

## AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL “IDÉAL” EN MODE “SATURÉ” - TP

### 1. Rappels

- L'amplificateur opérationnel (A.O.) idéal est caractérisé par :
  - ◊ des courants d'entrée, ou “courants de polarisation”,  $I_+$  et  $I_-$  nuls (résistances d'entrée infinies) ;
  - ◊ une différence de potentiel entre les deux entrées  $\varepsilon = V_+ - V_-$  :
    - nulle en mode linéaire ;
    - non nulle et du signe de  $V_s$  en mode saturé ;
  - ◊ une résistance de sortie :
    - nulle en mode linéaire (générateur de tension parfait) ;
    - $\rho \approx 350 \Omega$  en mode saturé ;
  - ◊ une tension de sortie  $V_s \approx \pm(A - \rho I_s)$  en mode saturé (où  $\pm A$  est la tension d'alimentation).
- ◊ remarque : l'alimentation de l'A.O. (tensions  $\pm A$ , usuellement  $\pm 15 \text{ V}$ ) n'est généralement pas représentée sur les schémas, il faut pourtant ne pas oublier de la brancher.

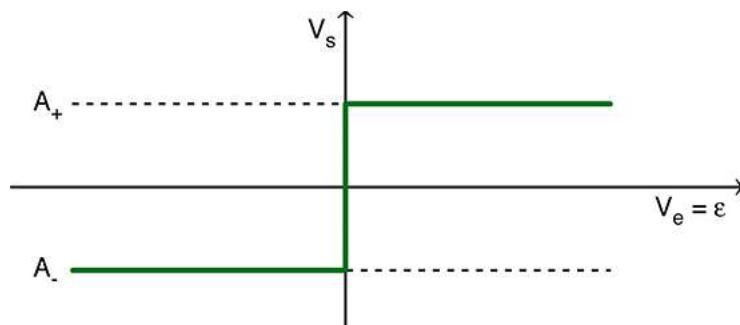
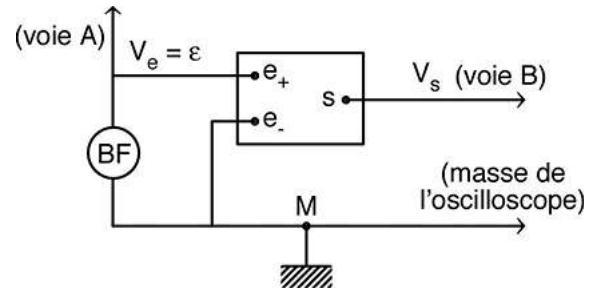
### 2. Caractéristique des modes linéaire et “saturé”

- Réaliser le montage ci-contre, branché en entrée sur un générateur “basse fréquence” (BF) en mode sinusoïdal.

◊ remarque : pour visualiser correctement les variations brutales de  $V_s$ , il faut utiliser un signal  $V_e$  de fréquence assez faible.

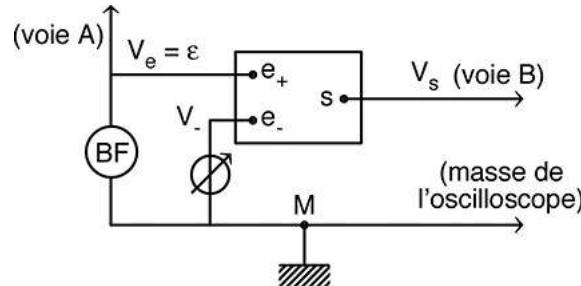
- En utilisant l'oscilloscope en mode “XY”, vérifier expérimentalement les propriétés caractéristiques :
  - $\varepsilon \approx 0$  en mode linéaire ( $A_- \leq V_s \leq A_+$ ) ;
  - $\varepsilon \geq 0$  et du signe de  $V_s$  en mode “saturé positif” ( $V_s = A_+ \approx +A$ ) ;
  - $\varepsilon \leq 0$  et du signe de  $V_s$  en mode “saturé négatif” ( $V_s = A_- \approx -A$ ) .

◊ remarque : repérer les décalages ( $\rho I_s$ ) entre  $A_+$  et  $+A$  ; entre  $A_-$  et  $-A$  .

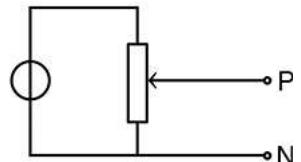


### 3. Montage “comparateur”

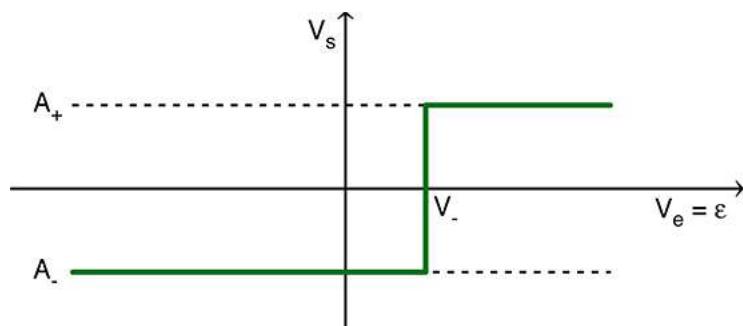
- Réaliser le montage suivant (“comparateur”), branché en entrée sur un générateur sinusoïdal (BF).



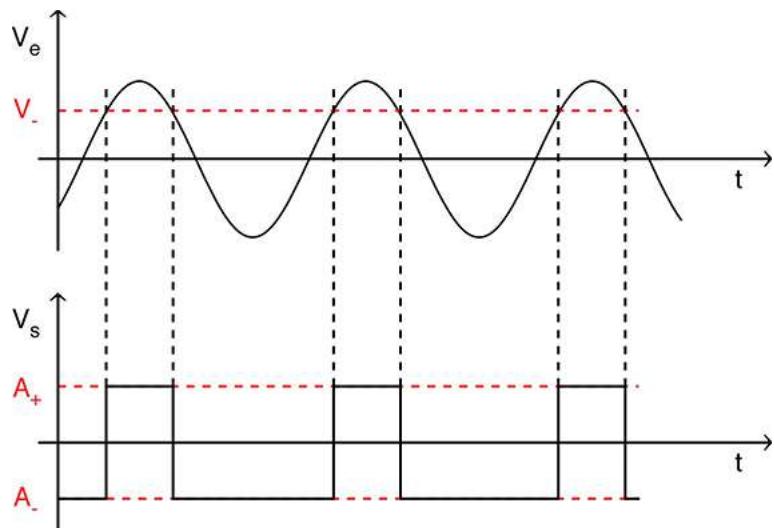
◊ rappel : si on ne dispose que d'une alimentation continue non réglable, on peut utiliser un rhéostat pour la transformer en alimentation continue réglable à l'aide d'un montage “diviseur de tension”.



- En utilisant l'oscilloscope en mode “XY”, vérifier expérimentalement le décalage de la caractéristique.

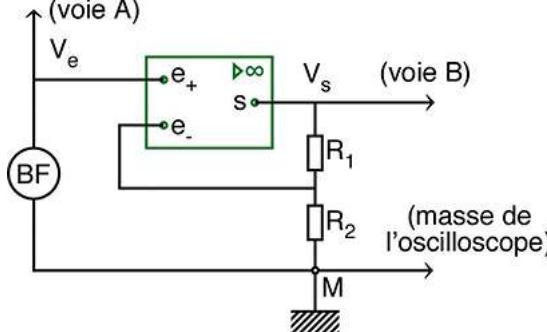


- En utilisant l'oscilloscope en mode “A et B”, vérifier expérimentalement la “bascule” du comparateur lorsque  $V_e$  passe par la valeur  $V_-$ .

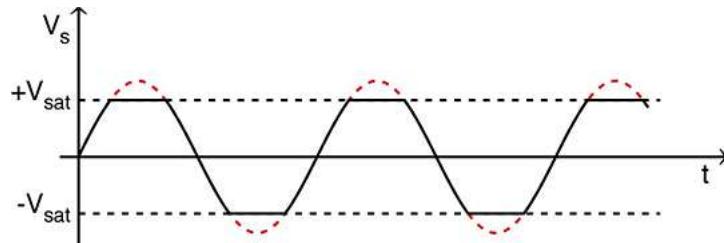


#### 4. Montage amplificateur non-inverseur en mode “saturé”

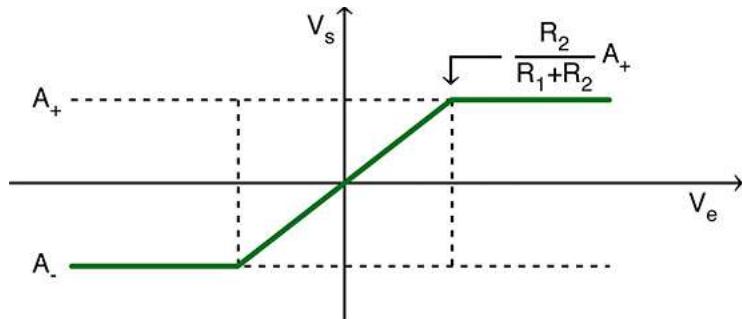
- Réaliser le montage amplificateur non-inverseur (avec  $R_1 \geq R_2$ ), branché en entrée sur un générateur sinusoïdal (BF).



- Imposer une amplitude suffisante au signal d'entrée pour provoquer volontairement une saturation de la sortie.



- Passer alors en mode “XY” pour observer la caractéristique complète, incluant le mode “saturé”. Vérifier expérimentalement (pour plusieurs valeurs de  $R_1$  et  $R_2$ ) la relation du mode linéaire :  $V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2} V_e$ .

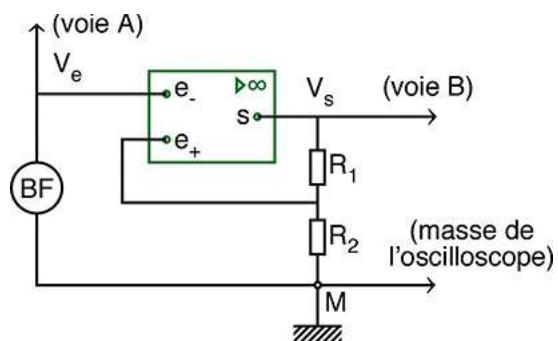


- Vérifier expérimentalement et démontrer (d'après le signe de  $\varepsilon$ ) que les modes saturés correspondent à :  $V_s = A_+$  pour  $V_e \geq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_+$  ;  $V_s = A_-$  pour  $V_e \leq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_-$ .

#### 5. Montage “comparateur à hystérésis”

##### 5.1. Caractéristique “statique”

- En intervertissant simplement les entrées  $e_+$  et  $e_-$ , réaliser le montage “comparateur à hystérésis” (inverseur), branché en entrée sur un générateur sinusoïdal (avec, de même que précédemment, une amplitude suffisante du signal d'entrée).

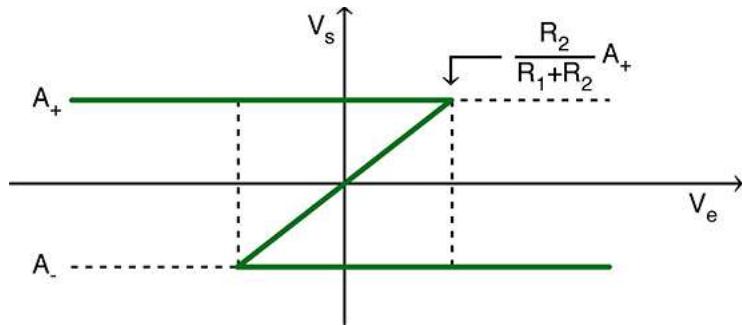


- Démontrer théoriquement que les différents modes correspondent à :

$$V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2} V_e \text{ pour } \frac{R_2}{R_1+R_2} A_- \leq V_e \leq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_+ \quad (\text{mode linéaire}) ;$$

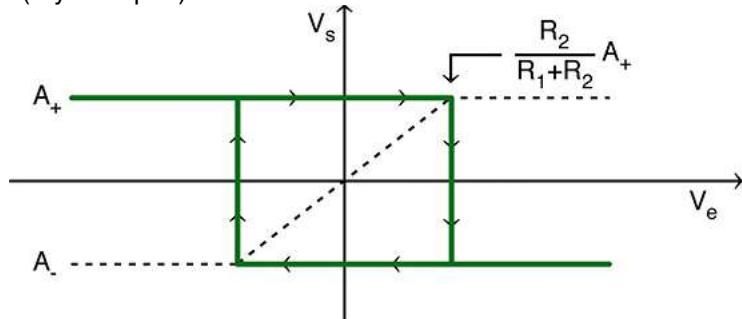
$$V_s = A_+ \text{ pour } V_e \leq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_+ ; \quad V_s = A_- \text{ pour } V_e \geq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_- ;$$

avec ici une indétermination (plusieurs solutions possibles) pour  $\frac{R_2}{R_1+R_2} A_- \leq V_e \leq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_+$ .



## 5.2. Caractéristique "dynamique"

- Vérifier expérimentalement, en mode "XY", que la caractéristique observée n'est pas la précédente ("statique"), mais la suivante ("dynamique").



- On constate ainsi que :

- ◊ le segment central n'est jamais parcouru : il correspond à un "équilibre" instable du montage ;
- ◊ les segments qui décrivent les solutions avec saturation pour  $\frac{R_2}{R_1+R_2} A_- \leq V_e \leq \frac{R_2}{R_1+R_2} A_+$  ne sont parcourus chacun que pour l'un des sens de variation de  $V_e$  ;
- ◊ il apparaît une "bascule" rapide de  $V_s$  pour passer d'une saturation à l'autre.

- Ceci ne peut s'expliquer qu'en considérant l'équation qui décrit l'A.O. réel :  $\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s = \mu \varepsilon$  en mode linéaire, avec une "constante de temps"  $\tau \approx 0,1 \text{ s}$  et un "gain différentiel"  $\mu \approx 10^6$ .

Dans les conditions usuelles, tant que  $\varepsilon$  ne varie pas trop vite, on peut utiliser :  $V_s = \mu \varepsilon$  ; par suite on retrouve les propriétés de l'A.O. idéal :

$$\diamond \text{en mode linéaire : } |\varepsilon| = \left| \frac{V_s}{\mu} \right| \leq \frac{A}{\mu} \approx 10^{-5} \text{ V généralement négligeable } (\varepsilon \approx 0) ;$$

$$\diamond \text{en mode saturé : } V_s \text{ sature avec le signe de } \varepsilon \text{ puisque } \mu > 0 .$$

Par contre, compte tenu de l'intervention du terme  $\frac{dV_s}{dt}$ , l'équation caractéristique du mode linéaire décrit une sorte "d'équilibre électrique" du montage... or l'équilibre peut être stable ou instable.

Ainsi la relation  $V_s = \frac{R_1+R_2}{R_2} V_e$ , qui semble valable indépendamment du sens de branchement de  $e_+$  et  $e_-$ , correspond :

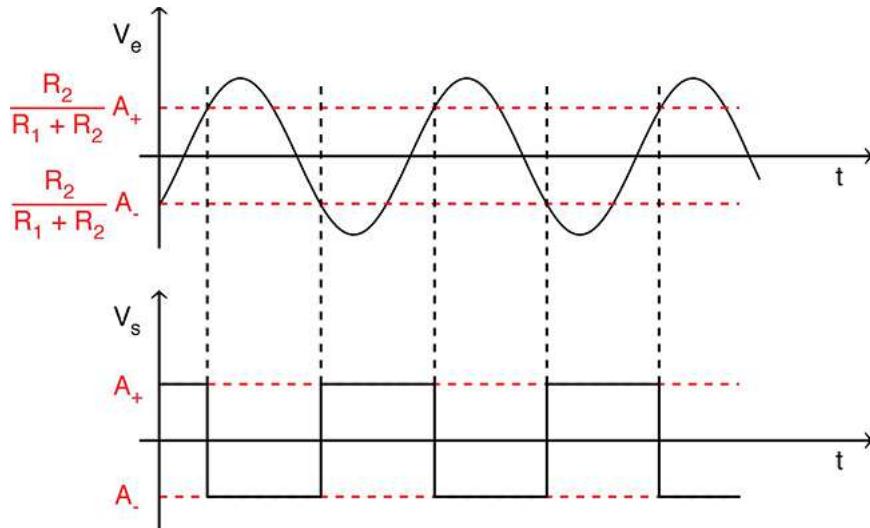
- ◊ à un équilibre stable pour l'amplificateur non-inverseur : un signal parasite qui augmente  $V_e$ , donc aussi  $V_+$ , provoque ainsi une augmentation de  $\varepsilon$ , qui provoque une augmentation de  $V_s$  ( $\mu$  fois plus grande), qui provoque une augmentation de  $V_-$ , donc une diminution de  $\varepsilon$ , ce qui compense le parasite ;
- ◊ à un équilibre instable pour le comparateur à hystérésis : un signal parasite qui augmente  $V_e$ , donc aussi  $V_-$ , provoque ainsi une diminution de  $\varepsilon$ , qui provoque une diminution de  $V_s$  ( $\mu$  fois plus grande), qui provoque une diminution de  $V_+$ , donc une diminution de  $\varepsilon$ , ce qui accentue le parasite d'un facteur  $\mu$  et provoque la saturation (le fonctionnement "linéaire" est alors inobservables...).

- Si on visualise la caractéristique avec l'oscilloscope, l'augmentation de  $V_e$  (à partir des valeurs négatives) ne peut suivre le segment supérieur pour  $V_e > \frac{R_2}{R_1+R_2} A_+$  ; le potentiel  $V_s$  "tombe" alors sur la seule valeur stable possible (saturation négative) selon l'équation :  $\tau \frac{dV_s}{dt} \approx \mu \varepsilon$  (le terme "de variation" étant ici généralement prépondérant).

La situation est analogue pour la diminution de  $V_e$ , mais la "bascule" se produit pour  $V_e = \frac{R_2}{R_1+R_2} A_-$ , d'où le "cycle d'hystérésis" observé.

- Vérifier expérimentalement l'influence de  $R_1$  et  $R_2$  sur les tensions de "bascule" (en mode "XY").

Vérifier qualitativement l'allure des signaux obtenus en mode "A et B", vérifier également l'influence de  $R_1$  et  $R_2$  sur les tensions de "bascule".



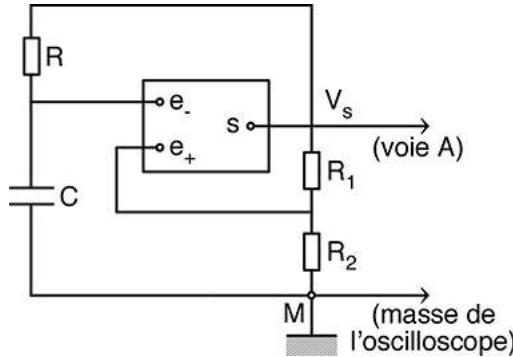
◊ remarque : il s'agit ici d'un comparateur à hystérésis inverseur (ou "trigger de Schmitt") ; on obtient de même un comparateur à hystérésis non-inverseur en intervertissant les entrées  $e_+$  et  $e_-$  d'un montage amplificateur inverseur.

◊ remarque : le terme "hystérésis" indique que l'état de la sortie dépend non seulement de l'état présent de l'entrée, mais aussi de ses états passés ; un montage de ce type peut ainsi "garder en mémoire" une information.

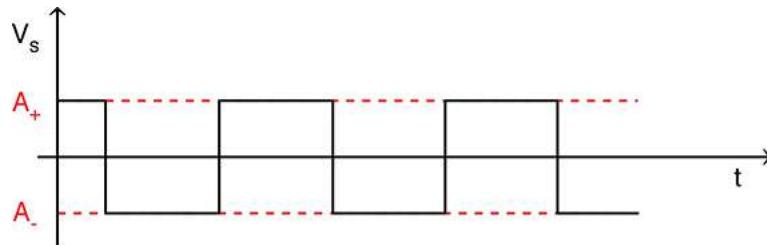
## 6. Multivibrateur astable

• Bien que les multivibrateurs astables soient généralement construits avec des circuits plus rudimentaires : portes logiques “NON” (ou “NON ET”), on peut également en construire avec un A.O..

• Réaliser le montage suivant, avec  $R_1 \approx R_2 \approx 1 \text{ à } 100 \text{ k}\Omega$  ,  $R \approx 20 \text{ à } 100 \text{ k}\Omega$  ,  $C \approx 0,1 \text{ à } 10 \mu\text{F}$  .



• Vérifier l'allure de  $V_s$  .



• Vérifier l'influence de  $R_1$  ,  $R_2$  ,  $R$  et  $C$  sur la période d'oscillation :  $T = 2 RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right)$  (et essayer éventuellement de démontrer cette expression).

◊ remarque : à partir de cet oscillateur en “créneaux”, il suffit d'ajouter un intégrateur pour obtenir un oscillateur en “dents de scie”, puis d'ajouter un second intégrateur pour obtenir un oscillateur en “arcs de paraboles”... qui ressemble à s'y méprendre à un oscillateur sinusoïdal.

## AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL “IDÉAL” EN MODE “SATURÉ” - TP

### Matériel

#### Pour chaque groupe (9 groupes)

1 A.O. avec son alimentation  
1 oscilloscope  
3 adaptateurs BNC  
2 raccords BNC “en T”  
1 générateur BF  
1 fréquencemètre (si le GBF n'en a pas)  
1 pile, ou un générateur 6 V continu  
1 rhéostat  
12 fils (des courts et quelques longs)  
2 câbles coaxiaux (BNC d'un seul côté)  
2 câbles coaxiaux (BNC des deux côtés)  
2 contrôleurs électroniques  
lot de résistors  $\approx 1$  à  $100$   $\text{k}\Omega$   
1 boîte de résistors  $\times 1$  à  $\times 1000$   $\Omega$   
1 boîte de condensateurs  $0,1$  à  $10$   $\mu\text{F}$