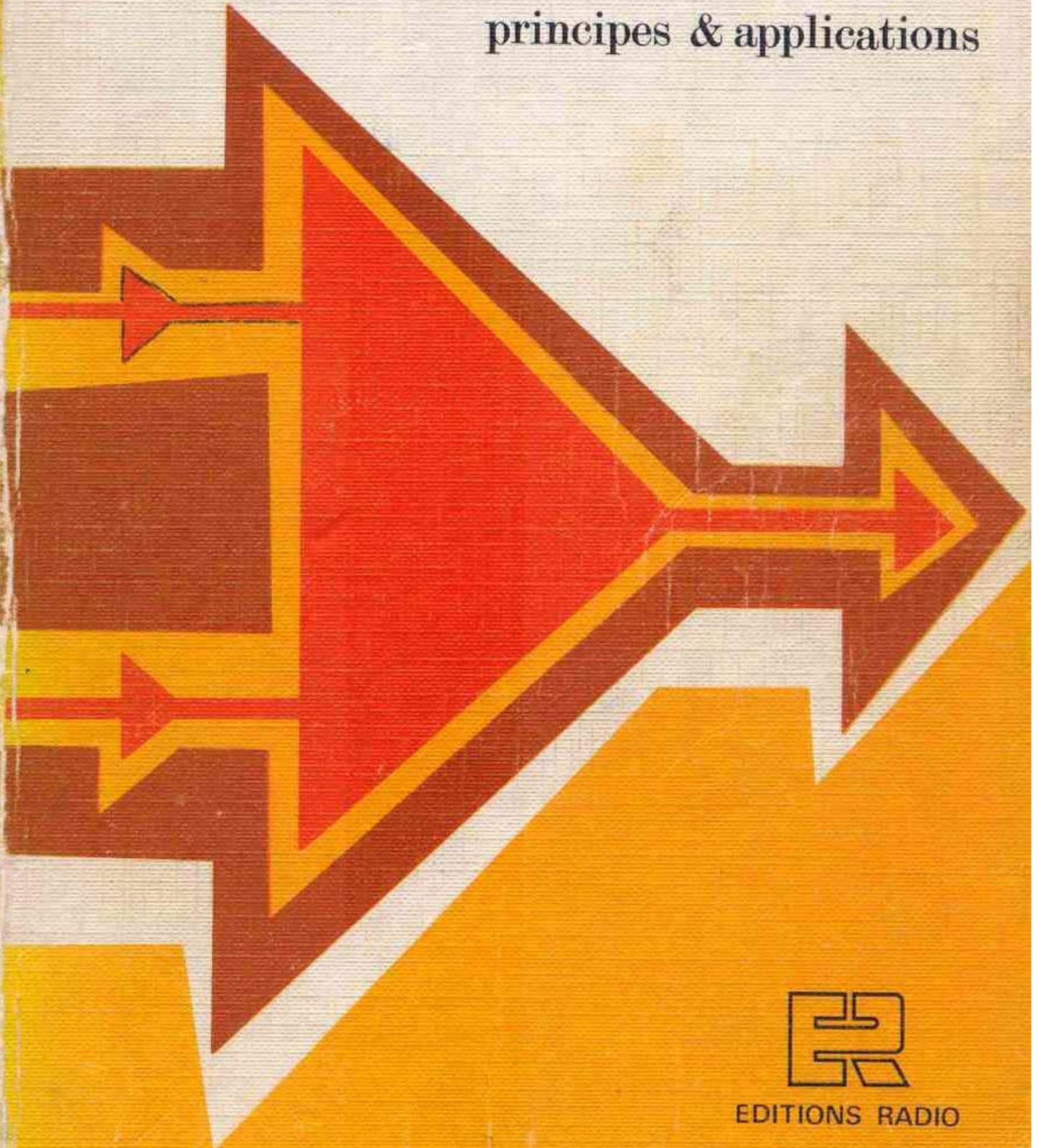


R. DAMAYE

l'amplificateur opérationnel

principes & applications



EDITIONS RADIO

au service de l'électronique d'aujourd'hui

1. électronique professionnelle



Journal hebdomadaire des cadres de l'industrie électronique



Revue technique bimensuelle d'applications industrielles de l'électronique



Revue mensuelle des ingénieurs et techniciens de l'électronique



Revue mensuelle des techniques et applications industrielles de l'automatisation

2. électronique grand public



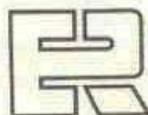
Magazine

Le magazine qui fait autorité par la valeur de ses études.

la nouvelle **REVUE DU SON**

DES IDEES ■ DES NOUVEAUTES ■ TOUS LES PRIX

La revue du véritable audiophile.



9, rue Jacob - 75006 PARIS
Tél. 033.13.65

502

L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

Principes et applications

A Claude GAGNE, mon ami.

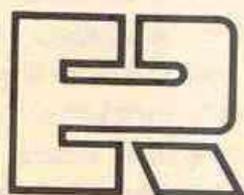
R. DAMAYE



L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

~~~~~ *principes et applications* ~~~~~

*3<sup>e</sup> édition*



**Editions Radio**

9, RUE JACOB - 75006 PARIS

TEL. 033.13.65 - C.C.P. 1164-34 PARIS

OPÉRATIONNEL  
L'AMPLIFICATEUR

|                                                |                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>©<br/>By Éditions Radio<br/>Paris, 1977</p> | <p>Imprimé en France<br/>Imprimerie Berger-Levrault, Nancy<br/>N° Éditeur : 720 - N° Imprimeur : 778303<br/>Dépôt légal : 3<sup>e</sup> trimestre 1977</p> |
|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

I.S.B.N. 2 7091 0720 1

## INTRODUCTION

*Celui qui, il y a seulement vingt ans, aurait imposé pour la réalisation d'un amplificateur les caractéristiques suivantes :*

- Gain en tension minimal : 50 000*
- Produit gain - largeur de bande : 1 MHz*
- Consommation : inférieure à 100 mW*
- Poids : quelques grammes*

*serait passé pour un joyeux farfelu. Pourtant, ces caractéristiques sont, à peu de choses près, celle du très classique  $\mu A$  709 ; tellement classique qu'il a été diffusé à des millions d'exemplaires et qu'il ne coûte actuellement que quelques francs.*

*Né avec le calculateur analogique pour permettre, en association avec des circuits extérieurs plus ou moins complexes, de constituer les modèles électriques des principales fonctions mathématiques, l'amplificateur opérationnel était à l'époque des tubes un engin cher, fragile et assez facilement affecté par diverses dérives et instabilités.*

*En 1952 découverte du transistor : les pessimistes disent que le nouveau composant ne pourra jamais être utilisé qu'en basse fréquence et pour des circuits à faible impédance d'entrée.*

*1959 voyait naître, chez Texas Instruments, le premier circuit intégré monolithique. C'était un circuit de logique : les pessimistes déclarent que la nouvelle technologie ne pourra jamais être utilisée — tout au moins d'une manière économique — que pour des circuits fonctionnant en tout ou rien et que la réalisation industrielle en grande série de circuits linéaires est tout à fait impensable.*

*Réponse aux pessimistes : en 1965, environ six ans seulement plus tard, Fairchild sort sa première série linéaire, la série 700 qui donnera*

naissance aux  $\mu A$  702,  $\mu A$  709,  $\mu A$  741,  $\mu A$  725, etc. Tandis que de nombreux autres constructeurs lancent sur le marché des amplificateurs opérationnels intégrés de plus en plus performants.

Parallèlement, les progrès effectués dans d'autres branches de la technique (circuits à haute densité de composants sub-miniatures, films minces, couches épaisses) permettaient la réalisation, généralement sous forme de boîtiers moulés, d'amplificateurs à hautes performances : gain et bande passantes élevés, très faibles tension et courant de décalage, courant de polarisation quasi nul, grâce aux dispositifs à transistors à effet de champ, et plus spécialement amplificateurs stabilisés par chopper ou à entrée par varactors, courants de sortie élevés, etc.

Tous ces perfectionnements devaient permettre d'étendre les possibilités de l'amplificateur opérationnel et en multiplier les applications. Cet élément est ainsi devenu d'un usage si courant que d'ensemble il est passé progressivement au rang de sous-ensemble puis de simple composant ; à tel point qu'actuellement on peut presque le considérer comme un transistor un peu particulier, dont, en version intégrée monolithique, il a les dimensions.

Décrire l'amplificateur opérationnel, en énoncer les qualités et les défauts, expliquer comment mettre à profit les premières et comment remédier aux seconds, mesurer ses caractéristiques puis en montrer les principales applications, tel est le but de cet ouvrage.

La présente étude ne se prétend pas exhaustive, ce n'est qu'un modeste ouvrage d'initiation. En cours de rédaction nous avons parfois eu l'impression de ne faire qu'effleurer le sujet. Pour compenser ces lacunes nous avons fait suivre chaque chapitre d'une bibliographie parfois même assez fournie. D'autres fois, au contraire, nous avons été amenés, pour permettre l'intelligence de ce qui allait suivre, de nous livrer à des considérations théoriques qui paraîtront peut-être un peu trop longues à certains. Ceci est en contradiction avec notre propre conception de l'ouvrage technique qui doit, selon nous, faire plus appel à l'esprit d'analogie et à l'intuition du lecteur qu'à la démonstration théorique laquelle, toujours à notre avis, est plutôt l'apanage du livre scientifique. Afin de permettre au lecteur surtout pratique, faisant confiance à une formule ou à un schéma de montage sans vouloir entrer dans les considérations d'ordre théorique qui les justifie, de voir d'un seul coup d'œil les passages qu'il peut sauter, nous avons demandé à l'imprimeur de composer ces parties en un caractère plus petit.

En ce qui concerne les applications, nous nous sommes plus particulièrement apesantis sur les plus classiques : circuits mathématiques et filtres actifs. Un nombre pratiquement illimité d'applications de l'amplificateur opérationnel sont possibles, nous nous sommes limités à décrire les plus courantes. Le lecteur pourra en découvrir des tas d'autres dans les ouvrages cités en référence, ou mieux dans son imagination.

## CHAPITRE PREMIER

# FAISONS CONNAISSANCE AVEC LES AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

Dans les premiers calculateurs analogiques — c'était encore à l'époque de l'électronique « chaude » — il était fait appel à des amplificateurs à courant continu à très grand gain de haute qualité auxquels, en les dotant de circuits de contre-réaction appropriés, il était possible de faire effectuer les principales opérations mathématiques : addition, soustraction, élévation à une puissance donnée, intégration, etc. et qui pour cette raison furent nommés amplificateurs « opérationnels ». Le développement que l'on sait des semiconducteurs, et en particulier des circuits intégrés, a permis la réalisation en grande série, et pour des prix modiques, d'amplificateurs de ce type pouvant égaler et même souvent dépasser les performances de leurs ancêtres à tubes. Compacts, stables, d'une très faible consommation, ces éléments ont rapidement pris rang de composants dans les montages électroniques actuels et le champ de leurs utilisations, qui n'a fait que croître, n'a de limites que celle de l'imagination des chercheurs. Mais que sont ces petites merveilles ? Quelles doivent en être les caractéristiques ? C'est ce que nous nous proposons de montrer dans ce premier chapitre.

### **Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel idéal.**

Nous montrerons dans l'avenir qu'avec un amplificateur opérationnel idéal, les caractéristiques du circuit dans lequel il est monté ne dépendent que de celles de la boucle de contre-réaction qui lui est

associée. Là se pose la question : « Quelles doivent être les particularités d'un amplificateur opérationnel parfait ? »

Pour atteindre la perfection, un amplificateur opérationnel devrait répondre aux critères suivants :

- Gain infini.
- Impédance d'entrée infinie, afin de ne pas surcharger les circuits amonts d'une part et, d'autre part, pour que cette impédance d'entrée n'influence en aucune manière les caractéristiques propres de la boucle de contre-réaction.
- Impédance de sortie nulle afin que la tension de sortie ne soit pas influencée par l'impédance de la charge.
- Bande passante infinie, afin de lui permettre de fonctionner à n'importe quelle fréquence sans apporter d'atténuation ou de déphasage aux fréquences élevées.
- Tension de sortie parfaitement nulle en l'absence de signal à l'entrée.

Nous verrons plus loin que si cet idéal n'a pu être atteint, il a été possible de réaliser des amplificateurs dont les caractéristiques sont suffisamment bonnes pour pouvoir, dans certains cas, négliger leur influence sur les circuits extérieurs.

## Définissons les caractéristiques statiques.

### GAIN EN BOUCLE OUVERTE.

Dans la majorité des cas, un amplificateur opérationnel est utilisé selon le schéma général de la figure 1-1, dans lequel  $Z_E$  et  $Z_{CR}$  peuvent être n'importe quel type d'impédance (résistances pures, condensateurs, parfois inductances — cela est très rare mais n'est pas exclu

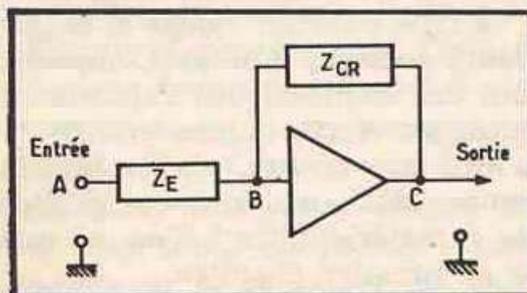


Fig. 1-1. — Schéma général de branchement d'un amplificateur opérationnel.

en principe — impédances complexes (circuits accordés, filtres, etc.) ou même par des éléments non linéaires : transistors, diodes, thermistances, résistances V.D.R., tout ce que l'on voudra. Le gain du montage est alors, répétons-le dans le cas d'un amplificateur opérationnel parfait, uniquement fonction des caractéristiques de la boucle : on parle alors de *gain en boucle fermée* ou parfois plus simplement *gain en boucle*. L'amplificateur opérationnel n'étant pas parfait il

possède un *gain propre fini* qui est nommé *gain en boucle ouverte*, symboliquement  $G_0$  ou  $A_0$ . Ce gain qui comme pour tout amplificateur est égal au rapport de la tension de sortie à la tension d'entrée en l'absence de toute boucle de réaction est donné par la formule :

$$G_0 = V_S / V_E$$

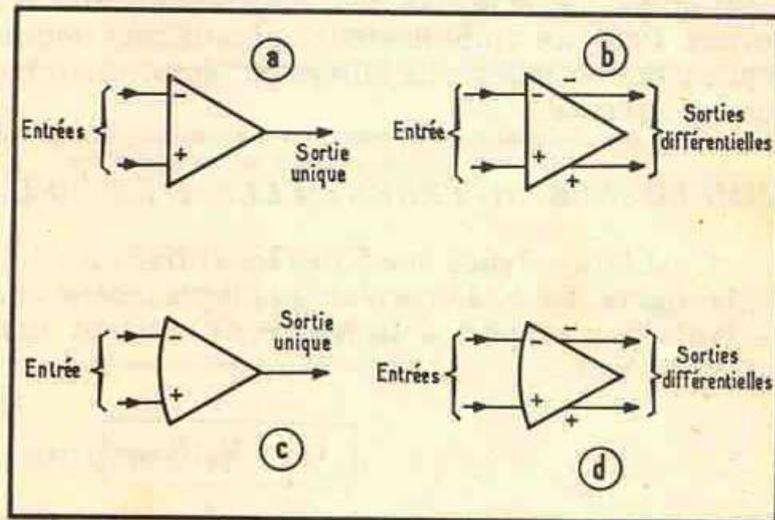
—  $V_S$  étant la tension de sortie et  $V_E$  celle appliquée à l'entrée. Ce gain peut être également exprimé en décibels. On a alors :

$$G_0 \text{ (dB)} = 20 \log (V_S/V_E)$$

### REPRESENTATION SCHEMATIQUE.

Nous avons jusqu'à présent envisagé un amplificateur opérationnel qui n'aurait qu'une unique entrée et dont le signal de sortie serait déphasé de  $180^\circ$  sur la tension d'entrée, ou si nous raisonnons en

Fig. 1-2. — Représentations schématiques de l'amplificateur opérationnel à sortie unique (a et c) - à sorties différentielles (b et d).



tension continue, la tension de sortie serait négative lorsque celle d'entrée serait positive et positive pour une tension d'entrée négative. Pour diverses raisons que nous découvrirons au fur et à mesure que nous progresserons, les amplificateurs opérationnels possèdent généralement deux entrées fonctionnant en différentiel : une inverseuse, c'est-à-dire que le signal qui lui est appliqué se voit changé de signe par l'amplificateur et qui est généralement appelée entrée « moins » (elle est presque toujours marquée du signe — sur les schémas) ; l'autre entrée est dite directe car le signal qui lui est appliqué ne subit pas d'inversion lors de son traitement par l'amplificateur. Cette entrée est nommée entrée « plus » et est marquée d'un signe + sur les schémas.

Généralement la sortie est unique (*single ended* comme disent les Anglo-Saxons) mais elle peut être différentielle, ce qui signifie

que pour un signal négatif appliqué à l'entrée « plus » la sortie « plus » est positive alors que la sortie « moins » est négative, et réciproquement pour la sortie « moins ».

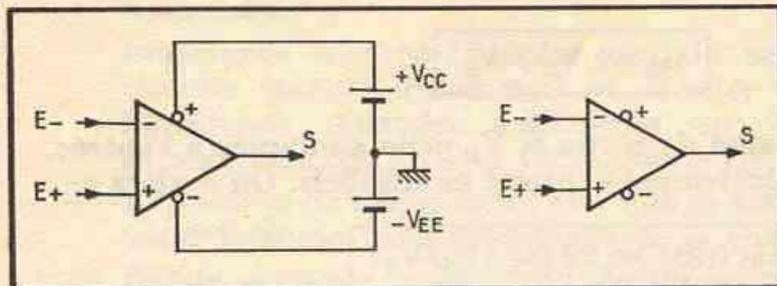


Fig. 1-3. — L'amplificateur opérationnel nécessite généralement deux sources d'alimentation (a) qui sont parfois omises sur les schémas dans un but de simplification (b).

Les différentes représentations graphiques des amplificateurs opérationnels sont réunies à la figure 1-2. On remarquera que pour plus de simplicité dans les schémas, les tensions d'alimentation — il en faut généralement deux, une positive et l'autre négative par rapport à la masse — ne sont pas figurées (figure 1-3). On rencontrera également dans les schémas des chiffres inscrits à côté des différentes bornes. Pour un amplificateur opérationnel donné et présenté dans un type de boîtier donné, ils indiquent simplement le numéro de la broche correspondante.

#### L'IMPEDANCE DIFFERENTIELLE D'ENTREE.

C'est l'impédance vue entre les entrées A (+) et B (—) du schéma de la figure 1-4 b. Lorsqu'on applique entre ces bornes une source flottante par rapport à la masse, le courant fourni par cette source est alors égal à :

$$I_E = V_d / Z_{AB}$$

#### IMPEDANCE D'ENTREE EN MODE COMMUN.

Si l'on réunit l'une des entrées à la sortie et que l'on applique à l'autre entrée une source variable E par rapport à la masse (fig. 1-4 c), l'impédance d'entrée en mode commun est celle donnée par la formule :

$$Z_A \text{ ou } Z_B = \Delta E / \Delta I$$

#### IMPEDANCE DE SORTIE.

L'impédance équivalente de source vue de la sortie de l'amplificateur fonctionnant en boucle ouverte est nommée *impédance de sortie en boucle ouverte* ( $Z_S$ ). Dans la partie linéaire de la caractéristique de l'amplificateur on peut écrire l'équation du courant de sortie :

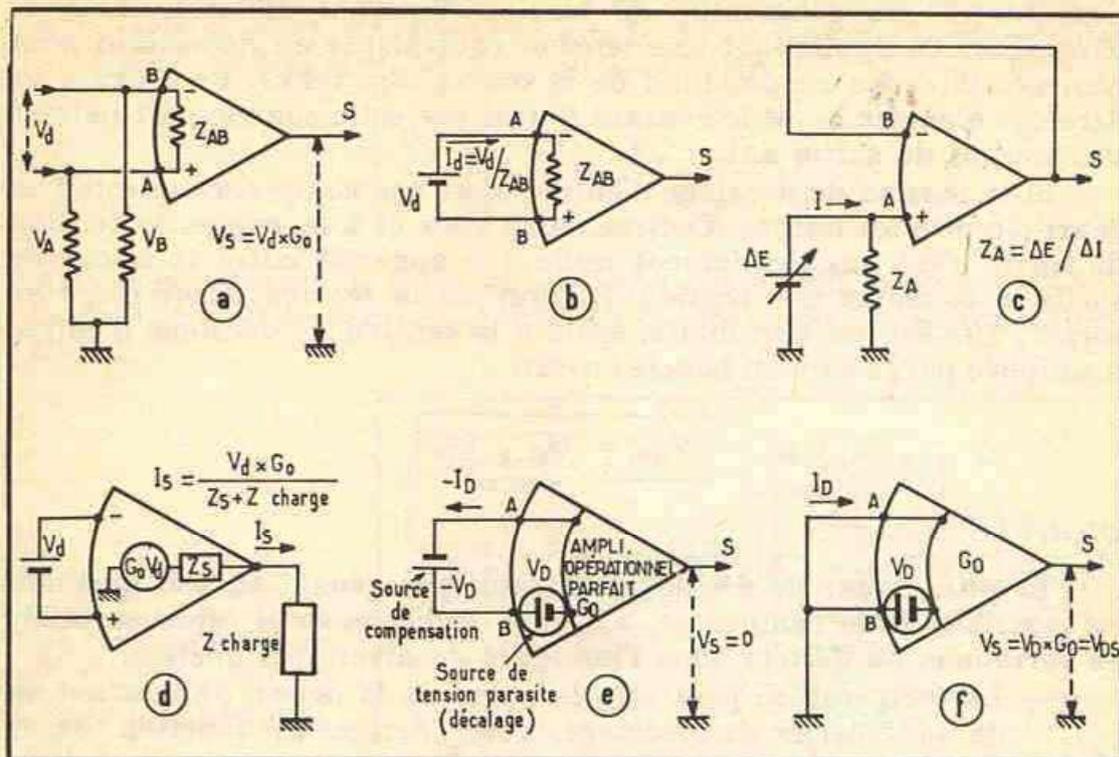


Fig. 1-4. — Représentation schématique des principaux paramètres statiques de l'amplificateur opérationnel.

$$I_s = \frac{G_o \cdot V_d}{Z_s + Z_c} \quad Z_c : \text{Impédance de charge}$$

(Fig. 1-4 d)

**COURANT DE POLARISATION ( $I_p$ ).**

Le courant de polarisation  $I_p$  est le courant, issu d'une source de résistance interne infinie, qu'il faudrait appliquer sur l'une des entrées pour avoir une tension de sortie nulle. On peut considérer deux courants de polarisation : celui concernant l'entrée non-inverseuse  $I_{p+}$  et celui concernant l'entrée inverseuse  $I_{p-}$ . C'est la différence de ces deux courants qui constitue le courant de décalage d'entrée.

**DECALAGE (OFFSET).**

Nous avons dit que dans un amplificateur opérationnel idéal, la tension de sortie est parfaitement nulle en l'absence de signal à l'entrée. Dans la pratique il n'en est généralement pas exactement ainsi. On nomme *tension de décalage d'entrée* (offset) la petite tension  $V_D$  qu'il est nécessaire d'appliquer à l'entrée pour obtenir une tension de sortie parfaitement nulle. Tout se passe comme si on avait affaire à un amplificateur opérationnel parfait avec, en série avec l'une

des entrées, un générateur de tension  $V_D$  qu'il est nécessaire de neutraliser en appliquant une tension équivalente en opposition pour ramener la sortie au potentiel de la masse (fig. 1-4 e). Le *courant de décalage d'entrée*  $I_D$  est le courant fourni par cette source pour obtenir un courant de sortie nul.

Si la tension de décalage d'entrée n'est pas compensée et que l'on court-circuite les bornes d'entrée entre elles et à la masse, la tension de sortie n'est pas exactement nulle : il apparaît entre la borne de sortie et la masse une tension  $V_{DS}$  qui est la *tension de décalage de sortie* ; elle est, on s'en doute, égale à la tension de décalage d'entrée multipliée par le gain en boucle ouverte :

$$V_{DS} = G_0 \cdot V_D$$

### DERIVE.

Le phénomène de décalage ne serait pas gênant en soi, puisqu'il est possible de le compenser, s'il était stable mais il est susceptible de variations ou *dérives* sous l'influence de divers paramètres.

- La température peut être la cause de la dérive du courant ou de la tension de décalage, cette dérive en fonction de la température est exprimée en microvolts par degré Celsius ( $\mu V/^\circ C$ ).
- En dehors de toute cause extérieure, les paramètres de décalage évoluent également dans le temps. La dérive en fonction du temps s'exprime en microvolts par jour pour la tension et en nano ou en pico-ampère par jour pour le courant.
- Les variations des tensions d'alimentation peuvent être également cause de dérives qui sont exprimées en  $\mu V$  par volt de la tension d'alimentation.

### Paramètres dynamiques.

#### GAIN EN BOUCLE FERMÉE.

Il est fort rare que l'amplificateur opérationnel soit utilisé en boucle ouverte. Ainsi qu'il a été dit plus haut, la configuration la plus courante d'utilisation est celle de la figure 1-5 comparable à la figure 1-1, dans laquelle  $Z_E$  est l'impédance d'entrée qui est égale à la somme de l'impédance interne de la source  $Z_1$  (étage amont) et d'une impédance montée en série avec la borne d'entrée de l'amplificateur  $Z_2$ .  $Z_{CR}$  est l'impédance de contre-réaction. Dans le cas d'un amplificateur opérationnel idéal, la tension entre les points A et B est nulle (puisque le gain en boucle ouverte de l'amplificateur est infini). Nous pouvons alors écrire que le gain en courant de l'amplificateur opérationnel est égal à :

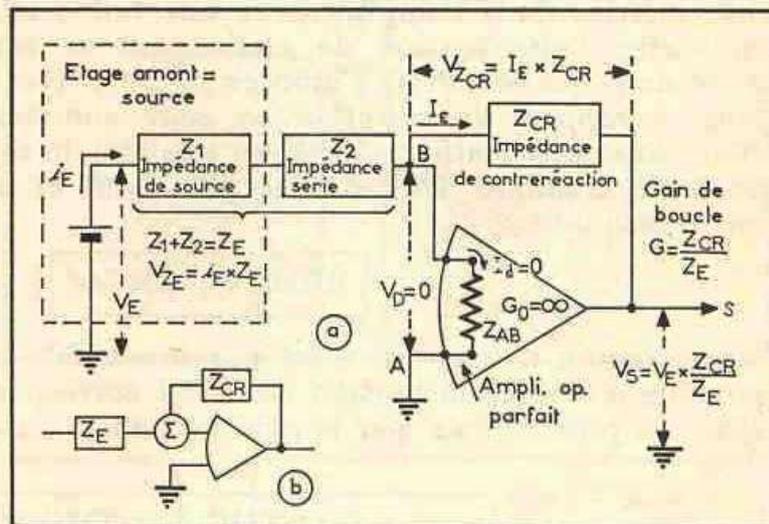
$$G = Z_{CR}/Z_E$$

Dans ces conditions idéales on peut en effet considérer que le courant différentiel d'entrée  $I_d$  est nul et que le même courant  $I_E$  circule dans les deux impédances  $Z_E$  et  $Z_{CR}$  ; on peut écrire :

$$\frac{V_E - V_B}{Z_E} = \frac{V_B - V_S}{Z_{CR}}$$

Mais si le potentiel de B est nul (il n'y a pas de différence de potentiel entre B et A et ce dernier point est à la masse par construction) on a bien :

Fig. 1-5. — Fonctionnement en boucle fermée d'un amplificateur opérationnel (a). Le point de sommation est parfois marqué de la lettre  $\Sigma$  (b).



$$G = V_S/V_E = - (Z_{CR}/Z_E)$$

Le signe moins indique qu'il y a inversion de polarité (ou de phase pour un signal d'entrée alternatif) entre l'entrée et la sortie.

**CARACTERISTIQUES DE TRANSFERT.  
TENSION MAXIMALE DE SORTIE.**

Si nous relevons, à l'aide du montage de la figure 1-6 a la caractéristique de transfert d'un amplificateur opérationnel nous obtiendrons une courbe du genre de celle représentée à la figure 1-6 b. Cette courbe comporte deux zones de saturation — dues au fait évident que la tension de sortie ne peut excéder celle d'alimentation — encadrant une zone de fonctionnement linéaire. Pour un amplificateur opérationnel idéal, cette courbe est symétrique par rapport aux deux axes c'est-à-dire que la zone linéaire s'étend à la même valeur, et avec une même pente, dans la région négative comme dans la région positive. Deux points remarquables doivent être signalés :

- La tension de saturation est indépendante du gain en boucle.
- Seule la pente de la zone linéaire est influencée par la valeur du gain en boucle du montage.

On appelle *tension maximale de sortie* ( $V_s \text{ max}$ ) de l'amplificateur la hauteur de la zone linéaire de la courbe caractéristique de transfert. C'est elle qui définit l'amplitude maximale de crête du signal de sortie en l'absence de distorsion.

#### MODE COMMUN (TENSION ET RAPPORT DE REJECTION).

Réunissons entre elles les entrées d'un amplificateur opérationnel et appliquons entre ces deux bornes réunies et la masse une tension que nous nommons tension de mode commun (TMC), (fig. 1-7). Si l'amplificateur était parfait, sa tension de sortie ne devrait pas en être affectée. Dans la pratique on constate qu'à cause de légères dissymétries dans l'amplificateur une faible tension prend naissance en sortie. Cette tension de sortie peut se ramener à une tension d'erreur  $\varepsilon'$  qui viendrait s'ajouter en série avec l'une des entrées. On nomme *rapport de rejection en mode commun* (RRMC), (*Common Mode Rejection Ratio* : CMRR en anglais) le rapport entre la tension de mode commun TMC définie plus haut et la tension d'erreur en mode commun :

$$\text{RRMC} = \text{TMC}/\varepsilon'$$

Cette tension d'erreur  $\varepsilon'$  n'est pas mesurable mais il est par contre possible d'évaluer la tension de sortie correspondante  $\varepsilon_s$ , laquelle est égale au produit de  $\varepsilon'$  par le gain en boucle ouverte de l'amplificateur d'où :

$$\text{RRMC} = \frac{\text{TMC}}{\varepsilon_s/G_0} = \frac{\text{TMC} \times G_0}{\varepsilon_s}$$

Le plus souvent le rapport de rejection en mode commun est exprimé en décibels, on peut alors écrire :

$$\text{RRMC (dB)} = 20 \log \left( \frac{\text{TMC} \times G_0}{\varepsilon_s} \right)$$

Bien que les constructeurs soient généralement d'une prudente discrétion à ce sujet, il semble intéressant de noter que le rapport de rejection en mode commun n'est pas un paramètre immuable, car il est dans une certaine mesure affecté par la température, les variations des tensions d'alimentation et plus particulièrement la fréquence du signal d'entrée (1). Précisons que la *tension maximale de mode commun* est la valeur maximale que peut prendre la tension de mode commun sans risquer d'endommager l'amplificateur. De même la tension qu'il est possible d'appliquer entre les entrées de l'amplificateur sans risquer sa détérioration est appelée *tension maximale différentielle d'entrée* ( $V_d \text{ max}$ ).

(1) A ce sujet, lire l'intéressante étude « Common Mode Rejection Ratio : What the spec sheet doesn't say » cité en référence.

Fig. 1-6. — Relevé de la caractéristique de transfert (a) et allure de cette courbe (b).

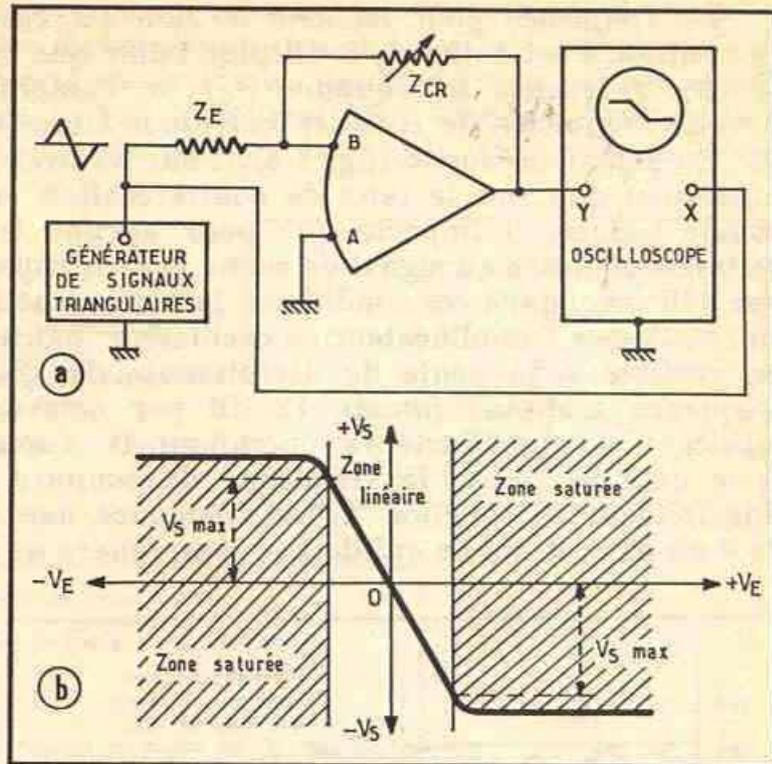


Fig. 1-7 ci-dessous. — La tension d'erreur de mode commun peut être considérée comme un petit générateur monté en série avec l'une des entrées de l'amplificateur opérationnel.

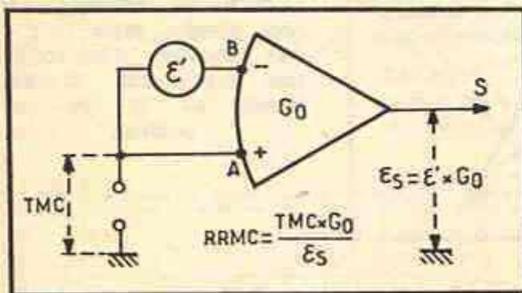
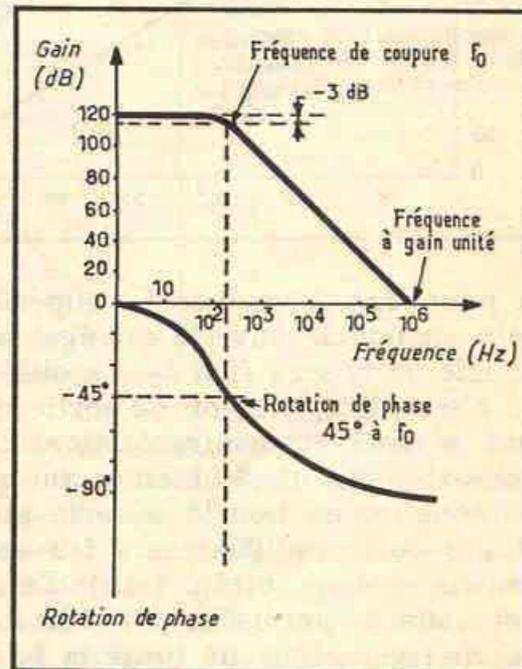


Fig. 1-8 ci-contre. — Diagramme de Bode d'un amplificateur opérationnel : à la fréquence de coupure  $f_0$  correspond une rotation de phase de  $45^\circ$  du signal de sortie.



### Comportement en alternatif.

Si le gain d'un amplificateur opérationnel est très élevé en continu (il peut atteindre 160 dB soit  $10^8$ ) du fait des capacités internes inévitables, ce gain commence à décroître, d'abord très lentement puis de plus en plus rapidement lorsque la fréquence augmente.

La fréquence pour laquelle le gain est égal à  $1/\sqrt{2}$  fois celui en continu, c'est-à-dire de 3 dB plus faible que le gain en continu, est appelée *fréquence de coupure* ( $f_0$ ) de l'amplificateur opérationnel. A cette fréquence de coupure correspond une rotation de phase de  $45^\circ$  du signal de sortie (fig. 1-8). Pour assurer la stabilité du montage, quel que soit le taux de contre-réaction en fonctionnement en boucle fermée, il importe que pour aucune fréquence, la rotation de phase imposée au signal de sortie par les capacités internes n'atteigne  $180^\circ$  car, dans ces conditions, la contre-réaction se transformerait en réaction et l'amplificateur en oscillateur (figure 1-9). Cette condition est réalisée si la pente de décroissance du gain en fonction de la fréquence n'atteint jamais 12 dB par octave. C'est pourquoi les fabricants d'amplificateurs opérationnels s'arrangent généralement pour qu'à partir de la fréquence de coupure  $f_0$  le gain décroisse linéairement en fonction de la fréquence avec une pente régulière de 6 dB par octave. Ce qui doit se comprendre de la manière suivante :

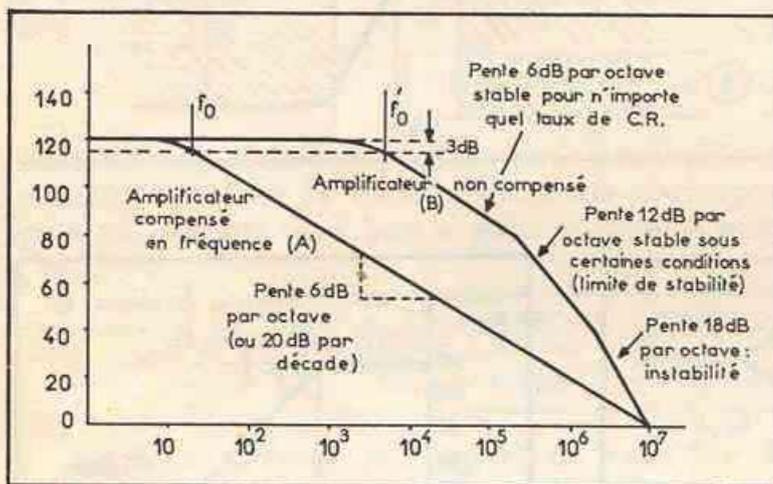


Fig. 1-9. — Courbes de réponses d'un amplificateur opérationnel compensé en fréquence (a) et non compensé (b). Dans ce second cas, la fréquence de coupure est plus élevée, mais il y a des risques d'instabilité aux fréquences élevées (pente de 18 dB par octave).

si pour une fréquence  $f_1$ , supérieure à la fréquence de coupure, le gain en boucle ouverte est égal à  $G_1$ , le gain  $G_2$  pour une fréquence double de  $f_1$  sera égal à la moitié de  $G_1$ . De cette manière la rotation de phase de la tension de sortie ne dépassera jamais  $90^\circ$  et, quel que soit le taux de contre-réaction, le montage restera stable. En fait, cette stabilité n'est obtenue que par une diminution de la fréquence de coupure en boucle ouverte au moyen d'une contre-réaction entre étages de l'amplificateur à travers un réseau R — C judicieusement calculé et disposé (fig. 1-10). Dans certains amplificateurs opérationnels, afin de permettre à l'utilisateur de profiter, pour de faibles taux de contre-réaction, de toute la bande passante, ce réseau de compensation n'est pas incorporé à l'amplificateur proprement dit mais des bornes sont prévues pour son raccordement extérieur. Dans ces conditions la fréquence de coupure  $f_0$  est notablement plus élevée mais la pente de décroissance du gain en fonction de la fréquence à partir de  $f_0$  est beaucoup plus rapide. L'utilisateur sait qu'il a la possibilité, en jouant sur les valeurs des éléments R et C de compensation, de décaler la fréquence de coupure  $f_0$  mais que de toute façon,

il n'a pas le droit de descendre au-dessous de certaines valeurs (généralement indiquées par le constructeur dans ses notices) faute de quoi la pente de décroissance fatidique de 12 dB par octave serait dépassée et que de ce fait il encourrait des risques d'instabilité. Nous reviendrons plus en détail, sur ce sujet, dans un chapitre ultérieur.

Fig. 1-10. — Exemple de réseau de correction en fréquence ( $\mu A$  709). Les constructeurs fournissent les courbes de réponse pour les principales combinaisons de valeur des éléments  $R_1$ ,  $C_1$  et  $C_2$ .

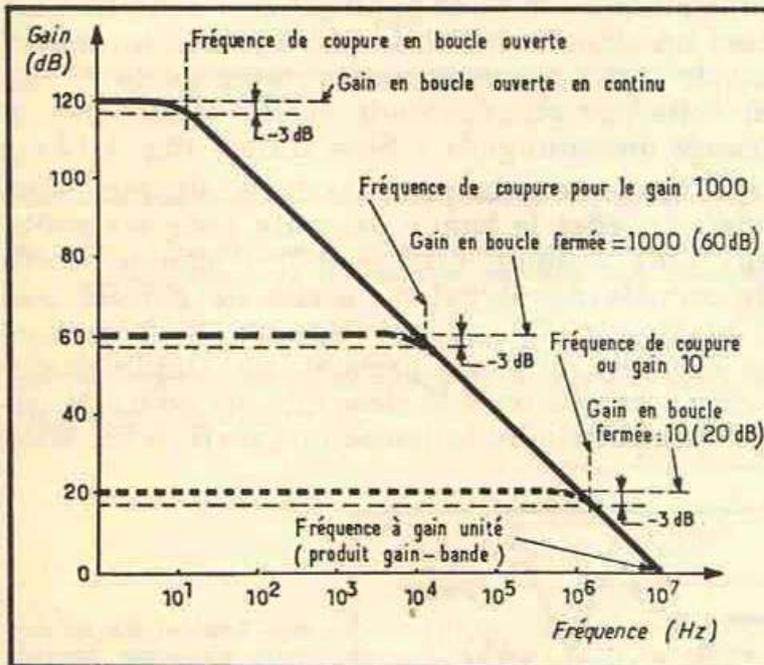
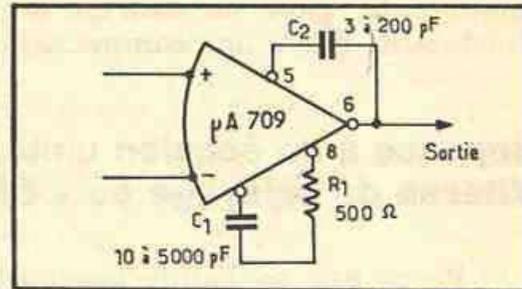


Fig. 1-11. — Le diagramme de Bode permet de déterminer la fréquence de coupure d'un amplificateur opérationnel pour n'importe quel taux de contre-réaction.

Revenons à la courbe standard du gain en boucle ouverte, en fonction de la fréquence (diagramme de Bode) d'un amplificateur opérationnel normalement compensé (pente de décroissance de 6 dB par octave). En dehors de la fréquence de coupure  $f_0$ , un autre point de cette courbe doit attirer notre attention : c'est celui pour lequel le gain en boucle ouverte est exactement égal à 1 (0 dB). La connaissance de ce point ainsi que celle du gain en continu nous permettent de reconstituer la courbe de réponse de l'amplificateur pour n'importe quelle valeur du taux de contre-réaction ; puisqu'il suffira de tracer à partir de la valeur du gain en boucle fermée retenu, une parallèle à l'axe horizontal. Cette fréquence pour laquelle le gain est égal à l'unité correspond à ce que l'on appelle le produit gain-bande passante de l'amplificateur. En effet si nous savons que le produit gain-bande passante d'un amplificateur est égal à 10 MHz (gain unité pour cette

fréquence) sa fréquence de coupure en boucle fermée avec un gain en continu de 60 dB (1 000) sera de  $10 \text{ MHz}/1\,000 = 0,01 \text{ MHz}$  ou 10 KHz. Il ne faudrait cependant pas nous livrer à des extrapolations hâtives en disant que ce même amplificateur aurait un gain de  $10^7$  à 1 Hz si son gain en boucle ouverte en continu n'excède pas  $10^6$  soit 120 dB ! C'est à cela que sert la connaissance du gain en continu car en aucune manière ce gain ne saurait être dépassé sauf cas de tendance à l'instabilité due à une compensation en fréquence inadéquate.

### Réponse à un échelon unité. Vitesse de balayage ou « Slew rate ».

Parce que sa bande passante n'est pas infinie, un amplificateur opérationnel ne restitue pas fidèlement l'échelon unité. Expliquons-nous dans un langage plus simple : si nous appliquons à l'entrée d'un amplificateur opérationnel un signal variant de 0 à  $V_d$  dans un temps infiniment bref, le signal de sortie accusera une certaine pente  $dV/dt$  qui peut se mesurer en volts par microseconde et est définie par le terme de *vitesse de balayage* ou en anglais « Slew Rate » (fig. 1-12 a).

C'est le slew rate qui limite le gain pour les forts signaux d'un amplificateur opérationnel. En effet la bande passante pour les petits signaux est notablement plus étendue que pour les signaux forts parce que la vitesse de montée du signal de sortie ne permet pas d'atteindre l'amplitude maximale  $V_{S \text{ max}}$  des signaux à fréquence élevée (fig. 1-12 b). Par exemple, si nous prenons un amplificateur opérationnel comme le classique 709 dont le slew rate est de  $0,3 \text{ V}/\mu\text{s}$ , l'amplitude maximale que peut atteindre la tension de sortie à  $0,1 \text{ MHz}$

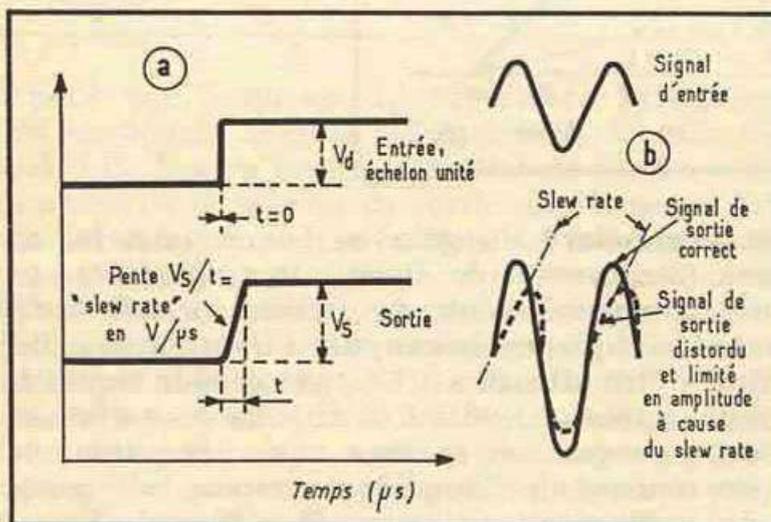


Fig. 1-12. — Un échelon unité n'est pas transmis fidèlement par l'amplificateur opérationnel, le signal de sortie accuse une certaine pente ou « Slew rate » (a) ce qui entraîne une limitation et une distorsion des signaux alternatifs de grande amplitude (b).

est de  $0,4 \text{ V}$  et si nous désirons obtenir une amplitude maximale de  $10 \text{ V}$  nous serons obligé de limiter la bande passante à  $4,7 \text{ KHz}$ . Ce genre de calcul (tension de crête maximale à une fréquence donnée ou au contraire fréquence maximale pour une tension de crête donnée)

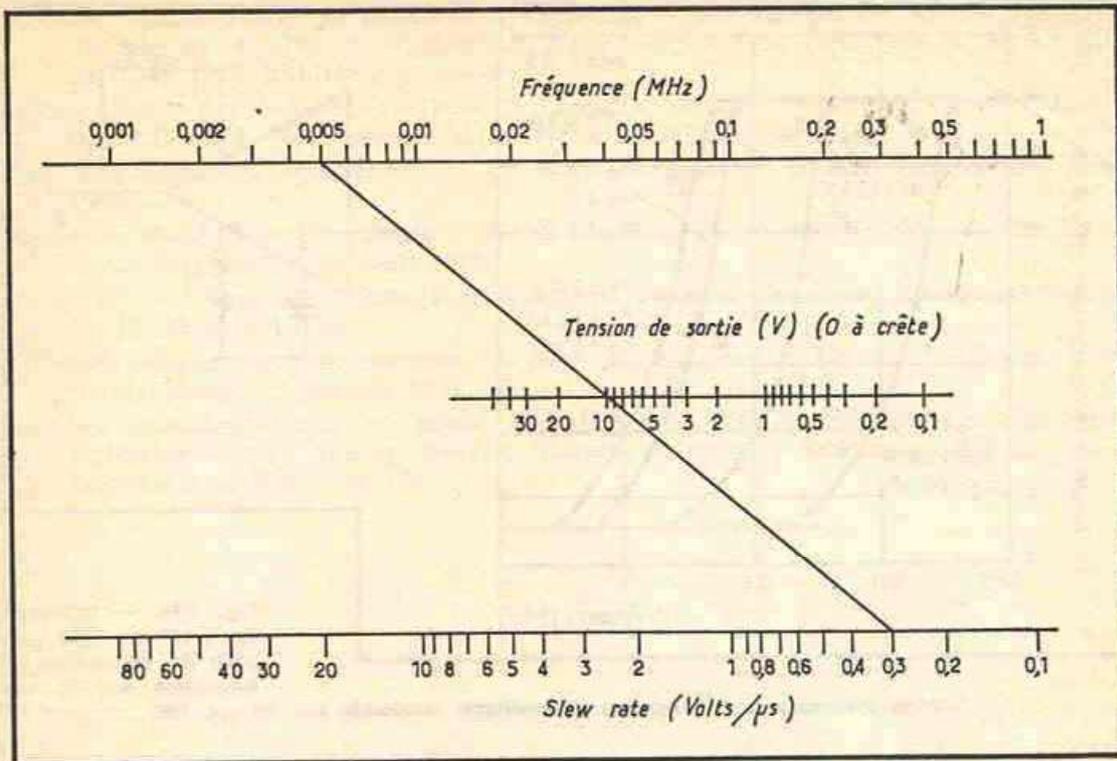


Fig. 1-13. — Abaque pour le calcul de la tension maximale de sortie à une fréquence donnée — et réciproquement de la fréquence maximale pour une amplitude donnée — en fonction du slew-rate.

peuvent être aisément résolus au moyen de l'abaque de la figure 1-13 ou d'après la relation :

$$f \leq \frac{1}{\pi \cdot V \text{ crête à crête}} \times \frac{dV}{dt}$$

dans laquelle  $f$  est la fréquence du signal considéré.  $V$  crête à crête est l'amplitude de crête à crête désirée pour le signal de sortie et  $dV/dt$  le slew rate de l'amplificateur.

Dans un amplificateur comportant des bornes pour branchement d'un réseau extérieur de compensation en fréquence, il est possible d'agir sur la valeur du slew rate en modifiant les valeurs des éléments de ce réseau. C'est bien ce que montrent les courbes de la figure 1-14 qui représente la variation de l'amplitude du signal de sortie d'un amplificateur  $\mu A$  709 en fonction de la fréquence pour différentes valeurs des éléments du réseau de compensation en fréquence. On voit nettement que pour les valeurs du réseau qui confèrent à l'amplificateur la pente standard de décroissance du gain en fonction de la fréquence de 6 dB par octave ( $C_1$  : 500 pF,  $C_2$  : 20 pF et  $R_1$  : 1 500), courbe II, l'amplitude maximale de crête à crête de 28 V ne pourra être atteinte que pour des fréquences inférieures à 20 KHz alors que pour de très faibles valeurs de ces éléments la même amplitude pourra être atteinte pour des fréquence 10 fois plus élevées.

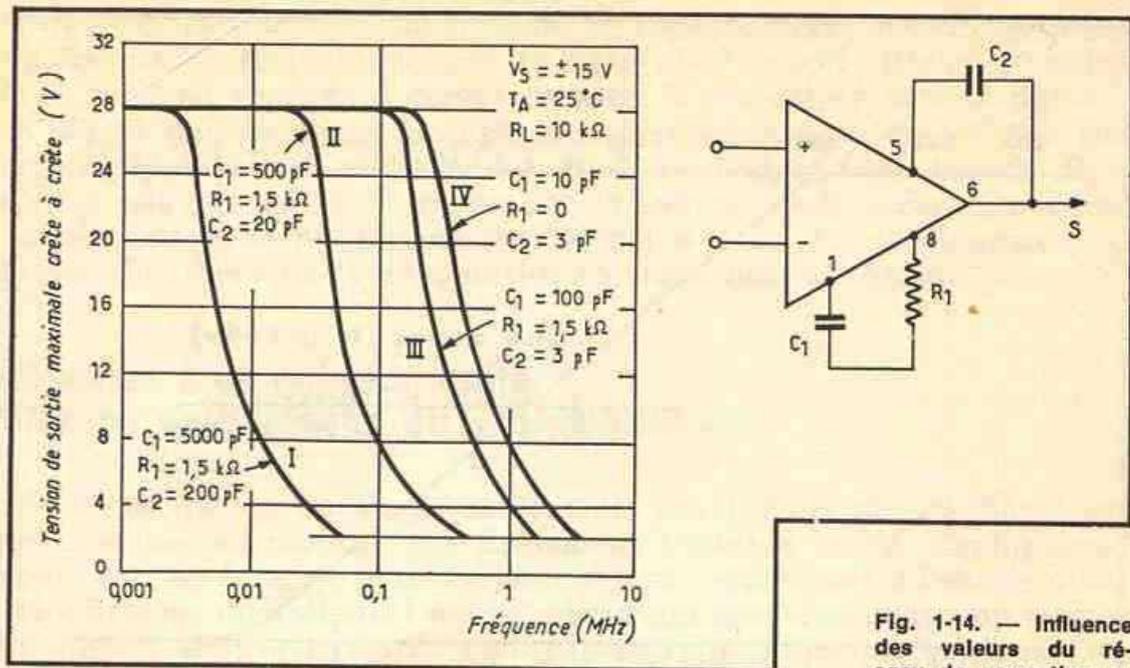


Fig. 1-14. — Influence des valeurs du réseau de correction en fréquence sur la fréquence maximale transmise avec l'amplitude maximale par un  $\mu A$  709.

quence maximale transmise avec l'amplitude maximale par un  $\mu A$  709.

## Temps de reprise après surcharge.

Si l'on applique à l'entrée d'un amplificateur opérationnel un signal tel que sa sortie soit saturée, pour diverses raisons (charge des capacités internes qui n'arrivent pas à se décharger assez vite, temps de stockage des transistors saturés, etc.) l'amplificateur ne retrouve pas instantanément après la disparition de la surcharge ses caractéristiques initiales, il lui faut un certain temps, qui heureusement ne se chiffre qu'en microsecondes, pour récupérer. Ce temps est parfois donné par les constructeurs pour une surcharge de 50 % de la tension maximale pouvant être appliquée à l'entrée sans provoquer la saturation.

## Bibliographie

- Amplificateurs Op. — Première partie. Les paramètres. R. DUGÉHAULT. Electronique Professionnelle. Mai 1970.
- Principes et applications des circuits intégrés linéaires. H. LILEN. Editions Radio. 1968.
- Notions sur les amplificateurs opérationnels. C.V. WEDEN. Orbit. Juin 1967.
- Les amplificateurs continus. — J.M. ESCANE. Cours de perfectionnement de l'Ecole Supérieure d'Electricité. 1971.
- Amplificateurs opérationnels à circuits intégrés. — M. GRABOWSKI. Cours de perfectionnement de l'Ecole Supérieure d'Electricité. 1971.
- The settling Time of Operational Amplifiers. — Robert I. DEMROW. Analogue dialogue (publication Analogue Devices). Juin 1970.

Considérations pratiques relatives à l'utilisation des amplificateurs opérationnels du type SF. C 2709. — R. MICOLET. Note d'application technique N° 56 LA 088. de mars 1969, publiée par Sescosem.

Applications des semi-conducteurs : Circuits intégrés linéaires, Amplificateurs opérationnels. Note d'application N° 28. 1967, publiée par R.T.C.

Les amplificateurs opérationnels. — M.F. TOUTAIN DE BUSSY. Publication Imex France.

Common Mode Rejection Ratio : What the Spec Sheet doesn't say. — Frederick GANS. Electronics, 23 juin 1969.

Solve Op. — Amp Slew Rate Requirements. Thomas CARMODY. Electronic Design N° 13. 21 juin 1970.

Custom compensate your op amp. — GARY L., PAYNTON et MORRIS I. WAREN. Electronic Design. 7 janvier 1971.

Et les documentations et notes d'application des constructeurs : Fairchild, Philbrick-Nexus, Analog Device, Tekelec Airtronic, Sescosem, R.T.C., Texas Instruments, Motorola, etc.

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| INTRODUCTION .....                                                                                 | 5         |
| <b>CHAPITRE PREMIER. — FAISONS LA CONNAISSANCE AVEC LES<br/>AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS .....</b> | <b>7</b>  |
| Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel idéal .....                                       | 8         |
| Définissons les caractéristiques statiques .....                                                   | 8         |
| Paramètres dynamiques .....                                                                        | 12        |
| Comportement en alternatif .....                                                                   | 15        |
| Réponse à un échelon unité : vitesse de balayage ou « Slew rate » ....                             | 18        |
| Temps de reprise après surcharge .....                                                             | 20        |
| Bibliographie .....                                                                                | 20        |
| <b>CHAPITRE 2. — CONSTITUTION DES AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS</b>                                 | <b>22</b> |
| Schéma de principe .....                                                                           | 22        |
| Décortiquons un schéma classique .....                                                             | 25        |
| Augmentation de l'impédance d'entrée .....                                                         | 27        |
| Diminution du courant et de la tension de décalage d'entrée et de leur<br>dérive .....             | 33        |
| Amplificateurs à substrat stabilisé en température .....                                           | 36        |
| Mode de réalisation des amplificateurs opérationnels .....                                         | 39        |
| Bibliographie .....                                                                                | 39        |
| <b>CHAPITRE 3. — LE BRUIT .....</b>                                                                | <b>41</b> |
| Définitions .....                                                                                  | 41        |
| Bruits d'origine externe .....                                                                     | 43        |
| Bruits internes .....                                                                              | 44        |
| Spectre de bruit .....                                                                             | 47        |
| Bruit ramené à l'entrée .....                                                                      | 48        |
| Résistance caractéristique de bruit .....                                                          | 49        |
| Facteur de bruit .....                                                                             | 50        |
| Gain de bruit .....                                                                                | 51        |
| Comparaison du point de vue du bruit des divers types d'amplificateurs<br>opérationnels .....      | 52        |
| Bibliographie .....                                                                                | 53        |

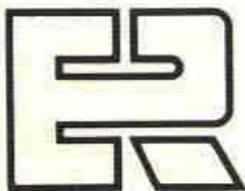
|                                                                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CHAPITRE 4 — LES MONTAGES FONDAMENTAUX</b> .....                                                                 | <b>54</b>  |
| Amplificateurs de tension inverseur .....                                                                           | 54         |
| Pont diviseur en sortie .....                                                                                       | 55         |
| Amplificateurs sans inversion .....                                                                                 | 56         |
| Suiveur de tension (transformateur d'impédance) .....                                                               | 58         |
| Transformateurs courant tension .....                                                                               | 59         |
| Amplificateurs de courant .....                                                                                     | 60         |
| Amplificateurs de transconductance .....                                                                            | 60         |
| Amplificateurs de différence .....                                                                                  | 64         |
| Bibliographie .....                                                                                                 | 65         |
| <b>CHAPITRE 5. — CIRCUITS AUXILIAIRES</b> .....                                                                     | <b>67</b>  |
| Compensation de la tension et du courant de décalage d'entrée .....                                                 | 67         |
| Décalage de la tension de sortie .....                                                                              | 73         |
| Protection contre les surtensions .....                                                                             | 73         |
| Limiteurs de tension de sortie .....                                                                                | 76         |
| Protection contre les courts-circuits en sortie .....                                                               | 76         |
| Commande de circuits de logique .....                                                                               | 78         |
| Augmentation de l'impédance d'entrée .....                                                                          | 80         |
| Diminution de l'impédance de sortie - Boosters .....                                                                | 84         |
| Bibliographie .....                                                                                                 | 89         |
| <b>CHAPITRE 6. — COMPENSATION EN FRÉQUENCE</b> .....                                                                | <b>92</b>  |
| Conditions de stabilité d'un amplificateur soumis à une contre réaction .....                                       | 92         |
| Diverses méthodes de compensation en fréquences .....                                                               | 95         |
| Quelques recommandations pour assurer la stabilité des montages<br>comportant des amplificateur opérationnels ..... | 104        |
| Bibliographie .....                                                                                                 | 105        |
| <b>CHAPITRE 7. — MESURE DES CARACTÉRISTIQUES</b> .....                                                              | <b>106</b> |
| Mesure du gain en boucle ouverte $G_0$ .....                                                                        | 106        |
| Mesures du produit gain-bande, du slew-rate et de fréquence maximale<br>à pleine puissance .....                    | 110        |
| Tension de décalage et courant de polarisation d'entrée .....                                                       | 112        |
| Résistance différentielle d'entrée $R_{AB}$ .....                                                                   | 115        |
| Résistance d'entrée de mode commun .....                                                                            | 117        |
| Tension maximale en mode commun .....                                                                               | 117        |
| Rapport de rejection en mode commun (R.R.M.C.) .....                                                                | 118        |
| Mesure de bruit .....                                                                                               | 121        |
| Testeur simple pour amplificateurs opérationnels .....                                                              | 121        |
| Bibliographie .....                                                                                                 | 130        |
| <b>CHAPITRE 8. — CIRCUITS DE CALCUL ANALOGIQUE</b> .....                                                            | <b>131</b> |
| Circuit additionneur .....                                                                                          | 131        |
| Amplificateur inverseur à gain réglable .....                                                                       | 136        |
| Amplificateur de différence à gain ajustable .....                                                                  | 136        |
| Circuits intégrateurs .....                                                                                         | 138        |
| Circuits de dérivation .....                                                                                        | 149        |
| Circuits à réponse logarithmique .....                                                                              | 153        |
| Circuits de multiplication .....                                                                                    | 161        |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Diviseurs, règle de trois .....                                                                      | 167        |
| Fonctions diverses .....                                                                             | 170        |
| Bibliographie .....                                                                                  | 175        |
| <b>CHAPITRE 9. — FILTRES ACTIFS .....</b>                                                            | <b>178</b> |
| Quelques définitions .....                                                                           | 178        |
| Principaux types de courbe de réponse de filtre .....                                                | 197        |
| Modes de réalisation des filtres actifs .....                                                        | 207        |
| Détermination pratique des éléments d'un filtre actif .....                                          | 227        |
| Filtres à accord électronique .....                                                                  | 240        |
| <b>ANNEXES :</b>                                                                                     |            |
| Polynômes de Butterworth .....                                                                       | 244        |
| Polynômes de Tchébitchef .....                                                                       | 244        |
| Polynômes de Bessel .....                                                                            | 245        |
| Bibliographie .....                                                                                  | 248        |
| <b>CHAPITRE 10. — APPLICATIONS DIVERSES .....</b>                                                    | <b>250</b> |
| Amplificateurs pour capteurs - Mesure .....                                                          | 250        |
| Amplificateurs pour ponts de mesure .....                                                            | 256        |
| Détection du seuil de tension, comparaison de tension de courant ou<br>de résistance. Triggers ..... | 259        |
| Montages dérivés du trigger : bistables et monostables .....                                         | 263        |
| Générateurs de signaux .....                                                                         | 265        |
| Montages redresseurs .....                                                                           | 278        |
| Références de tension ou de courant. Alimentations stabilisées .....                                 | 283        |
| Bibliographie .....                                                                                  | 292        |
| <b>CHAPITRE 11. — QUELQUES CONSEILS PRATIQUES .....</b>                                              | <b>293</b> |
| Un problème important : celui des masses .....                                                       | 293        |
| Blindages et écrans .....                                                                            | 296        |
| Découplages .....                                                                                    | 298        |
| Câblage .....                                                                                        | 300        |
| Alimentation .....                                                                                   | 301        |
| Bibliographie .....                                                                                  | 304        |
| <b>INDEX ALPHABÉTIQUE .....</b>                                                                      | <b>305</b> |
| <b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>                                                                      | <b>317</b> |

## EXTRAIT DU CATALOGUE DES ÉDITIONS RADIO

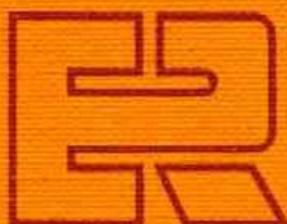
- MATHÉMATIQUES POUR ÉLECTRONICIENS**, par **F. Bergtold**. — Ouvrage spécialisé ne nécessitant pas de connaissances particulières. Les difficultés sont dosées depuis les opérations élémentaires et les équations jusqu'aux imaginaires, au calcul graphique, au calcul différentiel et à l'algèbre de Boole.  
324 pages, format 16 × 24.
- COURS ÉLÉMENTAIRE D'INFORMATIQUE**, par **J.-P. Boyer**. — Usant d'un langage simple et clair, ce livre s'adresse aux membres du service informatique (programmeurs, analystes, organisateurs) ainsi qu'aux responsables et correspondants informatiques des autres services.  
228 pages, format 16 × 24.
- COURS FONDAMENTAL DE LOGIQUE ÉLECTRONIQUE**, par **R. Amato**. — Avec des exemples simples, l'auteur explique le langage et le fonctionnement des éléments de base en logique électronique. Puis il conduit le lecteur à des réalisations complexes. Une excellente introduction à l'ordinateur.  
328 pages, format 16 × 24.
- LOGIQUE ÉLECTRONIQUE ET CIRCUITS INTÉGRÉS NUMÉRIQUES**, par **R. Damaye**. — Technologie, principe de fonctionnement électrique et logique, schémas d'utilisation des circuits intégrés de logique.  
488 pages, format 16 × 24.
- EMPLOI RATIONNEL DES CIRCUITS INTÉGRÉS**, par **J.-P. Cehmichen**. — Structures, circuits logiques, mémoires, comptage binaire et décimal, emploi des circuits intégrés, amplificateurs opérationnels, comparateurs, etc.  
512 pages, format 16 × 24, 3<sup>e</sup> édition.
- CIRCUITS INTÉGRÉS NUMÉRIQUES**, par **H. Lilen**. — Principes et applications des circuits intégrés numériques : familles, fonctions, utilisation.  
472 pages, format 16 × 24.
- OPTO-ÉLECTRONIQUE**, par **R. Damaye**. — Notions d'optique et de physique de la matière. Sources lumineuses et dispositifs photosensibles. Modulation des sources et leur couplage aux éléments photosensibles. Applications.  
228 pages, format 16 × 24.
- CIRCUITS HYBRIDES A COUCHES MINCES ET A COUCHES ÉPAISSES**, par **H. Lilen**. — Le domaine de la microélectronique hybride, techniques employées, conception et applications.  
200 pages, format 16 × 24.
- THÉORIE ET PRATIQUE DES MICROPROCESSEURS**, par **R. Arouete** et **H. Lilen**. — Étude fondamentale des logiques programmées et des microprocesseurs (matériels, logiciels, mise en œuvre, coûts).  
160 pages, format 16 × 24.
- GUIDE MONDIAL DES MICROPROCESSEURS**, par **H. Lilen**. — Les critères de sélection, les caractéristiques et le classement des microprocesseurs.  
192 pages, format 21 × 29,7.
- CIRCUITS INTÉGRÉS MOS ET CMOS**, par **H. Lilen**. — MOS et circuits intégrés, logique intégrée MOS et CMOS, les mémoires (ROM, PROM, RMM ou REPROM, RAM, registres et CAM), les applications (Microprocesseurs et calculatrices, montre électronique, MOS en linéaire).  
448 pages, format 16 × 24.
- CIRCUITS DE LOGIQUE**, par **R. Damaye**. — Circuits élémentaires, notion de comptage électronique, réalisation et protection, Algèbre logique.  
372 pages, format 16 × 24.

ENVOI DE NOTRE CATALOGUE SUR DEMANDE



# Editions Radio

9, RUE JACOB - 75006 PARIS  
TEL. 033.13.65 - C.C.P. 1164-34 PARIS



**Editions Radio**

L'amplificateur opérationnel a fait depuis quelques années une entrée très remarquée dans tous les domaines de l'électronique, à tel point qu'il peut aujourd'hui être considéré comme un simple composant : quelque chose comme un super-transistor aux possibilités étendues.

L'auteur, ingénieur dans un important centre de recherches, riche de plus de vingt années de pratique en laboratoire, explique, d'une manière simple et accessible à chacun, le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel, en définit les caractéristiques et montre comment et dans quelles mesures elles peuvent être améliorées.

Les causes du bruit et les remèdes pour en atténuer les effets font l'objet d'un important chapitre de même que la mesure des paramètres.

Trois chapitres sont consacrés aux principales applications : circuits de calcul analogique, filtres actifs et applications diverses dans les domaines de la mesure et de l'automatisation.

L'ingénieur tout comme le technicien ou l'étudiant verront dans cet ouvrage un véritable « handbook » de l'amplificateur opérationnel.

I.S.B.N. 2 7091 0720 1