

LA RÉACTION NÉGATIVE OU CONTRE-RÉACTION

Par L. CHRÉTIEN, Ingénieur E. S. E.

On dit qu'il y a « réaction » dans un amplificateur quand une fraction de l'énergie amplifiée est introduite, de nouveau, à l'entrée. Cette énergie peut s'ajouter à l'énergie d'entrée; dans ce cas, l'énergie de sortie sera naturellement augmentée. On sera en présence de **RÉACTION POSITIVE** (qu'on désigne souvent, d'ailleurs, par le seul mot « réaction » — sans qualificatif). On peut donc en conclure que la **RÉACTION POSITIVE** augmente le gain fourni par un amplificateur.

Si l'énergie ré-injectée se retranche de l'énergie d'entrée, le gain de l'amplificateur sera plus réduit.

On sera alors en présence de **CONTRE-RÉACTION** ou **RÉACTION NÉGATIVE**.

Mais, dans un cas comme dans l'autre, la « réaction » apportera une modification des propriétés de l'amplificateur. Ces modifications peuvent être, suivant les cas, avantageuses ou non...

Notre propos est d'étudier l'action d'une **RÉACTION NÉGATIVE** dans un amplificateur de basse fréquence. Par la suite, nous serons aussi amenés à fournir des indications pratiques qui permettront, dans bien des cas, d'améliorer le fonctionnement et les résultats obtenus.

Réaction de tension.

L'énergie reportée à l'entrée de l'amplificateur peut être proportionnelle à la tension fournie par l'amplificateur. On dit alors qu'il s'agit d'une réaction de tension. Elle peut aussi être proportionnelle à l'intensité fournie par l'amplificateur. Il faut distinguer les deux cas, car les résultats sont tout à fait différents.

Examinons le cas de la réaction de tension. Considérons d'abord un amplificateur A (fig. 1).

Il s'agit d'un amplificateur tout à fait quelconque qui peut comporter un nombre plus ou moins grand d'étages...

Nous introduisons une tension E à l'entrée. Nous trouvons une tension S entre les extrémités de l'impédance de charge Z (qui peut être, par exemple, la bobine mobile d'un haut-parleur).

Dans ces conditions, le gain de tension de l'amplificateur est $G = S/E$.

Introduisons maintenant un certain taux de contre-réaction, cela veut dire que nous superposons, à la tension d'entrée E, une certaine fraction r, de la tension de sortie. La grandeur r sera précisément le taux de contre-réaction.

Pour arriver à ce résultat, nous pouvons réaliser la combinaison indiquée sur la figure 2. Il est bien évident que

$$r = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Puisqu'il s'agit ici de contre-réaction ou réaction négative, la tension réellement introduite entre les deux bornes d'entrée de l'amplificateur ne sera plus E, mais $E - rS$.

Proposons-nous de déterminer maintenant la nouvelle valeur de gain Gr de l'amplificateur avec réaction.

Un calcul très élémentaire, qu'on trouvera à la fin de cet article, nous amène à l'expression suivante :

$$Gr = \frac{G}{1 + rG}$$

Ce qui nous confirme que le gain de l'amplificateur réactif est diminué puisqu'il est égal à G divisé par quelque chose qui est nécessairement plus grand que 1... puisqu'il est égal à :

$$1 + rG$$

La quantité rG est souvent nommée le *facteur de réaction*. C'est une grandeur dont il est utile de connaître la valeur. Le gain G est normalement compris entre 100 et 10.000 par exemple. Le facteur r varie entre 5/100 et plusieurs dixièmes. Dans ces conditions, G peut varier entre 10 et plusieurs centaines... C'est donc une quantité beaucoup plus grande que 1.

Nous sommes ainsi autorisés à supprimer 1 dans l'expression précédente et l'expression Gr devient alors :

$$Gr = \frac{1}{r}$$

Résultat tout à fait remarquable qui nous livre tous les secrets de la contre-réaction !

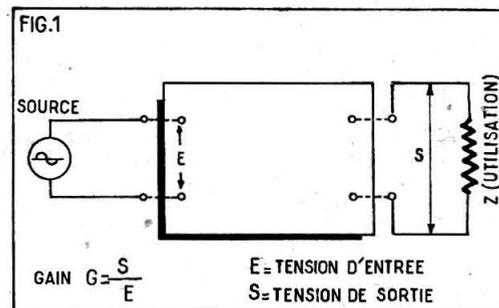


FIG. 1. — Définition du gain en tension $G = S/E$ d'un amplificateur sans contre-réaction.

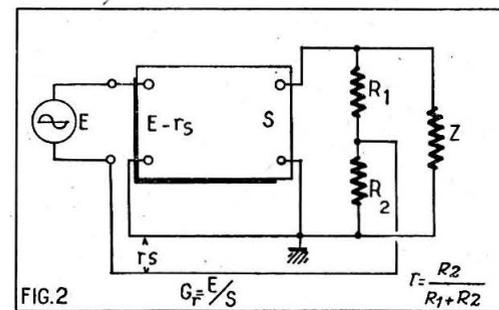


FIG. 2. — Dans l'amplificateur à contre-réaction, la tension d'entrée n'est plus E, mais cette valeur diminuée d'une fraction r de la tension de sortie S. C'est donc $E - rS$. Ce résultat peut être facilement obtenu au moyen d'un diviseur de tension constitué par les deux résistances R_1 et R_2 .

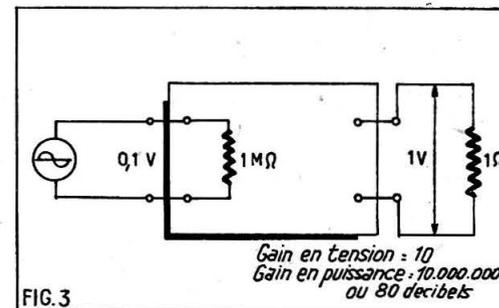


FIG. 3. — Le gain en tension d'un amplificateur ne signifie à peu près rien. Ce qui importe, c'est le gain en puissance.

Ainsi, l'amplificateur ci-dessus ne semble fournir qu'un modeste gain en tension de 10... Et pourtant, son gain en puissance atteint la respectable valeur de 10 millions, C'est-à-dire 80 décibels !

Les secrets de la contre-réaction.

C'est en effet ce que nous allons pouvoir constater. Pourquoi un amplificateur produit-il des déformations ? Il y a, évidemment, beaucoup de raisons. C'est, d'abord, le fait que les éléments de liaison entre les étages ne sont pas parfaits : transformateurs, groupes résistance, capacité, etc.

C'est aussi parce que les caractéristiques des tubes amplificateurs ne sont pas droites.

Dans le premier cas, le gain varie avec la fréquence, ce qui produit précisément de la *distorsion de fréquence*. Dans le second cas, le gain varie avec l'amplitude des tensions qu'il s'agit d'amplifier et, dans ces conditions, on dit qu'il y a *distorsion d'amplitude* (ou, d'une manière plus barbare : de non-linéarité). Et cela se traduit par l'apparition de composantes indésirables qui sont les *harmoniques*. Or, dans l'amplificateur à contre-réaction, le gain étant mesuré par $1/r$ ne dépend plus que du taux de réaction, celui-ci étant, à son tour, déterminé par le rapport :

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Ce taux est indépendant de l'amplitude et de la fréquence. On peut donc en conclure que le gain devient indépendant de la fréquence et de l'amplitude et qu'il n'y a plus de distorsion !

Ne nous emballons pas !

Peut-être serait-il imprudent de nous laisser emporter trop loin par notre enthousiasme ! Il importe maintenant d'examiner les choses d'un peu plus près... Nous avons là un nouvel exemple de ce qu'il ne faut pas faire en interprétant des résultats mathématiques : oublier les suppositions ou hypothèses qui ont été avancées.

Notre interprétation repose entièrement sur le fait que le facteur de réaction rG est beaucoup plus grand que 1. Mais cela ne sera pas nécessairement vrai dans tous les cas...

Il semble cependant que cela soit toujours possible, car il suffit d'augmenter le facteur r...

En réalité, des limitations pratiques interviennent toujours. D'abord, c'est r qui détermine le gain maximum. Si nous choisissons $r = 1/10$, le gain maximum de l'amplificateur sera de 10. Dans ces conditions, il sera peut-être insuffisant. Il ne faut pas oublier que la principale qualité d'un amplificateur, c'est encore d'amplifier...

Remarquons toutefois que ce chiffre de 10 peut sembler anormalement faible. Mais il s'agit du gain en tension.

Le gain en puissance est, dans le fond, le seul qui nous intéresse.

Si l'impédance d'entrée est de $1 \text{ M}\Omega$, — ce qui est une valeur courante — et si l'impédance de sortie est de 1Ω — valeur également courante pour la bobine mobile d'un haut-parleur — le gain en puissance atteint 100 millions. En effet, la puissance d'entrée pour 0,1 V est de (fig. 3).

$$\frac{0,1 \times 0,1}{1.000.000} \text{ ou } 10^{-8} \text{ watt.}$$

La puissance de sortie serait de :

$$\frac{1 \times 1}{1} = 1 \text{ watt.}$$

Le gain en puissance atteint donc bien 100 millions ! ou 80 db... Ce qui n'est pas précisément négligeable...

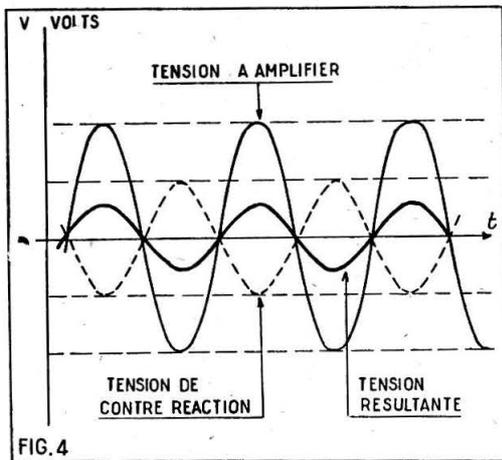


FIG. 4. — Pour qu'il y ait « contre-réaction », il faut que la tension d'entrée et la tension de contre-réaction soient rigoureusement en opposition de phase, c'est-à-dire déphasées de 180°.

La rotation de phase.

Un autre élément vient limiter le taux de contre-réaction que l'on peut pratiquement utiliser : c'est la nécessité d'obtenir toujours une réaction effectivement négative.

Nous avons supposé, jusqu'à présent, que la tension de contre-réaction rS , ramenée à l'entrée de l'amplificateur était exactement en opposition avec la tension qu'il s'agit d'amplifier.

Il s'agit, bien entendu, de tensions alternatives. Dire que ces deux tensions sont en opposition signifie qu'elles se présentent comme nous l'indiquons sur la figure 4, c'est-à-dire qu'elles sont déphasées de 180°.

Or, un amplificateur introduit toujours un certain déphasage qui varie, en général, avec la fréquence. Il en résultera que, pour certaines fréquences, l'opposition ne sera plus strictement réalisée. Il en résultera que le taux de réaction relatif à ces fréquences, diminuera. Dans ces conditions, la réaction pourra tendre à devenir positive. L'amplificateur ne remplira plus du tout les conditions indiquées plus haut. La contre-réaction, non seulement ne corrigera plus la distorsion, mais elle pourra même en produire...

Et, une fois encore, la grandeur essentielle sera le facteur de réaction rG .

Le risque sera d'autant plus grand que r sera lui-même plus grand...

Mécanisme de correction de la courbe de réponse.

Nous avons établi, tout à l'heure, que le gain d'un amplificateur à contre-réaction pouvait se déterminer par l'expression simple :

$$Gr = \frac{G}{1 + rG}$$

présentons sur la figure 5 la courbe de réponse en tension d'un certain amplificateur. On peut voir que cette courbe est très accidentée.

Cherchons à déterminer comment cette courbe sera transformée par l'application d'un couplage réactif.

Nous allons supposer, pour commencer, qu'on applique un taux de contre-réaction très faible, 1/1.000 par exemple.

Nous pouvons calculer le nouveau gain en chaque point de la courbe. Mais il nous suffira pratiquement de déterminer quelques points pour pouvoir tracer la nouvelle courbe de transmission.

FIG. 5. — Comment se modifie la courbe de réponse d'un amplificateur à mesure qu'on augmente le taux de contre-réaction.

Considérons, par exemple, le point A. Le gain, sans contre-réaction, était de 10.000. Le nouveau gain est donné par :

$$Gr = \frac{10.000}{1 + (10.000 \times 0,001)}$$

ce qui fait environ 900.

Nous obtenons donc ainsi le point A1. Le gain était de 1.000 pour les points B et C.

Le nouveau gain est de :

$$Gr = \frac{1.000}{1 + (1.000 \times 0,001)}$$

$$\text{C'est-à-dire } \frac{1.000}{1 + 1} = 500$$

Ce qui nous donne les points B1 et C1. En D et E, le gain était de 100. Nous obtenons maintenant

$$Gr = \frac{100}{1 + (100 \times 0,001)}$$

soit environ 100

Le gain n'est donc pratiquement pas changé et la nouvelle courbe se confond avec l'ancienne.

Bien entendu, en aucun point la valeur du gain ne peut dépasser $1/r$, c'est-à-dire 1.000. La nouvelle courbe présente les mêmes accidents que l'ancienne ; mais les « montagnes » sont relativement moins hautes et les « crevasses » relativement moins profondes.

L'amélioration est donc parfaitement nette.

Augmentons l'importance du taux de contre-réaction et portons le à 1/100 ou 0,01.

Au point A, le gain G était de 10.000. Il est maintenant de :

$$Gr = \frac{10.000}{1 + (0,01 \times 10.000)}$$

ou pratiquement 100.

En réalité, nous vérifions ici que si rG est beaucoup plus grand que 1, le gain devient égal à $1/100$...

Le nouveau point de la courbe est donc A2.

Aux points B et C, le gain était de 1.000. Il devient maintenant :

$$\frac{1.000}{1 + (0,01 \times 1.000)}$$

ou encore pratiquement 100.

Il en résulte que les deux crevasses que présente la courbe en B et C sont totalement effacées.

Aux points D et E, le gain était de 100 avant l'application de la contre-réaction, que devient-il maintenant ?

Il est facile de le calculer :

$$Gr = \frac{100}{1 + (0,01 \times 100)} = \frac{100}{2} \text{ ou } 50.$$

Si nous faisons le calcul aux points E ou F ou le gain était de 10, nous trouverons que le nouveau gain est :

$$Gr = \frac{10}{1 + (0,01 \times 10)} = \frac{10}{1,1}$$

soit 10 environ.

Il n'est donc pratiquement pas change.

Ce qui nous permet de tirer une conclusion fort intéressante. La contre-réaction agit en limitant le gain à la valeur $1/r$. C'est-à-dire 100 dans le cas qui nous a servi d'exemple. Quelle que soit la grandeur du gain en l'absence de contre-réaction, la nouvelle valeur ne sera jamais supérieure à $1/r$.

Il y a donc un rabotage automatique au niveau $1/r$. Quand le gain est très inférieur à $1/r$, rien n'est pratiquement changé. Il en résulte que toutes les bosses que peut présenter la courbe sont impitoyablement supprimées.

On aurait pu, dans l'exemple choisi, adopter un taux de contre-réaction de 1/10. Dans ce cas, le gain aurait été limité à 10, mais la courbe de réponse aurait été telle que nous l'avons représentée en IV.

L'amélioration obtenue de I en III est remarquable. Elle est encore plus saisissante quand on passe de III en IV. En I, la courbe très irrégulière ne présente aucune partie horizontale.

En III, le gain demeure pratiquement constant depuis 100 jusqu'à 10.000 périodes par seconde.

Enfin, en IV, le gain est constant depuis 50 jusqu'au-delà de 50.000 périodes par seconde.

Mais il ne faut pas oublier que cette amélioration de qualité se paie d'une perte considérable de gain...

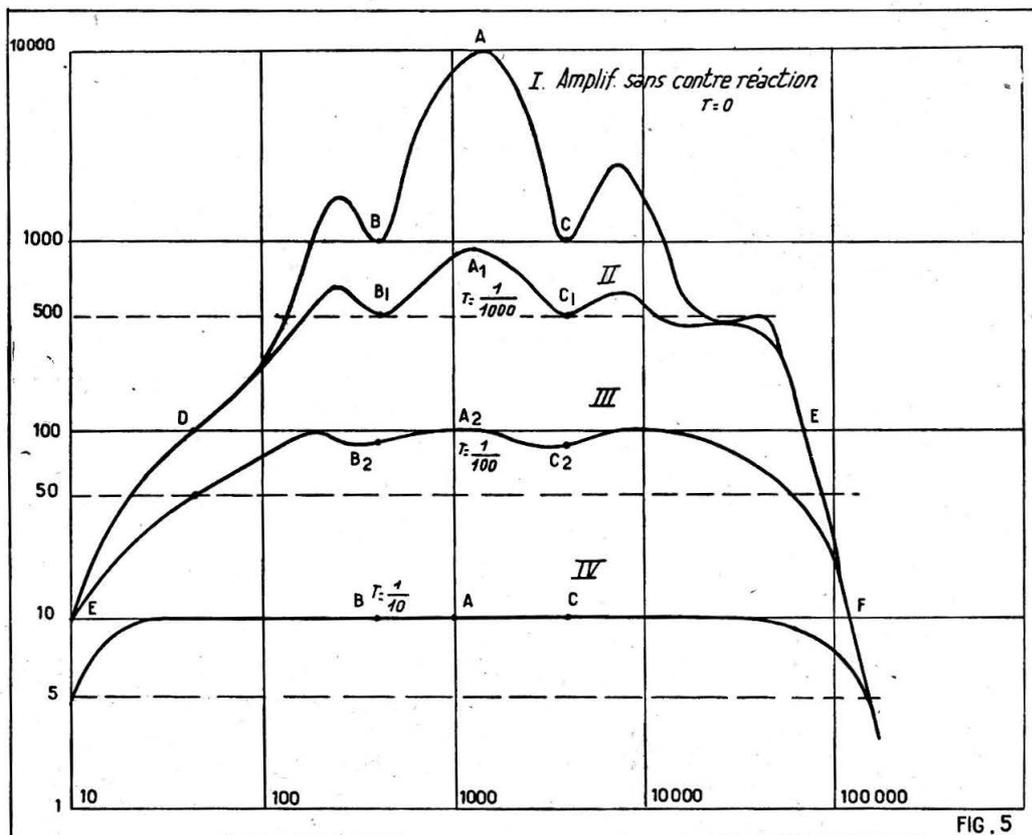


FIG. 5

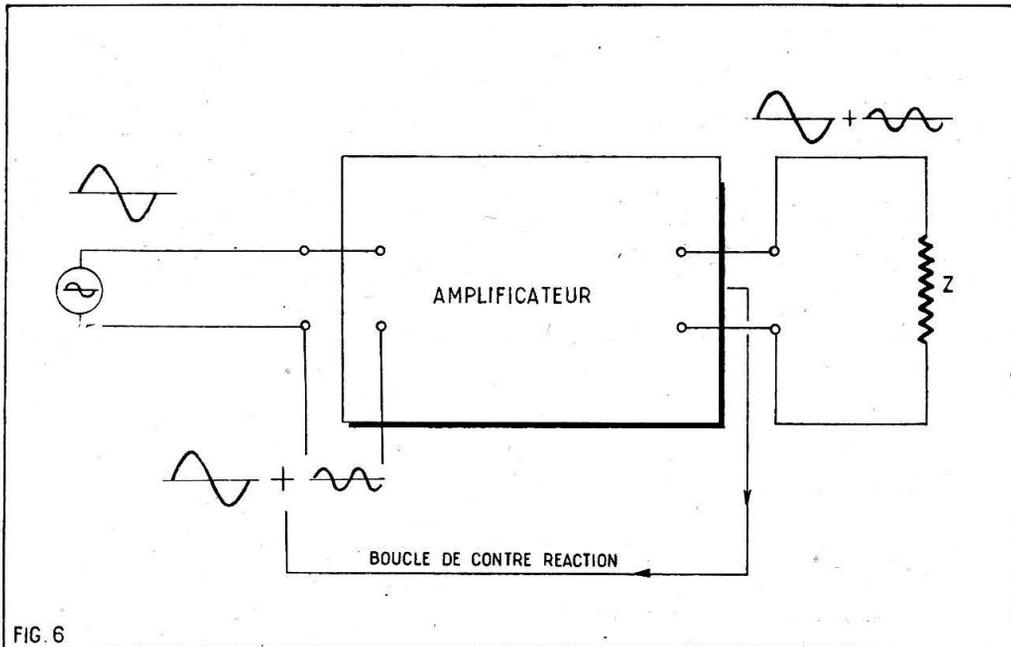


FIG. 6

FIG. 6. — Mécanisme de correction de la distorsion d'amplitude. C'est le même mécanisme qui permet de comprendre l'élimination du bruit de fond, des ronflements, etc...

De plus, il faut, en pratique, tenir compte des facteurs limitatifs que nous avons signalés plus haut.

Correction de la distorsion d'amplitude.

Le mécanisme de la correction apportée à la distorsion d'amplitude est donc fort simple. Celui qui apporte la correction de la distorsion d'amplitude est tout aussi efficace, mais aussi un peu plus subtil.

Considérons, par exemple, un amplificateur (fig. 6) qui fournit de la distorsion par harmonique 2. Cela veut dire que si nous introduisons à l'entrée une tension sinusoïdale pure F , nous trouvons à la sortie une tension composite résultant de la superposition d'une tension sinusoïdale F et d'une tension harmonique de fréquence $2F$.

La tension de contre-réaction comportera naturellement la composante F , qu'il s'agit d'amplifier, mais aussi la composante indésirable de distorsion $2F$. La première se compose avec la tension d'entrée de telle sorte qu'il reste une certaine amplitude $E - rS$ — Mais, pour l'autre, il n'y a aucune tension d'entrée.

C'est donc uniquement la composante $2F$ qui subsiste et qui, amplifiée, combattra l'action déformante de l'appareil. Il en résultera évidemment une amélioration notable de la situation. D'une manière plus précise, le rapport entre l'amplitude de la tension fondamentale F et celle de la tension harmonique indésirable $2F$ sera amélioré, précisément en fonction de la grandeur du facteur de réaction rG ...

Une analyse complète, dont nous faisons grâce à nos lecteurs, permettrait de conclure que le nouveau taux de distorsion d peut être calculé par rapport à l'ancien D par l'expression :

$$d = \frac{D}{1 + rG}$$

L'amélioration peut donc — encore une fois — être considérable. Notons en passant que cette formule, comme toutes les précédentes ne doit pas être appliquée sans discernement. Il y a lieu de l'interpréter.

Bruits de fond, ronflements, inductions, etc...

Il est fréquent qu'un amplificateur de grande sensibilité produise des bruits para-

sites. Un haut-parleur, connecté entre les bornes de sortie, fait entendre « quelque chose », même si rien n'est introduit à l'entrée de l'amplificateur.

Ces bruits peuvent avoir diverses origines. Ils peuvent être du « souffle », des ronflements dus à une insuffisance du filtrage, des inductions, dues à des couplages parasites.

La contre-réaction les atténuera et les fera même disparaître si le facteur de réaction rG atteint une valeur assez grande.

Le mécanisme de l'élimination de ces bruits est exactement le même que celui de la réduction de la distorsion.

Modification de la courbe de réponse par contre-réaction.

Une certitude se dégage nettement de ce qui précède : Le taux de réaction commande le gain d'un amplificateur réactif. Du moins, il en est ainsi, aussi longtemps que le facteur de réaction rG , produit du taux de réaction par le gain, demeure beaucoup plus grand que 1.

Si le taux de réaction est indépendant de la fréquence, l'amplificateur se comporte de la même manière pour toutes les fréquences. On obtient donc, ainsi, une courbe de réponse horizontale.

Mais il est de nombreux cas, où il est souhaitable de pouvoir modifier la forme de cette courbe de réponse. On veut, compenser les réductions d'amplitudes imposées par certains facteurs, par exemple, dans l'enregistrement sur disque, il est nécessaire de réduire l'amplitude des fréquences les plus basses pour éviter le chevauchement des sillons adjacents. Pour retrouver le niveau normal des fréquences basses, il faut, à la reproduction, amplifier davantage ces fréquences externes.

On peut aussi, de la même manière, corriger le mauvais rendement d'un haut-parleur...

D'après ce qui précède, on peut modifier la courbe du gain de l'amplificateur en faisant varier le taux de contre-réaction avec la fréquence. Dans nos différents schémas théoriques, la tension de contre-réaction était obtenue au moyen d'un diviseur de tension $R1-R2$ utilisant deux résistances.

Il en résultait que ce taux était indépendant de la fréquence. Mais nous pouvons facilement rendre ce taux de réaction variable avec la fréquence en utilisant non plus des résistances, mais des réactances.

Examinons, par exemple, la disposition de la figure 7. Le diviseur fournissant la tension de contre-réaction comporte une première branche, comportant, en série, la résistance $R1$ et le condensateur C . La seconde branche est la résistance $R2$. Pour les fréquences élevées, la réactance du condensateur C est négligeable. Mais il n'en est pas de même pour les fréquences basses. Citons quelques chiffres pour fixer les idées. Admettons que $R2 = 50 \Omega$ et que $R1 = 450 \Omega$.

Le taux de contre-réaction est de $50 / (50 + 450) = 0,1$ ou 10 % pour les fréquences élevées, en supposant la réactance de C négligeable.

Prenons $Cg = 1 \mu F$.

FIG. 7. — La réactance de Gg augmente quand la fréquence diminue. Tout se passe donc, en pratique, comme si la valeur de l'élément Zr (voir en b) augmentait. En conséquence, le taux de contre-réaction diminue.

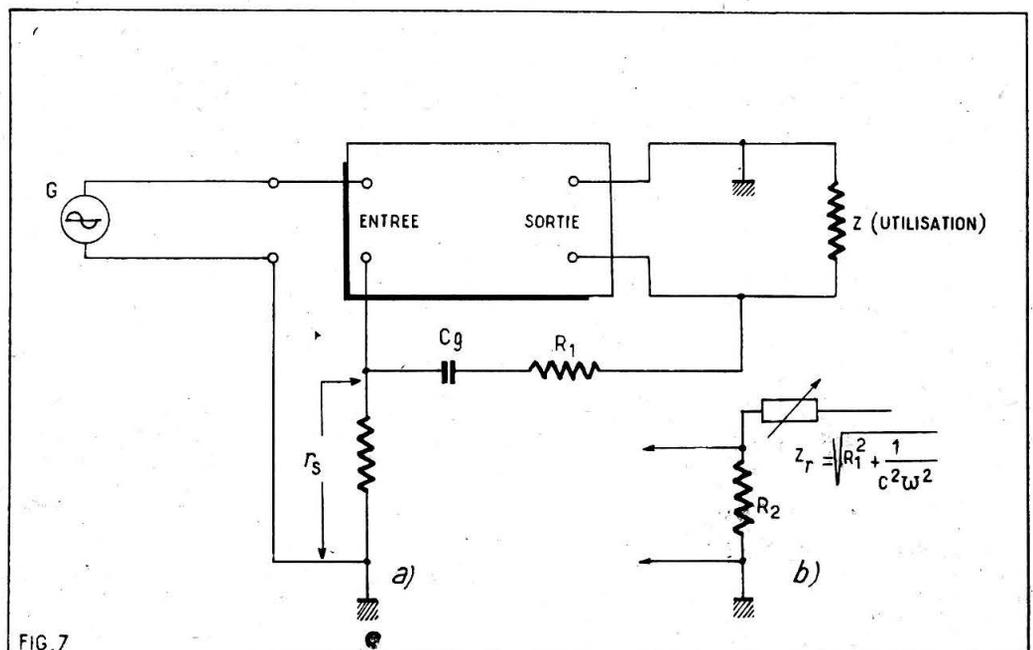


FIG. 7

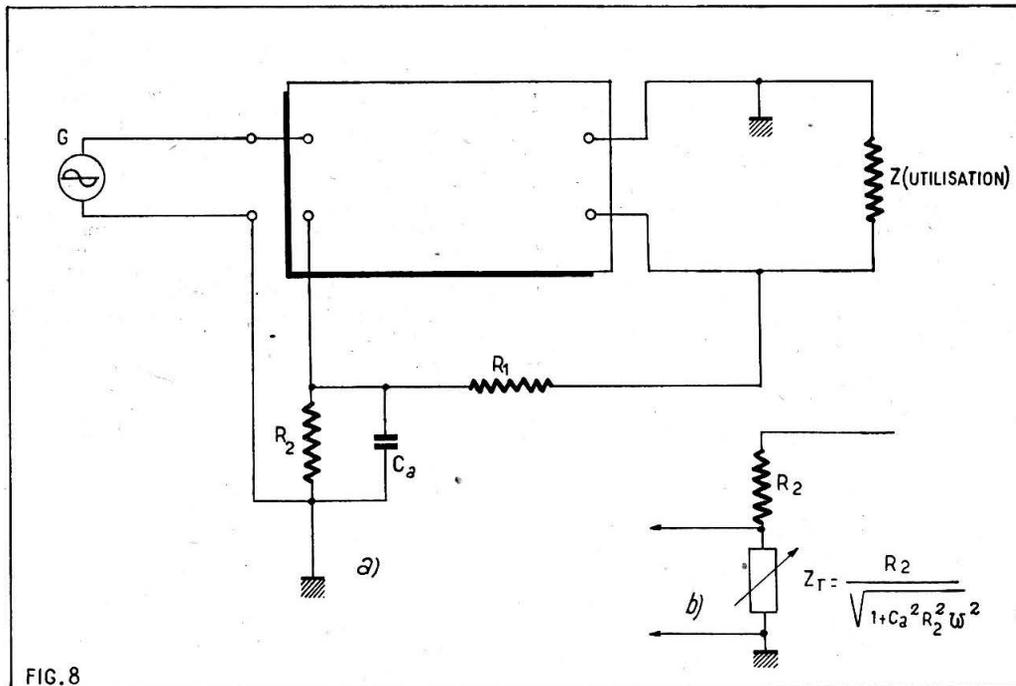


FIG. 8

FIG. 8. — La réactance de C diminue quand la fréquence augmente. Tout se passe, en pratique, comme si la valeur de l'élément Zr (voir en b) diminuait. En conséquence, le taux de contre-réaction diminue.

Il est toujours très commode de se souvenir qu'un condensateur de 1 μ F présente une réactance de 16.000 Ω à la fréquence de 100 périodes par seconde. Si la fréquence est de 10.000 périodes, cette réactance tombe naturellement à 16 Ω , ce qui est effectivement négligeable.

Mais à 100 périodes tout se passe comme si la seconde branche du diviseur de tension comportait en série une réactance de 1.600 Ω et une résistance de 450 Ω . Cette combinaison ne correspond pas à 2.050 Ω , car il ne s'agit pas de résistances, mais à environ 1.600 Ω .

En conséquence, le taux de contre-réaction devient beaucoup plus faible... En conséquence, le gain de l'amplificateur est beaucoup plus grand qu'à 1.000 ou 10.000 périodes par seconde.

Pour favoriser les fréquences élevées.

On peut aussi disposer les éléments pour obtenir un supplément de gain dans la gamme des fréquences élevées. Nous disposerons, dans ce cas (fig. 8) un condensateur en parallèle avec la résistance R2.

La réactance de ce condensateur diminue quand la fréquence augmente. On obtient donc l'effet indiqué en G, qui correspond à une diminution du taux de contre-réaction pour les notes aiguës.

Emploi d'inductances.

On pourrait tout aussi bien utiliser des inductances, mais leur action serait évidemment exactement opposées.

En effet, la réactance d'un bobinage augmente en même temps que la fréquence. En conséquence, une bobine de self-induction en parallèle avec R2, amène une augmentation de gain pour les notes graves.

Réglage de l'effet correcteur.

Enfin, rien n'est plus simple que de doser l'effet des renforcements obtenus. Il suffit, en effet, de prévoir des résistances variables qui deviennent aussi des véritables correcteurs de tonalité (fig. 9.)

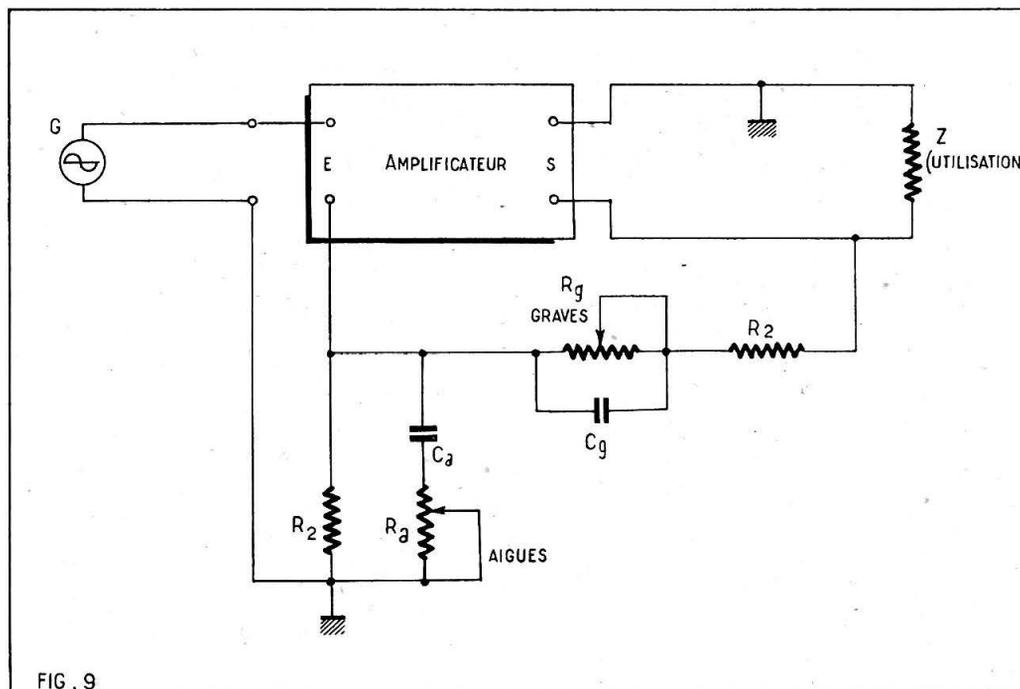


FIG. 9

Il importe de bien comprendre que les renforcements ainsi obtenus ont des limites bien déterminées. En effet, on peut augmenter le gain en réduisant le taux de contre-réaction. Quand la contre-réaction a été entièrement supprimée, le gain, relatif à la fréquence en question, a atteint évidemment une limite infranchissable.

Considérons, par exemple, la courbe de réponse ABCDEF d'un amplificateur sans contre-réaction. Une contre-réaction non sélective nous donnera la courbe GB'C'D'EF.

Nous voulons augmenter le gain pour la fréquence correspondant au point K'. En annulant la contre-réaction pour cette fréquence, nous pourrions faire passer le gain à la valeur correspondant à K'. Mais il sera impossible, par exemple, de faire passer le gain à la valeur correspondant à K''.

Les zones de corrections seront donc toujours situées à l'intérieur de la courbe primitive.

Enfin, l'utilisation d'éléments réactifs, comme des bobines de self-induction ou des condensateurs introduit nécessairement des déphasages. Or, l'effet de contre-réac-

tion est basé sur l'opposition de phase entre les tensions d'entrée et de contre-réaction. Si le déphasage est exagérément grand... on peut parfois observer des troubles de fonctionnement.

Les schémas que nous avons donnés au cours de cet article sont essentiellement théoriques. Leur transposition dans le domaine de la réalité pratique sera le thème d'un prochain article.

Démonstration de la formule du gain d'un amplificateur réactif.

Reportons-nous à la figure 2. Le gain de l'amplificateur sans contre-réaction était G. Il s'agit de calculer la nouvelle valeur du gain :

$$Gr = S/E \quad (1)$$

La définition même du gain de l'amplificateur nous donne :

$$G = \frac{S}{E - rS} \quad (2)$$

puisque E - rS est la tension réellement introduite à l'entrée de l'amplificateur.

Cherchons à tirer $\frac{S}{E}$ de l'expression (2).

Pour cela, nous pouvons la développer : $GE - rSG = S$.

Mettons S en facteur : $S(1 + rG) = EG$.
D'où :

$$\frac{S}{E} = Gr = \frac{G}{1 + rG}$$

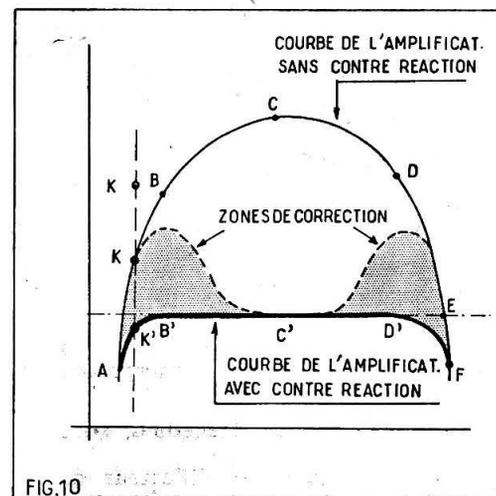


FIG. 10