

# Les montages à Amplificateurs Opérationnels

Chapitre 1 : Rappel sur les outils d'analyse

Chapitre 2 : L' Amplificateur Opérationnel

Chapitre 3 : Les montages de base de l' AO en régime linéaire

Chapitre 4 : Les montages de base à AO en régime non-linéaire

Chapitre 5 : Montages divers

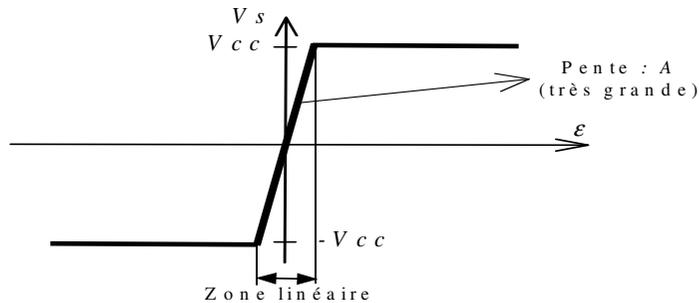
Principe

Les montages comparateurs

Le multivibrateur astable

Le monostable

## Domaine de fonctionnement en dehors de la zone linéaire



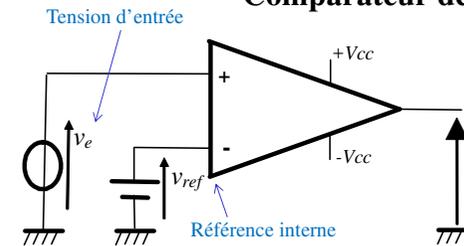
**Zone linéaire :**  $\varepsilon = (V^+ - V^-) = \frac{V_s}{A}$

si A est très grand,  $\varepsilon \rightarrow 0$ , et donc  $V^+ = V^-$

**Zone non-linéaire :**  $V_s \in \{-V_{cc}, +V_{cc}\}$ ,  $\varepsilon$  est quelconque et donc  $V^+ \neq V^-$

Les montages en fonctionnement non-linéaire reposent sur l'utilisation d'une réaction de la tension de sortie sur l'entrée non-inverseuse afin de forcer la tension  $V_s$  à prendre les deux valeurs  $-V_{cc}$  et  $+V_{cc}$ .

## Les montages comparateurs Comparateur de valeur relative



Une tension inconnue  $V_e$  est appliquée sur l'entrée positive

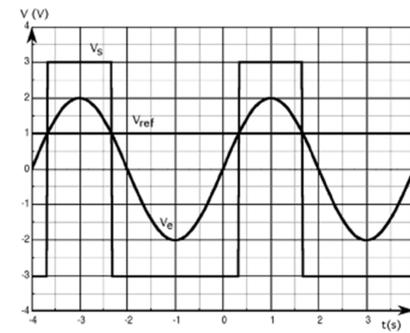
Si  $V^+ > V^-$  alors  $V_s = V_{cc}$

Si  $V_e > V_{ref}$  alors  $V_s = +V_{cc}$

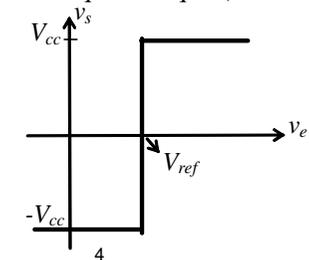
Si  $V^+ < V^-$  alors  $V_s = -V_{cc}$

Si  $V_e < V_{ref}$  alors  $V_s = -V_{cc}$

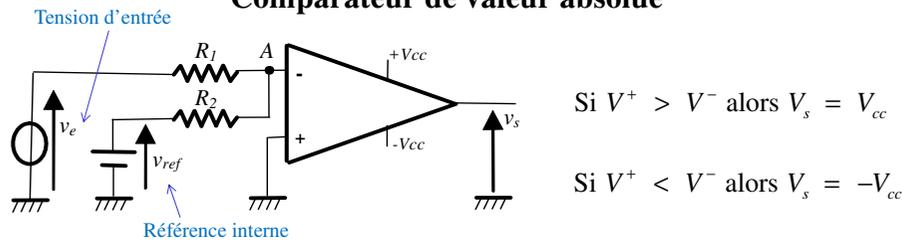
Exemple :  $V_{cc}=3V, V_{ref}=1V$



Caractéristique statique (entrée/sortie):



## Les montages comparateurs Comparateur de valeur absolue



$V^+ = 0$  donc le passage de  $V_s$  d'un état à un autre se produira quand la tension  $V^-$  sera égale à zéro.

En appliquant le théorème de superposition :

\* On éteint  $v_{ref}$  (on remplace  $v_{ref}$  par 0V)  $V^- ' =$

\* On éteint  $v_e$  (on remplace  $v_e$  par 0V)  $V^- '' =$

$$* V^- = \frac{R2}{R1+R2} \cdot V_e + \frac{R1}{R1+R2} \cdot V_{ref}$$

$$V^+ = 0$$

5

$$V_s = +V_{cc} \text{ si } V^+ > V^- \Rightarrow 0 > \frac{R2}{R1+R2} \cdot V_e + \frac{R1}{R1+R2} \cdot V_{ref} \quad V_e < -\frac{R1}{R2} \cdot V_{ref}$$

$$V_s = -V_{cc} \text{ si } V^+ < V^- \Rightarrow 0 < \frac{R2}{R1+R2} \cdot V_e + \frac{R1}{R1+R2} \cdot V_{ref} \quad V_e > -\frac{R1}{R2} \cdot V_{ref}$$

Le basculement aura lieu quand:

$$V_e = -\frac{R1}{R2} V_{ref}$$

Il faut que  $V_e$  et  $V_{ref}$  soient de polarité différente

Exercice :

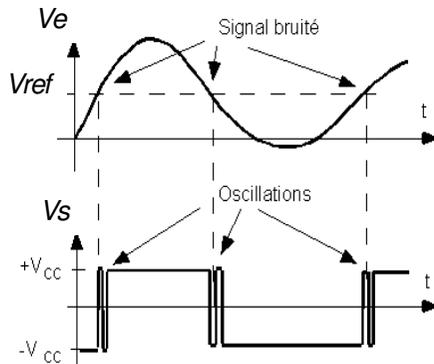
$V_{ref} = 5V$ ,  $V_{cc} = +15V$ ,  $R1 = R2 = 1k\Omega$ ,

Tracez la caractéristique  $V_s$  en fonction de  $V_e$

6

## Les montages comparateurs Comparateur à hysteresis : Intérêt

En fait, le signal d'entrée est toujours entaché de bruit.  
Si on n'en tient pas compte, des transitions rapides et intempestives entre les états haut et bas apparaissent (c est inversé sur la figure)



Les comparateurs à hysteresis apportent une immunité par rapport aux parasites présents sur le signal d'entrée

7

## Les montages comparateurs Comparateur inverseur à hysteresis, trigger de Schmitt

Introduction d'une réaction positive renvoyant une partie du signal de sortie sur l'entrée non-inverseuse. Le montage fonctionne en régime non-linéaire.

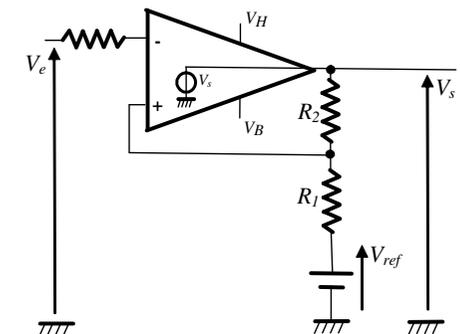
$$V_s \in \{-V_{cc}, +V_{cc}\}$$

Comme  $V^+$  dépend de  $V_s$ , les niveaux de basculement vont être différents selon la valeur de  $V_s$

Si  $V^+ > V^-$  alors  $V_s = V_H$

Si  $V^+ < V^-$  alors  $V_s = V_B$

Récrire ces conditions en fonctions de  $V_e$



8

## Les montages comparateurs Comparateur inverseur à hysteresis

$$V^- = V_e$$

$$V^+ =$$

$$V_s \in \{V_B, V_H\}$$

Il existe donc deux seuils de basculement

$$V_s = V_H \quad \text{si } V_e < V_1^+ \quad V_1^+ =$$

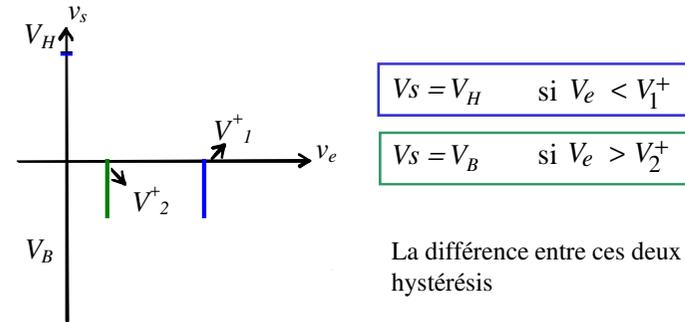
$$V_s = V_B \quad \text{si } V_e > V_2^+ \quad V_2^+ =$$

9

## Les montages comparateurs Comparateur inverseur à hysteresis

Exercice :

Tracez la caractéristique  $V_s$  en fonction de  $V_e$



La différence entre ces deux seuils est appelée hystérésis

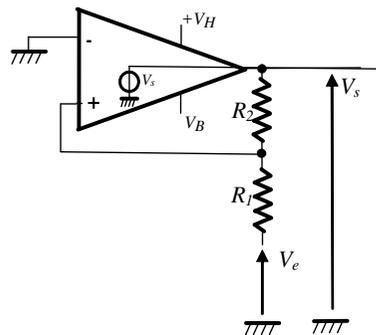
$$\Delta V = V_1^+ - V_2^+ = \frac{R1}{R1+R2} \cdot (V_H - V_B)$$

Il y a deux régions pour lesquelles l'état de la sortie est fixé.

Dans la zone d'hystérésis, l'état de la sortie peut prendre les deux valeurs. La valeur prise **dépend de la valeur prise précédemment en dehors**. C'est une zone de mémorisation.

10

## Les montages comparateurs Comparateur non inverseur à hysteresis



$V_s$  est connectée à ...

Donc  $V_s \in \{V_B, V_H\}$

Si  $V^- > V^+$  alors  $V_s = V_B$

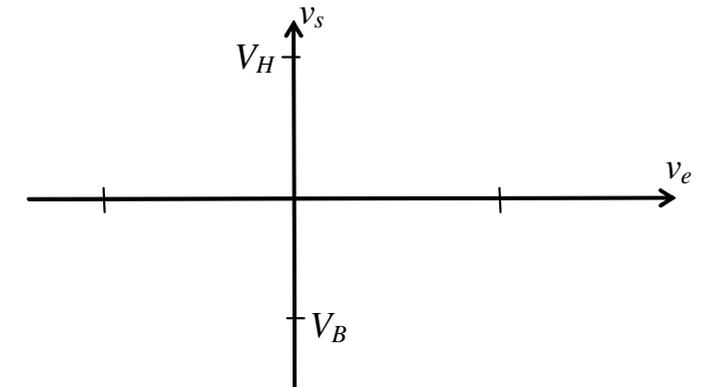
Si  $V^- < V^+$  alors  $V_s = V_H$

$$V^- = 0$$

$$V^+ =$$

11

## Les montages comparateurs Comparateur non inverseur à hysteresis



$$V_s \in \{V_B, V_H\}$$

Il existe donc deux seuils de basculement :

$$V_s = V_H \quad \text{si } V^+ > V^- \quad > 0 \quad V_e >$$

$$V_s = V_B \quad \text{si } V^+ < V^- \quad < 0 \quad V_e <$$

12

## Les montages comparateurs

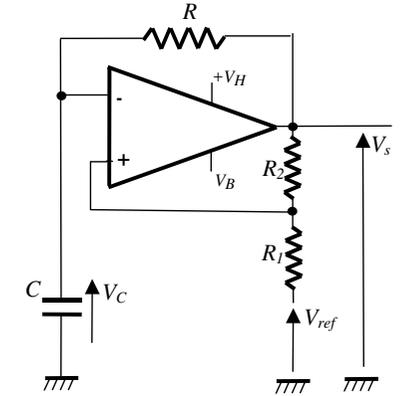
### Comparateur non inverseur à hysteresis

▲  $V_s$

13

## Le multivibrateur astable

C'est une application du comparateur non inverseur à hysteresis, pour lequel la tension  $V_s$  varie



14

## Le multivibrateur astable

A la mise sous tension :

- \_ le condensateur  $C$  est déchargé
- \_ la tension  $V_{ref}$  est positive (par exemple)

$$V^- = V_C = 0$$

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

A la mise sous tension,  $V_s = 0$ ,  
donc  $V^+ > V^-$ ,

$$V_s = V_H$$

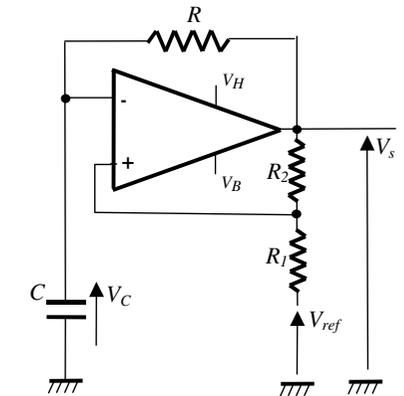
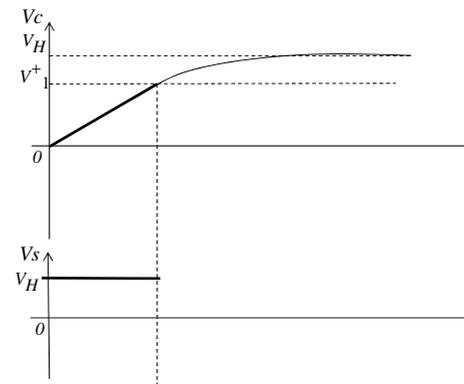
$V^+$  augmente et conforte l'état haut de  $V_s$

$$V_1^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}V_H$$

Le condensateur  $C$  se charge à travers  $R$  vers la valeur  $V_H$

15

## Le multivibrateur astable

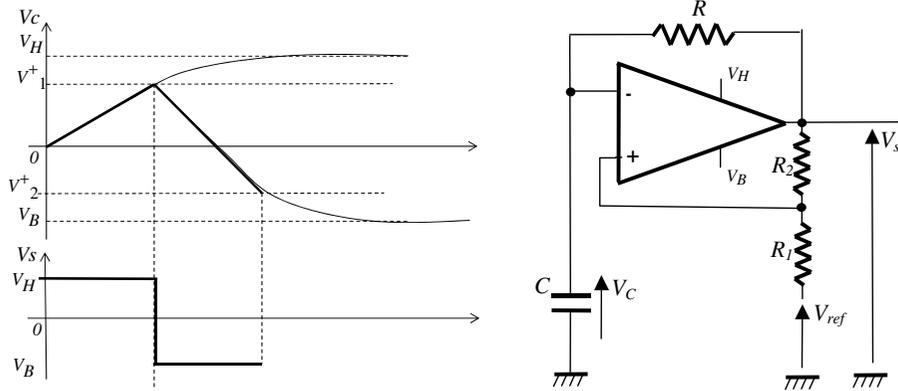


Dès que la tension aux bornes du condensateur  $C$  atteint la valeur présente sur l'entrée non inverseuse  $V^+$ ,

La tension de sortie  $V_s$  devient égale à  $V_H$

16

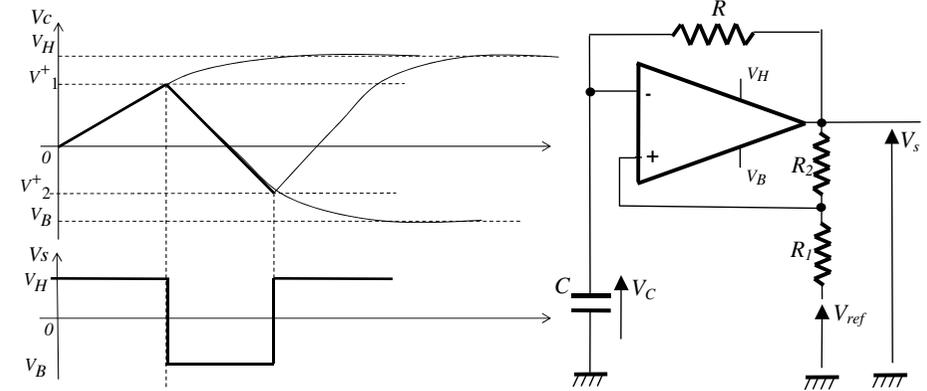
### Le multivibrateur astable



La tension de sortie  $V_s$  devient égale à  $V_B$   
 Le condensateur se charge à travers la résistance  $R$  vers la tension  $V_B$   
 La tension qui apparaît aux bornes de l'entrée positive devient égale à

$$V_2^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_B$$

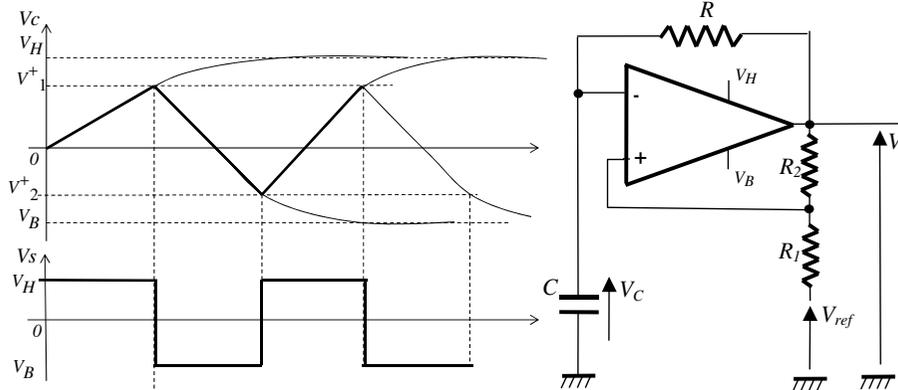
### Le multivibrateur astable



Dès que la tension aux bornes du condensateur  $C$  atteint la valeur présente sur l'entrée non inverseuse  $V_2^+$   
 La tension de sortie  $V_s$  devient égale à  $V_H$   
 Le condensateur se charge à travers la résistance  $R$  vers la tension  $V_H$   
 La tension qui apparaît aux bornes de l'entrée positive devient égale à

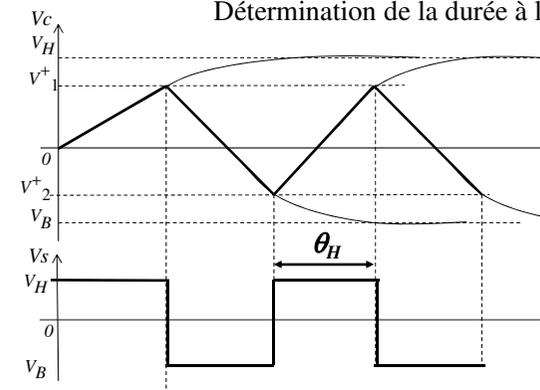
$$V_1^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2} V_H$$

### Le multivibrateur astable



Dès que la tension aux bornes du condensateur  $C$  atteint la valeur présente sur l'entrée non inverseuse  $V_1^+$   
 La tension de sortie  $V_s$  devient égale à  $V_B$   
 Le condensateur se charge à travers la résistance  $R$  vers la tension  $V_B$   
 La tension qui apparaît aux bornes de l'entrée positive devient égale à •••

### Le multivibrateur astable Détermination de la durée à l'état haut $\theta_H$



$$Vc(t) = (Vc(0) - Vc(\infty)) \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + Vc(\infty)$$

En régime permanent la durée à l'état haut correspond au temps mis par le condensateur pour passer de  $V_2^+$  à  $V_1^+$

$$Vc(t) = (V_2^+ - V_H) \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + V_H$$

Au bout de la durée  $\theta_H$ , la tension vaut  $V_1^+$

$$V_1^+ = (V_2^+ - V_H) \cdot e^{-\frac{\theta_H}{R \cdot C}} + V_H$$

$$\theta_H = R \cdot C \cdot \ln \left( \frac{V_H - V_2^+}{V_H - V_1^+} \right)$$

### Le multivibrateur astable

Détermination de la durée à l'état haut  $\theta_H$

$$\theta_H = R.C.Ln\left(\frac{V_H - V_2^+}{V_H - V_1^+}\right)$$

$$V_1^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}V_H$$

$$V_2^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}V_B$$

$$\theta_H = R.C.Ln\left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}\left(1 - \frac{V_B}{V_H}\right) - \frac{V_{Ref}}{V_H}}{1 - \frac{V_{Ref}}{V_H}}\right)$$

Si l'alimentation est symétrique,

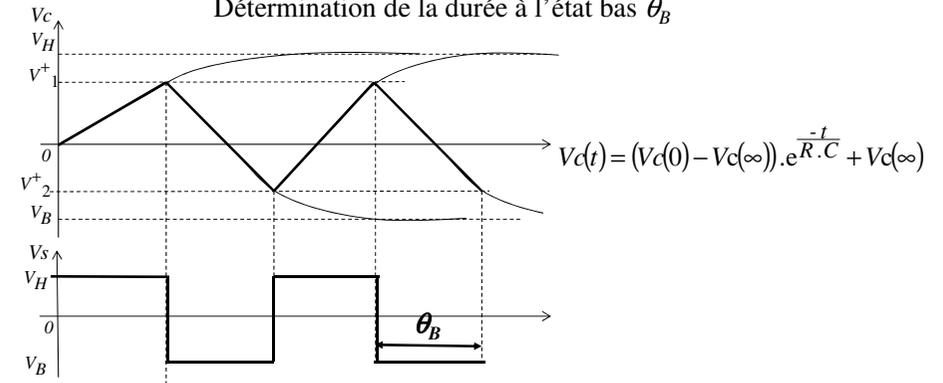
$$V_B = -V_H$$

$$\theta_H = R.C.Ln\left(\frac{1 + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} - \frac{V_{Ref}}{V_H}}{1 - \frac{V_{Ref}}{V_H}}\right)$$

21

### Le multivibrateur astable

Détermination de la durée à l'état bas  $\theta_B$



En régime permanent la durée à l'état bas correspond au temps mis par le condensateur pour passer de  $V_1^+$  à  $V_2^+$

$$V_c(t) = (V_1^+ - V_B) \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}} + V_B$$

Au bout de la durée  $\theta_B$ , la tension vaut  $V_2^+$

$$V_2^+ = (V_1^+ - V_B) \cdot e^{-\frac{\theta_B}{R \cdot C}} + V_B$$

$$\theta_B = R.C.Ln\left(\frac{V_1^+ - V_B}{V_2^+ - V_B}\right)$$

22

### Le multivibrateur astable

Détermination de la durée à l'état haut  $\theta_B$

$$\theta_B = R.C.Ln\left(\frac{V_1^+ - V_B}{V_2^+ - V_B}\right)$$

$$V_1^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}V_H$$

$$V_2^+ = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_{ref} + \frac{R_1}{R_1+R_2}V_B$$

$$\theta_B = R.C.Ln\left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}\left(1 - \frac{V_H}{V_B}\right) - \frac{V_{Ref}}{V_B}}{1 - \frac{V_{Ref}}{V_B}}\right)$$

Si l'alimentation est symétrique,

$$V_B = -V_H$$

$$\theta_B = R.C.Ln\left(\frac{1 + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2} + \frac{V_{Ref}}{V_H}}{1 + \frac{V_{Ref}}{V_H}}\right)$$

23

### Le multivibrateur astable

Rapport cyclique

$$\delta = \frac{\theta_H}{T} = \frac{\theta_H}{\theta_B + \theta_H}$$

Si  $V_{ref} = 0$  alors  $\theta_B = \theta_H = \theta$

et  $\delta = 0,5$

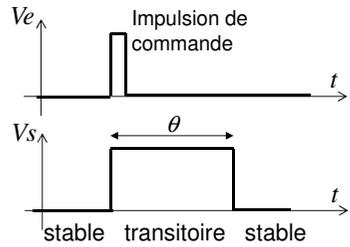
$$\theta = R.C.Ln\left(1 + 2 \cdot \frac{R_1}{R_2}\right)$$

24

## APPROFONDISSEMENT : Le monostable

Rappel : Monostable

Le monostable est un circuit logique à un état stable unique



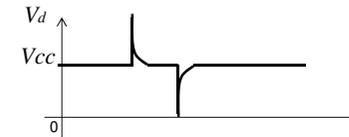
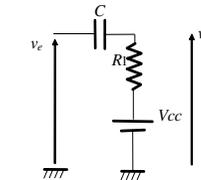
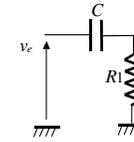
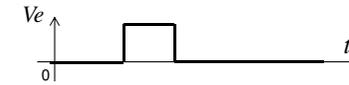
Génération d'une impulsion unique de durée et d'amplitude calibrée

On peut imaginer des montages monostables :  
avec une impulsion de commande positive ou négative  
avec un état de repos à l'état haut ou à l'état bas

25

## Le monostable

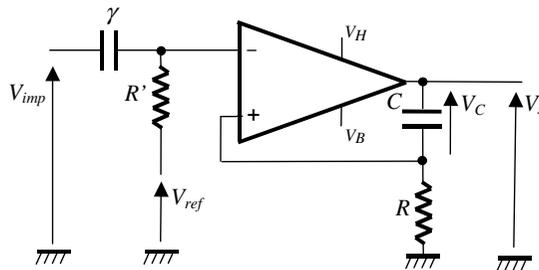
Rappel : le dérivateur



26

## Le monostable

Montage à AOP



Le montage est composé d'un dérivateur et d'un amplificateur bouclé sur son entrée positive

Hypothèses :

- \_  $V_{ref} > 0$
- \_  $V_{imp} = 0$
- \_  $V_c = 0$  à la mise sous tension

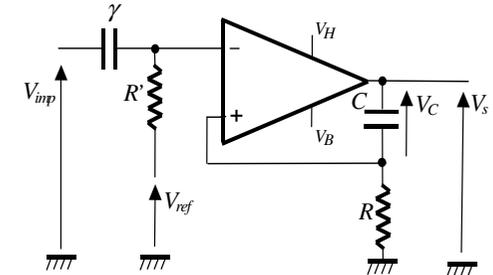
27

## Le monostable

Comme  $V_{imp} = 0$ ,  $V^- = V_{ref} > 0$

$V_c = 0$ ,  $V^+ = V_R = 0$

Donc  $V^- > V^+$ ,  $V_s$  prend la valeur  $V_B$ .



Le condensateur va se charger à travers  $R$  vers la valeur  $V_B$  !

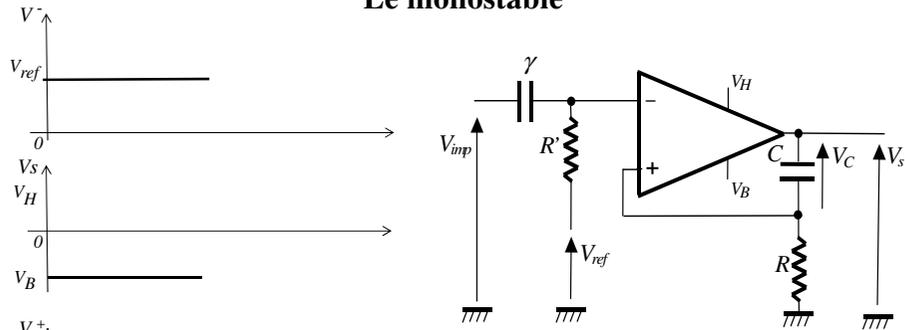
$$V^+ = VR = V_s - V_C = V_B - V_C$$

Lorsque le condensateur est chargé  $V_C = V_B$

$$V^+ = VR = V_B - V_B = 0, \text{ ce qui conforte } V_s = V_B$$

28

### Le monostable



Le condensateur va se charger à travers  $R$  vers la valeur  $V_B$  !

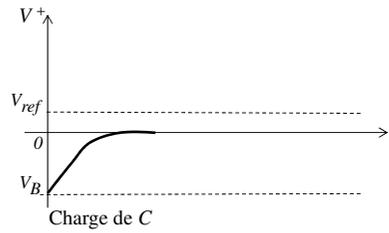
$$V^+ = V_R = V_s - V_C = V_B - V_C$$

Lorsque le condensateur est chargé  $V_C = V_B$

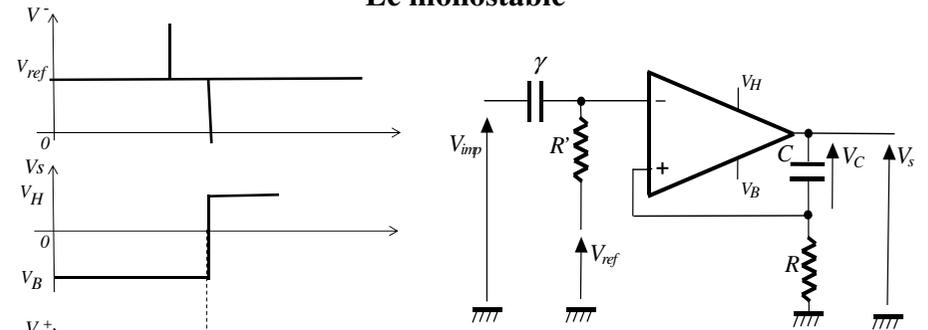
$V^+ = V_R = V_B - V_B = 0$ , ce qui conforte  $V_s = V_B$

$V^- > V^+$  donc  $V_s$  reste à  $V_B$ ,

29



### Le monostable



Pour que  $V_s$  change d'état, il faut que  $V^-$  change de signe

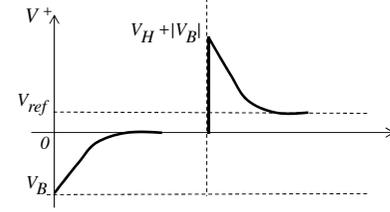
Pour cela, il faut une impulsion négative d'amplitude supérieure à  $V_{ref}$

$V_s$  passe à  $V_H$

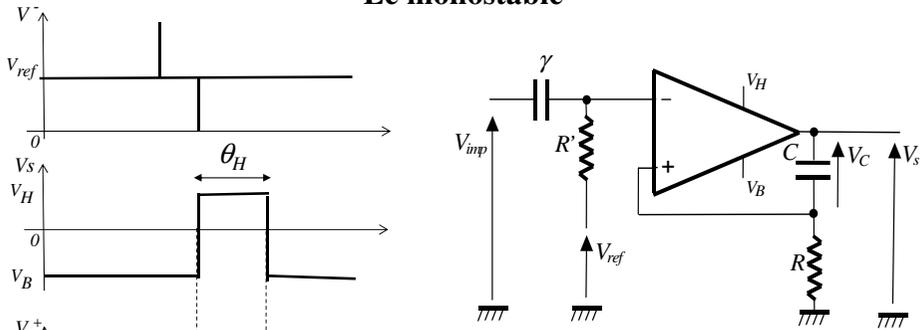
$V_C = V_B$  et  $V^+$  passe donc instantanément à  $V_H + |V_B|$

Le condensateur va se charger vers  $V_H$

30



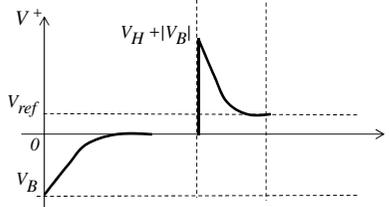
### Le monostable



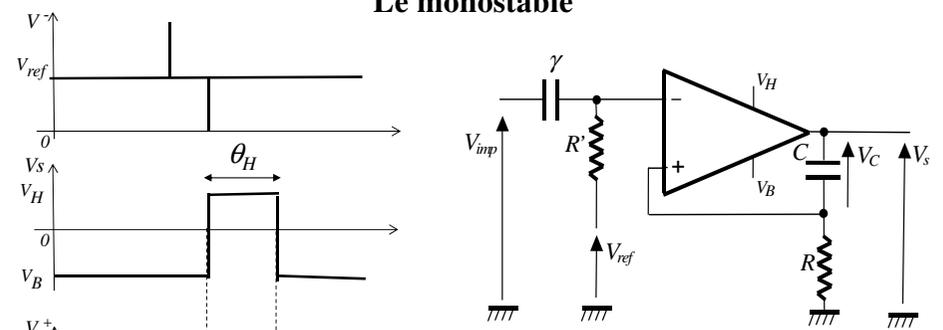
Le condensateur va se charger vers  $V_H$

$V_R = V^+$  tend à retourner à zéro mais ...

Dès que  $(V_R = V^+) < V^-$  alors  $V_s$  passe à  $V_B$

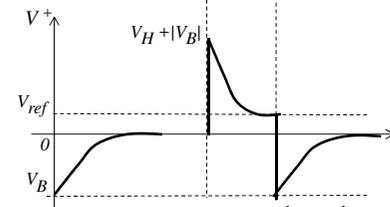


### Le monostable



Si  $V_s$  passe à  $V_B$

$V_R = V^+$  passe à  $V_B$



$\delta$   
Temps de relaxation

Tant que le condensateur n'est pas rechargé ( $V_R = 0$ ), on peut pas envoyer une nouvelle impulsion de commande

31

32

## Le monostable

Calcul de la durée de l'impulsion

33

# Les montages à Amplificateurs Opérationnels

Chapitre 1 : Rappel sur les outils d'analyse

Chapitre 2 : L' Amplificateur Opérationnel

Chapitre 3 : Les montages de base de l' AO en regime linéaire

Chapitre 4 : Les montages de base à AO en régime non-linéaire

Chapitre 5 : Autres montages pratiques

IG2I Cours d'Electronique, IG2I, ENI2, Bruno FRANÇOIS

34

Autres montages pratiques

## Autres montages pratiques

### 1) Sources de courant

Source de courant flottante

Source de courant reliée à la masse

### 2) Convertisseur courant/tension

### 3) Convertisseur tension/courant

### 4) Convertisseur d'impédance négative

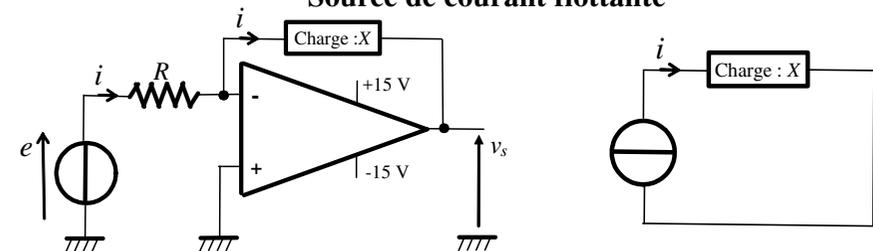
### 5) Diode sans seuil

### 6) Multiplicateur de capacité

35

### 1) Sources de courant

#### Source de courant flottante



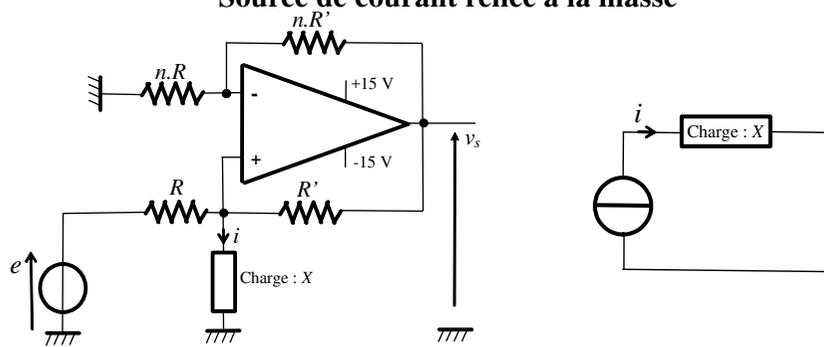
Calculez  $i(t)$  en fonction de  $e(t)$ .

La condition  $-15 < v_s = X \cdot i < +15$  doit être respectée

36

### 1) Sources de courant

Source de courant reliée à la masse



Pour  $-15V < v_s < +15V$ , déterminez l'expression de  $i$

Indice : On pourra calculer  $i_1$ , puis  $i_2$ , puis  $V_-$

37

La loi des noeuds appliquées à l'entrée + donne :

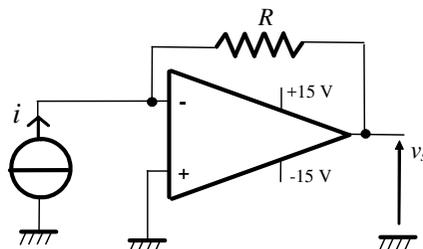
$$\begin{aligned} \epsilon \\ - \\ \dots \\ v^- = \end{aligned}$$

$$i =$$

Ce courant est imposé dans la charge qui est ainsi alimentée par une source de courant

38

### 2) Convertisseur courant/tension



Déterminez la tension  $v_s$  en fonction du courant  $i$

$$v_s =$$

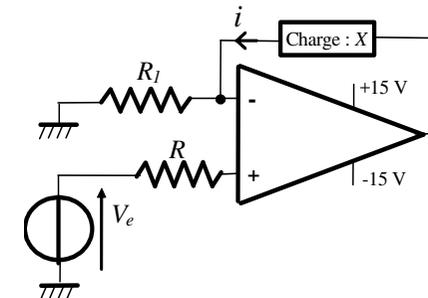
Déterminez l'impédance d'entrée

La condition  $-15 < v_s = R \cdot i < +15$  doit être respectée

39

### 3) Convertisseur tension/courant

Déterminez l'expression du courant  $i(t)$  en fonction de la tension d'entrée  $v_e(t)$

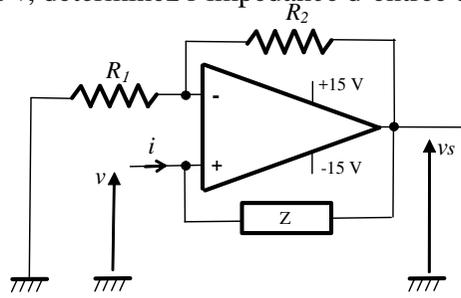


$X$  est une charge alimentée sous un courant donné  $i$

40

#### 4) Convertisseur d'impédance négative

Pour  $-15V < v_s < +15V$ , déterminez l'impédance d'entrée de ce montage



$$\left. \begin{aligned} v^- &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot v_s \\ v^+ &= v \end{aligned} \right\}$$

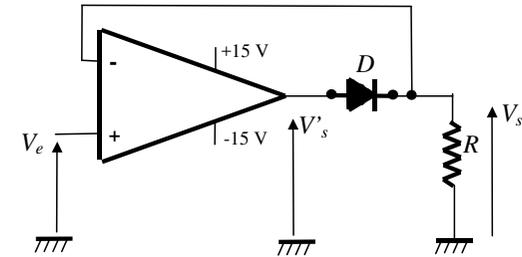
$v =$

$$v - \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot v = Z \cdot i \quad \Rightarrow \quad \frac{v}{i} =$$

41

#### 5) Redresseur sans seuil

La diode est idéale et a une tension de seuil  $V_{seuil}$



Quelle est la condition pour que la diode conduise ?

En posant  $V_s' = A \cdot \epsilon$ , avec un gain  $A$  infini, quelle est la condition sur  $V_e$  pour que la diode conduise ?

A  $t = 0$ ,  $V_s = 0$ , quelle est l'ordre de grandeur de la tension de seuil ?

$$V_e >$$

42

Si la diode conduit, on a un montage suiveur

$V^+ = V^- \Rightarrow V_s = V_e \Rightarrow$  Ce montage est équivalent à une diode sans seuil

#### Application:

La diode a une tension de seuil de 0,6V et l'amplificateur opérationnel a un gain de 100 000

$V_e$  est une sinusoïde de valeur crête de 1,2V de fréquence 50 Hz.

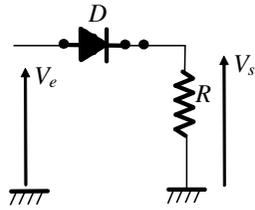
Combien vaut la tension d'entrée nécessaire pour mettre en conduction la diode ?

Représentez l'évolution temporelle de  $V_s'$  et  $V_s$

43

44

Refaire l'étude avec ce montage



Comparez les formes d'onde

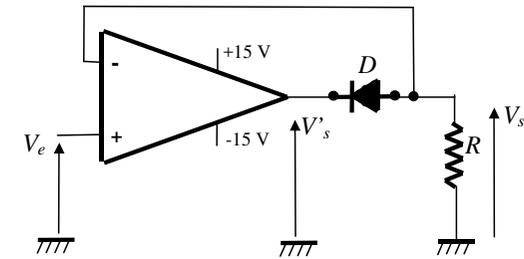
Application :

Redresser une tension d'amplitude faible (devant  $V_{seuil}$ )

Détection de de faible valeur de tension en instrumentation

45

## 6) Redresseur sans seuil



La diode a une tension de seuil  $V_{seuil}$

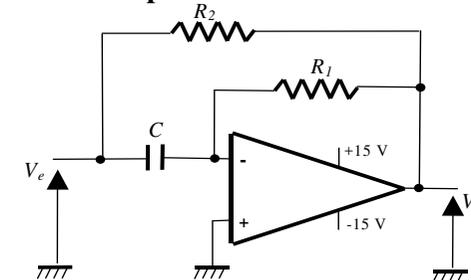
\_ Si  $V_e$  est négative, quel est l'état de la diode ?

\_  $V_{seuil} = 0.6V$  et le gain de l'amplificateur vaut 100 000, quelle est la condition sur  $V_e$  pour que  $D$  conduise ?

\_  $V_e$  est une sinusoïde de valeur crête  $V_m$ , représentez l'évolution temporelle de  $V_s$  et  $V_s'$

46

## 7) Multiplicateur de capacité



Calculez l'admittance d'entrée de ce montage

47

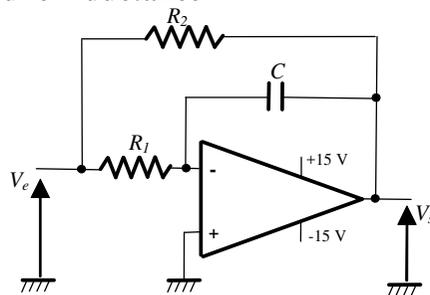
48

En déduire que cette impédance est équivalente à une capacité  $C'$  en parallèle avec une résistance  $R$

49

50

### 9) Simulation d'une inductance

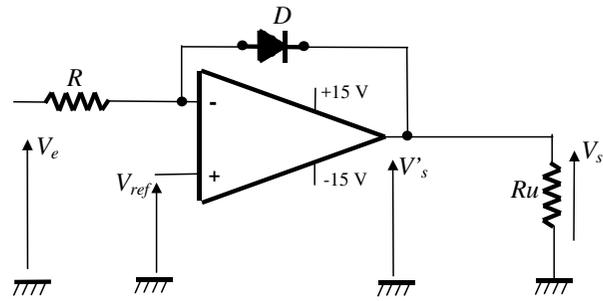


Calculez l'admittance d'entrée de ce montage

Montrez que cette admittance est équivalente à celle d'une inductance en parallèle avec une résistance.

52

## 7) Limiteur actif positif



\_ Quelle est la condition pour que la diode soit bloquée ? Déterminez alors l'expression de  $V_s$  en fonction de  $V_e$  et  $V_{ref}$

\_ Quelle est la condition pour que la diode conduise ? Déterminez alors l'expression de  $V_s$  en fonction de  $V_e$  et  $V_{ref}$

\_  $V_{ref} = 10V$  et  $V_e$  est une sinusoïde d'amplitude crête de  $10V$ , dessinez l'évolution temporelle de  $V_s$