \text{ V}$$

