

V.1 Principe d'un amplificateur opérationnel

V.1.1 Structure d'un amplificateur opérationnel

Un amplificateur opérationnel (AO) typique est constitué de trois types d'étage d'amplificateurs montés en cascade : amplificateur différentiel, amplificateur de tension à transistor bipolaire (émetteur commun) et amplificateur de puissance (classe AB) à deux transistors bipolaires montés en push-pull.

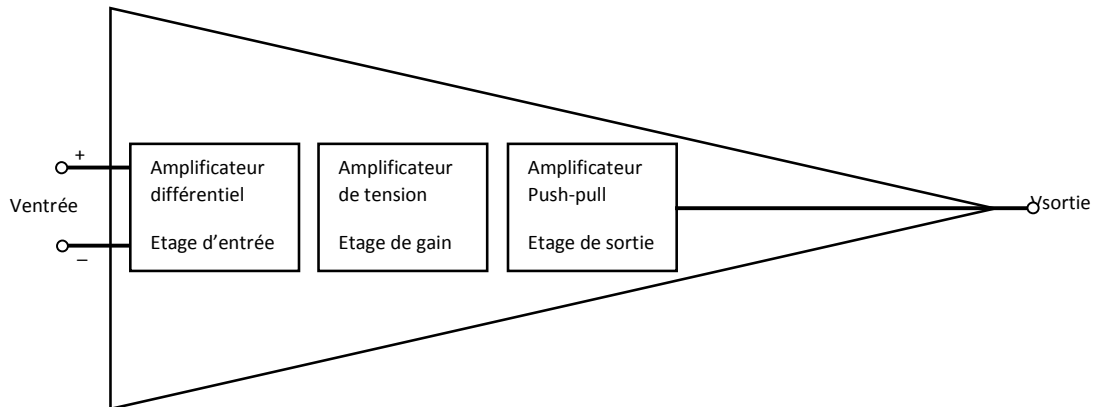


Figure V.1 : Schéma synoptique d'un amplificateur opérationnel (Ampli-Op)

L'amplificateur différentiel représente l'étage d'entrée de l'Ampli-Op. Il est constitué de deux entrées et amplifie la différence de potentiel entre les deux entrées. L'étage amplificateur généralement de classe A fournit un gain additionnel à l'Ampli-Op. Il amplifie aussi bien les signaux continus (DC) que alternatifs (AC). Quelque Ampli-Ops doivent avoir plus qu'un étage d'amplificateur. L'amplificateur push-pull classe AB constitue l'étage de sortie.

V.1.2 Représentation symbolique

La représentation symbolique de l'amplificateur opérationnel standard est illustrée dans la figure V.2 (a). Il est constitué de deux bornes d'entrées, repérées par un signe (+) pour  $V^+$  et un signe (-) pour  $V^-$  dite entrées non inverseuse et inverseuse respectivement, et une borne de sortie  $V_s$ . l'Ampli-Op fonctionne avec deux sources d'alimentation continues positive  $+V_{cc}$  et négative  $-V_{cc}$ , comme l'indique la figure V.2(b).

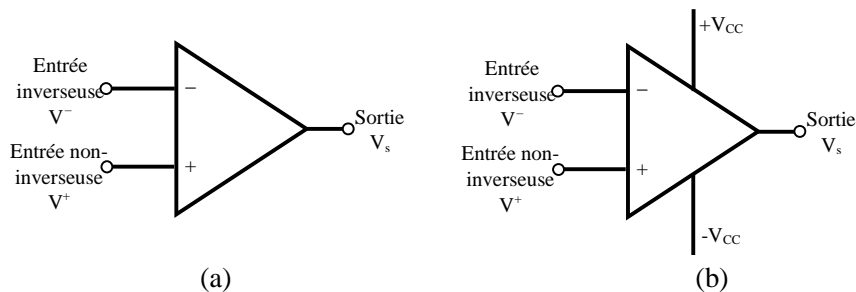


Figure V.2 : Représentation d'un Ampli-Op (a) Symbol (b) Symbol avec deux sources d'alimentation continues

**V.1.3 Caractéristique entrée-sortie**

L'Ampli-Op en régime linéaire est caractérisé par l'équation fondamentale suivante :

$$V_s = A_0 (V^+ - V^-) \quad \forall V^+ - V^- < V_{sat} / A_0$$

$A_0$  est appelé amplification différentielle ou gain en boucle ouverte. En pratique la valeur de ce coefficient multiplicatif est de l'ordre de  $10^5$ .  $V_{sat}$  est la tension de saturation déterminée par  $V_{cc}$ .

Si l'une des entrées est utilisée comme une référence de potentiel, on dit que la sortie est en phase (si  $V^-$  = référence) ou en opposition de phase (si  $V^+$  = référence). Le signe « - » qui peut affecter le gain indique une opposition de phase entre la sortie et l'entrée.

L'Ampli-Op en régime saturé est caractérisé par l'équation fondamentale suivante :

$$V_s = +V_{sat} \cong +V_{cc} - I \quad \forall V^+ - V^- > V_{sat} / A_0 \text{ et } V_s = -V_{sat} \cong -V_{cc} + I \quad \forall V^+ - V^- < -V_{sat} / A_0$$

Généralement, l'Ampli-Op est caractérisé par la représentation graphique illustré dans la figure V.3 :

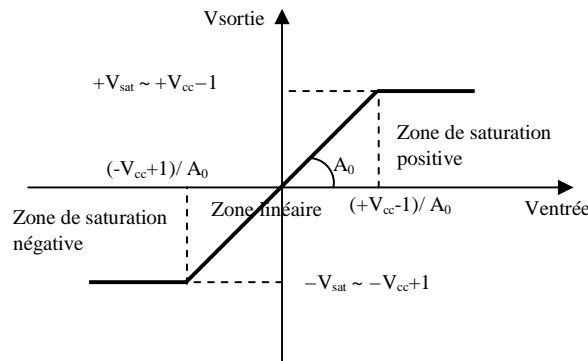


Figure V.3 : Caractéristique entrée-sortie de l'Ampli-Op

**V.2 Schéma équivalent**

L'Ampli-Op peut être considéré comme un quadripôle actif avec deux entrées  $V_e$ ,  $I_e$  et deux sorties  $V_s$ ,  $I_s$ . Ce dernier possède des paramètres caractéristiques qui peuvent définir l'Ampli-Op de façon exacte comme : le gain, l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie.

Le schéma équivalent d'un Ampli-Op peut être schématisé par le circuit de la figure V.4.

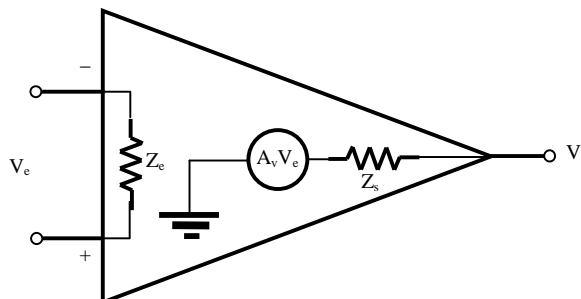


Figure V.4: Schéma équivalent d'un Ampli-Op

Dans le cas d'un Ampli-Op réel, il existe une certaine dissymétrie au niveau de l'étage différentiel défini par le courant et la tension de décalage à l'entrée (offset). Ces deux grandeurs quantifient cette dissymétrie et seront corrigées par la suite.

Dans la pratique, la plupart des Ampli-Ops ont une résistance d'entrée  $Z_e$  très élevée, un gain en boucle ouverte  $A_0$  très élevé et une résistance de sortie  $Z_s$  très faible c'est le cas d'un ampli-op idéal.

**V.3 Ampli-Op idéal**

- L'Ampli-Op idéal se décrit par les équations essentielles suivantes : Une impédance d'entrées  $Z_e$  infinie, ce qui implique que les courants :  $I^+ = I^- = 0$ .
- Une impédance de sortie nulle  $Z_s=0$ , ce qui implique que la tension de sortie  $V_s$  ne soit pas affectée quelque soit la valeur de la charge placée en sortie.
- Un gain en boucle ouverte  $A_0$  infini, ce qui implique que : si la tension de sortie  $V_s$  étant dans la zone linéaire de fonctionnement ( $-V_{cc} < V_s < +V_{cc}$ ), on affirme que les entrées inverseuse et non-inverseuse sont au même potentiel :  $V^+ = V^-$ .

Dans ces conditions, le schéma équivalent de l'Ampli-Op de la figure V.4, peut être réduit au circuit de la figure V.5.

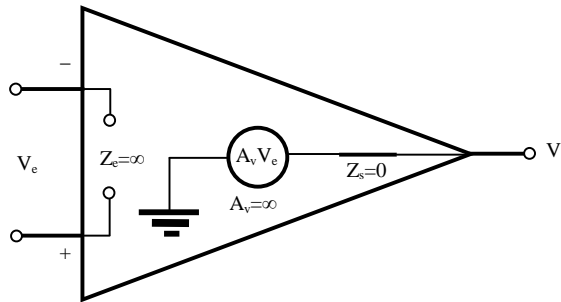


Figure V.5: Schéma équivalent d'un Ampli-Op idéal

Le schéma équivalent de l'Ampli-Op idéal illustré dans la figure V.5 montre qu'il est toujours saturé puisque le gain en boucle ouverte est infini  $A_0$  (sauf pour le cas  $V^+ = V^- = 0$  mais alors il n'y a rien à amplifier). Alors, l'ampli-op idéal peut être caractérisé par la représentation graphique illustré dans la figure V.6 :

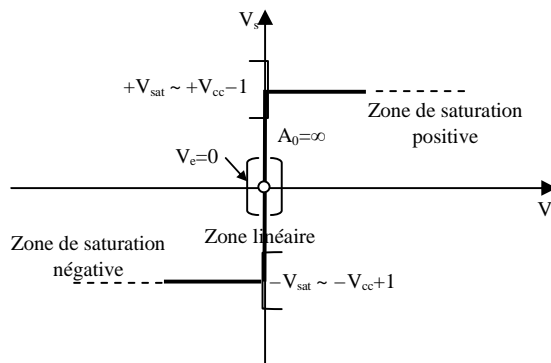


Figure V.6: Caractéristique entrée-sortie de l'Ampli-Op idéal

D'après cette caractéristique, on dit que l'Ampli-Op idéal en boucle ouverte ne peut pas être utilisé comme amplificateur. De ce fait, on fait donc appeler à la contre-réaction afin de diminuer le gain de l'ampli-op idéal.

**V.4 Contre-réaction**

Comme on a dit auparavant, le gain de l'Ampli-Op typique en boucle ouverte est très élevé. Donc, une petite différence de potentiel à l'entrée conduit l'Ampli-Op à son état de sortie saturé. En effet, l'utilité d'un Ampli-Op exploité dans cette application est extrêmement limitée et est généralement limitée aux applications de comparaison. Avec une réaction négative, le gain de tension de boucle fermée global  $A_v$  peut être réduit et contrôlé de sorte que l'ampli-op puisse fonctionner comme un amplificateur linéaire. En plus de fournir un gain de tension stable contrôlé, la contre-réaction négative permet également de contrôler les impédances d'entrée et de sortie et la largeur de bande de l'amplificateur.

Le tableau 3 résume les effets généraux du retour négatif sur les performances de l'amplificateur opérationnel.

	Gain en tension	Impédance d'entrée	Impédance de sortie	Bande passante
Sans contre-réaction négative	$A_0$ est très <b>élevé</b> pour les applications linéaires	Relativement <b>élevée</b>	Relativement <b>faible</b>	Relativement <b>étroite</b> puisque le gain est élevé
Avec contre-réaction négative	$A_v$ est <b>ajusté</b> à une valeur désirée par la contre réaction	Peut être <b>augmentée ou réduite</b> , ça dépend au type du circuit	Peut être <b>réduite</b> à une valeur désirée	Significativement <b>large</b>

**V.5 Caractéristiques de l'ampli-op**

**V.5.1 Caractéristiques statiques**

**a. Source d'alimentation**

Dans la figure V.7, l'Ampli-Op fonctionne avec deux tensions de polarisation  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$ , leurs valeurs maximum à ne pas dépassées  $+V_{CCmax}$  et  $-V_{CCmax}$  sont indiquées par le constructeur. On peut cependant dans les cas particuliers utiliser une seule source d'alimentation.

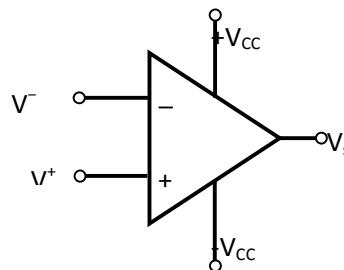


Figure V.7 : Polarisation d'un ampli-op

Dans le cas d'une alimentation symétrique, par exemple (+15V et -15V), aucune borne de l'Ampli-Op n'est connectée à la masse, même si on alimente l'Ampli -Op avec une alimentation dissymétrique par exemple (0V et 30V). Dans ce cas les entrées « + » et « - » doivent permettre la polarisation normale des transistors de l'étage d'entrée.

Tous les Ampli-Ops doivent être polarisés pour pouvoir fonctionner normalement où l'excursion maximum de la tension de sortie est limitée à des valeurs, dites de saturation  $\pm V_{sat}$ , légèrement inférieure à  $\pm V_{CC}$ . La puissance consommée par l'Ampli-Op  $P = 2 \cdot V_{CC} \times I_{CC}$  où  $I_{CC}$  est le courant délivré par chaque source d'alimentation.

Certains Ampli-Ops sont protégés contre les courts-circuits où le constructeur indique la valeur maximale du courant de sortie.

**b. Tension de décalage à l'entrée « tension d'off-set »**

L'Ampli-Op idéal fournit une tension de sortie nulle lorsqu'on relie les deux entrées à la masse. Cependant, ce qui n'est pas le cas d'un Ampli-Op réel. Cela veut dire qu'il en résulte une faible tension  $V_s$  à la sortie lorsqu'une différence de potentiel n'est appliquée à l'entrée. C'est à cause d'un déséquilibre à l'étage différentiel de l'Ampli-Op, particulièrement, les tensions base-émetteur des transistors bipolaires  $Tr1$  et  $Tr2$  comme l'indique la figure V.8.

La tension de sortie de l'étage d'entrée différentiel peut être exprimée par :  $V_s = I_{C2}R_C - I_{C1}R_C$

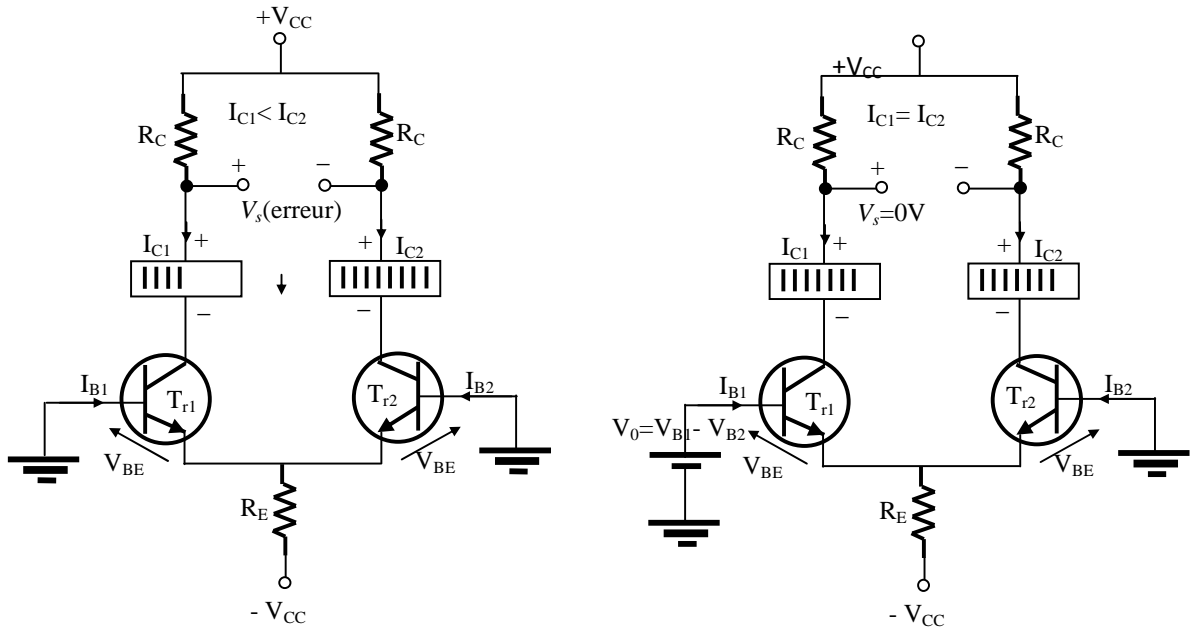


Figure V.8 : Illustration de la tension de décalage à l'entrée ou tension d'offset  $V_0$

Une faible différence entre les tensions base-émetteur des transistors  $Tr_1$  et  $Tr_2$  cause une faible différence entre les courants des collecteurs  $I_{C1}$  et  $I_{C2}$ . Ce qui résulte une faible tension à la sortie. Cette tension est appelée tension de décalage à l'entrée ou tension d'off-set  $V_0$ . Alors, pour compenser cette tension de décalage entre les entrées, il suffit de fournir entre les deux entrées de l'Ampli-Op une tension

de signe opposé et de valeur égale à cette tension de décalage  $V_0$  pour forcer la tension de sortie d'être nulle.

Pour éliminer cette tension de décalage, on réunit les deux entrées  $V^+$  et  $V^-$  puis on insère un potentiomètre comme un circuit externe approprié. Ce potentiomètre va être ajusté de telle sorte qu'on obtient la tension de sortie  $V_s$  nulle.

**Remarque :**

*La dérive de la tension de décalage à l'entrée est un paramètre relié à  $V_0$ . Il spécifie le changement dans la tension off-set en fonction de la température. Les valeurs typique de ce paramètre varient entre  $5\mu V/^\circ C$  et  $50\mu V/^\circ C$ . Dans la pratique, une valeur supérieur de la tension off-set présente généralement une grande dérive.*

**c. Courant de décalage à l'entrée « courant d'off-set»**

Les courants d'entrée de polarisation  $I^+$  et  $I^-$  d'un Ampli-Op idéal sont égaux. Ce qui n'est pas le cas d'un Ampli-Op réel ( $I^+ \neq I^-$ ). Le courant de décalage à l'entrée  $I_0$  est le courant exigé à l'entrée, fourni par une alimentation externe, pour que la tension de sortie soit nulle. Il est défini par l'expression :  $I_0 = |I^+ - I^-|$ .

L'ordre des grandeurs réelles des courants de décalage sont généralement au moins dix fois inférieures au courant de polarisation. Alors, il peut être négligé dans de nombreuses applications.

Cependant, les Ampli-Ops avec un gain élevé et une impédance d'entrée élevée devraient avoir aussi peu de courant de décalage  $I_0$  à cause de la différence des courants parcourant les résistances d'entrées  $R_e$  qui conduit à délivrer une tension de décalage consistante  $V_0$  comme l'indique la figure V.9.

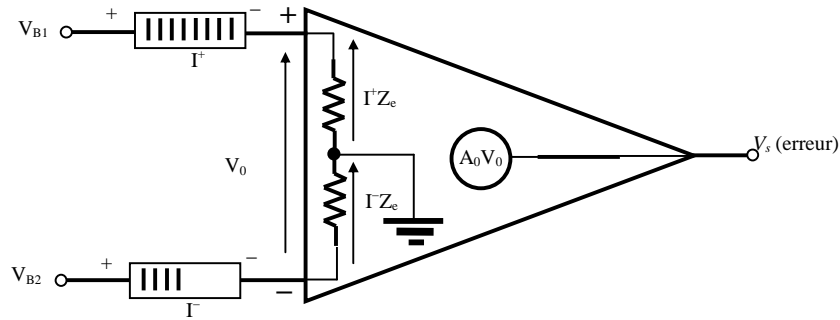


Figure V.9 : Effet du courant de décalage

La tension de décalage à l'entrée délivrée par le courant de décalage à l'entrée est défini par :

$$V_0 = (I^+) R_e - (I^-) R_e = (I^+ - I^-) R_e = I_0 R_e.$$

L'erreur créée par le courant offset est amplifiée par le gain  $A_0$  de l'Ampli-Op et résulté à la sortie comme :  $V_s = A_0 I_0 R_e = A_0 V_0$

**d. Courant de polarisation d'entrée**

Les bornes d'entrées inverseuse et non inverseuse du premier étage de l'Ampli-Op (étage différentiel) sont également les bases des deux transistors bipolaires  $Tr_1$  et  $Tr_2$  qui constituent l'étage

différentiel, par conséquent, les courants d'entrée  $I^+$  et  $I^-$  sont également les courants des bases. Le courant de polarisation d'entrée est le courant continu exigé par les entrées de l'ampli-op pour le bon fonctionnement de l'étage différentiel. Par définition, le courant de polarisation d'entrée est la moyenne des deux courants d'entrée, il est défini par l'expression :  $I_{pol} = \frac{(I^+) + (I^-)}{2}$

Le concept du courant de polarisation d'entrée est illustré dans la figure V.10.

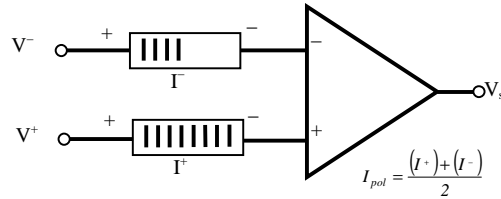


Figure V.10 : Concept du courant de polarisation d'entrée

**V.5.2 Caractéristiques dynamiques**

**a. Impédance d'entrée**

Il existe deux modes de base qui peut être utilisés pour spécifier l'impédance d'entrée : le mode différentiel et le mode commun (on reviendra à l'étude de ce mode par la suite). L'impédance différentielle d'entrée  $Z_e$  est la résistance totale vue entre les entrées inverseuse et non inverseuse comme l'indique la figure V.11(a). Elle est mesurée par la détermination de la variation du courant de polarisation pour un changement donné de la tension d'entrée différentielle.

L'impédance d'entrée en mode commun est la résistance montée entre chaque entrée (inverseuse ou non inverseuse) et la masse comme l'indique la figure V.11(b). Elle est déterminée par la variation du courant de polarisation pour un changement donné de la tension d'entrée en mode commun.

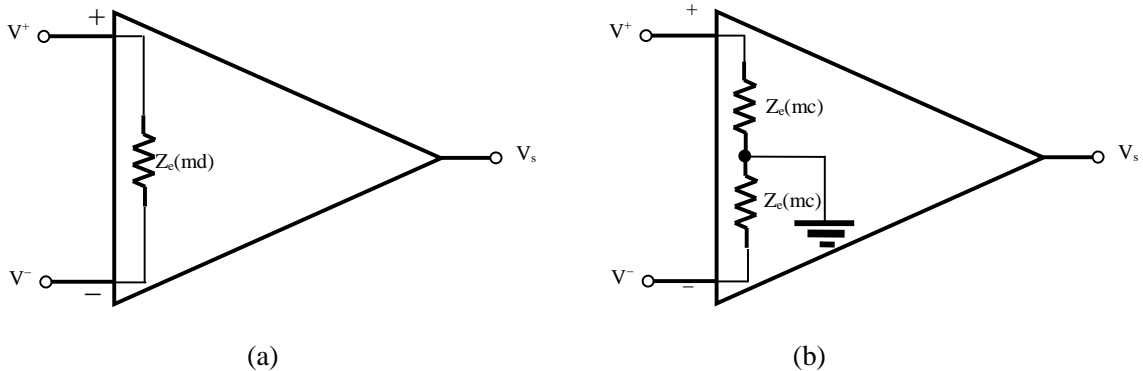


Figure V.11 : Impédance d'entrée de l'Ampli-Op (a) mode différentiel, (b) mode commun

L'impédance d'entrée de l'Ampli-Op est en général très grande, particulièrement pour les Ampli-Ops constitués d'une paire de transistors à effet de champs (MOSFET) à l'étage différentiel.

**b. Impédance de sortie**

L'impédance de sortie est la résistance vue par la borne de sortie de l'ampli-op comme l'indique la figure V.12.

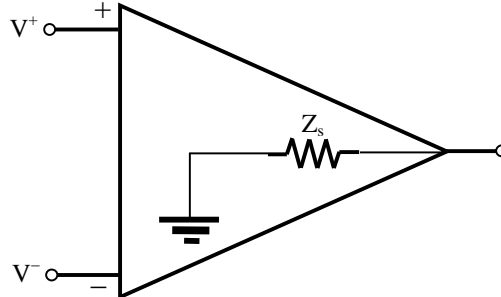


Figure V.12 : Impédance de sortie de l'ampli-op

L'impédance de sortie de l'Ampli-Op est en général très faible. Elle peut être considérée comme nulle dans le cas idéal ( $Z_s=0$ )

**c. Gain en tension en boucle ouverte**

Le gain en tension en boucle ouverte  $A_0$  de l'Ampli-Op est le gain en tension interne du dispositif. Il représente le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée (la différence des tensions appliquées sur les entrées inverseuses et non inverseuses  $V_d$ ) où il n'y a pas d'élément externe comme l'indique la figure V.13.

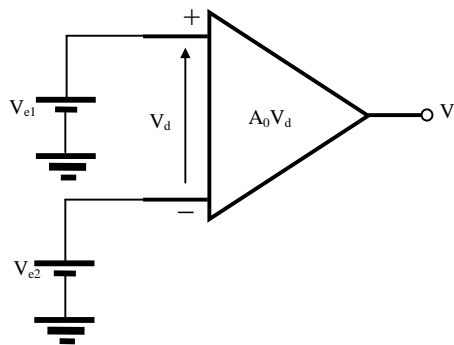


Figure V.13 : Tensions mise en jeu pour le calcul du gain en boucle ouverte

Le gain en tension en boucle ouverte est en général très grand. Il peut être défini comme :

$$A_0 = \frac{V_s}{V_{e1} - V_{e2}} = \frac{V_s}{V^+ - V^-} = \frac{V_s}{V_d}$$

Pour le cas idéal, les deux entrées sont ramenées au même potentiel :  $V_d \rightarrow 0$  et  $V^+ \rightarrow V^- \Rightarrow A_0 \rightarrow \infty$

**d. Gain en tension en boucle fermée**

Le gain en tension en boucle fermée est un gain en tension d'un Ampli-Op avec une boucle de contre-réaction négative. Sa configuration consiste un Ampli-Op et circuit externe de contre-réaction qui relie la sortie avec l'entrée inverseuse. Alors, le gain en tension en boucle fermée est déterminé par la valeur des éléments de la boucle de contre-réaction et peut être contrôlé par ces éléments.



La Figure V.14 illustre le schéma général d'un amplificateur avec la boucle de contre-réaction, dans le cas d'un amplificateur de tension.

Ce schéma peut être appliqué pour le cas où les entrées et les sorties sont des courants ou des puissances.

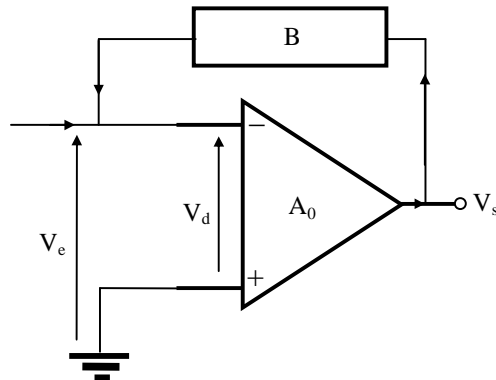


Figure V.14 : Schéma général d'un ampli-op avec la boucle de contre-réaction.

L'amplificateur a un gain en boucle ouverte  $A_0$ , et la boucle de contre-réaction soustrait de l'entrée une fraction  $B$  de la tension de sortie.

Alors, la sortie est l'entrée de l'amplificateur ( $V_e - BV_s$ ), multipliée par le gain  $A_0$ :

$$V_s = A_0 (V_e - BV_s)$$

Donc, le gain de l'Ampli-Op (en boucle fermée) est le rapport de la tension de sortie à la tension

$$\text{d'entrée qui vaut : } A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{A_0}{1 + A_0 B}$$

Si  $A_0 \gg B$ , le gain en boucle fermée vaut  $A_v = 1/B$ , il devient ainsi indépendant du gain de l'amplificateur en boucle ouverte  $A_0$ .

On reviendra sur l'étude de ce circuit dans la partie des montages de base de l'Ampli-Op qui est basée principalement sur la boucle de contre-réaction.

**e. Rapport de rejetion en mode commun**

Dans le cas idéal, la tension de sortie doit être nulle lorsque  $V^+ = V^-$ , quelque soit la variation de la tension d'entrée.

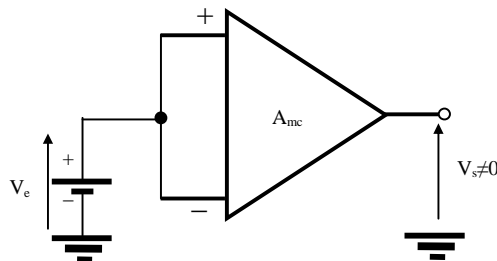


Figure V.15 : Mesure du rapport de rejetion en mode commun d'un Ampli-Op

## Chapitre V – Amplificateurs opérationnels

---

Dans le cas réel, si nous réalisons le montage  $V_e = V^+ = V^-$ , la variation de la tension d'entrée en mode commun a une influence sur la tension de sortie  $V_s \neq 0$  qui est proportionnelle à  $V_e$  comme l'indique la figure V.15. On définit alors une amplification en mode commun (puisque  $V^+$  est commun à  $V^-$ ). Donc, il existe une tension d'erreur à l'entrée qui donne lieu à une tension parasite de sortie.

En fonctionnement normal, la sortie  $V_s$  dépend donc de deux termes :

le terme différentiel  $V_s = A_0 (V^+ - V^-) = A_0 V_d$

le terme de mode commun  $V_s = A_{mc} V_e$ .

Alors,  $V_s$  s'exprime comme suit :  $V_s = A_0 V_d + A_{mc} V_e$  où :  $A_0$  et  $A_{mc}$  sont les gains en mode différentiel et en mode commun respectivement pour un Ampli-Op monté en boucle ouverte.

$$V_s = A_0 V_d \left( 1 + \frac{A_{mc} V_e}{A_0 V_d} \right)$$

Le rapport ou taux de réjection en mode commun ( $RRMC$ ) est défini par le rapport :  $RRMC = \frac{A_0}{A_{mc}}$

(en décibel:  $RRMC = 20 \log \left( \frac{A_0}{A_{mc}} \right)$  db)

Alors, la tension de sortie devient :  $V_s = A_0 V_d \left( 1 + \frac{1}{RRMC} \frac{V_e}{V_d} \right) = A_0 \left( V_d + \frac{V_e}{RRMC} \right)$

où :  $\left( V_{sp} = \frac{A_0 V_e}{RRMC} \right)$  est la tension d'erreur qui perturbe la tension de sortie. Elle est inversement proportionnelle au  $RRMC$ .

Pour contrôler cette perturbation on a défini le rapport de rejection en mode commun  $RRMC$  qui doit être élevé, par conséquent la tension d'erreur  $V_{sp}$  doit être très faible, pour assurer un fonctionnement performant de l'ampli-op.

### f. Vitesse d'excursion ou de monté (Slew-Rate)

Le taux de variation maximale du signal de sortie, qui est transmis par un signal d'entrée, par rapport au temps représente la vitesse d'excursion ou vitesse de balayage (Slew-Rate).

La vitesse d'excursion dépend de la fréquence de réponse de l'Ampli-Op. Cette grandeur est exprimée en Volt/ $\mu$ s.

Si par exemple on transmet un signal vers la sortie de type sinusoïdal :  $V_s = V_M \cos(\omega t)$ . La variation de ce

signal par rapport au temps est donné par :  $\frac{\Delta V_s}{\Delta t} \rightarrow \frac{dV_s}{dt} = -V_M \omega \sin(\omega t) = -V_M \frac{2\pi}{T} \sin(\omega t)$ .

La vitesse d'excursion est définie par la variation maximale de ce signal par rapport au temps :

$$SR = \left| \frac{dV_s}{dt} \right|_{max} = \left| -V_M \frac{2\pi}{T} \sin(\omega t) \right|_{max} \Rightarrow \sin(\omega t) = \pm 1 \Rightarrow \frac{2\pi}{T} t = \frac{\pi}{2} + 2k\pi \Rightarrow t = (2k+1) \frac{T}{4}$$

pour  $SR = \frac{2\pi V_M}{T}$  où: k est un entier.

**Exemple :**

Un signal est transmis vers la sortie à travers un Ampli-Op de type sinusoïdal  $V_s = 5 \cos(\omega t)$  dont la fréquence est de 2MHz. Calculer sa vitesse d'excursion SR.

**Solution :**

Si on donne au signal sinusoïdal qui se trouve à la sortie une amplitude  $V_M$  de 5volts avec une fréquence de 2MHz. Alors, la valeur de SR devient :  $SR = \frac{2\pi V_M}{T} = 18.8V / \mu s$

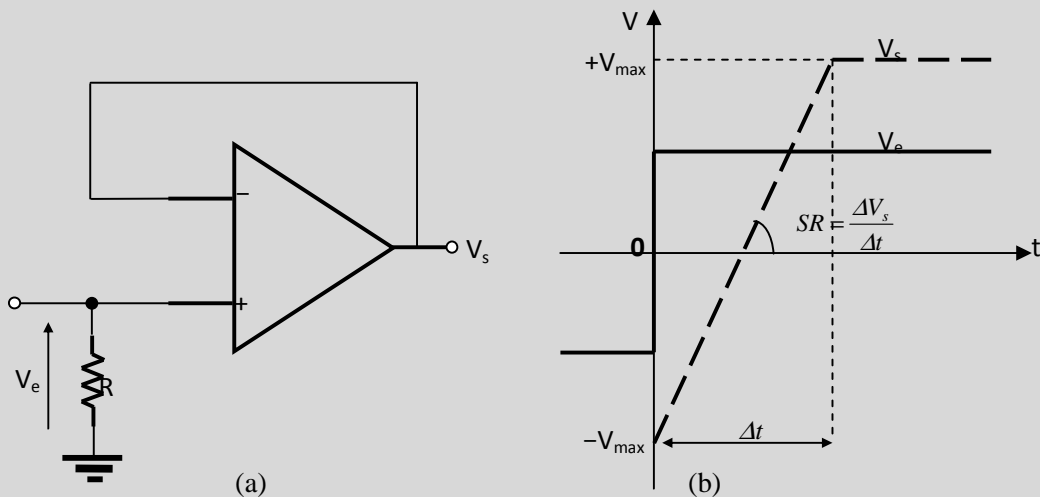


Figure V.15 : Mesure de la vitesse d'excursion ou de montée (Slew-Rate) d'un Ampli-Op (a) circuit de test, (b) échelon de tension d'entrée et l'évolution de la tension de sortie avec le temps

Afin de mesurer la vitesse d'excursion d'un Ampli-Op, il suffit de lui connecter en mode non-inverseur (on reviendra à l'étude de ce circuit par la suite). Puis, on applique un échelon de tension avec un temps de montée très rapide afin de voir l'évolution de la tension de sortie comme l'indique la figure V.16(a).

La largeur du signal échelon doit être suffisante pour permettre au signal de sortie de se transférer de l'état bas vers l'état haut.

D'après la figure V.16(b), on constate que certains intervalles de temps  $\Delta t$  sont exigés pour que le signal de sortie s'élève de la valeur basse  $-V_{max}$  vers la valeur haute  $+V_{max}$ . avec une vitesse donnée qui dépend de la caractéristique de réalisation de l'Ampli-Op. Cette vitesse est déterminée par la pente

$$\Delta V_s / \Delta t \text{ et est exprimée comme : } SR = \frac{\Delta V_s}{\Delta t} \text{ où: } \Delta V_s = +V_{max} - (-V_{max}).$$

**V.5.3 Comparaison des paramètres caractéristiques de l'ampli-op**

Le tableau V.1 compare quelques caractéristiques statiques et dynamiques décrites pour plusieurs circuits intégrés des Ampli-Ops. Ces valeurs sont fournies par la fiche technique du constructeur.

Tableau V.1 : Comparaison des paramètres caractéristiques de l'Ampli-Op

Ampli-Op	$V_0$ [mV] (max)	$I_{pol}$ [nA] (max)	$Z_e$ [M $\Omega$ ] (min)	$Z_s$ [ $\Omega$ ] (min)	$A_0$ (typ)	$SR$ [V/ $\mu$ s] (typ)	RRMC [db] (min)
LM741	6	500	0.3	100	200000	0.5	70
OP177	0.01	1.5	26	60	12000000	0.3	130
AD8055	5	1200	10	150	3500	1400	82
TL081	3	-	$10^{12}$	10	100000	13	200

**V.6 Montages de base de l'amplificateur opérationnel :**

**V.6.1 Amplificateur inverseur**

Le schéma électrique d'un amplificateur inverseur à base d'Ampli-Op est représenté par la figure V.16.

Le signal d'entrée est appliqué à l'entrée inverseuse à travers la résistance série  $R_1$ . En outre, la sortie est réinjectée à l'entrée inverseuse (-) à travers la résistance  $R_2$ . L'entrée non-inverseuse est reliée à la masse.

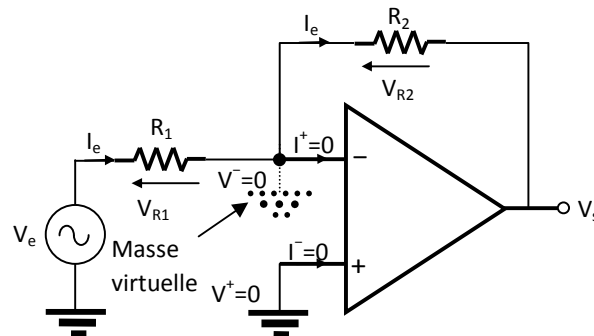


Figure V.16 : Amplificateur inverseur

Dans les conditions idéales, les valeurs du gain différentiel en boucle ouverte  $A_0$  et de la résistance d'entrée sont considérées infinies. La résistance de sortie est égale à zéro. Ceci nous permet alors de déduire que :  $V_d = V^+ - V^- = 0$ . Ce qui signifie que la tension de l'entrée inverseuse est considérée comme une masse virtuelle (égale à zéro) puisque l'entrée non-inverseuse est reliée à la masse. Et comme l'amplificateur inverseur a une impédance infinie, il n'y a aucun courant sortant de l'entrée inverseuse  $I^- = I^+ = 0$ . Alors, les résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont parcourues par le même courant  $I_e$ .

On a donc :  $V_e = V_{R1} = R_1 I_e$  et  $V_s = V_{R2} = -R_2 I_e$

Alors, le gain en tension en boucle fermée s'écrit dans ces conditions comme:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Le gain en tension en boucle fermée de l'amplificateur inverseur qui est le rapport entre les résistances  $R_1$  et  $R_2$  ne dépend pas du gain en boucle ouverte  $A_0$ . Alors, la résistance  $R_2$  doit être supérieure à  $R_1$  pour qu'on puisse parler d'amplification. Le signe négatif du gain indique l'inversion. Cela veut dire que les tensions d'entrée et de sortie sont en oppositions de phase.

**V.6.2 Amplificateur non inverseur,**

Le schéma électrique d'un amplificateur non inverseur à base d'Ampli-Op est donné par la figure.V.17. L'entrée non inverseuse (+) est attaquée par le signal d'entrée qu'on doit amplifier où une fraction de la tension de sortie définie par la boucle de contre-réaction (constitué par les résistances  $R_1$  et  $R_2$ ) est réinjectée à l'entrée inverseuse (-).

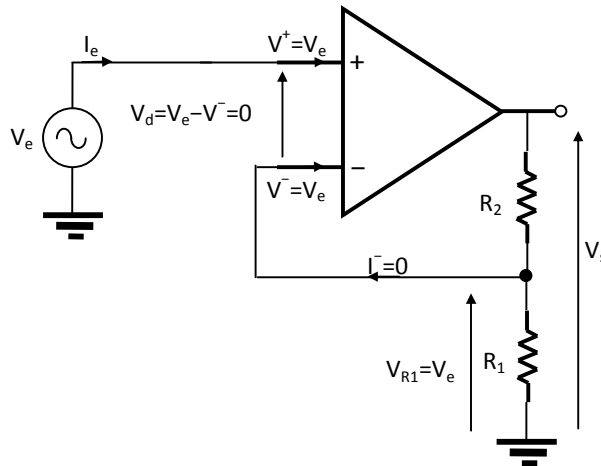


Figure V.17 : Amplificateur non inverseur

Dans les conditions idéals, le gain en tension est infiniment grand cela signifie que la tension différentielle d'entrée est nulle tant que l'Ampli-Op ne sature pas. On a alors :  $V_e = V^+ = V^-$

En appliquant le théorème de pont de diviseur de tension on aura :  $V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s = V_e$

Alors, le gain en tension en boucle fermée s'écrit dans ces conditions :  $A_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

On remarque que la tension de sortie et la tension d'entrée sont en phase et que l'amplification est toujours supérieure à 1. Le montage se comporte donc comme un vrai amplificateur.

En outre, la résistance d'entrée étant infiniment grande, les courants consommés par les entrées

inverseuse et non inverseuse sont nuls. On a donc :  $\sum I_k^- = \sum I_k^+ = 0$

$$I^- = I^+ = I_e = 0 \Rightarrow Z_e = \frac{V_e}{I_e} = \infty$$

**V.6.3 Amplificateur suiveur**

La figure V.18 représente le montage le plus simple que l'on puisse réaliser à l'aide d'un Ampli-Op. C'est un cas particulier de l'amplificateur non-inverseur où la sortie est reliée à l'entrée inverseuse (-) ce qui présente une boucle de contre-réaction assurant un fonctionnement linéaire à l'amplificateur opérationnel.

La boucle de contre-réaction de cet amplificateur a un gain en tension en boucle fermée  $1/B$  approximativement égale à 1, puisque  $B=1$ . Alors,  $A_V=1$ , ce qui permet un transfert intégral de tension d'entrée vers la sortie.

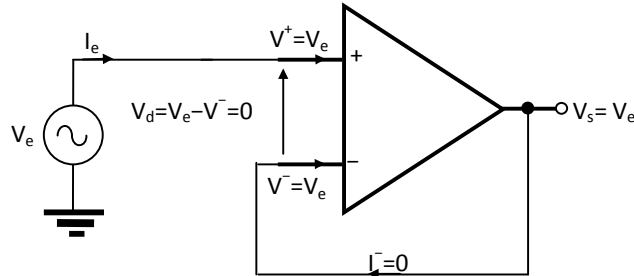


Figure V.18 : Amplificateur suiveur

Les caractéristiques les plus importantes de l'amplificateur suiveur sont : son très haute impédance d'entrée et son très faible impédance de sortie.

#### V.6.4 Amplificateur Sommateur

Le circuit de la figure V.19 représente un amplificateur sommateur avec deux entrées.

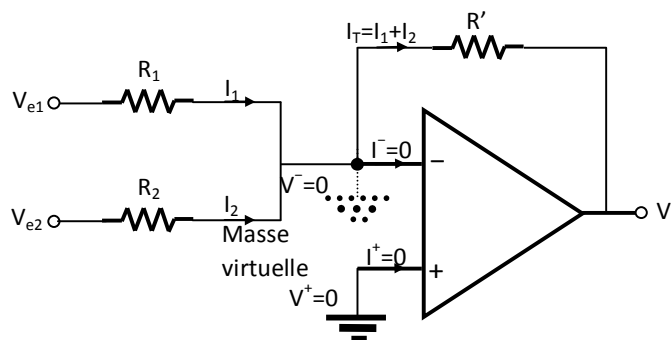


Figure V.19 : Amplificateur sommateur avec deux entrées

Le fonctionnement de ce circuit est la déduction de l'expression de la tension de sortie est donnée comme suit :

Deux tensions  $V_{e1}$  et  $V_{e2}$  sont appliquée à l'entrée et produisent deux courants  $I_1$  et  $I_2$  parcourant les résistance  $R_1$  et  $R_2$  respectivement.

D'après le concept de la masse virtuelle  $V_d = V^+ - V^- = 0$ , puisque l'entrée non-inverseuse est reliée à la masse, et le concept de l'impédance d'entrée infinie, il n'y a aucun courant sortant de l'entrée inverseuse  $I^- = I^+ = 0$ . Alors, la résistance  $R'$  est parcourue par le courant total :  $I_T = I_1 + I_2$

Comme  $V_s = -R' I_T$ , donc:  $V_s = -R' (I_1 + I_2) = -R' \left( \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} \right)$

Si les trois résistances sont égales :  $R_1 = R_2 = R' = R$ , alors :  $V_s = -R \left( \frac{V_{e1}}{R} + \frac{V_{e2}}{R} \right) = -(V_{e1} + V_{e2})$

La tension de sortie  $V_s$  s'exprime avec la somme des deux tensions d'entrée  $V_{e1}$  et  $V_{e2}$  mais avec un signe «-» (tension inversée) et gain unitaire.

Dans le cas général (figure V.20), un amplificateur sommateur avec  $n$  entrées, l'expression de la tension de sortie  $V_s$  est donnée par :  $V_s = -R' \left( \frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \dots + \frac{V_{en}}{R_n} \right)$

Si toutes les résistances sont égales  $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R' = R$ , alors :  $V_s = -(V_{e1} + V_{e2} + \dots + V_{en})$

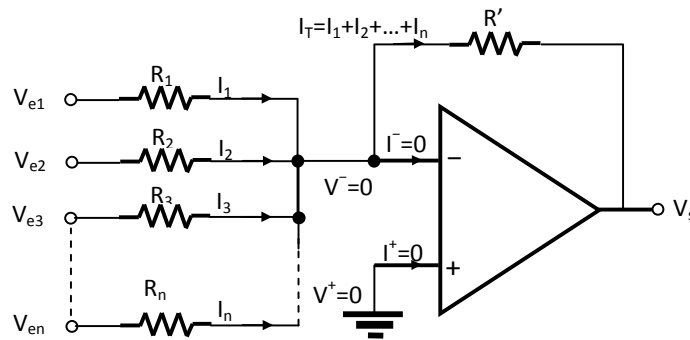


Figure V.20 : Amplificateur sommateur avec n entrées (cas général)

**V.6.5 Amplificateur intégrateur**

La figure V.21 représente un amplificateur intégrateur idéal où l'élément de base de la boucle de contre-réaction est donné par une capacité  $C$  qui forme avec la résistance d'entrée  $R$  un circuit RC.

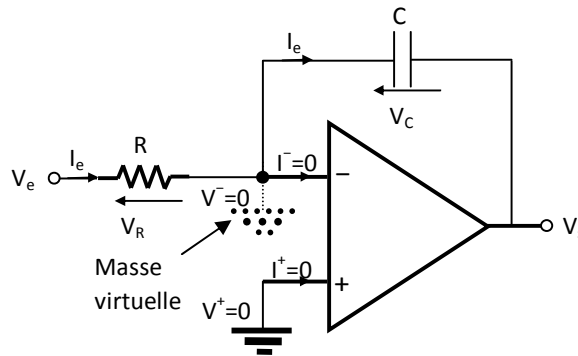


Figure V.20 : Amplificateur intégrateur idéal

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'amplificateur intégrateur, il faut d'abord comprendre comment la capacité se charge.

Il est évident que la charge  $Q$  d'un condensateur est proportionnelle au courant de charge  $I_C$  et au temps  $t$  selon la relation :  $I_C(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$ . En termes de tension, la charge  $Q$  devienne :  $dQ = C dV_C(t)$

Alors, le courant du condensateur  $I_C$  peut être déterminée par :  $I_C = C \frac{dV_C(t)}{dt}$

Maintenant, si on revient au circuit intégrateur, le courant d'entrée inverseuse  $I^-$  de l'Ampli-Op étant nul  $I^- = I^+ = 0$ . Donc, le courant  $I_e$  qui passe dans la résistance  $R$  est le même qui parcourt le condensateur.

Et comme l'entrée inverseuse est considérée comme une masse virtuelle, il en résulte :  $I_e = \frac{V_e(t)}{R}$  et

$$I_e = I_C = C \frac{dV_C(t)}{dt} = -C \frac{dV_s(t)}{dt}.$$

$$\text{Donc, } \frac{V_e(t)}{R} = -C \frac{dV_s(t)}{dt} \Rightarrow \int \frac{V_e(t)}{R} = -C \int \frac{dV_s(t)}{dt}$$

$$\text{Alors, } V_s(t) = -\frac{1}{RC} \int V_e(t)$$

On voit que la tension de sortie est proportionnelle à l'intégrale de la tension d'entrée. On dit que le montage est un amplificateur intégrateur idéal.

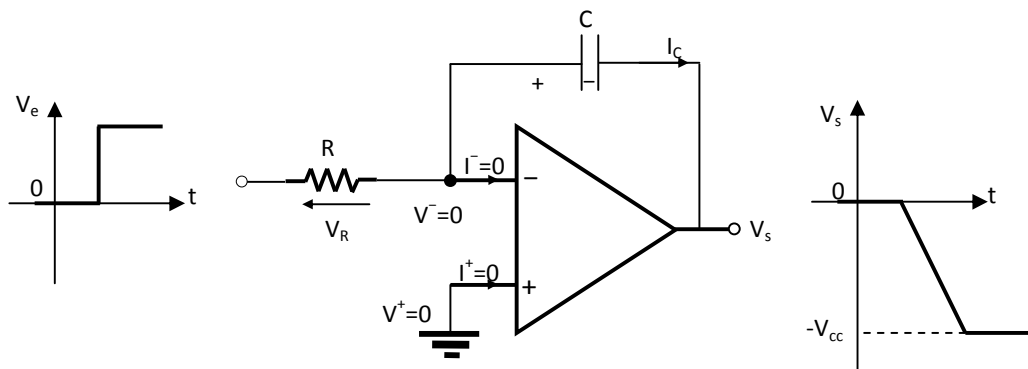


Figure V.21 : Application de l'amplificateur intégrateur idéal

Lorsque on applique une tension positive à l'entrée de forme impulsion, la tension de sortie diminue en pente dans le sens négative jusqu'à la saturation de l'Ampli-Op à  $-V_{cc}$  comme l'indique la figure V.21.

Le taux de variation de la tension de sortie, au cours du temps où le condensateur se charge, est la pente de rampe de la tension de sortie de l'intégrateur. Il est donné par :  $\frac{\Delta V_s(t)}{\Delta t} = -\frac{V_e(t)}{RC}$

### V.6.6 Amplificateur dérivateur,

Un amplificateur dérivateur idéal est représenté dans la figure V.22. Cette fois le condensateur est placé à l'entrée de l'Ampli-Op. L'amplificateur dérivateur résulte à la sortie une tension proportionnelle à la variation de la tension d'entrée. Dans le cas réel, une résistance est montée en série avec le condensateur afin de limiter le gain.



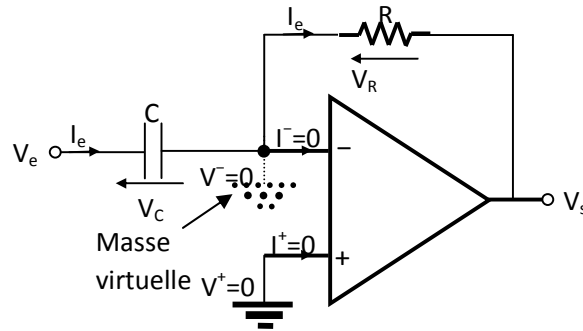


Figure V.22 : Amplificateur dérivateur idéal

Afin de comprendre le fonctionnement de l'amplificateur dérivateur, on doit appliquer une tension de rampe à l'entrée comme l'indique la figure V.23. Dans ce cas,  $I_C = I_e$  et la tension aux bornes du condensateur égale à :  $V_C = V_e$  puisque l'entrée inverseuse est considérée comme une masse virtuelle  $V^- = V^+ = 0$ .

D'après la relation de base  $I_C = C \frac{dV_C(t)}{dt}$  et comme le courant à l'entrée inverseuse  $I^-$  de l'Ampli-Op étant nul  $I^- = I^+ = 0$ , on donne  $I_C = I_R$ . Donc,  $V_s(t) = -I_C R = -I_R R$ .

En remplaçant l'expression du courant dans  $V_s(t)$ , on obtient :  $V_s(t) = -RC \frac{dV_C(t)}{dt} = -RC \frac{dV_e(t)}{dt}$

On remarque que la tension de sortie est négative lorsqu'on applique à l'entrée une tension positive et vice-versa comme l'indique la figure V.23.

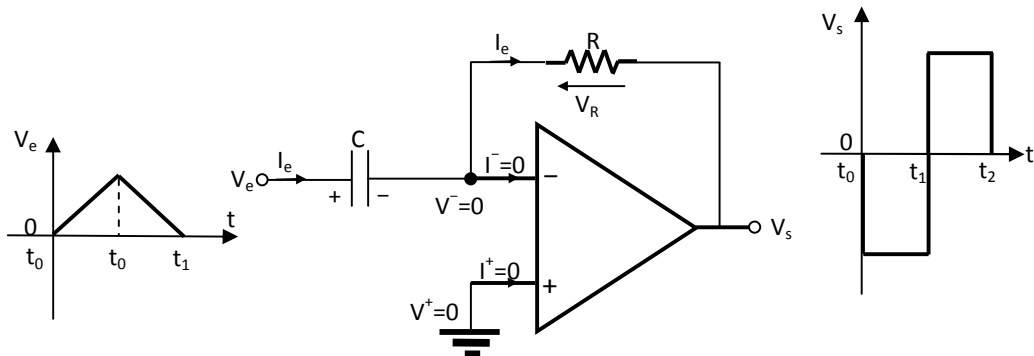


Figure V.22 : Application de l'amplificateur dérivateur idéal

Le condensateur se charge par la source d'entrée avec un courant constant à travers la résistance  $R$  au cours de la pente positive. Au cours de la pente négative, le courant change sa direction puisque le condensateur se décharge.

Si la pente de la tension d'entrée  $\frac{\Delta V_e(t)}{\Delta t}$  augmente, la tension  $V_s$  devienne plus négative et vice versa. Donc, la tension de sortie est proportionnelle à la pente négative (le taux de changement) de la tension d'entrée.