

# TP n°21 : AOP en Comparateur

## Objectifs

En dehors de l'amplification, les amplificateurs opérationnels sont souvent utilisés pour un autre type d'application : la comparaison d'une tension d'entrée à une tension de référence. Dans ce cas, les AOP sont utilisés sans boucle de rétroaction négative, c'est-à-dire que leur sortie  $V_s$  n'est pas reliée à leur entrée  $V_-$ . Le gain de l'AOP n'est alors plus limité et la différence entre ses entrées  $V_+$  et  $V_-$  est amplifiée de la valeur de son gain en boucle ouverte  $A_{bo}$ , c'est-à-dire 250 000 à basse fréquence pour un AOP de type LF351.

## Pré requis, Documents

Cours d'électronique du semestre 1 sur l'amplificateur opérationnel.

## Travail de préparation

### 1. Comparateur simple avec tension de référence égale à zéro (Théorie)

La Figure 1 représente un comparateur simple avec tension de référence égale à zéro.

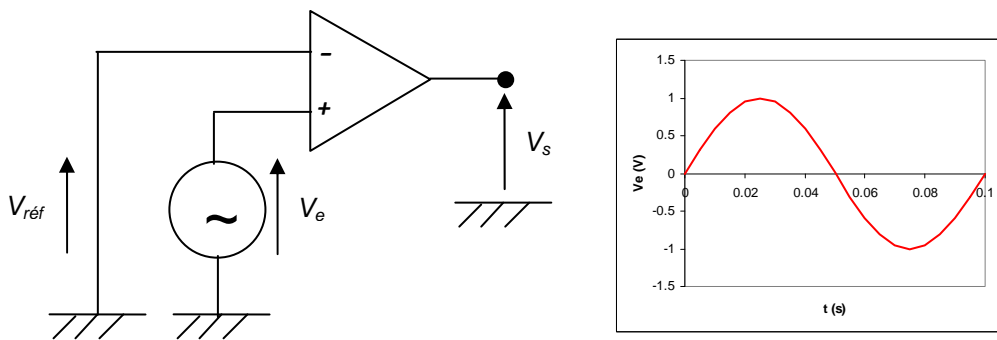


Figure 1

#### 1.1 Exercice théorique :

Soit  $V_e$  une tension sinusoïdale de fréquence 10 Hz et d'amplitude 1V. L'AOP de la Figure 1 a un gain en boucle ouverte  $A_{bo}$  de 250 000 à 10 Hz. L'AOP est alimenté en  $-V_{cc}/0/+V_{cc}$ .

On alimente l'AOP en  $-1\ 000\ 000\ V/0/+1\ 000\ 000\ V$  (une situation qui, convenons en, n'est guère réaliste !):

. Calculez  $V_s$  pour  $V_e = 1\ V$ ,  $1\ mV$  puis  $-1\ mV$ .

. Pour quelle valeur de  $V_e$  a-t-on  $V_s = +15\ V$  ?

On alimente maintenant l'AOP en  $-15\ V/0/+15\ V$ .

. Donnez la valeur de  $V_s$  pour  $V_e = 1\ V$ ,  $1\ mV$  puis  $-1\ mV$ .

. Représentez sur votre compte rendu l'allure des tensions  $V_e$  et  $V_s$  en fonction du temps.

. Que dit-on de la tension  $V_s$  quand elle est maximale (pratiquement égale à  $+V_{cc}$ ) ?

## Études à réaliser en salle de T.P.

### 2. Comparateur simple avec tension de référence égale à zéro (Pratique)

Réalisez le montage de la Figure 1 sur la plaquette d'essai. Alimentez l'AOP en  $-15\ V/0/+15\ V$ . Appliquez une tension sinusoïdale d'entrée de fréquence 100 Hz et d'amplitude 1 V.

#### 2.1 Tracé de $V_s(t)$

Tracez les tensions  $V_e$  et  $V_s$  en fonction du temps. Vous remarquerez que la tension maximale de  $V_s$  (qu'on appelle  $+V_{sat}$ ) n'est pas exactement égale à  $+V_{cc}$ . En fait, on a  $+V_{sat} = +V_{cc} - V_{déchét+}$  (la tension de déchet est due principalement à la tension Base-

Emetteur du transistor de sortie à l'intérieur de l'AOP). Déterminez la valeur de  $V_{déchét}$ . On a de même :  $-V_{sat} = -V_{cc} + V_{déchét}$ . Déterminez la valeur de  $V_{déchét}$ .

### 3. Comparateur simple avec tension de référence différente de zéro

La Figure 2 représente un comparateur simple avec tension de référence différente de zéro. Ici, la tension de référence est ajustée grâce à un pont diviseur de tension.

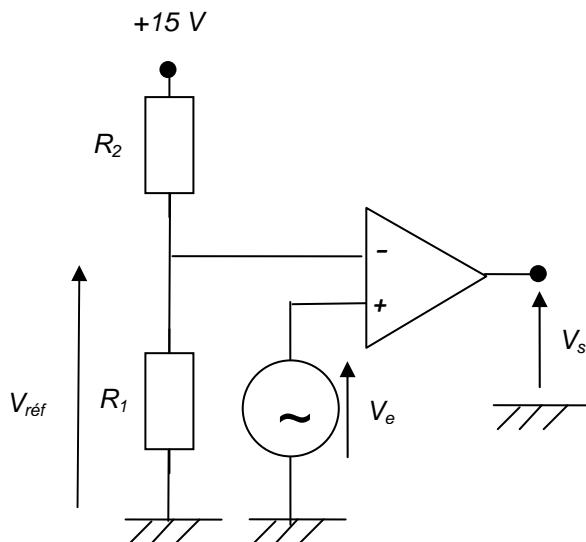


Figure 2

#### 3.1 Amplitude de basculement

On prend  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ . Appliquez une tension sinusoïdale d'entrée de fréquence 100 Hz et d'amplitude 1 V. Puis augmentez progressivement l'amplitude de  $V_e$  jusqu'à observer un basculement de la tension  $V_s$ . A quelle amplitude observe-t-on ce basculement ? Expliquez pourquoi.

#### 3.2 Tracé de $V_s(t)$

Augmentez encore cette amplitude de 1 V. Tracez les tensions  $V_e$  et  $V_s$  en fonction du temps.

### 4. Comportement du comparateur simple avec la fréquence

#### 4.1 Amplitude minimale de $V_e$ pour obtenir la saturation

Refaites le montage de la Figure 1. Appliquez une tension sinusoïdale d'entrée de fréquence  $f = 100 \text{ Hz}$  et d'amplitude 1 V. Maintenant, diminuez cette amplitude le plus possible (10 mV par exemple). Si vous observez un signal saturé en sortie, tout va bien... Augmentez la fréquence à 10 kHz. Observez vous toujours un signal saturé en sortie ? Sinon, augmentez l'amplitude jusqu'à observer la saturation de la sortie. Notez la valeur de cette amplitude qu'on appellera  $V_{e\_sat\_Exp}$ . Faites de même pour 100 kHz et 1 MHz.

Le phénomène que vous venez d'observer est dû en grande partie au produit gain-bande de l'AOP. A cause de cela, le gain en boucle ouverte d'un AOP baisse avec la fréquence (à haute fréquence, un autre phénomène vient se rajouter, dû à la vitesse limitée de variation en tension de l'AOP, le slew rate). En utilisant les relations suivantes :

$$A_{bo\_Théo}(f) = \frac{A_{bo}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}, \quad V_{sat} = A_{bo\_Théo}(f) \cdot V_{e\_sat\_Théo}$$

...et en prenant  $A_{bo} = 250\,000$  et  $f_0 = 20$  Hz (pour un AOP de type LF351), remplissez le tableau ci-dessous :

f (Hz)	10	100	1000	10 000	100 000	1 000 000
$A_{bo\_Théo}(f)$						
$V_{e\_sat\_Théo}$ (mV)						
$V_{e\_sat\_Exp}$ (mV)	X	X	X			

Cette manipulation montre que les performances du comparateur simple se dégradent à haute fréquence et qu'il faut le réserver à des signaux de basse fréquence.

### 5. Trigger de Schmitt

Pour éviter la dégradation des performances du comparateur simple à haute fréquence, il existe une solution : utiliser une boucle de rétroaction positive. On relie la sortie  $V_s$  à l'entrée  $V_+$  de l'AOP. Grâce à cela, on obtient des fronts de commutation plus abrupts et des caractéristiques moins dépendantes de la fréquence. C'est le principe du trigger de Schmitt qui est représenté sur la Figure 3.

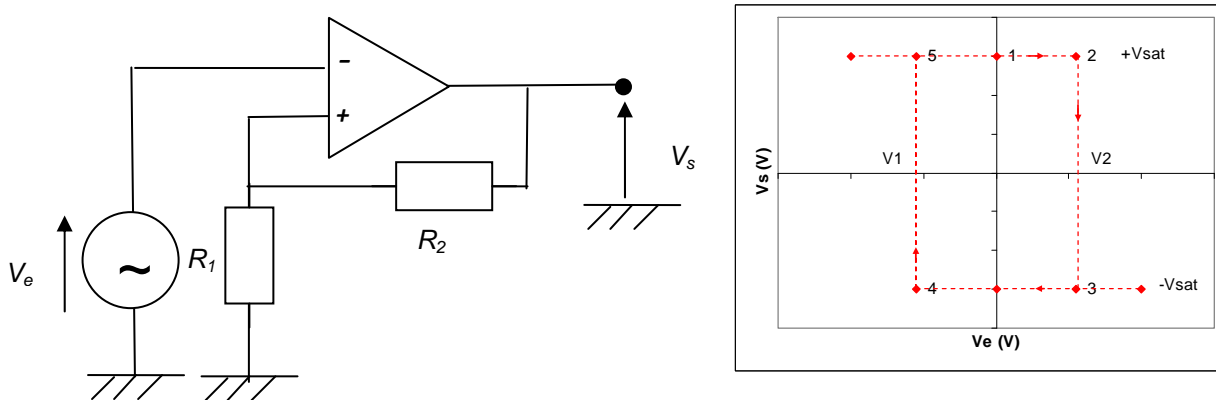


Figure 3

Voici comment il fonctionne :

1. Supposons que  $V_e = V_- = 0$  et  $V_s = +V_{sat}$ . On a alors :  $V_+ = R_1/(R_1+R_2) \cdot V_{sat}$ . On appelle tension de seuil  $V_2$ , la tension  $V_2 = R_1/(R_1+R_2) \cdot V_{sat}$ .
2. On augmente  $V_e$  jusqu'à ce qu'il soit supérieur à  $V_2$  ( $V_e - V_2 > 0$ ). On a alors :  $V_+ - V_- < 0$ .
3. L'AOP bascule et  $V_s$  passe à  $-V_{sat}$ . La nouvelle valeur de  $V_+$  devient  $V_+ = -R_1/(R_1+R_2) \cdot V_{sat}$ . On appelle tension de seuil  $V_1$ , cette tension. Si on augmente encore  $V_e$ , rien ne se passe.
4. Si, par contre, on diminue  $V_e$  jusqu'à ce qu'il soit inférieur à  $V_1$  ( $V_e - V_1 < 0$ ), on a alors :  $V_+ - V_- > 0$ .
5. L'AOP bascule et  $V_s$  passe à  $+V_{sat}$ .

On obtient ainsi un cycle d'hystérésis caractérisé par deux tensions de seuil  $V_1$  et  $V_2$ .

**5.1 Tensions de seuil**

Faites le montage de la Figure 3. Vous prendrez  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ . Appliquez une tension sinusoïdale d'entrée de fréquence  $f = 100\text{ Hz}$  et d'amplitude 1 V. Augmentez l'amplitude jusqu'à observer un basculement de la tension  $V_s$ . A quelles tensions observe-t-on ce basculement ? Expliquez pourquoi.

**5.2 Tracé de  $V_s(t)$** 

Augmentez encore l'amplitude de  $V_e$  d'1 V. Tracez les tensions  $V_e$  et  $V_s$  en fonction du temps.

**5.3 Tracé de  $V_s(V_e)$** 

Passez en mode XY et tracez l'évolution de la tension  $V_s$  en fonction de  $V_e$  (c'est-à-dire, le cycle d'hystérésis).

**5.4 Comportement avec la fréquence**

Augmentez la fréquence à 10 kHz, 100 kHz puis 1 MHz. Qu'observez-vous sur les fronts de commutation ? Le paramètre qui limite la variation de la tension de sortie est le slew rate. Mesurez sa valeur à 100 kHz et vérifiez qu'elle est proche de la valeur théorique ( $15\text{ V}/\mu\text{s}$ ) pour le LF351.