

Poste téléphonique à transistors expérimental

SOMMAIRE

Les auteurs décrivent les principes de base et un exemple particulier de réalisation industrielle d'un poste téléphonique entièrement équipé en transistors. Ils mettent en évidence, par comparaison avec les postes actuellement utilisés par l'Administration des P et T, les avantages et possibilités d'emploi, actuelles et futures, de ce nouveau poste dans le réseau téléphonique.

PLAN

I. - INTRODUCTION

II. - LE POSTE TÉLÉPHONIQUE CLASSIQUE

II. 1. - Les fonctions remplies par le poste

II. 2. - Description d'un poste téléphonique classique

II. 3. - Les inconvénients du poste classique

III. - LE POSTE TÉLÉPHONIQUE A TRANSISTORS

III. 1. - Conception d'ensemble

III. 2. - Principale réalisation des diverses fonctions

III.2.1. - Coupleur différentiel actif

III.2.2. - Amplificateurs

III.2.3. - Polarisation des transistors du montage

III.2.4. - Sonnerie électronique

III. 3. - Exemple de réalisation

III. 4. - Performances obtenues

IV. - AVENIR DU POSTE A TRANSISTORS

IV. 1. - Avenir immédiat ou à court terme

IV.1.1. - Remplacement pur et simple du poste classique

IV.1.2. - Utilisation du poste sur les lignes longues

IV. 2. - Avenir à moyen et long terme

IV.2.1. - Les postes téléphoniques de l'avenir

IV.2.2. - L'évolution vers le poste téléphonique de l'avenir

V. - CONCLUSION

ANNEXE: Equations du fonctionnement du poste

* Ingénieurs des Télécommunications. Département E.T.A. du CNET. Lannion.

I. - INTRODUCTION

L'amélioration de la qualité téléphonique constitue un objectif à caractère permanent pour l'Administration des Postes et Télécommunications. Ainsi, au cours des dernières années, la qualité de transmission des circuits interurbains à grande distance n'a fait que croître : les progrès rapides de l'électronique, en particulier dans le domaine des semi-conducteurs, ont rendu possible la mise au point d'équipements de transmission de plus en plus complexes et perfectionnés, aux performances meilleures pour un prix égal ou inférieur.

Toutefois, il ne faut pas oublier que le réseau téléphonique ne comprend pas que des lignes à grande distance, mais aussi un bien plus grand nombre de lignes d'abonnés reliées chacune à un poste téléphonique d'abonné.

Les meilleures lignes de transmission ne peuvent transmettre que ce qu'on leur demande de transmettre, et il semble que, dès maintenant, et de plus en plus à l'avenir, le facteur limitatif de la qualité d'une liaison téléphonique provienne presque exclusivement de la ligne et du poste d'abonné.

D'importantes études ont été menées sur le poste dans le cadre du programme général de recherches de SOCOTEL.

Pourquoi et comment introduire l'électronique dans le poste téléphonique d'abonné ? C'est ce que nous essaierons de définir dans cet article.

II. - LE POSTE TÉLÉPHONIQUE CLASSIQUE

II.1. - Les fonctions remplies par le poste

II.1.1. Réception de l'appel

Le poste doit produire un signal sonore qui avertit l'abonné quand un correspondant l'appelle.

II.1.2. Numérotation

Le poste, par son cadran ou clavier d'appel, doit permettre au demandeur d'indiquer aux centraux de commutation quel est l'abonné demandé.

II.1.3. Transmission

Lorsqu'une communication est établie, le poste doit émettre en ligne les courants délivrés par le microphone, et diriger sur l'écouteur les courants vocaux transmis par la ligne jusqu'au poste.

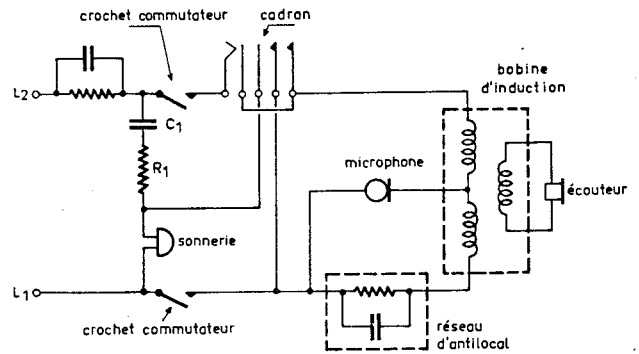


FIG. 1. — Schéma électrique du poste S 63.

II.2. - Description d'un poste téléphonique classique

Nous décrirons, sommairement, la constitution du poste téléphonique SOCOTEL S 63 de l'Administration (fig. 1).

II.2.1. Circuit de réception d'appel

Lorsque le crochet commutateur est abaissé (combiné « raccroché »), la ligne est bouclée uniquement sur la sonnerie, par l'intermédiaire de la capacité C_1 en série avec la résistance R_1 .

Sous l'effet des courants d'appel (50 Hz pulsé, $V_{\text{eff}} = 80 \text{ V}$) émis au central, l'électro-aimant de la sonnerie est actionné.

II.2.2. Circuits de numérotation

Quand le crochet commutateur est relevé (combiné « décroché ») un courant continu circule dans le poste, sous l'effet de la tension de 48 V appliquée en permanence au central sur les fils de ligne.

Les divers contacts et ressorts du cadran d'appel établissent, lorsque celui-ci est actionné, une succession d'ouvertures et de fermetures de boucle, ce qui se traduit au central par une succession d'impulsions de courant.

II.2.3. Circuits de transmission

Lorsque le combiné est « décroché », le poste se trouve en position de conversation. La ligne est couplée au microphone et à l'écouteur par l'intermédiaire de la bobine d'induction. Celle-ci n'est autre qu'un réseau différentiel assurant un passage 2 fils (ligne) \leftrightarrow 4 fils (microphone et écouteur). Lorsque l'impédance du réseau d'équilibrage, ou réseau d'anti-local, est égale à celle de la ligne, les

courants délivrés par le microphone ne produisent aucun son dans l'écouteur.

La bobine d'induction est de plus calculée de façon que l'impédance d'entrée du poste soit voisine de celle de la ligne, afin d'éviter les désadaptations d'impédances, les échos et les pertes qui en résultent.

II. 3. - Les inconvénients du poste classique

II.3.1. Immuabilité de "l'équivalent" du poste

La transformation de la puissance électrique en puissance acoustique développée dans l'oreille de l'abonné est effectuée par l'écouteur. Le rendement de cette « transduction » électro-acoustique est fixé une fois pour toutes par les caractéristiques de construction de l'écouteur. De même, le rendement de la transduction acousto-électrique du microphone est fixé par les caractéristiques de construction de ce microphone.

Un poste téléphonique placé en bout d'une ligne d'abonné longue, qui présente donc un fort affaiblissement, donnera un niveau de conversation beaucoup plus faible ainsi qu'une tonalité plus sourde et beaucoup moins intelligible que le même poste placé en bout d'une ligne courte. Or, on cherche, au contraire, dans l'organisation du réseau téléphonique moderne, à procurer une qualité de conversation aussi constante que possible à tous les abonnés.

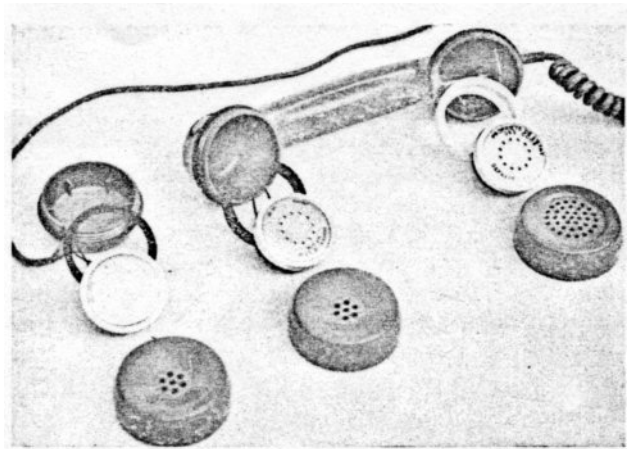
II.3.2. Qualités et défauts du microphone à charbon

Le microphone à charbon a deux grandes qualités :

- il est très « efficace », plus que tout autre type de microphone, et ne nécessite pas l'emploi d'un amplificateur,
- il est bon marché, ce qui s'explique aisément par le fait qu'il est très utilisé (d'ailleurs presque exclusivement) en téléphonie.

En revanche, le microphone à charbon présente de graves défauts :

- son bon fonctionnement nécessite un *courant de polarisation important* (de 30 à 50 mA), et son efficacité décroît rapidement quand ce courant de polarisation diminue. Ce courant est déterminé par la résistance de boucle et la tension d'alimentation (48 V) du central. Son maintien à une valeur minimale vient donc limiter la résistance, donc la longueur, de la ligne. D'autre part, pour les lignes courtes, il y a



— Vue éclatée du combiné et du récepteur supplémentaire, montrant l'utilisation de trois capsules identiques.

lieu d'insérer des résistances dans le poste, faute de quoi l'efficacité risque de devenir trop importante, mais surtout le courant trop fort risque de « brûler » la capsule ;

- il donne lieu à une distorsion non linéaire très importante. Si la perte d'intelligibilité qui en résulte est en général assez faible, le naturel de la voix en est grandement affecté : le microphone à charbon est loin d'être un microphone « haute fidélité » ;
- enfin, la capsule à charbon est un élément essentiellement instable ; l'efficacité dépend de la position et varie en fonction d'autres paramètres : durée de conversation, etc. (tassement des grains de charbon).

II.3.3. Impédance présentée à la ligne par le poste

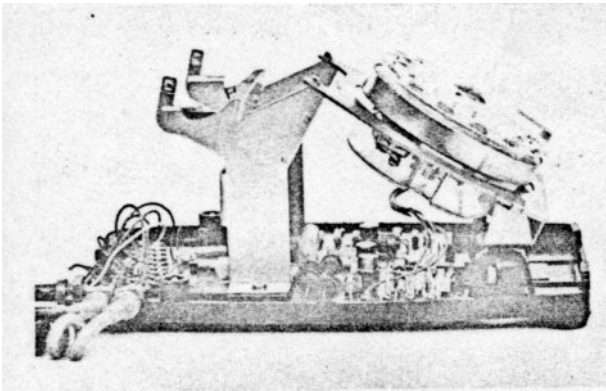
L'impédance que le poste présente à la ligne dépend des caractéristiques de la bobine d'induction et de l'écouteur ; elle est en général très mal définie, car l'impédance électrique de l'écouteur varie beaucoup avec la fréquence, et la bobine est loin de se comporter à toutes fréquences comme le transformateur parfait qu'elle est censée être.

III. - LE POSTE TÉLÉPHONIQUE A TRANSISTORS

III. 1. - Conception d'ensemble

III.1.1. Les idées de base

- Associer à l'écouteur un amplificateur électronique permettant de régler à volonté « l'équivalent à la réception du poste ».



— Vue du poste à transistors.

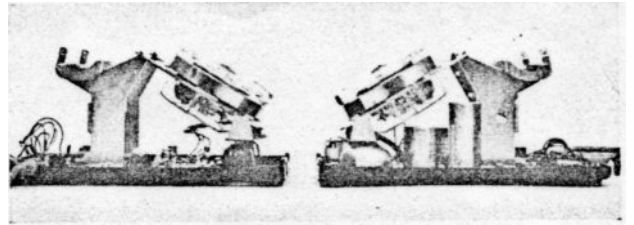
- Remplacer le microphone à charbon par un microphone de meilleure qualité, magnéto-dynamique ou électro-dynamique, associé à un amplificateur électronique permettant de régler à volonté « l'équivalent à l'émission » du poste.
- Remplacer la bobine d'induction par un « coupleur différentiel actif » à transistor effectuant parfaitement les fonctions essentielles de la bobine : découplage entre microphone et écouteur, d'une part, et adaptation du poste à la ligne, d'autre part.
- Assurer la polarisation des amplificateurs d'émission et de réception, et du coupleur actif par le courant continu que fait circuler dans la ligne et le poste d'abonné la batterie de 48 V placée au central.

III.1.2. Les impératifs de prix

Le bilan financier de ces transformations ne doit pas, en outre, être trop défavorable. Ce souci d'économie nous a conduit :

- à remplacer le microphone à charbon par une capsule réceptrice (écouteur) normale du poste S 63. Ces capsules réceptrices fabriquées en très grande quantité sont d'un prix de revient assez bas (beaucoup plus bas en tout cas que les microphones du commerce). Leurs qualités, comme microphones, se sont révélées satisfaisantes dans la bande 300 - 3 400 Hz (fig. 5a).
- à supprimer la sonnerie conventionnelle (qui coûte relativement cher) du poste S 63, en lui substituant une sonnerie électronique très simple utilisant l'écouteur supplémentaire du poste.

Toutes choses égales par ailleurs (boîtier du poste, cadran, crochet commutateur...), et en



— Le poste à transistors (à gauche) comparé au poste S 63.

négligeant le prix du câblage du poste, le coût de la transformation s'établit comme suit :

La différence de prix entre la version électronique et la version classique est égale à la différence de prix entre les composants ajoutés : capsule réceptrice et éléments électroniques (amplificateur, coupleur, sonnerie) et les composants supprimés : bobine d'induction, sonnerie, microphone à charbon.

Dans le cas d'une fabrication en série de la partie électronique, cette différence devrait être assez faible, et peut-être même être à l'avantage du poste électronique.

III. 2. - Principale réalisation des diverses fonctions

III.2.1. Coupleur différentiel actif

C'est en fait un simple transistor, comme le montre la figure. On peut montrer aisément (voir annexe) qu'il n'y a pas transmission entre les accès 1,1' et 3,3' si les accès 2,2' et 4,4' sont respectivement bouclés sur les impédances W et W/α , où α est le gain en base-commune du transistor.

On bouclera donc :

1,1' sur les bornes de sortie de l'amplificateur du microphone,

3,3' sur les bornes d'entrée de l'amplificateur de l'écouteur,

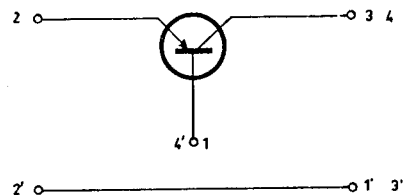


FIG. 2. — Schéma électrique de principe du coupleur actif.

2,2' sur les bornes lignes du poste,
4,4' sur le réseau d'équilibrage ou d'anti-local.

On obtiendra ainsi un découplage entre le microphone et l'écouteur. En se reportant aux résultats du calcul donné en annexe, on voit que l'impédance d'entrée du poste est pratiquement égale à l'impédance d'entrée de l'amplificateur de l'écouteur ; elle peut donc être ajustée aisément, en particulier à la valeur normalisée ($600 \Omega/0^\circ$).

Le calcul des valeurs des équivalents à l'émission et à la réception est immédiat.

III.2.2. Amplificateurs

Le choix, ainsi que le fonctionnement pour les courants de conversation, des amplificateurs de microphone et d'écouteur n'appellent pas de longs commentaires. On demande simplement à ces amplificateurs d'avoir des impédances d'entrée et de sortie bien définies, ainsi que des gains à chaque fréquence bien définis, mais ajustables par des moyens simples. Ces objectifs sont facilement réalisés.

III.2.3. Polarisation des transistors du montage

Il est nécessaire d'introduire dans le poste un montage redresseur à diodes, afin que le courant continu qui traverse les transistors du coupleur et des amplificateurs circule toujours dans le même sens et assure leur polarisation correcte malgré les inversions de batterie au central.

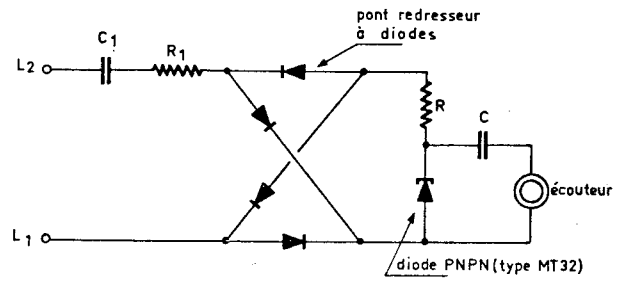


FIG. 3. — Schéma électrique de la sonnerie électronique.

III.2.4. Sonnerie électronique

Le dispositif de sonnerie, représenté à la figure 3, est un oscillateur à relaxation à impédance négative. Pendant chaque alternance du courant d'appel à 50 Hz, la capacité C se charge par l'intermédiaire de la résistance R , se décharge quand la tension à ses bornes atteint la tension « pic » de la diode à impédance négative Z , se recharge à nouveau et ainsi de suite.

L'écouteur supplémentaire est ainsi parcouru par les courants de charge et de décharge de la capacité C , dont la fréquence et la grandeur peuvent d'ailleurs être ajustées à volonté en jouant sur les valeurs de R et de C .

Ces impulsions de charge et de décharge ont un spectre très riche.

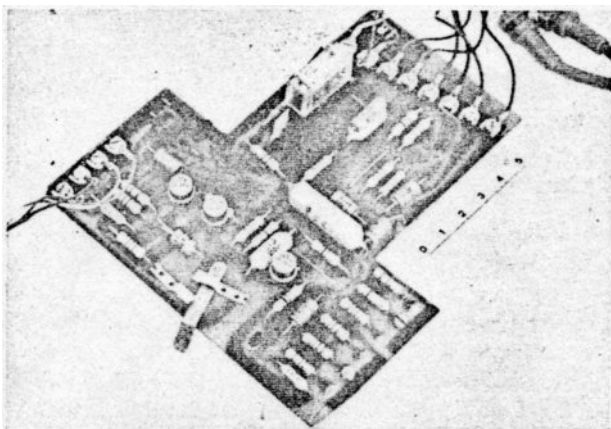
Les sons émis par l'écouteur sont très intenses et perceptibles à distance.

III. 3. - Exemple de réalisation

La figure 4 représente le schéma d'ensemble du poste transistorisé, réalisé par le CNET à quelques exemplaires. On reconnaît sur cette figure les principaux éléments constitutifs mentionnés précédemment.

Plusieurs particularités peuvent être notées :

- l'alimentation de ce poste se fait en courant constant. En effet, l'amplificateur du microphone A_1 , se comporte comme un injecteur de courant constant et impose une valeur bien déterminée au courant en ligne, *quelle que soit la résistance de celle-ci*. La valeur de ce courant de ligne peut être aisément fixée à n'importe quelle valeur (dans l'exemple présent, cette valeur a été fixée à 30 mA) ;
- des réglages à 3 positions des équivalents à l'émission et à la réception ont été prévus



— Circuit imprimé du poste à transistors.

11Z6 = 3.3V Zener
 set to line current of 30
 line < 630 Ω

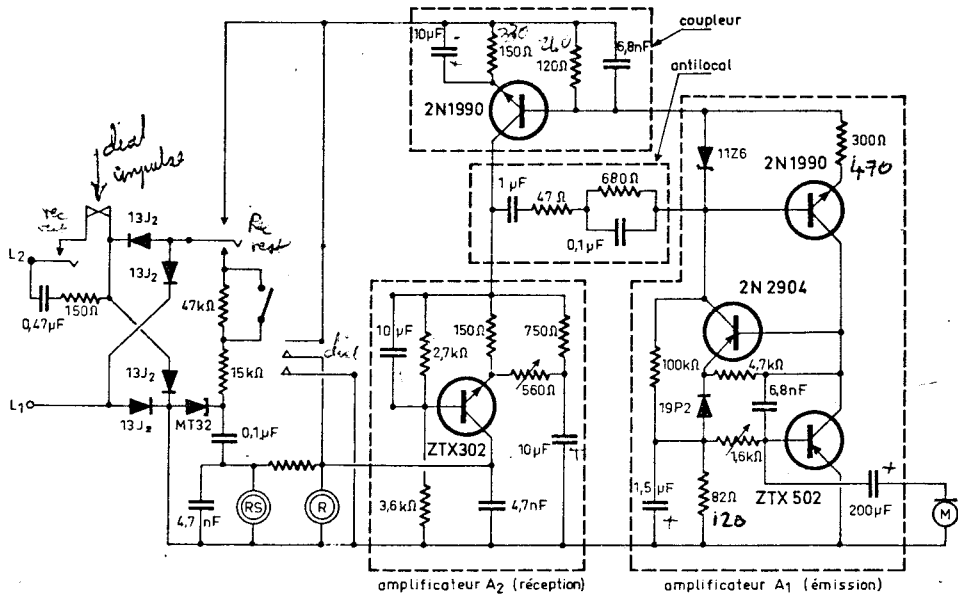


FIG. 4. — Schéma électrique du poste à transistors.

Electronic one = CNET 68
 Old fashioned one = S63

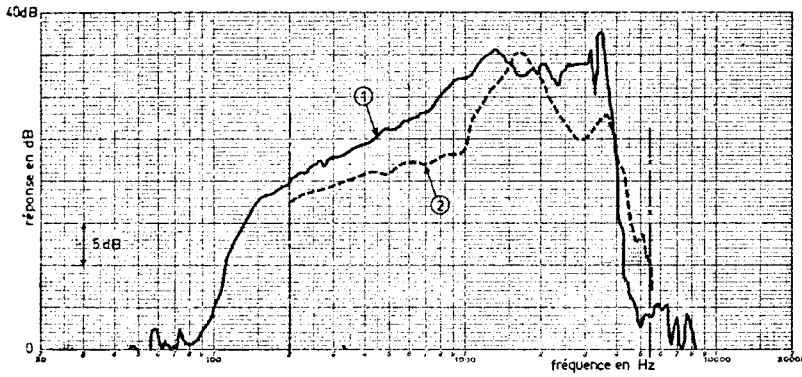


FIG. 5a. — Courbes de réponse à l'émission

Courbe 1. Poste CNET 68 + ligne 4 km. Bouche artificielle CNET.

Courbe 2. Poste S 63 + ligne 4 km. Bouche artificielle CNET.

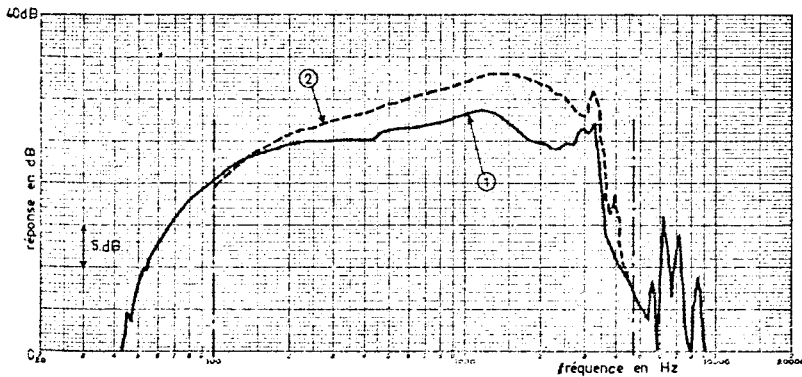


FIG. 5b. — Courbes de réponse à la réception.

Courbe 1. Poste CNET 68 + ligne 4 km. Oreille artificielle CNET.

Courbe 2. Poste S 63 + ligne 4 km. Oreille artificielle CNET.

(+ 5 dN, 0, - 5 dN par rapport aux équivalents nominaux du poste S 63). Ces réglages s'effectuent simplement par une modification de valeur de deux résistances agissant sur les gains des amplificateurs d'émission et de réception ;

- le réseau anti-local est déterminé de façon à donner un effet local minimal sur les lignes les plus longues (amplificateurs réglés à leur gain maximal).

Si on branche le poste sur une ligne courte, sans changer les gains des amplificateurs, l'effet local augmente sensiblement. Mais, en fait, lorsque le poste est branché sur une ligne courte, on positionne normalement le gain des amplificateurs à leur valeur nominale, ce qui diminue l'effet local.

On voit donc que le réglage des gains des amplificateurs, en fonction de la longueur de la ligne, permet d'assurer :

- des équivalents (ligne + poste) quasi constants à l'émission et à la réception,
- un effet local quasi constant.

III. 4. - Performances obtenues

Les figures 5a et 5b rassemblent les principaux résultats expérimentaux concernant les performances de prototypes de postes transistorisés réalisés au CNET.

On pourra noter en particulier l'excellente courbe de réponse amplitude-fréquence de la capsule réceptrice S 63 utilisée comme microphone.

IV. - AVENIR DU POSTE TRANSISTORISÉ

IV. 1. - Avenir immédiat ou à court terme

IV.1.1. Remplacement du poste classique

Le souci principal qui a prévalu lors de la mise au point de ce prototype a été la *compatibilité* avec les postes classiques. On peut, sans aucune autre modification, remplacer un poste classique U 43 ou S 63 par le poste transistorisé. Les avantages immédiats d'un tel remplacement sont comme on l'a signalé,

- l'augmentation de qualité,
- la possibilité d'ajuster les équivalents de transmission à n'importe quelle valeur,

et peuvent, à eux seuls, justifier l'introduction immédiate et progressive du poste à transistors dans le réseau.

IV.1.2. Utilisation du poste sur les lignes longues

Il semble que le poste à transistors permette surtout d'utiliser des lignes d'abonnés présentant un affaiblissement de transmission beaucoup plus élevé que les lignes actuelles. Le gain des amplificateurs du poste permet en effet de compenser l'affaiblissement supplémentaire de la ligne. Il devient ainsi possible :

- soit, pour une même longueur de ligne, d'utiliser des câbles de diamètre beaucoup plus faible, donc beaucoup plus économiques ;
- soit, pour un même diamètre de câble, d'augmenter notablement la longueur de la ligne, donc de raccorder des abonnés distants.

Cette faculté provient surtout de ce que le poste téléphonique à transistors peut se satisfaire d'un courant d'alimentation environ moitié de celui que nécessite le poste SOCOTEL S 63 : 12 à 15 mA, au lieu de 30 à 35 mA.

L'automatisation intégrale des groupements, qui constitue l'un des objectifs actuels de l'Administration, pose avec acuité le problème du raccordement des abonnés distants. L'utilisation, dans ce cas, de postes téléphoniques amplifiés, peut apporter une solution à ce problème. Toutefois, deux limitations apparaissent :

- la diaphonie entre lignes d'abonnés,
- la valeur minimale, importante, du courant de ligne nécessaire au fonctionnement des équipements d'abonnés situés au central.

L'amplification en extrémité de ligne, qu'opère le poste à transistors, est a priori très néfaste sur le plan de la *paradiaphonie*.

L'utilisation de postes fortement amplifiés raccordés à des lignes longues peut conduire à des valeurs d'affaiblissement de paradiaphonie beaucoup trop faibles.

Les équipements d'abonnés des centraux de commutation nécessitent pour leur bon fonctionnement (relais de lignes en particulier) un courant important en ligne. La résistance admissible de la ligne est donc limitée supérieurement par la valeur :

$$R_{\max} = \frac{\text{tension de batterie du central}}{\text{courant minimum en ligne}} - R_1 - R_2$$

R_1 résistance du pont d'alimentation,

R_2 résistance du poste.

Deux possibilités se présentent pour augmenter cette valeur R_{\max} :

- augmenter la tension de batterie du central,
- diminuer le courant minimal en ligne (utilisation de relais sensibles ou transistorisés).

Pour le poste électronique amplifié, les éléments à prendre en compte pour le calcul de la résistance maximale, donc de la longueur maximale de ligne, sont les suivants :

- courant de ligne : I_L (fixé par le poste),
- tension minimale aux bornes du poste pour être assuré d'un bon fonctionnement,
- chute de tension du courant de ligne dans l'équipement d'abonné (pont d'alimentation).

Actuellement le courant I_L minimum est de 35 mA pour les centraux de type ancien. D'autre part, la tension minimale aux bornes du poste est d'environ 12 V et la chute de tension dans le pont d'alimentation de 10 V.

La résistance maximale de ligne est dans ces conditions :

$$R_{\max} = \frac{44 - 12 - 10}{35 \times 10^{-3}} = 630 \Omega$$

En revanche, si un dispositif simple permet d'envisager de faire fonctionner le poste avec 12 mA seulement, sans pour autant augmenter la chute de tension dans l'équipement d'abonné, le même calcul donne :

$$R_{\max} = \frac{44 - 12 - 10}{12 \times 10^{-3}} = 1830 \Omega$$

Il n'est d'ailleurs pas interdit d'espérer réduire les 12 V actuels aux bornes du poste aux alentours de 7 V, grâce à un montage amélioré.

Compte tenu de la marge de gain et de la reproductibilité de fonctionnement du poste, on peut donc envisager sans crainte de pouvoir dépasser 2 000 Ω de résistance de ligne.

IV. 2. - Avenir à moyen et long terme

IV.2.1. Les postes téléphoniques de l'avenir

Que sera le poste de l'avenir ? celui du XXI^e siècle ? Il serait présomptueux de vouloir dès maintenant décrire un tel poste ; qui sait même s'il

existera encore au XXI^e siècle des postes téléphoniques ?

Toutefois, sans être taxés de futurisme, on peut essayer de dégager quelques grandes lignes raisonnables :

- le poste téléphonique de l'avenir sera adapté aux centraux de commutation modernes ;
- il assumera une qualité et un niveau de conversation constants,
- il sera probablement 'un poste à clavier,
- son volume se réduira de plus en plus, sa forme deviendra de plus en plus fonctionnelle.

IV.2.2. L'évolution vers le poste téléphonique de l'avenir

En laissant de côté les problèmes techniques liés à la pure esthétique de l'appareil (miniaturisation du clavier, du microphone, de l'écouteur...) on peut malgré tout définir le sens des perfectionnements à apporter au prototype de poste téléphonique à transistors pour qu'il ait une chance de devenir vraiment le poste de l'avenir.

L'adaptation aux centraux de commutation modernes et futurs implique à coup sûr une *diminution des courants de ligne* (peut-être même leur suppression, le poste de l'avenir redevenant un poste à batterie locale !), et des *courants d'appel*. L'électronique est la technique des courants faibles ; les centraux de l'avenir seront certainement des centraux électroniques. Demander à ces centraux électroniques de délivrer des courants continus d'une cinquantaine de milliampères par abonné, des signaux d'appels à fréquence industrielle sous des tensions de plus de 100 V sont déjà des invraisemblances techniques. Dans un poste électronique, la diminution des courants de ligne est très aisée ; la diminution des courants d'appel implique, à notre avis, l'étude et la mise au point d'une sonnerie électronique commandée par un code de fréquences audibles, semblable à ceux que l'on utilise déjà pour transmettre la signalisation sur les circuits téléphoniques.

Le réglage manuel de l'équipement du poste est appelé à disparaître au fur et à mesure de la normalisation du réseau téléphonique. Il est aisé d'imaginer et de réaliser des dispositifs d'asservissement des gains des amplificateurs du poste électronique à la longueur de la ligne, donc à son affaiblissement. Par exemple, les résistances qui permettent d'ajuster les gains des amplificateurs

peuvent être remplacées par des thermistances dont la valeur varie avec le courant en ligne.

La réalisation du poste en microélectronique rendra possible l'intégration, sous un très faible volume, des fonctions électroniques de numérotation assurées par le clavier, telles que la production du code de fréquences vocales, dans le cas d'une numérotation du type « 2 fréquences parmi 7 ».

V. - CONCLUSION

Le poste téléphonique d'abonné constitue l'un des maillons essentiels de toute liaison téléphonique. Son prix est conditionné par l'importance des séries de fabrication et l'Administration ne peut donc se permettre de mettre en service un grand nombre de modèles différents : elle doit, au contraire, dans ce domaine, unifier au maximum son matériel. Sans vouloir préjuger de ses décisions, nous avons seulement voulu montrer que le poste tout à transistors était possible du point de vue technique comme du point de vue économique et qu'il peut se substituer au poste actuel sans aucune modification des centraux téléphoniques.

ANNEXE

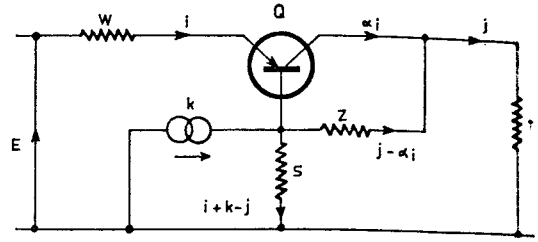
CALCUL DU FONCTIONNEMENT DU COUPLEUR ACTIF

Hypothèses

L'amplificateur de microphone est représenté par son impédance de sortie S ,
le courant utile k qu'il débiterait en court-circuit.

L'amplificateur de l'écouteur est représenté par son impédance d'entrée T .

W est l'impédance de la ligne vue aux bornes du poste.



Z est l'impédance du réseau d'équilibrage,
 Q est un transistor dont la matrice en H (base électrode commune) s'écrit :

$$\begin{vmatrix} b_{11b} & 0 \\ b_{21b} & b_{22b} \end{vmatrix}$$

On négligera le terme b_{11b} qui peut être incorporé dans W .

On négligera le terme b_{22b} qui peut être incorporé dans Z .

On appelle $\alpha = b_{21b}$.

Impédance d'entrée du poste

Faisant $k = 0$ on calcule :

$$\begin{aligned} z_e &= \frac{E - W i}{i} = -\alpha Z + (Z + T) \frac{j}{i} \\ &= -\alpha Z + (Z + T) \frac{S + \alpha Z}{S + Z + T} \\ &= \frac{(Z + T)S - \alpha Z S}{S + Z + T} \end{aligned}$$

c'est-à-dire :

$$z_e = \frac{ST + SZ(1 - \alpha)}{S + Z + T}$$

Si S est grand devant T et Z et si $(1 - \alpha)$ est petit, on obtient :

$$z_e \approx T.$$