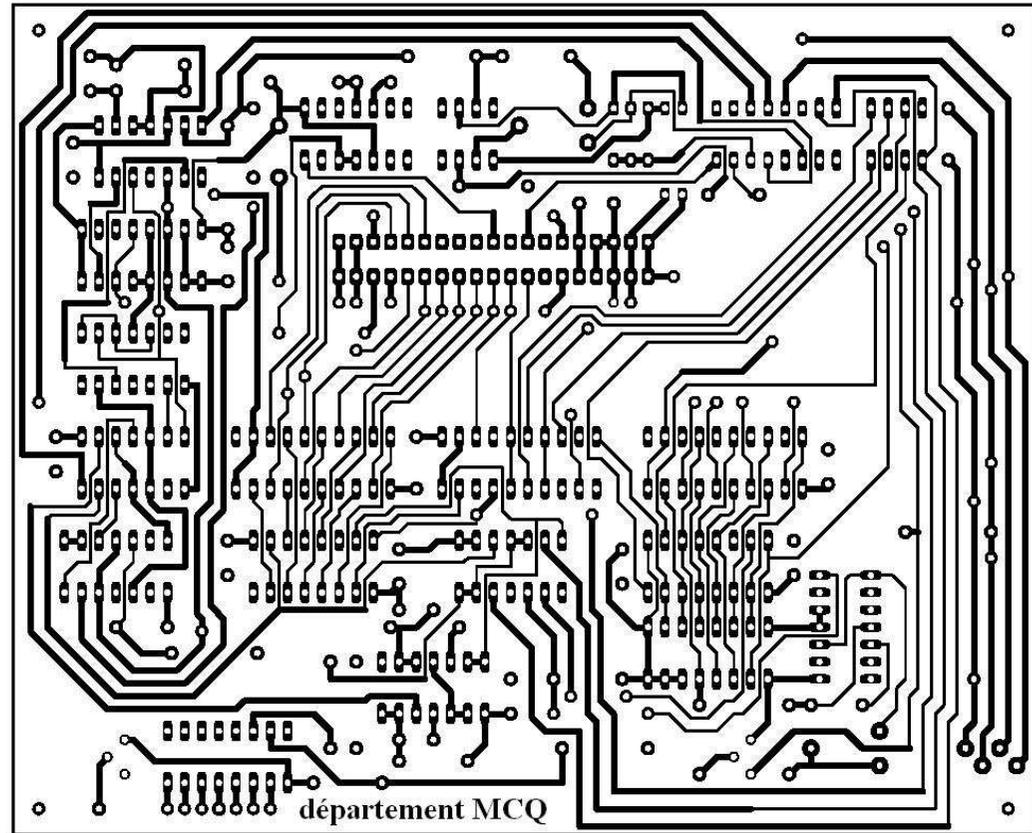




IUT qualité,  
logistique industrielle et organisation

**Fomesoutra.com**  
*ça soutra !*  
Docs à portée de main



# Module d'Electronique

## 1<sup>ère</sup> 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

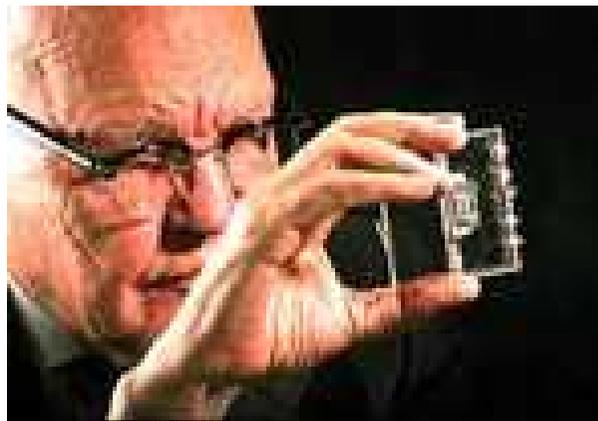
## L'amplificateur opérationnel

### Introduction : les circuits intégrés



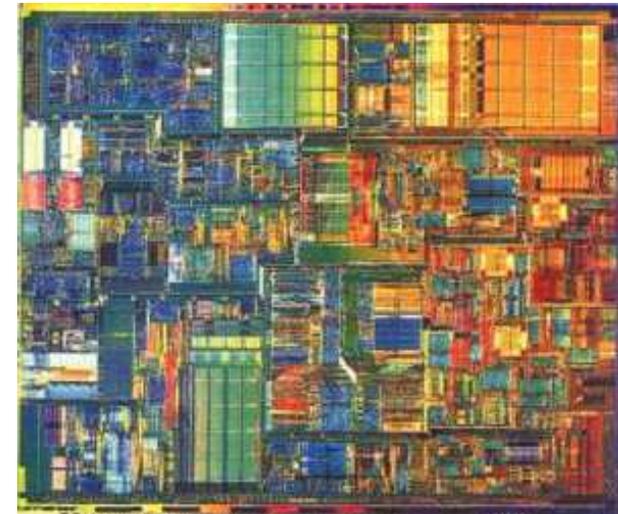
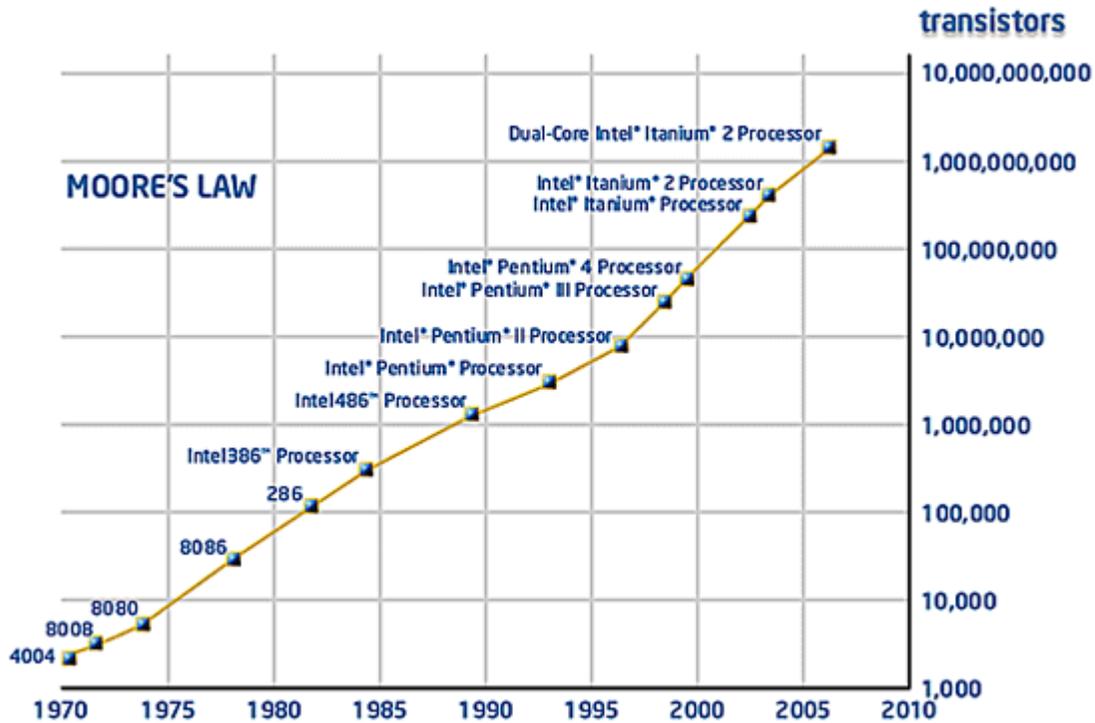
Un C.I. est un circuit électronique miniaturisé, principalement constitué de transistors.

- 1958 : 1<sup>er</sup> C.I. (Texas Instruments, Jack Kilby)



- Loi de Moore

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



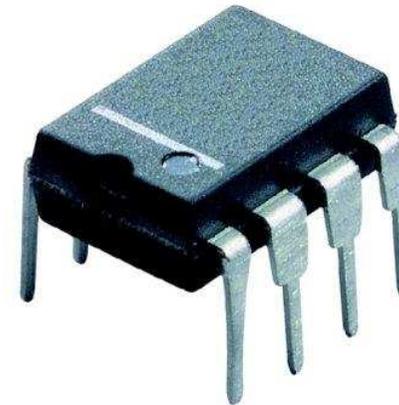
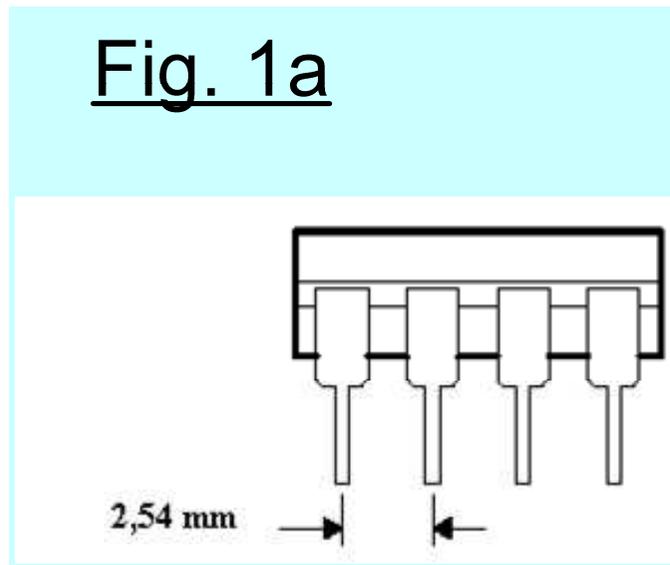
## 1- L'Amplificateur Opérationnel (A.O.)

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

- Exemple :  $\mu$ 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 :

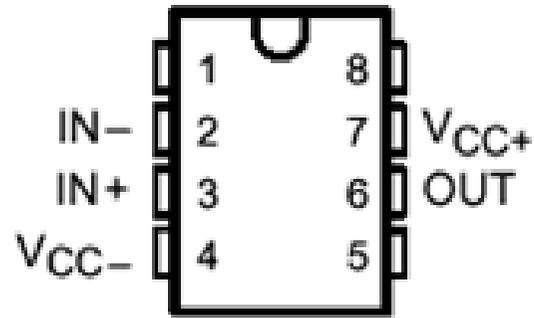


Fig. 1b

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

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

- une sortie :

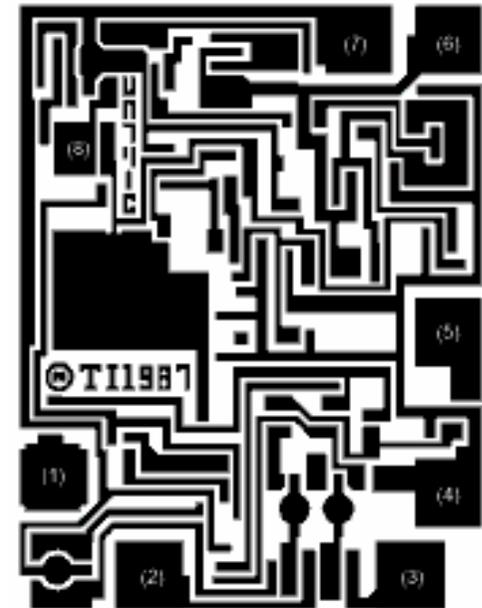
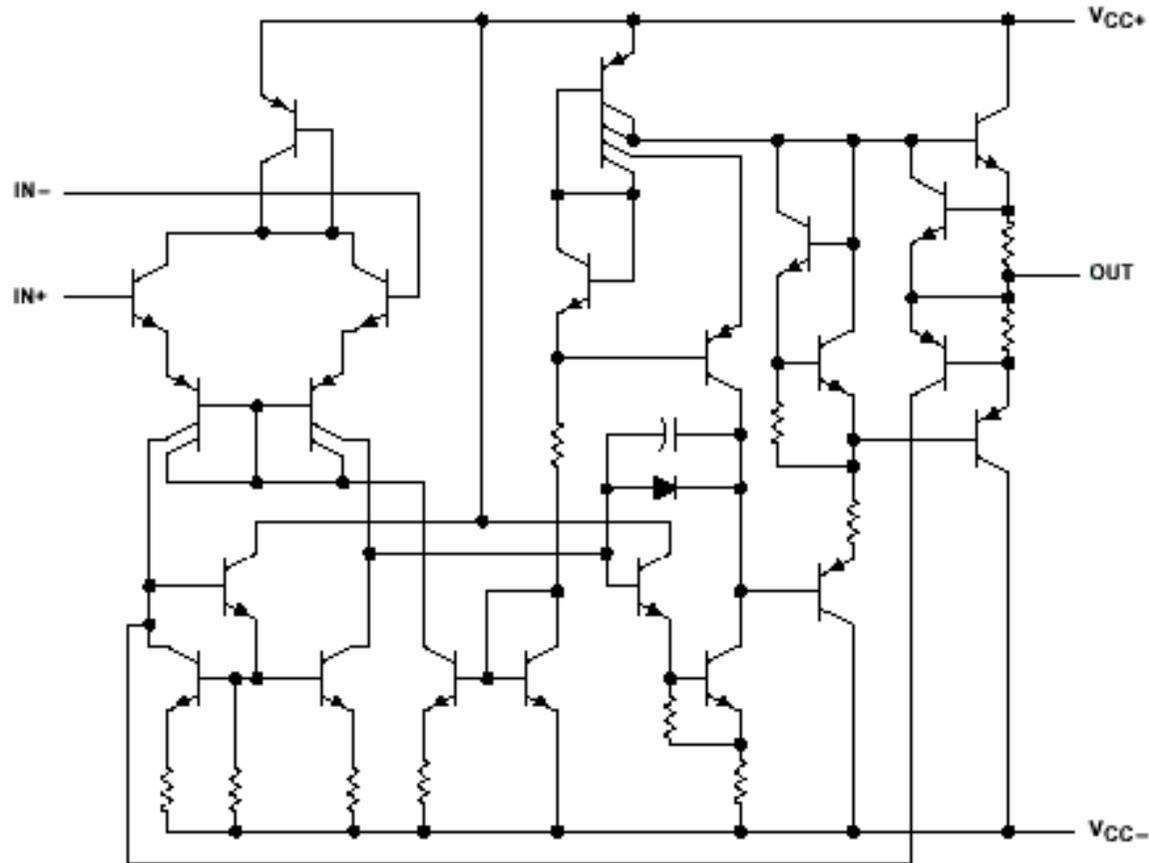
broche OUT (ou s)

- deux broches d'alimentation :

broche Vcc+ : alimentation en tension continue positive

broche Vcc- : « « négative

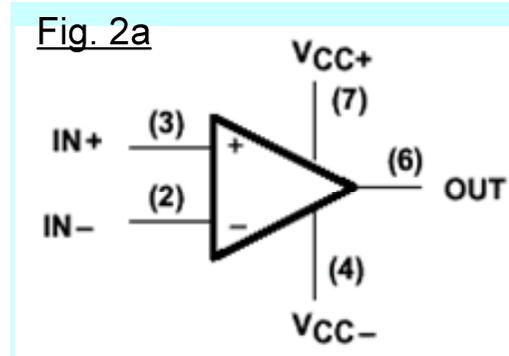
- Schéma interne du  $\mu A741$



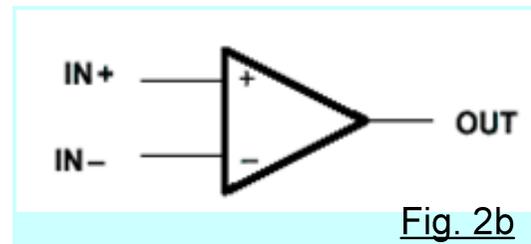
1 mm<sup>2</sup>

## 1-2- Symboles

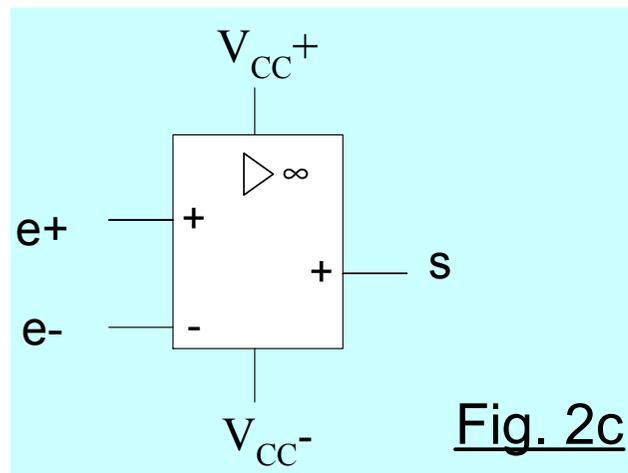
- symbole américain :



- symbole simplifié :

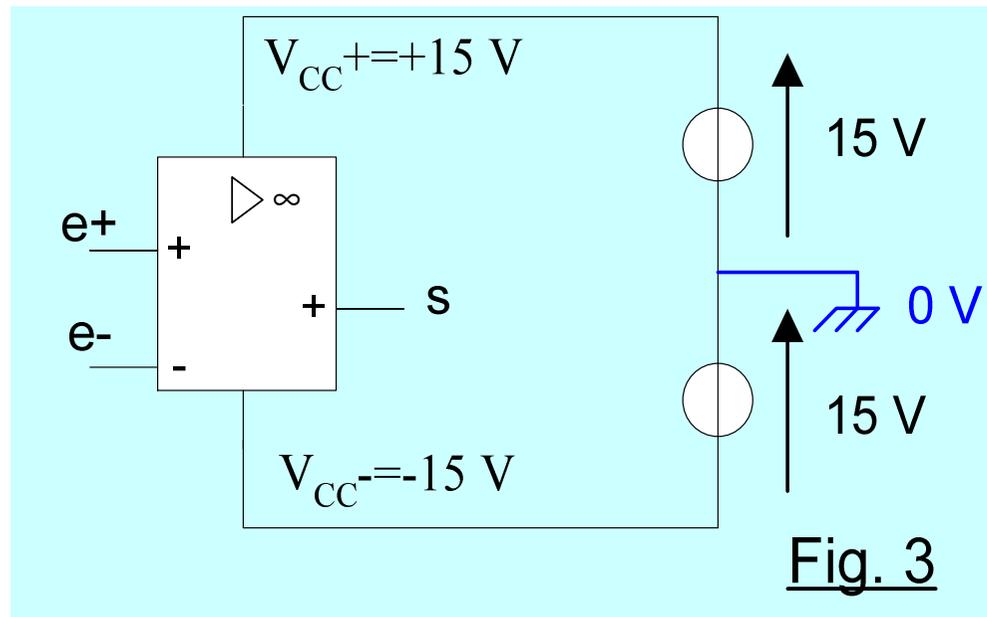


- symbole européen :



## 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

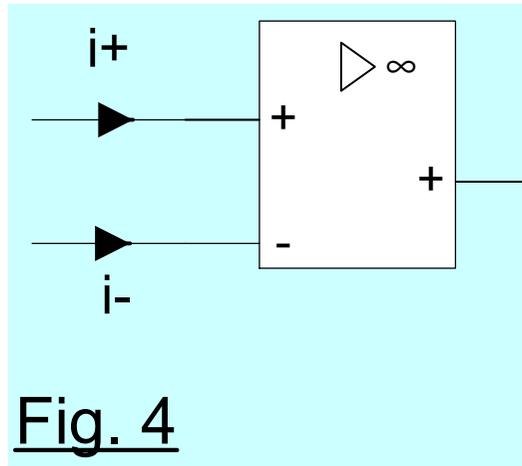


Fig. 4

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

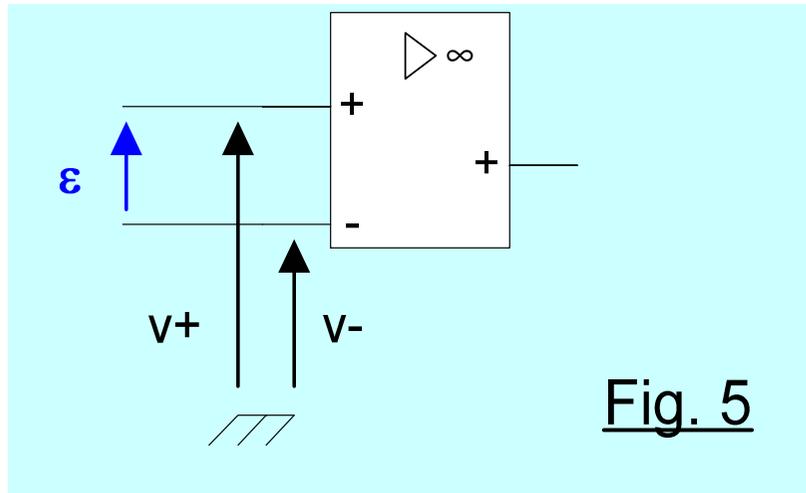
$$i+ \approx 0$$

$$i- \approx 0$$

## 2-2- Tension différentielle d'entrée : $\varepsilon$

- Définition :

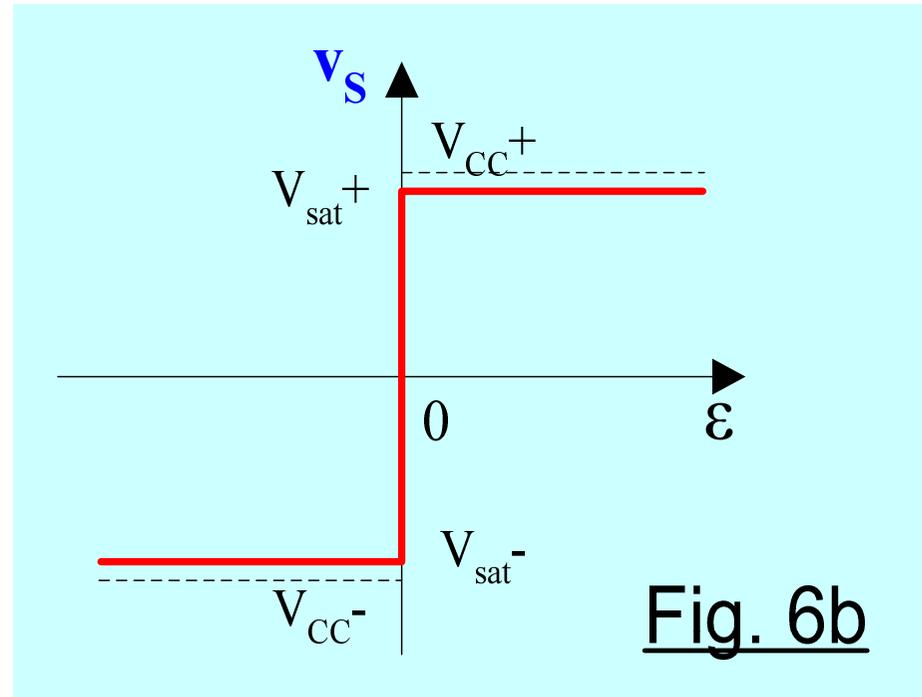
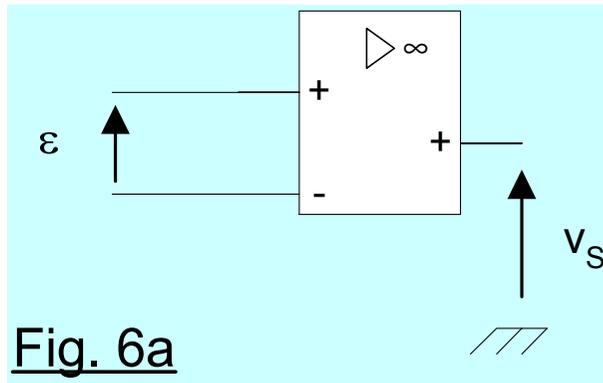
*La tension différentielle d'entrée est la différence de potentiels entre l'entrée non inverseuse et l'entrée inverseuse.*



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

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

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

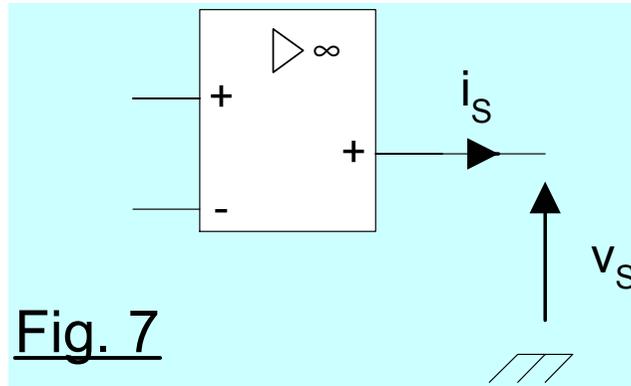


On distingue trois zones :

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

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 :

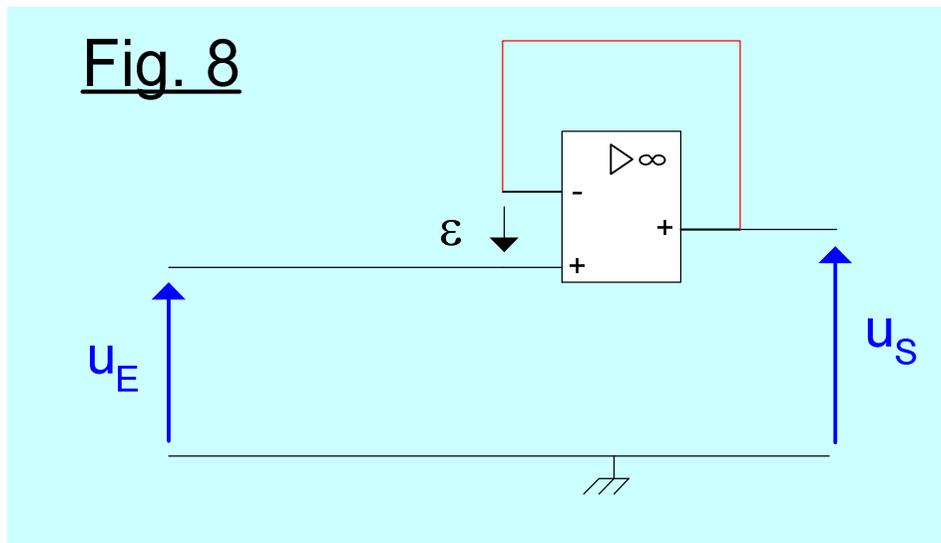
On dit qu'il y a *réaction positive* quand la sortie est reliée à l'entrée non inverseuse.

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

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

Finalement :  **$u_S = u_E$**

- **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

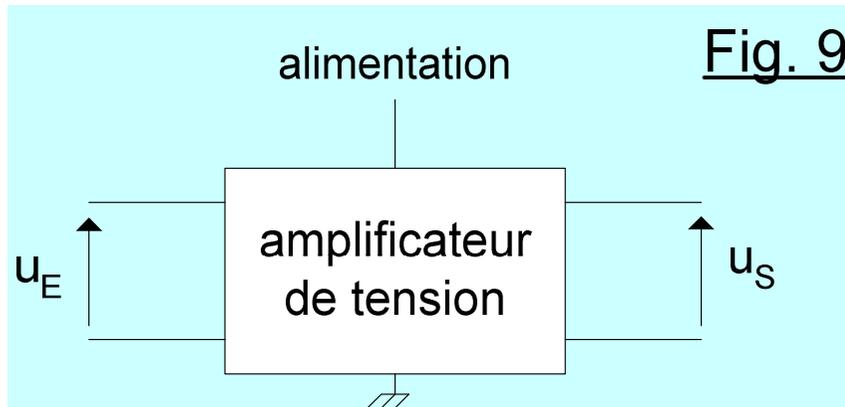


Fig. 9

Par définition, l'amplification en tension est :

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

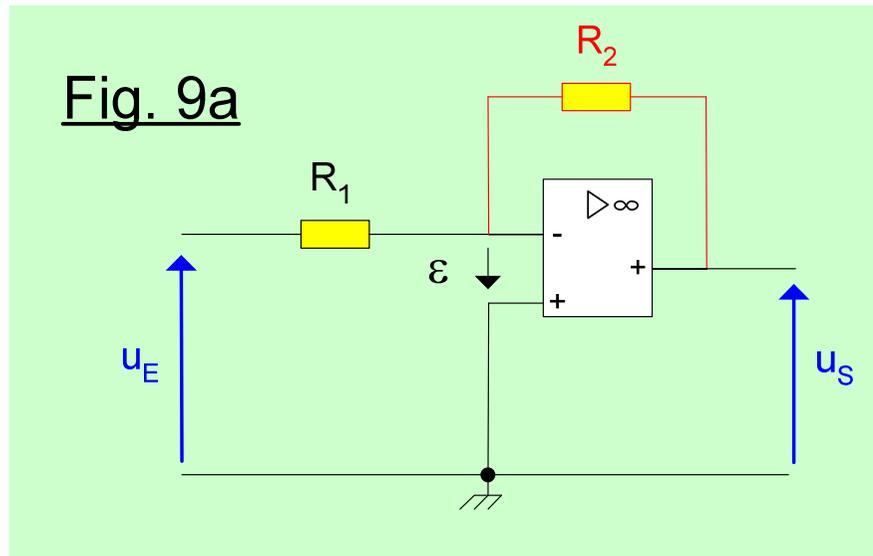
Par définition, le gain en tension est :

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

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 :

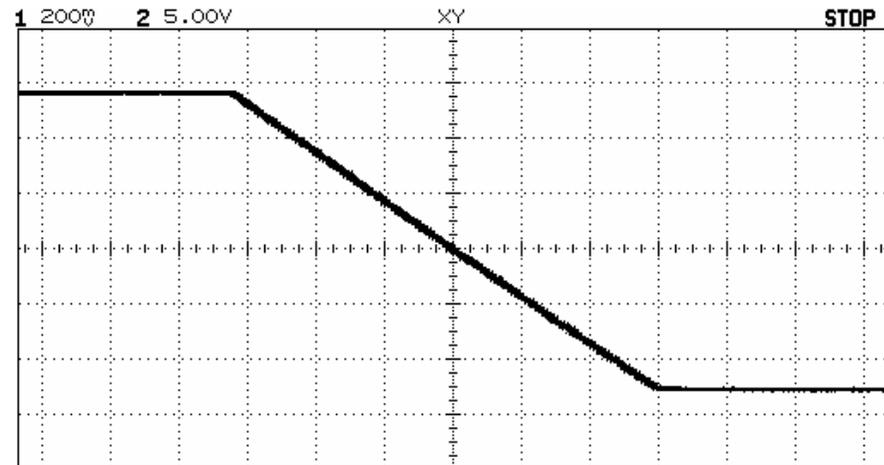
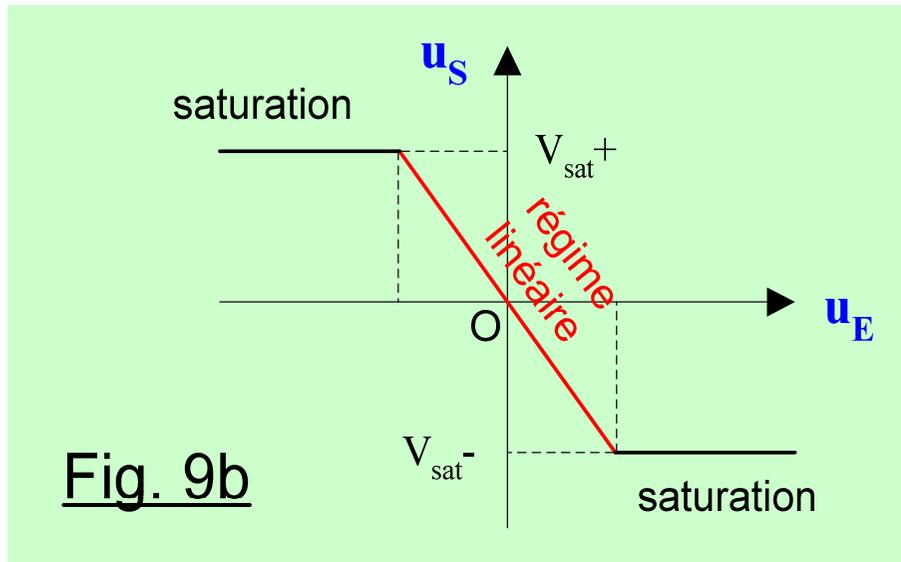
$$v_- = \frac{\frac{u_E}{R_1} + \frac{u_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

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

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

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

- Caractéristique de transfert  $u_S(u_E)$



- fonctionnement en régime linéaire :

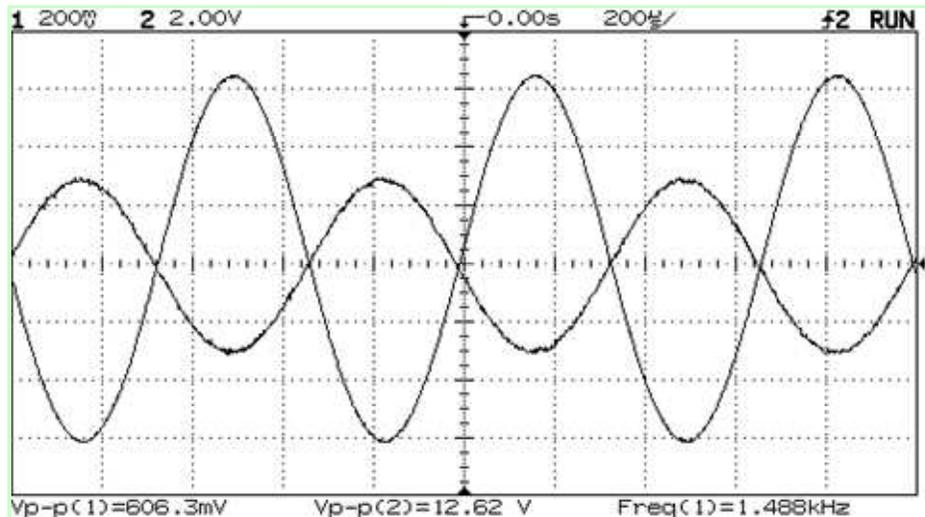


Fig. 9c

$u_S$  est proportionnelle à  $u_E$  :

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

- fonctionnement en saturation :

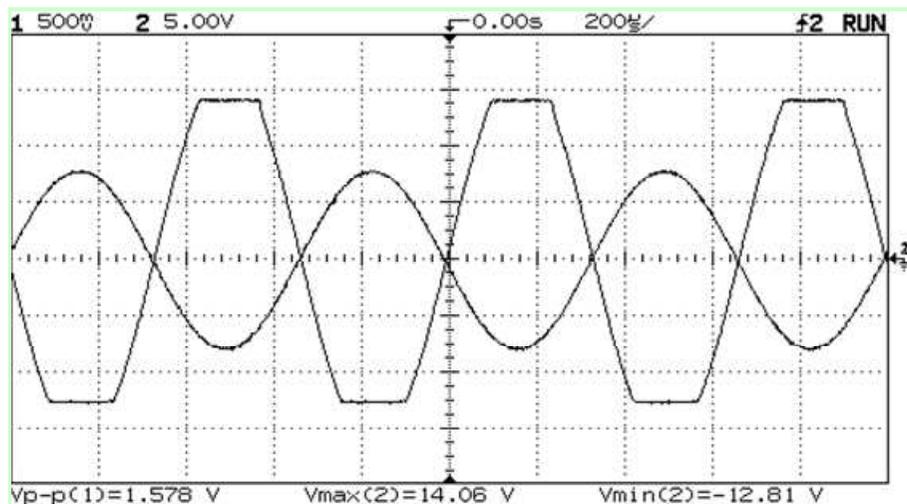
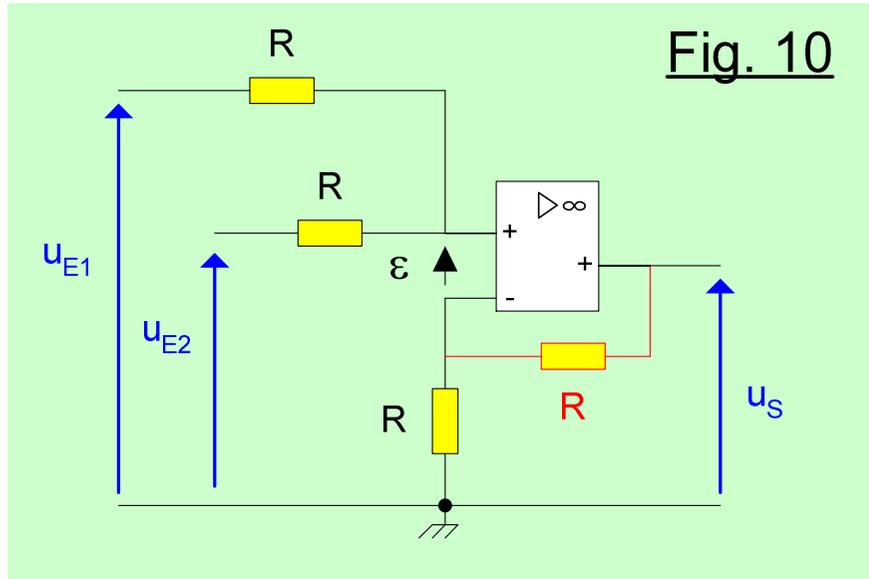


Fig. 9d

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+:

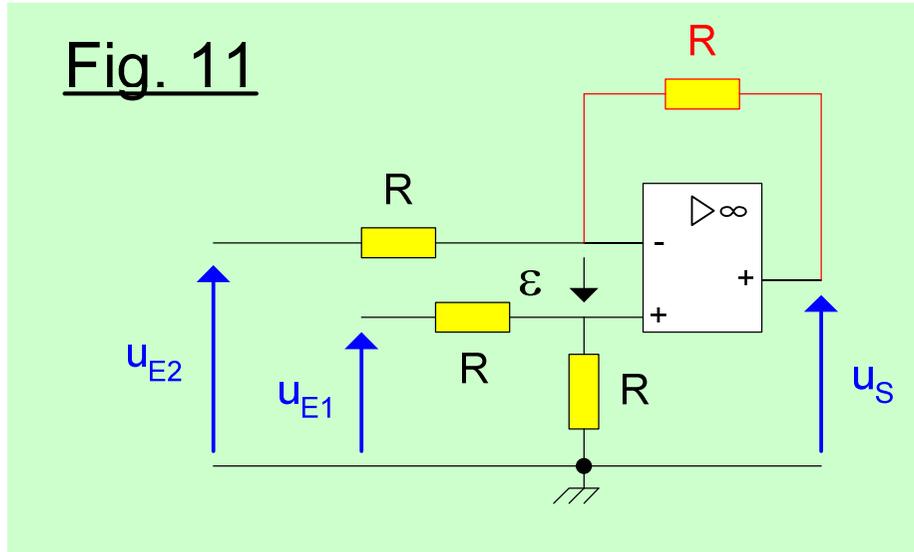
$$v_+ = \frac{\frac{u_{E1}}{R} + \frac{u_{E2}}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{u_{E1} + u_{E2}}{2}$$

- (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.

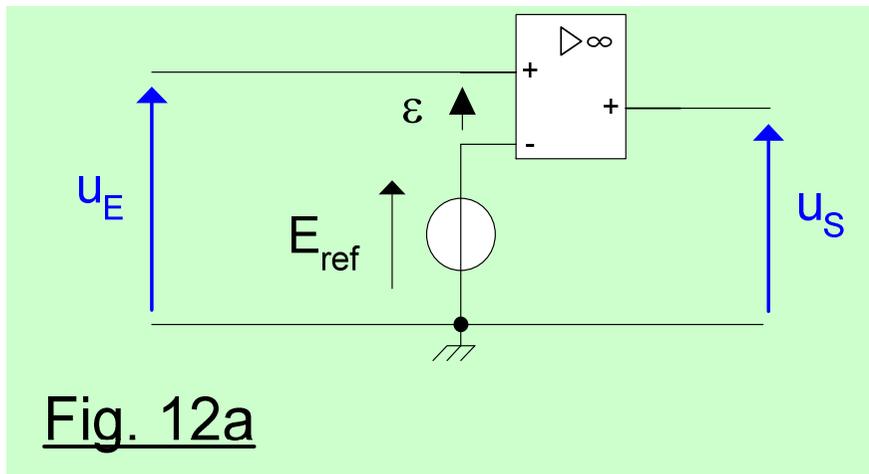
La sortie de l'A.O. peut prendre *deux* états :

$$V_{sat+} \quad \text{si } \varepsilon > 0 \text{ V}$$

$$\text{ou } V_{sat-} \quad \text{si } \varepsilon < 0 \text{ V}$$

### 4-1- Montage comparateur simple

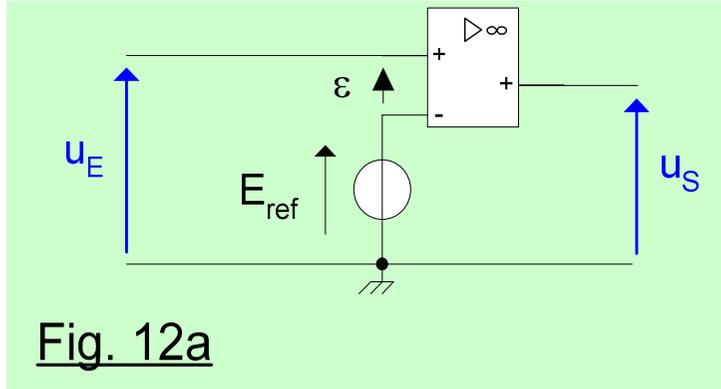
- comparateur simple « non inverseur »



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

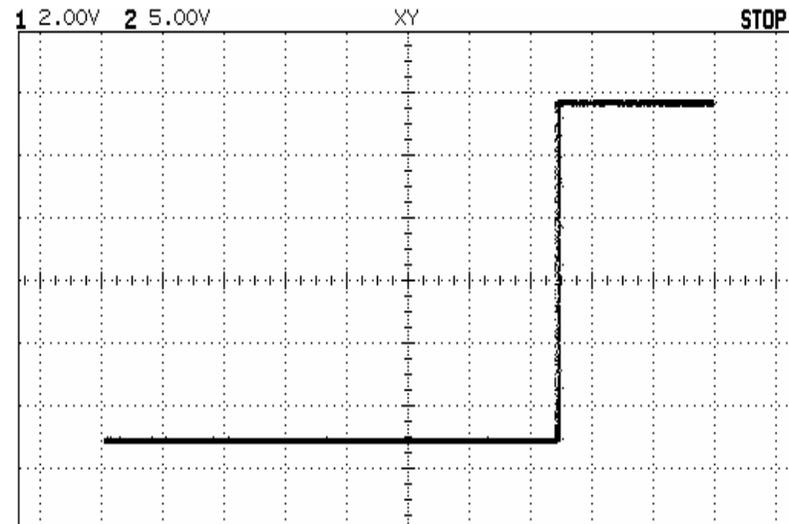
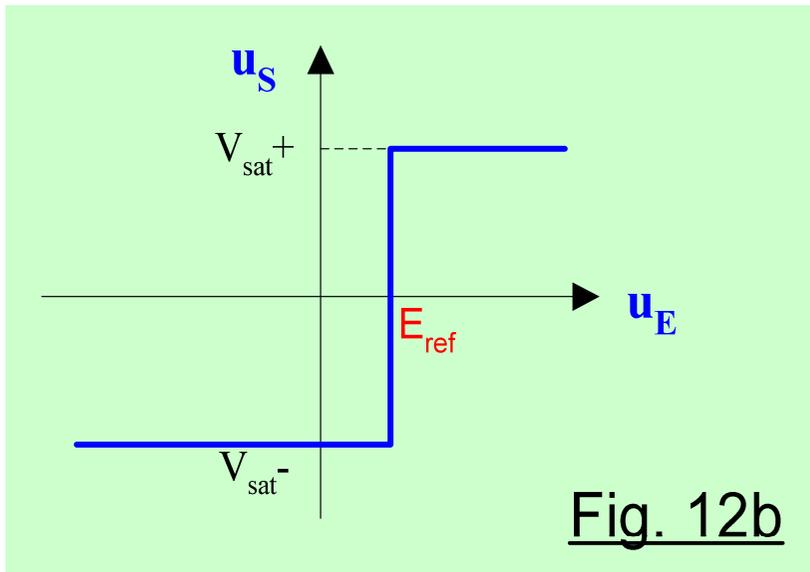
$$E_{ref} = +5 \text{ V}$$

- Caractéristique de transfert  $u_S(u_E)$



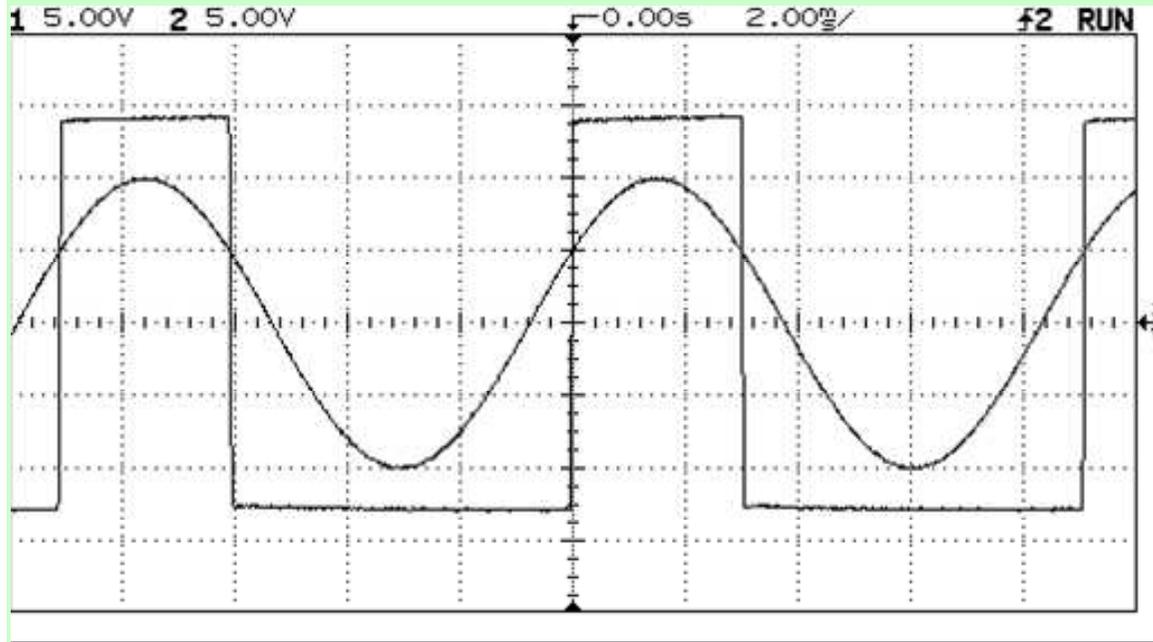
Loi des branches :  $\varepsilon = u_E - E_{ref}$

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 :

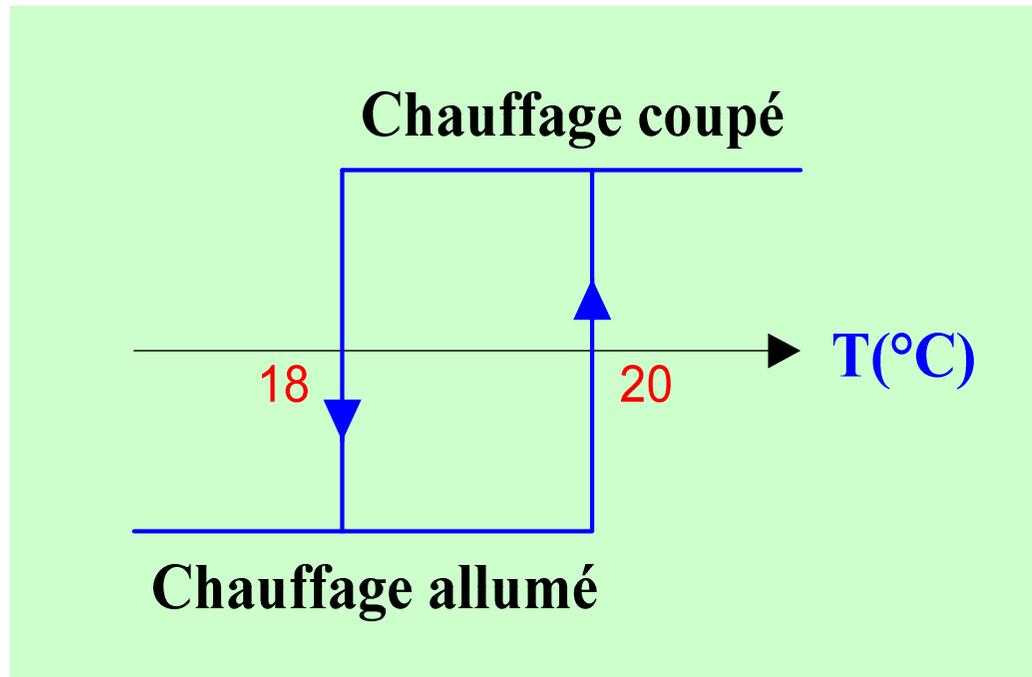


Ce montage compare la tension d'entrée à une tension de référence ( $E_{ref}$ ).

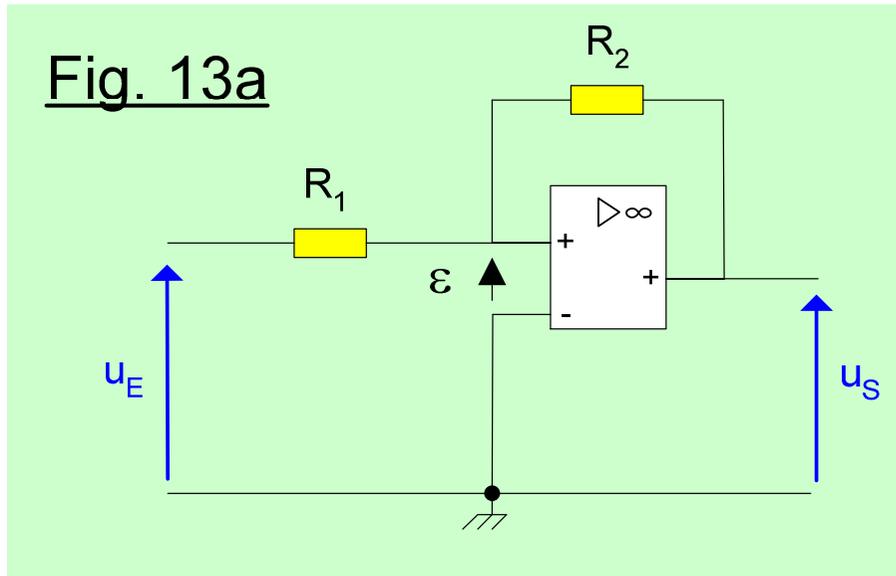
L'état de la sortie donne le résultat de la comparaison.

## 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



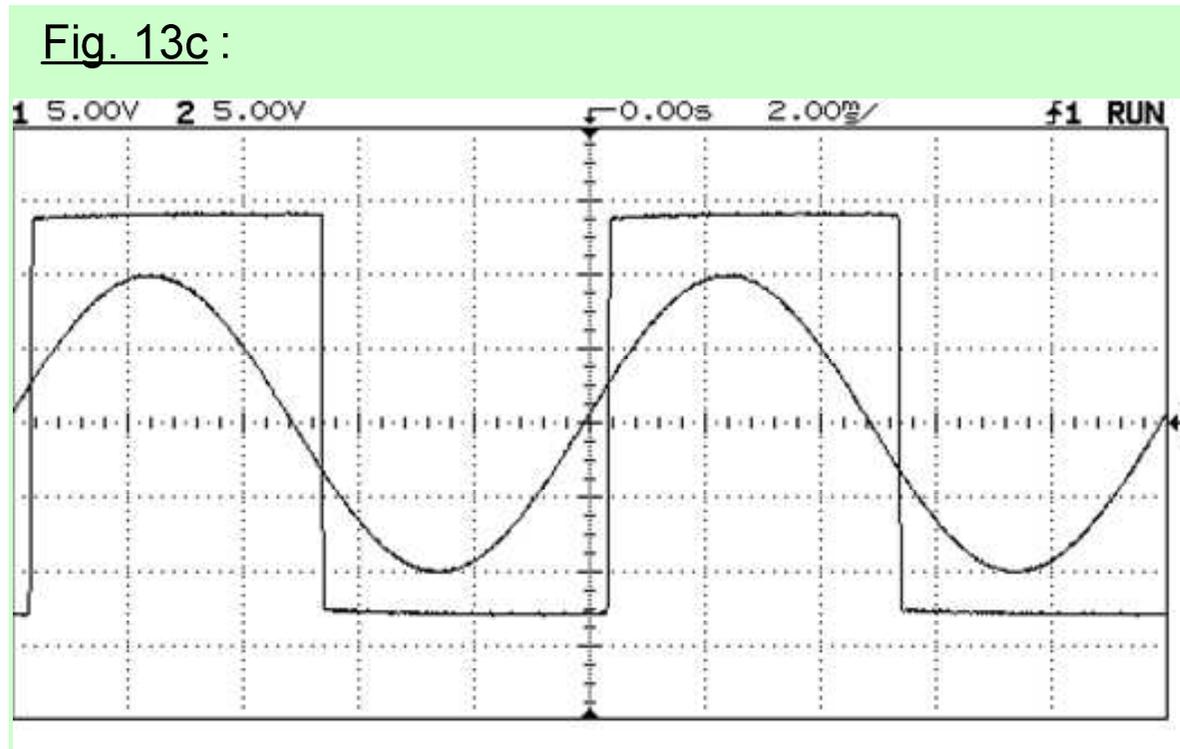
- Trigger « non inverseur symétrique »



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

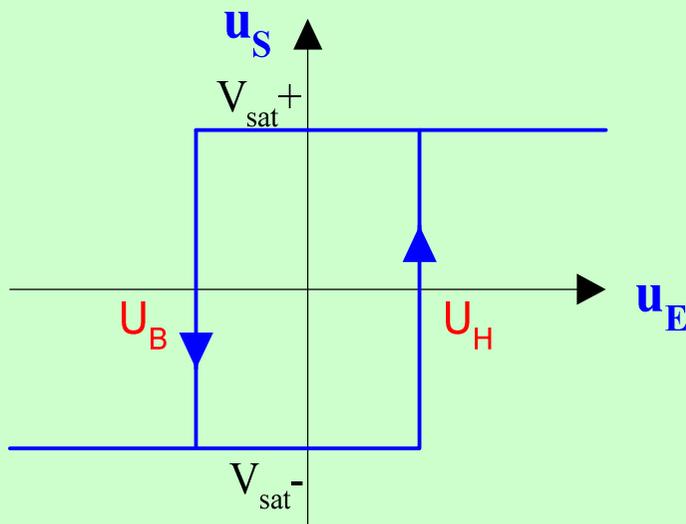
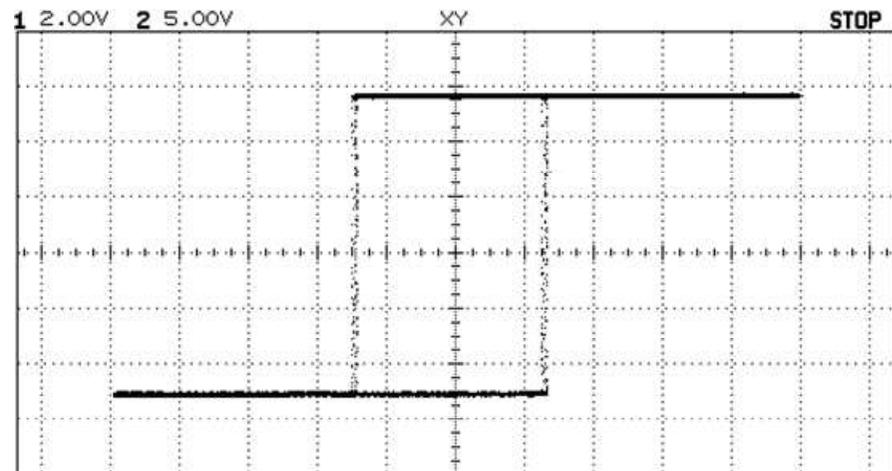


Fig. 13b

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 :

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

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

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

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

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

