

L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL EN REGIME LINEAIRE- AMPLIFICATION EN TENSION-

I.	INTRODUCTION	2
A.	CONSTITUTION INTERNE	2
B.	NOTATIONS	2
C.	PRESENTATION EXTERNE (BOITIER 8 BROCHES).....	3
D.	SYMBLES	3
II.	L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL IDEAL	3
A.	MODELE ELECTRIQUE.....	3
B.	CARACTERISTIQUE DE TRANSFERT (ENTREE-SORTIE)	4
III.	L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL REEL	4
A.	CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE REELLE	4
B.	REGIME LINEAIRE	5
IV.	BOUCLE DE RETROACTION	5
A.	MONTAGE EN REACTION (OU CONTRE REACTION POSITIVE)	5
1.	<i>Présentation</i>	5
2.	<i>Relation entre tensions :</i>	6
B.	MONTAGE EN CONTRE-REACTION (NEGATIVE)	7
V.	FONCTIONS AMPLIFICATRICES D'UN AOP	8
A.	AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR	8
1.	<i>Montage</i>	8
2.	<i>Expression de la fonction de transfert</i>	8
B.	MONTAGE SUIVEUR	9
C.	AMPLIFICATEUR INVERSEUR.....	9
VI.	IMPERFECTIONS ET DEFAUTS DE L'AOP	10
A.	INFLUENCE DE LA TENSION DE DECALAGE U_D SUR UN MONTAGE AMPLIFICATEUR.....	10
B.	MISE EN EVIDENCE DE LA BANDE PASSANTE DE L'AOP	11
C.	AUTRES DEFAUTS.	12
1.	<i>Tension de déchet</i>	12
2.	<i>Slew-rate</i>	12
VII.	CONCLUSION	12

I. INTRODUCTION

L'amplificateur opérationnel (AOp) est un composant complexe dans lequel sont intégrés un grand nombre de circuits élémentaires (résistances, capacités, diodes, transistors) qui permettent de réaliser *plusieurs classes de fonctions* :

- la **comparaison entre deux tensions** : dans cette situation, l'AOp ne fonctionne pas en linéaire. Cet aspect sera abordé brièvement.
- l'**amplification** : le signal en sortie est une image du signal d'entrée à un facteur multiplicatif près (cf. §V, p. 8).
- Les opérations mathématiques ou de conversion. Cet aspect ne sera pas abordé.
- Les fonctions d'oscillateur : l'AOp, à nouveau, ne fonctionne pas en linéaire. Cet aspect ne sera pas abordé.

Ces fonctions ne peuvent être réalisées que si :

- l'AOp est alimenté par une source de tension (symétrique, la plupart du temps +/- 15 V)
- on place l'AOp dans un circuit (« circuit extérieur ») bien défini : c'est ce circuit qui conditionnera le fonctionnement de l'AOp.

A. CONSTITUTION INTERNE

Les amplificateurs opérationnels sont constitués de trois étages :

- Un étage d'entrée, appelé aussi « différentiel », qui permet de fournir l'amplification différentielle entre les deux entrées (E+, E-).
- Un étage (au moins) intermédiaire qui est constitué d'un amplificateur à fort gain. Cet étage contient une capacité permettant une compensation en fréquence (du gain).
- Un étage de sortie, amplificateur de gain 1, qui permet à l'AOp de délivrer un courant « important » en sortie. Il peut également contenir des limiteurs de courant, protections contre les courts-circuits,...

Pour voir un exemple de circuit on peut visiter la page suivante :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Amplificateur_op%C3%A9rationnel

B. NOTATIONS

Le symbole utilisé pour la tension électrique est U et correspond à la différence de potentiel entre deux points A et B.

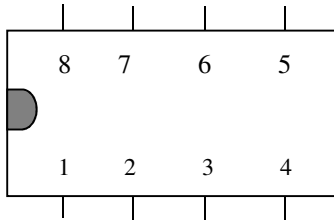
Le symbole utilisé pour le potentiel est V. Ainsi pour les deux points A et B on notera les potentiels V(A) et V(B).

La différence de potentiel sera alors notée $U_{AB} = V(A) - V(B)$.

Dans la suite du polycopié j'utiliserai, de façon arbitraire, la notation U tout aussi bien pour désigner une différence de potentiel que pour définir un potentiel en un point donné d'un circuit. La (pauvre) justification est que les potentiels sont/doivent être mesurés en référence au potentiel de la masse et donc, « techniquement », ce sont (déjà) des différences de potentiel.

Un avantage collatéral est d'éviter de nombreuses coquilles

C. PRESENTATION EXTERNE (BOITIER 8 BROCHES)



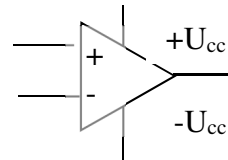
1. Offset
2. entrée inverseuse (E-)
3. entrée non-inverseuse (E+)
4. alimentation $-U_{cc}$ (-15 V)
5. offset (correction)
6. sortie
7. alimentation $+U_{cc}$ (+15 V)
8. non connectée (NC)

Remarques :

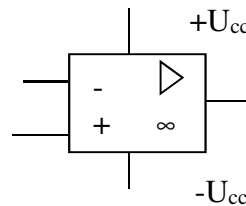
- Ce circuit existe également en boîtier 16 broches et en boîtier rond (métal) 8 broches
- Dans certaines applications particulières, l'alimentation peut être asymétrique
- Les broches 1 et 5 permettent de corriger un défaut de l'AOp (tension de décalage)

D. SYMBOLES

Anglo-saxon



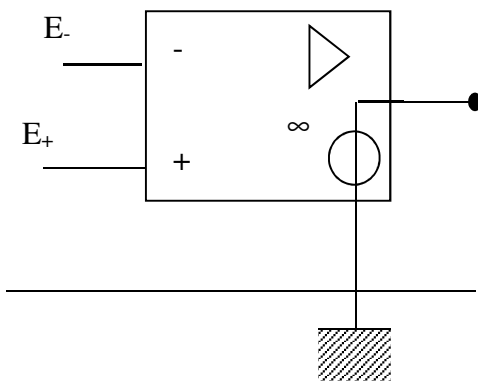
Norme Internationale



L'alimentation $\pm U_{cc}$ étant indispensable au fonctionnement de l'AOp, elle ne sera pas représentée dans les schémas de montage afin de ne pas les alourdir inutilement.

II. L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL IDEAL

A. MODELE ELECTRIQUE



Propriétés de l'AOp idéal :

L'impédance des entrées $E+$ et $E-$ est infinie : $Z_{E+} = Z_{E-} = \infty \Rightarrow I_{E+} = I_{E-} = 0$.

En pratique les courants d'entrée sont de l'ordre du nano-ampère.

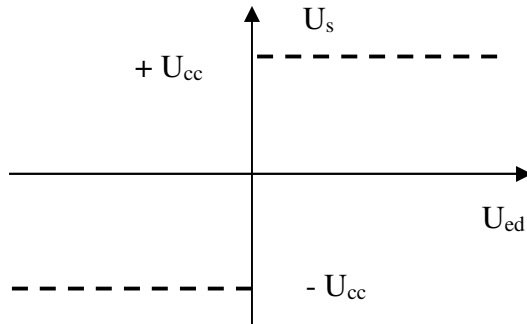
- L'impédance de sortie Z_s est nulle
- la tension de sortie est $U_s = A_d U_{ed}$ avec : $U_{ed} = \varepsilon = U_{E+} - U_{E-}$ la tension différentielle d'entrée

$A_d = \infty$ coefficient d'amplification différentielle.

Comme U_s prend des valeurs finies, si $A_d = \infty$ alors $U_{ed} = 0$ (idéal). En fonctionnement linéaire, $U_{ed} = 0$.

Remarque : La référence des tensions (la « masse ») est en général fixée à 0 V.

B. CARACTERISTIQUE DE TRANSFERT (ENTREE-SORTIE)



La caractéristique de transfert, idéale, présentée ci-contre permet de définir le mode de fonctionnement de l'AOp :

- si $U_{ed} \neq 0 \rightarrow$ la sortie est en régime de saturation, i.e. $U_s = \pm U_{cc}$
- si $U_{ed} = 0 \rightarrow$ l'AOp est en régime linéaire : U_s est déterminé par le circuit extérieur à l'AOp.

Remarque : en régime de saturation, la tension différentielle d'entrée, U_{ed} , est déterminée par le circuit extérieur.

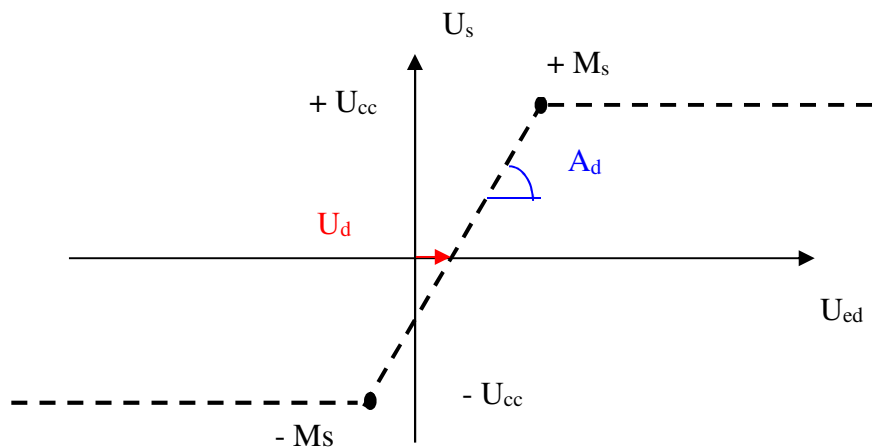
III. L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL REEL

Les composants élémentaires de l'AOp étant bien réels, l'AOp idéal n'existe pas. Chaque famille d'AOp possède des caractéristiques qui se rapprochent plus ou moins des valeurs idéales.

Dans un premier temps on ignorera la réponse en fréquence de l'AOp : on considère donc que l'AOp possède un coefficient d'amplification différentielle A_d indépendant de la fréquence.

On fera l'étude des principaux défauts de l'AOp au § VI – p 10.

A. CARACTERISTIQUE ELECTRIQUE REELLE



Les points $-M_s$ et $+M_s$ sont des points de fonctionnement particuliers, situés à la transition entre régime linéaire et régime de saturation.

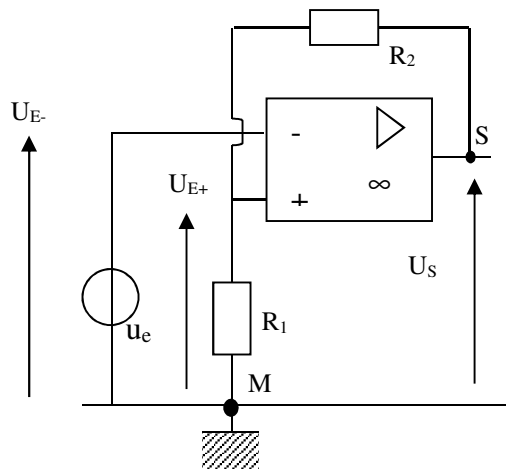
B. REGIME LINEAIRE

Le segment de courbe qui passe du point $-M_s$ au point $+M_s$ ne présente pas une pente infinie (contrairement à l'AOp idéal) : le coefficient d'amplification différentielle (A_d) prend une valeur finie, typiquement 10^5 à 10^6 . Par ailleurs, la tension différentielle d'entrée U_{ed} n'est pas nulle même lorsque $U_{E+} = U_{E-}$: il existe une tension résiduelle dite tension de décalage (« offset ») qui est un défaut de l'AOp¹. Le régime linéaire n'est possible que sur le segment $[-M_s, +M_s]$ donc pour des valeurs très faibles de U_{ed} . On ne pourra obtenir le régime linéaire sans une intervention « extérieure » : c'est l'objectif des montages en (contre)réaction qui permettent de maintenir le point de fonctionnement du circuit entre $-M_s$ et $+M_s$, même lorsque la tension différentielle ($U_{E+} - U_{E-}$) est très grande.

IV. BOUCLE DE RETROACTION

A. MONTAGE EN REACTION (OU CONTRE REACTION POSITIVE)

1. Présentation



On note :

- U_{E+} le potentiel de l'entrée $E+$
- U_{E-} le potentiel de l'entrée $E-$
- U_S le potentiel de la sortie S

La référence des potentiels est la masse.

Remarques :

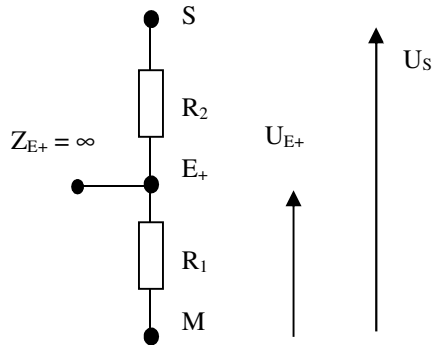
- La résistance R_2 est placée entre la sortie et l'entrée $E+$
- on dispose de deux entrées $E+$ et $E-$ et bien que, le plus souvent, on n'ait qu'un seul signal d'entrée (cas de l'amplification, par exemple), il faudra cependant toujours penser à polariser les deux entrées. Le signal à amplifier/modifier est envoyé sur l'entrée $E+$ ou $E-$, l'entrée restante est placée à un potentiel de référence (masse par exemple).

Notations : la tension d'entrée est notée (U_e , $\underline{U_e}$ ou $u_e(t)$) suivant que l'on travaille avec, respectivement, des tensions continues, les amplitudes complexes ou encore les valeurs instantanées des tensions.

¹ Pour un AOp type 741, lorsque $U_{ed}=0,015$ mV, pour un gain de 1000, la sortie est à $\pm U_{cc}$, c'est à dire à saturation.

2. Relation entre tensions :

Dans le circuit présenté ci-dessus, la tension d'entrée est délivrée par le générateur. On voit que , dans le cas idéal ($U_{ed} = 0$), $U_{E+} = U_{E-} = U_e$ car le générateur est directement connecté à l'entrée E- sans passage par un dipôle. Pour l'AOp idéal, les courants d'entrée I_{E+} et I_{E-} sont nuls, ce qui permet de schématiser le circuit de la façon suivante :



$$U_{E+} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_s \quad (1a)$$

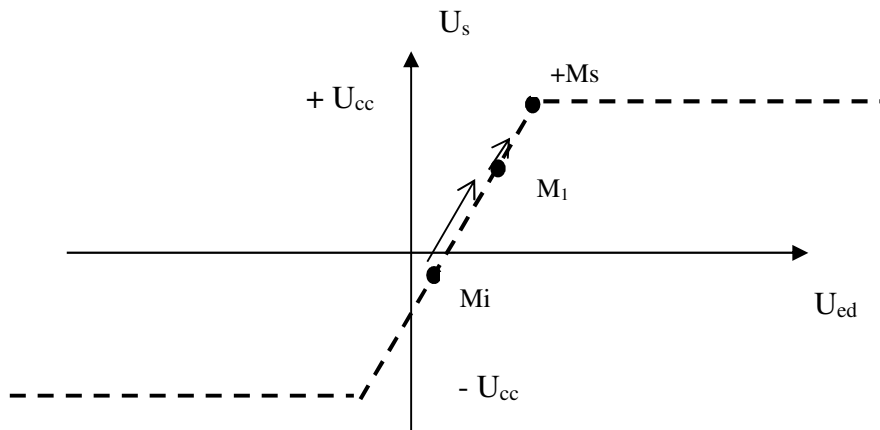
$$\text{donc } U_{E+} = k_+ U_s \quad (1b)$$

k_+ : taux de réaction
(noté également, τ_R ou β_+).

On choisit un point de fonctionnement initial M_i correspondant au régime linéaire. La tension de sortie de l'AOp en régime linéaire est, par définition :

$$U_s = A_d U_{ed} = A_d (U_{E+} - U_{E-}) \quad (1c)$$

On considère alors une dérive de la tension de sortie U_s (« bruit », élévation de température,...)



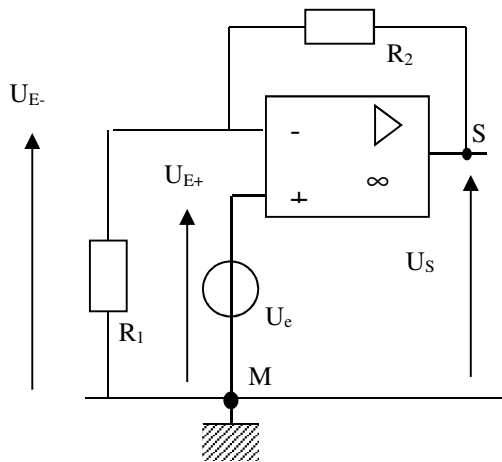
qui engendre un accroissement $dU_s > 0$.

Comme la boucle de réaction où se trouve R_2 permet de « réinjecter » une fraction du courant de sortie vers l'entrée $E+$, cela entraîne une modification du potentiel U_{E+} qui augmente de dU_{E+} . Avec : $dU_{E+} = k_+ dU_s$ (1d)
(on obtient (1d) en dérivant (1b))

Si on suppose que la source de tension délivrant U_e est parfaite alors le potentiel U_{E-} reste constant, donc $dU_{E-} = 0$: dans ce cas U_{ed} augmente et le point de fonctionnement M se déplace vers $+M_s$, ce qui entraîne un accroissement secondaire > 0 de U_s .

La variation initiale de la tension de sortie entraîne, via la boucle de réaction, une variation secondaire de cette même tension de sortie U_s . Ces variations sont de même signe : c'est une réaction en chaîne (ou emballement) qui amène très rapidement le point de fonctionnement en $+M_s$. En effet les variations de tension dU_s initiale et secondaire sont en phase (i.e. de même signe). **Ce montage ne permet pas d'obtenir un fonctionnement linéaire stable : $U_s = \pm U_{cc}$. L'AOp est en régime de saturation : $U_{ed} \neq 0$.**

B. MONTAGE EN CONTRE-REACTION (NEGATIVE)



En reprenant la même démarche qu'au § précédent :

$$U_{E+} = U_{E-}$$

$$I_{E+} = I_{E-} = 0$$

On trouve
$$U_{E-} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_S \quad (2a)$$

donc :
$$U_{E-} = k \cdot U_S \quad (2b)$$

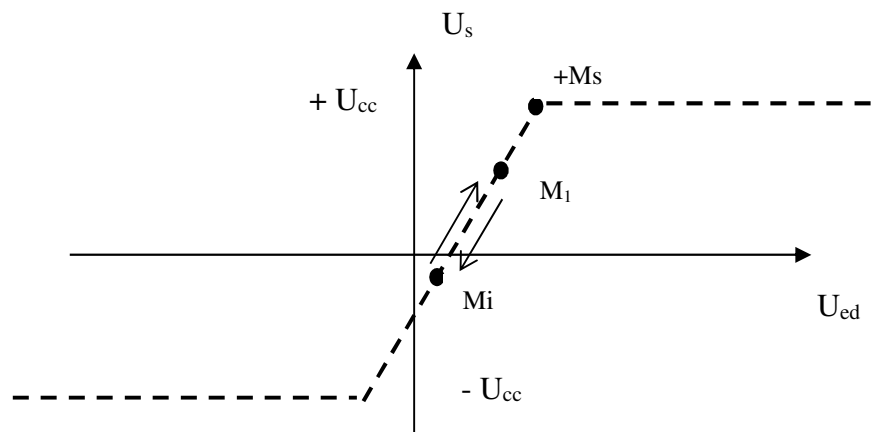
k : taux de contre-réaction (négative)
(noté également, τ_{CR} ou β).

La résistance R_2 est placée entre la sortie et l'entrée E .

La démarche suivie reste celle du § précédent :

La tension de sortie, en régime linéaire est :
$$U_S = A_d U_{ed} = A_d (U_{E+} - U_{E-}) \quad (2c)$$

On considère une dérive de la tension de sortie U_S qui engendre un accroissement $dU_S > 0$.



La boucle de contre-réaction entre S et E- entraîne une modification du potentiel U_{E-} qui varie de dU_{E-} . Avec :
$$dU_{E-} = k \cdot dU_S \quad (2d) \quad (\text{dérivée de (2b)})$$

Si on suppose que la source de tension délivrant U_e est parfaite alors le potentiel U_{E+} reste également constant, donc $dU_{E+} = 0$: dans ce cas U_{ed} augmente et le point de fonctionnement M_i se déplace vers $+M_s$. Cependant dans le montage inverseur, les signes des signaux d'entrée et de sortie sont opposés et donc les signes des variations dU_S et dU_{E-} aussi :

On dérive (2c) :
$$dU_S = - A_d dU_{E-} \quad (2e)$$

Le point de fonctionnement se déplace de M_i vers $+M_s$.

A nouveau, la variation initiale de la tension de sortie entraîne, via la boucle de contre-réaction, une variation secondaire de cette même tension de sortie U_S . Mais pour ce montage, les variations de tension dU_S initiale et secondaire sont en opposition de phase (i.e. de signe opposé). La variation secondaire tend à ramener le point de fonctionnement à sa position initiale. **Ce montage permet d'obtenir un fonctionnement linéaire stable : la tension de sortie U_S est fonction de la tension d'entrée U_e , et $U_S \in]-U_{cc}, +U_{cc}[$.**

V. FONCTIONS AMPLIFICATRICES D'UN AOP

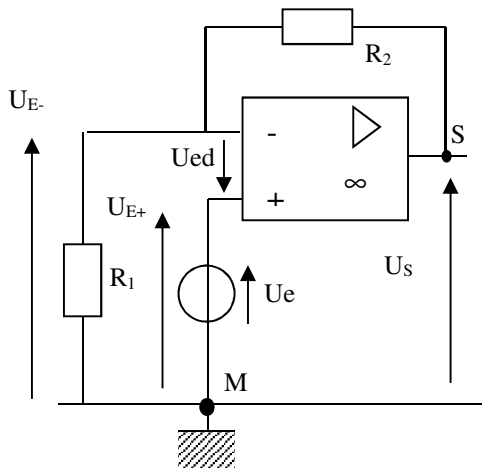
Après avoir montré au § précédent l'intérêt de placer une contre réaction entre la sortie et l'entrée E-, nous allons étudier divers types de montages, classiques, d'un AOp. Nous étudierons dans un premier temps les fonctions amplificatrices puis dans la seconde partie du chapitre nous étudierons les fonctions mathématiques simples réalisables avec un AOp.

Pour effectuer les calculs de fonction de transfert, on considérera que l'AOp est idéal. Dans le cadre d'une présentation didactique, on pourra calculer les coefficients k+ et k- des boucles de réaction positives et négatives, bien que cela soit le plus souvent trivial.

A. AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR

1. Montage

On considère que le signal d'entrée U_e est délivré par un générateur de tension ayant une résistance interne r_g . L'absence de branche entre la sortie S et l'entrée E+ est équivalent à une résistance infinie.



Comme précédemment, on définit k_- par :

$$U_{E-} = k_- U_S$$

$$k_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

2. Expression de la fonction de transfert

On notera que les expressions sont applicables aux régimes stationnaires donc pour des tensions continues ou pour les amplitudes complexes des tensions alternatives sinusoïdales.

$Z_{E+} = Z_{E-} \Rightarrow I_{E+} = I_{E-} = 0$ et la tension différentielle d'entrée est $\underline{U}_{ed} = \underline{U}_{E+} - \underline{U}_{E-} = 0$ donc :

$$\underline{U}_{E+} = \underline{U}_{E-} \quad (3a)$$

$$\underline{U}_{E+} = \underline{U}_e \quad (3b)$$

$$\underline{U}_{E-} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{U}_S \quad (3c)$$

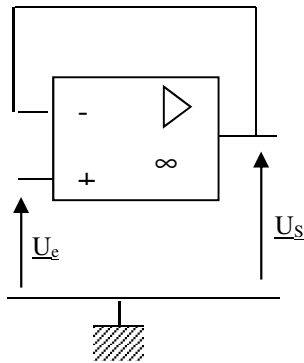
On trouve alors en combinant ces trois relations : $\underline{U}_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{U}_S$

La fonction de transfert est, par définition, $\underline{H} = \frac{\underline{U}_S}{\underline{U}_e} \quad (3d)$

$$\underline{U_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \underline{U_e} \quad \Rightarrow \quad \underline{H} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3e)$$

On pourra nommer gain en tension la norme de la fonction de transfert, $G_V = |\underline{H}|$. Ce gain pourra éventuellement s'exprimer en dB (décibels).

B. MONTAGE SUIVEUR



En reprenant la relation (3e) :

$$\underline{U_s} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \underline{U_e}$$

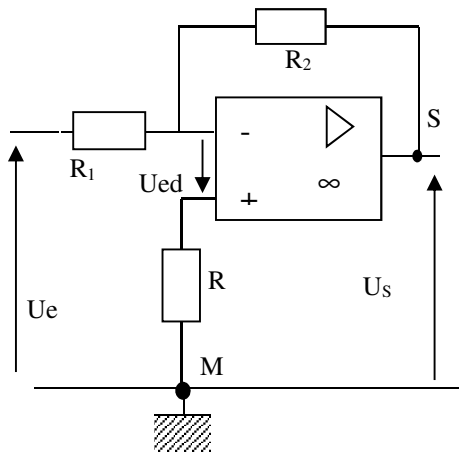
Avec $R_2 = 0$ et $R_1 = \infty$

on trouve : $\underline{U_s} = \underline{U_e}$ et $\underline{H} = 1$

Ce montage n'amplifie pas mais il permet d'effectuer une « adaptation d'impédance » entre deux éléments (exemple : une source de tension sinusoïdale et un haut parleur).

Le circuit « amont », qui délivre la tension d'entrée $u_e(t)$, ne fournit pas de puissance c'est à dire qu'il ne débite pas de courant mais délivre simplement une tension qui est le signal d'entrée. L'énergie nécessaire au fonctionnement du circuit aval est apportée par l'alimentation de l'AOp.

C. AMPLIFICATEUR INVERSEUR

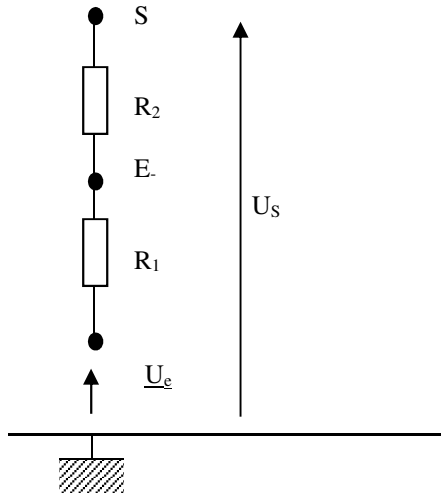


Comme précédemment, on défini k_- par :

$$U_{E-} = k_- U_s$$

$$k_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

On adapte les équations (3a, b, c) :



$$\underline{U_{E-}} = \underline{U_{E+}} \quad (4a)$$

$$\underline{U_{E+}} = 0 \quad \text{donc } \underline{U_{E-}} = 0 \quad (4b)$$

On appelle $\underline{I_2}$ le courant traversant la résistance R_2 puis la résistance R_1 .

$$\underline{U_{E-}} = \underline{U_e} + R_1 \underline{I_2} \quad \text{et donc :}$$

$$\underline{U_e} = -R_1 \underline{I_2}$$

$$\text{Comme } \underline{U_s} = +R_2 \underline{I_2} \quad (4c)$$

$$\text{On en déduit : } \underline{U_s} = - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \underline{U_e}$$

La fonction de transfert est :

$$\underline{H} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (4d)$$

VI. IMPERFECTIONS ET DEFAUTS DE L'AOP

Nous avons traité, pour simplifier les calculs, l'AOp comme un circuit idéal, à partir du modèle électrique équivalent. Ce sont cependant des circuits réels, ayant des imperfections physiques et donc des limitations, appelées communément défauts.

De par leur conception, les AOp présentent une tension résiduelle U_d sur leur entrée. On peut compenser cette tension par un circuit extérieur (bornes « offset ») sans toutefois pouvoir la réduire à 0 : ce défaut fait l'objet du §A. Par ailleurs la réponse en fréquence d'un AOp n'est pas uniforme : on verra au §B qu'il présente une bande passante aux propriétés variables. Enfin les composants élémentaires constituant l'AOp vont également engendrer des écarts à la théorie : on retrouvera une présentation sommaire de deux limitations (tension de déchet et slew-rate) au §CD.

A. INFLUENCE DE LA TENSION DE DECALAGE U_d SUR UN MONTAGE AMPLIFICATEUR

De par leur conception, les AOp présentent une tension résiduelle U_d sur leur entrée. On peut compenser cette tension par un circuit extérieur (bornes « offset ») sans toutefois pouvoir la réduire à 0.

Dans un montage inverseur, on a vu que la relation entre tension d'entrée et de sortie est :

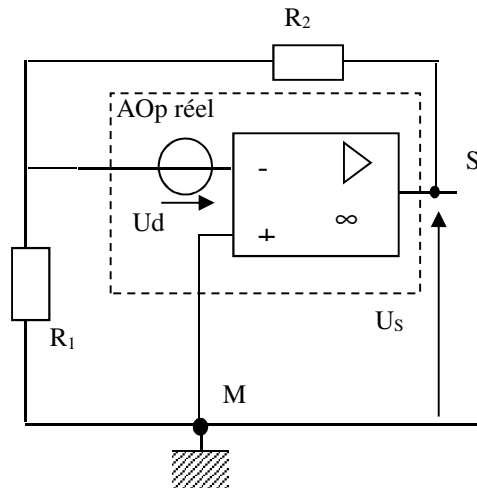
$$\underline{U_s} = - \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \underline{U_e}$$

Si $\underline{U_e} = 0 \Rightarrow \underline{U_s} = 0$ (AOp idéal)

$$\underline{U_{E+}} = 0$$

$$\underline{U_{E-}} = \underline{U_{E+}} - U_d \quad (\text{AOp réel})$$

et
$$\underline{U_{E-}} = \frac{\underline{U_s}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$



d'où :
$$\underline{U_s} = - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) U_d$$

Dans le cas d'un AOp type 741, $U_d \approx 6\text{mV}$: $\text{si } \frac{R_2}{R_1} = 100 \Rightarrow |\underline{U_s}| \approx -0,6 \text{ V}$

On voit que la tension de décalage peut modifier considérablement les résultats d'une mesure de tension en sortie de l'AOp.

B. MISE EN EVIDENCE DE LA BANDE PASSANTE DE L'AOp

On pourra étudier l'évolution du module de la fonction de transfert de l'AOp en fonction de la fréquence du signal d'entrée, à la façon d'un diagramme de Bode.

On pourra utiliser le montage amplificateur afin de montrer la dépendance en fréquence du terme d'amplification. On peut en effet décrire ce coefficient d'amplification (différentielle) par la fonction :

$$A_d(j\omega) = \frac{A_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0} \right)} \quad \text{avec } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \text{ et } A_0 \text{ une constante}$$

f_0 est la fréquence de coupure en boucle ouverte.

Lorsque la fréquence du signal en entrée de l'AOp est faible ($\omega \ll \omega_0$) l'amplification est indépendante de la fréquence et $A_d \approx A_0$.

Par contre, à haute fréquence, la dépendance en $\frac{1}{j\omega}$ de l'amplification entraîne des comportements plus complexe de l'AOp : diminution du gain et déphasage entre entrée et sortie, dépendant de f .

Pour plus de détail, se reporter aux ouvrages cités dans la bibliographie.

C. AUTRES DEFECTS.

1. Tension de déchet

Les éléments constitutifs de l'AOp vont entraîner des chutes de tensions suffisamment importantes pour que la tension de sortie à saturation ($|\pm U_s|$), soit plus faible que $|\pm U_{cc}|$. Les valeurs typiques de la tension de déchet sont de quelques centaines de millivolt.

2. Slew-rate

La réponse d'un AOp à un échelon de tension n'est pas instantanée : la pente de la tension de sortie $u_s(t)$ sera plus faible que celle de la tension d'entrée $u_e(t)$. Ceci est dû à la présence d'un condensateur de liaison dans les circuits internes à l'AOp. on pourra donc associer une constante de temps à la valeur nominale de ce condensateur. La manifestation principale du slew-rate est la déformation des signaux à « haute-fréquence ».

VII. CONCLUSION

L'AOp est un circuit intégré complexe qui permet de réaliser de nombreuses fonctions, suivant le circuit dans lequel il est placé :

1. Amplification.
2. Adaptation d'impédance.
3. Opérations mathématiques ($+$, $-$, $\int$, $\frac{df}{dx}$).
4. Conversion $I \leftrightarrow U$.

Ses caractéristiques d'entrée-sortie permettent, le plus souvent, de le traiter comme un circuit idéal ($Z_e = \infty$, $Z_s = 0$) et donc de simplifier les calculs d'électrocinétique. Il faut cependant connaître ses caractéristiques techniques (documentation constructeur) afin de pouvoir interpréter son fonctionnement dans les situations « exceptionnelles ». Par ailleurs, les défauts intrinsèques aux AOp peuvent avoir des conséquences importantes sur leur comportement : il est donc intéressant de posséder les notions de bases concernant ces défauts.

D'un point de vue pédagogique l'AOp est un outil très utile car il permet l'étude de circuits électriques (presque) idéaux. C'est le plus souvent l'AOp qui fournit la puissance (i.e. le courant) nécessaire à l'étude des quadripôles classiques étudiés en électrocinétique. Les générateurs deviennent alors des générateurs de tension idéaux qui fournissent un signal indépendant du courant et donc de la charge placée en aval. Cette fonctionnalité est utilisée pour mettre les signaux sortant d'un capteur « en forme » pour alimenter dans de bonnes conditions un micro-contrôleur.

Programme de 1ère STL-SPCL : Instrumentation / Capteurs et conditionneurs

http://cache.media.education.gouv.fr/file/SP1-MEN-22-1-2019/86/6/spe645_annexe4_22-1_1063866.pdf

Bibliographie pour le concours :

- « Guide pratique de l'électronique », R. Bourgeron, Hachette Technique, 1998
- "Montages de physique", Bellier, Boulloy, Guéant, Tome 1 "Electricité, Electromagnétisme, Electronique, Acoustique", DUNOD, 2000 et 2004
- « Electronique I », 2nd année PSI-PSI*, H-Prépa, Hachette Supérieur, p 82, 1997
- « Introduction à l'électronique », J.M. Donnini et L. Quaranta, Masson, 1998
- « Dictionnaire de physique expérimentale », T3, Electronique, D. Aubert, Pierron, 1992
- « Electronique », Thierry Gervais, Vuibert, 2002