

TP : AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL II

On aborde dans ce T.P. le caractère réel d'un amplificateur opérationnel, en essayant de déterminer tout d'abord les valeurs de certains défauts dits *statiques* liés aux alimentations continues et aux dissymétries inévitables de l'amplificateur opérationnel : la tension de décalage V_d et les courants de polarisations I_{p+} et I_{p-} ...

Nous abordons ensuite la modélisation de l'amplificateur en régime dynamique et par conséquent ses limitations en fréquence et sa modélisation comme un système dynamique, continu et linéaire.

Nous examinons l'influence de ces défauts sur le fonctionnement de quelques montages simples (intégrateur, amplificateur, ...).

1 Présentation d'un modèle statique de l'amplificateur opérationnel

1.1 Modélisation de l'amplificateur opérationnel

L'amplificateur opérationnel est un circuit intégré qui comporte plusieurs étages ; Comme l'indique le schéma de principe de la figure 1 on peut en général décomposer l'AO en trois parties fondamentales :

- un étage d'entrée différentiel ;
- un étage d'amplification et de compensation qui comporte un condensateur ;
- un étage de sortie monté en PUSH-PULL.

Remarque : Les logiciels de simulation tels que SPICE utilise ce type de modélisation pour simuler un amplificateur opérationnel.

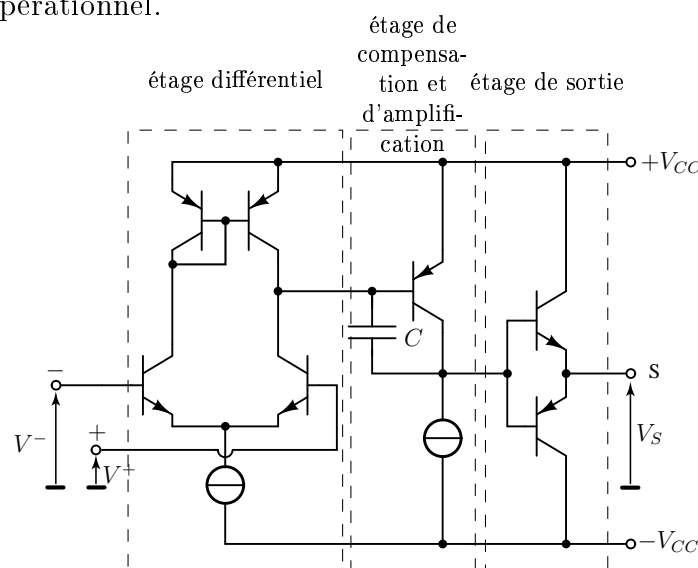


FIGURE 1 – Schéma interne d'un amplificateur opérationnel

Les différents défauts statiques que nous rencontrerons dans ce T.P. proviennent des dissymétries entre les différents transistors qui composent l'amplificateur opérationnel.

Nous étudierons les trois principaux défauts statiques suivants :

- la tension de décalage en entrée V_d ;
- les courants de polarisations I_{p+} et I_{p-} .

On supposera par ailleurs que les diverses impédances d'entrée et de sorties peuvent être considérées comme idéales.

On peut dans ce cas donner une représentation « boîte noire » de l'amplificateur opérationnel, qui ne détaille pas la constitution interne de l'A.O. mais permet tout de même de le modéliser comme un *amplificateur de tension différentielle*. On propose le modèle simple représenté figure 2 (ce n'est certainement pas le seul possible) pour l'étude des défauts statiques. En régime de fonctionnement linéaire, $\varepsilon_i = 0$.

Remarquons pour finir que le traitement théorique des défauts statiques peut se faire de manière séparée, grâce au théorème de superposition. La seule contrainte étant le fonctionnement linéaire de l'amplificateur opérationnel.

Dans la pratique on rencontre bien sûr les effets de ces trois défauts simultanément.

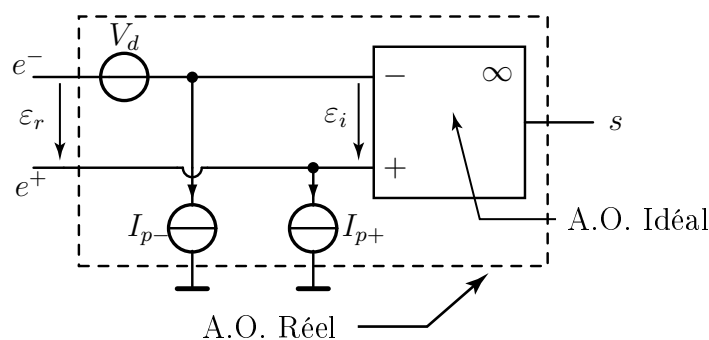


FIGURE 2 – Modélisation élémentaire d'un amplificateur opérationnel réel. En régime de fonctionnement linéaire, $\varepsilon_i = 0$.

1.2 Application : étude d'un amplificateur différentiel

1.2.1 Amplificateur opérationnel et définitions de base

1.2.1.1 Schéma

L'amplificateur opérationnel est lui même un amplificateur de différence, mais ses caractéristiques intrinsèques ne nous permettent pas de mesures directes avec les moyens du laboratoire, nous proposons donc un montage qui « dégrade » ses caractéristiques, nous permettant ainsi de réaliser des mesures plus facilement.

Le montage utilisé est celui de l'*amplificateur de différence* vu dans le T.P. A.O. 1 (figure 3). On peut le considérer comme un amplificateur de la différence de potentiel $e(t) = e_2(t) - e_1(t)$. On pourra négliger ici l'effet des courants de polarisation.

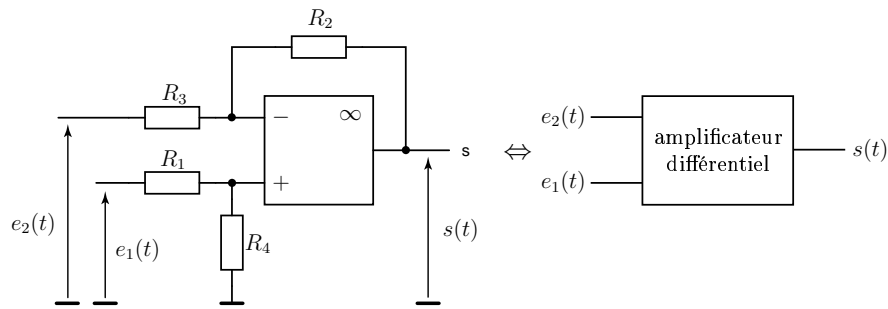


FIGURE 3 – Amplificateur de différence élémentaire.

1.2.1.2 Définitions et étude théorique

Un amplificateur différentiel réel n'amplifie pas exactement de la même manière le signal $e_1(t)$ et le signal $e_2(t)$. De plus il peut présenter en sortie, une tension décalée de V_0 de la tension amplifiée.

On peut écrire la tension de sortie de la forme $s(t) = A_1 \cdot e_1(t) - A_2 \cdot e_2(t) + V_0$, avec A_1 et A_2 les facteurs d'amplification respectifs des entrées 1 et 2 et V_0 la tension de décalage en sortie du montage.

☞ Montrer que l'on peut écrire $s(t)$ sous la forme :

$$s(t) = A_d \cdot [e_1(t) - e_2(t)] + A_c \cdot [e_1(t) + e_2(t)] + V_0$$

On définit alors plusieurs grandeurs importantes pour un amplificateur différentiel, qui permettent d'en quantifier les qualités :

- A_d : coefficient d'amplification différentielle ;
- A_c : coefficient d'amplification en mode commun
- V_0 : tension de décalage en sortie de l'amplificateur ;
- T.R.M.C. : taux de réjection de mode commun : $\text{T.R.M.C.} = 20 \log_{10} |A_d/A_c|$.

☞ Quelles devraient être les valeurs de A_c , de V_0 et du T.R.M.C. pour un amplificateur de différence idéal ?

☞ Dans le cas où l'A.O. utilisé dans cet amplificateur différentiel est idéal, donner les expressions de A_d et A_c pour le montage précédent, l'amplificateur opérationnel étant supposé fonctionner en régime linéaire.

☞ Que deviennent ces expressions si on réalise $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$?

1.2.2 Étude expérimentale

On prendra $R_3 = R_1 = 1 \text{ K}\Omega$ et $R_2 = R_4 = 10 \text{ K}\Omega$, R_4 étant une boîte à décades.

1.2.2.1 Mesure de V_0

☞ Réunir les entrées 1 et 2 de l'amplificateur différentiel à la masse et mesurer la tension de sortie du montage avec un multimètre.

☞ Quelle est l'origine de ce défaut ?

1.2.2.2 Mesure de A_c

- ☞ Réunir les entrées 1 et 2 et imposer une tension commune continue $x_e = 0,1$ V. Mesurer v_s et en déduire A_c .
- ☞ Quelles peuvent être les origines de cette valeur ? (Il y a deux origines indépendantes).

1.2.2.3 Mesure de A_d

- ☞ Relier l'entrée 1 à la masse et imposer un potentiel raisonnable à l'entrée 2. Relever la valeur de v_s pour quelques valeurs de v_2 , en déduire la valeur de A_d puis la valeur de T.R.M.C.

1.2.3 Conclusion – Origine des défauts

- ☞ Conclure sur l'origine des défauts caractérisés par V_0 et A_c . Proposer des solutions pour les compenser.
- ☞ Relever sur les tables de caractéristiques du constructeur, à titre de comparaison seulement, les valeurs du T.R.M.C. d'un A.O. TL081 ou 741. (Remarquer que les mesures faites précédemment ne donnent pas accès à cette grandeur pour l'A.O. utilisé, mais seulement au T.R.M.C. du montage différentiel complet).

2 Détermination des défauts statiques de l'amplificateur opérationnel

Nous nous proposons de mesurer les valeurs des trois défauts statiques présentés plus haut dans le cas de l'amplificateur opérationnel $\mu A741$.

2.1 Mesure de la tension de décalage en entrée V_d

2.1.1 Montage en boucle ouverte

2.1.1.1 Étude théorique

- ☞ On relie les entrées e^+ et e^- de l'amplificateur opérationnel réel à la masse (figure 2). Quelle est l'expression de la tension de sortie en régime continu ?
- ☞ Quelle doit être la valeur de V_S ?

2.1.1.2 Mesures

- ☞ Réaliser les conditions de la question précédente. Mesurer la valeur de V_s . Conclure.
- ☞ Quelle est la seule information¹ que l'on peut déduire concernant V_d ?

1. La valeur et le signe de V_d sont différentes d'un A.O. à l'autre.

2.1.2 Montage en boucle fermée

2.1.2.1 Étude théorique

- ☞ On impose cette fois $e^+ = 0$ et on réalise un bouclage entre l'entrée réelle e^- et la sortie S. Quelle est alors l'expression de la tension de sortie en régime continu?

2.1.2.2 Mesures

- ☞ Réaliser les conditions de la question précédente. Mesurer la valeur de V_s à l'aide du multimètre pour l'A.O. $\mu A741$. En déduire la valeur de V_d .
- ☞ Conclure et expliquer. Comparer avec les données du constructeur.

2.2 Mesure des courants de polarisation

2.2.1 Mesure du courant I_{p-}

Si on ne possède pas de nanoampèremètre, les mesures directes sont relativement délicates. On réalise alors le montage représenté figure 4 avec C un condensateur non polarisé de capacité 100 à 1000 nF. On utilisera la table traçante ou une carte d'acquisition. On fera les mesures pour un A.O. TL081.

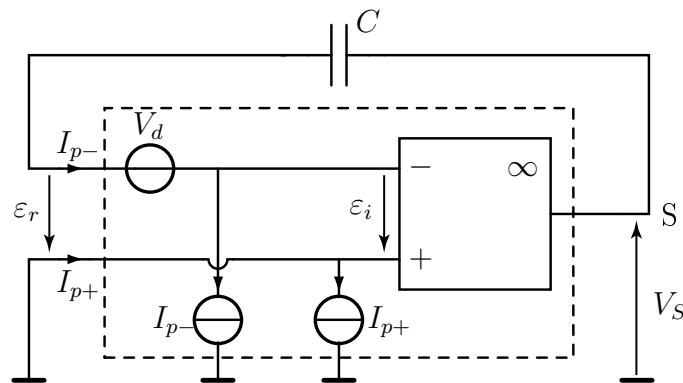


FIGURE 4 – Montage permettant de mesurer le courant de polarisation I_{p-} .

- ☞ Exprimer la tension V_s en fonction du courant I_{p-} , de C , de V_d et du temps t .
- ☞ Relever les variations de V_s en fonction du temps à l'aide d'une table traçante ou d'une carte d'acquisition. On prendra soin de décharger le condensateur ($q(0) = 0$) en le court-circuitant avant de démarrer l'enregistrement de V_s .
- ☞ Analyser les résultats et en déduire la valeur de I_{p-} .
- ☞ Comparer les résultats pour les deux types d'A.O. Conclure. Quelle technologie utilise-t-on pour l'étage d'entrée du TL081?

2.2.2 Mesure du courant I_{p+}

- ☞ Comment faut-il modifier le schéma de la figure 4 pour pouvoir mesurer cette fois le courant I_{p+} avec un condensateur et en assurant le fonctionnement linéaire de l'amplificateur opérationnel ?
- ☞ Exprimer cette fois la tension V_S en fonction du courant I_{p+} , de C , de V_d et du temps t .
- ☞ Modifier le montage de la figure 4 et relever les variations de V_S en fonction du temps.
- ☞ Analyser les résultats et en déduire la valeur de I_{p+} .

2.2.3 Conclusion : courant de polarisation I_p

Le constructeur indique en général un courant de polarisation moyen I_p donné par $I_p = (|I_{p+}| + |I_{p-}|)/2$.

- ☞ D'après les mesures précédentes, déterminer le courant de polarisation I_p et comparer les résultats avec les données du constructeur.

3 Influence et compensation des défauts statiques pour un amplificateur inverseur

Nous allons étudier l'influence des défauts statiques sur le comportement du montage amplificateur inverseur étudié sommairement dans le T.P. A.O.1 et essayer de montrer comment l'on peut compenser ces défauts.

Le principe de superposition nous permet d'étudier séparément chaque défaut.

Nous ferons les hypothèses importantes suivantes :

- V_d , I_{p+} et I_{p-} sont des grandeurs constantes ;
- l'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire, sauf s'il atteint une saturation lors de l'évolution d'une tension particulière.

3.1 Étude théorique de l'influence des défauts statiques

On se propose d'étudier le montage représenté figure 5

3.1.1 Influence des courants de polarisations I_{p+} et I_{p-}

On suppose ici que $V_d = 0$ et $I_{p+} = I_{p-}$.

- ☞ Montrer que le circuit se comporte bien comme un amplificateur inverseur idéal si $R_3 = R_1 // R_2$.
- ☞ Quelle valeur peut-on choisir ici pour R_3 ?

3.1.2 Influence de la tension de décalage V_d

On suppose ici que R_3 précédemment calculée permet de compenser les courants de polarisation. Ceci revient à écrire : $I_{p+} = I_{p-} = 0$ mais $V_d \neq 0$. (Théorème de superposition).

- ☞ Montrer que, tant que le fonctionnement de l'A.O. est linéaire, V_s peut s'écrire :

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} U_e - V_d \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

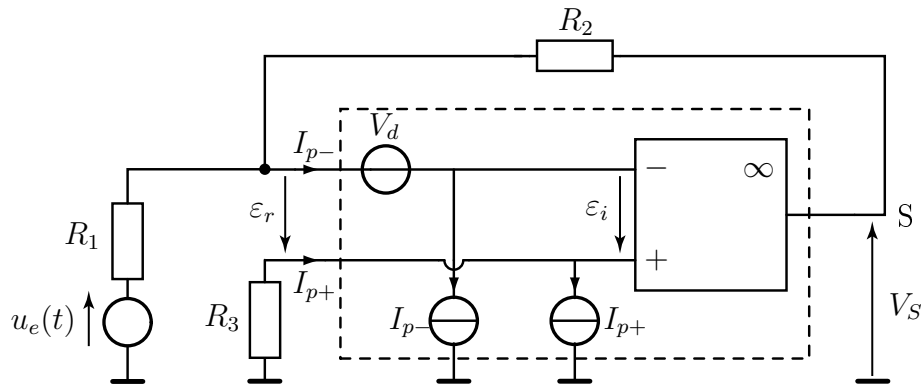


FIGURE 5 – Influence des défauts statiques sur le montage amplificateur inverseur. On donne $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$.

3.2 Étude pratique de l'influence des défauts

3.2.1 Compensation de la tension de décalage

- ☞ Placer la résistance R_3 de valeur déterminée précédemment, entre la patte + de l'A.O. et la masse.
- ☞ Remplacer le générateur d'attaque par un court-circuit : $U_e = 0$. Mesurer V_S en sortie du montage, en déduire V_d .
- ☞ Placer un potentiomètre P de $10 \text{ k}\Omega$ entre les pattes 1 et 5 de l'amplificateur opérationnel (cf. schéma 6), la patte médiane du potentiomètre étant connectée à l'alimentation $-V_{cc}$, c'est à dire à la patte 4. On ajuste ensuite le potentiomètre jusqu'à ce que la tension de sortie soit nulle. On fera le réglage à l'aide d'un multimètre. Ce réglage est difficile et délicat, de plus il n'est pas stable, la moindre dérive thermique le perturbe. Il suffit pour s'en convaincre de placer son doigt sur l'A.O.

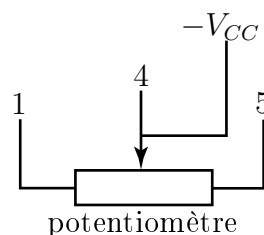


FIGURE 6 – Potentiomètre de compensation d'offset.

3.2.2 Influence de la tension de décalage sur le montage amplificateur inverseur

On reprend le montage précédent, le réglage d'offset ayant été effectué.

- ☞ Remplacer le court-circuit par un générateur de tension continue de f.e.m. $U_e = 10 \text{ mV}$ (mesurée à vide à l'aide du multimètre).
- ☞ Mesurer la tension de sortie V_S à l'aide du multimètre.

- ☞ Dérégler le potentiomètre P et mesurer à nouveau V_S .
- ☞ Comparer dans ce cas les mesures avec la partie théorique précédente. Conclure sur l'effet de tension de décalage dans le cas du montage amplificateur inverseur.
- ☞ Si on ne compense pas la tension de décalage, est-il possible d'amplifier des tensions U_e de l'ordre de V_d avec le montage amplificateur inverseur?

4 Modélisation dynamique de l'amplificateur opérationnel

Les amplificateur opérationnel sont composés d'au moins trois étages internes (cf. présentation), par conséquent leur réponse dynamique en fonctionnement linéaire devrait être celle d'un système linéaire, passe-bas, d'ordre 3 au moins.

Les amplificateurs opérationnels sont, dans la plus grande partie des cas, équipés d'un étage de compensation (condensateur C) qui permet d'obtenir une fonction de transfert en boucle ouverte d'un ordre plus bas.

On se propose d'étudier dans cette partie, la réponse dynamique de l'A.O. en boucle ouvert (de manière indirecte).

4.1 Étude de la fonction de transfert en boucle ouvert

Les manipulations du premier T.P. sur l'amplificateur opérationnel ont montré que son fonctionnement ne pouvait pas être stable en boucle ouverte (du fait de son facteur d'amplification A_0 très important). On se propose par conséquent d'accéder de manière indirecte à sa fonction de transfert en boucle ouvert, à l'aide du montage représenté figure 7.

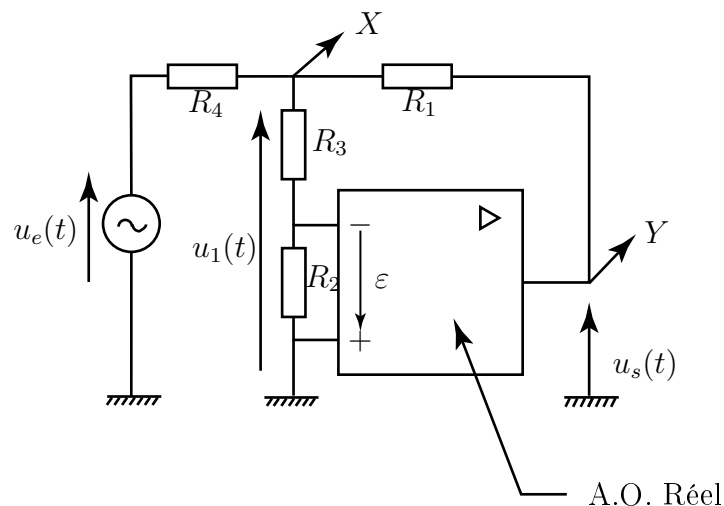


FIGURE 7 – Modélisation dynamique de l'amplificateur opérationnel, avec $R_1 = R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$.

4.1.1 Étude théorique

- ☞ Établir le lien entre la fonction de transfert $\underline{A}_v(j\omega) = \underline{U}_S/\underline{\varepsilon}$ de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte et la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = \underline{U}_S/\underline{U}_1$.

4.1.2 Expérimentation (avec TL081 uniquement)

Nous relevons maintenant les diagrammes de Bode de la fonction de transfert $\underline{H}(j\omega)$. Pour cela, on tiendra compte des remarques faites dans le T.P. sur le filtrage. On utilisera ici l'oscilloscope pour faire les mesures de déphasage.

- ☞ Réaliser le montage représenté figure 7. Exciter en entrée par un signal sinusoïdal d'amplitude convenable.
- ☞ Balayer en fréquence et observer l'allure de la réponse du filtre. Repérer les régions du spectre nécessitant plus de mesures que d'autres.
- ☞ Relever de manière précise les diagrammes de Bode du montage (une dizaine de points bien répartis). On prendra garde aux faibles fréquences.

4.1.3 Exploitation

- ☞ Représenter le diagramme de Bode du gain en boucle ouverte de l'amplificateur opérationnel sur papier semi-logarithmique.
- ☞ En déduire la fréquence de coupure en boucle ouverte f_0 , ainsi que l'amplification statique en tension A_{v0} .
- ☞ Calculer le produit $A_{v0} \times f_c$. Comparer les résultats avec ceux indiqués par le constructeur.

4.1.4 Conclusion

- ☞ Quel modèle dynamique peut-on proposer pour cet amplificateur opérationnel compensé en fréquence ?