

**UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE II**

**FACULTE DES SCIENCES  
DE LUMINY**

**Département de Physique**

**Licence  
Unité expérimentale  
TRAVAUX PRATIQUES  
D'ELECTRONIQUE**

**2007-2008**

# INFORMATIONS CONCERNANT LES TRAVAUX PRATIQUES

---

Lieu :

Département de Physique, entrée G, 3<sup>ème</sup> étage.

Date des séances de Travaux Pratiques :

## **Groupe Physique**

1. mardi	10:00-13:00
2. mardi	10:00-13:00
3. mardi	10:00-13:00
4. mardi	10:00-13:00
5. mardi	10:00-13:00
6. mardi	10:00-13:00

## **Groupe Physique-Chimie**

1. jeudi	10:00-13:00
2. jeudi	10:00-13:00
3. jeudi	10:00-13:00
4. jeudi	10:00-13:00
5. jeudi	10:00-13:00
6. jeudi	10:00-13:00

## INFORMATIONS CONCERNANT LES TRAVAUX PRATIQUES

---

### Polycopié :

Les étudiants devront avoir lu et assimilé le polycopié avant de se présenter aux séances de TP s'ils veulent disposer d'un temps suffisant pour rédiger le compte rendu.

### Rédaction et notation du compte rendu :

Le compte rendu est un élément essentiel des TP qui doit apprendre aux étudiants à rédiger d'une façon claire, lisible et concise. Il est parfaitement inutile d'y recopier le cours ou le poly de TP!

### Notation :

Il sera tenu compte de:  
la présentation,  
la prise de données expérimentales,  
la discussion et l'interprétation de ces données,  
de la manipulation au cours de la séance.

La note sur 20 se décompose comme suit:

Présentation :	4
courbes :	4
interprétation :	4
résultats expérimentaux :	4
calculs d'erreurs :	4

### Objectif des Travaux Pratiques

1. Apprendre à faire des montages expérimentaux
2. Apprendre à rédiger un compte rendu
3. Apprendre à tracer des courbes et à les exploiter
4. Apprendre à faire des mesures et à évaluer les incertitudes
5. Apprendre des notions d'électronique

## INFORMATIONS CONCERNANT LES TRAVAUX PRATIQUES

---

### Présentation du compte rendu

Les comptes rendus sont rédigés sur un cahier grand format 21x29,7, petits carreaux. qui sera laissé aux enseignants à la fin de chaque séance.  
Chaque compte rendu devra commencer par:

---

Nom Prénom  
Nom Prénom

Date  
N° de la table de TP  
N° et titre du TP

---

Laisser 10 cm pour les commentaires

---

Laisser une  
marge à gauche  
de 5cm  
pour les  
corrections

**Important:** Si une des deux personnes est absente, seul le nom de la personne ayant effectivement fait le travail doit être mis sur le cahier.

### Courbes :

La présentation des résultats expérimentaux sous forme de courbe est essentielle. Attention au choix correct des échelles: les feuilles de papier millimétré étant graduées de façon décimale, chaque centimètre devra représenter un multiple de 1,2 ou 5.

Avant de tracer les courbes, il est indispensable de mettre les barres d'erreur autour des points expérimentaux. Les courbes **ne passent jamais** par les points expérimentaux, mais entre ces points, dans la zone des barres d'erreur.

## LES ERREURS DE MESURE

---

### 1 - Introduction

Toute mesure physique réelle est entachée d'une erreur de mesure provenant à la fois de l'instrument de mesure lui-même que de la définition même de la quantité à mesurer. Par exemple si vous devez déterminer le périmètre et la surface d'une table rectangulaire, vous mesurez la longueur "L", la largeur "l", puis vous faites la somme " $P = 2(L + l)$ " et le produit " $S = L \times l$ ". Cependant pour faire cela, vous faites plusieurs suppositions :

- a) La table est réellement rectangulaire (4 angles de  $90^\circ$ )
- b) Les côtés sont parfaitement rectilignes
- c) Votre règle est parfaitement calibrée au près du mètre étalon
- d) Vous ne faites aucune erreur de mesure.

Evidemment nous ne sommes pas en mathématique, et toutes les remarques ci-dessus sont valables. Nous pouvons imaginer que les angles sont très proches de  $90^\circ$  ce qui nous permet d'éliminer cette erreur. Nous pouvons supposer que l'erreur d'étalonnage du mètre est négligeable devant celle de la mesure elle-même. Nous pouvons penser que les côtés sont suffisamment parallèles. Dans un premier temps nous pouvons nous limiter à l'erreur sur la mesure elle-même.

Exemple:

Nous mesurons une table de 1 mètre de long et de 50 cm de large, avec un mètre gradué en millimètres. Quand nous mesurons la longueur, nous pouvons penser pouvoir apprécier le demi millimètre sur chacune des mesures. Il y en a deux par mesure, donc l'erreur totale sur L est de 1 mm, ainsi que pour la largeur l.

## LES ERREURS DE MESURE

---

### 2 - Comparaison de deux mesures

Il ne faut pas mélanger physique et comptabilité.... En comptabilité, deux nombres sont égaux s'ils le sont jusqu'au centime. En Physique, il faut prendre en compte les erreurs de mesure.

Exemple 1 :

Vous achetez une planche de bois de 1,50 m, et vous mesurez avec une règle  $1,48 \pm 0,05$  m, ceci signifie que vous pensez que la longueur mesurée est comprise entre 1,43 m et 1,53 m. La planche est donc de la bonne longueur aux erreurs de mesure près.

Exemple 2 :

Une résistance  $R_{\text{théo}}$  de valeur marquée  $1000 \Omega$  est donnée avec une précision de 5%. Vous mesurez cette même résistance, et vous trouvez  $R_{\text{exp}} = 1005 \Omega$ , avec une précision de  $1 \Omega$ . Ces deux valeurs sont égales aux erreurs de mesure près, puisque  $950 < R_{\text{théo}} < 1050$  et  $999 < R_{\text{exp}} < 1001$ .

### 3 - Détermination statistique de l'erreur

Si le même expérimentateur, ou  $N$  expérimentateurs mesurent  $N$  fois la longueur  $L$  de la table, les grandeurs mesurées seront légèrement différentes les unes des autres. Pour trouver la meilleure valeur possible, il suffit de faire la moyenne des mesures, en utilisant la relation.

$$\langle L \rangle = \sum (L/N)$$

L'écart type  $\Delta L$  de la mesure représente la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne, il est donné par :

$$(\Delta L)^2 = \sum ((L - \langle L \rangle)^2/N)$$

### 4 - Calcul d'erreur

Sans aller dans le détail des formules de calcul des erreurs qui se déduisent simplement du calcul différentiel, les règles à connaître sont les suivantes :

***L'erreur absolue d'une somme ou d'une différence est la somme des erreurs absolues.***

$$\Delta (A + B) = \Delta (A) + \Delta (B)$$

et

$$\Delta (A - B) = \Delta (A) + \Delta (B)$$

## LES ERREURS DE MESURE

---

***L'erreur relative d'un produit ou d'un quotient est la somme des erreurs relatives.***

$$\Delta (A \times B) / (A \times B) = \Delta (A) / A + \Delta (B) / B$$

et

$$\Delta (A/B) / (A/B) = \Delta (A) / A + \Delta (B) / B$$

Dans l'exemple du rectangle, on aura :

$$\begin{aligned} L &= 1 \text{ m}, & \Delta L &= 0,001 \text{ m} \\ l &= 0,5 \text{ m}, & \Delta l &= 0,001 \text{ m} \end{aligned}$$

Donc :

$$(\Delta L)/L = 0,001 \text{ et } (\Delta l)/l = 0,002$$

On en déduit :

$$\Delta P = 2 \times (\Delta L + \Delta l) \quad \text{soit : } \Delta P = 0,004 \text{ m}$$

$$\text{donc :} \quad \mathbf{P = 3 \pm 0,004 \text{ m}}$$

De la même manière :

$$\Delta S/S = \Delta L/L + \Delta l/l \quad \text{soit} \quad \Delta S/S = 0,001 + 0,002 = 0,003$$

$$S = 0,5 \text{ m}^2, \quad \text{donc } \Delta S = 0,0015 \text{ m}^2$$

La mesure est donc :  $\mathbf{S = 0,5 \pm 0,0015 \text{ m}^2}$

## LES ERREURS DE MESURE

---

### 5 - Présentation des résultats

Supposez que vous trouviez le résultat suivant :

$$I = 2,83225 \pm 0,53128 \text{ mA}$$

Vous ne devez pas mettre tous les chiffres non significatifs, c'est à dire ceux qui sont dans la marge d'erreur. Il faut en réalité écrire :

$$I = 2,8 \pm 0,5 \text{ mA}$$

### 6 - Régression linéaire

La régression linéaire est un traitement statistique qui permet de trouver l'équation de la droite qui passe au milieu d'un nuage de n points. Soient  $x_i$  et  $y_i$  les coordonnées du  $i^{\text{ème}}$  point. L'équation de la droite  $y = ax + b$  est donnée par:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i) - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad b = \bar{y} - a \bar{x} \quad \text{avec} \quad \bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad \text{et} \quad \bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$$

### 7 - Présentation d'un tableau de mesures

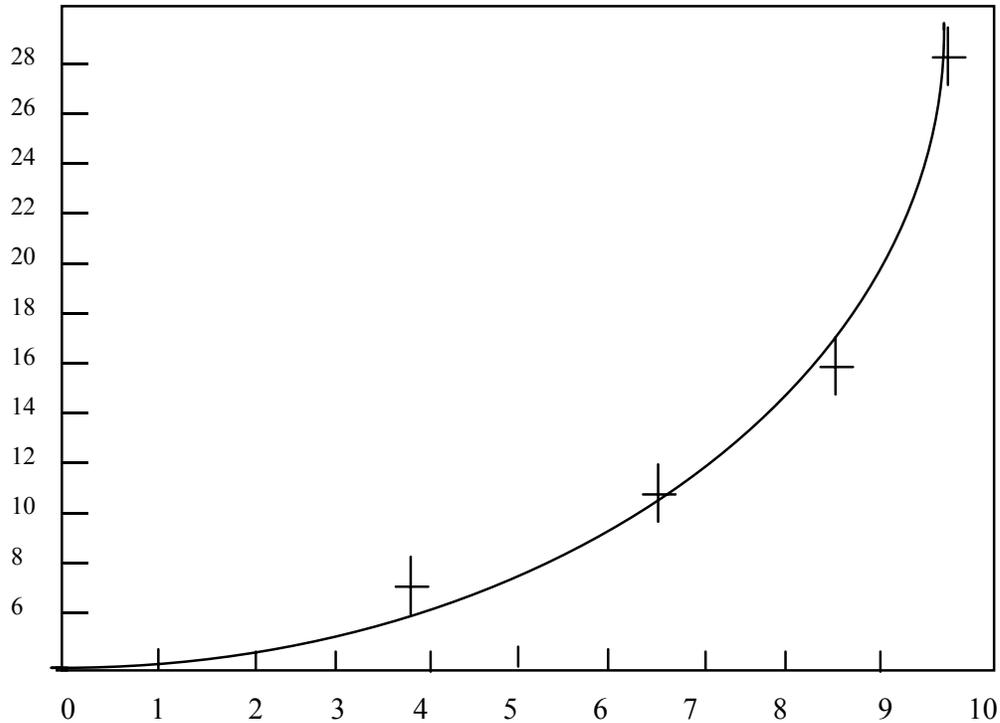
Afin de tracer des courbes correctement avec les barres d'erreur indiquées sur le graphique, il est utile de présenter un tableau des valeurs mesurées avec leurs barres d'erreur.

Par exemple, on mesure un gain G en fonction de la fréquence f, en mesurant la période T. On évalue l'erreur  $\Delta T$  sur cette mesure, on en déduit l'erreur  $\Delta f$  de f par la relation du paragraphe 4 :  $\Delta f / f = \Delta T / T$ . Avant de tracer la courbe, on peut représenter les résultats de la manière suivante:

T (ms)	10	12	15	18	24	27	30	33	34	37
$\Delta T$ (ms)	0.5	0.5	1	2	2	2	2	2	2	3
F (Hz)	100	83	67	56	42	37	33	30	29	27
$\Delta F$ (Hz)	5	3.4	0.45	4.5	3.5	2.7	2.2	1.8	1.7	2.2

### 8 - Les graphiques

De la même manière les mesures étant entachées d'erreur, on ne peut pas sur un graphique tracer une courbe à partir seulement de la valeur mesurée. Il faut placer en plus de la position du point correspondant, une petite croix ou un rectangle représentant les erreurs de mesure.



Les échelles sont toujours graduées, il n'est pas nécessaire, pire il est interdit de mettre les échelles en haut à droite ou ailleurs comme vous l'avez malheureusement appris au lycée. Cette méthode est bonne pour les cartes routières, où il n'y a pas d'axes, et où l'on convertit une longueur sur la carte en une longueur réelle sur la route en multipliant par un facteur d'échelle. Dans le cas des graphiques avec des axes, il est beaucoup plus pratique de graduer les axes d'une manière rationnelle, par exemple 0,1, 2, 3, 4,... ou 4, 6, 8, 10... ou 1, 5, 10, 15, 20,... Il n'est pas nécessaire de commencer à zéro, mais par contre il est impératif que les graduations soient régulières. L'écriture et la lecture se font en lisant directement sur le papier millimétré, **pas à la règle**.

# L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

---

## 1. Introduction

A l'origine, la notion d'amplificateur opérationnel est liée aux calculateurs analogiques : un amplificateur opérationnel, ou A.O., (O.A. Operational Amplifier en Anglais) est un amplificateur à courant continu, de très grand gain, qui est nécessairement utilisé au sein d'un "système bouclé" où il est associé à des éléments extérieurs : résistances, condensateurs, diodes... En changeant le type et l'arrangement de ces éléments extérieurs, on peut réaliser différentes fonctions analogiques et, dans une certaine mesure, les caractéristiques du montage sont déterminées uniquement par les éléments extérieurs et non pas par les caractéristiques propres de l'A.O.

Exemples de fonctions analogiques :

- \* Amplification et conversion de tension ou de courant.
- \* Addition, soustraction, combinaison linéaire.
- \* Intégration, dérivation, filtrage.
- \* Conversion logarithmique ou exponentielle.
- \* Multiplication, division, extraction de racines...

Les premiers A.O. étaient réalisés au moyen de tubes électroniques, puis on a utilisé des transistors "discrets" et enfin depuis les années soixante, ils sont réalisés sous forme de circuits intégrés, ce qui a permis d'en abaisser le coût et a entraîné la généralisation de leur usage à toute l'électronique analogique.

Un circuit intégré est constitué d'une "puce" (ou "chip") de silicium sur laquelle sont élaborés les différents constituants du circuit, ainsi que les interconnexions. Pour un A.O. classique, on a ainsi regroupé : 20 transistors, 12 résistances et 1 condensateur sur une surface de l'ordre de quelques millimètres carrés.

Les A.O. ne constituent que l'une des nombreuses catégories de circuits intégrés ; il en existe bien d'autres tant dans le domaine analogique: régulateurs de tension, comparateurs, amplificateurs B.F. de puissance, que dans le domaine logique: circuits logiques TTL, CMOS....; mémoires; microprocesseurs...

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

### 2. Description de l'A.O.

#### 2.1. Présentation

Nous considérons dans la suite les A.O. réalisés sous forme de circuits intégrés; ils se présentent pratiquement sous la forme d'un boîtier le plus souvent à 8 broches (boîtier DIL : dual in line ).

Pour son fonctionnement, l'A.O. nécessite généralement deux alimentations continues  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$  branchées en série et dont le point commun constitue la "masse électrique" du montage et qui est donc la référence de tous les potentiels considérés dans la suite. Ces deux alimentations  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ , le plus souvent de même module, permettent de polariser convenablement tous les composants de l'A.O. et d'effectuer l'apport d'énergie extérieure indispensable.

Valeurs typiques des tensions d'alimentation :

$$+V_{CC} = -V_{CC} = V \quad \text{avec} \quad 5 < V < 15 \text{ Volts.}$$

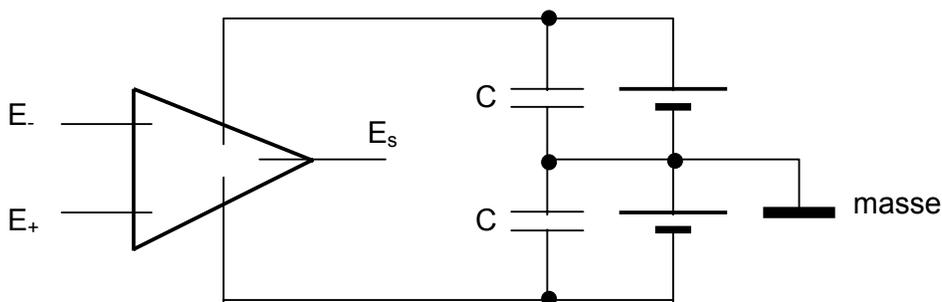
Certains A.O. (voir notice du constructeur) peuvent être alimentés avec une seule tension  $0, +V_{CC}$ .

La consommation d'un A.O. étant très faible, les courants fournis par les alimentations continues n'excèdent pas quelques mA : on peut donc alimenter un A.O. au moyen de piles, par exemple deux piles 9 volts.

#### 2.2 Alimentation continue de l'A.O.

Les condensateurs C (ex:  $C = 0,1 \mu\text{F}$ ) assurent le "découplage" des alimentations, ils doivent être disposés très près de l'A.O.; bien que pas toujours nécessaires, il est préférable de les utiliser pour éviter d'éventuelles oscillations parasites de l'A.O.

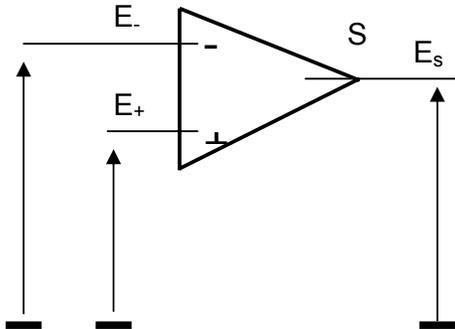
La masse n'est reliée à aucune entrée de l'A.O., mais elle sert de références à toutes les tensions, polarisation et signaux d'entrée-sortie.



Dans la suite, pour alléger les schémas, nous ne représenterons plus les alimentations qui sont indispensables au fonctionnement de l'AO.

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

### 2.3. Comportement statique de l'A.O.



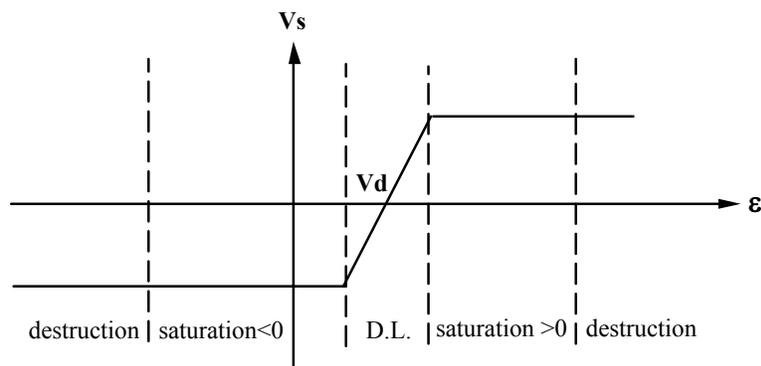
L'A.O. possède deux entrées,  $E_-$  et  $E_+$  (ou - et +, ou in- et in+), et une borne de sortie S : l'entrée  $E_-$  ( $E_+$ ) est dite inverseuse (non-inverseuse) car une tension  $v_-$  ( $v_+$ ) appliquée entre cette entrée et la masse M fournit à la sortie S une tension  $v_s$  de signe opposé (de même signe).

#### 2.3.1. Caractéristique de transfert statique

Pour simplifier, nous admettons que la tension de sortie  $v_s$  ne dépend que de la différence  $e$  des tensions d'entrée :  $e = v_+ - v_-$

L'A.O. est donc un amplificateur "différentiel". ( $e$  est parfois noté  $u_d$ )

Pour les régimes indépendants du temps (continu) ou variables de très basse fréquence, la caractéristique de transfert statique de l'A.O. :  $v_s = f(e)$ , en sortie ouverte, a l'allure suivante :



## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

---

### a) Le domaine LINEAIRE

Dans ce domaine :  $v_S = \mu (\varepsilon - v_D)$

La pente  $m$  de la caractéristique de transfert dans le domaine linéaire (ou d'amplification) est dite : "gain différentiel de l'A.O." ou, improprement, gain en boucle ouverte de l'A.O. (valeur typique :  $10^5$ ).

A cause des inévitables dissymétries dans l'étage d'entrée de l'A.O., la caractéristique de transfert ne passe pas par l'origine et on appelle "tension de décalage d'entrée" (offset d'entrée) le module de la tension  $v_D$  requise à l'entrée pour annuler la tension de sortie  $v_S$  (valeur typique : quelques mV).

### b) Les domaines de saturation positive ou négative

Dans ces deux domaines, la tension de sortie est indépendante de la tension d'entrée ; les tensions de sortie correspondantes, dites de saturation  $v_{S+}$  et  $v_{S-}$  sont déterminées par les valeurs des tensions d'alimentation d'une part, et par la structure interne de l'A.O. d'autre part : généralement (mais pas toujours !) :  $v_{S+} < v^+$  et  $|v_{S-}| < |v^-|$  :

valeurs typiques si :  $+V_{CC} = -V_{CC} = 15$  volts,  $\Rightarrow v_{S+} \approx -v_{S-} = 14$  volts.

- Si on relie les deux entrées  $E_+$  et  $E_-$  à la masse M, on a donc :  $\varepsilon = 0$  et comme  $\mu \cdot |v_D|$  est en général supérieur aux tensions de saturation, l'A.O. sera saturé à cause de l'existence de cette tension de décalage.

Exemple :

$v_D = 1$  mV ;  $\mu = 10^5$  ;  $\mu \cdot v_D = 100$  volts  $\Rightarrow$  l'A.O. sera donc saturé à  $V_{S-}$ .

Le domaine LINEAIRE est de très faible largeur au voisinage de  $v_D$ , pour  $v_{S+} = v_{S-} = 14$  volts et  $\mu = 10^5$ , elle vaut 0,28 mV et donc la moindre tension perturbatrice recueillie à l'entrée de l'A.O. conduit à la saturation ( $>0$  ou  $<0$ ).

### c) CONCLUSION

L'A.O. ne peut pas fonctionner seul dans le domaine linéaire et il est nécessaire de l'inclure dans un système bouclé où une partie de la tension de sortie est renvoyée à l'entrée.

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

---

### 2.3.2. Courants de polarisation

Les bornes d'entrée  $E_+$  et  $E_-$  de l'A.O. sont reliées directement aux transistors d'entrée. Dans le domaine linéaire, des courants de polarisation notés  $I_{b+}$  et  $I_{b-}$  doivent donc nécessairement entrer (ou sortir) par  $E_+$  et  $E_-$ :

- On appelle "courant de polarisation moyen" la moyenne arithmétique  $I_b$  de  $I_{b+}$  et  $I_{b-}$  :

$$I_b = [I_{b+} + I_{b-}] / 2$$

- On appelle "courant de décalage" le module de la différence de ces courants :

$$I_d = |I_{b+} - I_{b-}|$$

Exemple : TLO81 :  $I_b = 30 \text{ pA}$ ,  $I_d = 5 \text{ pA}$ .

Ces courants sont le plus souvent négligeables devant les autres courants circulant dans le montage; néanmoins, pour un bon fonctionnement de l'A.O., il est nécessaire qu'ils puissent circuler ! Il n'est donc pas possible de relier les entrées  $E_+$  et  $E_-$  au reste du montage uniquement par des condensateurs.

### 2.3.3. Résistances d'entrée et de sortie

En régime continu ou lentement variable, on peut se limiter à la considération de résistances d'entrée et de sortie. A plus haute fréquence, il serait nécessaire d'envisager des impédances.

A l'entrée, pour simplifier, on ne considère que la résistance différentielle d'entrée  $R_d$  située entre les bornes  $E_+$  et  $E_-$ .

A la sortie, on considère la résistance de sortie  $R_s$

Exemple : TLO81 :  $R_d = 10^{12} \Omega$        $R_s = 100 \Omega$

### 2.4. Vitesse de balayage ("slew-rate") $S_R$

La tension de sortie de l'A.O. ne peut pas varier instantanément et on appelle vitesse de balayage ou slew-rate, en régime de forts signaux mais en l'absence de saturation, la valeur absolue de la vitesse maximale de variation de la tension de sortie, soit :

$$|dv_s/dt| < S_R$$

Exemple : TLO81 :  $S_R = 13 \text{ V}/\mu\text{s}$ .

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

---

### 3. Le modèle de l'amplificateur opérationnel idéal

#### 3.1. Présentation

Pour une utilisation "courante", on peut admettre que les paramètres fondamentaux de l'A.O. sont parfaits et les défauts inexistant ; on utilise alors le modèle de l'A.O. idéal.

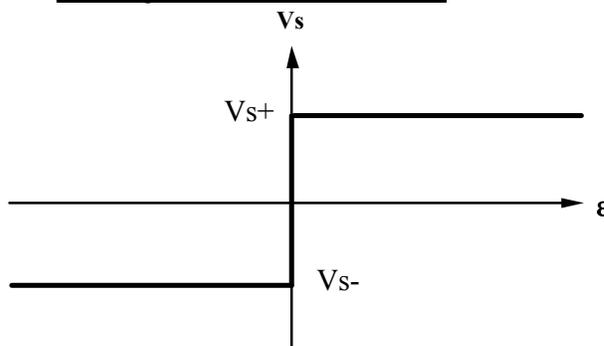
Le modèle de l'A.O. idéal est caractérisé par :

- 1) un gain différentiel infini :  $m = \infty$
- 2) une bande passante infinie.
- 3) une tension de décalage nulle :  $v_d = 0$
- 4) des courants de polarisation nuls :  $I_{b+} = I_{b-} = 0$
- 5) une impédance différentielle d'entrée infinie.
- 6) une impédance de sortie nulle.
- 7) une vitesse de balayage infinie :  $S_R = \infty$

Remarque :

Les A.O. classiques ont des performances moyennes mais néanmoins suffisantes ; on dispose, par ailleurs, de circuits aux performances très supérieures (mais dont le prix l'est aussi !).

#### 3.2. Les règles d'or de l'A.O. idéal



Pour le modèle de l'A.O. idéal, la caractéristique de transfert a la forme ci-contre :

On déduit donc :

i) Dans le domaine de fonctionnement LINEAIRE la tension différentielle d'entrée  $\varepsilon$  est NULLE.

ii) Si la tension différentielle  $\varepsilon$  est non nulle, l'A.O. est en saturation négative ou positive.

L'étude des montages utilisant un A.O. supposé IDEAL, et en fonctionnement LINEAIRE, peut s'effectuer facilement au moyen des règles qui découlent des hypothèses du § 3.1.

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

### Règles d'or pour l'A.O. IDEAL en fonctionnement LINEAIRE

I: La sortie de l'A.O. fournit le courant et la tension nécessaires pour que sa tension différentielle d'entrée soit NULLE.

II: Les entrées de l'A.O. :  $E_-$  et  $E_+$  ne sont traversées par aucun courant

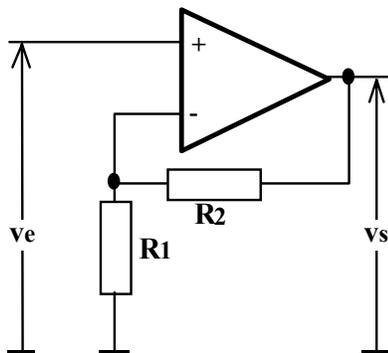
Le fait que le courant de sortie de l'A.O. soit non nul, alors que les courants d'entrée le sont, n'est pas contradictoire car l'A.O. est relié, par ailleurs, aux sources d'alimentation continues  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ .

La règle d'or I n'est naturellement plus valide si l'A.O., toujours supposé idéal, fonctionne dans les domaines de saturation. Par contre la règle II reste toujours valide.

### 3.3. Comportement linéaire et non linéaire de l'A.O.

Dans le modèle de l'A.O. idéal, il semble que les deux bornes  $E_+$  et  $E_-$  soient équivalentes (vu que  $\varepsilon = 0$ ) ; on constate (par exemple expérimentalement) qu'il n'en est rien, la stabilité du montage dépendant de la position de ces bornes.

#### 3.3.1. Comportement linéaire



Considérons le montage ci-contre :

La source de tension d'entrée  $v_e$  est reliée directement à l'entrée  $E_+$  de l'A.O., d'où :  $v_+ = v_e$

Un pont diviseur de tension, constitué de deux résistances  $R_1$  et  $R_2$ , est branché entre la sortie S de l'A.O. et la masse M. Son point milieu est relié à l'entrée  $E_-$  de l'A.O. : ceci permet de "réinjecter" à l'entrée  $E_-$  une fraction de la tension de sortie, le pont diviseur ne débitant pas vu que  $I_- = 0$  (cf. règle d'or II)

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

$$\text{on a: } v_- = v_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{D'après la règle d'or I: } \varepsilon = 0 = v_+ - v_-, \text{ d'où: } v_s = v_e \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

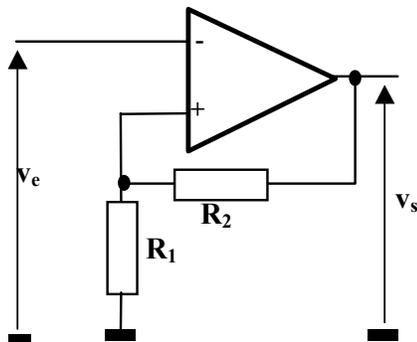
Le montage ci-dessus est donc un amplificateur de tension dont le gain n'est fonction que de  $R_1$  et  $R_2$ .

### Stabilité

Montrons, par un raisonnement intuitif, que ce montage est stable : c'est-à-dire que si une perturbation sort l'A.O. du domaine linéaire, le montage est conçu de telle manière que l'évolution temporelle des différentes tensions contraigne l'A.O. à retourner dans le domaine linéaire :

Soit donc une perturbation qui rende momentanément positif, le potentiel  $v_s$  évolue donc vers  $+v_{\text{sat}}$ , obligeant ainsi le potentiel  $v_-$  à croître.  $\varepsilon$  diminue donc jusqu'à zéro, situation où le potentiel de sortie s'arrête de croître. L'A.O. atteint un nouvel état d'équilibre dans son domaine de fonctionnement linéaire et le montage est donc stable.

### 3.3.2. Comportement non linéaire



Considérons le montage ci-contre ;  
il se déduit du précédent par la simple inversion des bornes d'entrée E- et E+:

### Stabilité

Montrons que ce montage est instable:

soit une perturbation qui rende  $\varepsilon$  positif, le potentiel  $v_s$  évolue vers  $+v_{\text{sat}}$  obligeant le potentiel  $v_+$  à croître, ce qui renforce l'écart initial de  $\varepsilon$ . L'A.O. évolue donc vers l'état d'équilibre final où  $v_s = +v_{\text{sat}}$ . Inversement, si la perturbation initiale rend  $\varepsilon$  négatif, l'A.O. évolue vers un état d'équilibre final où  $v_s = -v_{\text{sat}}$ .

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

---

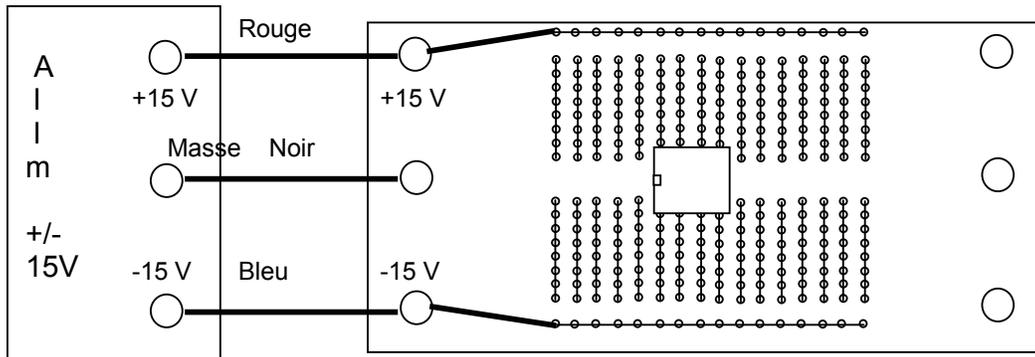
Ainsi, tout point de fonctionnement situé sur la partie verticale de la caractéristique, est devenu instable et le système ne peut exister, à l'état stable, qu'avec une tension de sortie égale à  $-v_{sat}$  (saturation  $< 0$ ), ou à  $+v_{sat}$  (saturation  $> 0$ ); le montage est dit "comparateur à hystérésis".

### 4 - Conclusion :

Cette étude "qualitative" permet de comprendre le choix des entrées  $E_+$  et  $E_-$  dans les montages décrits plus loin.

## UTILISATION DE LA PLAQUETTE

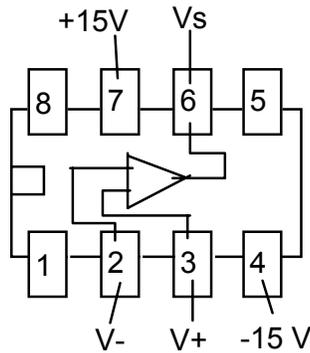
La plaquette sur laquelle vous allez réaliser vos expériences est composée de 6 bornes pour relier les composants qui seront placés sur celle-ci aux appareils de mesure extérieurs. Par ailleurs, les différents contacts de la plaquette sont reliés comme indiqué dans le schéma suivant.



**Afin de faciliter la tâche des enseignants, il est impératif de faire les montages, comme indiqué ci-dessus.**

**1 - Introduction**

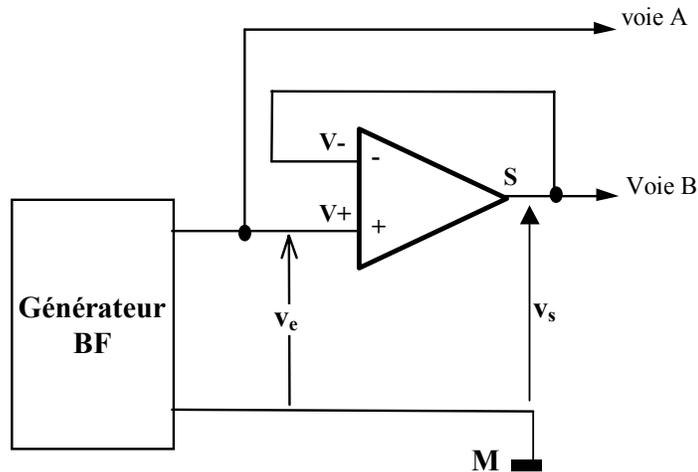
Nous allons faire les expériences avec le modèle TL 081 d'amplificateur opérationnel. Le schéma de brochage est le suivant:



Vue de dessus

**2 - Montage Suiveur**

2.1. Montage



L'A.O., dont la sortie S est reliée directement à l'entrée E<sub>-</sub>, est alimenté entre E<sub>+</sub> et la masse au moyen d'un générateur B.F .

**Analyser le montage en utilisant le modèle de l'A.O. idéal .  
Déterminer théoriquement la relation entre  $v_s$  et  $v_e$ .**

**Quel est l'intérêt d'un tel montage?**

## 2.2. Mesures

### 2.2.1. Gain

Prendre une tension d'entrée sinusoïdale de fréquence 1kHz et d'amplitude voisine de 5 volts, et appliquer  $v_e$  et  $v_s$  aux entrées A et B d'un oscilloscope bi-courbe.

**Déterminer le déphasage entre  $v_s$  et  $v_e$  et mesurer le gain en tension  $G$ : rapport des amplitudes des tensions  $v_s$  et  $v_e$ .**

**Conclusion.**

**Que se passerait-il si vous aviez utilisé un signal triangulaire ou rectangulaire?**

### 2.2.2. Saturation en tension

Utiliser un générateur de tension continue variable pour mesurer  $V_{sat}$ . Pour cela, prendre un générateur de tension continue, en positif, **puis** en négatif. Commencer avec une tension nulle, et augmentez celle-ci tout en observant la tension de sortie de l'AO.

**Mesurer  $V_{sat}$ , quelle est la précision de la mesure?**

### 2.2.3. Limitation en courant

Placer à la sortie de l'amplificateur opérationnel, entre  $V_s$  et la masse, une charge variable, (utiliser pour cela un potentiomètre de 10 K $\Omega$ ), et déterminer le courant maximum qui peut être débité par l'AO. Appliquez une tension de 10 Volts à l'entrée de l'AO, et observez la tension de sortie à l'oscilloscope. Diminuez lentement la résistance en tournant le potentiomètre, lorsque vous observez un décrochement, vous avez atteints le courant maximum fourni par l'AO. Si la résistance est R, et la tension 10 Volts, alors  $I_{lim} = 10/R$ .

Pour avoir une meilleure précision de la mesure recommencer 10 fois de suite la mesure, par exemple, 5 mesures faites par un étudiant et 5 autres par l'autre, calculer la valeur moyenne de la résistance, l'écart type, et en déduire le courant maximum.

**Mesurer  $I_{lim}$ , quelle est la précision de la mesure?**

2.2.4. Vitesse de balayage

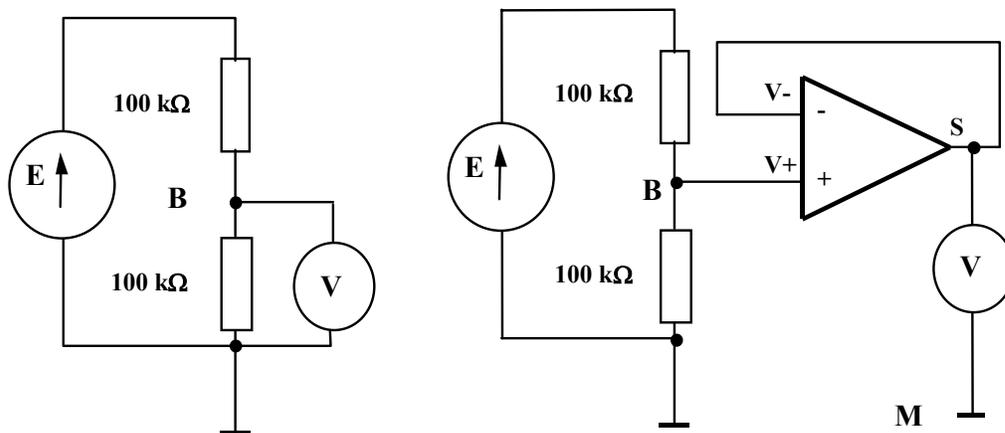
Appliquer à l'aide du BF un signal carré de 5 volts d'amplitude et faire croître la fréquence. Vérifier qu'aux fréquences élevées le signal de sortie devient trapézoïdal. Ceci est lié au fait qu'un A.O. ne peut répondre "instantanément" aux variations de tension ; il est donc caractérisé par une "vitesse limite de balayage" (ou "slew-rate")  
 $S_R = [dv_s/dt]_{\max}$

**Déduire  $S_R$  en  $V/\mu s$  en mesurant la pente du signal trapézoïdal. Quelle est l'erreur de mesure de  $S_r$ ? Comparer la valeur mesurée à la valeur nominale donnée par le fabricant.**

2.3. Application

Fabrication d'un voltmètre haute impédance

Une application intéressante du montage suiveur est montrée dans l'expérience qui suit.



Faire le montage de la partie gauche: E est un générateur de tension continue, V est un voltmètre magnétoélectrique.

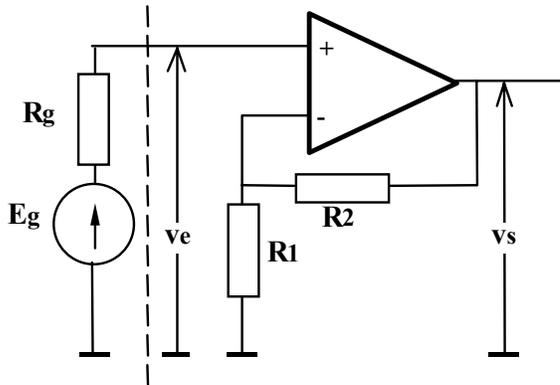
**Mesurer la tension à l'aide d'un voltmètre magnétoélectrique, donner sa valeur, ainsi que l'erreur de la mesure.**

Remplacer celui-ci par le montage suiveur de la partie droite.

**Mesurer la nouvelle tension obtenue. Donner sa valeur ainsi que l'erreur de la mesure  
 Expliquez la différence entre les deux résultats.**

## TP N°2 AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR ET INVERSEUR

### 1. Amplificateur non inverseur



On a fait apparaître sur ce schéma 3 "blocs successifs" :

- \*la source représentée par son schéma équivalent dit de Thévenin ( $E_g$  est la fem,  $R_g$  la résistance interne)
- \*l'amplificateur de tension
- \*la charge supposée résistive  $R_c$ .

Analyse :

Règle II :  $v_+ = v_e = E_g$  ;  $v_- = v_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  (pont diviseur ne débitant pas)

Règle I :  $v_+ = v_-$  d'où :  $v_s = v_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

d'où les caractéristiques du montage :

Gain en tension  $G_v$   $G_v = \frac{v_s}{v_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$  ( $> 1$ )

Le gain en tension étant positif, l'amplificateur est dit non inverseur.

Résistance d'entrée :  $R_e = \infty$

Résistance de sortie :  $R_s = 0$

Remarque pratique :

Le gain  $G_v$  semble ne dépendre que du rapport des résistances  $R_1$  et  $R_2$  ; néanmoins, en pratique, les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$  ne peuvent pas être quelconques :

i) Elles ne doivent pas être trop grandes (par exemple supérieures à  $1M\Omega$ ) car elles sont alors peu stables (ou coûteuses), sources de perturbations, et d'autre part l'influence des courants de polarisation peut cesser d'être négligeable.

ii) Elles ne doivent pas être trop faibles (inférieures à  $1k\Omega$ ) car l'A.O. ne peut débiter qu'un courant de sortie limité (de l'ordre de  $10mA$ ). Très souvent, les résistances utilisées sont comprises dans l'intervalle  $1k\Omega - 1M\Omega$ .

## TP N°2 AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR ET INVERSEUR

---

### Montage

Prendre  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

### Manipulations

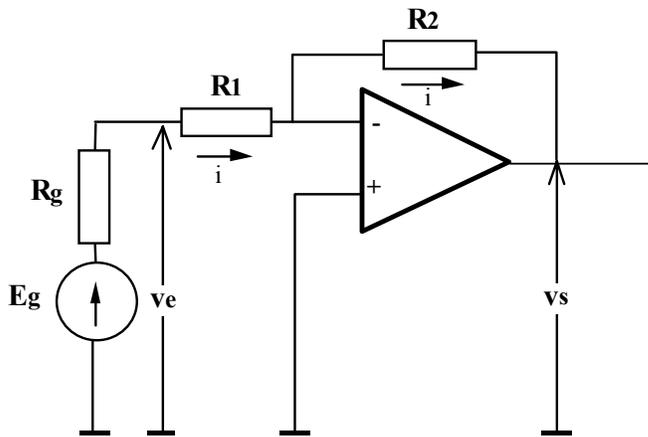
Linéarité de l'AO

Injecter une tension continue à l'entrée  $E_+$  positive et négative.

***Tracer  $v_s = f(v_e)$ . En déduire le domaine de linéarité de l'A.O.***

***Déterminer le gain et l'offset de l'AO en faisant une régression linéaire.***

2. Amplificateur inverseur



Analyse :

Règle II :

Le courant  $i$  est le même dans les résistances  $R_1$  et  $R_2$ .

Règle II:

$$v_- = v_+$$

$$\text{d'où : } v_e = R_1 \cdot i$$

$$\text{et } v_s = - R_2 \cdot i$$

$$\text{donc } v_s = - \frac{R_2}{R_1} v_e$$

Caractéristiques du montage :

- Gain en tension :  $G_v = - R_2/R_1$
- Résistance d'entrée :  $R_e = R_1$
- Résistance de sortie :  $R_s = 0$

Le gain  $G_v$  étant négatif, l'amplificateur est dit inverseur ; on notera que sa résistance d'entrée est, en général, assez faible

**Comment peut-on remédier à, cette faible impédance d'entrée?**

Remarque:

En remplaçant les résistances  $R_1$  et  $R_2$  par des impédances  $Z_1$  et  $Z_2$ , on peut réaliser des amplificateurs sélectifs (filtres) pour des régimes variables de basse fréquence.

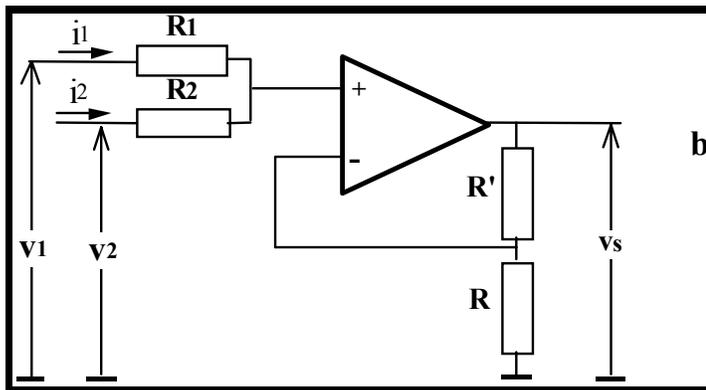
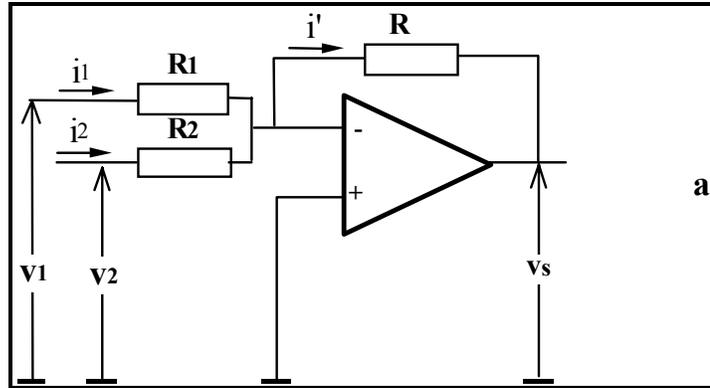
Montage

Avec  $R_1=1k\Omega$  et  $R_2=100k\Omega$

Manipulation

**Tracer sur papier semi-logarithmique la réponse en fréquence, et déterminez la fréquence de coupure. Quelle est l'erreur sur cette fréquence de coupure ?**

1. Sommateurs inverseur et non inverseur



Considérons les montages des figures **a** et **b** qui dérivent des précédents :

Analyse

Sommateur inverseur (**a**)

$$i' = i_1 + i_2 = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \quad \text{et} \quad v_s = -R i' \quad \text{d'où} \quad v_s = -R \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

Si  $R_1 = R_2 = R \implies v_s = -(V_1 + V_2)$  d'où le nom du montage.

Sommateur non inverseur (**b**)

$$i_1 + i_2 = 0 \quad v_+ = \frac{V_1 / R_1 + V_2 / R_2}{1 / R_1 + 1 / R_2} \quad v_- = v_s \frac{R}{R + R'}$$

### TP N°3 MONTAGES SOMMATEURS ET DIFFERENTIEL

$$\text{d'où } v_s = \frac{V_1/R_1 + V_2/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} \cdot \frac{R+R'}{R} \quad \text{si } R_1 = R_2 \quad v_s = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot \frac{R+R'}{R}$$

et si  $R = R'$   $v_s = V_1 + V_2$  d'où le nom du montage.

#### Remarque :

En modifiant les valeurs des résistances, on peut naturellement réaliser des combinaisons linéaires quelconques (à coefficients  $<0$  ou  $>0$ ). Ces montages sont très utilisés, en particulier dans les calculateurs analogiques.

Manipulation : choisir un des deux montages, inverseur ou non-inverseur

Prendre  $R = R' = R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

***Additionner deux signaux continus puis un signal continu et un périodique et vérifier que l'on a bien la somme à la sortie.***

On vient de réaliser un décaleur de tension qui possède l'avantage de ne pas faire débiter un générateur dans l'autre au risque de les détériorer. On peut ajouter deux signaux sinusoïdaux de fréquences proches afin de réaliser des battements (leurs amplitudes doivent être aussi égales).

Théorie:

$$s_1 = a \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \text{ et } s_2 = a \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \text{ avec } \omega_1 > \omega_2, \text{ mais } \omega_1 \cong \omega_2,$$

$$s_1 + s_2 = 2a \sin\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} + \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right) \cos\left(\frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} + \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{2}\right)$$

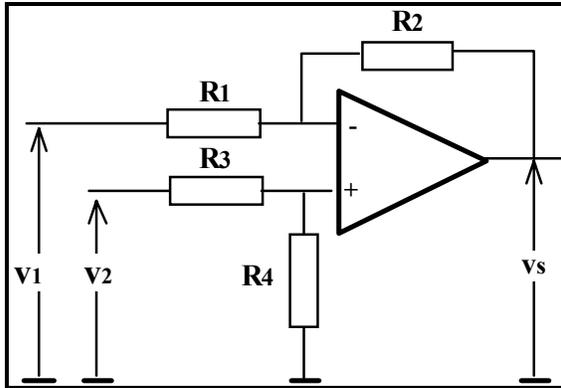
- Le premier terme est le signal de porteuse:  $\frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2} \cong \omega_1 \cong \omega_2$
- Le deuxième terme est le signal de modulation:  $\frac{(\omega_1 - \omega_2)}{2}$ . Dans ce cas c'est un battement.

Utiliser deux Générateurs Basse Fréquence.

***Observez les battements quand les fréquences des deux signaux sont voisines.. A l'oscilloscope, mesurer la fréquence des battements  $f_b$ , ainsi que  $f_1$  et  $f_2$  et comparer à la différence entre les deux fréquences d'entrée  $f_1, f_2$ ,***

L'addition de signaux de fréquences multiples permettrait de fabriquer des signaux de forme quelconque (triangle, carré...) en ajustant les amplitudes selon les spectres de Fourier.

**2. Amplificateur différentiel**



Analyse:

$$v_+ = v_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \text{ et } v_- = v_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{d'où } v_s = v_2 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1 + R_2}{R_1} - v_1 \frac{R_2}{R_1}$$

Si la condition :  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  est satisfaite, le montage fonctionne en amplificateur différentiel

$$v_s = (v_2 - v_1) \frac{R_2}{R_1}$$

Pour que  $v_s$  ne dépende que de la différence  $v_1 - v_2$ , la condition précédente doit être réalisée avec précision.

Montage

Prendre  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ .

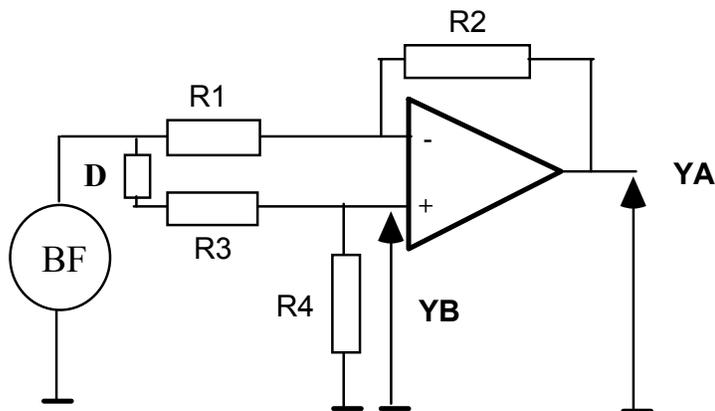
Manipulation

Prendre pour  $V_1$  un signal alternatif sinusoïdal, et pour  $V_2$  une tension continue.

***On vérifiera que l'on a bien à la sortie la différence des deux signaux d'entrée.***

**Caractéristique d'une diode**

Le montage peut être utilisé pour tracer des caractéristiques de dipôles au moyen d'un oscilloscope en évitant les problèmes de "masse" :



La tension envoyée sur  $Y_A$  est égale à la ddp aux bornes du dipôle D.  
 La tension envoyée sur  $Y_B$  est proportionnelle à l'intensité traversant D.

**Montage**

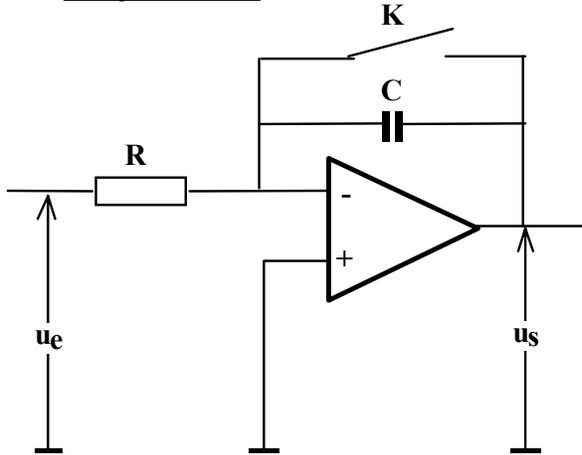
Prendre  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$ .

**Manipulation**

***Tracer à l'oscilloscope fonctionnant en X-Y la caractéristique d'une diode. Quelle est la tension de seuil de la diode? Quelle est l'erreur de mesure ?***

## 1. Intégrateur

### 1.1. Intégrateur pur



Analyse :  $v_+ = v_- = 0$  donc  $u_s = -u_c$   $i = \frac{u_e}{R} = C \frac{du_c}{dt} = -C \frac{du_s}{dt}$

$$u_s = -\frac{1}{RC} \int_0^T u_e dt + u_s(0)$$

Ce montage intègre, inverse, divise par RC. A priori, si l'on envoie des signaux carrés alternatifs à l'entrée, on doit obtenir en sortie une double rampe.

#### Expérimentation:

$C = 10 \text{ nF}$        $R = 10 \text{ k}\Omega$        $f = 2000 \text{ Hz}$   
 -  $u_e$  est un signal carré alternatif d'amplitude 5 V.

En fait, la moindre tension de décalage d'entrée (qu'elle soit due au générateur ou à l'A.O) sera intégrée, ce qui provoque une dérive vers le haut ou vers le bas du signal de sortie.

Toute composante continue à l'entrée donne un terme de la forme  $kt$ . Cette dérive peut être due aux différents "offsets" de l'A.O. lui-même ; une simple expérience le montre : fermer K et observer  $u_s$ .

L'interrupteur K permet d'initialiser  $u_s$  à 0.

## TP N°4 MONTAGE INTEGRATEUR ET DERIVATEUR

Manipulation:

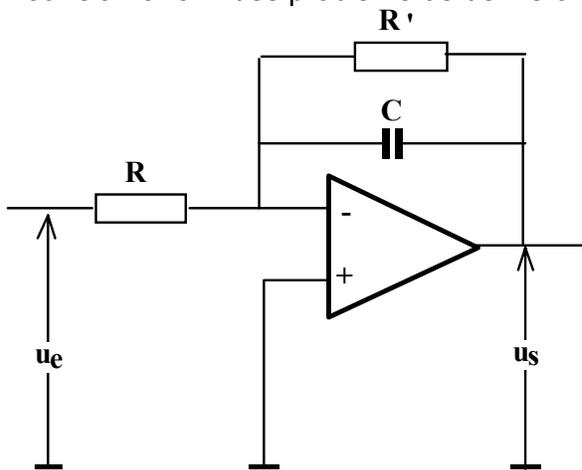
- **Noter vos observations après avoir visualisé  $u_e$  et  $u_s$  sur l'écran de l'oscilloscope.**

Conclusion:

Ce montage intègre tout signal.

### 1.2. Pseudo-intégrateur

Pour s'affranchir des problème de dérive on peut utiliser un pseudo-intégrateur.



Analyse

$$v_- = v_+ = 0$$

La somme des courants à l'entrée est nulle :  $\frac{u_e}{R} + \frac{u_s}{R'} + j C \omega u_s = 0$

$$\frac{R'}{R} u_e + (1 + j R' C \omega) u_s = 0 \quad \text{et} \quad u_s = \frac{-R'/R}{1 + j R' C \omega} u_e$$

Si  $R' C \omega \gg 1$ , c'est-à-dire  $f \gg \frac{1}{2 \pi R' C} = f_c$

$$\text{alors } u_s = \frac{-1}{j R C \omega} u_e \quad \text{soit } u_s(t) = \frac{-1}{R C} \int_0^t u_e dt + u_s(0)$$

## TP N°4 MONTAGE INTEGRATEUR ET DERIVATEUR

---

Le montage devient intégrateur.

Le montage est en réalité pseudo-intégrateur : il n'intègre pas les signaux de basse fréquence et notamment pour le continu, il se comporte en simple amplificateur (si  $R' > R$ ) inverseur ; de ce fait, la dérivée est supprimée et remplacée par un simple décalage (qui dépend du rapport  $R'/R$ ).

**N.B.** On peut retrouver rapidement ces résultats :

- aux basses fréquences et notamment en continu,  $1/C\omega \gg R'$  et tout se passe comme si C était débranché ==> le montage est amplificateur inverseur ( $- R'/R$ ).
- aux fréquences telles que  $1/C\omega \ll R'$ , soit  $R'C\omega \gg 1$ , tout se passe comme si  $R'$  était débranchée et on retrouve l'intégrateur (inverseur).

### Expérimentation

- $u_e$  est un signal carré alternatif d'amplitude 5 V.
- Brancher  $R' = 10 \text{ k}\Omega$

**Noter la différence par rapport au montage précédent.  
Faire varier la fréquence du signal d'entrée et conclure.  
Vérifier que l'intégration est effective (obtention de rampes) si  $f \gg f_c = 1/(2\pi R'C)$   
Envoyer un signal d'entrée triangulaire, relever  $u_e$  et  $u_s$ , conclure.**

- Injecter un signal d'entrée  $u_e$  sinusoïdal

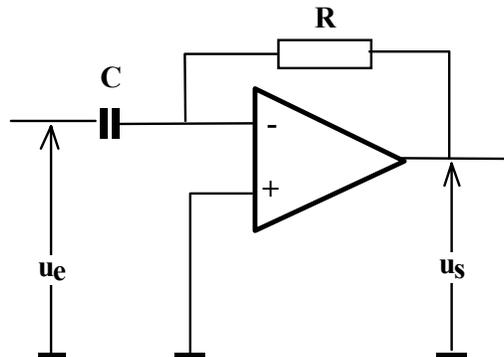
**Mesurer le déphasage en fonction de la fréquence sur papier semi-log. En déduire la valeur de  $f_c$ . Tracer la courbe eb faisant varier la fréquence de 100 Hz à 100 kHz.**

Faire un tableau comprenant :

t
$\Delta t$
T
$\Delta T$
$f=1/T$
$\Delta f$
$\varphi=2\pi t/T$
$\Delta \varphi$

## 2. Dérivateur

### Montage de principe

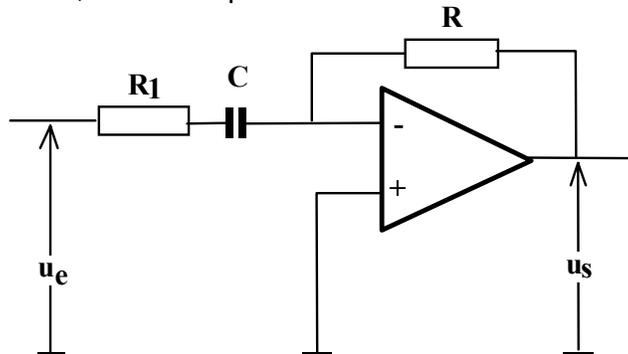


Analyse: En supposant l'A.O. idéal :  $v_- = v_+ = 0 \implies u_s = -Ri$   
 avec  $i = C \frac{du_C}{dt}$  où  $u_e = u_C$  d'où  $u_s = -RC \frac{du_C}{dt}$   
 Ce montage réalise donc à  $(-RC)$  près l'opération dérivation.

### Expérimentation

$R = 10 \text{ k}\Omega$  ,  $C = 0,22 \text{ }\mu\text{F}$  et  $R_1 = 100 \text{ }\Omega$

Envoyer un signal triangulaire de  $f = 100 \text{ Hz}$ , de valeur maxi  $1,5 \text{ V}$ .  
 Dans le cas où le GBF a une résistance de sortie nulle (étage suiveur), on observe des oscillations. Dans ce cas, il suffit de placer une résistance en série avec C :



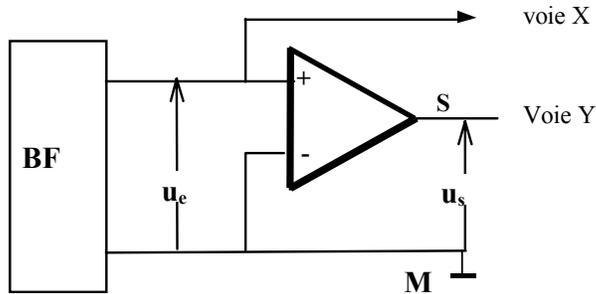
**Mesurer la pente du signal triangulaire en V/s, et en déduire  $u_s$ . Comparer à la valeur expérimentale**  
**Mesurer la pente de la sortie parallélogramme observé à haute fréquence et en déduire le slew rate en  $\text{V}/\mu\text{s}$ .**

**1. Comparateur simple**

L'AO est en boucle ouverte, c'est à dire avec un gain très élevé.

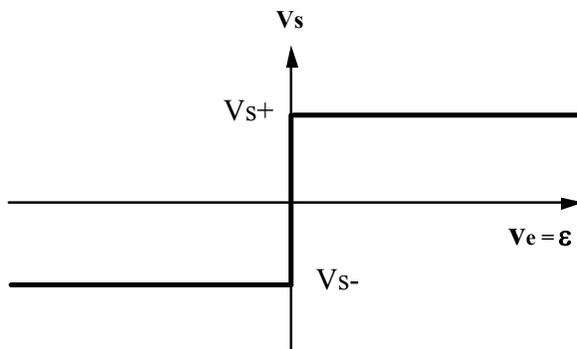
**1.1 Comparateur à zéro**

Réaliser le montage suivant:



Utiliser comme tension d'entrée un signal triangulaire d'amplitude 5 Volts et de fréquence 500 Hz. Mettre l'oscilloscope en mode X-Y.

**Relever la caractéristique de transfert  $V_s$  en fonction de  $V_e$**



C'est finalement la caractéristique statique (ou régime lentement variable) de l'AO en boucle ouverte.

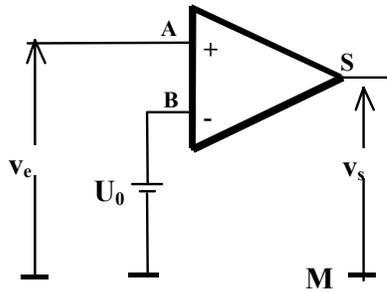
Le point de fonctionnement ne peut pas rester en équilibre stable sur la partie rectiligne correspondant au régime linéaire à cause du gain très élevé de l'AO en boucle ouverte.

## TP N°5 REGIME NON LINEAIRE /COMPARATEUR

---

### 1.2. Comparteur à $U_0$

Réaliser le même montage que précédemment en ajoutant un générateur de tension continue sur l'entrée négative.



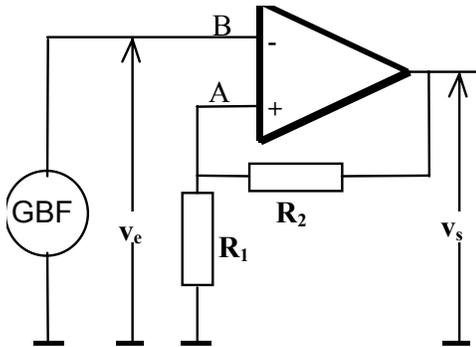
**Réaliser le montage avec  $U_0 = 4,5$  Volts, effectuer le même travail que précédemment, et interpréter vos résultats.**

**2. Comparateur à hystérésis (ou trigger de Schmitt)**

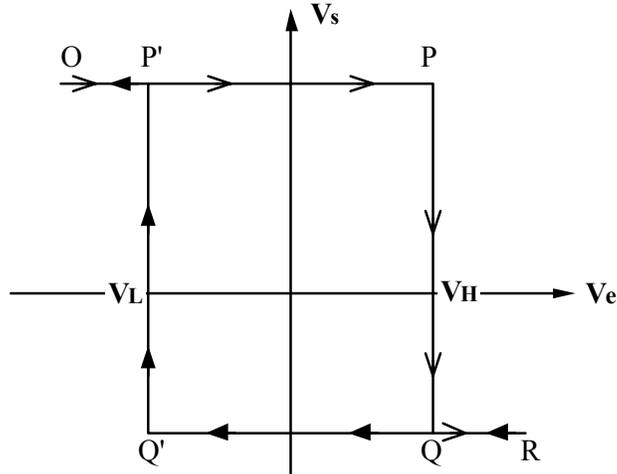
Ces systèmes comportent une boucle de réaction positive.

**2.1. Comparateur à seuils symétriques**

Réalisez ce montage avec  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ . On prendra pour  $V_e$  un signal triangulaire d'amplitude 10 Volts et de fréquence 200 Hz.



**Tracer la courbe  $V_s$  en fonction de  $V_e$ .**



## TP N°5 REGIME NON LINEAIRE /COMPARATEUR

La sortie est en butée haute ou basse.  
L'AO compare toujours les potentiels de ses 2 entrées.  
Le potentiel de A est une image du potentiel de la sortie.

$$V_A = v_s \frac{R_1}{R_1 + R_2} = k V_{sat} \quad \text{avec} \quad k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

si  $V_A > V_B \implies V_s = + V_{sat}$       si  $V_A < V_B \implies V_s = - V_{sat}$

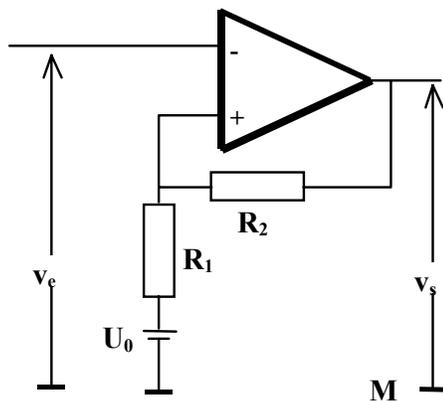
Supposons que  $V_s = + V_{sat}$ , alors  $V_A = k V_{sat} = V_H$ .  
Tant que  $V_e = V_B < V_H$ ,  $V_s = V_{sat}$  (trajet OP) ;  
dès que  $V_e$  atteint  $V_H$  en croissant, la sortie bascule à  $- V_{sat}$  (trajet PQR), mais  $V_A$  passe alors à  $-k V_{sat} = V_L$  et le seuil de comparaison change.  
Tant que  $V_e = V_B > V_L = V_A$ ,  $V_s = - V_{sat}$  (trajet RQ') ; dès que  $V_e$  atteint  $V_L$  en décroissant, la sortie bascule à  $+ V_{sat}$  (trajet Q'P'O).

Remarque: L'appellation hystérésis provient du fait que le seuil de comparaison  $V_A$  dépend de l'état de la sortie.

### 2.1.3. Expérimentation (suite)

**Observer  $V_s(t)$ ,  $V_e(t)$ ,  $V_A(t)$  et retrouver les seuils de basculement.**

### 2.2. Comparateur à seuils dissymétriques



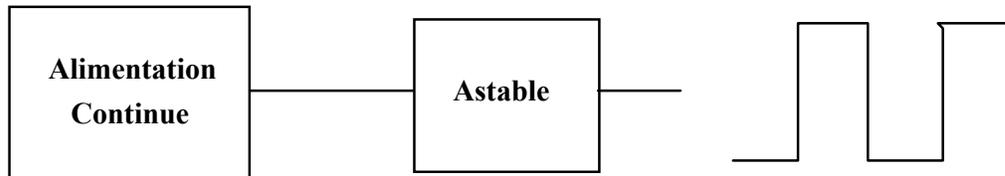
Comme dans le cas du comparateur simple on peut, en ajoutant une tension continue  $U_0$ , obtenir un comparateur à seuils dissymétriques.

**Calculer le décalage des seuils de basculement en fonction de  $U$ ,  $R_1$ , et  $R_2$ . Comparer aux valeurs expérimentales de  $V_L$  et  $V_H$ .**

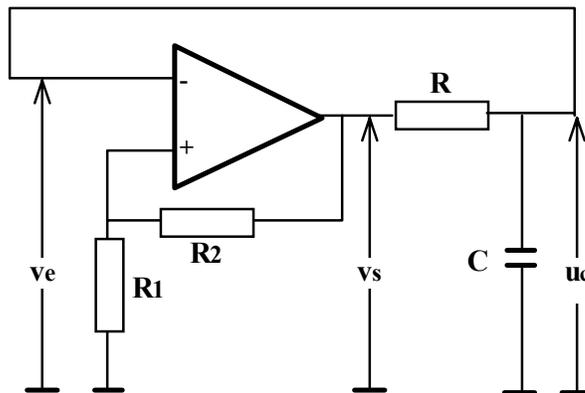
## 1. Astables

### 1.1. Introduction

Un astable est un oscillateur autonome donnant des signaux rectangulaires.



### 1.2. Montage



Soit un comparateur à hystérésis à seuils symétriques qui alimente un circuit RC et qui est lui-même commandé ( $v_e = u_c$ ) par la tension aux bornes de C.

Quand S est au niveau haut ( $+V_{sat}$ ), C se charge à travers la résistance R,  $u_c$  augmente et dès que  $u_c$  atteint  $kV_{sat}$ ,  $V_s$  bascule au niveau bas ( $-V_{sat}$ ), par suite  $u_c$  tend maintenant vers  $-kV_{sat}$  (exponentiellement) et dès que  $u_c$  atteint  $-kV_{sat}$ ,  $V_s$  bascule à  $+V_{sat}$  etc...

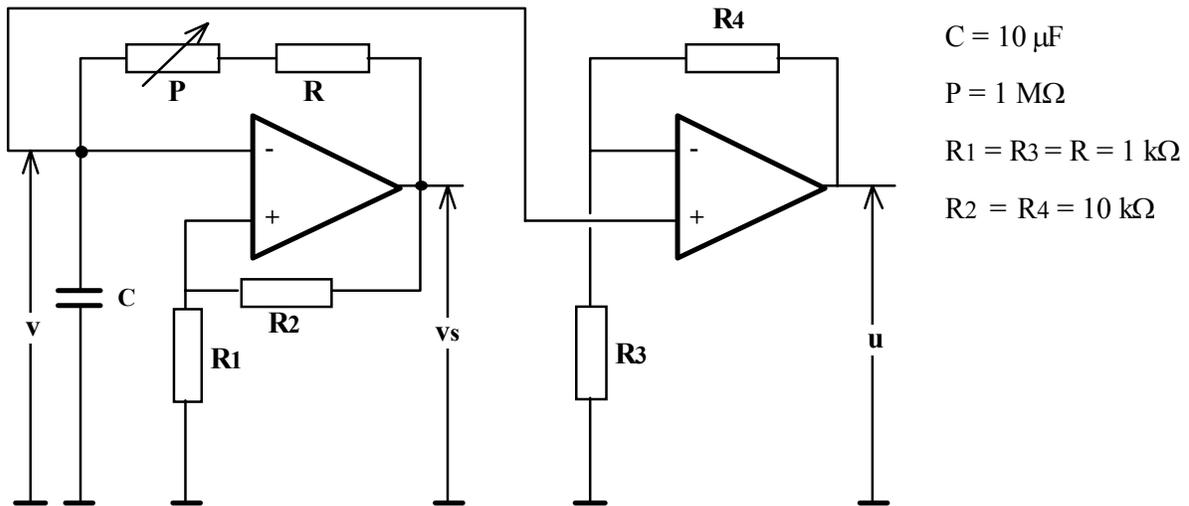
Le système n'est jamais dans un état stable (il est en perpétuelle relaxation !). Ce montage est le même que celui qui a servi à étudier le comparateur à hystérésis, simplement les signaux triangulaires qui étaient délivrés par le BF sont maintenant obtenus aux bornes du condensateur. Le système est devenu autonome.

## 2. Réalisation d'un Générateur TBF (Très Basses Fréquences)

Il s'agit de réaliser un générateur capable d'alimenter à TBF un pont de diodes électroluminescentes.

### 2.1. Principe

En utilisant deux montages classiques de l'amplificateur opérationnel, on peut proposer la réalisation suivante :



Le premier étage est un multivibrateur astable. Le condensateur se charge et se décharge exponentiellement à travers la résistance variable de  $1 \text{ M}\Omega$ . La résistance  $R$  en série avec  $P$  sert de protection quand  $P$  est à 0.

La tension  $V^+$  varie entre:  $\pm V_{\text{sat}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

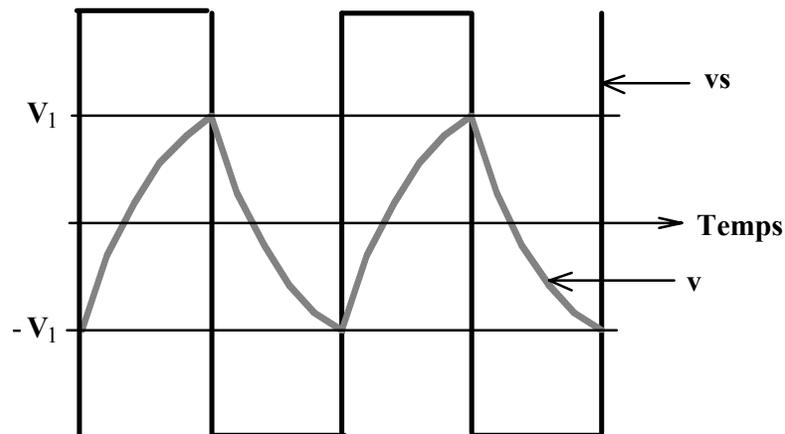
donc la tension aux bornes du condensateur varie entre:

$$\frac{V_s}{11} \text{ et } -\frac{V_s}{11}$$

on peut donc, ces valeurs étant faibles, employer un condensateur polarisé ( $10 \mu\text{F}$  au tantale).

Les tensions  $v$  et  $v_s$  peuvent être visualisées; on obtient en régime permanent avec des échelles différentes:

## TP N° 6 REGIME NON LINEAIRE / LES ASTABLES



Le deuxième étage est un ampli non inverseur donc:  $u = v \frac{R_3 + R_4}{R_3}$

### 2.2. Calcul de la période

Pour mémoire, si l'on désire calculer la période, on peut écrire que par exemple pour

la portion allant de  $-V_1$  à  $+V_1$   $\left( V_1 = V_{sat} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$   $v = A + B e^{-t/\tau}$

à  $t = 0$   $v = -V_1 \implies -V_1 = A + B$

à  $t = \infty$   $v = +V_{sat} \implies V_{sat} = A \implies B = -(V_1 + V_{sat})$

à  $t = T_1$  demi-période, on peut écrire:

$v = V_1 = A + B e^{-T_1/\tau}$  soit  $V_1 - V_{sat} = -(V_1 + V_{sat}) e^{-T_1/\tau}$

donc:  $e^{-T_1/\tau} = \frac{V_{sat} - V_1}{V_1 + V_{sat}}$  et  $e^{T_1/\tau} = \frac{V_1 + V_{sat}}{V_{sat} - V_1} = \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$

d'où:  $T_1 = \tau \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}$

et comme  $T = 2T_1 \implies \boxed{T = 2\tau \ln \frac{2R_1 + R_2}{R_2}}$

$\tau = (R+P)C$  varie entre  $10 \cdot 10^{-6} \times 10^6 = 10s$  et  $10 \cdot 10^{-6} \times 10^3 = 10 ms$

donc  $3,6 \cdot 10^{-3} s \leq T \leq 3,6 s$  et  $0,3Hz \leq f \leq 270 Hz$

**Attention** : le potentiomètre à zéro n'a pas une résistance nulle

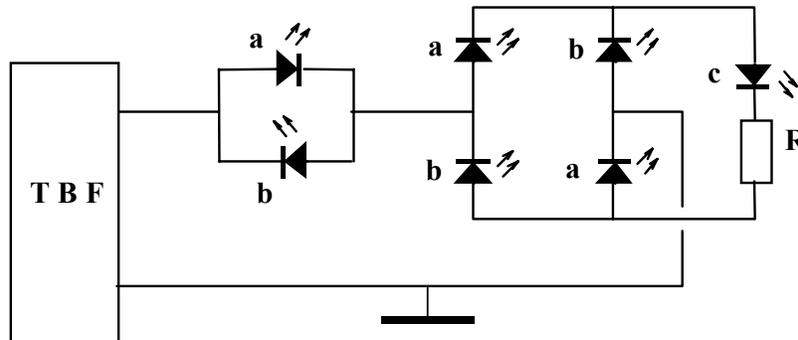
**Mesurer la période à l'oscilloscope ou au chronomètre, et comparer à la valeur théorique**

## TP N° 6 REGIME NON LINEAIRE / LES ASTABLES

### 2.3. Alimentation du pont de diodes

Ce générateur TBF peut alimenter directement un pont de diodes électroluminescentes à condition de limiter le courant de sortie par une résistance. En effet le courant traversant une LED ne doit pas dépasser une dizaine de mA.

On choisira  $R = 1k\Omega$ .

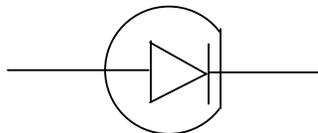


Les LED **a** et **b** sont allumées alternativement, la LED **c** est allumée en permanence. Utiliser comme Générateur Très Basse Fréquence (TBF) soit la sortie **u**, soit la sortie **v<sub>s</sub>**.

**Expliquer la séquence d'allumage des diodes. Pourquoi y a t il une différence entre les sorties **u** et **v<sub>s</sub>**.**

**Important:**

Dans cette séance la réalisation du fonctionnement du circuit sera notée de 0 à 4 points. Montrez à l'enseignant que votre circuit fonctionne.



**Diode électroluminescente**

## Code de couleurs des résistances



$R_v = AB 10^C \pm D$  exemple : brun rouge rouge =  $1210^2 = 1200 \Omega$

Couleur	chiffre	tolérance
Noir	0	
Brun	1	1%
Rouge	2	2%
Orange	3	
Jaune	4	
Vert	5	
Bleu	6	
Violet	7	
Gris	8	
Blanc	9	
Or	$10^{-1}$	5%
Argent	$10^{-2}$	10%
néant		20%

## Code des condensateurs

$10AK = 10 \times 10^A \text{ pF}$

exemple :  $103 K = 10 \times 10^3 \text{ pF} = 10 \text{ nF}$