Lois Physiques

Chapitre 5
Les Amplificateurs Opérationnels

G. MALEJACQ

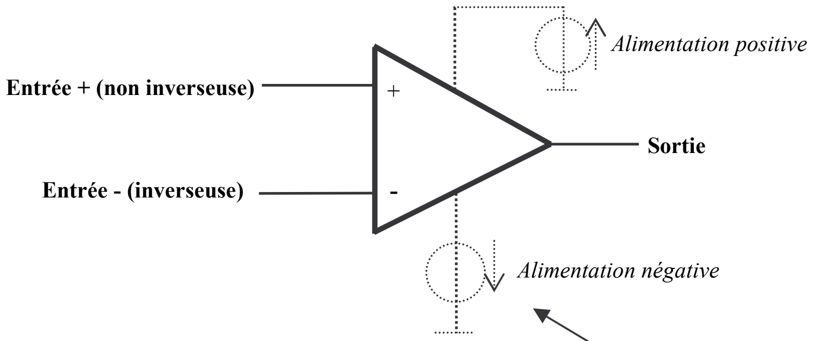
LES AMPLIFICATEURS OPERATIONNELS

I- Présentation du composant.

1.1 Symbole.

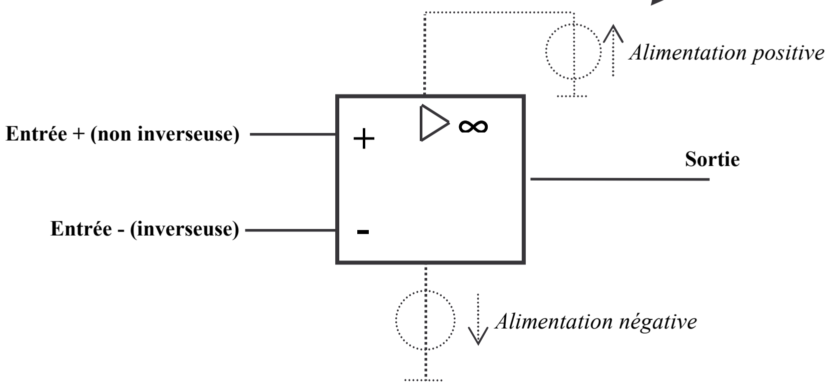
L'amplificateur opérationnel admet deux représentations que nous rappelons ci-dessous:

a) La représentation américaine :



Représentation facultative des alimentations

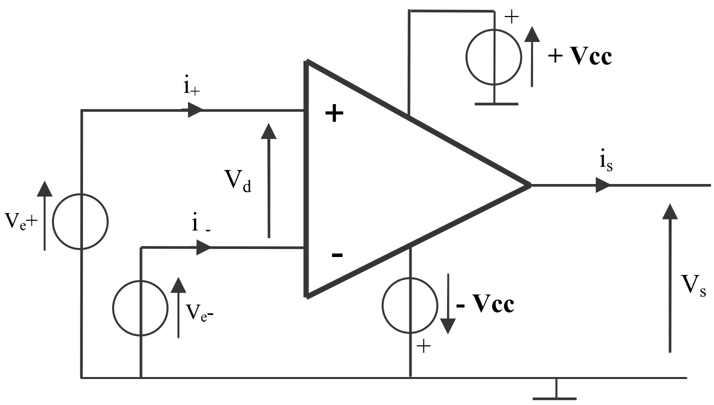
b) La représentation européenne :



C'est la représentation américaine qui est la plus usitée, c'est elle que nous garderons durant ce cours.

1.2 Notations des grandeurs électriques.

Considérons une polarisation indépendante des entrées + et -.



L'amplificateur opérationnel est un composant actif : il faut donc lui **fournir de l'énergie**; on utilise pour ce faire deux alimentations $+V_{CC}$ et $-V_{CC}$. Les valeurs de Vcc sont variables (+12V, +15V...); d'autres modes d'alimentation (non symétriques) sont également possibles: 0 V + 5 V par exemple.

On note :

- V_{e+} (ou V_+) le potentiel de la borne "+".
- V_{e-} (ou V_-) le potentiel de la borne "-".
- i_+ et i_- les courants rentrant par les bornes "+" et "-".
- i_S le courant de sortie.

1.3. Relations électriques.

Du schéma présenté précédemment, nous pouvons déduire une première relation :

$V_d = V_{e+} - V_{e-}$ $\qquad$ V_d est appelée **tension différentielle**.

Le schéma électrique interne d'un amplificateur opérationnel est très complexe, nous ne l'étudierons pas. On pourrait montrer qu'il existe une relation entre la tension de sortie et la tension différentielle en entrée; cette relation fait intervenir une grandeur appelée Gain Différentiel.

$\boxed{\mathbf{V_s = A_d\, V_d = A_d\, (V_{e+} - V_{e-})} \qquad \text{où } \mathbf{A_d} \text{ est le gain différentiel.}}$

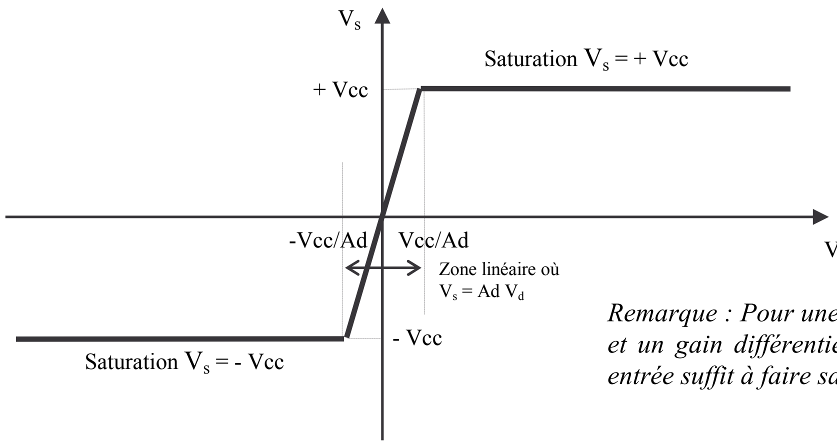
Ad, également appelé gain en boucle ouverte, a une valeur très élevée, généralement supérieur à 10^6.

1.4 Courbe de transfert.

Si un composant actif (et de manière générale, tout circuit) est alimenté sous deux tensions $\pm V_{CC}$, la tension récupérable en tout point (et notamment en sortie) est bornée par ces valeurs; de ce fait, nous pouvons écrire que :

$$\mathbf{-V_{cc} < V_s < +V_{cc}}$$

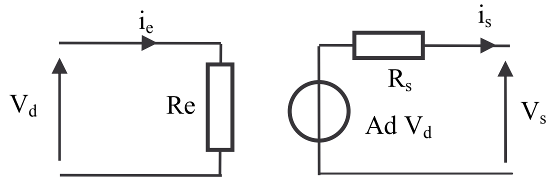
En conséquence, étant donnée la valeur très importante du gain différentiel, une tension V_d très faible va très rapidement faire saturer le composant. Sa courbe de transfert aura donc l'allure suivante :



Remarque : Pour une tension d'alimentation V_{cc} = +10 V, et un gain différentiel de 10^6, une tension de 10 µV en entrée suffit à faire saturer l'amplificateur!

1.5 Schéma équivalent de l'amplificateur opérationnel.

On utilise la notation quadripolaire. Ce schéma se présente alors de la façon suivante :



- R_e est la résistance d'entrée différentielle,
- R_S est la résistance de sortie,
- A_d l'amplification différentielle.

Nous avons typiquement :

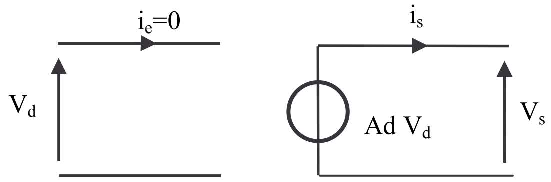
- Re = 1 MΩ
- Rs = 75 Ω
- Ad = 10^5

Pour un amplificateur opérationnel idéal, nous sommes amené à définir les valeurs suivantes :

- Re = ∞
- Rs = 0 Ω
- Ad = ∞

Nous pouvons constater que les valeurs de l'amplificateur réel ne sont pas "très éloignées" des caractéristiques idéales; aussi pourrons nous utiliser le modèle de l'amplificateur idéal dans la majorité des montages.

Le schéma équivalent de l'amplificateur devient donc dans ce cas :



En conséquence, la résistance d'entrée étant infinie, les courants i_+ et i_- de l'amplificateur sont nuls.

1.6 Caractéristiques conventionnellement utilisées.

Les caractéristiques les plus souvent employées sont celles de l'amplificateur opérationnel parfait :

$R_e = \infty$ $\quad$ $R_S = 0$ $\quad$ $A_d = \infty$ $\quad$ et $V_{e+} \approx V_{e-}$ soit $V_d \approx 0$

Conséquence : Puisque Re = ∞, il n'y a pas de courant à rentrer dans l'amplificateur opérationnel.
Donc $i_+ = i_- = 0$.

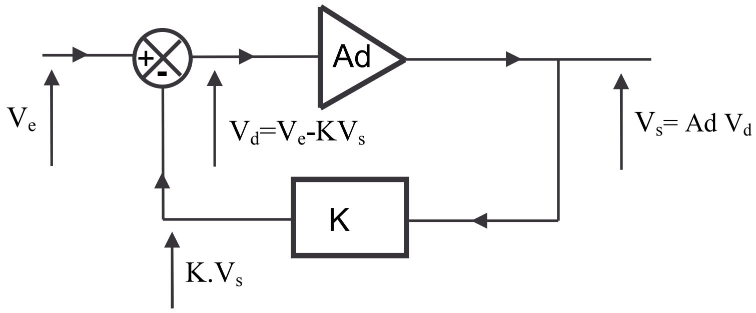
En résumé :

Amplificateur Idéal : $\mathbf{R_e = \infty}$ $\quad$ $\mathbf{R_S = 0}$ $\quad$ $\mathbf{A_d = \infty}$ $\quad$ $\mathbf{V_d \approx 0}$ $\quad$ $\mathbf{i_+ = i_- = 0}$

1.7 Nécessité d'un rebouclage entre la sortie et l'entrée inverseuse.

La valeur élevée du gain (environ 10^6) limite considérablement la plage de linéarité de l'amplificateur (la pente de la courbe de transfert étant A_d). Afin d'utiliser ce montage en amplificateur, il convient d'augmenter cette plage. Ceci ne peut se faire qu'en diminuant le gain global du montage, et ce, en utilisant un rebouclage. La grandeur amplifiée par le composant doit être une image de la soustraction analogique Ve – K Vs, K étant un coefficient obtenu par un réseau de résistances.

On réalisera donc une structure conforme au schéma suivant :



Nous pouvons lire sur ce schéma de principe les relations suivantes :

$$V_s = A_d\, V_d$$
$$V_d = V_e - K\, V_s$$

D'où nous tirons : $\dfrac{V_s}{V_e} = \dfrac{A_d}{1 + A_d K} = \dfrac{1}{K + \dfrac{1}{A_d}}$

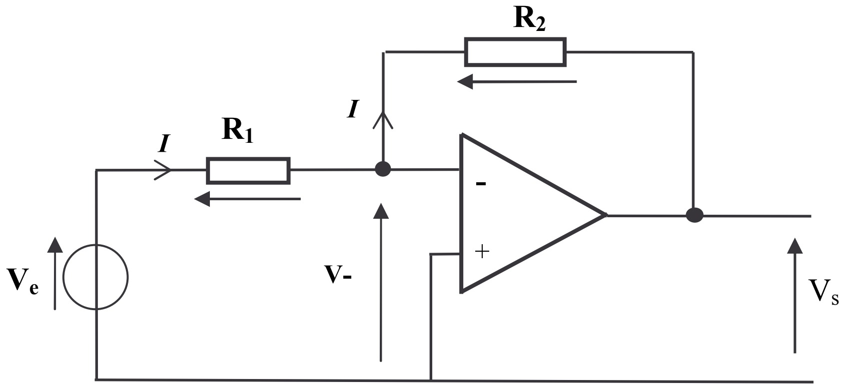
On s'aperçoit que lorsque Ad tend vers l'infini, le gain global du montage est $\frac{1}{K}$, donc **totalement indépendant de l'amplificateur opérationnel**. En choisissant $\frac{1}{K}$, on peut donc régler à sa convenance la largeur de la plage de linéarité. Le choix est désormais un compromis à trouver entre la valeur effective du gain et l'étendue de la linéarité désirée.

Remarque importante :

LE REBOUCLAGE D'UN AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL SE FAIT TOUJOURS SUR L'ENTREE INVERSEUSE

II-Les montages de Bases.

2.1 L'amplificateur inverseur.



Nous allons ici présenter une méthode utilisée pour déterminer le gain en tension; de nombreuses méthodes sont néanmoins applicables.

Il s'agit de déterminer l'amplification en tension $Av = \frac{V_S}{V_e}$.

Notons *I* le courant dans la résistance R_1, puisque $i_+ = i_- = 0$, ce courant se retrouve intégralement dans la résistance R_2. Nous avons introduit une variable supplémentaire qui pour être éliminer, nous oblige à établir deux relations entre V_s, V_e et *I*. Nous pouvons écrire pour cela deux équations de mailles en se servant du potentiel V_-. Il vient :

$V_e = R_1 I + V_-$
$V_s = - R_2 I + V_-$

Remarque : on peut se servir également de l'équation $V_s = - (R_1 + R_2) I + V_e$

Compte tenu des hypothèses vues précédemment $V_- = V_+ = 0$; nous obtenons donc :

$V_e = R_1 I \qquad V_s = -R_2 I \qquad \text{soit } V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e$

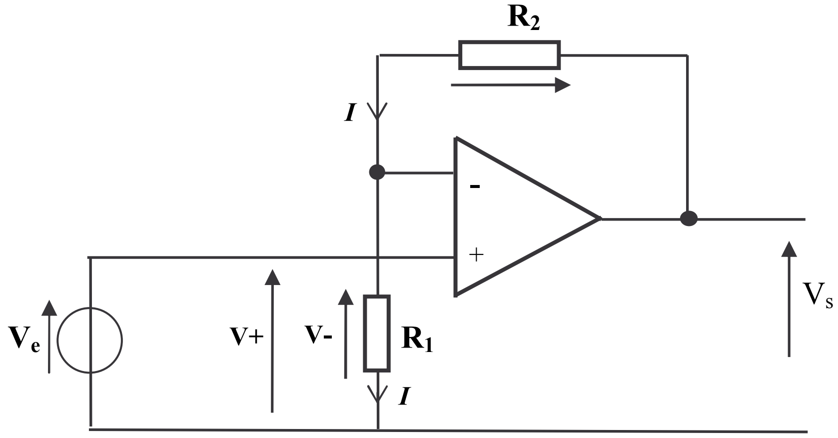
D'où

$$\boxed{Av = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}}$$

Le théorème de Millman convient très bien à ce type de montage. Ainsi en exprimant directement V- :

$$V_- = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = V_+ = 0 \quad d'où \quad \frac{V_e}{R_1} = -\frac{V_s}{R_2} \quad puis \quad V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e$$

2.2 L'amplificateur non-inverseur.



La méthode de résolution reste identique à la précédente; elle peut néanmoins se résumer à une méthode du pont diviseur nous avons aux bornes de la résistance R_1 :

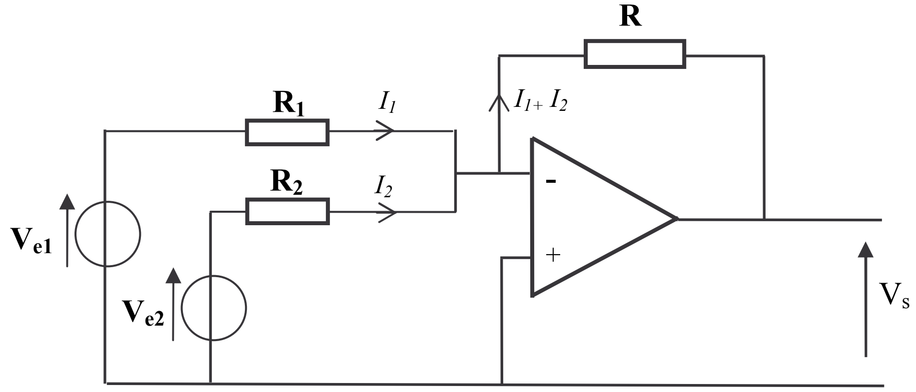
$V_- = \dfrac{R_1}{R_1 + R_2} V_S$ et comme $V_e = V_+ = V_-$ il vient $V_s = \dfrac{R_1 + R_2}{R_1} V_e = \left(1 + \dfrac{R_2}{R_1}\right) V_e$

$$Av = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Nous obtenons donc un gain positif, mais il reste constamment supérieur à 1.

2.3 Le montage sommateur-inverseur.

On considère ici deux sources de tensions en entrée :



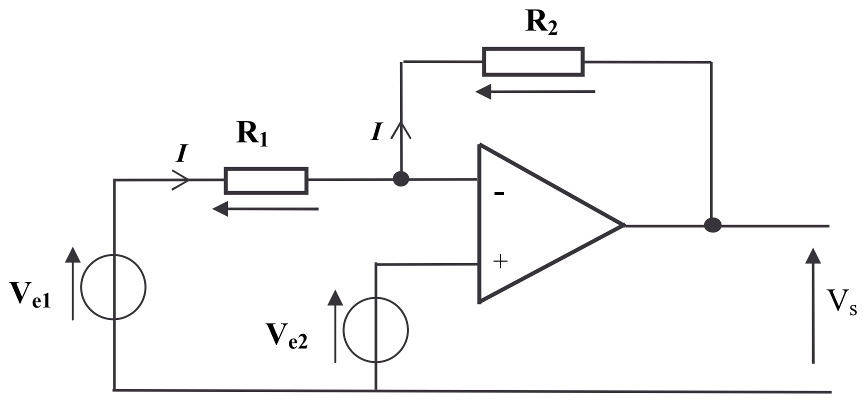
Nous pouvons écrire que le courant dans la résistance R est la somme des courants dans R_1 et R_2. Une démarche similaire au premier cas (inverseur simple) conduit alors au résultat suivant :

$$V_s = -R\left(\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2}\right)$$

Une utilisation du théorème de superposition permet aussi de donner une expression de V_s en référence au montage amplificateur inverseur :

$$V_s = (V_s)_{ve_2=0} + (V_s)_{ve_1=0} = V_{e1}\frac{-R}{R_1} + V_{e2}\frac{-R}{R_2} = -R\left(\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2}\right)$$

2.4 Le montage soustracteur.

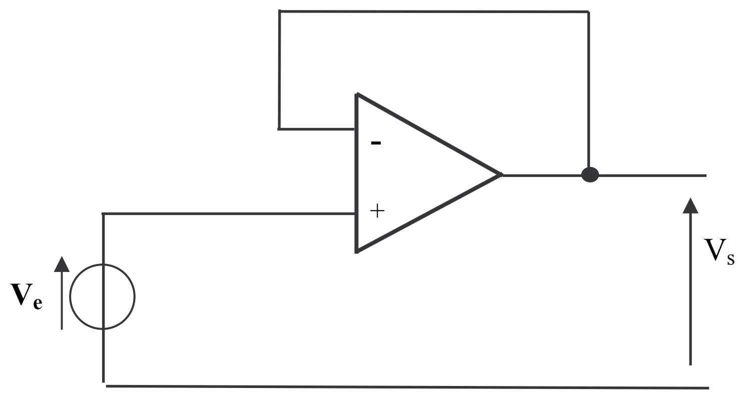


Il s'agit en fait d'un montage pratiquement identique au montage inverseur : il s'agit du même courant dans R_1 et R_2 (le courant $i_- = 0$). Il suffit d'écrire alors deux lois des mailles par l'intermédiaire du potentiel V_-, qui en l'occurrence est égal à V_{e2} , pour obtenir une relation entre V_s, V_{e1} et V_{e2}.

Il vient alors :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{e2} - \frac{R_2}{R_1}V_{e1}$$

2.5- Le montage suiveur.



Le résultat découle directement de la propriété $V_+ = V-$; nous avons en effet $V_e = V_+$ et $V_S = V_-$

$$V_S = V_e$$

Il est légitime de s'interroger sur l'intérêt d'un montage réalisant la fonction qu'un simple fil pourrait effectuer. En fait, l'intérêt de ce montage réside dans les qualités apportées par l'amplificateur opérationnel : ce composant a, nous l'avons vu, une très grande résistance d'entrée et une résistance de sortie quasiment nulle; si l'on calcule ces grandeurs dans le cas du montage suiveur, les résultats obtenus sont ceux de l'amplificateur opérationnel lui-même; en résumé, ce montage réalise une fonction de suiveur avec en plus une très grande résistance d'entrée et une très faible résistance de sortie. Ce montage s'avère donc particulièrement utile si l'on désire récupérer des informations sur un montage sans pour autant en altérer le fonctionnement.

III- Bande passante des montages à amplificateur opérationnels

3.1 Rappel : l'amplificateur en boucle ouverte :

Nous avons vu que la relation linéaire entre l'entrée et la sortie de l'amplificateur est $V_s = A_d\, V_d$

Ad étant appelée *Amplification Différentielle* ou encore, *Gain en Boucle Ouverte*.

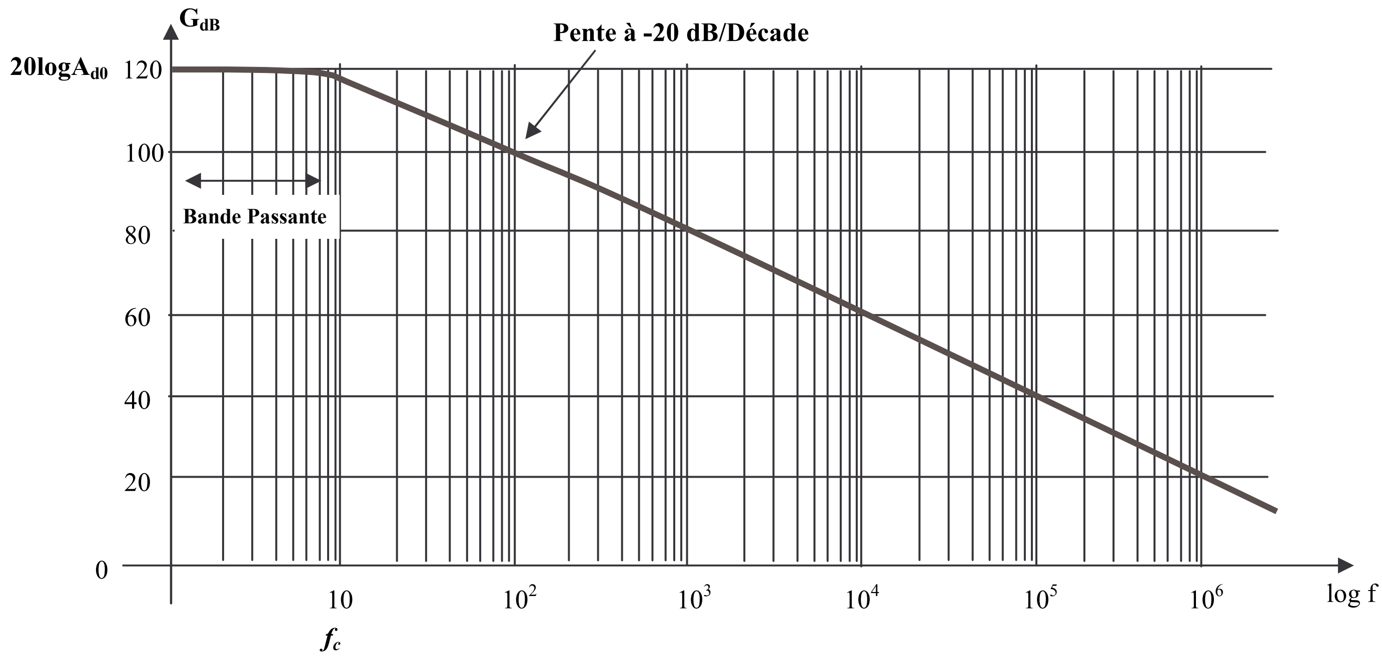
Cette écriture laisse supposer que ce gain reste constant en fonction de la fréquence du signal injecté à l'entrée; cependant il n'en est rien : de fait nous sommes amenés à écrire une relation complexe exprimant la variation de l'amplification différentielle en fonction de la fréquence du signal :

$$A_d = \underline{A}_d = \frac{A_{d0}}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

Où - A_{d0} est l'amplification maximale,
- f la fréquence du signal,
- f_c la fréquence de coupure du composant.

La valeur du gain A_{d0} est très élevée, et celle de f_c très faible; dans le cas général nous avons $A_{d0} = 10^6$ et $f_c = 10$ Hz.

L'étude du Gain de cette fonction est $G_{dB} = 20\log|\underline{A}_d| = 20\log A_{d0} - 20\log\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_c^2}}$



Cette courbe nous permet d'avoir des informations intéressantes sur le comportement fréquentiel du système : ainsi la pente de la fonction de transfert après la fréquence de coupure est de - 20 dB/décade soit la caractéristique d'une **fonction passe-bas du premier ordre**. Nous en concluons donc que la bande passante de ce système est :

$$\text{Bande Passante} = [0\ , f_c]$$

Nous pouvons donc constater que la bande passante du système en boucle ouverte est très faible et qu'il convient donc peu (sous cette configuration) à des applications amplificatrices.

3.2 Relation Gain-Bande Passante :

Définition : *"Quel que soit l'amplificateur opérationnel utilisé et sous quelque configuration que ce soit, le produit Gain-Bande Passante est toujours constant"*.

En résumé :

$$|Av|\ B.P. = A_{d0} \cdot f_C = cte$$

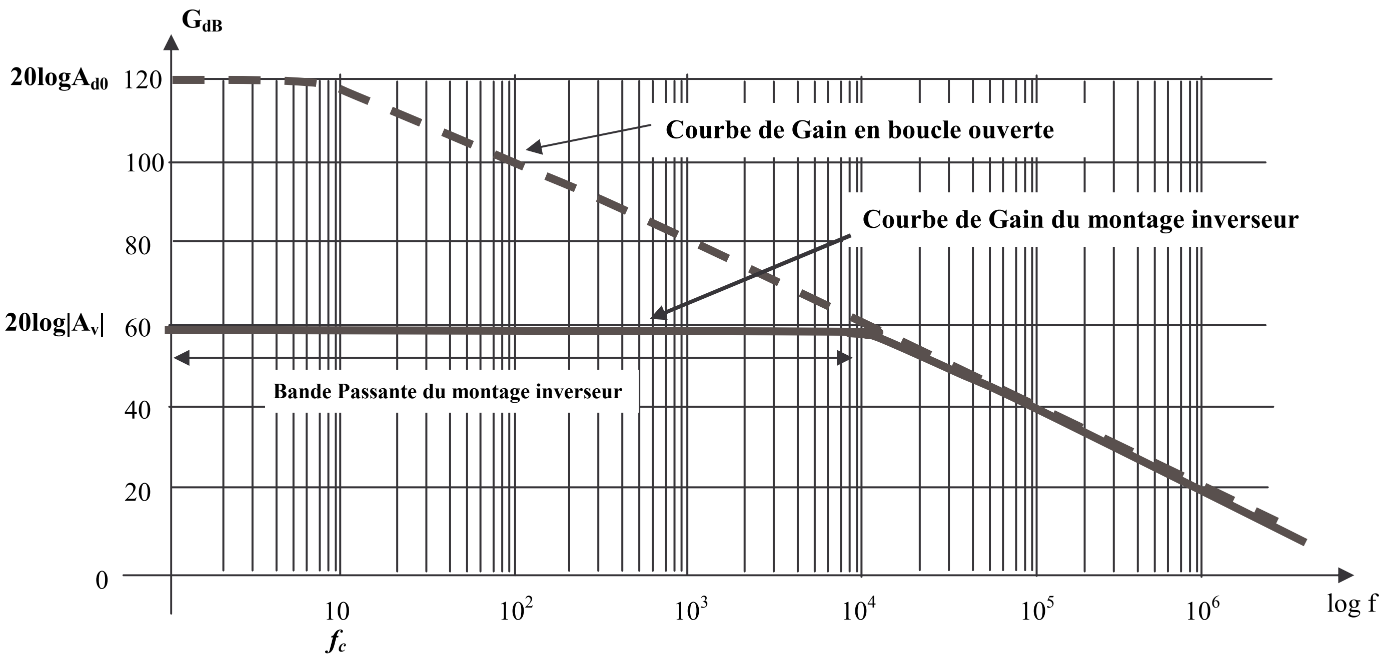
Si nous voulons augmenter la bande passante, il faut diminuer le gain. C'est ce que nous allons faire en rebouclant l'amplificateur opérationnel.

Application : Montage inverseur

L'amplification vaut $Av = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$

Choisissons R_2 = 100 kΩ et R_1 = 100 Ω, nous obtenons A_V = - 1000.

Avec ce montage nous obtenons une bande passante de $\frac{A_{d0} f_c}{|Av|} = \frac{10^7}{10^3}$, soit une bande passante de 10kHz.



Utilisant un seul étage amplificateur, si l'on désire obtenir un gain de 10^6, la bande passante du système serait de 10 Hz. Afin de conserver la bande passante, il convient donc de **répartir le gain** sur plusieurs étages en conservant la même bande passante sur tous (car il est facile de montrer que la bande passante résultante d'une chaîne amplificatrice est la bande passante de l'étage au plus fort gain).

Ainsi, pour obtenir un gain de 10^6 avec une bande passante de 10 kHz, il faut utiliser 2 étages avec un gain de 10^3 chacun.0