

FISA AE 3A

A mplification

On doit à George A. Philbrick vers 1938 le premier développement de « calculatrice analogique » baptisée « Polyphemus » en référence à la mythologie Grecque. C'est en 1943, que le terme « amplificateur opérationnel » est mentionné dans l'article « Analysis of Problems in Dynamics » de John R. Ragazzinni, rédigé avec le support technique de Philbrick pour le compte d'un projet « U.S. National Defense Research Council ». Cet article ne sera publié qu'en Mai 1947, alors que le premier amplificateur opérationnel à tubes le « K2-W tubes » est finalisé en 1952 par l'Institut de recherches George A. Philbrick. Une décennie plus tard, en 1963, Bob Widlar conçoit la première version d'A.O à base de neuf transistors: le "μA702" commercialisé par « Fairchild Semiconducteurs » dont les tensions d'alimentation ne sont pas encore symétriques (+12V et -6V) mais dont le prix de 300\$ limite son application au marché aéronautique et militaire. En 1965, Widlar améliore son architecture en bande passante, gain et courants de polarisation et présente le « μA709 » qui offre des tensions d'alimentations symétriques (+15V et -15V). Le succès commercial est tel qu'en 1969 le prix se situe en dessous des 2\$. La série des « LM101 » incluant une protection contre les court-circuits et une compensation en fréquence est présentée en 1967, et la version hybride « LH101 » avec capacité intégrée dans le boîtier. La version « μA741 » avec compensation interne est proposée en Mai 1968 par « Fairchild » avec le succès que l'on connaît...En 1974, « Raytheon Semiconductors » présente le « RC4558 », premier boîtier intégrant deux A.O. similaires au 741. La même année « National Semiconductor » commercialise le « LM324 », quadruple A.O. toujours sur la base du 741 mais avec l'originalité de présenter une alimentation unipolaire. Le succès de l'architecture du 741 conduiront Bob Widlar à la retraite en 1970 à moins de trente ans. Consultant, il développera d'autres architectures et s'éteint à 53 ans le 27 Février 1991.

Circuit de base des montages analogiques ou numériques, l'Amplificateur Opérationnel, abrégé A.O par la suite, est un circuit actif qui nécessite des sources d'alimentation (par opposition aux circuits passifs). Son champ d'applications s'étend depuis le traitement de grandeurs électriques, tension ou courant, (amplification, conversion, filtrage) issues de capteurs (microphones, thermocouples, photopiles, interrupteurs) jusqu'à la génération de signaux (par exemple oscillateurs sinusoïdaux ou numériques) capables de commander divers actionneurs (moteurs, haut-parleurs, résistances chauffantes, relais, etc...).

Dans ce chapitre, l'A.O est présenté depuis sa description analytique et son modèle électrique équivalent nécessaires à l'étude des deux régimes de fonctionnement : saturé ou linéaire avec respectivement une application en électronique numérique ou analogique.

I. –AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

Utilisé en tant que « système analogique », l'Amplificateur Opérationnel, composant ACTIF noté A.O., présente la propriété de délivrer en sortie un signal (tension ou courant) proportionnel à l'amplitude de :

- la grandeur (tension ou courant) présente en entrée,
- la somme de plusieurs grandeurs,
- la dérivée ou l'intégrale d'une grandeur.

L'ensemble de ces caractéristiques lui ont valu de nombreuses utilisations dans la résolution « analogique » d'opérations à base d'équations différentielles d'où son qualificatif d'Amplificateur Opérationnel.

Dans l'étude des systèmes à base d'A.O, on définit deux types de modèles :

- **le modèle idéal**, qui permet de faire une analyse ou une synthèse très efficace des montages à base d'A.O,
- **le modèle réel**, qui traduit les caractéristiques réelles de l'A.O au sens des imperfections du modèle.

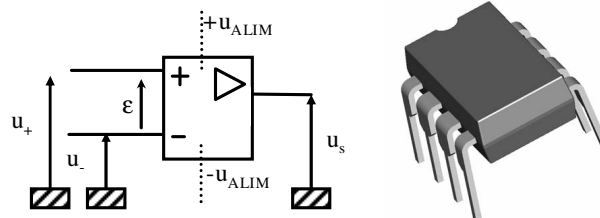
En pratique, il est toujours recommandé d'aborder la modélisation d'un système à base d'A.O en utilisant le modèle idéal, puis de prendre en considération les imperfections du composant dans l'identification des valeurs des éléments passifs (résistances, condensateur, ..) ou encore pour minimiser les effets des imperfections de l'A.O sur les performances globales du système.

I.1.- Symbole et représentation

L'amplificateur opérationnel est un composant ACTIF auquel on associe « au moins » 5 broches (ou plots de connexion) correspondant à :

- deux entrées, respectivement notées u_+ et u_- ,
- une sortie, notée u_s
- une tension de polarisation positive, notée $+u_{ALIM}$
- une tension de polarisation négative, notée $-u_{ALIM}$

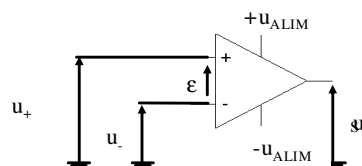
Le symbole électrique de l'A.O est :



Remarques sur la représentation schématique :

1) Par convention, on ne **représentera plus ni les tensions d'alimentation**, ni la connexion au potentiel de référence commune, ni les générateurs de tension en entrée du montage.

2) Dans certains ouvrages (ou en notation anglosaxonne) on trouve encore le symbole électrique de l'A.O associé à un triangle traduisant la caractéristique unidirectionnelle du composant.



figure(\ref{aost})

I.2.- Repérage des entrées/sortie

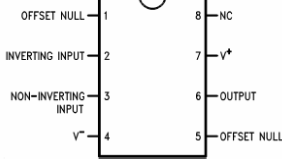
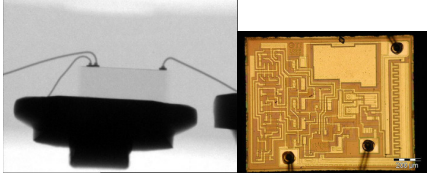
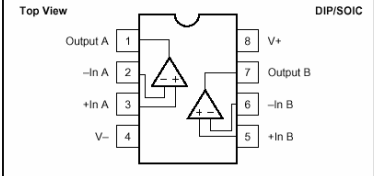
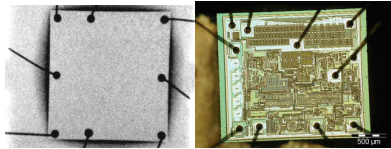
La plupart des composants électroniques fabriqués sur la base d'un semi-conducteur (silicium, germanium,..) sont ensuite encapsulés dans différents types de boîtiers («package» en anglais) qui assurent une connexion de la puce vers la circuit imprimé tout en garantissant la tenue mécanique et le caractère hermétique vis-à-vis de l'environnement extérieur.

L'assignation géographique des différentes entrées et sorties d'un composant sont données par la fiche technique du composant (data sheet) où il est conventionnel de repérer la broche (ou « pin ») numéro un par un point sur une encoche.

Sans se risquer à énoncer les différents types de boîtiers, on peut souligner que la plupart des A.O se présenteront dans le cas d'un boîtier de 8 broches :

- soit sous la forme unitaire,
- soit par paire

avec l'assignation conventionnelle détaillée ci-dessous et extraite d'un datasheet composant.

Boitier unitaire	Dual-In-Line or S.O. Package 	 Vue rayons X et vue optique
Boitier double	PIN CONFIGURATION Top View  DIP/SOIC	 Vue rayons X et vue optique

I.3.- Architecture et équation de fonctionnement

En pratique, **il n'est aucunement nécessaire de connaître la structure interne d'un A.O** présenté ci-dessous pour en déduire l'équation linéaire reliant la sortie aux entrées différentielles.

On associe donc à tout amplificateur opérationnel le modèle comportemental mis sous la forme :

- d'une équation algébrique de variables dans l'espace des fréquences (ou des pulsations), avec un coefficient de proportionnalité $A(f)$

$$u_s(f) = A(f)(u_+ - u_-) = A(f)\mathcal{E}(f)$$

- d'une équation différentielle d'ordre un dans l'espace temps, équation présentant des analogies avec l'équation de la tension aux bornes de la capacité dans un filtre passe-bas type réseau RC :

$$\tau_c \frac{du_s}{dt} + u_s = A_0 \mathcal{E}$$

avec :

u_s	:	tension de sortie
u_+	:	tension sur l'entrée non inverseuse
u_-	:	tension sur l'entrée inverseuse
$\mathcal{E}$	:	tension différentielle d'entrée.
$\underline{A}$	:	fonction complexe de la variable pulsation radiale associée au gain différentiel en boucle ouverte de l'A.O, définie par :

boucle ouverte de l'A.O, définie par :

$$\underline{A}(x) = \frac{A_0}{1 + jx} \quad \text{avec} \quad x = \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{f}{f_c}$$

où : A_0 grandeur sans unité est le gain différentiel statique obtenu lorsque ω tend vers zéro (valeur typique comprise entre 10^4 , 10^7).

τ_c constante de temps de l'A.O, dont l'ordre de grandeur est la dizaine de millisecondes

ω_c pulsation de coupure l'A.O et f_c fréquence de coupure l'A.O, définie par $f_c = \frac{1}{2\pi\tau_c}$.

OPA2604




www.burr-brown.com/databook/OPA2604.html

Dual FET-Input, Low Distortion OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- LOW DISTORTION: 0.0003% at 1kHz
- LOW NOISE: 10nV/√Hz
- HIGH SLEW RATE: 25V/μs
- WIDE GAIN-BANDWIDTH: 20MHz
- UNITY-GAIN STABLE
- WIDE SUPPLY RANGE: $V_s = \pm 4.5$ to $\pm 24V$
- DRIVES 600Ω LOADS

APPLICATIONS

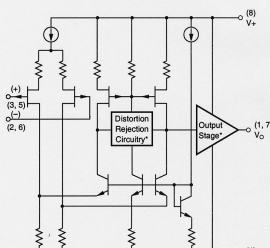
- PROFESSIONAL AUDIO EQUIPMENT
- PCM DAC I/V CONVERTER
- SPECTRAL ANALYSIS EQUIPMENT
- ACTIVE FILTERS
- TRANSDUCER AMPLIFIER
- DATA ACQUISITION

DESCRIPTION

The OPA2604 is a dual, FET-input operational amplifier designed for enhanced AC performance. Very low distortion, low noise and wide bandwidth provide superior performance in high quality audio and other applications requiring excellent dynamic performance.

New circuit techniques and special laser trimming of dynamic circuit performance yield very low harmonic distortion. The result is an op amp with exceptional sound quality. The low-noise FET input of the OPA2604 provides wide dynamic range, even with high source impedance. Offset voltage is laser-trimmed to minimize the need for interstage coupling capacitors.

The OPA2604 is available in 8-pin plastic mini-DIP and SO-8 surface-mount packages, specified for the -25°C to $+85^\circ\text{C}$ temperature range.



* Patents Granted:
#5053718, 5019789

Remarque sur la « signalétique des entrées » :

Le repérage des entrées par les signes «+» et «-» est identifiable à partir de l'expression précédente lorsque :

- une tension est appliquée entre u_+ et u_- avec l'entrée u_- reliée à la masse, la tension de sortie u_s est en phase avec cette tension d'entrée. On qualifie u_+ d'entrée « non inverseuse » ou « non déphaseuse » de l'amplificateur,
- une tension est appliquée entre u_- et u_+ avec l'entrée u_+ reliée à la masse, la tension de sortie u_s est en opposition de phase avec cette tension d'entrée (déphasage de π). On qualifie u_- d'entrée « inverseuse » de l'amplificateur.

I.4.- Limites de la modélisation : notions de saturations

L'expression du gain différentiel de l'A.O fonction de la pulsation radiale ω est applicable à un régime sinusoïdal permanent avec :

$$u_+(\omega) = U_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \text{ et } u_-(\omega) = U_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

L'expression linéaire $u_s = A_e$, est limitée par le caractère « composant actif » de l'A.O qui implique au minimum trois limites :

- la fonction ne peut être obtenue que sous réserve de polariser le composant au travers des deux sources de polarisation $+u_{ALIM}$ et $-u_{ALIM}$. Cela induit **une limite en tension** pour la tension de sortie. Le principe de conservation de l'énergie suppose que la tension u_s soit toujours inférieure ou égale aux limites de tension imposées par $+u_{ALIM}$ et $-u_{ALIM}$. En pratique les limites autorisées seront $+u_{SAT}$ et $-u_{SAT}$ (parfois notées $+S_M$ et $-S_M$) avec $|u_{SAT}| \leq |u_{ALIM}|$ (la différence étant en partie liée à la tension Base-Emetteur ou Grille-Drain des transistors constituant le composant),
- la fonction est indépendante de la charge connectée, sous réserve que le courant induit en sortie de l'A.O soit inférieur à i_{sMAX} , grandeur fournie par le constructeur qui représente le courant maximal débité par l'A.O. On définit la notion de **limitation en courant**,
- la fonction présente une **vitesse de variation maximale** définie par $\max \left[\frac{du_s}{dt} \right] < \sigma_{A.O}$, où le paramètre $\sigma_{A.O}$, donné par le constructeur, représente la vitesse maximum de balayage (slew rate en anglais).

Remarque concernant le modèle comportemental :

Dans les faits, l'équation dans l'espace des fréquences est représentée par l'expression :

$$u_s = A \left[(u_+ - u_-) + \frac{1}{\Gamma} \left(\frac{u_+ + u_-}{2} \right) \right]$$

où

* Γ représente le taux de réjection de mode commun (en anglais Common Mode Rejection Ratio) qui est très grand, d'où le caractère essentiellement différentiel de l'A.O,

* et les constantes de temps τ_1 et τ_2 de l'A.O définies telles que

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{(1 + j\omega\tau_0)(1 + j\omega\tau_1)(1 + j\omega\tau_2)} \text{ seront négligées.}$$

II. -CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ET MODELE EQUIVALENT

La modélisation comportementale est complétée par les aspects électriques essentiels du composant définis par les paramètres :

- **impédance différentielle d'entrée :**

On nomme ainsi l'impédance équivalente qui relie les deux entrées notées (+) et (-). Dans la bande passante de l'amplificateur (fréquence d'utilisation $f < f_0$) c'est une résistance que l'on notera R_e dont l'ordre de grandeur s'échelonne entre 100K Ω et 10M Ω selon la technologie. On observe également l'existence d'une impédance de mode commun qui relie l'entrée (+) [ou (-)] à

la masse, l'autre entrée n'étant pas connectée. Dans la bande passante de l'amplificateur, c'est une résistance R_{MC} qui est de l'ordre de 50 à 500 M Ω qui, compte tenu de sa valeur très élevée par rapport à R_e et aux impédances que l'on connecte sur l'amplificateur, n'intervient pratiquement pas dans les résultats numériques. On la néglige donc systématiquement.

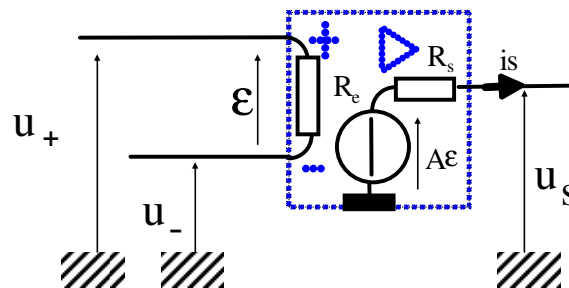
- **impédance de sortie :**

C'est l'impédance interne du générateur de tension contrôlé par la tension différentielle d'entrée $\underline{A}\epsilon$. Dans la bande passante de l'amplificateur, c'est une résistance R_s qui est de l'ordre de 10 à 100 Ω . On doit noter que sa valeur dépend de l'amplitude de la tension de sortie. Plus cette tension est élevée plus R_s est faible.

- **saturation en courant :**

La structure interne d'un A.O assure une protection contre les court-circuits, en limitant la valeur maximale du courant à i_{smax} (de l'ordre de 20 à 80mA pour un A.O d'instrumentation par opposition avec un A.O de puissance). En pratique, on peut déterminer la valeur de ce courant de saturation en connectant une charge résistive variable (potentiomètre) en sortie de l'A.O. En faisant diminuer cette charge, à partir d'une certaine valeur, apparaît un écrêtage (symétrique ou non) du signal, correspondant à une saturation en courant du système.

La figure suivante représente sous la forme d'un schéma électrique équivalent les caractéristiques de l'A.O.



On peut citer deux intérêts à la représentation en modèle équivalent :

- la résolution des équations du système par les équations classiques des réseaux électriques,
- la modélisation du système indépendamment de toute impédance de charge. En effet la mise en place d'une charge Z_L en sortie modifiera la tension de sortie u_s selon l'expression du pont diviseur de tension :

$$u_{s(Z_L \neq \infty)} = \frac{Z_L}{Z_L + R_s} \underline{A}\epsilon = \frac{Z_L}{Z_L + R_s} u_{s(Z_L = \infty)}$$

III. – CONCEPT D'AMPLIFICATEUR IDEAL

Il est d'usage de déterminer les caractéristiques d'un montage construit autour d'un A.O de considérer dans un premier temps l'A.O idéal.

Cette hypothèse de travail se traduit sur le symbole par la lettre ∞ positionnée sous le triangle.

Les hypothèses associées au modèle idéal sont :

- gain statique A_0 infini
- impédance d'entrée infinie (vis-à-vis des impédances utilisées dans les montages)
- impédance de sortie nulle (vis-à-vis des impédances utilisées dans les montages)
- fréquence de coupure f_c infinie (cette hypothèse qui permet de considérer $\underline{A}$ comme une fonction réelle, n'est vraie qu'en régime statique). Néanmoins, en régime dynamique, au vu des valeurs de f_c cette hypothèse semble difficilement justifiable. On reviendra ultérieurement sur cette limitation de

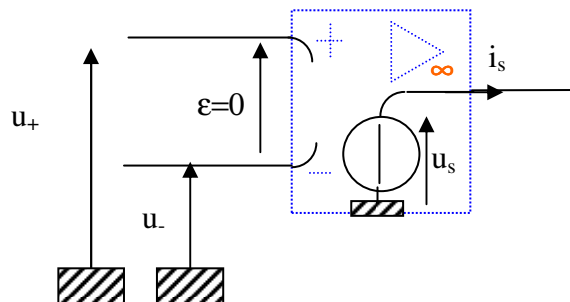
l'hypothèse A.O idéal dans le paragraphe relatif aux imperfections de l'A.O., ou bien on appliquera le modèle électrique équivalent « non idéal » (modèle réel présenté précédemment).

En régime linéaire, la relation $u_s = A_0 \varepsilon$ exprime une source parfaite de tension $A_0 \varepsilon$, avec A_0 qui tend vers l'infini. Comme $u_s = A_0 \varepsilon$ est une tension finie, on peut considérer que l'A.O idéal fait évoluer son potentiel de sortie pour garantir la relation $\varepsilon = 0$.

Dès lors un A.O idéal, en régime de linéarité, fait évoluer son potentiel de sortie pour garantir une entrée différentielle nulle, ce que traduit l'équation :

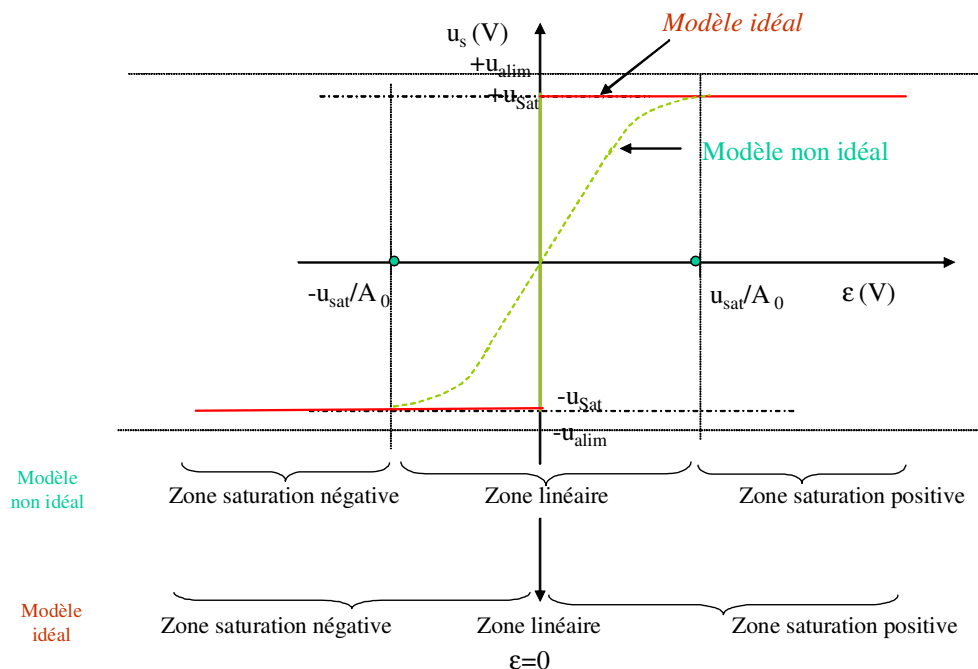
$$\varepsilon = 0$$

Dans le modèle idéal, la tension différentielle d'entrée peut se voir négligée par rapport aux autres potentiels présents, à condition d'être en régime linéaire : le générateur parfait de tension $G\varepsilon$ se retrouve remplacé par un générateur parfait de tension u_s limité dans sa capacité à fournir un courant inférieur au courant de saturation.



IV. – DOMAINES DE FONCTIONNEMENT : REGIME LINEAIRE ET SATURE

La caractéristique statique $u_s(\varepsilon)$ fait apparaître trois zones de fonctionnement de l'amplificateur suivant les valeurs de la tension d'entrée.



En fonctionnement en régime linéaire, la structure interne de l'A.O va modifier sa tension de sortie pour assurer un potentiel quasiment nul ($\varepsilon=0$) sur son entrée différentielle.

Type AOP Fabricant	A.O Idéal	LM741C National Semiconducteur	TL072C ST Microelectronics	OPA2604 Burr-Brown	THS 4062 C/I Texas Instruments
Paramètre					
Nombre d'A.O par boîtier	x	1	2	2	2
Gain en Boucle Ouvrte (G_0)	∞	200V/mV $\Rightarrow$ 106 dB	200V/mV $\Rightarrow$ 106 dB	100dB	15V/mV $\Rightarrow$ 83,5dB
f_T (Bandwidth)	∞	1.5 MHz	2 MHz	20MHz	50MHz
f_0 fréquence de coupure (Bande Passante en Boucle Ouvrte)	∞	Déduit de $f_T=f_0G_0$ $\Rightarrow$ 7.5 Hz	Déduit de $f_T=f_0G_0$ $\Rightarrow$ 20 Hz	Déduit de $f_T=f_0G_0$ $\Rightarrow$ 200 Hz	Déduit de $f_T=f_0G_0$ $\Rightarrow$ 3333 Hz
R_e (input resistance)	∞	$2 \cdot 10^6 \Omega$	$10^{12} \Omega$	$10^{12} \Omega$ en parallèle avec 8pF	$10^6 \Omega$ en parallèle avec 2pF
i_{smax}	∞	25mA	40mA	± 35 mA	115mA
Tension d'alimentation (Power supply, typical V_{cc})	alimentation bipolaire: $\pm U_{ALIM}$ alimentation unipolaire: $+U_{ALIM}$ et zéro Volts	± 15 V	± 15 V	± 15 V	± 15 V
Courant de polarisation (I_p polar current)	0	80nA	65pA	100pA	3 μ A
Courant d'offset (I_d offset current)	0	20nA	5pA	± 4 pA	75nA
Tension d'offset (input offset voltage)	0	2mV	3mV	± 1 mV	2,5mV
Vitesse maximum de balayage (Slew rate)	∞	0,5V/ μ s	16V/ μ s	25V/ μ s	400V/ μ s
Température d'utilisation	x	0°C à 70°C	0°C à 70°C (avec le suffixe M : gamme militaire -55°C à 125°C)	-40°C à +100°C	0°C à 70°C

