
L'amplificateur opérationnel parfait

En ce sens la philosophie de la physique rejoint, jusqu'à ne plus pouvoir en être distinguée, la philosophie du bouddhisme, qui est celle de l'éclairement.

Gary Zukav in « La danse des éléments ».

Résumé

L'amplificateur opérationnel (AOP) est la matérialisation de la fonction amplification, essentielle en électronique. Les progrès observés dans les caractéristiques et les performances de ce composant permettent de n'envisager qu'une description des caractéristiques idéalisées.

Après une brève introduction, une présentation du symbole et des notations des grandeurs relatives à l'AOP, les caractéristiques essentielles de l'AOP parfait sont présentées pour déboucher sur le modèle équivalent. La mise en œuvre du composant nécessite le bouclage de la sortie l'une des entrées. Ceci conduit à deux principaux groupes de montages. Le premier, où la contre réaction est négative, met en œuvre le fonctionnement linéaire dans le suiveur de tension, l'amplificateur simple —inverseur ou non— ou de différence, le sommateur, l'intégrateur ou le dérivateur. L'autre groupe présente l'effet d'une contre réaction positive au sein du comparateur simple ou à hystérésis. La dernière partie aborde quelques applications qui échappent à une étude systématique.

Sommaire

I. Le composant « amplificateur opérationnel »	2
I.1. Introduction	2
I.2. Symboles — Notations	2
I.3. Caractéristiques de l'AOP parfait	2
I.3.1. Amplification différentielle	2
I.3.2. Impédance et courants d'entrée	2
I.3.3. Impédance de sortie	2
I.3.4. Schéma équivalent de l'AOP parfait	2
II. Mise en œuvre de l'AOP	3
II.1. Introduction	3
II.2. Notion de contre-réaction	3
II.2.1. Représentation fonctionnelle	3
II.2.2. Etude de la stabilité	3
II.3. Modes d'étude des montages à AOP	4
III. Les applications linéaires de l'AOP	4
III.1. Linéaire ou non linéaire ?	4
III.2. Suiveur de tension	4
III.2.1. Etude	4
III.2.2. Intérêt et application : prélèvement d'une tension sans influence	4
III.3. Amplificateurs de tension	5
III.3.1. Amplification avec inversion	5
III.3.2. Amplification sans inversion (cas de l'introduction)	5
III.4. Amplificateur de différence (appelé aussi soustracteur)	5
III.5. Structure sommatrice (ou sommateur)	5
III.6. Intégrateur et dérivateur	5
IV. Les applications non linéaires de l'AOP	6
IV.1. Mise en place	6
IV.2. Comparateur de tensions	6
IV.3. Comparateur à deux seuils, à hystérésis ou trigger de schmitt	7
IV.3.1. Structure sans inversion	7
IV.3.2. Structure avec inversion	7
V. Les montages particuliers	8
V.1. Diode sans seuil	8
V.2. Simulateur de résistance négative	9

I. Le composant « amplificateur opérationnel »

I.1. Introduction

Si on pousse la description d'un composant au plus loin que nous le permet la physique, on obtient un modèle très précis, certes, mais qui bien souvent ne permet pas une approche suffisamment simple permettant une mise en œuvre rapide et efficace de l'élément dans un contexte industriel.

L'amplificateur opérationnel (AOP) bénéficie aujourd'hui de performances telles que le composant réel est très proche de ses caractéristiques idéalisées. C'est la raison pour laquelle ce document présente l'amplificateur opérationnel parfait pour lequel les "défauts" du composant sont ignorés.

I.2. Symboles — Notations

- Alimentation double $\pm V_{cc}$ (de 3 à 50 V) souvent, mais pas nécessairement, symétrique
- 2 entrées : une marquée +, influence non inverseuse
l'autre marquée -, influence inverseuse
- Application des tensions v^+ (sur +) et v^- (sur -)
- Tension d'entrée différentielle : $v_{ed} = v^+ - v^-$
- la sortie délivrant la tension v_s
- Symbole de l'amplification : \triangleright
- Coefficient d'amplification : A_d

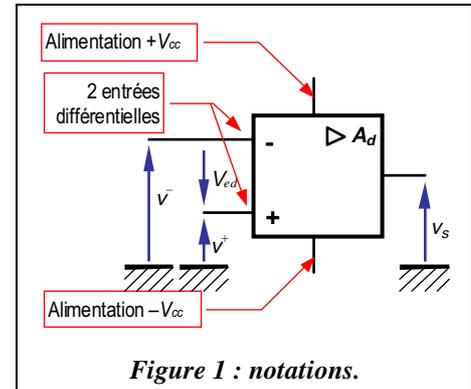


Figure 1 : notations.

I.3. Caractéristiques de l'AOP parfait

I.3.1. Amplification différentielle

Caractéristique $v_s = f(v_{ed})$, on relève 2 domaines :

- Domaine linéaire : $v_s = A_d v_{ed}$ où A_d est l'amplification différentielle, très grande ($>10^5$) donc tendant vers $+\infty$. Dans ce cas, L'AOP est dit « **idéal** ». L'indication ∞ remplace A_d .
- Zones de saturation : $v_s = \text{cte} = V_{sat+}$ ou V_{sat-} , les tensions de saturation, très proches de la tension d'alimentation si bien que : $v_s = \pm V_{cc}$.

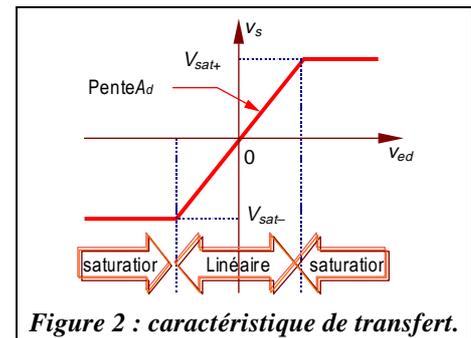


Figure 2 : caractéristique de transfert.

I.3.2. Impédance et courants d'entrée

Les impédances des deux entrées sont très élevées ($\rightarrow \infty$) : les courants d'entrée sont nuls.

$$i^+ = i^- = 0$$

I.3.3. Impédance de sortie

L'impédance de sortie de l'AOP est nulle : la tension v_s est indépendante du courant extrait i_s .

I.3.4. Schéma équivalent de l'AOP parfait

On rassemble toutes ces hypothèses d'étude en construisant le schéma équivalent de l'AOP parfait (Figure 3).

Ce modèle montre que l'on réalise une source de tension v_s commandée en tension v_{ed} .

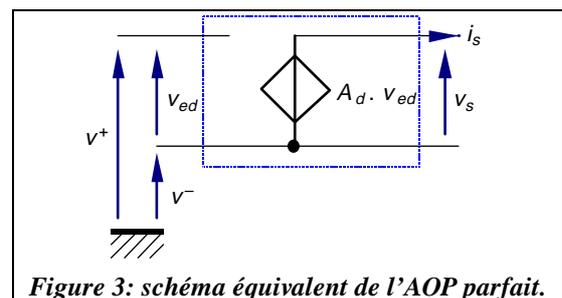


Figure 3: schéma équivalent de l'AOP parfait.

II. Mise en œuvre de l'AOP

II.1. Introduction

Constatation : il est difficile de contrôler la tension de sortie car l'amplification A_d est très importante et une très faible valeur de la tension d'entrée suffit à saturer l'AOP.

Remède : prélever une fraction de la tension de sortie et l'ôter de la tension d'entrée dans le but d'obtenir une différence proche de 0. De cette manière, on travaille dans le domaine linéaire.

Structure d'étude (Figure 4)

$$\left. \begin{aligned} v^+ &= v_e \\ v^- &= \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s = kv_s \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{ed} = v_e - kv_s$$

or $v_s = A_d \cdot v_{ed}$, si bien que $v_s = \frac{A_d}{1 + kA_d} v_e$

si $A_d \rightarrow \infty$, alors $v_s \rightarrow kv_e$,

Le fonctionnement est linéaire.

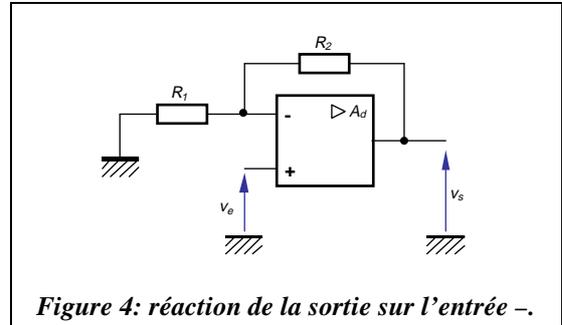


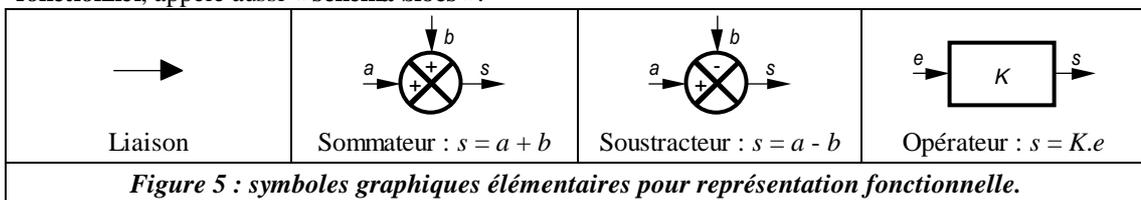
Figure 4: réaction de la sortie sur l'entrée -.

II.2. Notion de contre-réaction

Le bouclage de la sortie sur une entrée est un principe appelé **contre-réaction**.

II.2.1. Représentation fonctionnelle

Ici, c'est un bouclage sur l'entrée négative : la **contre-réaction** est **négative**. Les relations établies précédemment peuvent recevoir une **représentation fonctionnelle** à l'aide d'éléments graphiques : l'addition, la soustraction et la multiplication par une constante (Figure 5). On obtient alors le **schéma fonctionnel**, appelé aussi « **schéma blocs** ».



A partir des éléments précédents, on traduit les relations établies dans le paragraphe §II.1 en schéma fonctionnel comme l'indique la Figure 6.

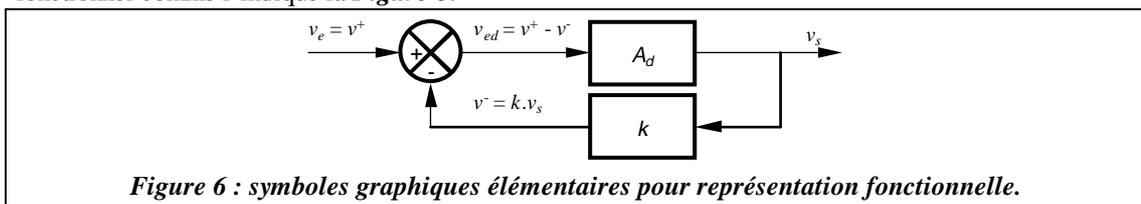


Figure 6 : symboles graphiques élémentaires pour représentation fonctionnelle.

II.2.2. Etude de la stabilité

Dans une étude, il est intéressant de contrôler la stabilité (statique) de la sortie v_s :

- l'entrée v_e est maintenue constante, si $v_s \nearrow \Rightarrow v^- \nearrow \Rightarrow v_{ed} \searrow \Rightarrow v_s \searrow$, il y a compensation ;
- l'entrée v_e est maintenue constante, si $v_s \searrow \Rightarrow v^- \searrow \Rightarrow v_{ed} \nearrow \Rightarrow v_s \nearrow$, il y a compensation ;

Cette analyse peut être étudiée et illustrée graphiquement comme le présente la Figure 7. Une légère variation du point de fonctionnement (intersection entre la caractéristique interne de l'AOP et la caractéristique externe, le diviseur de tension), conduit à revenir vers ce point. L'état attaché à ce point de fonctionnement est stable.

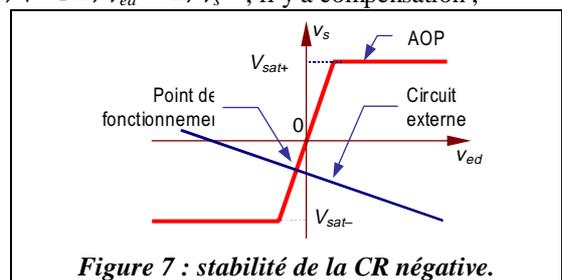


Figure 7 : stabilité de la CR négative.

II.3. Modes d'étude des montages à AOP

Dans un premier temps, si l'AOP est considéré parfait, alors $i^+ = i^- = 0$. Cette hypothèse peut être notée sur le schéma pour fixer les conditions d'étude.

Par observation du schéma, on en déduit la connexion de la sortie :

- l'entrée - est connectée à la sortie : le montage est étudié en linéaire, on a alors $v_{ed} = 0$. Cette condition d'étude est notée aussi sur le schéma.
- l'entrée + est connectée à la sortie (ou s'il n'y a pas de lien) : le montage est étudié en non-linéaire. On a alors saturation de la tension de sortie et $v_s = V_{sat}^+$ ou V_{sat}^- . Dans ces conditions v_{ed} n'est pas identiquement nulle, seul son signe est important.

III. Les applications linéaires de l'AOP

III.1. Linéaire ou non linéaire ?

Les applications de l'AOP sont divisées en deux grandes catégories suivant la nature de la contre réaction. Si elle s'opère sur l'entrée négative, la **contre-réaction** est dite **négative** ce qui permet un **fonctionnement linéaire**. Dans l'autre cas, la **contre-réaction positive** a tendance à accentuer l'instabilité de la sortie qui part vers l'une des tensions de saturation : le **fonctionnement** est alors en tout ou rien ou **non linéaire**. Un dernier ensemble de montages regroupe les structures mixtes ou spéciales : double contre réaction ou insertion de composants particuliers. Dans ce cas, on ne peut pas, a priori, établir un type de fonctionnement.

Cette première partie traite des montages linéaires. La suivante aborde les non linéaires pour terminer par les applications spécifiques essentielles. Ils sont traités en grandeurs sinusoïdales avec des impédances mais restent valables en grandeurs quelconques avec des résistances.

III.2. Suiveur de tension

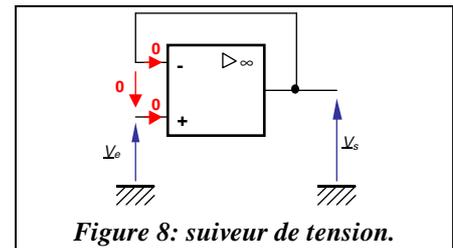
III.2.1. Etude

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

Maille entrée-sortie : $\underline{V}_s = \underline{V}_e + \underline{V}_{ed}$

$$\text{Donc } \underline{V}_s = \underline{V}_e$$



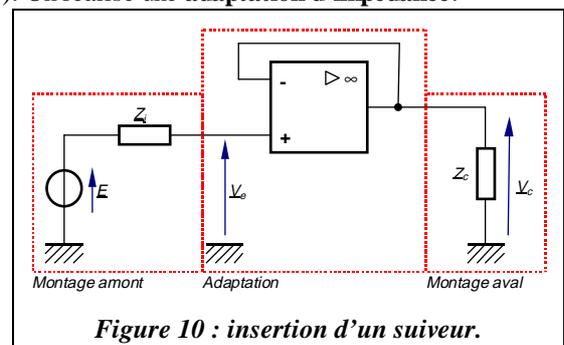
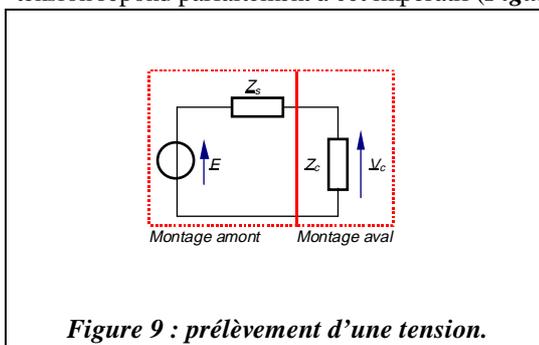
Remarque : il est possible d'utiliser la structure du §II.1 avec $R_1 \rightarrow \infty$ et $R_2 = 0$.

III.2.2. Intérêt et application : prélèvement d'une tension sans influence

Lorsque l'on charge un montage par un autre (**Figure 9**), l'interaction des impédances d'entrée des montages amont et aval, altère la tension E prélevée :

$$\underline{V}_c = \frac{\underline{Z}_c}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_s} \underline{E}$$

Pour éviter cet inconvénient, il faut transmettre la tension avec un courant extrait nul. Le suiveur de tension répond parfaitement à cet impératif (**Figure 10**). On réalise une **adaptation d'impédance**.



III.3. Amplificateurs de tension

III.3.1. Amplification avec inversion

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

$$\text{Tension borne - : } \underline{V}^- = 0 = \frac{V_e}{Z_1} + \frac{V_s}{Z_2}$$

$$\text{Donc } \boxed{\frac{V_s}{V_e} = -\frac{Z_2}{Z_1}}$$

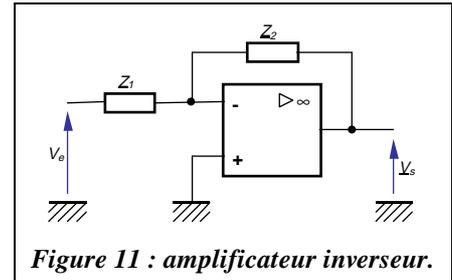


Figure 11 : amplificateur inverseur.

III.3.2. Amplification sans inversion (cas de l'introduction)

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

$$\text{Tension borne - : } \underline{V}_e(Z_1 + Z_2) = 0Z_2 + Z_1V_s$$

$$\text{Donc } \boxed{\frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}}$$

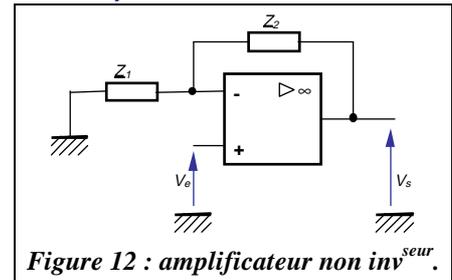


Figure 12 : amplificateur non inverseur.

III.4. Amplificateur de différence (appelé aussi soustracteur)

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}^-(Z_1 + Z_2) &= Z_2V_1 + Z_1V_s \\ \underline{V}^+(Z_3 + Z_4) &= Z_4V_2 \end{aligned} \right\} \text{or } \underline{V}^+ = \underline{V}^-$$

$$\text{Donc } \boxed{V_s = \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_3 + Z_4} \right) \frac{Z_4}{Z_1} V_2 + \frac{Z_2}{Z_1} V_1}$$

$$\text{Si } Z_1 = Z_3 \text{ et } Z_2 = Z_4 \text{ alors } \boxed{V_s = \frac{Z_2}{Z_1} (V_2 - V_1)}$$

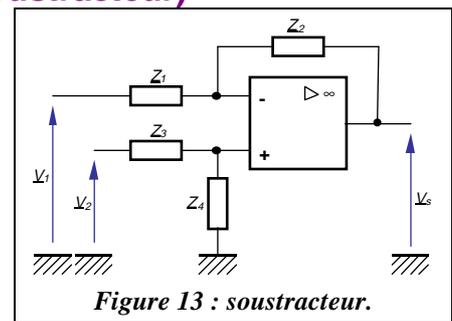


Figure 13 : soustracteur.

III.5. Structure sommatrice (ou sommateur)

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

$$\text{Millman avec } \underline{V}^- = \underline{V}^+ : \frac{V_1}{Z_1} + \frac{V_2}{Z_2} + \frac{V_s}{Z_c} = 0$$

$$\text{Donc } \boxed{V_s = -\frac{Z_c}{Z_1} V_1 - \frac{Z_c}{Z_2} V_2}$$

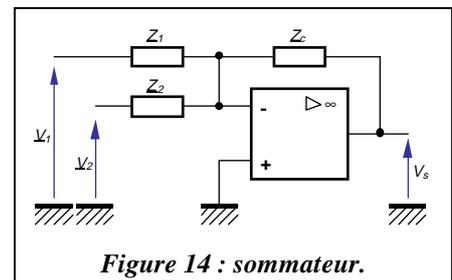


Figure 14 : sommateur.

III.6. Intégrateur et dérivateur

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

$$\text{Courant } i \text{ dans } C : i = C \frac{dv_c}{dt} = \frac{v_e}{R} \text{ et } v_c = -v_s$$

$$\text{Donc } \boxed{v_s(t) = -\frac{1}{RC} \int v_e(t) dt}$$

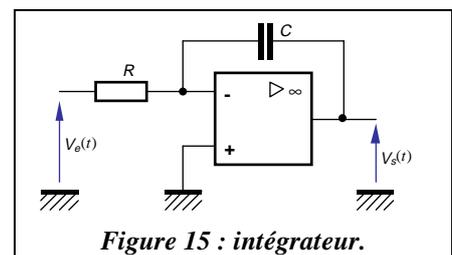


Figure 15 : intégrateur.

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction négative \Rightarrow étude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

Courant i dans C : $i = C \frac{dv_e}{dt} = -\frac{v_s}{R}$

Donc $v_s(t) = -RC \frac{dv_e(t)}{dt}$

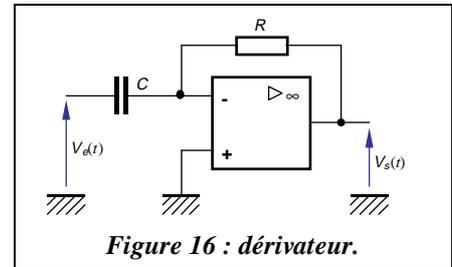


Figure 16 : dérivateur.

IV. Les applications non linéaires de l'AOP

IV.1. Mise en place

Si la contre réaction est absente

Dès que $v_{ed} \neq 0$, la saturation de la sortie apparaît :
$$\begin{cases} v_s = V_{sat+} = V_{cc} & \text{si } v_{ed} > 0 \\ v_s = V_{sat-} = -V_{cc} & \text{si } v_{ed} < 0 \end{cases}$$

Conclusion : $v_s = V_{cc}$ ou $-V_{cc}$ quelque soit la tension v_{ed} . Le fonctionnement n'est pas linéaire.

Si la contre-réaction est positive

On étudie la stabilité à v_e fixée sur la **Figure 17** :

$v_s \nearrow \Rightarrow v^+ \nearrow \Rightarrow v_{ed} \nearrow \Rightarrow v_s \nearrow$

$v_s \searrow \Rightarrow v^+ \searrow \Rightarrow v_{ed} \searrow \Rightarrow v_s \searrow$

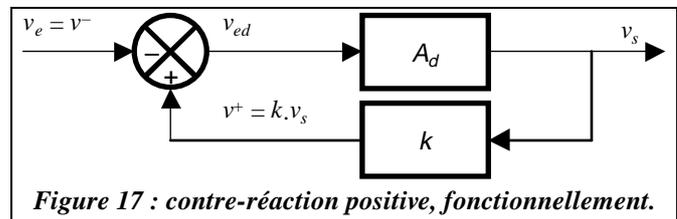


Figure 17 : contre-réaction positive, fonctionnellement.

Les évolutions possibles de v_s concourent à la saturation.

Conclusion : $v_s = V_{cc}$ ou $-V_{cc}$ quelque soit la tension v_{ed} . Le fonctionnement n'est pas linéaire.

D'une manière similaire à celle employée pour la contre réaction négative, l'illustration graphique de la **Figure 18** montre qu'une légère variation du point de fonctionnement, conduit vers la saturation. L'état attaché à ce point de fonctionnement est instable (la seule stabilité est la saturation résultante).

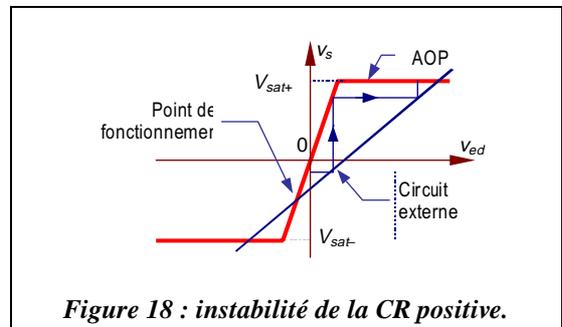


Figure 18 : instabilité de la CR positive.

IV.2. Comparateur de tensions

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Contre réaction positive $\Rightarrow v_s = \pm V_{cc}$.

- $v_{ed} = v_e - V_0 < 0$, ie $v_e < V_0$ donc $v_s = -V_{cc}$
- $v_{ed} = v_e - V_0 > 0$, ie $v_e > V_0$ donc $v_s = V_{cc}$

Suivant la position de la tension d'entrée par rapport à V_0 , la sortie indique le signe de la différence : c'est une **fonction de comparaison**.

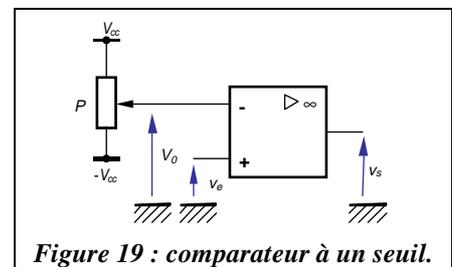


Figure 19 : comparateur à un seuil.

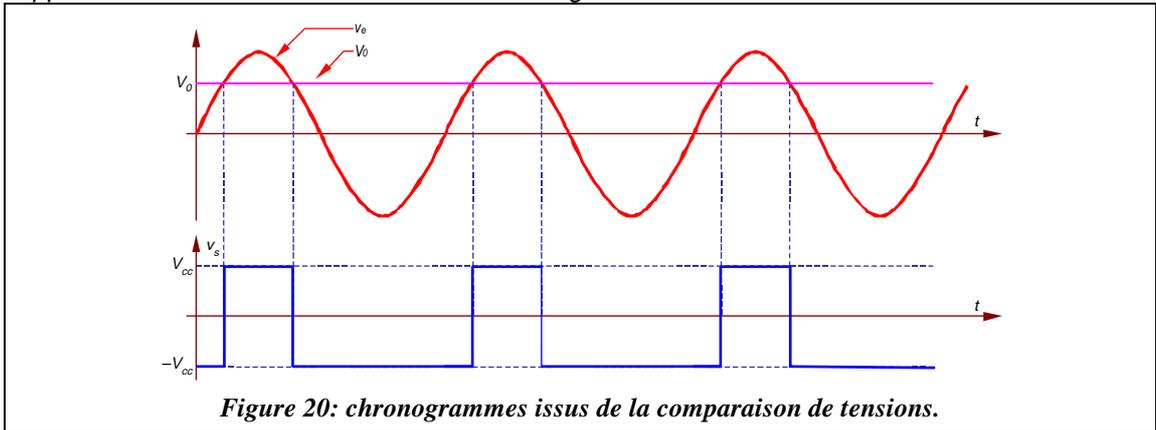


Figure 20: chronogrammes issus de la comparaison de tensions.

IV.3. Comparateur à deux seuils, à hystérésis ou trigger de schmitt

IV.3.1. Structure sans inversion

$$v_{ed} = v^+ = \frac{R_1 v_s + R_2 v_e}{R_1 + R_2}$$

Basculement dès que $v_{ed} = 0$, ie $v_e = -\frac{R_1}{R_2} v_s$

Les deux valeurs de v_s conduisent à deux seuils :

$$V_{T-} = -\frac{R_1}{R_2} V_{cc} \text{ et } V_{T+} = \frac{R_1}{R_2} V_{cc} \text{ (T pour } \textit{threshold}, \text{ seuil) symétriques.}$$

Remarque : v_e « attaque » la borne + qui marque la non inversion.

$$v_s = -V_{cc} \text{ si } v_{ed} < 0, \text{ c'est dire } v_e < -\frac{R_1}{R_2} v_{cc} = V_{T+}$$

$$v_s = V_{cc} \text{ si } v_{ed} > 0, \text{ c'est dire } v_e > -\frac{R_1}{R_2} v_{cc} = V_{T-}$$

Ces éléments aident au tracé de la caractéristique de transfert de la **Figure 22**.

On remarque qu'en parcourant la courbe (fléchage), le premier seuil rencontré est ignoré pour basculer au second.

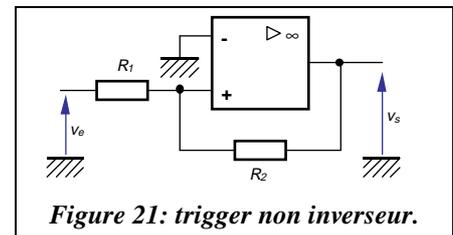


Figure 21: trigger non inverseur.

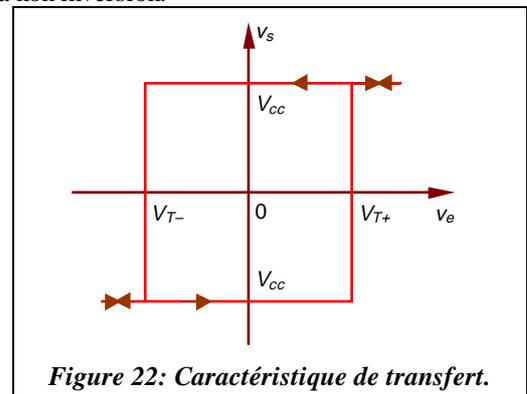


Figure 22: Caractéristique de transfert.

IV.3.2. Structure avec inversion

$$v_{ed} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s - v_e$$

Basculement dès que $v_{ed} = 0$, ie $v_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s$

Les deux valeurs de v_s conduisent à deux seuils :

$$V_{T-} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{cc} \text{ et } V_{T+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{cc} \text{ symétriques.}$$

Remarque : v_e « attaque » la borne - qui marque l'inversion.

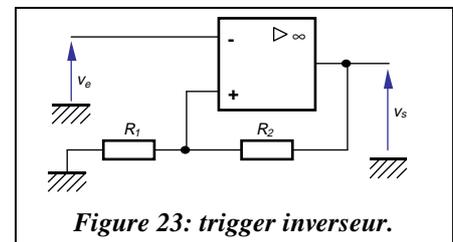


Figure 23: trigger inverseur.

$$v_s = -V_{cc} \text{ si } v_{ed} < 0, \text{ ie } v_e > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{cc} = V_{T-}$$

$$v_s = V_{cc} \text{ si } v_{ed} > 0, \text{ ie } v_e < \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_{cc} = V_{T+}$$

Ces éléments aident au tracé de la caractéristique de transfert de la **Figure 24**.

On peut suivre la même règle que pour la structure non inverseuse concernant le parcours de la caractéristique.

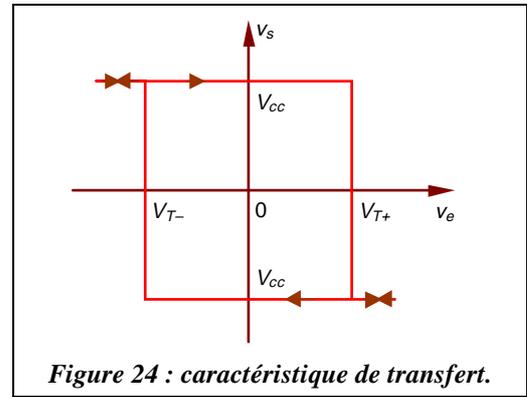


Figure 24 : caractéristique de transfert.

V. Les montages particuliers

Dans ces montages, on ne peut pas, a priori, déterminer si le fonctionnement est linéaire ou non.

V.1. Diode sans seuil

Si la charge R est absente, aucun courant ne parcourt D qui n'est donc pas polarisée : il faut tenir compte de la charge R lors de l'étude.

L'état de D dépend de v_D , donc du signe de v_e .

$D = 0 \Rightarrow$ pas de CR : $v'_s = -V_{cc}$, $v_e < 0$ et $v_s = 0$
($v'_s < 0$ confirme l'hypothèse D bloquée).

$D = 1 \Rightarrow$ suiveur : $v'_s = v_s = v_e > 0$.

On retrouve le fonctionnement d'une diode parfaite.

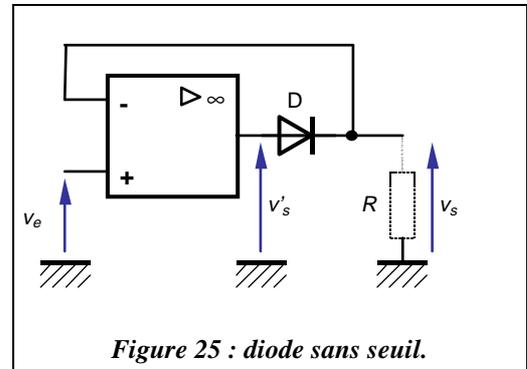


Figure 25 : diode sans seuil.

Comparaison avec la diode « classique » avec seuil

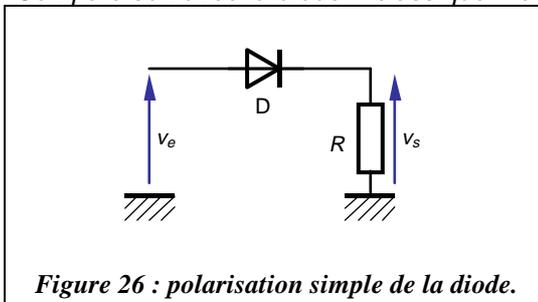


Figure 26 : polarisation simple de la diode.

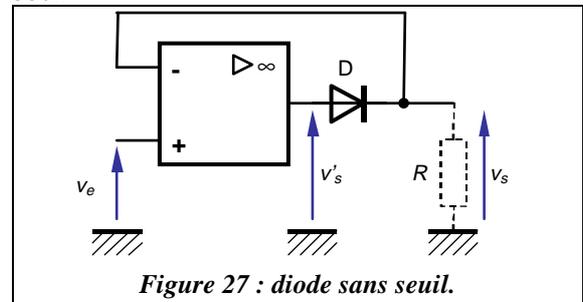


Figure 27 : diode sans seuil.

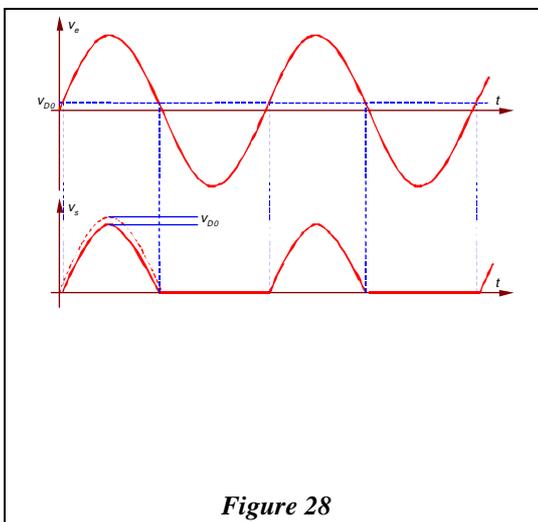


Figure 28

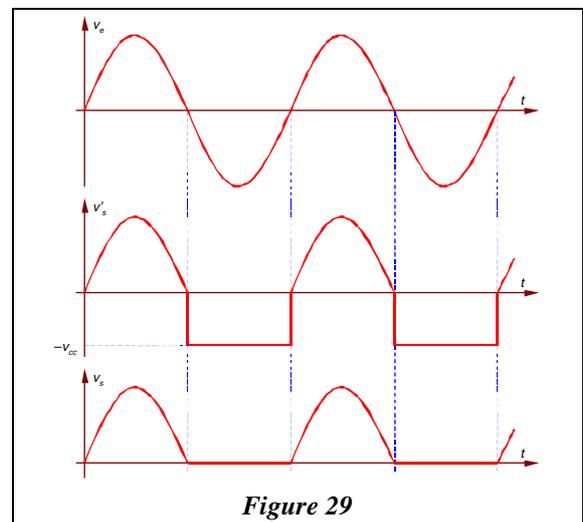


Figure 29

V.2. Simulateur de résistance négative

On rencontre souvent la dénomination anglo-saxonne : NIC pour *negative impedance converter*.

2 contre-réactions : une positive, une négative.

On ne peut conclure sur le mode d'étude.

Etude de la stabilité lorsque v_e est invariante :

- Si $v_s \nearrow$, seule $v^- \nearrow \Rightarrow v_s \searrow$
- Si $v_s \searrow$, seule $v^- \searrow \Rightarrow v_s \nearrow$

La variation de v_s a tendance à être stabilisée dans un fonctionnement linéaire.

Conclusion : étude effectuée en linéaire ($v_{ed} = 0$).

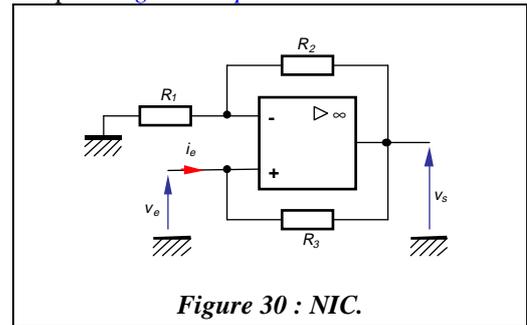


Figure 30 : NIC.

Expression de la relation tension-courant

AOP supposé idéal (en particulier $i^+ = i^- = 0$).

Etude en linéaire : $v_{ed} = 0$.

$$\text{Tension entrée - : } v^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s \text{ donc } \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s = v_e \text{ or } v_s = -R_3 i_e$$

$$\text{En éliminant } v_s, \text{ on obtient : } v_e = -\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} i_e$$

Le coefficient de proportionnalité entre la tension v_e et le courant i_e est homogène à une **résistance négative** de valeur $R_e = -\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2}$.

Application

Compensation de la résistance d'un circuit *RLC* pour réaliser un oscillateur sinusoïdal à oscillations entretenues.