

UNIVERSITE D'ALGER

16/79

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ELECTRICITE

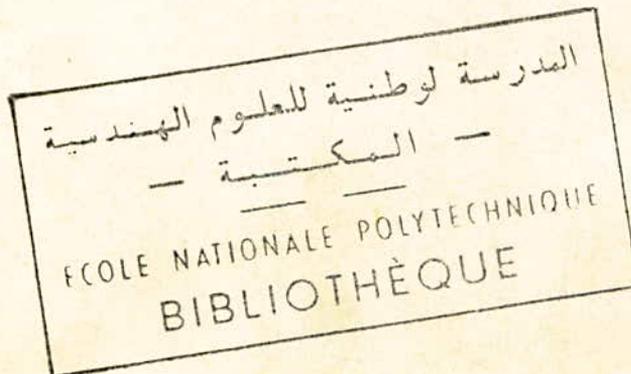
3ex



THESE DE FIN D'ETUDES

SYNTHETISEUR DE SON

" ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE "



Promoteur :

M. HADDADI

Etudié et réalisé par :

SAIDI Amar

YAGOUB Mustapha C.E

Promotion Janvier 1979

Bibliothèque

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ELECTRICITE

THESE DE FIN D'ETUDES

SYNTHETISEUR DE SON

“ ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ”

Promoteur :

M. HADDADI

Etudié et réalisé par :

SAIDI Amar

YAGOUB Mustapha C.E

Promotion Janvier 1979

8
 REMERCIEMENTS

NOUS TENONS A REMERCIER: notre promoteur Monsieur MOURAD HADDADI dont la précieuse aide et les conseils judicieux qu'il nous a prodigué ont été pour nous d'un concours appréciable.

NOUS TENONS EGALEMENT A REMERCIER tous ceux QUI ONT CONTRIBUE A NOTRE FORMATION.

NOS REMERCIEMENTS vont aussi A TOUS NOS CAMARADES.

YAGOUB MUSTAPHA C.E.

SAIDI AMOR

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail :

- A mes chers parents
- A ma compagne
- A tous les camarades.

Mustapha

D E D I C A C E S

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :

888 A MES CHERS PARENTS POUR TOUS LEURS SACRIFICES ET LEUR
AFFECTION.

 A TOUS MES PROCHES ET EN PARTICULIERS MES ONCLES ET SURTOUT
ONCLE SAIDI MOKHTAR & FILS.

 A TOUS MES AMIS / MOKHTAR, TAHAR, DAHMANE A.E.K., HALOUANI A.E.K.

BENHELLA ABDELHAY, BENTAHAR MESSAOUD ET OUALI ET HOUGEIR WADIH
LES "FAMEUX" ET ENFIN A HAYAT, MALIKA et NADIA

Amar

I-INTRODUCTION

1-But du projet

L'accès à une information transmise oralement par un ordinateur capable, d'engendrer une réponse intelligible, a semblé relever du domaine de la science fiction, mais cette fiction est devenue progressivement une réalité d'aujourd'hui.

Le but de ce projet est avant tout **BIBLIOGRAPHIQUE** Il s'agit de donner un aperçu des recherches effectuées dans le domaine de la synthèse du son, afin de servir de base de travail à plusieurs autres travaux dans les prochaines années.

Ce travail sera donc une sorte de bilan ~~schématique~~ de la synthèse de la parole, des premières machines parlantes à nos jours.

2-Définition d'un synthétiseur

Que ce soit dans l'industrie (projets, calcul...) les télécommunications (réseaux téléphoniques, guidage des avions informations diverses...), les centres de recherche, de documentation..., les synthétiseurs de parole tendent à devenir des instruments de plus en plus indispensables, car ils tendent à créer un dialogue direct entre l'homme et la machine (améliorent ainsi les moyens et les méthodes d'information.)

Le synthétiseur, comme son nom l'indique, synthétise c'est-à-dire qu'il reforme artificiellement un corps composé, à partir de ses éléments. Le corps dans notre cas est le son en général et la parole en particulier.

3- Historique

Les machines parlantes que nous connaissons, reproduisent, à l'aide de haut parleurs, les sons enregistrés (parole et musique). Mais depuis longtemps, l'homme a songé à construire des machines destinées, non pas à reproduire mais à imiter la voix humaine.

Les études historiques de METTAS (1966), LIENARD (1970) ou FLANAGAN (1972), nous montrent que dès l'antiquité, des

chercheurs ingénieurs ont réalisé des "statues parlantes".
C'en'était en fait que des hommes cachés à l'intérieur de
la statue, et parlant avec de longs tuyaux.

Et tout au cours des siècles, les ouvrages d'histoi-
re scientifique mentionnent des "têtes parlantes", tenant
plus du charlantisme que de la science. Et comme écrit JEAN
SYLVAIN LIENARD dans sa thèse sur l'analyse, la synthèse
et la reconnaissance de la parole (université Paris VI,
le 21 avril 1972). "Jusqu'à la fin du 18^e siècle, les machi-
nes parlantes furent un prétexte à légendes et mystifica-
tion".

En effet; ce n'est qu'en 1782, qu'un professeur de
l'université de Copenhague, KRA TZENTZIN présenta la première
vraie machine parlante. C'était une série de cinq résonateurs de
"a, m, i, o, u". Ces résonateurs, de forme variées, avaient à
peu près le volume de la cavité buccale.

En France, l'abbé MICAL construisait 2 machines pro-
nonçant chacune une phrase distincte, en se basant sur les
travaux de VAUCANSON.

En 1791, un physicien hongrois, le baron VONN KEMPEL
LENY construisait une machine parlante assez intéressante.

C'était une imitation de mécanique de l'ensemble
vocal humain. A l'aide de soufflets, d'une chambre à air
comprimé et d'un résonateur, on pouvait avoir des sons di-
fférents.

La machine de Kempelen put produire plus de 20 notes
différents dont plusieurs difficiles (Constantinopolis
anastasius, astronome...).

Ces recherches et ces travaux, malgré leurs imperfec-
tions, enthousiasmaient les contemporains. Ainsi le 19^e si-
ècle fut riche en automates et machines parlantes. Au de-
but du 19^e siècle d'ailleurs, les recherches avaient con-
tinué:

WHEATSTONE réalisa une machine, et dans sa jeunesse

BELL expérimenta un appareil de ce genre.

Joseph Faber présenta, en 1835, à Vienne, une machine plus élaborée, qui parlait à voix haute et basse et chantait l'hymne britannique. Après lui, les physiologistes abandonnèrent la méthode empirique, pour se préoccuper plutôt de la reproduction continue de la parole. De nombreux essais d'imitation de voyelles, ont été faits grâce à divers procédés. Ainsi HELMOLTZ (1885) utilisa des combinaisons de diapasons, KOENIG (1882) des sifflants, MILLER (1916) et STUMPF (1926) des tuyaux d'orgues, MARAGE des résonateurs. Sire Richard Paget proposa quant à lui un système remarquable et simple constitué par le soufflement dans les mains avec un chalumeau (1930).

L'avènement du téléphone permit l'utilisation des procédés électriques et électroacoustiques, au lieu des méthodes purement mécaniques et acoustiques.

Vers les années vingt les chercheurs de l'American Telephone and Telegraph et ceux des laboratoires BELL de téléphone ont construit plusieurs machines parlantes.

En 1922 STEWART inventait le principe des analogues électriques. Dès 1924, HARVEY FLETCHER présenta un appareil à touches émettant des sons de voyelles et en 1937, RIESZ présenta une machine s'inspirant de celle de Faber. Mais c'est le VODER (de voice operation demonstrator) mis au point par DUDLEY en 1936 qui a constitué la 1^{re} machine à parler moderne, comportant un système très complet d'analyse de la voix. C'est un banc de dix filtres passe-bandes, réparties entre 300 et 3000 Hz et connectées en parallèle. Ces montages d'oscillateurs émettent des sons continus de fréquences variables, au moyen d'une pédale et correspondant aux vibrations des cordes vocales pour les sons des voyelles

Les sons sifflants, qui sont produits naturellement en retrécissant le passage de l'air au moyen de la langue, le Voder les fournit lui par un autre oscillateur. Enfin

Les effets de modulation et de résonance du pharynx; de la bouche et du nez sont imités par des filtres utilisant des potentiomètres à touches.

C'est sur le principe du vocoder que se base toute l'étude moderne des vocodeurs (voix opérations codées) et donc des synthétiseurs de parole.

SYNTHESE DE LA PAROLE (APPAREILS DE SYNTHESE)

A-SYNTHESE DE LA PAROLEI- definitionsI-1-Qu'est-ce-qu'un son

Le son est un ébranlement périodique de l'air. C'est-à-dire qu'à un point de rupture de l'air pris à l'état de repos (pas d'agitation) une molécule donnée reçoit une impulsion qui la met en mouvement dans une certaine direction. Cette molécule pousse les molécules qu'elle rencontre successivement en formant une zone de compression. La région comprimée ne tarde pas à se détendre, les molécules dépassant leur point de repos et une détente suit la compression, tandis qu'une nouvelle zone de compression se forme plus loin. Une série d'oscillations s'établit ainsi et la propagation de ces dernières s'effectue de proche en proche à une vitesse qui dépend du milieu (liquide, solide ou gazeux). Le son ne peut donc pas se propager dans le vide, il lui faut un support matériel.

Pour devenir un son, ces ébranlements doivent agir sur un de nos sens: notre oreille. Cette dernière est sensible aux vibrations allant de 20 Hz à 20 KHz. En deçà c'est la zone des infra-sons. Au-delà ce sont les ultra-sons. Les infra et ultra-sons ne sont pas audibles. La vitesse de propagation de l'ébranlement est de: 330 m/s dans l'air, 1430 m/s dans l'eau et 5000 m/s dans l'acier.

Le bruit est aussi un son ayant généralement un caractère aléatoire sans fréquences composantes bien définies.

Un son est aussi défini par les notions de fréquences, hauteur, amplitude, volume et ton. Une autre notion entre dans la définition du son: il s'agit du timbre qui est la couleur sonore qui sert à reconnaître l'origine du son.

I-2- Production naturelle de la parole

Définition: au point de vue acoustique, tout bruit ou tonalité produit par l'organe humain est obtenu par une suite de fonctions élémentaires; souffle, émission, résonance/diffusion.

La parole est une excitation des cavités de l'appareil vocal. Cette excitation peut être soit une source d'impulsions (sons vocaux), soit une source de bruit (sons non vocaux). Dans le premier cas, la source est constituée par l'ensemble "poumons-cordes vocales"; dans le second cas

le bruit est produit par l'action de courants d'air sur certaines parois de l'appareil vocal.

I-3-L'appareil vocal

a)-description et fonctionnement

La cavité nasale (en parallèle sur le conduit vocal) est limitée par les narines d'un côté et le voile du palais de l'autre, ce dernier règle le couplage acoustique entre le conduit vocal et le conduit nasal.

L'essentiel du générateur sonore est constitué par les poumons et le larynx. Les poumons assurent une pression d'air, à l'intérieur des branches. Le larynx possède des cartilages mobiles reliés entre-eux par des ligaments et des muscles striés.

La partie intérieure est faite d'une muqueuse qui forme deux paires de bourrelets membrano-musculaires (se sont les cordes vocales et les bandes ventriculaires). Une articulation complexe permet de régler en largeur et en hauteur l'ouverture des cordes vocales.

L'impédance interne de la source vocale est variable et est supérieure à I Kohms acoustique. L'impédance de charge apportée par le conduit vocal étant inférieure à 100 ohms, on considère souvent la source comme un générateur d'impédance interne élevée donc non perturbée par la variation des cavités de la bronche.

Une coupe du conduit vocal (fig. I-1) permet de mettre en évidence quatre parties principales : le larynx, les fosses nasales reliées au pharynx par l'abaissement du voile du palais, les cavités buccales et enfin l'ajutage labial.

Chacun de ces organes possède un champ de liberté considérable grâce à la présence de très nombreux muscles; ainsi la langue dispose à elle seule de 17 muscles, la mâchoire inférieure de 10, les lèvres en comptent une dizaine environ. Au total une cinquantaine de muscles participent à la phonation.

Acoustiquement, le conduit vocal est un tube de section variable en fonction du temps et de la distance au larynx ainsi que de la longueur totale qui est légèrement variable. Ces parois internes sont de tissus très absorbants qui amortissent considérablement les ondes issues de la glotte.

b)-Complexité de la production de la parole à l'intérieur du conduit vocal:

Lorsque nous parlons, l'air venant de nos poumons passe dans le larynx qui comptant les cordes vocales. Leurs vibrations excitent la membrane vibrante qui émet des sons multiples, ou harmoniques, de la fréquence fondamentale.

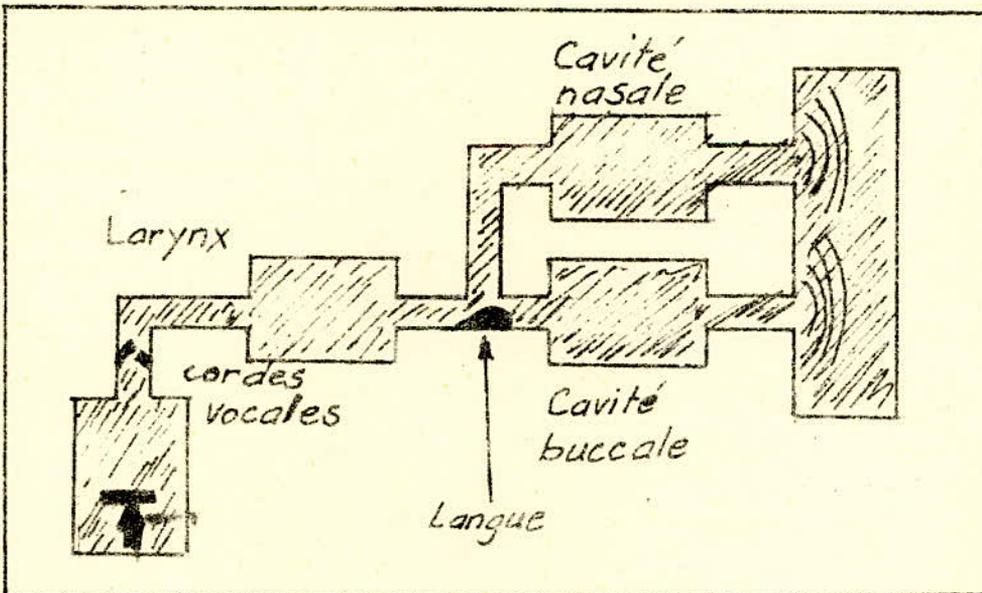
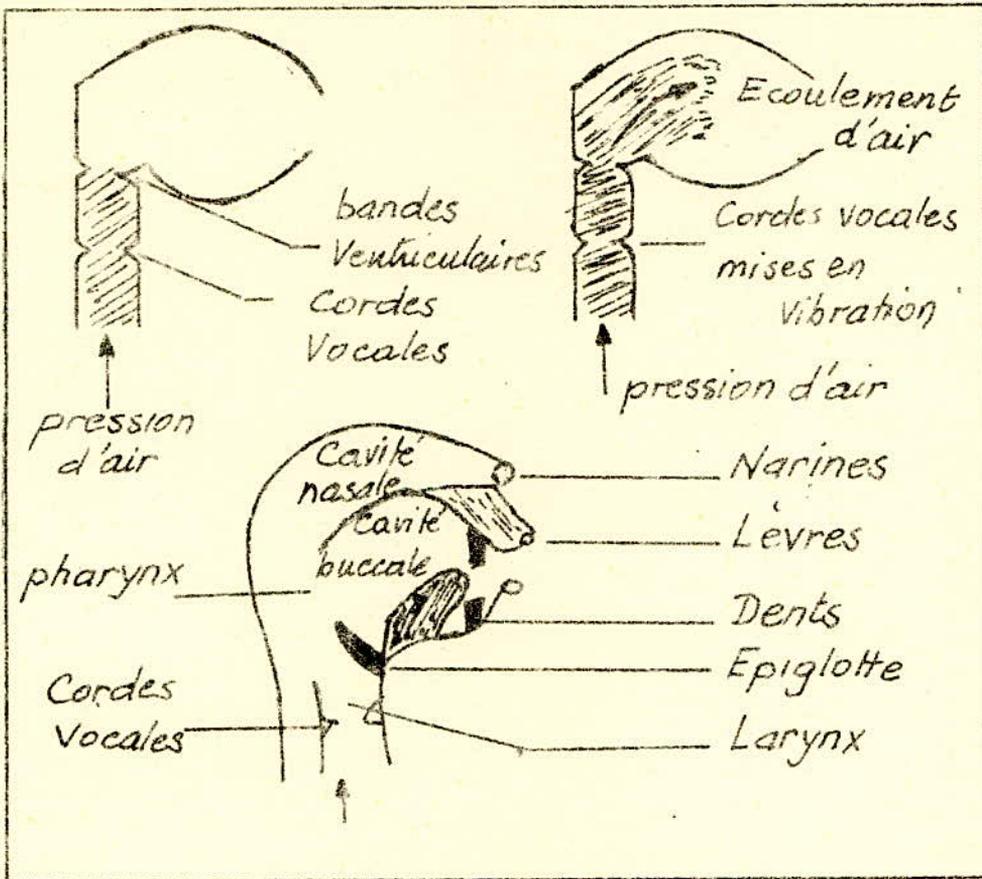


Fig. I-1

En Haut : Coupe du Conduit vocal

en bas : Schématisation du conduit vocal

masse d'air du pharynx, de notre bouche et du nez . Ces organes en se modifiant créent des fréquences multiples ou harmoniques, de la fréquence de vibration des cordes vocales . Elles se distinguent par leurs nombres leurs rangs et leurs intensités .

Le générateur de voyelles est le larynx , tandis que le générateur de consonnes est le pharynx . Le voile du palais intervient plus ou moins selon la langue (Arabe, Français, Anglais, etc; ; ; ;). Le rayonnement sonore n'est pas complètement limité par l'effet du nez et des lèvres .

Les différents rythmes, les genres d'émissions sonores dépendent d'un grand nombre de para-réactions nerveuses . En effet les cordes vocales , le résonateur, la cavité nasale, buccale et le larynx sont contrôlés par le ~~cerveau~~ cerveau de façon à produire un texte intelligible . Tout ceci traduit la complexité ~~et~~ la difficulté de la production de parole .

II-LA parole phénomène physique

II-I-Introduction

La bouche émet les voyelles et les consonnes pour une position déterminée des cavités résonnantes . Pour certaines voyelles dites "sourdes" et certaines consonnes, les cordes vocales ne vibrent même pas, les sons sont uniquement modulés. La parole met donc en jeu des phénomènes physiques très complexes vu le nombre de paramètres à contrôler d'une manière précise .

La voix humaine est en fait une suite de silences, de parties mélodiques dues à la vibration des cordes vocales, et de bruits plus ou moins sourds. La voix est schématiquement caractérisée par deux paramètres d'une part la fréquence de vibration des cordes vocales (de 300 à 3500 Hz) que l'on appelle aussi mélodie de la voix et d'autre part l'intensité de ces vibrations .

II-2-Caractéristiques de la parole

Les cordes vocales constituent un générateur de sons en hauteur . Les autres organes influent sur les variations du timbre, et les transitoires constituent l'articulation .

Les principales caractéristiques de la parole sont: le niveau, la hauteur, le timbre, le rythme et la dynamique .

a)- Le niveau: compte tenu des instants de silence, l'énergie moyenne développée au cours d'une conversation est d'environ 10 pW, mais selon le cas elle peut varier de 1 à 500 pW .

b)- La hauteur: la fréquence la plus basse dans le signal de parole est la fréquence fondamentale de vibration des cordes vocales (pitch) elle peut varier de 90 Hz pour une voix de basse à 300 Hz pour une voix très aiguë et à 500 Hz pour les voix d'enfants. Les fréquences les plus élevées débordent même le seuil audible (ULTRA-SONS).

c)- Le timbre : les courbes donnant les niveaux sonores des voyelles par bande de fréquence montrent l'existence de formants. D'un individu à l'autre, la densité et la fréquence changent beaucoup sans altérer les principales caractéristiques.

Le timbre peut être considéré comme un paramètre du son. Il se caractérise par l'amplitude harmonique. Chaque harmonique a son amplitude propre. C'est pourquoi il est important que chaque harmonique soit respectée pour retrouver toute l'intégrité et la richesse du timbre.

d)- Le rythme: le débit moyen dépend des conditions acoustiques. Le débit instantané est lié à la compréhension du texte.

e)- La dynamique: globalement l'énergie de parole varie au plus entre $I/10^6$ et 1000 pW soit une dynamique de valeur extrême 40 dB.

II-3-Décomposition du son

Le son peut être décomposé en quatre catégories:

a)- Les voyelles: ce sont des sons périodiques produits par une excitation récurrente des cordes vocales. Leur signal est riche en harmoniques.

b)- Les consonnes fricatives ou sifflantes: elles sont dues à un rétrécissement du passage de l'air, ce qui produit un bruit de friction. Ce rétrécissement est équivalent à une source de bruit mise en forme par les cavités du conduit. Si en plus de cette source de bruit les cordes vocales interviennent la consonne est dite "voisée". Elles peuvent être prolongées autant qu'on le veut.

c)- Les consonnes plosives: ce sont des consonnes momentanées dues à une occlusion complète suivie d'une ouverture brusque, semblable à une explosion. Comme pour les consonnes fricatives, il existe des couples de consonnes plosives semblables semblables quant au point d'occlusion mais différentes quant au caractère voisé ou non.

Contrairement aux fricatives et aux voyelles, les plosives sont des sons purement transitoires.

d)- Les nasales: pour produire ces sons les fosses nasales doivent être en parallèle sur le conduit nasal. Il y a des voyelles "IN", "ON" "AN" et des consonnes "M", "N" nasales.

Il existe aussi des cas particuliers telles les liquides "L" les vibrantes "R" et les diphtongues.

II-4-Décomposition de la parole

Les phonéticiens décomposent la parole en phonèmes, mots (pris dans un sens large) et phrases comme il en est pour l'écriture imprimée ou manuscrite qui se décompose en lettres, mots et phrases.

Exemple de décomposition d'un mot en syllabes et phonèmes:

Mot	EMBAUCHER
Syllabes	EM-BAU-CHER
Phonèmes	AN-B-O-CH-E

Les phonèmes eux-même sont décomposés en critères produits par une excitation périodique, c'est-à-dire voisés, ou bien il font appel à une brusque variation de certains paramètres. Ce sont ces critères qui une fois connus permettent de classer les phonèmes d'une langue. Bien que les notions de critères et phonèmes soient fondamentales il faut bien saisir que ce ne sont que des notions idéales. En effet, il est impossible de trouver deux personnes qui parlent exactement de la même manière. On considère que ces différences sont des erreurs systématiques. De plus la présence dans la parole d'un certain niveau de bruit est inévitable.

La parole, même bien articulée, n'est pas une simple juxtaposition de phonèmes les uns derrières les autres au fil du temps. Tous les phonèmes sont associés à un phonème statinaire, mais pour certains, comme les consonnes explosives, elles ne sont pas représentés par un phonème temporairement statinaire. dans une phrase les phonèmes sont groupés en syllabes et ne jouent pas tous le même rôle.

a)-Les phonèmes: sur le plan du signal proprement dit et sur le plan linguistique, la parole est redondante. Cinquante milles unités d'information par secondes environ sont transmises par une ligne téléphonique classique au cours d'une conversation, alors que le cerveau humain ne peut décoder, après traitement, qu'un maximum de 50 (selon certaines hypothèses). On cherche donc à détecter ces 50 unités d'information fondamentales qui permettent la reconnaissance par le cerveau, et on cherche à reconstituer la parole à partir d'un même nombre d'unités d'information. Cette réduction considérable des informations doit faciliter la construction d'unités à réponse vocale.

La phonétique considère depuis longtemps l'existence de sons élémentaires appelés "phonèmes". Dans chaque langue on peut compter un

NOMBRE fini de phonèmes mais ces dénombrements sont effectués à partir d'une prononciation de référence peu fréquente dans la réalité. Certaines différences dans la prononciation sont peu significatives. En français par exemple "IN" et "UN", "E" et "EU" sont souvent confondus sans dommage aucun pour l'intelligibilité de la parole. On peut donc réduire le nombre de phonèmes et décrire la prononciation d'une langue sans ambiguïté.

La notion de phonème sert surtout à analyser la parole et n'est pas applicable en synthèse. Pour s'en rendre compte essayons de synthétiser le mot "CHAT" à l'aide des deux phonèmes "CH" et "AAA". Enregistrons chacun d'eux sur une bande magnétique; juxtaposons par un montage simple les deux morceaux de bande, puis chacun dans une séquence. Les résultats obtenus par ce procédé ne sont pas le mot désiré, mais on entend les deux sons entrecoupés par un "clic".

Ceci montre d'une façon simple que l'information se trouve essentiellement dans la transition d'un phonème à l'autre et non dans les phonèmes eux-mêmes. C'est pourquoi, on fait intervenir les phonatomes.

b)-Les phonatomes : c'est l'association de deux phonèmes que l'on désigne par phonatomes. Un phonatome est également appelé "diphone" ou "diphonème". Pour réaliser une synthèse efficace de la parole il suffit d'établir une fois pour toute un dictionnaire des caractéristiques acoustiques des phonatomes en rassemblant ces derniers par leur extrémité commune exactement comme au jeu de domino.

Supposant que n soit le nombre de phonèmes. Associés deux à deux ces phonèmes donnent $n^2 = n \times n$ phonatomes.

Une étude statistique faite sur un texte a montré qu'un certain nombre d'entre eux n'était pas utilisé. En plus certains phonatomes peuvent être considérés comme réversibles (comme pour ME, EM en français) il apparaît pratiquement qu'un nombre beaucoup plus réduit que n^2 est suffisant pour reconstituer correctement la prononciation d'une langue.

II-5-Etude spectrale de la parole :

Un son quel qu'il soit, n'est presque jamais quelque chose de simple; il s'agit toujours d'un mélange de plusieurs sons qui, additionnés les uns ^{aux} autres, forment un tout homogène, ou du moins entendu comme tel. ON sait que pour les couleurs il y a trois couleurs fondamentales à partir desquelles il est possible d'obtenir n'importe quelle tinte. Pour le son il en va autrement. Il y a un son fondamental duquel dérivent des sons, les harmoniques. UN son pur est sans harmoniques

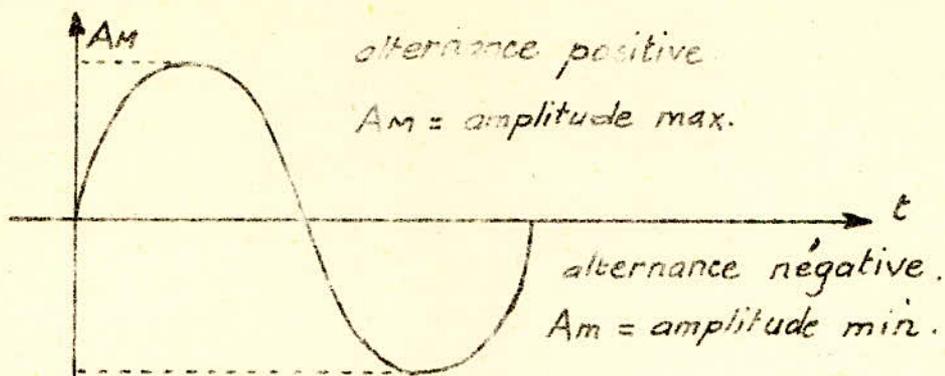
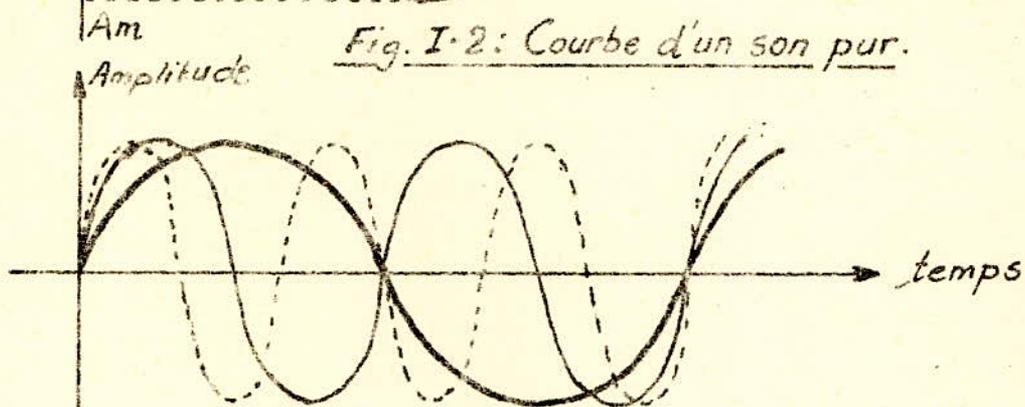
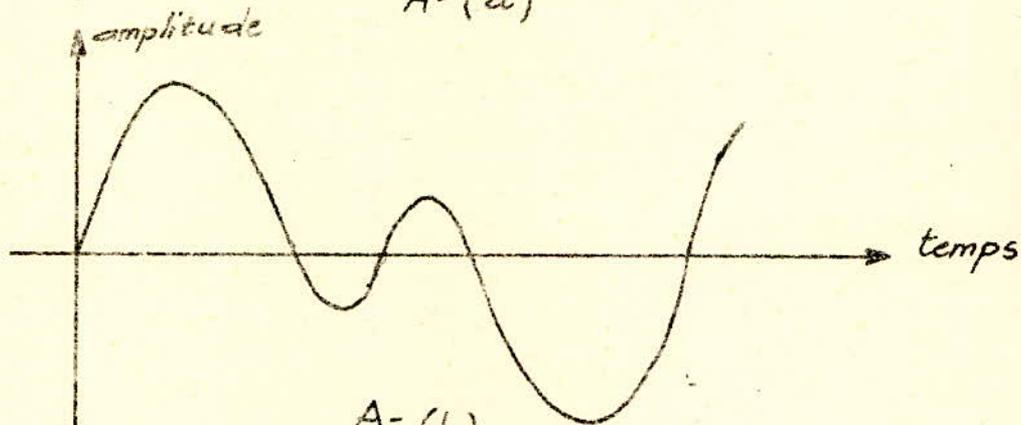


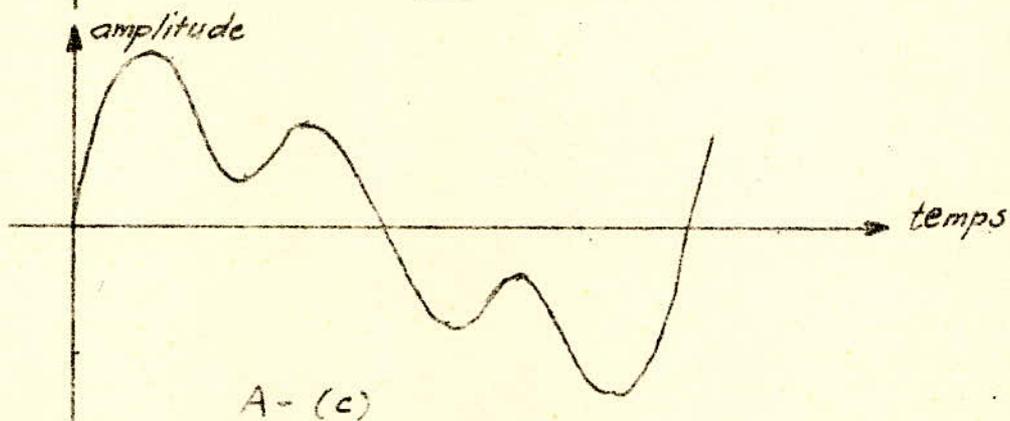
Fig. I-2: Courbe d'un son pur.



A-(a)



A-(b)



A-(c)

Fig. I-3-A

A-(a) Fondamental

A-(b) Somme résultante du fondamental et de l'harmonique 2

A-(c) Somme résultante du fondamental et de l'harmonique 3

Sa courbe est une sinusoïde (fig. I-2).

Le physicien français JOSEPH FOURIER démontra que tout mouvement vibratoire complexe, et le son est un, peut être décomposé en une série de mouvements simples sinusoidaux. C'est ce qu'on appelle les séries de Fourier (fig. I-3).

Pour additionner deux courbes, on mesure la distance de la courbe à l'axe des abscisses et les ajoute algébriquement. Dans l'atmosphère cette opération se réalise toute seule par l'addition des pressions. C'est la raison pour laquelle deux sons en phase s'ajoutent et deux sons de même amplitude et en opposition de phase s'annulent. La représentation d'un son représente son évolution dans le temps. Si le son représenté figure I-3 est appliqué à un haut parleur, sa membrane aura un mouvement qui, dans le temps, sera similaire à sa courbe

II-5-I- SON FONDAMENTAL ET HARMONIQUE

Lorsqu'on entend une note possédant une fréquence, l'oreille ne reconnaît qu'une seule fréquence bien que le son soit formé de plusieurs harmoniques à des fréquences différentes. La note reconnue par l'oreille est celle de la fréquence la plus basse contenue dans le son. Cette fréquence basse est appelée la fondamentale et elle est confondue avec le premier harmonique, les autres harmoniques ont des fréquences qui sont des multiples de celle de la fondamentale. Le tableau suivant donne les fréquences relatives de chaque harmonique, leur place dans le rang des octaves ainsi que les intervalles qu'ils forment avec la tonique. Ce tableau n'est pas exhaustif et les harmoniques peuvent se multiplier jusqu'à l'infini. On constate que plus les rangs sont bas et plus les intervalles sont grands.

Harmonique	Frequence	Octave	Intervalle
Fondamentale	F	I	tonique
2	F X 2	I	tonique
3	F X 3	I	quinte
4	F X 4	2	tonique
5	F X 5	2	tierce
6	F X 6	2	quinte
7	F X 7	2	septième
8	F X 8	3	tonique
9	F X 9	3	seconde
10	F X 10	3	tierce
...

II-5-2-LES HARMONIQUES ET LE TIMBRE

Si tous les sons ont des harmoniques alors qu'est-ce qui les différencie? On a vu qu'un son se caractérise par son amplitude et sa fréquence. Un troisième paramètre entre en ligne de compte: l'amplitude harmonique, chaque harmonique a son amplitude particulière qui, à rang égal, peut varier d'un instrument à l'autre. Certaines harmoniques peuvent être tout à fait absentes dans certains sons. Les sons doux ont surtout des harmoniques de rangs élevés plus amples. Pour avoir un rendement optimum dans la reproduction de la parole, il faut que la bande passante (bande de fréquence allant du son le plus grave au son le plus aigu) soit le plus près possible de celle de l'oreille (entre 20 et 20.000 Hz).

a)-Analyse harmonique d'un signal transitoire

Les cordes vocales recevant une excitation de l'air des poumons produisent des vibrations sonores non entretenues. Le son produit s'éteint lentement pour finalement disparaître. La courbe d'amplitude d'une note de piano (fig. I-4) indique une montée plutôt raide, correspondant à l'attaque de la note, suivie d'une descente par paliers (l'extinction du son). Cette courbe d'amplitude est celle du signal sonore avec toutes ses composantes harmoniques. On peut également

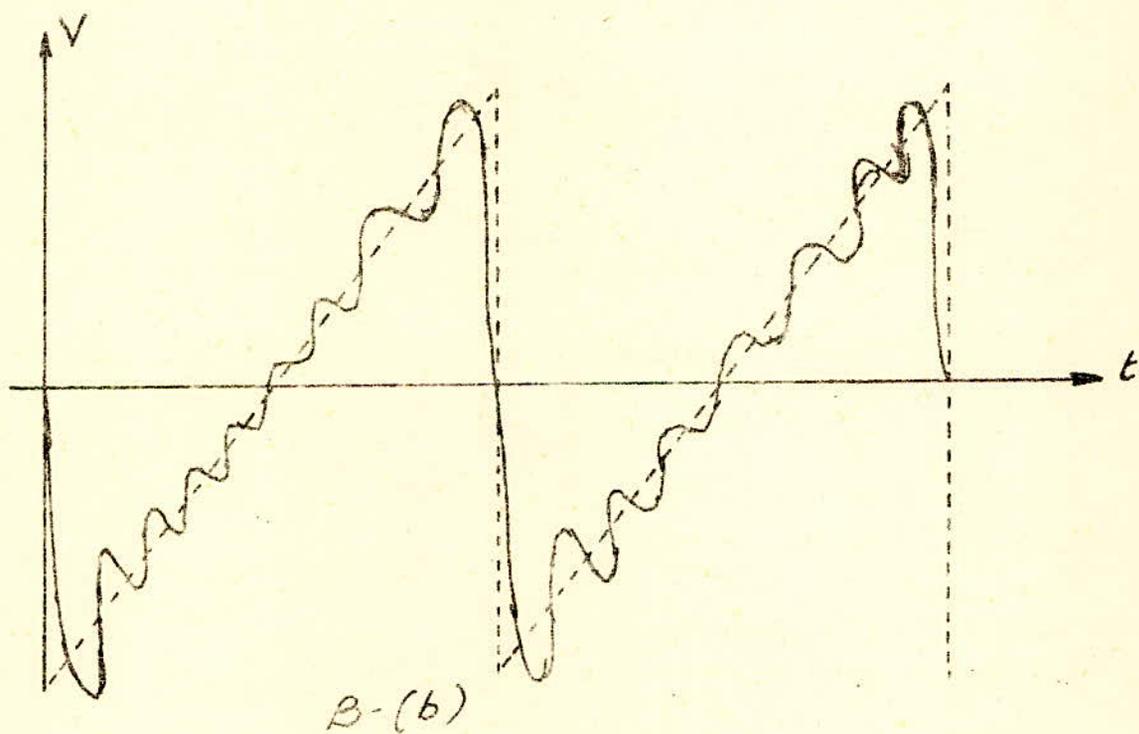
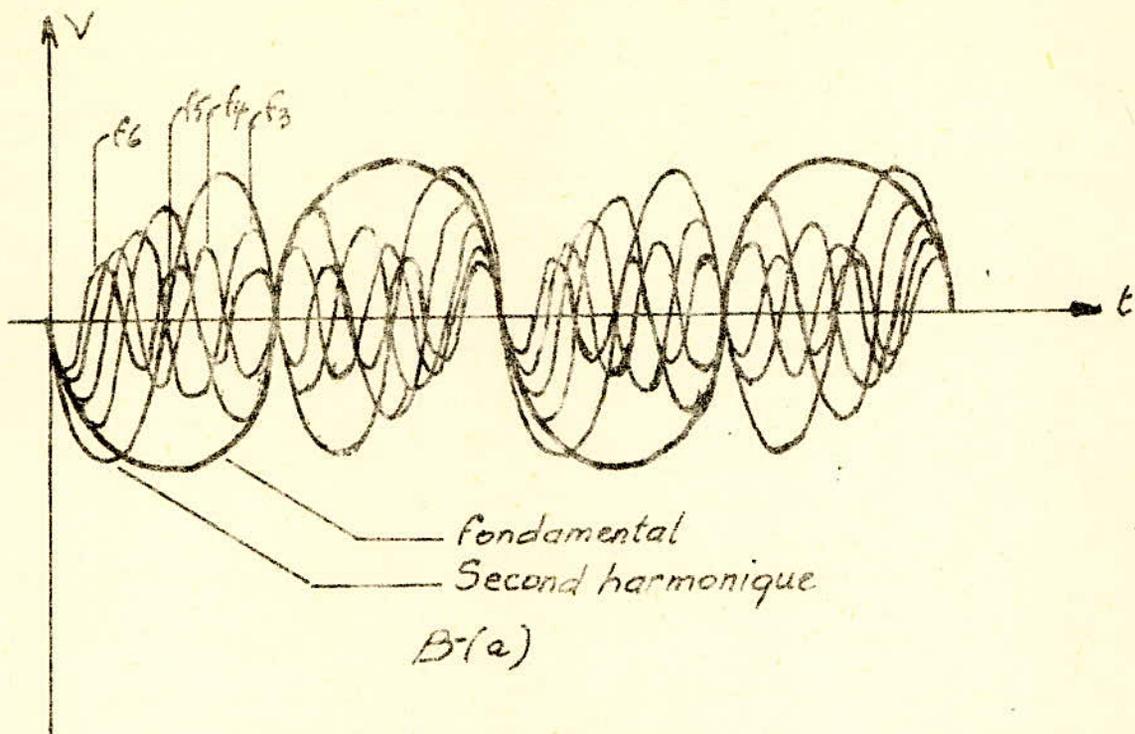


Fig. I-3-B

B-(b) : Somme du fondamental et des cinq premiers harmoniques, le resultat tend vers la dent de scie (en tirets)

B-(a) : fondamental et les cinq premiers harmoniques.

tracer le même type de courbe pour chaque harmonique. Dans ce cas on s'aperçoit que toutes les courbes sont différentes (fig. I-5). Ces courbes permettent d'avoir une vue globale de l'évolution du spectre et de comparer l'enveloppe de chaque son partiel.

Le spectre est le réseau d'harmoniques et de leurs amplitudes respectives à un moment donné. SI un son est constitué de plusieurs sons partiels (harmoniques) on observe sur le sonogramme plusieurs rayures parallèles, chaque rayure correspondant à un signal sonore perçu. Leur densité de marquage correspondant à leur amplitude, et leur position sur l'échelle indiquant leur fréquence; les sons les plus graves sont en bas et les plus aigus en haut. Ayant toutes ces informations on ^{est} mieux à même d'interpréter le sonogramme du piano (fig. I-6). On remarque que plus les harmoniques ~~est~~ sont de rangs élevés plus ils sont faibles, ce qui est une constante générale en acoustique et que certaines harmoniques qui s'étaient éteintes peuvent ressurgir grâce au phénomène de résonance. Une autre constante des sons ~~acoustiques~~ fait que les harmoniques disparaissent en général toujours avant la fondamentale.

Tous ces paramètres mis ensemble font qu'un son est riche et bien timbré quasiment inimitable par l'électronique; mais cette dernière a mieux à faire que d'imiter. A la figure I-7 nous voyons que le spectre des harmoniques est celui établi sur le même enregistrement peu après l'attaque; un autre exemple qui illustre bien les différences de répartitions entre les harmoniques dans les différents sons, est celui représenté à la figure I-8 par le sonogramme de plusieurs voyelles (A, OU, E, I). Il est très net que le A, très riche en harmoniques, s'oppose au OU, au contraire très pauvre. Ceci explique la sonorité très colorée du premier et la sonorité très sourde du deuxième. Le OU n'a que quelques harmoniques dans les graves et c'est tout. L'opposition entre le ~~OU~~ E et le I se fait par répartition des zones d'harmoniques: pour le E la répartition est assez régulière avec une décroissance régulière en montant vers les aigus, pour le I les harmoniques sont comprises entre 100 et 1000 Hz, puis plus rien jusqu'à 3500 Hz et de nouveau des harmoniques jusqu'à 4500 Hz.

Mais le langage n'est pas formé que de voyelles il y a aussi les consonnes; ceci est vrai pour la voix qui est un des sons les plus diversifiés et les plus complexes, mais c'est vrai aussi pour n'importe quel autre son musical ou autre .



Fig. I-4

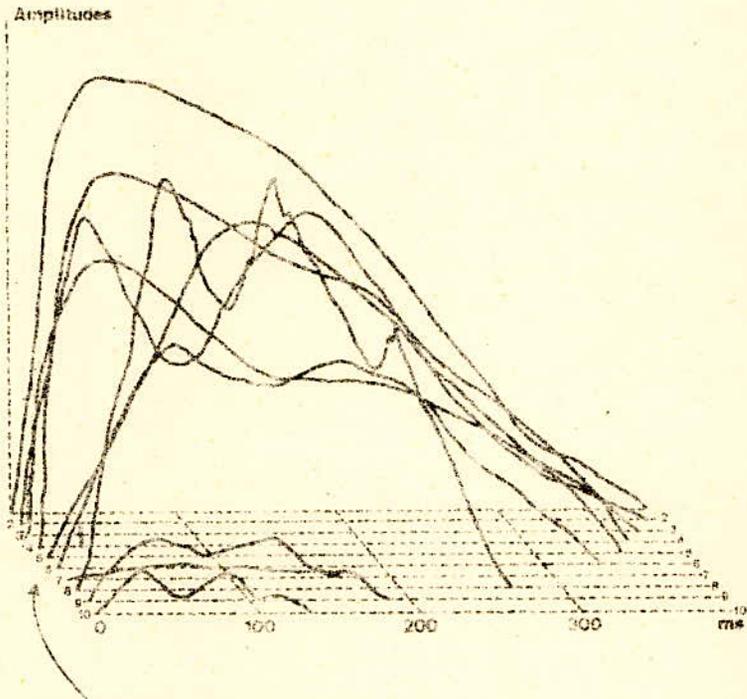


Fig. I-5 Rang des harmoniques

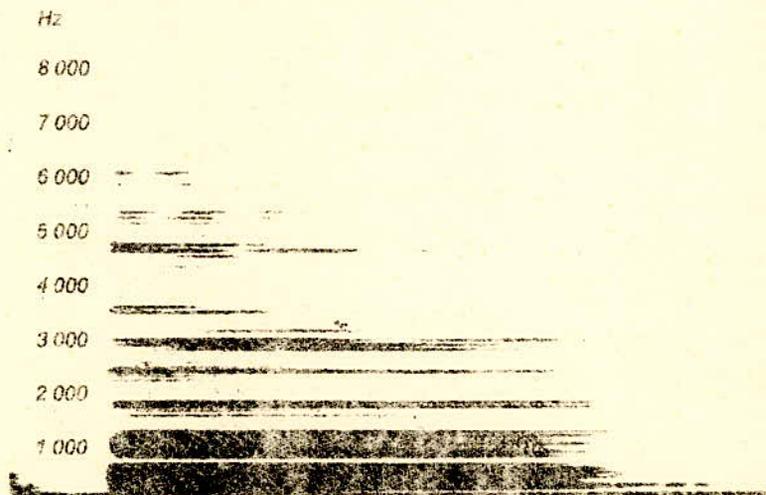


Fig. I-6

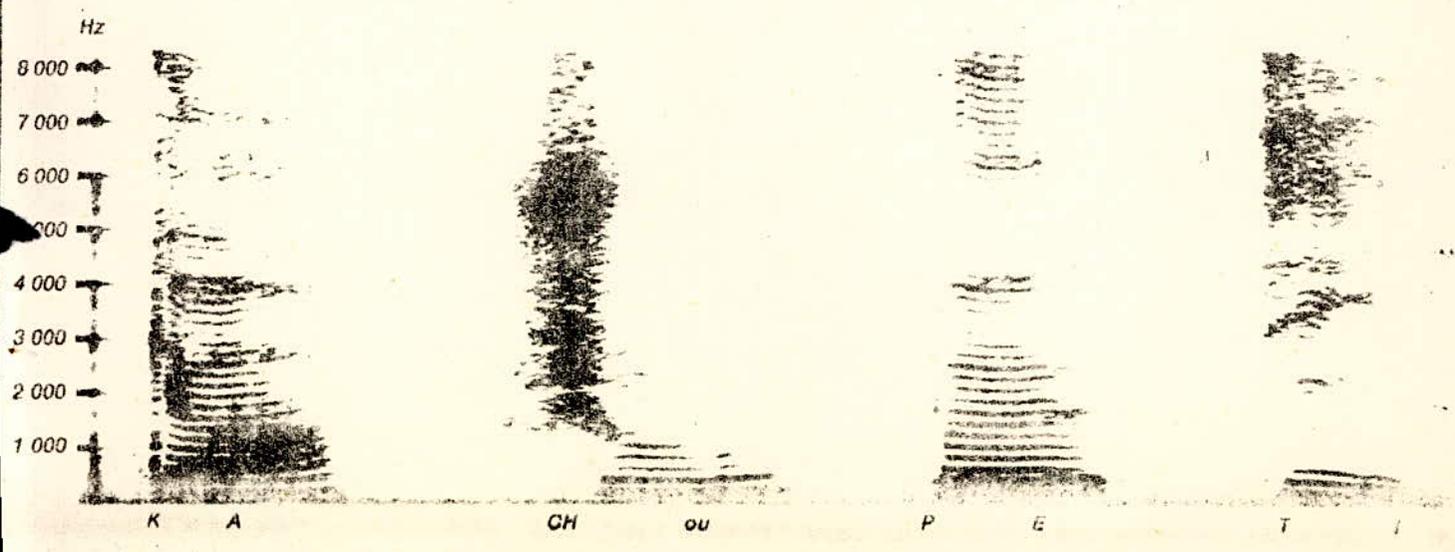
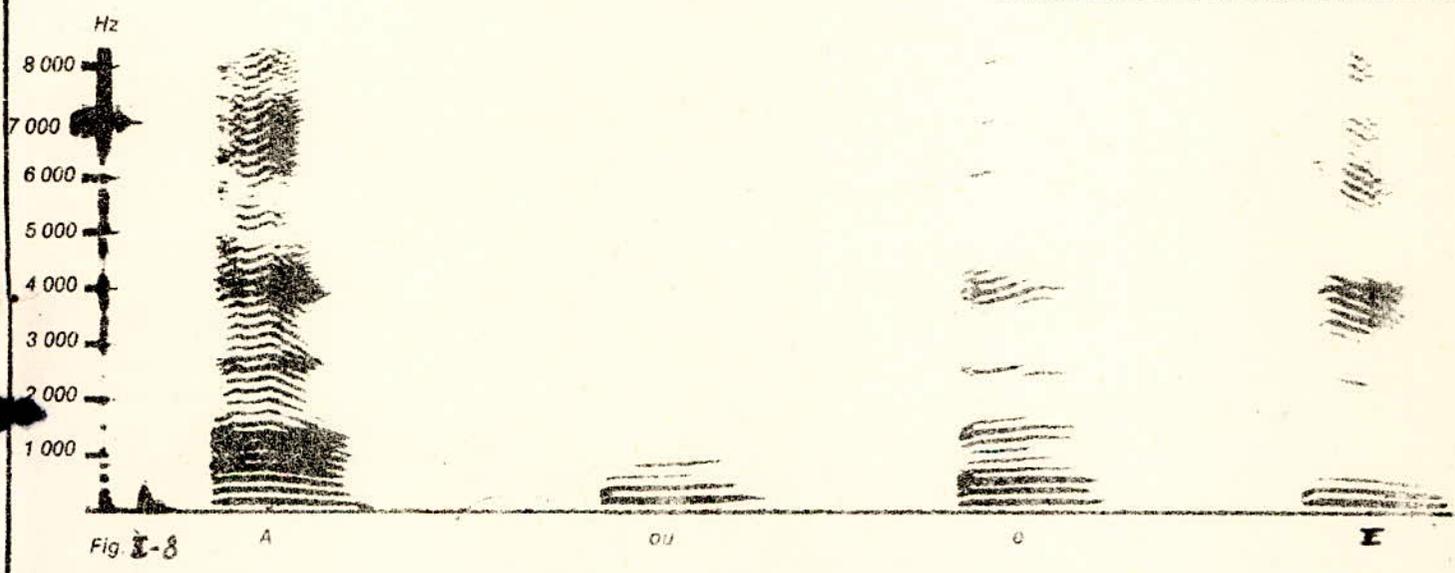
Les consonnes sont des bruits qui forment l'attaque ou l'articulation des sons entre-eux. Il convient ici de faire la distinction entre son et bruit. Un son, nous l'avons vu, est composé d'une fréquence fondamentale et des harmoniques dont les fréquences sont multiples de la fondamentale, alors qu'un bruit n'a pas de fréquence composantes définie ou définissable ; il peut être formé de plusieurs fréquences simultanées. Dans ce cas on dira que les composantes de ce bruit sont des "partielles" et non des harmoniques. Un son partiel a une fréquence non multiple ou sous-multiple des autres fréquences. Par exemple un son peut posséder des harmoniques, mais aussi des partiels, comme on fait souvent en musique électronique ou en recherche musical, ce qui ouvre une voie vers des timbres nouveaux. Lsonogramme de la fig. I-9 montre des syllabes prononcées par la même personne, avec les mêmes voyelles que précédemment, mais chacune précédée d'une consonne différente, en occurrence: K, CH, P, T. Ce qui donne les syllabes suivantes: ka chou petit. Le bruit se traduit sur le sonogramme par une espèce de brouillard disposé aux endroits correspondant à la fréquence. C'est très visible pour le CH qui est avec le S la consonne la plus proche du bruit blanc (le bruit blanc comporte dans son spectre toutes les fréquences, celles-ci ayant toutes, la même amplitude). On voit que pour le CH la répartition n'est pas égale dans toute l'échelle des fréquences. Il n'y a rien au-dessous de 1500 Hz, et très net renforcement d'amplitude entre 5KHz et 6K. Pour les autres consonnes, le sonogramme est moins net; le K se traduit par un bruit très court, suivi d'un léger blanc juste avant la voyelle.

Le P et le T sont des attaques très franches et très brusques de la voyelle, le bruit est très court; c'est pourquoi il est assez difficile de la distinguer. Néanmoins le T est un bruit à composantes aiguës, alors que le P est un bruit à composantes graves.

Pour réaliser des synthétiseurs, il est indispensable de connaître le spectre de la parole c'est-à-dire de ses fréquences acoustiques qu'elle compte. Les deux sources sonores décrites précédemment possèdent des caractéristiques spectrales différentes. La source périodique, ou vocale, délivre des oscillations de "relaxation" qui prennent naissance au niveau des cordes vocales. La fréquence de ces oscillations est essentiellement déterminée par la tension et la masse des cordes vocales ainsi que par la pression subglottique. Le débit d'air au niveau des cordes vocales est évidemment modulé à la même fréquence dite fondamentale. Cette fré-

Hz
 8 000
 7 000
 6 000
 5 000
 4 000
 3 000
 2 000
 1 000

Fig. 3-7



quence caractérise la hauteur du son de la voix. Elle est en moyenne de 120 Hz pour un homme et de 220 Hz pour une femme

b)- Les formants:

Des modèles mathématiques simplifiés du conduit vocal ont permis de mettre en évidence plusieurs resonances pour une position donnée du conduit. En 1960 G. FANT a calculé la fonction de transfert du conduit vocal. Cette fonction de transfert notée $T(p)$ est définie par le rapport du débit en sortie sur le débit à l'entrée, elle est du type:

$$T(p) = \frac{c_n}{a_n^2 p^2 + 2ax_n p + I}$$

Cette expression représente la transformée de LAPLACE de la fonction de transfert. a_n et x_n représentent des paramètres du conduit vocal; c_n est un paramètre complexe.

Cette fonction de transfert correspond à celle d'un circuit résonnant monté en cascade avec un filtre passe-haut.

Les régions fréquentielles correspondant à des maxima d'amplitude sont appelés des "formants". La fréquence F_n , un formant est l'une des fréquences de resonance du conduit vocal et correspond à l'un des pôles de la fonction $T(p)$. On a alors $F_n = \frac{1}{2\pi a_n}$. De même la bande passante

à 3dB d'un formant est $B_n = \frac{x_n}{\pi a_n}$. Ainsi la fréquence du premier formant peut varier de 200 à 900 Hz environ, celle du deuxième de 500 à 2500 Hz. Il existe des formants d'ordre supérieur mais leur rôle sur le plan réceptif est limité; il contribue à caractériser la qualité de la voix. La bande passante B_n est en première approximation constante dans la plage de variation d'un formant déterminé.

Dans le cas d'une excitation des cavités nasales, la fonction de transfert est le produit de deux type de termes:

$$T_n(p) = \frac{a_n^2 p^2 + 2x_n b_n p + I}{b_n^2 p^2 + 2x_n b_n p + I}$$

Toutes ces fonctions de transfert permettent de déterminer le débit d'air D_s au niveau des lèvres du locuteur, en fonction du débit de la source. Normalement l'oreille réceptrice est excitée par la pression P_s qui résulte de ce débit; on doit associer à ces fonctions de transfert

une fonction de rayonnement $F_s = \frac{P_s}{D_s} \dots / \dots$

a : étant une constante et $C_r(p)$ une fonction de transfert comportant un pôle à 1000 Hz et un zéro à 500 Hz.

~~XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX~~

une fonction de rayonnement de la bouche : $\frac{P_s}{D_s} = a.p.C_r(p)$ a: étant une constante et $C_r(p)$ une fonction de transfert comportant un pôle 100 Hz et un zéro à 500 Hz .

Lors de la production d'une voyelle le conduit vocal se déforme très peu, et ses fréquences de résonances (donc les fréquences des formants) sont stables et dépendent de la voyelle émise. En revanche, la forme du conduit vocal évolue rapidement dans le temps lors de la production de certaines consonnes, ce qui représente un changement des fréquences des formants. Les caractéristiques de transition sont alors représentatives de la consonne prononcée (figure I-10 et I-11). Dans le cas de la production du son du type "S", "CH", "F", à partir d'une source de bruit, les formants se situent vers les hautes fréquences; les consonnes nasales sont au contraire caractérisées par un affaiblissement des formants à fréquences élevées.

Une analyse spectrale de la parole, que l'on peut obtenir à l'aide d'un sonographe, met en évidence les évolutions des formants. Elle simplifie la représentation du signal, et les composantes qu'elle révèle sont directement liées aux caractéristiques du conduit vocal. L'importance de ces composantes a été vérifiée par la synthèse.

II-5-3- Propriétés subjectives des sons :

a)- Corrélation des phénomènes physiques et physiologiques:

Physiquement, le phonème (phonème) s'analyse comme l'évolution d'une variation de pression au voisinage de l'oreille. Le développement de cette variation se fait en trois étapes (fig. I-12):

- La formation;
- La stabilité;
- L'extinction.

Les périodes de formation (prises séparément; pour le langage il s'agit de consonnes) sont toujours de courte durée (de quelques ms à des dizaines de ms). Elles ont un niveau et une hauteur élevés.

C'est en fin de compte les caractéristiques de durée, hauteur et intensité de la période de stabilité (voyelle) qui sont celles du phonème.

Les phonèmes peuvent être classés en utilisant la décomposition spectrale de leur période de stabilité.

Les sons du langage sont tels que l'effet de structure l'emporte

sur la composition spectrale.

* SONS A UN FORMANT /

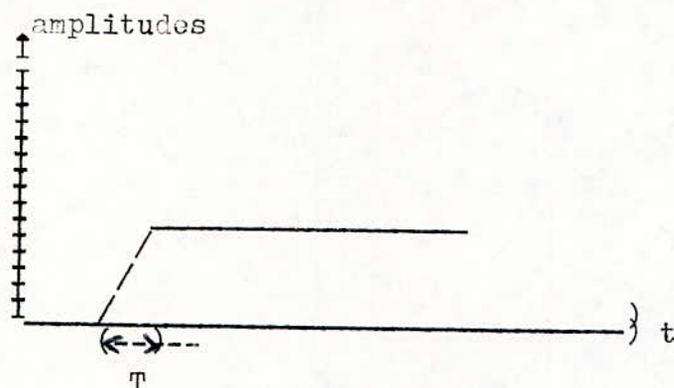
De tels sons ne couvrent qu'une gamme restreinte de sons naturels et ne correspondent pas aux sons du langage.

* SONS A DEUX FORMANTS /

Ils sont très courants dans la nature. Elles sont en particulier les voyelles et la plupart des sons de musique.

Le lagage est cependant un son à plusieurs formants.

* DUREE DU REGIME TRANSITOIRE



La durée du transitoire T est de :

--- 6ms pour les consonnes non vocales;

--- 100 ms pour les consonnes vocales

b)- Composition spectrale de la période transitoire :

Le spectre varie avec la forme du signal. Dans tous les cas il apparaît un bruit grave dit de transition sans coloration particulière. La figure I-13 nous montre que l'étude spectrale ΔN de ce bruit varie avec la durée T de la période transitoire suivant la formule

$T \times \Delta N = 1$ (relation d'incertitude, cf cellules de GABOR). Dans ces conditions une consonne non vocale ($T = 6$ ms) donne un bruit de transition qui s'étend jusqu'à 170 Hz.

c)- Evolution de la partie transitoire :

L'évolution des amplitudes spectrales dépend de multiples facteurs :

--- caractéristiques du système vibrant (cavités buccales);

--- excitation du système vibrant etc...

Les amplitudes spectrales apparaissent de façon très fantaisiste; il semble tout à fait impossible de reproduire la vie intense de la période transitoire. Il n'existe jamais deux mots ou deux sons parfaitement identiques.

III) Conclusion

Heureusement pour nous; le son n'est pas un signal à variation uniforme dans le temps; Quel qu'en soit le nombre des composantes harmoniques, celles-ci varient constamment en amplitude. Donc le spectre harmonique d'un signal n'est pas défini une fois pour toute, bien qu'il demeure sensiblement approprié à ce signal.

L'électronique a beaucoup de mal à synthétiser un son naturel justement à cause de ses nombreux paramètres à respecter. Si les recherches actuelles en synthèse font appel à l'ordinateur, c'est que lui seul, grâce à sa mémoire infailible et sa rapidité de travail, est capable d'englober toutes les données pour les traiter et synthétiser un son de manière quasi parfaite. De plus le signal sonore est souvent entaché de petit bruit sans lesquels il serait impossible de le reconnaître, ou qui dans le meilleur des cas, perdrait toute sa richesse .

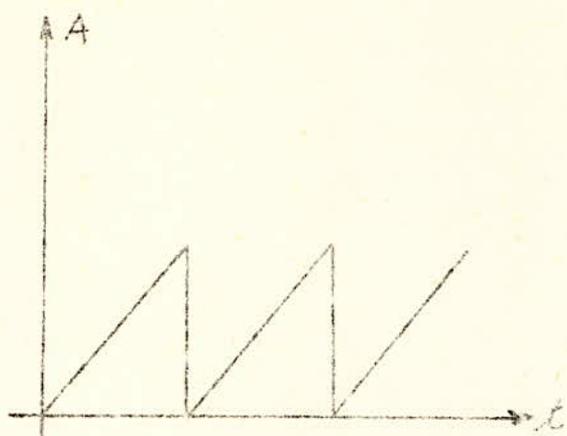


Fig. I-10-a:
Variation dans le temps du débit
d'air au niveau des cordes vocales.

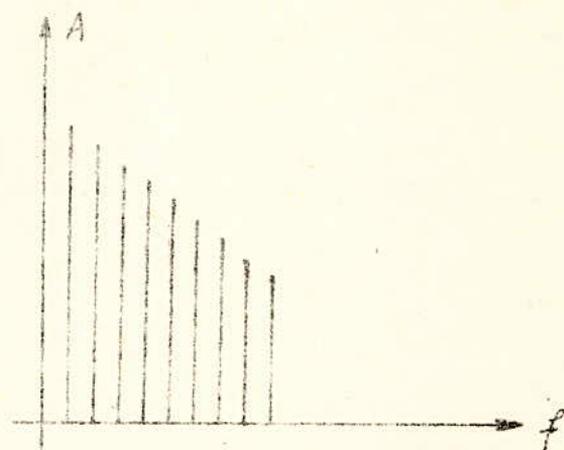


Fig. I-10-b: Son spectre
en fréquence.

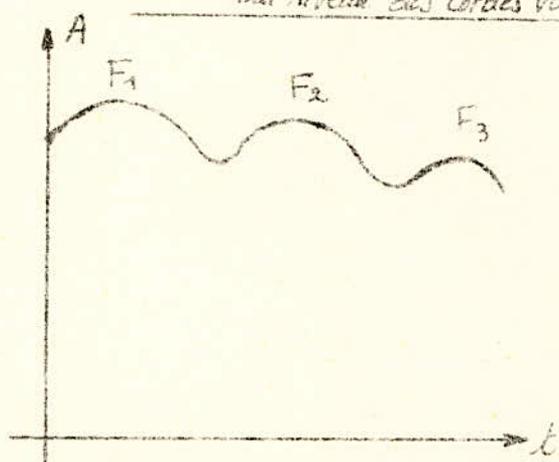


Fig. I-10-c: Courb de
réponse en fréquence du
conduit vocal.

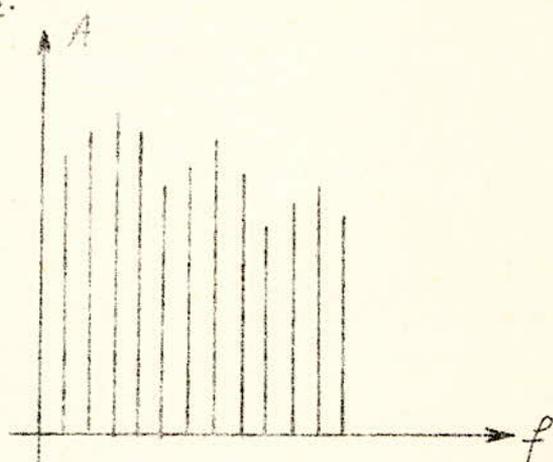


Fig. I-10-e

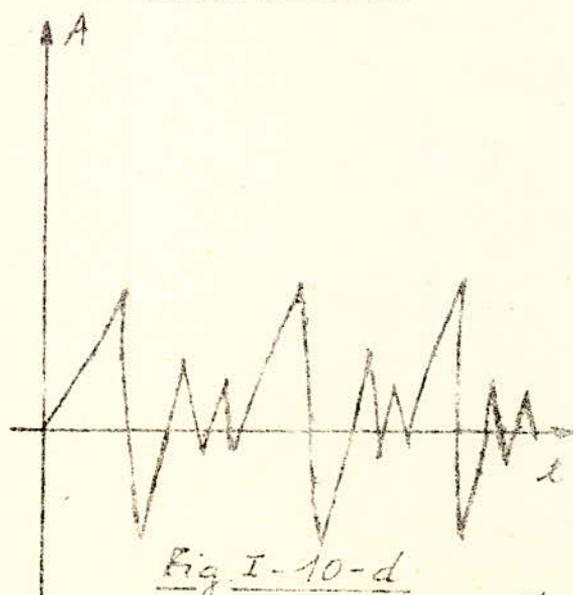


Fig. I-10-d

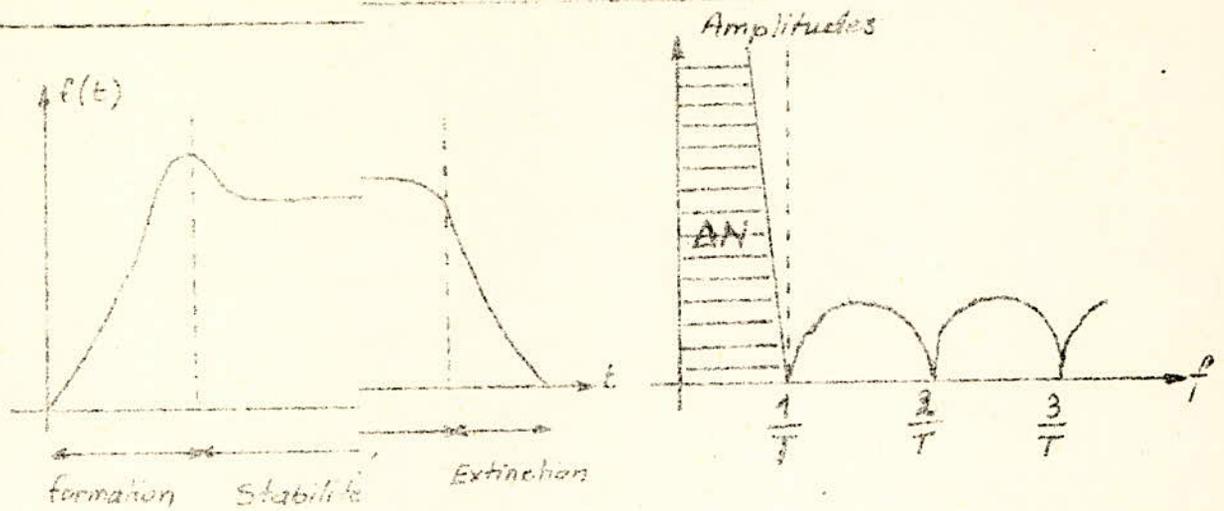


Fig I-12

Fig I-13

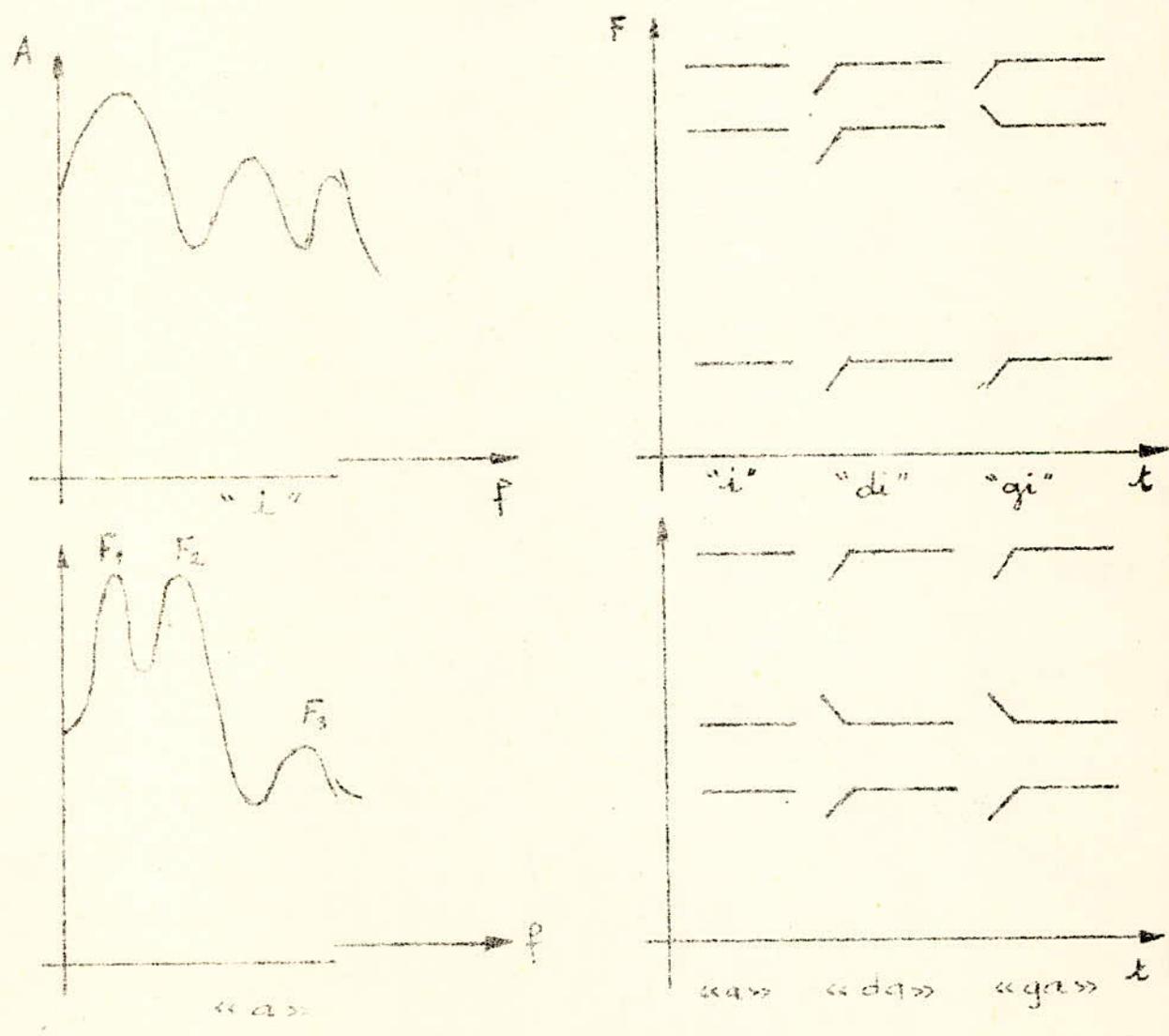


Fig I-11: Les consonnes sont caractérisées par les évolutions des fréquences des formants dans le temps.

I-) LES VOCODEURS (Voice Operation Coder)

I-) Principe des vocodeurs:

Les vocodeurs sont des appareils récents. Ils sont utilisés pour comprimer la largeur de bande nécessaire dans les transmissions téléphoniques. Ils se basent sur le principe du voder de DUDLEY, qui a montré qu'en utilisant des méthodes de codage appropriées, on peut retransmettre la parole en n'utilisant qu'une fraction de la bande (qui est de 3000Hz), ceci en conservant le même nombre de lignes.

La figure II-1 nous permet de voir qu'un vocodeur est constitué de 2 parties:

- l'analyseur qui permet de "tirer" (extraire) de la voix les paramètres fondamentaux caractéristiques d'un son, pendant un intervalle de temps significatif (exple: 20 ms). Ces paramètres sont conservés en mémoire.

- Le synthétiseur qui décode les signaux en mémoire, et les reproduit pour reformer la parole initialement analysée.

2-) les différents types de vocodeurs:

2-1) les vocodeurs à canaux:

a-) Plusieurs études ont été faites sur le vocodeur à canaux par FLANAGAN 1965 & 1970, FANT 1968, CARRE & PAILLE (1970) ...

C'est le type qui dérive le plus du voder. Il comprend un système d'analyse-synthèse ayant un banc de onze filtres. Les 11 signaux issus des filtres (dont la fréquence de coupure est de 25Hz) sont combinés en un signal unique d'une largeur de bande totale de $25 \times 11 = 275\text{Hz}$, ce qui réduit considérablement la bande initiale requise (3000Hz).

Dans la partie synthèse, les signaux de chaque canal sont utilisés pour contrôler la fréquence de résonance de filtres à bande étroite (0 à 300Hz), variables avec le temps. Un oscillateur de relaxation ou une source de bruit (cas des sons non laryngés), fournissent l'excitation appropriée. Chaque filtre est modulé en intensité par le signal de commande correspondant.

b-) RESULTATS DES RECHERCHES: la parole ainsi reconstituée en sortie est intelligible, mais de qualité médiocre avec un accent métallique.

La différence entre sons voisés et non voisés est mal réalisée. La mélodie est peu satisfaisante à cause d'une mauvaise extraction de la fréquence fondamentale. Le schéma de ce vocodeur est à la fig. II-2

2-2) les vocodeurs à formants:

a-) FLANAGAN en 1966-1970, a distingué 2 sortes de vocodeurs à formants selon que les circuits sont en série ou en parallèle.

---la méthode des circuits en série, reconstruit le signal en simulant globalement les résonances et les anti-résonances de la transmission vocale. Les fréquences complexes des formants, des anti-formants et de l'excitation représentent les paramètres de codage.

---la méthode des circuits en //, s'efforce de reconstruire le même signal mais de façon différente, car chaque circuit retransmet séparément les fréquences des formants et leurs amplitudes ainsi que les zones des zéros acoustiques (anti-formants). Le produit acoustique de chaque circuit étant somme à la sortie.

b-) RESULTATS DES RECHERCHES: d'après FLANAGAN, le modèle en // présente plus d'avantages, car il permet de mieux synthétiser les consonnes grâce à un contrôle individuel de la fréquence et de l'amplitude des formants. La figure du vocodeur à formants est à la II-3.

2-3) le PATTERN MATCHING:

a-) ce type de vocodeur réduit encore davantage l'information relative au spectre. DUDLEY & DAVIS (1953) ont écrit une série de 10 éléments phonétiques (s, f, i, l, e, a, o, u, é, n) qui ont leurs propriétés spectrales dans les 10 canaux du vocodeur sous la forme de filtres dont la courbe de réponse correspond à un certain élément.

Il faut simplement calculer à chaque moment la meilleure approximation possible entre le spectre d'entrée et les 10 spectres de référence.

b-) REMARQUE: cet appareil permet surtout des expériences de perception auditives (expériences de SMITH en 1963).

2-4) les vocodeurs à auto-corrélateur:

a-) dans le système mis au point par SCHROEDER & HUGGINS (1964), on calcule la fonction d'auto-corrélation du signal directement liée au spectre. Les valeurs relatives aux coefficients et à la fréquence fondamentale sont transmises. Le schéma de ce type est à la fig II-6.

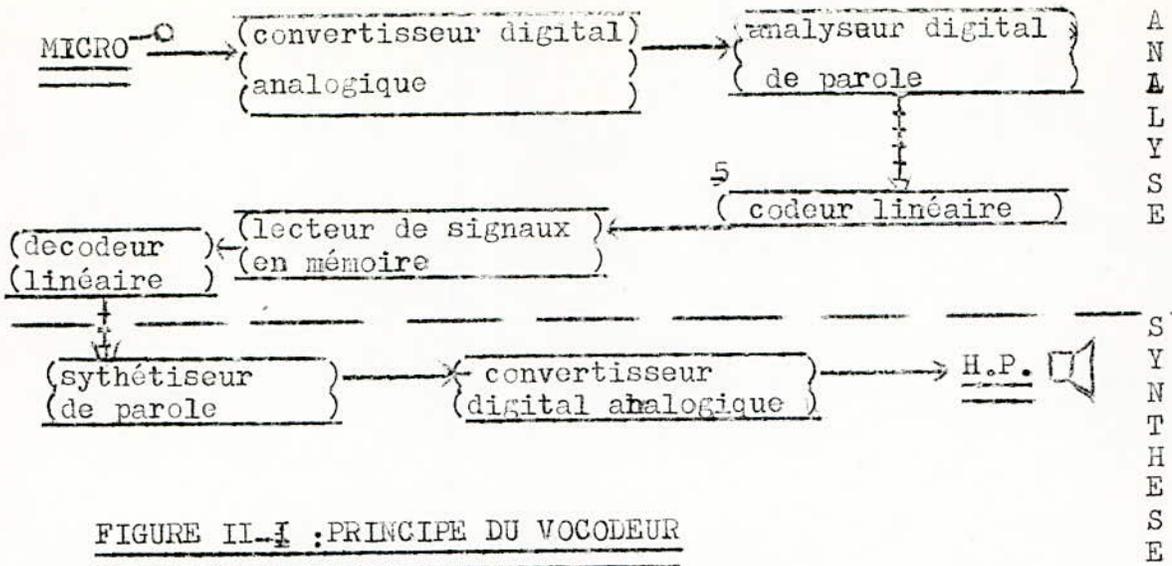


FIGURE II-1 : PRINCIPE DU VOCODEUR

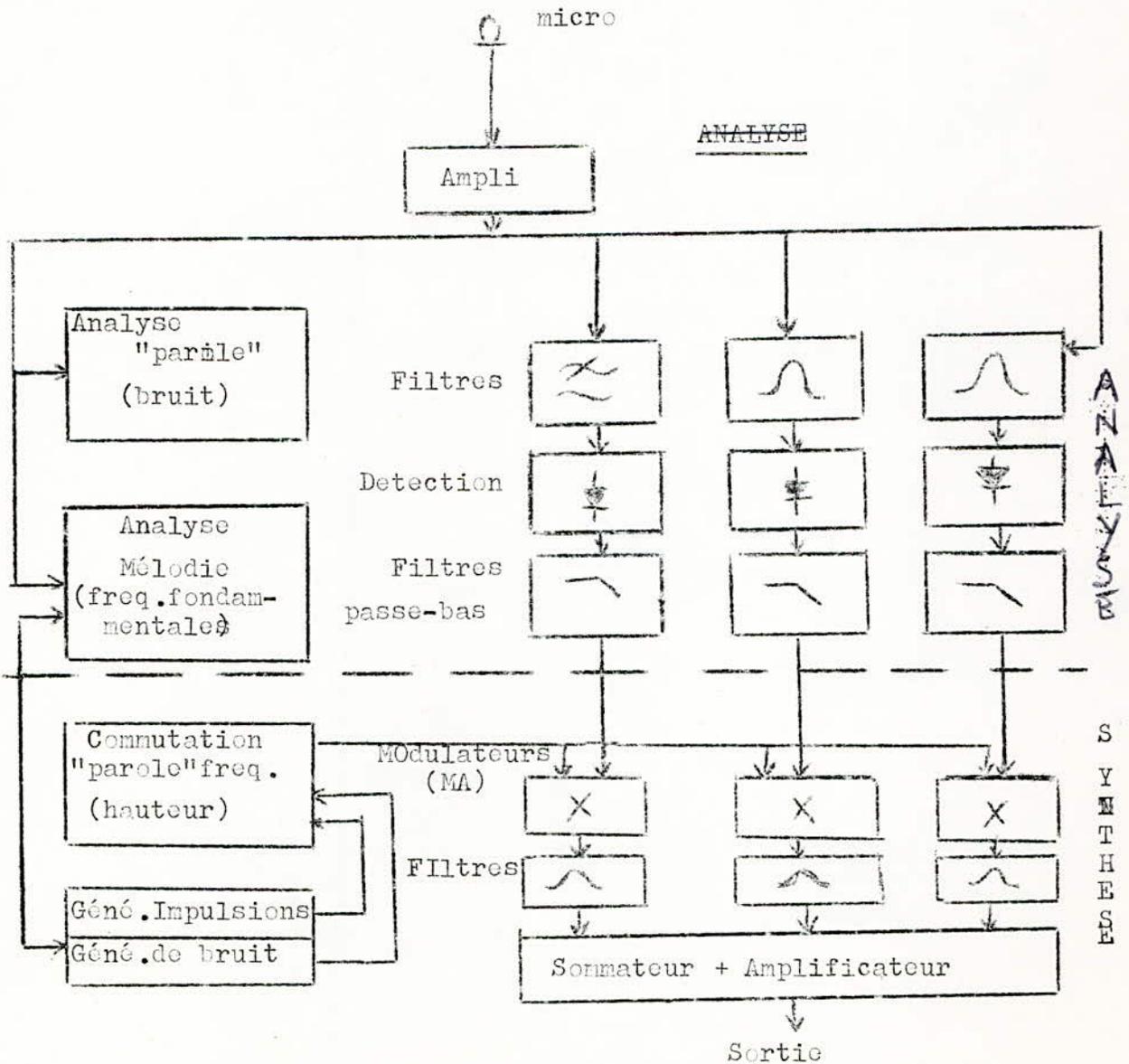


Figure II-2: Vocodeur à canaux

b-) RESULTATS DES RECHERCHES: la qualite de la voix est sensiblement ameliorée mais elle reste celle d'un vocodeur à canaux classique.

2-5) les vocodeurs à fonction orthogonale:

a-) en principe un spectre peut être développé en un nombre quelconque de fonctions orthogonales. Le développement d'un spectre de parole en termes exponentielles orthogonales et les fonctions de LAGUERRE a été utilisé par certains chercheurs tels HUGGINS, KULYA, MANLEY, KLEIN (57-63)

b-) RESULTATS DES RECHERCHES: retransmission de la parole (vocodérisée par ces chercheurs) de bonne qualite.

2-6) les vocodeurs conservant la phase:

a-) les vocodeurs déjà vus provoquent une distorsion du message en négligeant la phase. En intercalant de nouveaux systemes entre la source d'impulsion et les filtres de synthèses, on restitue les variations de phase. BELL a produit plusieurs modeles (ainsi que les labo LINCOLN. BELL a permis d'éviter les difficultés d'extraction de la fréquence fondamentale et celles relatives aux sons voisés et non voisés

b-) RESULTATS DES RECHERCHES: économie de bande faible mais qualite nettement améliorée.

2-7) les vocodeurs à divisions:

a-) ils utilisent la division de fréquences pour réduire la largeur de bande sans trop affecter l'intelligibilité. Dans le systeme "MOBANC 3" de BOGERT (1956) il y a une division par 2 dans 9 canaux (2 à 10 KHz) puis recombinaison et remultiplication pour retrouver le signal origine

b-) RESULTATS DES RECHERCHES: le systeme de BOGERT qui utilise 3 bandes de fréquences (correspondant aux 3 premiers formants) n'a donné que des résultats médiocres, mais a permis d'ouvrir la voie aux systemes plus élaborés, notamment les compresseurs d'harmoniques.

SCHROEDER décrit justement en 1962 un systeme de compression plus élaboré, pouvant être utilisé (par ralentissement ou par accélération du débit de parole) pour la présentation de textes à des aveugles ou dans les méthodes d'enseignement à des enfants retardés.

2-8) les vocodeurs hybrides ou à excitation vocale:

a-) dès 1950, des chercheurs ont orientés leurs travaux vers la détection de la fréquence fondamentale car ils ont pensé que la cause d'une production de parole peu naturelle serait une transmission defectueuse de la fonction d'excitation.

C'est ainsi que des chercheurs de la BELL telephone Co. (exple: PIERCE

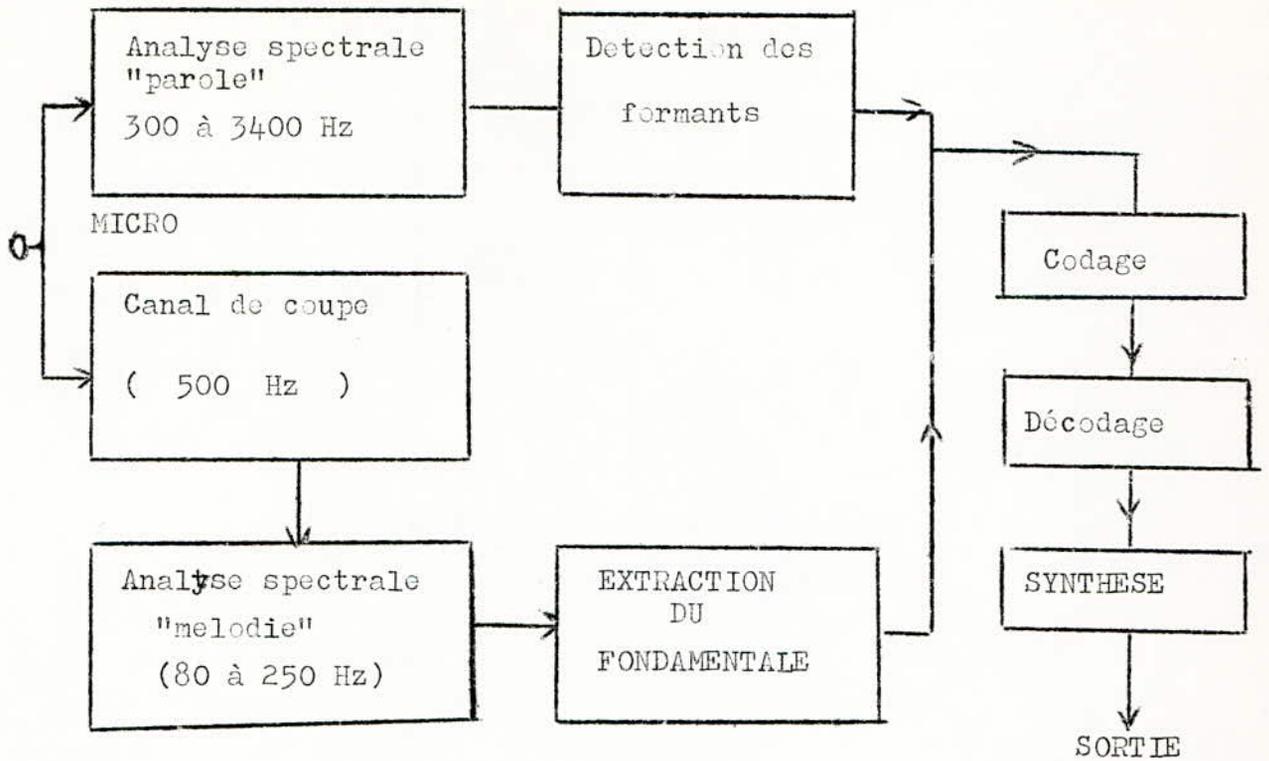


FIG.II-3:vocodeur à formants

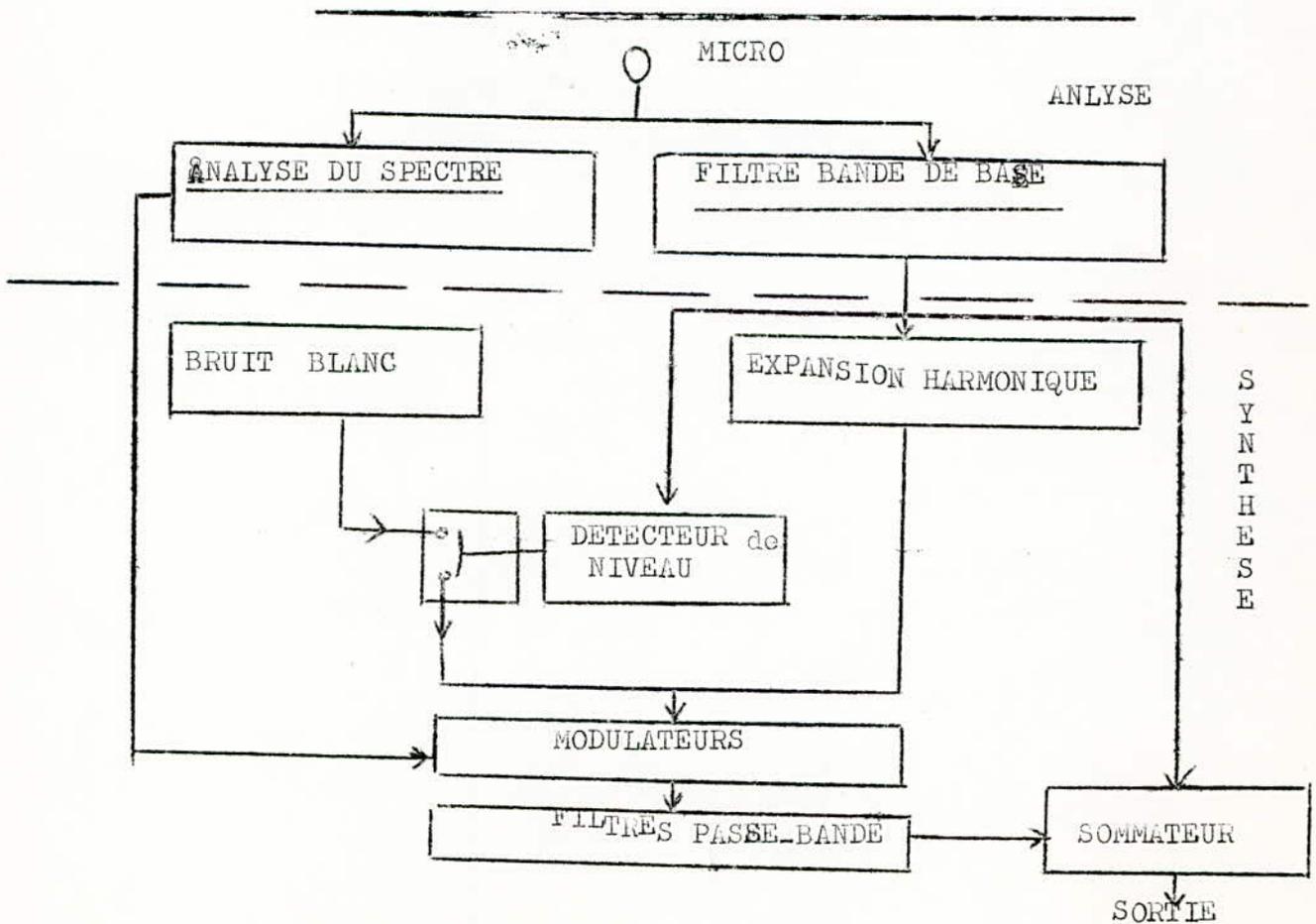


FIG.II-4:vocodeur à excitation vocale(principe)

en 1957 & DAVID en 1960-63) ont pense à utiliser un semi-voceur où une portion du spectre original(en general le bas du signal) est retransmise dans son integra ite, ce qui permet de reproduire fidelément les frequences importantes. Les figures II-4 & II-5 donnent respectivement le schéma de principe et le schéma de l'organisation du voceur

b-) RESULTATS DES RECHERCHES; cette solution au probleme de l'excitation a conduit à une amelioration substancielle de la parole, aussi bien du point de vue de son intelligibilite que de la reconnaissance du locuteur

3-)domaines d'applications.

comme nous venons de le voir, les voceurs realises sont conçus surtout pour une application aux telecommunications et à la compression de bandes passantes. Neanmoins, il y a lieu de signaler 2 domaines propre

3-1) la recherche phonetique:

dans cet axe 3 adaptations sont abondamment utilisées:

a-) L'INTONATOR: utilisé par les chercheurs de l'institut d'EINDHOVEN C'est un voceur à canaux, sans extracteur de frequence fondamentale. Dans la synthese, on substitue à la frequence fondamentale, une frequence fondamentale artificielle que l'en impose sur n'importe quel enoncé. Ses variations sont controlées par un generateur de fonctions.

b-) LE VOBACK: il utilise un voceur de 18 canaux comprenant une source lumineuse dont les faisceaux sont reflechis par des schemas spectrographiques. La lumiere reflechie est recueillie par des cellules photoelectriques et par là, active une serie de filtres (de meme nombres que les cellules). On a ainsi des controles de voltage qui modulent le son dans les canaux. 2 autres controles additionnels permettent de voir si les sons sont voises ou non, et de controler la hauteur de la voix.

L'inconvénient est de choisir une seule source de generation (source de bruit ou ^{source} pour les sons voisés) car le spectre est reduit à 18 zones discrettes. Neanmoins, ses performances sont satisfaisantes.

c-) LE MANIPULATEUR DIGITAL DE SPECTRE : presente par COOPER au 5ème congrés international des sciences phonetiques (1965). Il est utilisé pour la generation d'un spectre et la synthese à partir de ce spectre. Entre l'analyseur et le synthétiseur, il y a une memoire centrale et un convertisseur digital pour la conversion de l'onde sonore en données numériques. La memoire centrale, vue de l'exterieur est une serie de couch

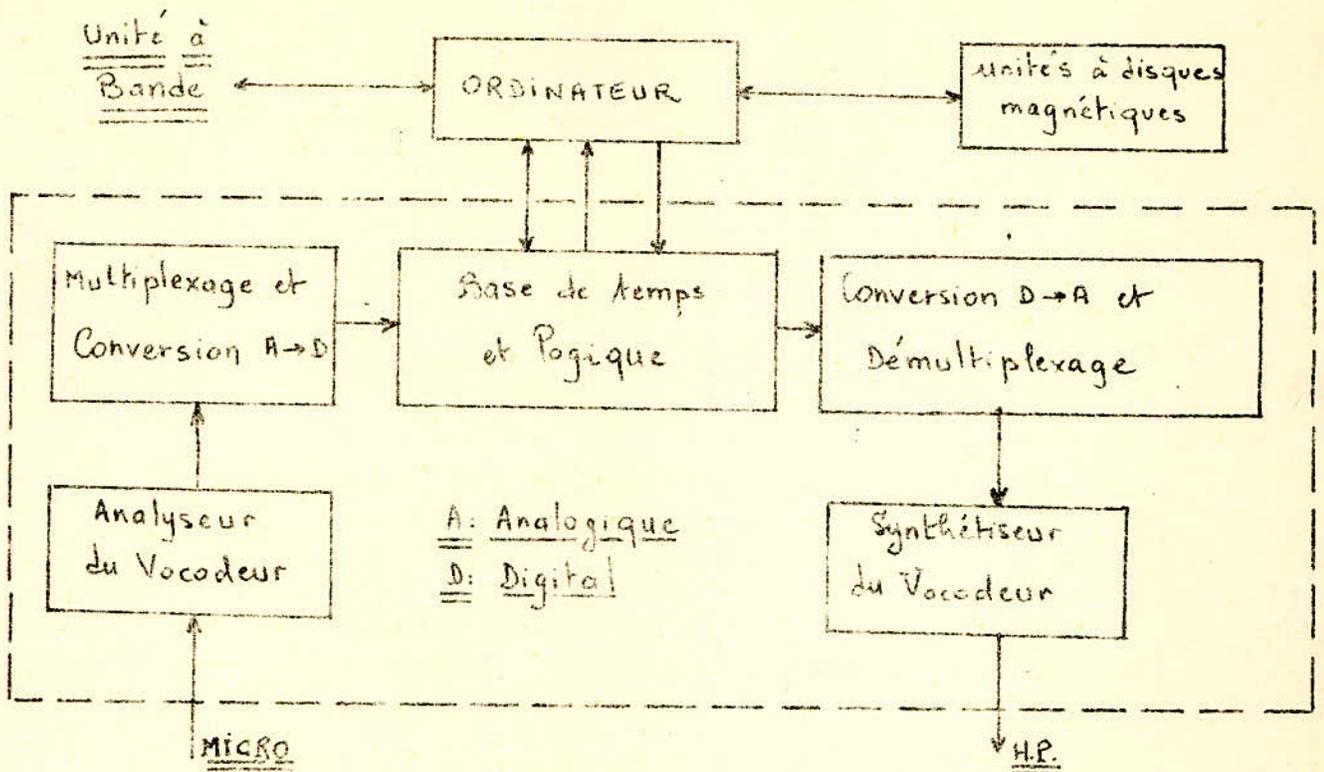


fig II-5: Organisation d'un Système à Vocodeur Hybride

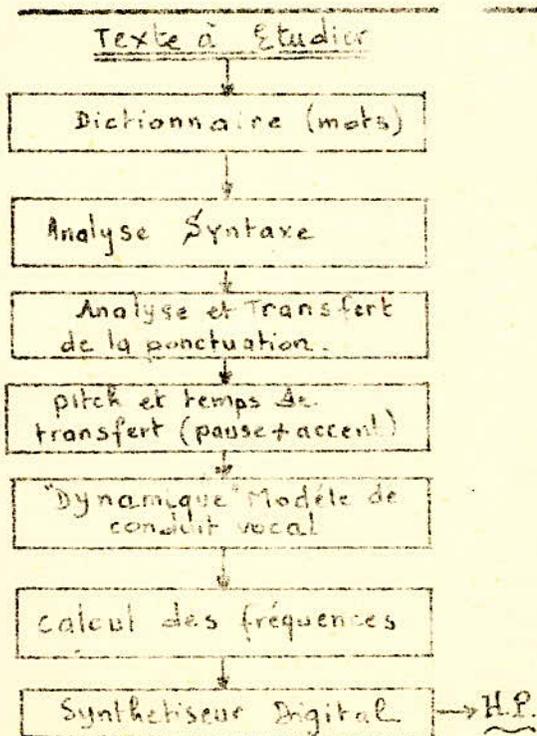


fig II-11: Synthèse par texte imprimé

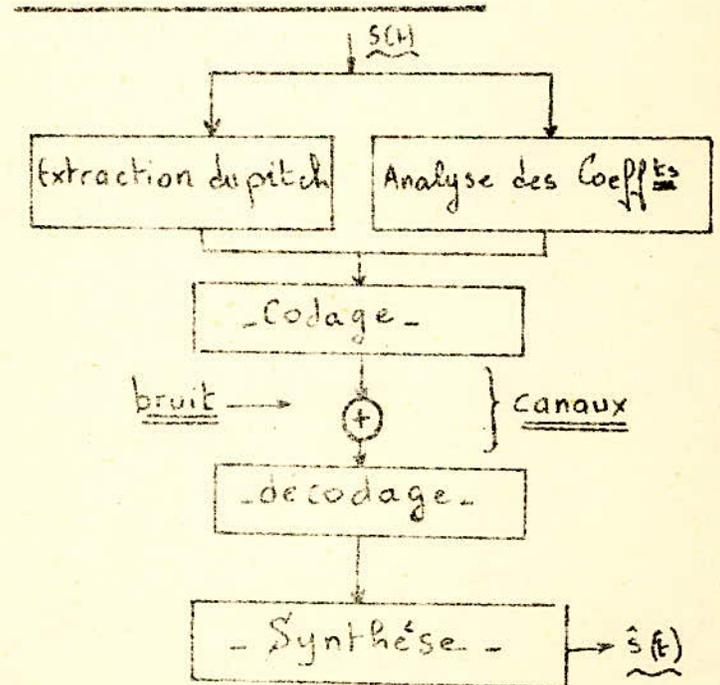


fig II-6: Vocodeur à auto-Corrélation

couches. Chaque couche a la forme d'un spectrogramme digital (durée: 2,5s). De nombreuses opérations sont possibles avec cet appareil.

--Plusieurs versions du même spectre peuvent être stockés en mémoire pour être ensuite comparés.

--Des modifications plus complexes peuvent être faites par un ordinateur. Dans ce même type, il existe une autre variante de synthétiseur pour l'accélération ou le ralentissement de la parole:

LE SPEECH-STETCHER, qui utilise un vocodeur à canaux et un enregistreur magnétique pour enregistrer ou repasser l'information spectrale qui passe de l'analyseur au synthétiseur. Cette information est alors soit étendue, soit comprimée sans pour autant affecter la qualité.

3-2) La recherche médicale:

Les vocodeurs sont utilisés dans le domaine de la surdité partielle ou totale. Il y a 3 méthodes d'approche à cette rééducation: a-) approche visuelle: elle préconise l'emploi du "traducteur de parole visible" (de la BELL T. Co.) où un signal de parole est affecté en temps réel sur un écran. Le sujet n'a ainsi qu'à apprendre à lire la parole qui apparaît devant lui (initiallement, dans le micro, il aura dit cette parole.

b-) approche tactile: PICKETT (1962) a travaillé sur l'utilisation d'un vocodeur tactile dont le procédé consiste à attacher au bout des doigts d'un sujet, des vibrations mécaniques. Chaque doigt reçoit ainsi une vibration tactile correspondant à une gamme bien définie de fréquences.

c-) approche auditive: d'après les expériences, les gens atteints de surdité pouvaient néanmoins être plus réceptifs à des fréquences qu'à d'autres (généralement les B.F.).

Ainsi avec un vocodeur BF (travaux de PIMONOW en 1962, NELSON 68, LEVITT 70) on peut recoder l'information HF (non perçues) en signaux BF.

REMARQUE:

Nous devons mentionner que les vocodeurs peuvent être utilisés pour la parole lors des plongées sous-marines (le mélange oxygène-hélium donne un taux de distorsion élevé (travaux de GOLDEN 66)).

II-) LES SYNTHÉTISEURS.

L'instrument fondamental, dans toute cette étude, est le synthétiseur de parole, qui permet de voir le rôle et l'importance des diverses composantes du signal acoustique. La réalisation et la commande de synthétiseurs mécaniques complexes pouvant offrir des performances satisfaisantes posent de multiples problèmes. Aussi s'est-on rapidement tourné vers la construction d'appareils destinés à simuler optiquement ou électriquement la production de la parole.

La pression et le débit de l'air peuvent être mis en parallèle avec la tension aux bornes d'un circuit électrique et le courant qui le parcourt. De même il peut exister un // entre les impédances acoustiques et les impédances électriques.

Ces constatations très simples sont à la base du fonctionnement de ces appareils dont le plus ancien est le vocodeur. Par la suite on a construit des filtres électriques présentant la même courbe de réponse en fréquence que le conduit vocal ou le conduit nasal; ces filtres ont permis de réaliser des synthétiseurs à formants. Mais il est aussi possible de représenter par un quadripôle électrique un tube de longueur et de sections déterminées; c'est ainsi que sont construits les simulateurs de conduit vocal, dont l'étude est récemment reprise grâce à de nouveaux moyens.

I-) le synthétiseur à formants:

G. FANT en collaboration avec le "ROYAL INSTITUTE of TECHNOLOGY" de STOCKHOLM a proposé une autre forme de synthèse, qui vise à reconstituer un fait de parole à partir de ses principaux paramètres acoustiques (en simulant les qualités de résonance du circuit vocal par des circuits électriques). Dans cet appareil un générateur simule les vibrations des cordes vocales (sons voisés) et envoie une série d'impulsions dans les circuits de résonance. Pour les sons de friction (non voisés) on a un générateur de bruit blanc dont la fréquence et l'amplitude des formants de bruits sont variés. Les pics de résonance des signaux correspondent à ce qu'on appelle les formants.

I-I) Il y a 2 types de synthétiseurs à formants:

a-) le synthétiseur en parallèle, dans lequel les canaux du spectre de parole sont en // comme dans le vocodeur à formants. Pour la restitution du signal, il faut ajouter les formants. Cette sorte de synthétiseur donne des facilités pour réaliser des spectres complexes.

4-1) le synthétiseur en serie ou en cascades, où la sortie d'un circuit constitue l'entrée de l'autre. L'inconvénient est que l'amplitude des formants ne peut pas être contrôlée séparément, mais il permet une représentation plus exacte du son dans le tractus vocal.

I-2) les appareils réalisés:

a-) les OVES : le R.I.T. de STOCKHOLM a produit des OVES (Orator Verbi Electric).

----- l'OVE I a été réalisé par FANT en 1948, les paramètres de commande sont contrôlés manuellement à l'aide d'un seul bouton.

JOOS a construit aussi un appareil de ce type (1948).

----- l'OVE II a été mis au point par le RIT (avec FANT -1963). il est muni d'un lecteur photo-électrique qui convertit en signal sonore les II courbes paramétriques (fréquence fondamentale, amplitude; ;...).

----- l'OVE III (avec LILJEN CRANTS 1968) est semblable au 2ème sauf qu'il a 16 paramètres de commande. Il a une grande facilité de manipulation (il équipe aussi les laboratoires de HASKINS à NEW-HAVEN) Pour la commande automatique, les travaux ont été dirigés par les U.S.A. (RABINER 68, BELL Co., KLATT 1973...). Pour les problèmes relatifs à la source vocale, FLANAGAN a dirigé les travaux avec notamment LANDGRAF 68/CHERRY 69/ISHIKATA 1972 .

b-) aux U.S.A.: nous signalerons le synthétiseur // PAT (paranét. artificial talker) construit par LAWRENCE, le synthétiseur de WEIBEL en 1955, de GLACE-HOLMES (1968), de STEVENS (au M.I.T. en 1955 et appelé le POVO), ainsi que les travaux de FLANAGAN & HOUSE (56) sur le codage

c-) en POLOGNE : le SYNFOR de KRACPROWSKI (69) ou sa version 2ème de KRACPROWSKI & MIKIEL en 1971, avec l'Académie des sciences de POLOGNE

d-) en FRANCE: un tableau récapitulatif (ci-dessous), nous permet de regrouper tous les travaux, réalisations, performances... des synthétiseurs réalisés en FRANCE.

Nous noterons que celui de L'É.N.S.E.R.G. (GRENOBLE), ne peut être utilisé en télécommunications, mais peut être une sortie parlée d'ordinateurs.

(la figure II-7 est une sorte d'appendice qui montre le résultat des travaux de PAILLE sur le calcul de la fonction de transfert d'un circuit de formants (la même qu'un circuit RLC). (cette remarque vient du fait qu'un synthétiseur de ce type a 3 canaux: I pour les sons voisés, I pour les non voisés, I pour les sons nasaux. Et on simule les qualités de

resonance du conduit vocal par des circuits electriques.

Le tableau est donne à la fig. II-8 .

1-3) les techniques de codage:

nous avons juge nécessaire de parler des techniques de codage car c'est une des raisons pour laquelle une parole est de mauvaise qualité (c-a-d quand dans un systeme d'analyse-synthèse, l'analyse automatique des formants de la voix est peu satisfaisante). A ce sujet des travaux ont été entrepris par BELL Co. sur le codage numerique (1972-73) ainsi que par SCHAFER & RABINER (1971) sur les bancs de filtres digitaux. OPPENHEIM, SCHAFER, STOCHKAM ont etudiés en 1968 le filtrage non lineaire des signaux et le traitement homomorphique de la parole (avec des filtres homomorphiques) pour separer et analyser les diverses composantes de l'onde acoustique. Ces travaux ont conduit à plusieurs ameliorations dans les resultats. Ainsi des phrases de parole synthétique où l'on varie le taux d'échantillonnage (7200, 4500 & 2400 bits/seconde), le nombre des coefficients de prediction (2 à 18) et dont on peut moduler la fréquence fondamentale, les formants ainsi que les largeurs de bande, ont été réalisées. Les tests de comparaison, ont relevés peu de différence avec les spectrogrammes de la voix naturelle. (travaux de ATAL & HANAUER en 1971, et SCHAFER en 1970-72). Cette forme de synthetiseurs offre des possibilités dans le domaine de la recherche des sons (contrôle independant de l'enveloppe spectrale, durée relative, vitesse du débit...)

2-) le synthétiseur à enregistrement :

la methode la plus simple et la plus immediate de synthése de la parole est celle où l'on enregistre directement le signal vocal sur un support adéquat (bande magnetique par exple). La qualité de la voix ne sera altérée que par le manque de melodie (si initialement il y a assemblage de mots disjoints).

-----en FRANCE (70-74), il y a 2 sortes: le terminal vocal et l'IBM 770.

a-) le terminal vocal de TOULOUSE, fait par BRUEL & CAZAUX qui ont utilisé les propriétés de l'enregistrement holographique comme memoire adressable, permettant de générer un ensemble de mots constituant un vocabulaire spécialisé. L'enregistrement est fait par photos. La lecture se fait par faisceau laser, mais le probleme est le codage son-image

b-) IBM 7770: connectable à un ordinateur IBM 360 ou 570, les informations ont pour origine un poste telephonique à clavier. La reponse est

assemblée par la sélection, dans un dictionnaire, de mots ou de parties de mots, ou phrases.

Un tableau des performances de ces 2 types est à la figure II-8.

3-1) le synthétiseur à canaux:

3-1) introduction-théorie;

Le signal vocal est considéré comme la somme de signaux émis par une batterie de générateurs, émettant à une fréquence donnée, dans une bande passante audible, et d'amplitude variable. Le signal, pour un locuteur donné, dépend du phonème prononcé, mais aussi de la fréquence fondamentale (dite pitch) qui caractérise une voix grave ou aiguë. Ce type de synthétiseur est le plus répandu.

3-2) les appareils réalisés:

Ce type est à la base de nombreux systèmes. Parmi eux;

a-) L'ICOPHONE: ce système se distingue par le fait qu'il n'y a pas de commande en amplitude des filtres, mais une commande en tout ou rien.

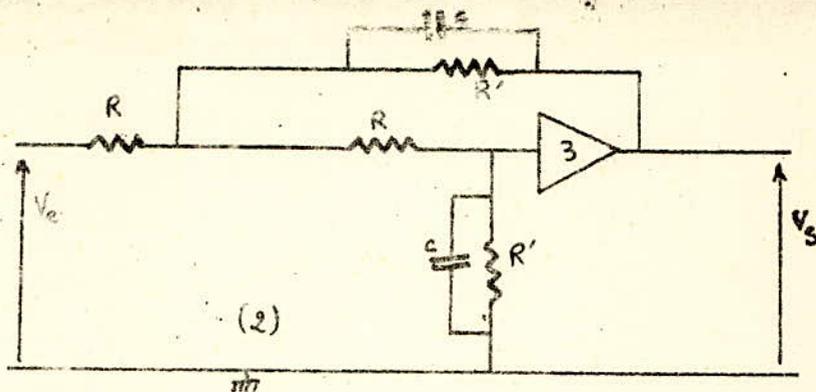
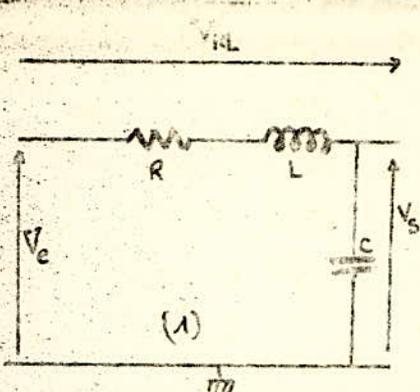
-----1'ICOPHONE I, a été construit en 1965. il avait un signal enregistré en boucle pendant 2,4s sur une piste magnétique, puis répété pour analyse. Un procédé hétérodyne permet de n'utiliser qu'un seul filtre pour couvrir tout le spectre (travaux de DELLATRE 1965)

-----1'ICOPHONE II, a une fréquence sinusoïdale issue du générateur qui est utilisée dans un circuit de mélange de sons venant de plusieurs canaux, lorsqu'il y a une zone opaque sur un sonogramme qui défile près de l'une des cellules photo-électriques (fig. II-10) - (travaux de LIENARD & SAPALY 1968-1971).

Un sonogramme, obtenu sur un sonographe, est une représentation visuelle des sons. Par exemple, un son sinusoïdal de 1000Hz est représenté par un trait horizontal, fin en bande étroite, épais en bande large. Un son de fréquence décroissante donne un trait descendant. Une impulsion est un trait vertical. Ce synthétiseur est un relecteur de sonogramme à 44 voies.

-----1'ICOPHONE III, utilise un ordinateur IBM II30. Les cellules photo-électriques sont remplacées par des portes électroniques dont la fermeture est commandée par des signaux binaires. L'appareil sort sous forme vocale, l'information contenue dans un texte écrit. Le texte est traduit automatiquement en suite de symboles phonétiques qui permet de appeler les phonèmes correspondants (stockés dans une mémoire à disques) (travaux de SAPALY 1971 & 1972)

type de synthétiseur.		Enregistrements		Synthétiseurs à formants		
Qualités	intrinseques de la parole	Terminal vocal à mémoire holographique	I. B. M. 7700	ENSERG	CGE	CIPHON Thomson/CSF
		intelligibilité	Excellente		bonne	bonne
Qualité	Excellente		bonne	bonne	bonne	
Qualité de l'information	Signal analogique		1000 bits/s	1200 bits/s	7000 bits/s	
Nbre et nature des paramètres de commande	Signal analogique		11 paramètres	7 paramètres		
Complexité du matériel	Moyenne	Simple	M o y e n n e			
Etat d'achèvement du matériel	Etude	Commercialisé	D e v e l o p p e m e n t			
Méthodes	Phrases		oui	oui	utilise	
	Mots	oui	oui	oui	en telecom-	
	Diphonèmes		oui	Mais...	munication	
	Phonèmes	matériel pas approprié.	oui	Mais...	—	
Etat d'achèvement du système.		Commer-	E t u d e			
REMARQUES.	<p>Ces méthodes ne permettent pas l'accès à la prosodie ni à aucun paramètre lié à la sémantique de la parole.</p> <p>Il s'agit plus de recherches sur les matériels que sur la synthèse de la parole.</p>		<p>La méthode actuellement optimale d'emploi de ce type de synthétiseurs est la synthèse par mots.</p> <p>La synthèse par règles avec ces matériels peut être étudiée à la fin de recherche fondamentale sur les transitions de la parole. Mais la complexité finale des règles de transition en termes de formants ne semble pas ouvrir la voie à une utilisation réelle du synthétiseur à formants par association de phonèmes ou diphonèmes.</p>			
<u>Fig. II-8 : Enregistrements et synthétiseurs à formants.</u>						



La fonction de transfert est :

(1) : $V_s/V_e = \frac{1}{Lc p^2 + Rcp + 1}$ (de $\frac{1}{a^2 p^2 + 2axp + 1}$) pour une cellule RLC.

(2) : $V_s/V_e = \frac{3}{R^2 c^2 p^2 + \frac{2R^2 c p}{R'} + \frac{R^2}{R'^2} + 1}$ = pour un circuit de formants

fig II-7: fct de TRANSFERT d'un circuit de formants

$R' > 10R$
 fréquence = $\frac{1}{2\pi RC}$
 $\Delta F = \frac{1}{\pi RC}$

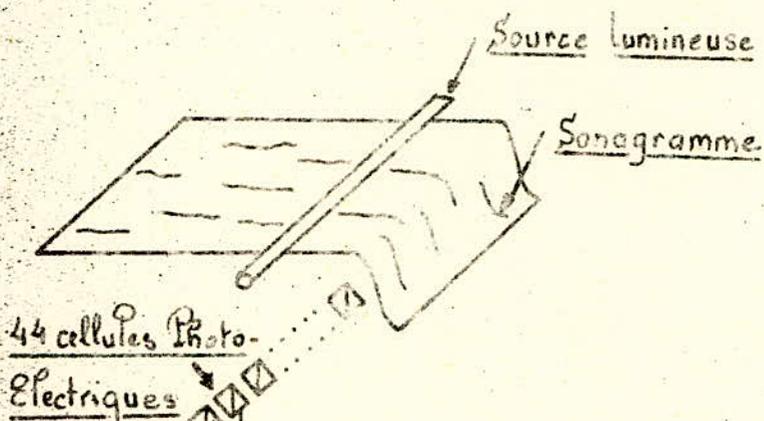
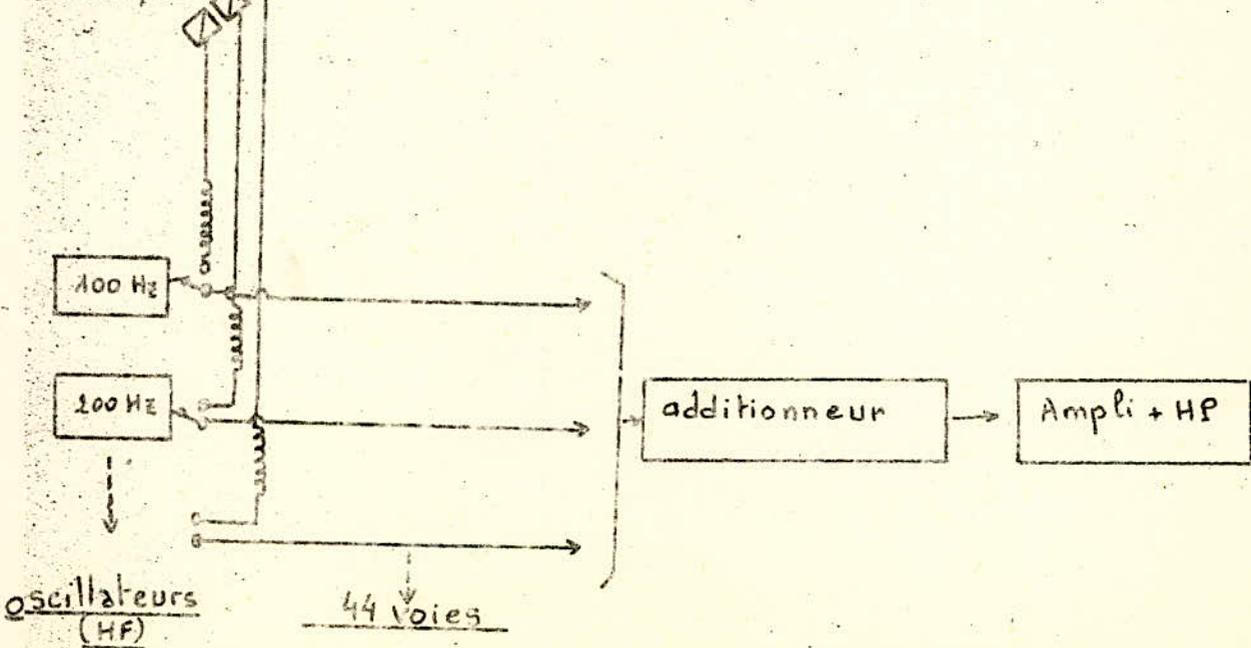


fig II-10: L'ICOPHONE (II)



-----l'ICOPHONE IV, est une version améliorée du 3ème; on y a adjoint au message synthétisé des éléments esthétiques(intonation,rythme...)

-----l'ICOPHONE V, serait en cours de réalisation(d'après une publication de la délégation à l'informatique 1974)Ce sera une unité autonome à réponse immédiate, et vocabulaire illimité,pouvant être connecté à la place de n'importe quel telescripteur.

LES ICOPHONES SONT DES APPAREILS DE COMMANDE EN TOUT OU RIEN, CE QUI DONNE 45 CANAUX(au lieu de 12 ou 15 dans les autres).

b-) le modèle IBM 7772 :le vocabulaire est stocké sous forme numérique. Pour préparer une réponse vocale,l'ordinateur y lit la représentation numérique des mots et phrases à prononcer et les transmet dans l'ordre à l'appareil.Celle-ci, à l'aide d'un synthétiseur de vocodeur à canaux, transforme les représentations en mots ou phrases parlés.

A LA GAUDE , NEMETH ET BURON ont réalisé une expérience de synthés automatique à 200bits/s au lieu de 2500bits/s.

Un tableau des performances de ce type de synthetiseur est donné à la figure II-9 .

4-) LES UNITES à REPONSE VOCALES (URV):

ce sont des appareils capables de reponse orale aux questions qui leur sont posées(travaux de ANON 1962 à 1971).

a→ 4-1) les travaux réalisés:

les 1ères URV ont été utilisées à des fins commerciales (horloge parlante, lecture de renseignements ...)

NEMETH en 1970, au labo d'IBM de FRANCE, a réussi à synthétiser la fable"la cigale et la fourmi" sur un vocodeur à canaux avec un taux d'information assez bas(200bits/s).Il a employé la méthode atomique où la parole est reconstruite à partir des sons élémentaires. Mais la qualité de la voix,quoique acceptable, est peu mélodieuse et partielle.

Pour répondre aux besoins modernes,l'URV doit avoir un langage codé avec un taux minimum d'informations et permettre la transmission d'un taux maximum de réponses.

4-2) les appareils réalisés:

une des premières URV a été le système de réponse IBM installé au stock exchange de NEW-YORK(1960).Il comprenait 250 mots de durée d'environ 300m/s(vitesse) pour chacun.

En 1963, un système amélioré est présenté.La durée est 500m/s et il

type de synthétiseur		← synthétiseurs à canaux →					Vocoder numérique S.L.E.
		CIT DECLAM	CNET U.R.V.	S.P.S.	IBM 7772	IBM, synthèse à 200 bits/s	
Qualités							
Intelligibilité	Intrinsèques de la parole			Bonne			
Qualité				Moyenne			
Qualité d'information			2400 bits/seconde			3700 bits/s	2400 bits/s
Nbre et nature des paramètres de commande		12 canaux + pitch		15 canaux + pitch		47 canaux binaires	12 canaux + pitch
Complexité du matériel			Moyenne			Simple	Moyenne
Etat d'achèvement du matériel			Opérationnel	Commercialisée	Opérationnel	opérationnel	Developpement
MÉTAPHORES	Phrases	OUI	OUI				
	Mots	OUI	OUI		OUI		
	Diphonèmes			OUI		OUI	OUI
	Phonèmes		matériel	pas approprié			
Etat d'achèvement du système	Opérationnel	Developpement	Etude	Commercialisée	Opérationnel	Opérationnel	
REMARQUES	Pas de prosodie	Prosodie	Prosodie	Pas de Prosodie	Prosodie	Pas de pitch donc pas de prosodie.	Susceptibles des mêmes applications que les vocoders analogiques.
	Possibilité d'action sur le vocabulaire.	Possibilité d'action sur les paramètres spectraux pour corriger le vocabulaire.		Possibilité d'action sur le pitch et le rythme, tant en correction du vocabulaire qu'en cours de synthèse pour l'introduction de la prosodie.		Les diphonèmes sont en mémoire et ne sont pas traités en temps réel.	

Fig. II-9: Synthétiseurs à canaux.

a en plus une meilleure facilité de stockage et de generation des mots.

BURON(68) a présenté une version améliorée de l'IBM 7770, le type 7772. Le stockage est sous forme numérique, mais 2 problèmes restent

-l'enregistrement des mots (choix du locuteur, intonation...)

-le traitement des mots (mode d'excitation, de traitement...)

-----un tableau des URV, est donné à la fig II-11. Il date de 1973.

4-3) les résultats de l'étude du type URV du C.N.E.T.:

l'étude de l'URV du CNET a permis de montrer le fonctionnement:

-a-) dans l'URV la parole est représentée par son spectre à court-terme; la connaissance de ce spectre toutes les 25ms permet de reconstituer un signal de qualité acceptable, parfaitement intelligible. Chaque spectre est lui-même défini par l'énergie dans 12 bandes de fréquences. Le vocabulaire de l'URV est constitué de quelques portions de phrases et d'une trentaine de chiffres et portions de nombres.

Lors de la synthèse, des corrections automatiques sont effectuées sur le rythme et la hauteur en fonction de l'emplacement de chaque mot.

b-) l'URV du CNET EST CONSTITUÉ de deux synthétiseurs à canaux, et d'une mémoire de masse contenant 512000 éléments binaires et d'un ordinateur CII 10010.

Le CNET étudie aussi un système dit de synthèse par syllabes, à l'aide d'un matériel similaire au précédent. La parole est obtenue par la somme de segments de parole (en général des diphtongues). UN test d'intelligibilité démontre la validité du système (97% d'identification correctes)

La limite principale réside dans le volume restreint des mémoires. En effet, on emploie la méthode par impulsions codées (PCM) qui requiert un nombre d'informations considérable, la haute intelligibilité du message se fait au dépend du vocabulaire.

On a donc pensé à une autre forme de codage.

4-4) autres systèmes de codage:

Pour une capacité de mémoire de 10^6 (c-à-d un million) de bits, le codage PCM ne peut reproduire que 20s de parole, alors que si l'on réduit le taux d'information à 533 bits/s et à 75 bits/s, la synthèse à partir des formants (ou données formantiques) et à partir d'un texte écrit peut générer 30mn à 4h de parole.

Fabricant	Modele	Vocabulaire		Memoire de stockage	nombre de lignes telephoniques disponibles	Temps d'accès (en ms)	Extension possible?
		Nombre de Mots	Duree des mots Messages (secondes)				
Advanced Communications Inc.	V56464/M	64	64		1	<1	
	V56464/M1	64	64		1		
American Systems.	Voicemaster 3000	3000		Disque Magnetique	32		jusqu'à 10.000 mots
Cognitronics	630	10	10		1	625	
	631, 632, 632/4/618	31	31 0,5-0,6	Tambour	1	625	
	636	31	0,5-0,6		1	625	
	MARS	31 à 183	0,5-0,6	magne- tique	4 à 48	3508	
	STAR	32			1	625	
	Horloge Parlante	70			1	10.000 (par Message)	
Co-System, Inc.	TAU 16-W	16		Ruban magne- tique		600	
	TAU 16-WX	64			600		
	DTB-16W	16			600		
	DTB-16WX	64			600		
	DTB-8M		8		600		
	TAU-8M		8		4600		
Datapro Inc.	CS-1400	32 à 256	0,5 à 1,5	Tamb. magn.	2 à 64		
Metrolab Inc.	Digitalk 256	16 à 256	0,5-0,6	Tamb. magn.	1		
	Digitalk 3100	32 à 64	0,5-0,6	Tamb. magn.	1		Par bloc de 27 mots ou phrases.
	Digitalk 14000	32 à 64	0,5-0,6	Tamb. magn.	1		
Periphonics Corp.	PAC 2000	2000	Diverse	Disque magn.	256		jusqu'à 10.000 mots
Phonoplex Corp.	7050	50	0,5	Semi-Conduct	4 à 256		Extension non limitee
Wavetek Data Communications	A500	32 à 256	0,5-0,6	Tamb. magn.	8 à 64		
IBM	7770	32 à 128	0,5	Tamb. magn. forme analogique	4 à 48		
IBM.	7772	illimite'	non impose'	forme numer sur disque.	2 à 8		illimite'.
<u>Fig. II-11: LES UNITES A REPONSE VOCALE</u>							

a-) la synthèse à partir des données formantiques:

La seule information transmise est celle relative aux formants (effets et éléments redonnants du langage éliminés; (RABINER 1971) La partie électronique dans cette forme de synthèse, peut être un ordinateur (RABINER a utilisé un HONEYWELL DDP 516), pour la simulation d'un synthétiseur à formants digital classique (composé de 4 résonateurs en cascade, d'un filtre et d'un convertisseur digital analogique pour la sortie vocale). Les paramètres sont obtenus à partir de l'analyse de segments naturels et concernent la F. fondamentale, les 3 premiers formants, l'amplitude globale, et les zones de résonance et d'anti-résonance. Tous les paramètres sont quantifiés et stockés (taux de 533 bits/s).

Une application de ce type est faite par FLANAGAN en 1972 dans une station téléphonique (pour éliminer les erreurs dans le tirage et l'enregistrement des cartes d'abonnés).

b-) la synthèse à partir d'un texte imprimé:

Cette méthode présentée par FLANAGAN, ne requiert pas d'analyse préalable des segments naturels (à la différence de la première). Elle a 2 phases. La première comprend la conversion du texte en symboles et son analyse (en tenant compte de la valeur des virgules, points, mots substantifs, articles... dans la durée du texte et le ton).

La 2ème phase comprend la conversion des symboles en parole synthétique. Ce système peut utiliser une liste exhaustive de 130 000 mots avec un taux bas (6 bits/phonème).

Tous les 10ms, le modèle calcule une forme de tractus qui correspond à un symbole particulier. Cette forme est programmable (fig II-12)

c-) résultats:

en plus de son caractère économique par rapport au PCM, la synthèse à formants permet la production d'une voix de meilleure qualité (utilisée donc pour la transmission de renseignements nécessitant une grande intelligibilité (météo, contrôle navigation aérienne...))

La 2ème méthode est la plus intéressante du point de vue de la richesse du vocabulaire. Pour un ordinateur doté d'une capacité de stockage de 10 millions de mots de 36 bits/s, le stockage de véritables encyclopédies est réalisable. Quoique la qualité de la voix est moins bonne elle peut être utilisée pour la lecture de textes pour (par exemple, les aveugles).

5-) les relecteurs de sonagrammes:

5-1) le pattern play-back: _ _

Dés 1945, écrivent COOPER & LIBERMAN /72/, "avec STUDDERT et nous, on travaillait déjà dans les laboratoires HASKINS, sur des machines à lire pour aveugles". Le but de ce projet était de convertir les graphemes en sons. Mais la difficulté et la lenteur du codage, a conduit l'orientation des travaux vers la spectrographie (pour déceler les indices pertinents de la parole). Mais le spectrogramme à lui seul est beaucoup trop complexe. Il fallait donc des spectrogrammes schématisés (travaux de COOPER-1950).

Le principe du pattern play-back (SCHOTT 1948 / COOPER 1950 / BORST 1956) est constitué par un bloc; dans ce bloc, il y a une roue de 50 cercles concentriques, d'opacité variable (modulés de 120 à 6000 Hz). Une lumière émise par une lampe à arc, traverse la roue. Les faisceaux issus des cercles sont dirigés vers des spectrogrammes schématisés. La lumière réfléchie est transformée en onde sonore (à l'aide de cellules photo-électriques).

Mais il y a plusieurs limites à ce modèle: qualité et technique médiocres; monotonie de la voix, un bruit de fond...; néanmoins, grâce au travail de COOPER sur ce type, on a pu découvrir les principaux aspects et caractéristiques des indices acoustiques de la parole.

5-2) l'ICOPHONE: _

C'est le même principe que le pattern, sauf qu'il n'y a pas de roue tonale. Les rayons sont recueillis par les cellules photo-électriques reliées à des oscillateurs (44) accordés de 0 à 4400 Hz.

IL a l'avantage, par rapport au pattern de permettre une variation de l'intensité précise. Il permet aussi de reproduire des phénomènes d'une durée inférieure à 5 ms.

Les différents types de ce synthétiseur ont été exposés précédemment; ce type de synthèse est en effet à canaux.

6-) les synthétiseurs à codage prédictif:

Ils simulent de façon globale la fonction de transfert du conduit vocal. Ce sont des modèles variables, commandés de façon à minimiser l'écart entre la sortie réelle et la sortie des modèles étudiés.

FANT a calculé la fonction de transfert de ce type d'appareil:
$$T(p) = \frac{1}{a_n^2 p^2 + 2a_n x_n p + 1} \cdot C_n$$
 qui est la transformée de LAPLACE de la fonction de transfert; a_n, x_n sont les paramètres du conduit vocal.
 C_n est un terme correctif, p , un complexe. C'est celle d'un circuit résonant monté en cascade avec un filtre passe-haut.

Les appareils de cotype réalisés en FRANCE sont au tableau-fig.II-I4.

7-) les simulateurs vocaux:

7-I) les genres de synthétiseurs:

Pour améliorer la qualité de la parole reçue, les chercheurs ont expérimenté une synthèse de type nouveau; elle consiste à simuler les mouvements des organes de la phonation à l'aide de circuits analogues électriques du tractus vocal. Il y a 2 sortes:

a-) les simulateurs vocaux statiques:

dans la simulation électrique du conduit vocal, une des principales méthodes employées est la variation de l'aire des sections transversales, qui schématisent le tube acoustique. Pour avoir cette forme de synthèse, il faut connaître la fonction d'aire du conduit vocal. L'étude de cette fonction est fondée sur plusieurs techniques:

--- la 1^{ère} est fondée sur la cinéradiographie. FANT, STEVENS & HOUSE ont orienté leurs recherches sur l'analyse préalable de films radiologiques.

--- la 2^{ème} est de MERMELSTEIN & SCHROEDER (-65 à 68) qui se sont efforcés de déterminer la géométrie du conduit vocal à partir de mesures acoustiques. Pour cela, il y a 2 méthodes de calcul: l'une (KADOKAWA & SUZUKI / 1968) est fondée sur la mesure des 3 premiers formants. La 2^{ème} (SONDHI & GOPINATH / 1970/, DESCOUT / 1972/) est fondée sur la mesure de la réponse impulsionnelle aux lèvres.

Les analogues de type statiques ont de sérieuses limites (ne génèrent que les sons isolés) mais ne sont pas moins très utilisés dans la recherche, car ils sont employés comme "instruments de calcul" sur le conduit vocal et son mécanisme.

b-) les simulateurs vocaux dynamiques:

les sons caractérisés par des changements articulatoires non reproduit par les simulateurs statiques, ont conduit à la recherche de simulateurs dynamiques qui fonctionnent avec des transitions de formants).

Mais ce genre de simulateurs a aussi de sérieuses limites (notamment dans la non linéarité des phénomènes). Mais il peut reconstituer des segments de la chaîne parlée, et peut émettre des syllabes synthétiques parfaitement naturelles. Les ordinateurs ont permis l'avènement d'une nouvelle relance de ce genre de synthétiseurs.

type de synthétiseur		Simulateurs de conduits vocal		codage prédictif.		
		ENSERG	CNET	ENSERG	CNET	ENST
Qualités						
intelligibilité } intrinsèques Qualité } de la parole		Espérées bonnes à très bonnes.		Espérées bonnes à très bonnes.		
Qualité d'information		Objectif final : 50 bits/seconde		à étudier		
Nbre et nature des paramètres de commande.		26 ou 17 aires de section du conduit ou environ 10 paramètres		12 paramètres de commande + paramètres d'entrée.		
Complexité du matériel		?	?	?		
Etat d'achèvement du matériel		Etude		Etude.		
METHODES	Phrases	sans intérêt		} toutes les méthodes sont envisageables.		
	Mots					
	Diphonèmes					
	Phonèmes	OUI	OUI			
Etat d'achèvement du système		Recherche fondamentale		Etude		
REMARQUES.		C'est la source d'une recherche fondamentale sur la physiologie du conduit vocal, le fonctionnement des cordes vocales. On se rapproche de l'étude des commandes réelles de l'organe phonatoire par l'homme.				

Fig. II-13 et II-14: Simulateurs de conduit vocal et codage prédictif.

7-2) les appareils réalisés:

a-) les simulateurs statiques:

----aux USA: les premiers ont été ceux de la BELL T. Co. construit par DUNN(en 1950-avec 25 résonateurs cylindriques et 25 cellules)et par SCHOTT (1950-il y a 15 cellules).

--les constrictions entre le dos de la langue et le palais sont simulés par des résistances. Le circuit est alimenté par un bruit blanc pour les consonnes sourdes et par un mixage pour les sonores. Il y a une tension périodique pour les voyelles.

Ensuite au M.I.T., il y a le Vocal Tract Analog (VTA de STEVENS, KASOWSKI & FANT-1953-) C'est une version améliorée de celui de DUNN. C'est une réplique électrique d'un tube acoustique aux sections transversales variables. La ligne électrique représentant le tube acoustique a 17 sections variables (chacune = 1 cm du conduit vocal) la surface de chaque section change avec des selfs et capacités.

FANT en 1958 construit au RIT de STOCKHOLM, le LEA (Line Electric Analog très voisin du VTA. Il a 35 sections (section = 0,5 cm du conduit vocal ou tractus). L'aire de chaque section prend 16 valeurs différentes (de 0,16 à 16 cm²) et définit la forme de synthèse.

b-) les simulateurs dynamiques:

----au MIT, ROSEN en 58 et DENNIS & WHITMAN (63), ont réalisés le DAVO. il est constitué par une ligne de transmission électrique et de 2 sources d'excitation (voisement + bruit blanc). Il est également muni d'un système servo-électrique qui fait varier l'aire transversale des 14 sections de la ligne, permettant ainsi de synthétiser même des séquences de sons. Un 2ème circuit, le DANA, a 9 sections fixes et 2 variables, et sert à la génération de sons de nasalité (HECKER 62).

Dès 1965, la simulation par ordinateur a connu un nouvel essor. La BELL T. Co. avec des moyens considérables (DENES /70/, COKER & FUJIMURA /66/, SCHODER /68/, MERMELSTEIN /73/) se ~~est~~ efforcées de réaliser des modèles plus exacts du système phonatoire.

COKER & FUJIMURA ont fait un modèle articulaire où chaque phonème est caractérisé par des configurations types. Ces configurations articulaires sont présentées par des tables paramétriques. Ces paramètres se rapportent aux:

--levres (paramètre lent-300m/s pour la vitesse-pour la production de la protrusion des levres)

- (parametre rapide-50m/s- pour l'ouverture et la fermeture des levres)
 --apex de la langue.
 --partie centrale de la langue(param. lent-150m/s-pour l'angle de la
 machoire)
 (2 parametres lents et rapides pour les deplacements vert.&hori.)

Un modele plus récent et ameliore(COKER 68)permet une meilleure production de consonnes ainsi qu'une meilleure simulation des phenomenes de coarticulation.

HENKE /67/ a mis au point au MIT,un appareil pour les mouvements des organes articulatoires en fonction d'une serie d'attributs stockes pour chaque phoneme.Cet appareil a été utilisé par LIEBERMAN(71 à 74), pour l'etude de l'appareil vocal humain.

Le modele de WERNER & HAGGARD(69) donne une plus grande precision du parametre "langue" et une meilleur controle des sons nasaux.

MERMELSTEIN(69) a orienté son systeme sur des parametres supplementaires tels que l'aspiration,le controle de l'inertie des differences articulatoires...)Ce mode de simulation réalisé sur ordinateur DDP-224 se fonde sur l'utilisation d'une ligne de transmission non uniforme dont l'impedance est inversement proportionnelle à la section.

En 1973 MERMELSTEIN a presente un modele perfectionné presentant une superiorité sur la synthese acoustique(qui s'appuie sur des regles souvent tres complexes)et une utilité fondée sur l'application de regles articulatoires simples(suivant de pres la realite genetique).

APPENDICE:

--- la réalisation de tels circuits de simulation devrait permettre de mieux connaitre les qualités de résonance du conduit vocal(et donc de construire de meilleurs synthetiseurs à formants).

---signalons pour terminer les travaux de RICE(71)à l'universite de CALIFORNIE,SHIGENADA(68)à l'universite de YAMANASHI et HONDA(68) à l'universite de MEIJI(JAPON).

---en FRANCE,il y a GENIN au CNET, et GUERIN(72),PULVERIC,VALET & GAUDE(66) à l'ENSER de GRENOBLE.

UN TABLEAU POUR LES TRAVAUX EN FRANCE est donne à la fig.II-13.

III-REALISATIONS RECENTES ET PERSPECTIVES D'AVENIR:

Nous avons vu que le problème de la synthèse de la parole se ramenait à produire des sons vocaux pour transmettre un certain nombre de mots; le problème étant d'autant plus complexe que le nombre de mots possibles différents est plus grand.

On peut évidemment enregistrer à l'avance tous les mots et groupe de mots utilisés, comme cela a été fait pour l'horloge parlante.

Des recherches sont actuellement en cours pour mettre au point des appareils effectuant la synthèse au niveau des syllabes, à partir des sons (phonèmes), ou des transitions entre sons (diphonèmes).

I-) Réalisations récentes: Période de 1975 à 1978=

DANS notre étude des appareils de synthèse, nous avons surtout fait état des réalisations antérieures à 1974, aussi dans ce paragraphe, avons nous regroupé les appareils commercialisés entre 1975 et 1978:

a-) les appareils de la CIT(USA): ce sont principalement des systèmes d'envoi automatique de messages pour l'aviation (météo, positions...).

b-) la firme VOTRAX qui a réalisé deux synthétiseurs portatifs, ainsi qu'un système de conversion de signaux téléphoniques (64 au maximum) en une réponse vocale.

Un système de production de parole polyglotte, qui permet la synthèse électronique en anglais et en allemand est prévu également pour le français et l'espagnol (aux environs de 1980). Tous utilisent les phonèmes.

c-) la COMUTALKER qui a mis au point un dispositif de calcul automatique des paramètres vocaux à partir des sons produits phonétiquement.

d-) la SPEECH Technology a réalisé des appareils qui produisent des paroles à partir de mots de vocabulaire mis en mémoire, pour produire des formats. Ces appareils fournissent des informations à une vitesse qui peut être réduite à 10^3 bits/s

e-) la MASTER Specialities a produit un ordinateur sous forme d'URV, ce qui préfigure l'étude d'une série importante de synthétiseurs.

f-) BELL a annoncé la création d'un système analogique à tambour, et récemment un système qui énonce les numéros téléphoniques chiffre par chiffre avec une prononciation satisfaisante.

g-) la Telesensory a présenté un microprocesseur pour les aveugles. Ce dispositif fonctionne avec des mémoires standards et des convertisseurs digitaux-analogiques.

h-) en FRANCE, le CNET a proposé un système à "phonèmes+sons de transition" avec rythme et intonation, de qualité moyenne. Il a aussi fait un appareil

à diphonèmes à entrée phonétique, qui donne une voix de qualité passable.

i-) l'ENST quant à lui a proposé un nouveau vocodeur "le vocodeur à canaux adaptés". C'est avant tout un appareil de reconnaissance automatique de la parole par identification

j-) au JAPON, la ROLAND Cie, s'est spécialisée dans les synthétiseurs de musique.

2-) quantité d'information:

le volume des données stockées peut être un élément déterminant de la forme de synthèse choisie. L'indication du nombre d'éléments binaires (bits) n'est significative que si l'on précise problème traité.

	Qté d'information (pour une seconde)	adressage	commande du synthétiseur	stockage
message par phrases et par mots	10 à 30 bits/s	50 bits/s avec intonation	10^3 à 10^4 /s	10^3 à 10^4 bits/s
phonème	5 bits			50 bits
diphonème	10 bits/s			1000 bits/s
mot (I parmi 4000)	12 bits	25 à 50 bits		
message par éléments phonétiques	50 BITS/s	50 à 200	50 à 5000	1000 à 5000 par message

On peut remarquer que pour une seconde de paroles, la synthèse par phonèmes et sons de transition, nécessite 50 bits à la commande phonétique, 200 bits à l'adressage des éléments sonores, 2400 à 5000 bits à la commande d'un synthétiseur à canaux.

3-) perspectives:

A moyen terme, les progrès techniques, en particulier ceux des mémoires, permettent d'envisager l'avenir de la synthèse "globale" avec une extension des possibilités actuelles.

Il est en effet certain que d'ici deux à trois ans, on saura faire des systèmes capables de fabriquer une parole de bonne qualité à partir de quelques indications prosodiques.

Ces systèmes pourront être utilisés dans deux types d'applications:

--- les applications autonomes (peu de messages possibles, stockage d'un vocabulaire sous forme phonétique). Ce sont les unités spécialisées

en téléphonie. Ces unités peuvent d'ailleurs servir aussi bien à la synthèse qu'à la reconnaissance automatique de la parole.

— les applications liées à l'ordinateur central (par exemple un ordinateur), pour donner des renseignements, pour des réservations, de la documentation automatique...

Nous pouvons presque sans hésitation, affirmer que cette forme de transmission de l'information, est vouée à un avenir brillant, et que la circulation orale et écrite de l'information deviendront complémentaires et tout aussi indispensables.

C-) LES REPERTOIRES .

Nous avons rassemblé dans ce répertoire les noms des centres, instituts, ..., ainsi que les publications qui traitent du problème de la synthèse de la parole - et que nous avons rencontrés tout au long de notre étude.

Ce répertoire n'est évidemment pas exhaustif. Il reste à compléter et à enrichir. Nous n'avons, ~~y-voir~~, voulu y voir qu'un instrument de documentation et de travail.

I6-) principaux centres de recherches:

I-I) centres de recherches et de publications:

certaines centres font de la recherche, mais parallèlement, ils publient leurs résultats dans des journaux, qui la plupart du temps leur appartiennent. Nous désignerons pour plus de clarté ces centres par, en () le nom de leur publication.

a-) en U.S.A.:

- MASSACHUSETTS INSTITUTE of technologie;
- HASKINS LAB. of NEW-YORK;
- BELL laboratory (the BELL systems technical journal)
- R.C.A. products;
- Army sciences tech. center of WASHINGTON;
- U.S. Air Force of BEDFORD;
- GEORGIA INSTITUTE of research of ATLANTA;
- American Telephon and telegraph;
- I.B.M. (journal of research and developement)
- I.T.T. (electrical communication)
- FRANKLIN INSTITUTE;
- National academy of sciences;
- TEXAS university of AUSTIN;
- Universities of IOWA / OHIO / CALIFORNIA (working papers in phonetics)
- I.E.E.E. (TRANSACTIONS ON: Acoustics, speech and signal processing)
- Audio engineering society (journal);
- Acoustic society of america (journal)

b-) au JAPON:

- universities of TOKYO / KYOTO / MEIJI / YAMANASHI / KYUSHU / THOKU / OSAKA /

- 6-JAPAN INSTITUTE of electronics;
- Radio research lab. of JAPAN(journal);
- INSTITUTE of electronics(journal);
- Acoustic society of JAPAN(journal);
- research INSTITUTE of TOHUKU;

c-) en FRANCE:

- C.E.A. de SACLAY;
- les laboratoires MARCOUSSIS(revue de la compagnie des l'electricité)
- C.E.R.F.I.A. de TOULOUSE-lab. de reconnaissance des formes et de l'intelligence artificielle-;
- les instituts de GRENOBLE(revue de phonétique), de AIX-EN-PROVENCE
- le C.I.I. de GRENOBLE;
- laboratoire d'automatisme et d'electricité-université de NANCY-;
- le C.I.T. d'ALCATEL;
- l'institut de recherche d'informatique et d'automatisme
- l'E.N.S.E.R. de GRENOBLE;
- le C.N.E.T. de LANNION - l'E.N.S.T. de PARIS(revue du CNET-ENST);
- le C.N.R.S. de PARIS;
- THOMSON-CSF(revue technique) et CSE-;
- les laboratoires I.B.M. de la GAUDE;
- le LIMSI d'ORSAY;
- les universites de PARIS-VIème- et de STRASBOURG;
- le SLE-CITEREL de LANNION;

d-) en RFA:

- SIEMENS(telefon report);
- institute of MUNICH;

e-) en ANGLETERRE:

- universities of CAMBRIDGE(journal of linguistics)/ EDIMBOURG;
- post office research station of LONDON;
- QUEEN'S university of BELFAST- et "the UNIVERSITY COLLEGE";
- institute of phonetic of EDIMBOURG;

f-) en POLOGNE:

- academie des sciences de VARSOVIE(wybrane zagadnienia elektroniki tel.)
- institut d'automatisme de VARSOVIE;

--I.P.P.S. de VARSOVIE;

--institut de recherche et de technologie;

g-) en NORVEGE:

--l'ecole polytechnique scandinave de OSLO;

h-) au PORTUGAL:

--laboratoire de COMBRIA(revue du laboratoire);

i-) en SUEDE:

--Royal institute of technologie of STOCKHOLM;

--royal Swedish academy of engineering sciences;

j-) en HOLLANDE:

--institute voor perceptie onderzoek d'EIDHOVEN;

--université d'AMSTERDAM;

k-) en ITALIE:

--les instituts de TURIN / PADOUE / ET L'INSTITUT NATIONAL de GALILEE;

-- le centre national de la recherche;

l-) au DANEMARK:

--l'academie de COPENHAGUE;

m-) en RDA:

--institut de DRESDE;

n-) en INDE:

--l'institut indien de technologie;

--l'université de BOMBAY;

o-) en UR.SS:

--institut de mathematiques de NOVOSIBIRICK;

--academie des sciences de MOSCOU;

--l'universite d'UKRAINE--à LVOV--;

I-2) les publications dans les revues specialisees:

les chercheurs publient souvent leurs rés ultats dans des revues specialisees, dont la majorité sont en anglais, ou en francais(plus rarement)

a) Parmi celles en anglais on peut citer:

- journal of speech and hearing disorders(USA);
- " " " " " research(USA);
- american journal of physics;
- international journal of man-machines studies(USA);
- encyclopedia of electronics(USA);
- teletechnics(USA);
- electronics(");
- " telecommunications(USA);
- " communications(JAPAN);
- language and speech(ENGLAND);
- soviet physics and acoustics(URSS);
- " automatic contribution(URSS);
- international review of applied linguistics in language teaching(URSS);

b-) en français:

- revue de physique appliquée;
- echo des recherches;
- les revues d'acoustique, des télécommunications, du son, d'électronique;
- les annales des télécommunications;
- revues non spécialisées mais contenant des articles:
 - haut-parleur, radio-plans, revue musicale, sono, automatisme....-

c-) en russe:

- electrosjaz;
- akustic zh.;

d-) en roumain:

- revue de linguistique;
- télécommunicatü;

e-) en polonais:

- archiwes akust polska;
- rozprawy elektrotechniczne;

/...../...../.

II-) repertoire des rencontres, colloques...les plus importants

(I) rencontres les plus significatifs(par leurs resultats):

- journées d'etudes de l'institut d'informatique et d'automatisme(en FRANCE, en fev. 73);
- journées d'etudes sur la parole(AIX EN PROVENCE-avril 71);
- " " " " " (GRENOBLE 1970);
- " " " " " (CNET-juin 72);
- journées d'etudes du groupe de la communication parlée(BRUXELLES 73);
- colloque sur la parole(PARIS66);
- colloques autour du festival du son(PARIS tous les ans);
- colloque international sur la tele-information(70-71);
- symposium sur l'intelligibilité de la parole(LIEGE 73);
- symposium on auditory analysis and perception in speech(LENINGRAD 73);
- international symposium on theory of information(BRUXELLES);
- international seminar on digital processing of analogs signal(ZURICH 70)
- seminar of speech communications(STOCKHOLM 74);
- conference on speech communication and processing(USA 72/CAMBRIDGE 67);
- international congress on acoustics(TOKYO 68 / BUDAPEST 71);
- " " of phonetics sciences(KYOTO 68 / MONTREAL 71);

III-) quelques ouvrages de recherche:

- "panorama des recherches sur la production de la parole-SIMMONS-(61);
- "articles sur la période 58/68(en collaboration avec FANT & FLANAGAN);
- "cours de LIENARD à l'université de PARIS-VIe-
- "techniques pour la phonétique experimentale, et l'intonation(METTAS 71);
- "acoustics theory of speech production(ANON & surtout FANT 1960);

III éme PARTIE.

A-)AVANT-PROPOS:

Comme on l'a signalé dans notre introduction, le but de cette étude est une bibliographie sur toute l'évolution des appareils de synthèse et en particulier sur les synthétiseurs de son. nous espérons avoir atteint notre objectif.

Comme illustration à notre travail, nous avons pu à réaliser un synthétiseur, dans un domaine où il a connu (et où il connaît encore) un essor considérable: la MUSIQUE.

Cette réalisation pratique n'étant pas donc le but de ce projet; nous n'avons pas voulu y attacher énormément d'importance du point de vue théorie,

Neanmoins, nous avons jugé nécessaire de donner un aperçu sur la musique électronique et les appareils de musique pour une bonne compréhension de notre réalisation, et pour son illustration.

B-)LA MUSIQUE ELECTRONIQUE:

I-)GENERALITES:

Depuis sa création, l'électronique a été amenée à simuler la plupart des activités de l'intelligence humaine. Et avec les ordinateurs (où sous leur forme réduite - les micro processeurs -) elle est entrée dans tous les domaines de la vie moderne (industrie, information, électro-ménage, ...) et particulièrement celui de la musique.

La musique électronique est le résultat des procédés de création de sons "nouveaux" ou "inusités" à l'aide de procédés électroniques. Et il est relativement facile de créer des sons et de leur donner des formes diverses à l'aide de quadripôles actifs ou passifs.

Avec la transposition des sons ou la variation du temps, on a des mélodies "rares" ou des combinaisons de sons.

II-) les sens musicaux:

II-1) Un son musical n'est pas une Cste; il est caractérisé par;

a-) l'intensité: un instrument peut jouer plus ou moins fort et on le perçoit avec plus ou moins "d'intensité". (peut être exprimé en décibels)

b-) la hauteur: l'acuité d'un son est sa hauteur. Les notes basses sont graves, les notes hautes sont aiguës. La hauteur croît avec la fréquence (avec des seuils de Maximum et de Minimum du spectre audible).

c-) le timbre: si 2 instruments différents donnent la même note avec la même intensité, on peut néanmoins distinguer une différence. C'est dû au timbre qui est une qualité physiologique du son et qui correspond au taux des divers harmoniques et à leurs phases.

d-) la durée: un son bref ne sera pas perçu de la même manière que le même son soutenu.

Ces paramètres traditionnels définissent le son d'une manière correcte, mais insuffisante. Il est nécessaire de définir des caractéristiques dynamiques nouvelles, tels que la forme, la masse, la couleur, la pente et la vitesse.

Cette nécessité est surtout apparue lorsqu'il s'est agi de faire la synthèse des sons. En effet, peut-on réellement confondre hauteur et fréquence? Prenons le son d'un diapason et la même note sur un instrument de musique: s'ils sont dans le médium, la hauteur perçue est effectivement la même. Si nous les prenons dans le grave, le son pur paraît être une octave inférieure au son instrumental - pourtant ils ont tout 2 la même fréquence. Ceci est dû à des phénomènes dont le siège est au niveau de l'oreille, celle-ci entendant des "masses" plus ou moins fortes.

Les moyens modernes en électroacoustique permettent de façonner les sons de façon plus précise et variée que les instruments traditionnels.

Ainsi apparaît la notion de "forme" des sons. Le timbre permet de caractériser un instrument: son grêle ou rond, sec ou doux... En fait le timbre peut être dissocié en "forme" et "couleur" du son.

Quant à la durée, on sait que l'oreille est sensible à la vitesse sur un son en évolution, - ainsi qu'aux "pentes" .

II-2) l'historique:

le premier appareil qui est été réalisé pour produire un son musical par des procédés électriques paraît être le "SELOPHONE" (1866). Son principe consiste à faire tomber sur une cellule conductrice (R varie avec la

lumière) un faisceau lumineux périodiquement interrompu par la rotation d'un disque métallique percé de trous. En 1889, SIEMENS présenta un type analogue et en 1905, MERCADIER perfectionna le dispositif.

Entre temps, CAHILL avait proposé, en 1897, d'obtenir le même résultat au moyen d'un ou de plusieurs alternateurs de petite puissance engendrant des courants de fréquence musicales et alimentant un H.P..

De ce dispositif sont dérivés diverses orgues (BETHENOD/HAMMOND/...)

Le premier appareil purement électronique est dû à LEE DE FOREST qui en 1915, présenta un montage où une triode (à l'aide d'un transformateur) produit des oscillations à fréquences musicales, qui alimentent un HP.

En FRANCE, HUGONNIOT mis au point le "cellulophone" (1919), un dérivé du séléphone. GIVELET de son côté a réalisé de véritables orgues électroniques qui furent présentées en 1928 & 1929.

Vers les années 20, TEREKINE exploita le phénomène des battements et du condensateur variable dans la création d'instruments élect. et construisit le "Terekin". Puis il créa un piano électrique et en 1927 le "rythmicon".

JORG MAGER, quant à lui, il réalisa une orgue polyphonique à 5 voix (1929).

Avec les recherches de MERTELOT & TRAUTWEIN (le trautionium), il y a à partir de 1935 un afflux de nouveautés dont beaucoup sont fabriquées en séries: le radiophone de BOREAU, les orgues de TOURNIER & HAMMOND, le solo-vox, le melachord, la clavioline, le pianophon, le récepteur d'orgues de MARTIN, ... pour ne citer que les principaux.

Les années 50 à 60, sont marquées par une abondante production d'œuvres mélangeant les instruments traditionnels et certains dispositifs électroniques. Ainsi, la musique électronique prend une nouvelle dimension.

Cependant ce n'est qu'au début des années 70 qu'ont lieu les 1ers concerts de "Live-Electronic-Music (musique électronique vivante) et c'est à cette période qu'apparaît le synthétiseur, ensemble modulaire de circuits dont les interconnexions sont faites à l'extérieur par le musicien (le patching).

II-3) classification des dispositifs musico-électroniques:

il y a 3 catégories de dispositifs.

--- la première comprend la musique électronique c-a-d- tout ce qui permet de créer un art nouveau completant ou même "doublant" l'art classique

La catégorie II permet de rassembler les instruments électroniques de musique, exple: l'orgue.

La catégorie III est la plus importante, car elle comprend les radio-recepteurs, les appareils BF, ...

La musique électronique signifie aussi bien la musique créée par des procédés électroniques que ces procédés eux-mêmes, mis en oeuvre sur des appareils spéciaux dont les plus importants sont les synthétiseurs, qui sont avec les rythmeurs des appareils engendrant de la musique électronique.

II-4) le spectre musical:

a-) figure III-1 :

cette figure montre 2 notes "sol". Le spectre A est celui de "sol" à vide de la corde sol du violon, donc à la fondamentale $f_1 = 196$ Hz.

Le spectre B est aussi celui d'un sol mais joué sur la corde "ré" donc un sol fondamental à $f_2 = 372$ Hz ($f_2 = 2f_1$).

La différence n'est pas surprenante. Le plus curieux, c'est qu'à l'audition les timbres de ces 2 notes semblent très proches. La différence provient du fait que les cordes sont de constitution différentes, que les longueurs des portions vibrantes des cordes ne sont pas les mêmes, que la boîte de résonance du violon ne réagit pas de la même manière.... Remarquons toutefois que pour les 2, la fréquence fondamentale est de plus faible amplitude que les harmoniques 2, 3, 4;

b-) cas des orgues:

dans le cas des orgues ou autres instruments électroniques de musique, les spectres adoptés pour les multiples notes de l'instrument imité ne pourront pas être aussi divers. Le plus souvent se sera le même spectre qui sera adopté pour toutes les notes, en s'efforçant de le déduire des spectres du vrai instrument en conservant ce qui leur est commun

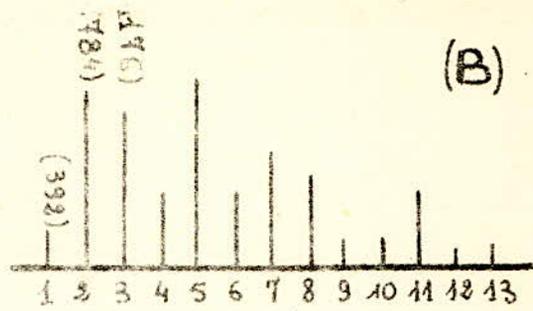
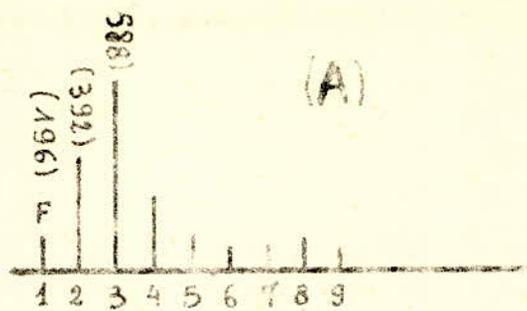
c-) le tableau des fréquences est donné à la figure III-2.

II-5) procédés de génération non électroniques:

a-) procédés électro-mécaniques:

— dans le premier procédé une roue dentée entraîne un moteur. Ce moteur provoque un courant induit dans une bobine. La vitesse du moteur est commandée par un rhéostat qui joue le rôle d'un clavier. La variation de la vitesse provoque un changement de la fréquence de la tension dans la bobine.

— le deuxième procédé dérive du premier. Il permet de faire une synthèse harmonique en dosant chacune des composantes du son.



— fig III-1. Spectre musical de la note "Sol" —

no. diaton. notes	-1	$\times 2$	0	$\times 2$	1	$\times 2$	2	$\times 2$	3	$\times 2$	4	$\times 2$	5	$\times 2$	6
DO	16,35	32,70	65,40	130,80	261,60	523,25	1046,50	2093,00							
DO #	17,32	34,64	69,29	138,59	277,18	554,36	1108,73	2217,46							
RE	18,35	36,70	73,41	146,83	293,66	587,32	1174,65	2349,31							
RE #	19,44	38,89	77,78	155,56	311,12	622,25	1244,50	2489,01							
Mi	20,60	41,20	82,40	164,81	329,62	659,25	1318,51	2637,02							
FA	21,82	43,65	87,30	174,61	349,22	698,45	1396,91	2793,82							
FA #	23,12	46,24	92,49	184,99	369,99	739,98	1479,97	2959,95							
Sol	24,49	48,99	97,99	195,99	391,99	783,99	1567,98	3135,95							
Sol #	25,95	51,91	103,82	207,65	415,30	830,60	1661,21	3322,43							
La	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00							
La #	29,13	58,27	116,54	233,08	466,16	932,32	1864,65	3729,30							
Si	30,86	61,73	123,47	246,94	493,88	987,76	1975,53	3951,06							

— fig III-2 : Tableau des fréquences — la référence est le La_3 (octave n°3). Vers les aigus : 4, 5, 6 ; Vers les graves : 2, 1, 0, -1 —

La roue dentée est remplacée par 6 roues entraînées par un seul moteur (donc à la même vitesse) qui ont un nombre de dents multiples ($D_1=2D_2=4D_4=5D_5=...$). La recherche du timbre se fait par le réglage de l'amplitude respective de chaque harmonique (cas des premières orgues de HAMMOND)

b-) procédé électromagnétique:

dans ce cas le son est émis par une lame en acier, fixée sur une caisse résonante et se déplaçant en face d'un aimant permanent, entouré d'une bobine, dans laquelle naît une force électromotrice qui sera amplifiée.

c-) procédé électrostatique:

ce procédé est celui des orgues de DEREUX (1960). On grave sur des disques circulaires les diagrammes de tous les tuyaux d'une orgue, puis on les "lit" à l'aide de lames fines.

II-6) procédés électroniques:

a-) procédé de l'oscillateur BF:

c'est le type d'appareils semblable à celui de LEE DE FOREST. Il se compose d'un oscillateur à relaxation (avec un tube au néon). La fréquence est modifiée par la variation de la résistance (pour les notes) ou de la capacité (pour les octaves).

b-) procédé de l'oscillateur à battements:

son principe est que 2 tensions de même signe s'additionnent et 2 tensions de signe opposé se retranchent. Lorsque 2 oscillations sont mélangées, ce principe s'applique. Donc si on a 2 oscillateurs HF (un de fréquence fixe, l'autre de fréquence variable) et que les 2 fréquences sont voisines, le battement (mélange) des 2 produira une fréquence audible

c-) procédé opto-électronique:

l'oscillation est engendrée par un faisceau lumineux périodiquement interrompu; ce faisceau est alors capté par une cellule photo-électrique au sélénium, donnant lieu ainsi à des distensions périodiques (principe du selenophone). On dessine plusieurs harmoniques sur un disque de verre pour rendre le son plus intéressant.

Le même principe a été appliqué dans un autre appareil: le cellulophone. Le diagramme et la forme des trous ont été établis de manière scientifique, en se basant sur les spectrogrammes de sons acoustiques. Grâce à l'inertie d'allumage des lampes à incandescence, on peut imiter les attaques des instruments.

II-7)reconstitution du son:(méthodes utilisées):

la reconstitution d'un signal électrique correspondant à un son d'instruments de musique(donc un son assez complexe),peut être effectuée de 2 manières différentes:

--par la modification du signal.Cette modification se fait généralement à partir d'un signal en dents de scie,avec des filtres passifs ou actifs nommés formants.

--par la synthèse du son à timbres déterminés,en utilisant les signaux alternatifs(fondamentale et harmoniques)selon le spectre de fréquence du signal considéré.

la première méthode est la plus fidèle théoriquement,pour le cas où il y a un formant pour chaque note.

mais le coût élevé de cette installation oblige les réalisateurs à ne mettre qu'un formant pour toute une gamme de notes(s'étendant sur un,deux voir trois octaves).De ce fait,la reproduction est plus ou moins altérée.

la deuxième méthode serait parfaite si on tenait compte des positions de phase de chaque composante du signal(chacun des signaux élémentaires).Malheureusement,les spectres ne l'indiquent pas.Neanmoins,la distorsion à la sortie n'est pas forte.

II-8)introduction au synthétiseur:définition de la synthèse:

avant d'aborder le synthétiseur proprement dit,un aperçu sur ce qu'est une synthèse des sons musicaux est nécessaire.

d'abord,La synthèse c'est l'analyse d'un signal pour en donner les pourcentages d'amplitude des harmoniques par rapport au signal fondamental,autrement dit pour donner les renseignements nécessaires à l'établissement du spectre.Ces renseignements sont souvent des tensions relatives applicables à un mélangeur.

Cette partie est surtout appelée"synthèse des timbres".Pour avoir une synthèse globale,il est indispensable d'avoir:

- un générateur BF donnant les notes audibles.
- des dispositifs de modulation.
- un ensemble de circuits déformants.
- un ampli BF et une alimentation.

C-) LE SYNTHÉTISEUR DE MUSIQUE :

I-) GENERALITES :

L'appareil le plus caractéristique destiné à la création de la musique électronique est le synthétiseur.

I-1) forme de synthèse :

la quasi-totalité des synthétiseurs utilise 2 modes de synthèse : la synthèse additive et la synthèse soustractive.

D'abord réalisée à des fins expérimentales et scientifiques, la synthèse des sons est maintenant exploitée pour tenter d'imiter les sons naturels et (c'est certainement là le plus important) pour créer des sons nouveaux.

a-) la synthèse additive :

c'est le procédé qui consiste à construire un son en additionnant entre elles les différentes composantes sinusoïdales. De par son principe, c'est la seule méthode que l'on puisse nommer "synthèse".

b-) la synthèse soustractive :

ce n'est pas une reconstitution du son à partir de ses éléments mais une transformation d'un signal électrique qui permet la production d'un son différent du premier. Mais malgré tout on l'appelle synthèse car elle permet de réaliser des sons relativement proches de ceux que l'on peut produire avec des instruments traditionnels.

Pour réaliser une synthèse soustractive, on effectue le traitement d'un signal riche en harmoniques, en enlevant une partie.

c-) utilisation :

A cause de la complexité de sa mise en œuvre, la synthèse additive est peu utilisée.

par contre la synthèse soustractive est très répandue et abondamment exploitée.

I-2) schéma de principe d'un synthétiseur :

Le synthétiseur est généralement un appareil important en volume et en prix. Pour cela il existe pas de schéma typique de synthétiseur. EN Réalité, ils se construisent en petites quantités et même parfois par unité sur commandes spéciales (souvent ce sont les utilisateurs qui les dessinent et les construisent suivant l'usage auquel ils les destinent).

a-)schéma suivant l'orgue polyphonique de MOOG:
Ce schéma de principe (figure III-3)-4 est proposé par l'un des chercheurs les plus connus dans le domaine de la recherche musicale: R. MOOG.

Il comprend 10 parties (ce nombre n'est nullement imposé):

- les oscillateurs(a): il y en a de toute sorte donnant des signaux de formes diverses (figure III-4)
- le générateur de bruit blanc(b): le bruit blanc est celui engendré par une résistance pure. Le bruit thermique de la résistance a une tension: $V_{\text{eff}}^2 = 4kTR_{\text{M}}B$, avec $K=1,374 \cdot 10^{-3} \text{ J/K}^\circ$, T =température, R_{M} =résistance, B =bande des fréquences dans laquelle le bruit est mesuré.
- les filtres(c): il y en a de toutes sortes: passe-bas, passe-haut, détecteur, intégrateur, redresseur, créateur, ...
- réverbérateurs(d): ce sont en principe des retardateurs de signaux (la réverbération est une sorte d'écho qui renvoie toute l'onde incidente avec un certain retard).
- modulateurs(e): ce sont des dispositifs d'introduction d'un signal dans un autre par modulation de fréquence d'amplitude ou de phase.
- organes de commande(f): ils effectuent la mise en service ou l'arrêt des appareils.
- mélangeur: il additionne plusieurs signaux différents et associe le résultat au modulateur pour créer des signaux nouveaux.(g).
- magnétophones: il en faut au moins deux pour enregistrer les produits des opérations effectuées avec les signaux(h).
- amplificateur(i) et HP(j): pour contrôler la marche de l'opération "composition musicale électronique" pendant la période de gestation et aussi après son enregistrement sur magnétophone.

En résumé on prend les signaux, on les multiplie, on les combine entre eux et on les enregistre.

b-) schéma plus simple:

en définitive, il n'est pas besoin de monter toutes les parties décrites précédemment. Néanmoins un minimum est nécessaire:

pour faire de la musique, nous avons besoin d'un oscillateur qui fournit des oscillations dont la fréquence se situe dans la plage des sons audibles. Si l'appareil ne peut jouer qu'une note à la fois, il suffit que l'oscillateur puisse couvrir les octaves désirées.

Comme on peut vouloir changer la sonorité, on aura besoin d'un circuit de timbres. Ensuite il suffira d'amplifier le signal obtenu.

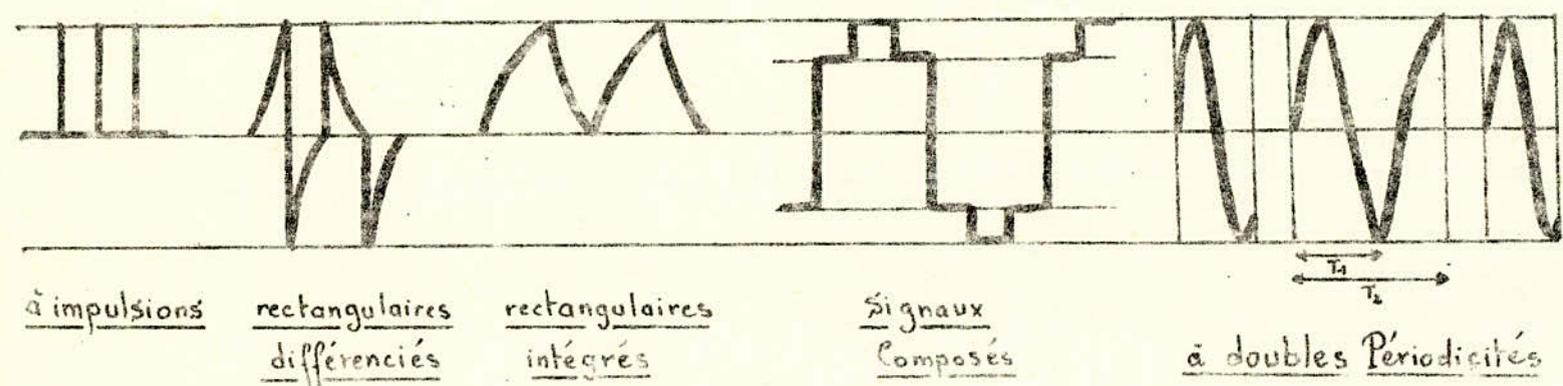
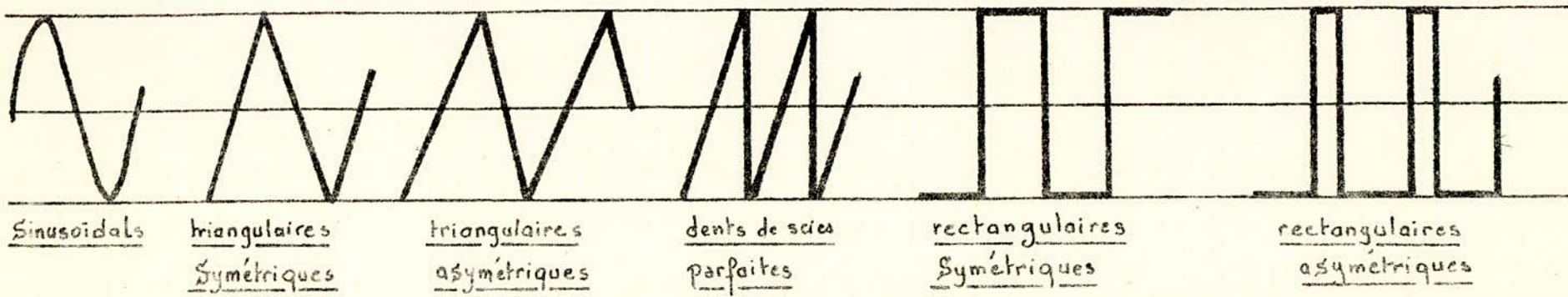
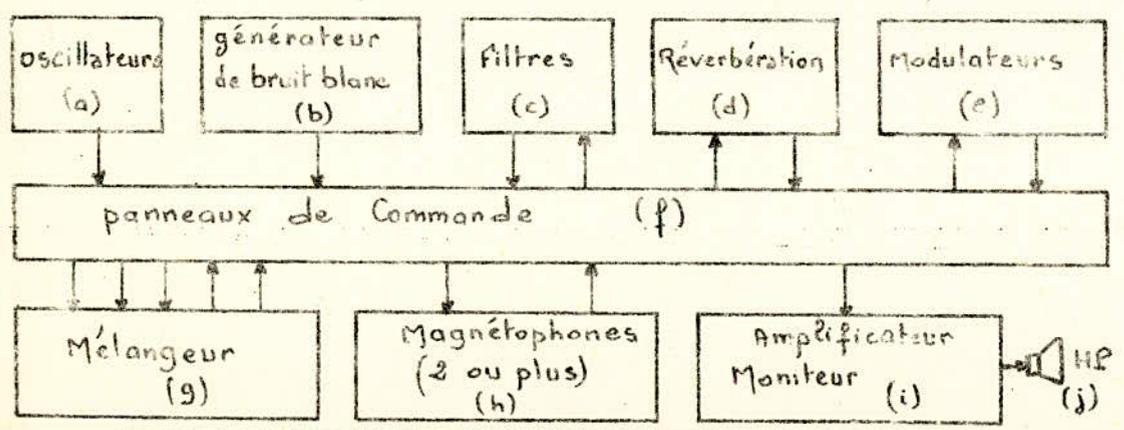


fig III-4:
Oscillateurs-
formes de Signaux
Possibles -



-fig. III-3: Schéma de principe d'après MOOG-

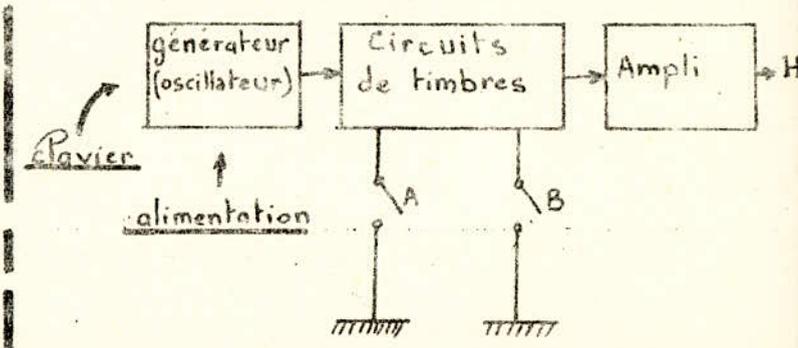


fig III-5: Schéma de principe plus simple.

Pour la partie mécanique, un pousse bouton ou un clavier suffiront, ainsi qu'une alimentation (piles ou secteur). Ceci nous donne la fig. III-5

II-) Analyse des différents blocs du synthétiseur:

II-I) les générateurs:

a-) le générateur proprement dit comporte:

- l'oscillateur
- les diviseurs de fréquence
- les mélanges d'harmoniques

--b-) l'oscillateur:

===: le VCO: (oscillateur commandé par une tension): avec des commandes de tensions, il est assez facile de faire apparaître ou disparaître le genre de signal que l'on veut, de modifier sa forme, sa fréquence...

Un exemple particulier est l'oscillateur de relaxation. Il est modifiable en fréquence grâce à une commande qui permet la génération de signaux en dents de scie (très riches en harmoniques); c'est le + utilisé.

===: les autres types d'oscillateurs sont l'oscillateur à déphasage RC dans lequel un transistor déphase de 90° (pour réinverser le signal à la sortie du collecteur, on applique 3 cellules RC qui déphasent de 30° chacune). Le signal est réinjecté à l'entrée du transistor par une boucle et cet oscillateur délivre des sinusoides.

Un deuxième oscillateur possible est le multivibrateur qui donne des signaux rectangulaires (mais pas très précis).

On peut utiliser aussi un oscillateur à self qui est un circuit LC (donnant l'accord) inséré dans le circuit collecteur d'un transistor. C'est un oscillateur très stable mais difficilement réalisable (bobine L)

--c-) les diviseurs de fréquence:

l'oscillateur délivre une sinusoïde (ou toute autre forme de signaux) avec une fréquence fixe F. Pour avoir les octaves différentes, il faut que l'on ait $F, F/2, F/4, \dots$

les plus simples et les plus utilisés sont des genres de multivibrateurs. Un basculement T_1 au repos à T_2 bloqué ou T_1 conduit à T_2 conduit se fait sur les fronts négatifs d'un signal rectangulaire (signal que délivre un oscillateur multivibrateur) donc une division du signal initial

Si on a une sinusoïde on peut l'écarter (éliminer le positif par exemple)

--d-) les mélanges d'harmoniques:

ils se font par le biais de combinaisons de résistances qui relient diverses notes entre elles pour avoir certaines associations d'harmoniques. Cela présente néanmoins des problèmes d'adaptation d'impédances.

d-) quelques générateurs particuliers:

----le générateur de bruit blanc: le bruit blanc est un signal aléatoire aussi bien en fréquence qu'en amplitude; c'est donc celui qui délivre toutes les harmoniques. En pratique, il suffira pour l'obtenir, de laisser le collecteur d'un transistor en "l'air" c-à-d sans jonction.

----le générateur de tension de commande: (voltage controlled generator) c'est en quelque sorte un pré-générateur puisqu'il commande un VCO. en effet pour commander les oscillateurs tels les VCO, il arrive qu'on ait besoin de disposer de tensions de commande (E_c). Il existe bien sûr une infinité de VCG suivant l'usage approprié.

Mais parmi les plus importants, citons les générateurs VCG de transitoires (qui donnent un signal de type rectangle) qui ont un faible % d'harmoniques au début (utiles pour les sons de trombone par exple)

==pour des sons demandant un début de signal riche en harmoniques, on fait l'inverse (tension tombante).

==pour un vibrato par exple, qui est une modulation de fréquence, on fait varier la tension d'un VCO à 6 Hz.

==pour une modulation d'amplitude (genre tremolo), on applique la tension à un amplificateur (VCA).

---le générateur d'enveloppe: il produit des formes d'ondes transitoires dont les temps de montée et de descente sont réglables (sons particuliers)

II-2) la boîte à timbre:

on dispose le plus souvent de signaux couvrant une plage de fréquence de 30 Hz à 8 KHz. Ces signaux sont la plupart du temps riches en harmoniques

La boîte à timbres renferme le plus souvent des circuits qui sont des filtres passifs. Ces filtres peuvent enlever l'indésirable (harmoniques paires, impaires de rang élevées):

---pour la flute, on a un son doux, pauvre en harmoniques (presque une sinusoïde). Pour cela, on enlève les harmoniques de rang élevées.

---pour le diapason, c'est le même principe que la flute, sauf qu'il comporte aussi l'harmonique 2. Pour cela, on reprendra un filtre de flute mais en étant moins sévère sur les valeurs des condensateurs (valeurs moins fortes pour conserver mieux les HF).

---pour la clarinette, la trompette, il y a un "favoritisme" de certaines bandes de fréquences (privilégier une bande, respecter certains formants) pour cela en dehors de passe-haut ou passe-bas, on utilisera un circuit bouchon.

---pour les cordes, on a beaucoup d'harmoniques de rang élevé, et peu de rang faible. On utilisera donc un passe-haut.

II-3) le pré-amplificateur:

nous avons besoin d'un pré-amplificateur pour 2 raisons:

- le signal issu de la boîte à timbres a été atténué par les filtres.
- la nécessité d'une pédale d'expression qui consiste un 2ème atténuateur (la pédale peut être un potentiomètre ou une cellule photo-électrique. Elle permet de grandes variations d'intensité).

II-4) l'amplificateur:

le type d'amplificateur le plus utilisé est le VCA (voltage controlled amplifier). Ils existent dans les HF et les BF, lorsque le gain varie avec la polarisation d'une électrode. Dans un transistor, une variation de V_{BE} , donne un % fixe de variation de I_C . Et cette variation de I_C crée sur des résistances de collecteurs des variations de tensions.

II-5) la réverbération:

C'est un effet naturel rencontré dans toute salle. On la reproduit sur les orgues, artificiellement, pour compenser le manque de réverbération dans la salle.

Pratiquement, on peut la reproduire par 2 ressorts raccordés à des selfs "excitatrices" et "captrice" (capteurs électromagnétiques).

II-6) l'alimentation:

son énergie est le plus souvent peu élevée (9 à 20^V généralement)

II-7) le clavier:

il peut être mécanique ou électronique;

- mécanique: cela peut être un clavier type piano, ou alors des boutons poussoirs ou tout autre moyen de passage d'une note à une autre.
- électronique: cela peut être des claviers à effleurement (il suffit de effleurer la touche) qui sont apparues ces 2 à 3 dernières années.
- il peut y avoir aussi un système de relais (pour une commande automatique programmable) ou des commutateurs de positions.

II-8) les filtres:

a-) les VCF (voltage controlled filters):

ce sont des filtres contrôlés par des tensions, qui peuvent ainsi créer avec une variation de tension, une variation de fréquence de coupure ou une variation de bande.

b-) les formants:

ce sont des filtres actifs ou passifs, que l'on met entre le clavier

et les amplis. Ils permettent une modification des dents de scie (timbre).

II-9) les modulateurs en anneaux:

Ce sont des circuits de distorsion, qui permettent, à partir d'un signal A (de fréquence F_A , et d'harmoniques $2F_A, \dots$) et d'un signal B de modulation (fréquence F_B), d'avoir un signal de contenu harmonique particulier ($F_A + F_B, nF_A + mF_B, \dots$). Ils permettent la réalisation de sons de percussion.

II-10) les circuits d'échantillonnage et de maintien:

Au moment voulu, ils enregistrent une tension, puis ils la conservent jusqu'à l'enregistrement d'une autre tension.

Ils possèdent une entrée de commande d'enregistrement et une entrée du signal à échantillonner.

D-) SCHEMA PROPOSE:

Après cette introduction sur la musique électronique, ainsi que sur les générateurs de musique, et plus particulièrement les synthétiseurs, nous abordons l'étude proprement dite de notre réalisation.

Cette réalisation est en fait une mini-orgue, inspirée de l'ondioline de G. JENNY, et proposée par J. ARIANNE, qui a des ressources habituellement rencontrées seulement dans les synthétiseurs professionnels, tels l'effet de mémoire, la commande d'enveloppe, la répartition homogène des notes...

En effet les mini-orgues généralement rencontrés dans la littérature ont deux défauts majeurs/:

---les octaves n'ont pas la même répartition partout (du fait que nos organes de perception ont un "comportement" logarithmique en fonction de la fréquence des ondes sonores...).

---le son n'est pas modulé (temps d'attaque, d'extinction, ;...).

Nous allons, pour plus de clarté, examiner d'abord le schéma de principe, puis étage par étage.

I-) Schéma de principe:

Il se divise en deux schémas principaux tel que nous le montre la figure III-6: le circuit qui "forme" l'onde, et le circuit d'enveloppe.

Le premier circuit part du clavier, mémorise la note, l'amplifie, puis convertit la tension d'entrée en un courant variant exponentiellement

avec cette tension. Cette conversion est due au besoin d'obtention d'une répartition homogène des notes, par rapport à nos organes de perception.

Le courant de sortie, est alors appliqué à un relaxateur de base puis à un flip-flop (bistable).

Le circuit d'enveloppe part également du clavier, et son rôle est de moduler l'onde, en jouant sur les constantes de temps d'attaque, et d'extinction, ainsi que sur les niveaux de maintien.

La liaison entre les deux circuits se fait à l'aide d'un "amplificateur à gain variable", qui sert à adapter et qui permet de sortir sur un ampli basse-fréquence, puis sur un haut-parleur.

Il ne faut évidemment pas oublier d'alimenter les deux circuits.

Une fois terminé cet exposé sur notre schéma de principe, nous allons aborder l'étude bloc par bloc.

II-) Choix du clavier:

Le premier problème auquel nous avons à faire face est le choix du clavier qui doit nous donner la même étendue pour toutes les notes.

Et l'étude de quelques claviers nous montre que cette homogénéité n'est pas simple à obtenir; en effet, nous pouvons voir que:

--- pour le cas d'une corde vibrante, il y a un entassement vers les aiguës (figure III-8-a): les 12 premiers demi-tons occupent la moitié de la corde, alors que les 12 demi-tons suivants n'occupent que le quart de la longueur de la corde. La sélection des aiguës devient peu précise.

--- pour le cas d'un fil résistant rectiligne, constituant la résistance variable d'un relaxateur, il y a également un entassement vers les notes aiguës. La fréquence est en effet inversement proportionnelle à la résistance du fil donc à sa longueur.

La figure II-8-b donne un schéma possible avec un relaxateur.

Si la tension d'alimentation E est suffisamment faible, tout en étant positive, le signal en dent de scie sur la base du NPN aura donc une amplitude faible. Si la tension relative au fil est elle au contraire forte (environ dix fois plus), et négative, le courant du fil sera pratiquement constant et inversement proportionnel à la résistance.

Ce courant va décharger le condensateur C et l'on aura la fréquence $F = kI$ (Fréquence proportionnelle au courant, et avec une décharge rapide si le courant est suffisamment fort. Dans ce cas, si V_{base} du PNP descend

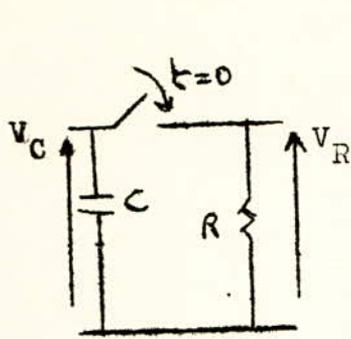


Figure III-9:
Cellule RC.

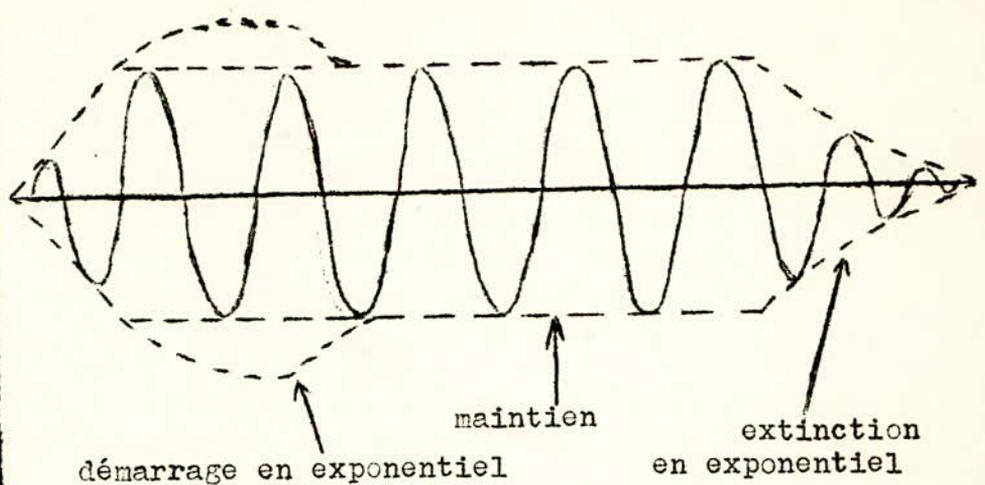


Figure III-10: Enveloppe d'un signal.

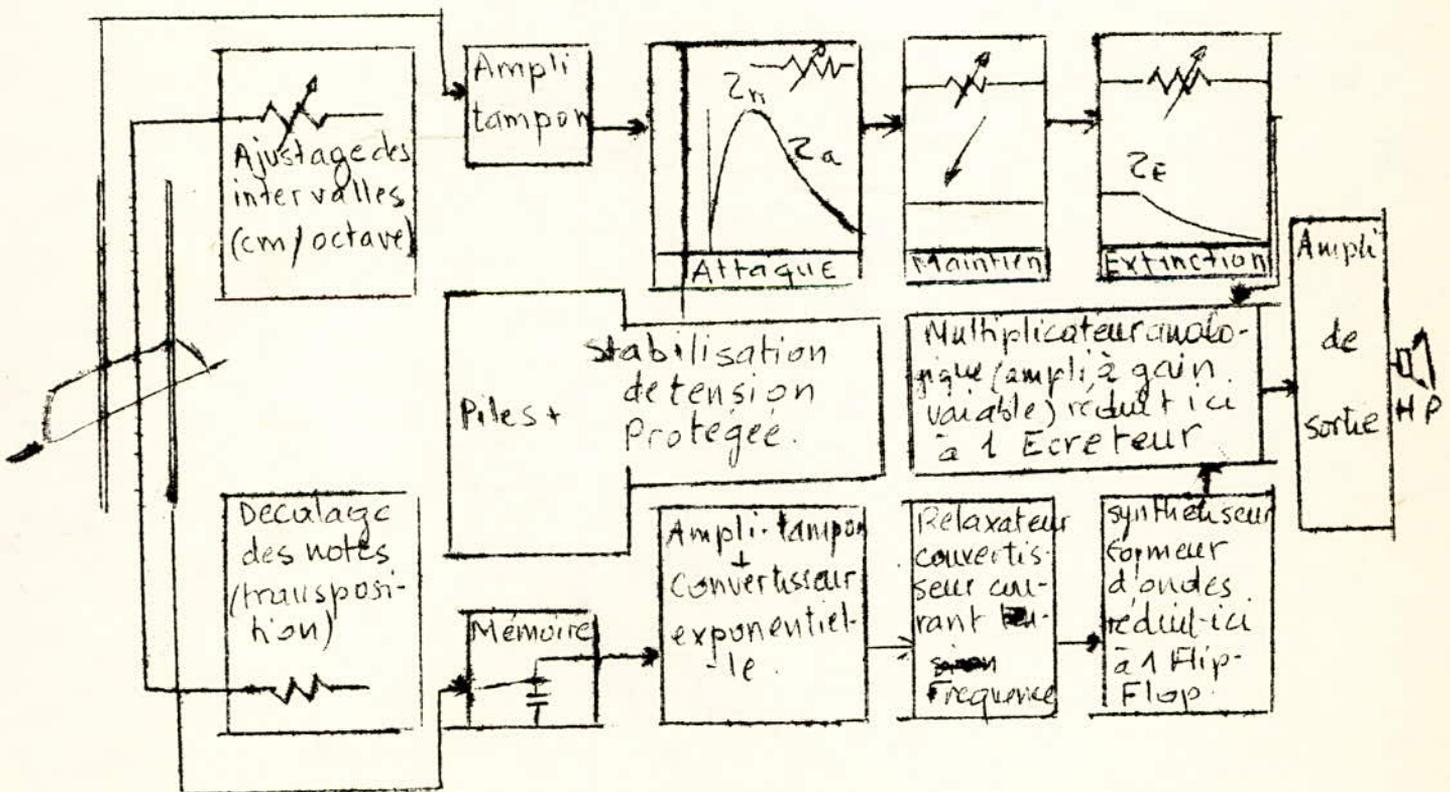


Fig. III-6. schéma synoptique général d'un mini-orgue.

à 0,5-0,6V en dessous de E, les 2 transistors conduisent. Il y a alors une recharge rapide de C. Quand la charge est terminée, le NPN ne fournit plus de courant de base au PNP à travers C. Il n'existe plus que le courant du fil (ce courant ne doit pas être fort car sinon les 2 Transistors restent conducteurs). Les transistors se bloquent alors, et on a un saut positif sur le collecteur du NPN qui est transmis intégralement (par C) à la base du PNP qui prend donc une valeur très positive par rapport à l'émetteur et on a une nouvelle décharge.

a-) REMARQUES/ si le stylet est à la masse ($V_{\text{fil}}=0$) on a une dent de scie non linéaire mais toujours: $F=k/R$ et un entassement vers les aiguës.

----pour compenser le défaut d'entassement, on prend une fonction non linéaire au niveau du fil (figure III-8-c): plan de découpe exponentielle

b-) autres types:

___ le clavier peut être des plots conducteurs avec une chaîne de résistances ajustables. Mais il n'y a pas de glissando (on ne peut pas jouer "entre" les notes). Quand on touche un plot, on branche au circuit oscillant la résistance appropriée.

----jusqu'ici, on a vu des montages où le clavier faisait partie du circuit oscillant, et donc était soumis à des oscillations. Dans ce cas, le clavier ne peut commander 2 oscillateurs à la fois (monodique).

On peut même dire que l'on ne commande pas, mais qu'on modifie le circuit oscillateur. Et sans commande, on ne peut parler de mémoire; donc, un inconvénient: l'impossibilité de laisser le son s'évanouir progressivement (par un circuit de commande d'enveloppe). Et comme de plus, le contact stylet-clavier n'est jamais parfait, il peut y avoir des variations brusques de fréquence; donc des "craquements"!

Pour pallier à ce grave défaut, il faut stocker en mémoire, la dernière information relative à la dernière note.

Le stockage peut être un condensateur (si l'information est une tension continue de commande d'oscillateur) avec une amplification à l'aide d'un ampli à forte impédance d'entrée (exple: un FET).

c-) conclusion:

Pour avoir une répartition homogène des notes, ainsi qu'une tension de commande continue (pour la mémoire), 2 solutions sont possibles:

----un fil sous tension continue, et avec une découpe exponentielle; c'est le cas de la figure III-8-d.

----un fil sous tension continue, qui commande un convertisseur continue-en exponentielle (figure III-8-e) c'est le cas de notre réalisation.

III-) aspects théoriques:

Nous avons vu que la meilleure manière d'avoir une répartition homogène des notes est d'introduire des variations exponentielles, soit au niveau du fil, soit au niveau de la conversion (étage convertisseur en exponentiel).

Un fil à découpe exponentielle est assez difficile à faire, aussi le seul clavier qui nous parait satisfaisant, est celui de la fig. III-8-e.

Il exploite le fait qu'un courant collecteur $I_{\text{collecteur}} = f(V_{\text{BE}})$, suit une loi exponentielle avec une très bonne approximation.

(pratiquement chaque augmentation de V_{BE} de 18 mv, augmente la hauteur de la note de une octave).

nous voyons donc que le nombre "e" joue un grand rôle. Essayons de l'étudier un peu plus en détail: avec quelques exemples:

III-1-) la jonction PN:

le courant à travers une jonction PN, ou une diode, peut s'exprimer par:

$$I_D = I_S (e^{qU_D/KT} - 1) \quad \text{avec:}$$

I_D : le courant de diode;

I_S : le courant de saturation inverse (constant pour une diode donnée)

q : charge d'un porteur (un électron par exemple);

U_D : la tension de diode;

K : la constante de BOLZMANN;

T : température en kelvin (absolue);

à la température ambiante, on a l'approximation: $I_D = e^{39U_D} \cdot I_S$

III-2) les cellules RC-RLC:

les formules de telles cellules nous intéressent, car en pratique, nous allons rencontrer des réseaux de ce genre (exple: commande d'enveloppe)

a-) circuit RC:

--- la figure (III-9), nous montre que si C est à une tension U_0 , et que l'on ferme l'interrupteur, il y aura un phénomène de décharge.

$$U(t) = U_0 e^{-t/RC} \quad \text{et } RC \text{ est appelée la constante de temps } T.$$

(c'est le temps où U_0 devient $U_0/2$ (e fois moins), le courant de décharge sera $I_R(t) = U_0/R e^{-t/T}$, et U diminue et tend vers zéro.

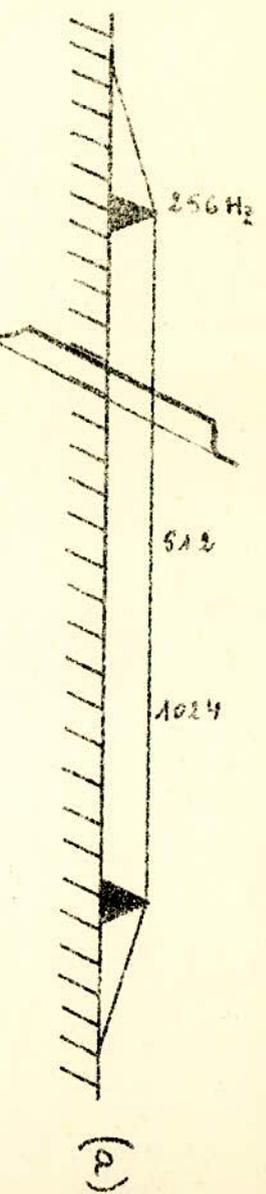
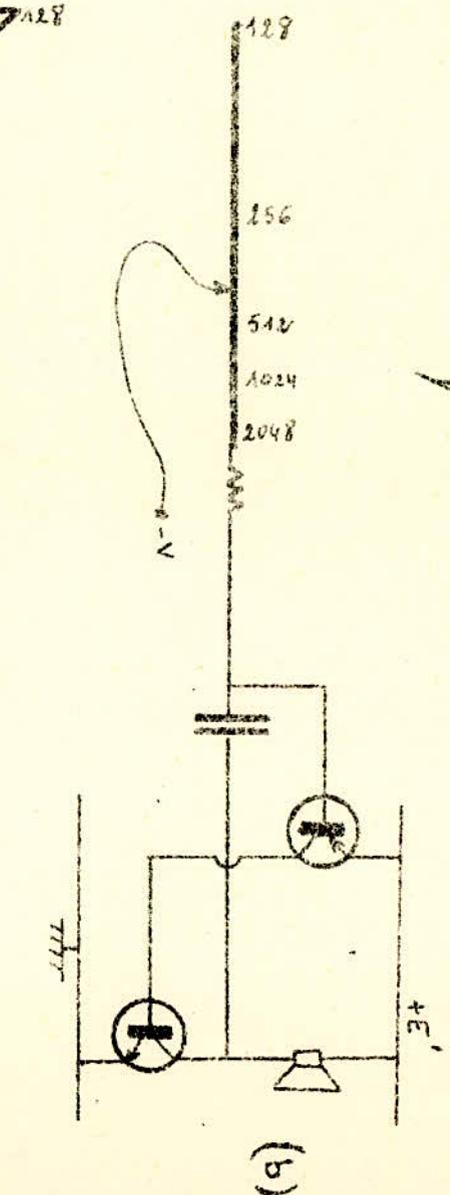
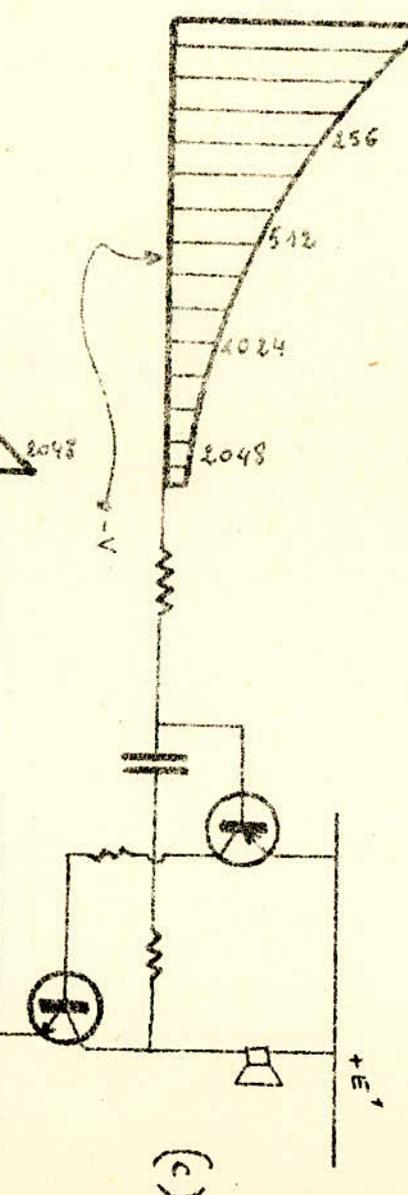
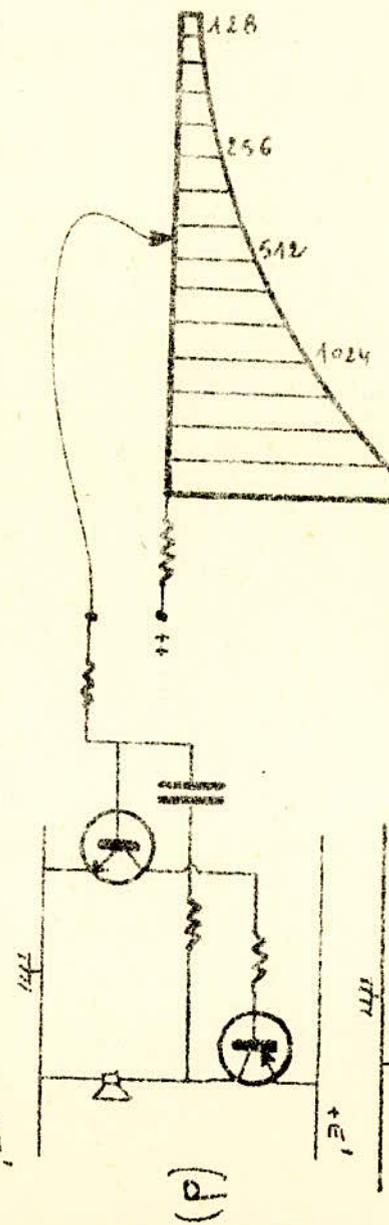
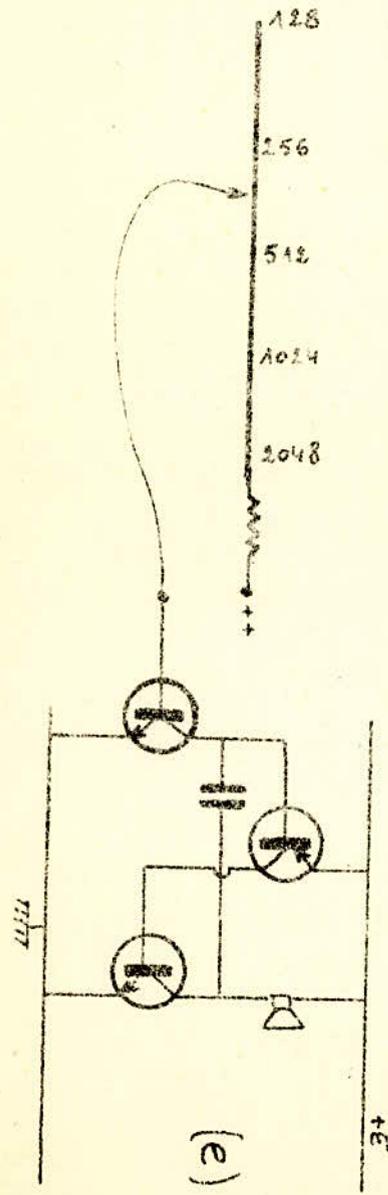
--- si à $t=0$, on a $U_C = 0$, et on branche une tension U_0 à l'entrée,

on a $U_C = U_0 (1 - e^{-t/T})$ U va donc augmenter jusqu'à U_0 : charge de C .

b-) cellule RLC:

soit un circuit bouchon, et si au départ le circuit oscille, on a un évanouissement de l'oscillation avec: $i = i_0 e^{-R_p t/2L} (\sin \omega t)$ et R_p est positif. Si on maintient les oscillations on aura: $i = i_0 \sin \omega t$.

UNIT 10 Study 1-100' 1-0



si au début, il n'y a pas d'oscillations, on a une croissance avec :
 $i = i_0 e^{-R_N t / 2L} (\sin \omega t)$ et R_N est négatif.

on a un coefficient de surtension $Q = L/R$.

(le nombre d'oscillations périodiques entre une amplitude donnée et une amplitude e fois plus forte ou plus faible est proportionnel à Q).

La figure III-10 nous donne l'allure d'une oscillation produite par un générateur de notes utilisant un circuit RLC et commandé par une tension de polarisation d'une base.

Pour l'enveloppe, la sensation auditive ~~peut~~ par une oreille (qui introduit une fonction logarithmique) est celle d'un son qui augmente linéairement, reste constant, puis diminue linéairement.

Afin de donner plus d'ampleur à un son, on superpose à l'enveloppe une oscillation lente (6 Hz environ); l'effet obtenu est dit trémolo.

--pour l'extinction, on emploie une courbe de décharge de C .

--pour l'enveloppe, un dosage de charge et décharge de C est employé (avec des durées de temps différentes).

l'expression $e^{-t/T}$ joue un grand rôle. Notre instrument exploite à fond également l'expression e^U pour avoir des courants de commande de fréquences les mieux adaptés à l'emploi d'un fil résistant linéaire comme clavier.

on remarquera aussi que sur une échelle linéaire $I_D = f(U_D)$, est difficile à lire si I_D varie de 1 à 1000 (10 octaves). L'emploi d'une échelle semi-log, donne une droite plus maniable dans les représentations.

Les transistors bipolaires petits signaux type planar, donnent pratiquement les mêmes courbes pour $I_C = f(U_{BE})$:

en effet U_{BE} , engendre le courant d'émetteur comme s'il s'agissait de diodes; donc $I_E = f(U_{BE})$ est de la même configuration que $I_D = f(U_D)$.

De plus comme $I_E = I_C$ collecteur (en première approximation), on peut écrire: $I_C = I_E = f(U_{BE})$.

ainsi en prenant un transistor pour la conversion U (linéaire) en I (exponentiel), on a l'avantage de séparer l'entrée de commande (une tension appliquée à la base par rapport à l'émetteur) de la sortie fournissant le courant pour le circuit oscillateur-relaxateur (courant passant par le collecteur).

IV-)Etude de l'alimentation:

Dans notre précédente étude sur le clavier, nous avons vu que l'amplitude d'oscillation du relaxateur est approximativement celle de la tension d'alimentation. Si cette tension varie par exemple de 6%, l'amplitude de l'oscillation variera d'autant; ce qui entraîne une variation de la durée de décharge (en supposant que le courant de décharge du condensateur qui détermine la fréquence, reste constant) de 6% également, c'est-à-dire d'un demi ton environ. Or, nous avons déjà remarqué qu'une variation de 18 mV double ou divise par deux le courant d'entrée du relaxateur; donc, si la variation est de 30 mV (0,5% de 6 Volts) seulement, nous aurons un glissement de fréquence d'un facteur de $e^{30/18} = 3,2$ (plus ou moins 3,2 c'est-à-dire plus d'une octave et demi).

Il est donc nécessaire d'avoir une alimentation stabilisée.

IV-I) étude de quelques schémas:

La figure III-II-a nous montre par exemple un régulateur de tension du type shunt (c'est-à-dire parallèle), car l'élément de régulation - la diode Zener - est en parallèle avec l'utilisation. Ce type a l'avantage de résister à d'éventuels courts-circuits en sortie (R_s limitera le courant batterie quand le courant Zener tendra vers zéro).

La figure III-II-b est une amélioration. Ici c'est le courant à travers le transistor qui absorbe les variations du courant de charge, pour avoir I_{R_s} constant. On bénéficie en outre du gain apporté par le transistor, ce qui donne une impédance dynamique plus petite, donc une meilleure régulation. Aux bornes de sortie, on prévoit de préférence un condensateur d'assez forte valeur pour diminuer l'impédance dynamique interne du régulateur, quand il existe des ondulations rapides du courant de charge. Ainsi, un condensateur chimique d'environ 100 μF , supprime les ondulations lentes, tandis qu'un condensateur non chimique supprime les éventuelles

ondulations et transitions ultra-rapides.

Avec ces quelques précautions de stabilisation, on a donc amélioré le système mais on peut faire encore mieux:

alimenter le fil résistant sur lequel on prélèvera la tension de commande, par une source de courant constant, elle même alimentée par une tension régulée. Si on choisit par exemple un fil résistant de 42ohms/m, on aura donc 7 octaves, donc une chute de $7 \times 18 = 126$ mV par mètre; et le courant à travers le fil devient de $126/42 = 3$ MA.

En examinant les courbes d'un FET du type BFW I2 (ou BF I44A), nous voyons que le courant drain-source est de 3 mA pour $U_{GS} = 0$ Volts, valable pour une grande plage de tension U_{DS} (1 à 15 Volts).

Nous aurons ainsi une indépendance du courant de charge par rapport à la tension de la batterie.

IV-II) schéma retenu:

Contrairement aux schémas classiques, c'est dans notre cas le collecteur et non l'émetteur qui constitue la sortie.

Le transistor ballast T_I branché de cette façon peut fonctionner correctement même si la tension V_{CE} tend vers zéro.

Notons que si l'on met seulement des piles entre émetteur et masse, on aura 0 Volts en sortie car R_2 ne fournirait pas de courant de base à T_2 et donc pas de courant de base à T_I , de sorte que le régulateur possède un état stable à 0 V en sortie (pas de consommation).

Il nécessite donc un circuit de démarrage pour le mettre à son deuxième état stable (5 à 6 Volts en sortie régulée). A cette fin, R_3 a été incorporée, et le commutateur de marche/arrêt est du type "make-before-break", c'est-à-dire qu'en passant de l'arrêt à marche, les 3 contacts sont tous reliés ensemble simultanément pendant un bref instant; à ce moment la base de T_2 reçoit un courant venant de R_3 .

Ce régulateur est aussi protégé contre les court-circuits de sortie. Le courant de base de T_I est en effet limité par R_I ; donc si la charge devient trop importante, le collecteur ne peut fournir le courant correspondant à la tension stabilisée. La tension de sortie baisse de même que le courant de base pour T_2 , donc pour T_I . Passé un certain seuil de courant on aura en sortie 0 V et elle reste là même si on enlève la charge excessive. Il faut alors "relancer" le régulateur avec le bouton "Marche/Arrêt".

R_5 fixe le courant Zener $I_Z = V_{BE}(T_2)/R_5$ qui est ici de 0,6 mA.

R_4 protège contre des court-circuits entre (+) de la batterie et la tension stabilisée.

V-) le circuit de mémoire:

Dans la présentation de notre schéma synoptique, nous avons parlé d'un circuit de mémoire.

L'introduction d'un tel circuit provient de la nécessité de pallier à deux défauts essentiels/ :

---le premier provenant d'un éventuel mauvais contact entre le stylet et le fil résistant ; en effet, si ce contact n'est pas parfait, nous aurons de brusques variations de courant collecteur. Et si ce courant collecteur commande un relaxateur couplé à un haut-parleur, il y aura des craquements donc une dérive en fréquence.

---le deuxième défaut vient du fait que si la température varie, ce même courant collecteur variera dans le même sens.

Or nous devons transmettre sans aucune dérive la tension de commande disponible aux bornes d'un condensateur de mémoire de 0,1 à 1 μ F, non chimique (pour avoir un courant de fuite négligeable), à la base du transistor qui effectue la conversion exponentielle en courant.

Pour pallier à ces deux défauts, nous emploierons un FET à JONCTION canal N, branché en source suiveur.

L'emploi d'un tel transistor est dû à sa très haute impédance d'entrée, liée à un très faible courant gate (la jonction d'un JFET est polarisée en sens inverse, contrairement à la polarisation d'un transistor bipolaire).

L'emploi de ce JFET permet ainsi de compenser non seulement la dérive de fréquence, mais aussi l'effet de température en choisissant judicieusement son point de fonctionnement. N'oublions pas également que dans notre étude sur l'alimentation stabilisée, nous avons noté que l'emploi du BFW 12 qui est un JFET, améliorerait sensiblement la stabilité du courant de charge qui est ici le courant qui provient du fil.

La figure III-13-a nous montre le principe de base d'une combinaison d'un JFET + un NPN. Le condensateur faisant office de mémoire est connecté entre la gate et la masse. Le stylet est aussi à la masse.

En touchant avec le stylet, le fil résistant nous avons une tension aux bornes de ce stylet d'environ de l'ordre de 100 à 200 mV. Cette tension résterait aux bornes du condensateur s'il n'y avait pas de courant de fuite du condensateur et celui de la gate, tous deux extrêmement faibles (pratiquement de l'ordre du nanoampère).

La valeur de I_{PF} pour le condensateur de mémoire est plus ou moins un maximum pratique pour un condensateur non chimique.

Il ne faut pas oublier que les nanoampère de courant de fuite ne doit pas être dépassé sinon le résultat serait décevant. Il faut alors prendre certaines précautions pour le point de soudure du stylet, de la gate et du condensateur de mémoire.

Si donc cet aspect ne demande qu'un grand soin dans la réalisation, par contre l'aspect de la compensation en température demande un certain travail de mise au point pour avoir des performances optimales. Ce réglage se fera en pratique à l'aide d'un potentiomètre, qui donnera le courant de drain I_D optimal.

Cependant la pratique nous montre que le circuit de la figure III-13-a ne compense qu'incomplètement le coefficient de température; pour cela, nous avons amélioré ce circuit en faisant le montage de la figure III-13-b qui nous permet d'obtenir une bonne compensation.

Pour faire des essais d'optimisation, nous prendrons la valeur de $R_D = 1$ Kohms, ce qui nous donnera une valeur de I_D optimale de l'ordre de 1 mA.

Si pour $U_G = 0$ Volts, le courant collecteur de T_C est trop fort, pour correspondre à la fréquence la plus basse que l'on veut jouer, il convient de prendre pour R_S une valeur appropriée.

Il se peut cependant que malgré toutes les précautions apportées à la réalisation du circuit, le courant I_C ne diminue que très lentement lorsque nous retirons le stylet.

La figure III-13-c que nous avons adopté, montre comment on peut éliminer cette dérive avec un PNP. Le potentiomètre de 10 Kohms, est celui qui permettra de compenser la dérive en température et donc celle de I_C .

VI-) l'ampli tampon plus la conversion exponentielle:

Pour mieux comprendre la conversion tension-courant, nous allons examiner le comportement d'un transistor bipolaire: courant collecteur en fonction d'une commande par la base.

La figure III-12-a représente une commande par courant, c'est-à-dire que l'impédance de la source commandant la base par rapport à l'émetteur est non négligeable (ici c'est R_b).

Bien que R_b soit relié à la tension stabilisée positive U_{ps} , nous pouvons dire que le transistor "voit" R_b entre base et émetteur (qui est à la masse) car il n'y a pas de variations de tensions entre U_{ps} et la masse autrement dit, l'impédance dynamique entre U_{ps} et la masse est pratiquement nulle ($\Delta U_{ps} / \Delta I$).

Entre le galvanomètre et le collecteur, on insère une résistance R_c qui ne sert pas uniquement à limiter I_c mais encore à diminuer la tension collecteur-émetteur du transistor, et donc la puissance dissipée (ainsi que l'échauffement).

Ce montage peut permettre de tracer la courbe $I_c = f_1(R_b)$. Comme de plus V_{BE} variera très peu, et donc nous aurons $I_b = (U_{ps} - V_{BE}) / R_b$, donc I_b en fonction de R_b ; d'où une deuxième courbe $I_c = f_2(I_b)$. Et l'on peut voir que le courant de collecteur variera pratiquement d'une manière linéaire en fonction de I_b .

Cette loi de variation n'est pas celle que l'on recherche, car c'est une variation linéaire.

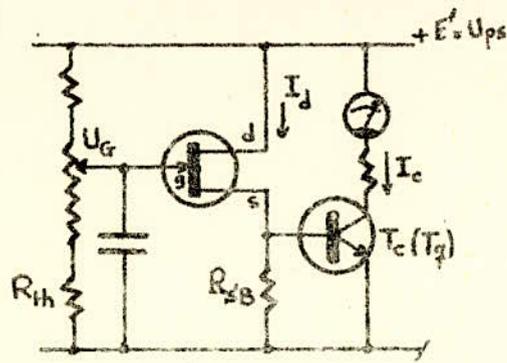
La figure III-I2-b représente une commande par tension, où le courant collecteur et la puissance maximale dissipée dans le transistor sont à nouveau limités par R_c . Et dans ce cas nous avons une loi de variation exponentielle $V_{BE} \rightarrow I_c$.

Nous prendrons pour R_b le fil résistant de 42ohms/m, parcouru par un courant de 3 mA pour couvrir sept octaves.

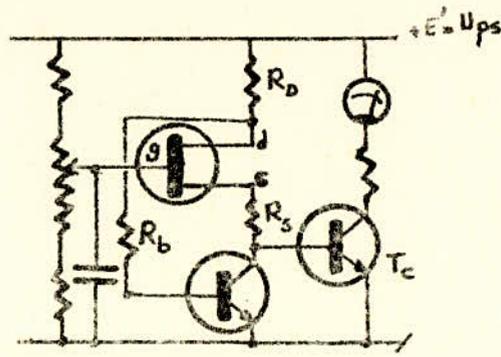
La base du transistor est donc reliée au fil résistant par un curseur ou stilet. Nous pouvons alors par exemple tracer I_c en fonction de la position choisie sur le fil résistant.

Ainsi ce montage, ramené à un seul transistor, réalise la conversion souhaitée.

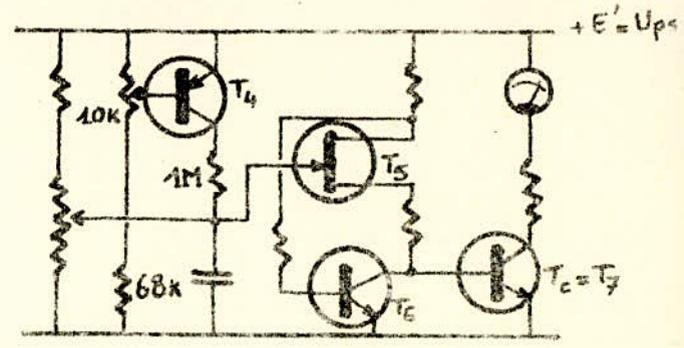
Pour le cas de notre circuit, nous avons adopté ce schéma en y amenant une amélioration; cette variante est celle mentionnée plus haut; elle consiste à remplacer la résistance R_b par la source de courant à JFET réglée à 3 mA. La stabilité de I_c n'en sera que meilleure.



(a)

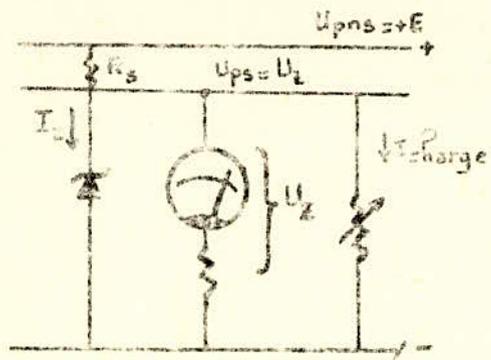


(b)

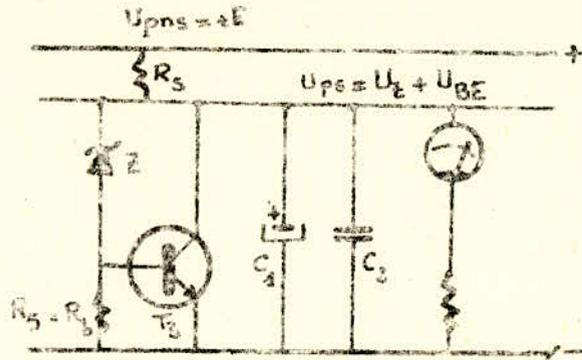


(c)

(fig III-13) - circuits de mémorisation du signal de commande, avec la Conversion exponentielle.

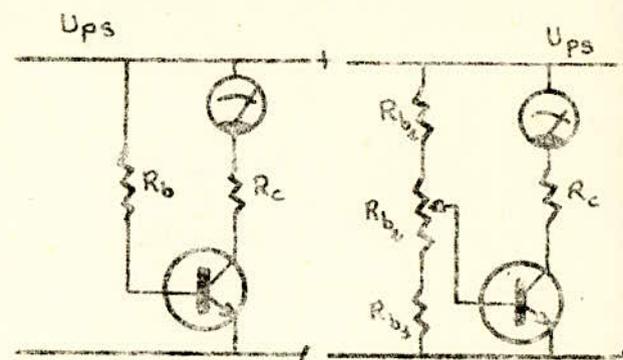


(a)

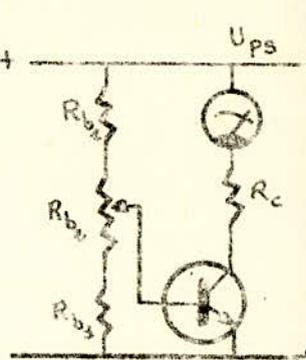


(b)

(fig III-11) - Circuits de Stabilisation -



(a)



(b)

(fig III-12) - transistor en EC, commande par base

LE RELAXATEUR DE LA FIG. III-I4-a, comporte une diode qui nous permet de connaître le comportement du relaxateur aux très basses fréquences (très faible courant de décharge du condensateur); en effet il serait moins prévisible sans la diode, car la jonction base-émetteur du PNP polarisée en inverse présente généralement d'avantage de courant de fuite (qui se rajoute au courant de décharge) qu'une bonne diode telle que la IN 194 ou la IN 4I48. De plus la IN 4I48 absorbera l'éventuel excès de tension.

Au lieu de relier le potentiomètre de 10 MOhms à une tension négative nettement plus importante que la tension positive comme c'était le cas par exemple de la Fig. III-I4-b, ici il est directement relié à la masse pour simplifier. La dent de scie sur la cathode de la diode ne présentera plus maintenant une rampe descendant linéairement: il y aura courbure.

Notons que cette dent de scie est difficilement visualisable sur oscilloscope aux basses fréquences.

En dépit de la courbure citée ci-dessus, la fréquence sera strictement inversement proportionnelle à la valeur de la résistance vers la masse. Cette courbure s'explique par la variation du courant de décharge qui varie sur une plage de 2 sur 1 pour une valeur donnée de R_p . Ce courant de décharge est toujours inversement proportionnel à la valeur de R_p quel que soit le niveau instantané de la dent de scie. Il en est de même pour la fréquence.

Cette relation $f = K/R_p$ est respectée tant que la fréquence n'est pas trop élevée, car il arrive un moment où la durée de l'impulsion de charge sur le collecteur du NPN n'est plus négligeable par rapport à la durée de la rampe courbe de la dent de scie. La fréquence croîtra alors moins vite que préconisé par la formule simplifiée: $f = K/R_p$. En effet, il est plus exacte d'écrire $T_d = R_p/K$, où T_d représente la période de décharge et où K est une constante proportionnelle à la tension d'alimentation.

mentation et à la valeur du condensateur et $T = T_d + T_p$, où T_p représente la durée de l'impulsion (fonction de la valeur du condensateur et également de la valeur de la petite résistance de garde (serie)). T représente la durée d'une dent de scie complète et on a donc :

$$f = 1/(T_d + T_p) = 1/(R_p/K + T_p) \approx 1/T$$

on voit que T_p peut devenir non négligeable quand R_p diminue c'est-à-dire quand la fréquence augmente.

On peut diminuer T_p en réduisant la valeur capacitive et en prenant la plus faible valeur de résistance de garde limitant encore suffisamment le courant de base du PNP au moment de la conduction simultanée des 2 transistors. Au lieu de 39 nF, on peut très bien choisir moins, mais il y a des limites; une trop faible valeur nécessite des valeurs de R_p trop fortes pour retrouver les mêmes fréquences et des courants de fuite peuvent alors devenir gênants.

Pendant chaque dent de scie la tension aux bornes du condensateur varie avec la formule $C = Q/U = it/U$, on obtient alors les fréquences de 32Hz à 3200Hz. Une gamme de 32Hz à 3200Hz représente plus de 6 (presque 7) octaves.

Si l'on met cette théorie en pratique on s'apercevra qu'il y a quelque chose qui ne va pas: en augmentant la fréquence progressivement, arrive un moment où l'oscillation s'arrête brutalement. Ce phénomène, caractéristique de la plupart des types de relaxateurs, s'explique ainsi: supposons la dent de scie à son point le plus bas avec $R_p = 10\text{Kohms}$, le courant de décharge est de 0,5 mA et les deux transistors sont arrivés au point où ils vont conduire simultanément. Au bout d'un certain temps le condensateur est complètement chargé et le collecteur du NPN ne fournit plus de courant de base au PNP. Avec une résistance plus forte pour R_p (faible courant de décharge) les 2 transistors se bloquent. Ici ce n'est pas le cas, le courant à travers R_p est toujours présent et il est telle-

ment important qu'il sature le PNP (si le PNP a un gain correct: $\beta \approx 100$)
Un courant de 5 mA (fourni par le collecteur du PNP) alimente la base du
NPN qui restera saturé. Des transistors saturés n'ont pratiquement pas
de gain en alternatif et l'oscillation cesse.

Un relaxateur ne fonctionne correctement qu'avec un courant de dé-
charge en-dessous d'une certaine valeur, dépendant surtout des β des
transistors (variables d'un montage à l'autre) sinon les transistors res-
tent conducteurs.

Le montage de la Fig. III-14-B propose une méthode pour pallier ce
défaut. Dans ce schéma le PNP a été inversé pour réduire les courants de
fuite, à travers la diode du PNP, entre base et tension positive; le β de
ce PNP devient très petit.

Le PNP supplémentaire joue ici deux rôles:

1°) Quand T_1 et T_2 sont bloqués, T_3 lui conduit. Le β de T_3 étant
considérable ($\beta > 100$) le courant émetteur est transmis intégralement comme
courant collecteur et le relaxateur fonctionne presque comme pendant la
période de décharge. Mais la situation est toute différente à l'instant
 T_p où T_1 et T_2 conduisent simultanément. Pendant la période T_p , T_3 est
donc bloqué et aucun courant ne peut passer de l'émetteur vers le collecteur
même si R_p est faible. T_1 et T_2 se bloquent à la fin de la brève
période T_p car T_1 ne reçoit plus de courant de base. Par l'addition de
 T_3 on obtient ainsi que le relaxateur fonctionne sur une plage de fréquen-
ces beaucoup plus importante que sans cet artifice.

2°) Quand on commande le relaxateur par le convertisseur exponen-
tiel tension/courant, le transistor de sortie de ce convertisseur aura
dans ce cas une tension collecteur constante ce qui en améliore déjà les
performances. Cette tension peut être fixée à une valeur basse ce qui
diminue la dissipation et par conséquent, limite l'échauffement des jon-
ctions et donc la dérive thermique.

Sur le plan musical ces 2 schémas ne sont pas ce que l'on aimerait avoir: l'impulsion a une durée pratiquement indépendante de la fréquence et l'intensité sonore est donc plus faible aux graves qu'aux aigus. DE ce point de vue et du point de vue de la répartition des harmoniques, ou plutôt leur dosage.

Le timbre d'une impulsion est très strident, les harmoniques ont une amplitude inversement proportionnelle à leur rang. Si la fréquence fondamentale de la note LA est 440 Hz à une amplitude de 1 volt, la deuxième harmonique (880 Hz) est de 1/2 Volt, la troisième (1320) 1/3 de volt.

Le timbre d'un signal carré (c'est-à-dire un signal rectangulaire dont les parties hautes et basse ont même durée) est nasal; si la fréquence fondamentale est 440 Hz avec une amplitude de 1 volt, la deuxième harmonique est absente (comme toutes les harmoniques d'ordre pair) à 1320 Hz on a 1/3 de volt etc.

III) Flip-Flop
Le schéma de la figure III-I4-C est celui que nous utilisons. Il reprend le relaxateur de la figure III-I4-b au lieu d'exploiter la dent de scie ou l'impulsion, on applique maintenant un signal carré au haut-parleur. Ce signal est obtenu en utilisant un Flip-Flop qui change d'état (tantôt c'est le transistor de gauche, tantôt celui de droite qui conduit tout en bloquant l'autre) à chaque impulsion. CE Flip-Flop divise par deux la fréquence de l'impulsion et n'affecte pratiquement pas le fonctionnement du relaxateur car le point de prélèvement de l'impulsion est à basse impédance. Ce Flip-Flop ne peut directement attaquer un HP c'est pourquoi on doit intercaler un émetteur-suiveur.

La fig. III-I4-c montre comment on relie le transistor T_c de sortie du convertisseur au relaxateur.

Cette combinaison permet d'exprimer le jeu sur fil résistant avec effet de mémoire, le timbre produit rappelant celui de beaucoup d'orgues

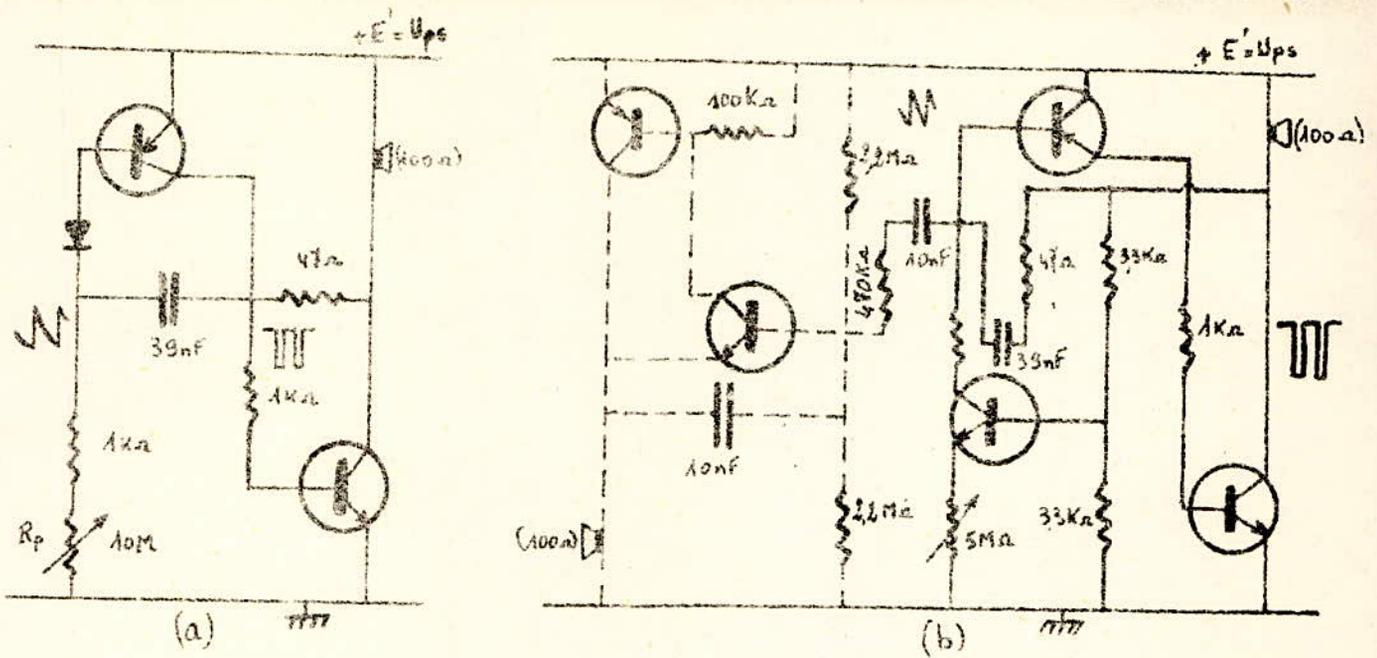
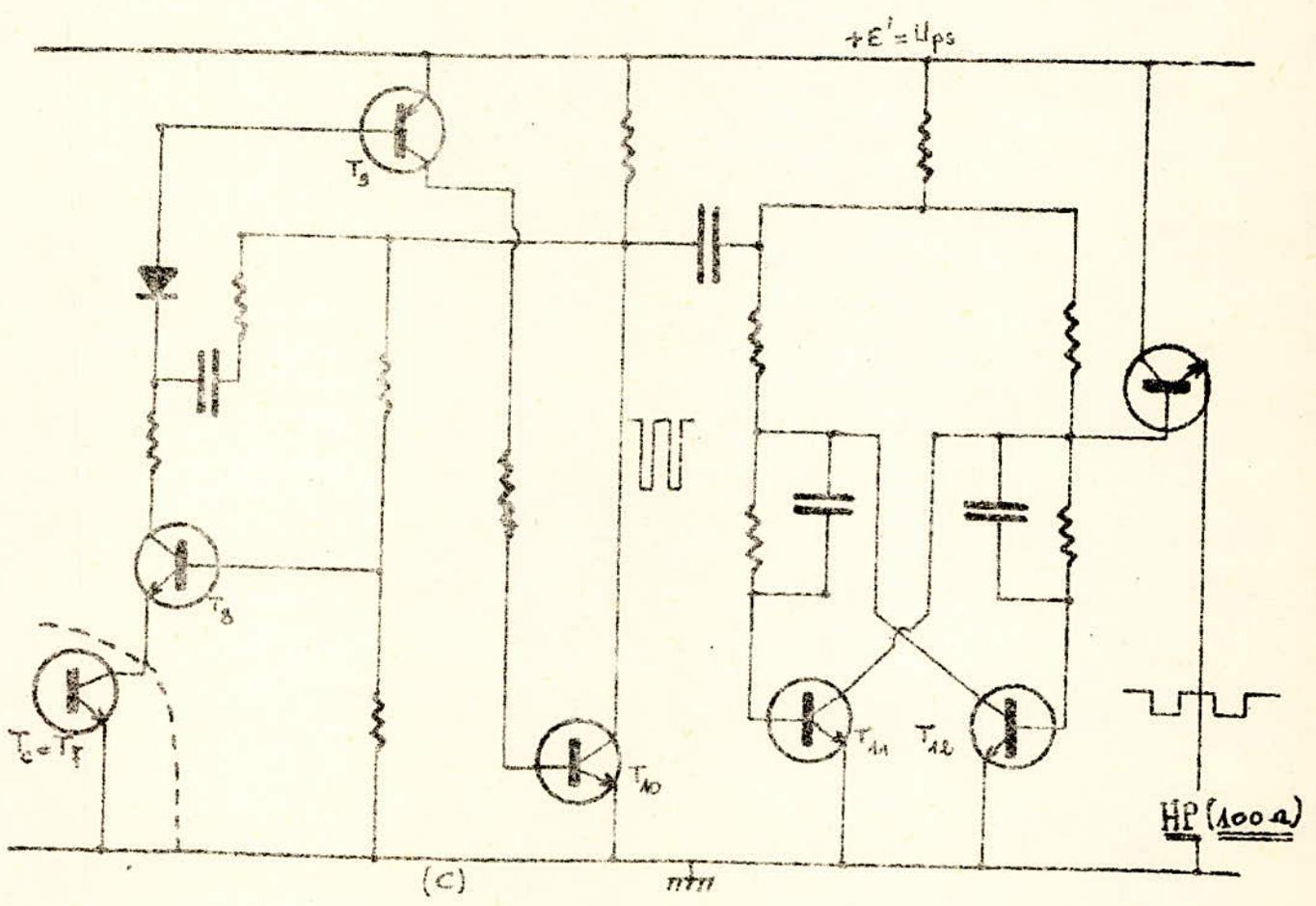


fig III-14: relaxateurs



electroniques. En effet la majorité des orgues electroniques modernes utilisent des Flip-Flop pour la création des sons; ceci s'explique par le fait que ces circuits se prêtent par excellence à une intégration poussée: il n'y a pas de condensateur de forte valeur. Le circuit est aperiodique et se comporte de la même façon quelle que soit la fréquence. Il n'y a donc pas de réglage de la fréquence.

IX) Commande d'enveloppe

On peut aussi introduire un circuit de commande d'enveloppe (amplitude du signal en fonction du temps).

Dans sa version la plus générale un tel circuit comporte d'une part un générateur d'allure d'enveloppe et d'autre part un multiplicateur. Dans ce dernier on multiplie le signal très basse fréquence, fonction du positionnement de quelques potentiomètres suivant l'allure désirée, par le signal audio. Ce dernier est alors modulé en amplitude et devient plus agréable et plus "musical".

Puisque dans notre cas le signal audio est le signal carré issu du Flip-Flop, le modulateur d'amplitude (multiplicateur) peut être simplifié. Il sera réduit à un écrêteur car celui-ci ne distord pas l'allure d'un signal rectangulaire. Le signal très basse fréquence représentatif de l'enveloppe désirée, devra toujours être généré pour commander l'écrêteur.

Le fonctionnement du circuit de commande d'enveloppe est expliqué ci-après:

La figure III-15 montre le schéma complet. Pour que le générateur d'enveloppe n'affecte pas la fréquence désirée, il faut que son impédance soit élevée. Quand le mini-archet est appuyé, la base de T₁₅ se trouve à 5,2v, environ, à travers la résistance de quelques dizaines de Mohms (R₂₄ et R₂₅) et T₁₇ est bloqué. En appuyant le mini-archet sur le fil résistif, la base de T₁₅ se trouve à un potentiel entre +IV et +500mV. Le circuit d'entrée du générateur d'enveloppe injecte alors dans le fil résistif un courant de l'ordre de 300 nA qui vient s'ajouter au courant

de 3 mA le parcourant en permanence

Si le contact se fait à un point qui se trouve à 100 Ohms de la masse, ces 300 nA provoqueront une augmentation de la tension de $300 \times 100 = 30 \mu\text{V}$ ce qui correspond à 1/50 de demi-ton (donc tout à fait négligeable).

De ces 300 nA, environ 200 nA passent par R_{24} et R_{25} , le reste sert de courant de base pour le transistor T_{I5} . Les transistors T_{I5} et T_{I6} forment un émetteur-suiveur à super-gain (le produit des deux β) et 100 nA à l'entrée suffiront à rendre l'émetteur de T_{I5} à environ IV positif par rapport à la cathode de D2: à travers les 33 KOhms de R_{27} , il y a alors un courant d'environ 150 μA suffisant pour faire conduire T_{I7} . La diode D2 est nécessaire pour assurer le super-gain dans tous les cas, par exemple aussi quand on joue une note grave et que la cathode de D2 peut se trouver très proche de 0V: son anode est dans ce cas suffisamment positive ($\approx 500 \text{ mV}$) pour que le collecteur de T_{I5} ne puissent pas descendre en dessous du seuil de conduction de T_{I6} (si le VBE de T_{I6} n'atteignait pas +500 mV, ce transistor ne pourrait pas participer au gain en courant et le courant de T_{I5} deviendrait tellement élevé que la répartition des tensions sur le fil résistif serait affectée sérieusement au point de modifier l'emplacement prévu des notes, de façon visible)

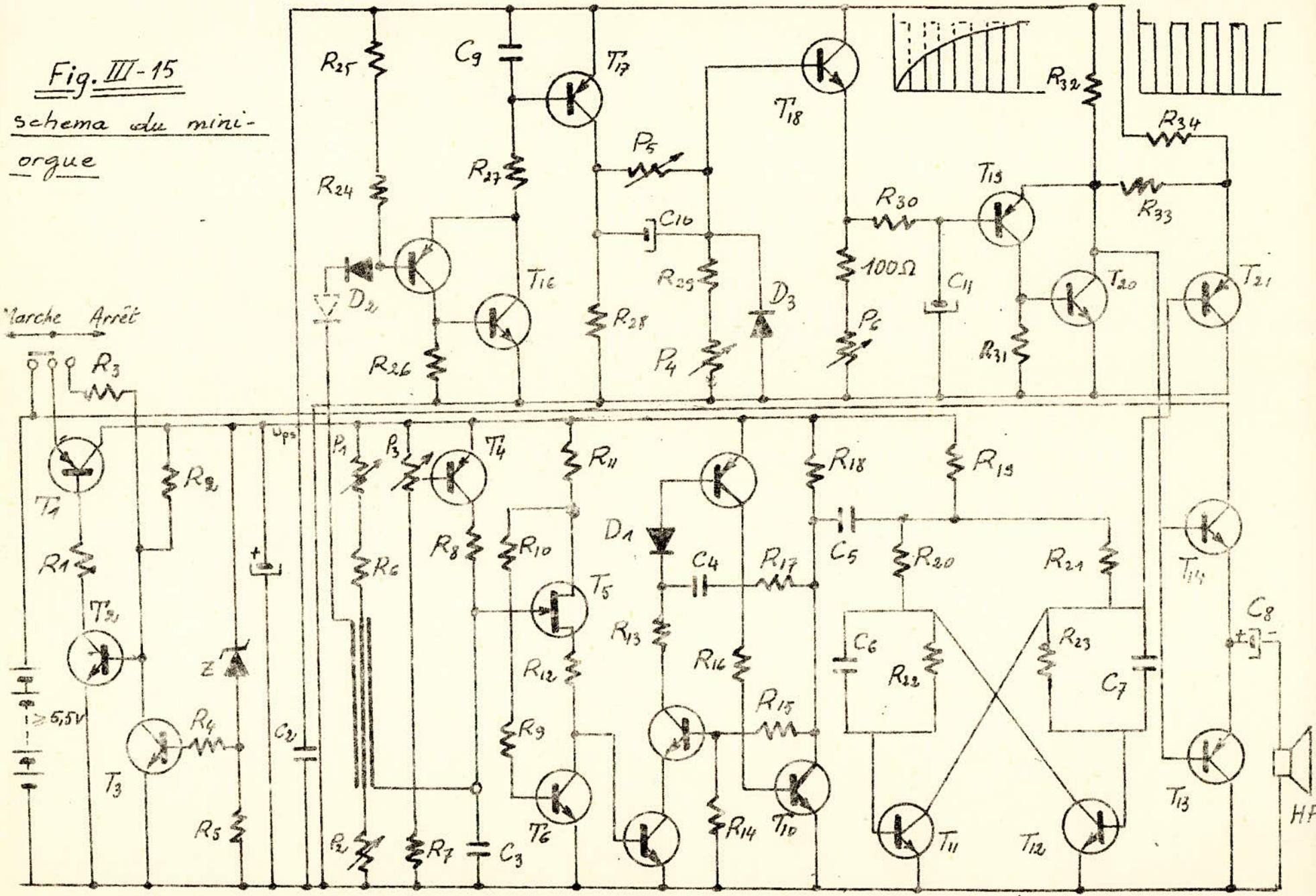
Au lieu d'une seule diode, on peut même en prendre deux.

L'incorporation de R_{26} est une mesure de précaution: si jamais il y a un faible courant de fuite sur la base de T_{I6} (archet soulevé) il ne pourra pas faire conduire T_{I6} et par-là T_{I7} , tant qu'il ne dépasse pas 50 nA, car VBE de T_{I6} (égale à $50 \text{ nA} \times 10 \text{ M}\Omega = 500 \text{ mV}$) n'atteindra pas le seuil de conduction. Une telle résistance de déviation de courant de fuite n'est pas tellement nécessaire entre émetteur et base de T_{I7} car il faut un courant de base d'au moins quelques dizaines de μA pour que le courant collecteur qui en résulte développe une tension appréciable aux bornes de R_{28} (pour IV il faut déjà 1 mA à travers la R_{28} de 1 K Ω).

Fig. III-15

schema du mini-
orgue

Marche Arrêt



Le condensateur C9 est à recommander si le mini-archet n'assure pas de contacts suffisamment bien établis: C9 lisse dans ce cas un peu les "bavures"; la valeur de C9 doit être aussi petite que possible et est à déterminer expérimentalement. Le plus souvent C9 ne sera pas nécessaire, car CII empêche également les variations trop brutales de la tension représentant l'enveloppe. Le collecteur de TI7 suit donc fidèlement les manipulations du mini-archet: + 5 V quand il est appuyé, 0 V quand le contact est rompu. Des réseaux RC vont ensuite modifier l'allure de ce signal (à deux niveaux seulement) donc du type "tout ou rien" en une allure évoluant plus graduellement.

C10 transmet le saut positif de départ intégralement (D3 sera bloquée) et l'émetteur de TI8 suit ce saut de 5 V. Sans P5 la tension VE de TI8 reviendrait vers zéro volt avec une constante de temps d'attaque de $t_A = C10 \times P4$ la résistance R29 de faible valeur limite le courant collecteur de TI7 quand P4 est au minimum.

Avec P5, le niveau ne descendra pas à 0 V mais à une valeur de maintien fonction de la valeur de P5 et P4 (qui constituent un pont diviseur).

Le saut négatif, se produisant quand on soulève l'archet, décharge C10 rapidement à travers D3 et R28 avec une constante de temps très courte: $t_F = C10 \times (R28 + RD3)$ où RD3 est très faible (diode conductrice). Le deuxième rôle de D3 est d'empêcher que la base de TI8 devienne négative. Il y a donc une récupération rapide, chaque note ayant une amplitude d'attaque de 5 V. Si on positionne P5 à une faible valeur, le niveau de maintien sera également proche de +5 V.

LES SAUTS positifs apparaissant sur l'émetteur de TI8 subiront un petit ralentissement avec une constante de temps de montée: ($t_M = R30 \times CII = 1K \times 10 \mu F = 10 \text{ ms}$) avant d'être appliqués à la base de TI9.

Quand on soulève l'archet, la base de TI8 descend vite et la diode base émetteur de TI8 se bloque, ce qui fait que TI8 ne fournit plus de courant et VB de TI9 (= VCII) revient à zéro avec une constante de temps d'excitement $t_E = (P6 + R30) \times CII$ qui peut être très longue.

t_M a été choisie fixe, t_A et t_E sont variables (P4 et P6 respectivement) P5 affecte un peu t_A mais permet surtout de choisir le niveau de maintien.

La tension VB de TI9 évolue entre 0 V et des valeurs positives. L'émetteur-suiveur composé comprenant TI9 et T20 (fonctionnement analogue à celui de TI5 et TI6) transmet la tension de CII, sans affecter les constantes de temps (l'impédance d'entrée est très élevée); la transmis-

sion de cette tension se fait avec un certain décalage en tension; VEE de T20 + VCE de TI9 quand VCII est suffisamment positive; VBE de TI9 quand VCII est proche de 0 V .

POUR VCII égale 0 V on a environ la tension émetteur de TI9, VETI9 $\hat{=}$ 0,7 V. A cette tension il ne doit pas y avoir de transmission du signal audio. Ceci se vérifie facilement/le signal provenant du Flip-Flop (collecteur de TII) oscille entre 0,1 V (transistor saturé) et + 4 V environ (transistor bloqué); à la sortie de l'émetteur-suiveur (émetteur de T2I) le signal audio oscille entre deux niveaux plus positifs d'environ 0,6 V (VBE de T2I) donc entre + 0,7 V et 4,6 V. Ce signal est appliqué, à travers R33, à la sortie de l'émetteur-suiveur composé TI9/T20 qui est maintenu à + 0,7 V par CII; le signal audio ne passe donc pas: les émetteur-suiveurs TI3/TI4 reçoivent un niveau constant de + 0,7 V. La valeur de R32 joue sur la fluidité de l'extinction des notes.

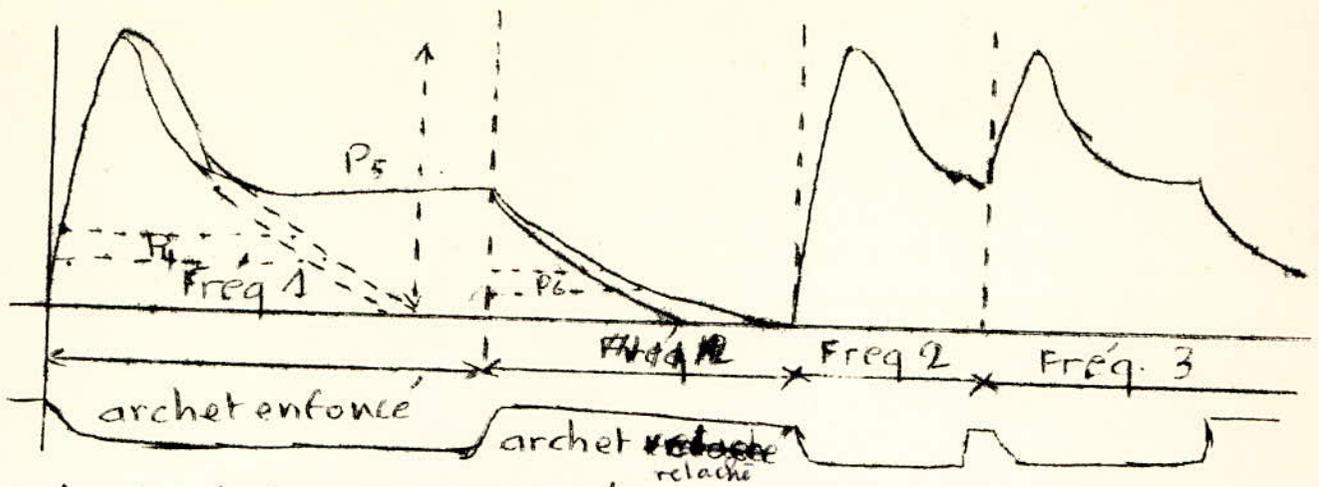
Pour VCII = 1 V, l'émetteur de TI9 sera à 1,7 V à condition que le signal provenant de l'émetteur de T2I soit égal ou supérieur à 1,7 V; pour les valeurs en-dessous de 1,7 V, l'émetteur de TI9 suivra fidèlement les variations provenant de T2I, car la diode émetteur-base de TI9 sera polarisée en sens inverse. On a donc, pour VCII = 1,0 V un signal carré sur l'émetteur de TI9 (transmis, à travers les émetteurs-suiveurs TI3/TI4) au haut-parleur d'une amplitude de 1 V crête-crête (oscillant entre 0,7 V et 1,7 V).

De la même façon, l'amplitude du signal carré appliqué au haut-parleur sera 2 V pour VCII = + 2 V etc. L'amplitude est proportionnelle à VCII: tout ce qui dépasse est écrêté par TI9/T20.

Il y a une petite bavure théorique, mais non gênante dans la pratique, due au fait que le signal carré est modulé en amplitude de façon asymétrique: il oscille entre 0,7 V et un niveau évoluant lentement. Le signal de commande de l'enveloppe apparaît donc à la sortie. La simplicité, fiabilité et reproductibilité de l'écrêteur justifient pleinement cette petite bavure dans un mini-orgue muni d'un petit haut-parleur qui masque complètement ce signal lent de modulation.

La figure suivante schématise l'action des trois potentiomètres de la manipulation du mini-archet sur l'enveloppe.

Un des objectifs était de réaliser un instrument consommant très peu, l'alimentation par pile, pour rendre l'orgue entièrement autonome, ne se heurtera alors pas à des objections d'ordre pécuniaire. D'abord, on



le signal de commande d'enveloppe avec ses différents paramètres

insère un condensateur chimique entre l'étage de sortie et le haut-parleur afin d'éliminer le courant continu; ceci a deux autres avantages: on élimine une source de distorsion (avec une composante continue, la position moyenne de la membrane ne serait pas celle du repos) et en choisissant une valeur capacitive pas trop grande, on réduit l'importance de la composante due à la modulation lente d'amplitude. Ensuite, on peut sophisticationner le régulateur de tension de façon à avoir un minimum de chute à travers le transistor.

PROPOSITIONS POUR LA REALISATION AVEC CIRCUITS INTEGRES

Il est tout à fait possible de remplacer le Flip-Flop en composants discrets par un circuit intégré comportant par exemple 4 Flip-Flop en cascade (diviseur par 16, tel que le SN 74 (L)93).

La série 74 L est en technologie TTL et a l'avantage d'une faible consommation (low-power). On peut également faire appel à des circuits COS/MOS, série CD 4000 ou 74 C, dont la consommation est pratiquement nulle. L'avantage de plusieurs Flip-Flop par note au lieu d'un seul réside dans le fait que l'on peut mélanger et doser les sorties pour obtenir des timbres indépendants de la fréquence; on peut également effectuer des opérations logiques sur les signaux avec des portes logiques à diodes, avec des NAND, NOR, AND, OR, EXOR etc. On arrive ainsi à obtenir une grande variété de timbres (qui peuvent également comporter plusieurs harmoniques d'ordre pair).

A tout cela on peut rajouter des filtres passifs (ou actifs) pour créer des formats. L'action de ces filtres sur le contenu harmonique d'un son est différent pour les différentes notes.

Remarquons que l'emploi de tels circuits permettant la création des timbres de tout genre nécessite en général un préamplificateur d'adaptation appropriée entre la sortie et le HP.

La sortie de cet amplificateur peut bien sûr être branchée à l'entrée d'une installation HI-FI. L'adaptation à notre orgue ne pose pas de problème et constitue d'ailleurs un bon exercice pratique.

L'ampli en CI, TBA 915 (I2 V: 2mA repos 500 mW dans 20 ohms) est très intéressant avec des piles (alimentation séparée).

NOMENCLATURE du schéma complet(Figure III-I5).

RAPPELS DES FONCTIONS DES COMPOSANTES:

TRANSISTORS:

- T_1 : 2N 2905 ou équivalent(PNP) ayant un courant de collecteur de quelques centaines de mA. Transistor ballast.
- T_2/T_3 : NPN(BC 107 ou équivalent) -ampli régulateur de tension.
- T_4 : PNP(BC 178 ou équivalent) -compense une dérive éventuelle de la mémoire.
- T_5 : JFET canal N (2N 12 ou équivalent ayant une tension de pincement d'environ 1 à 2 Volts; par exemple le BF 244 A, que nous avons d'ailleurs utilisé)-Ampli tampon pour condensateur de mémoire.
- T_6 : NPN(BC 107 ou équivalent) -source de courant constant pour T_5 .
- L'ENSEMBLE de T_5, T_6, T_8 est à faible coefficient de température, c'est à-dire qu'il compense la dérive en température.
- T_7 : NPN (BC 107 ou équivalent) -c'est le transistor qui produit la conversion exponentielle: $I_C = k \exp(39 \times U_{BE})$. Il permet d'avoir la même différence de potentiel pour chaque octave.
- T_8 : NPN(BC 107 ou équivalent) -il sert à agrandir la plage de fréquence.
- T_9 : PNP(BC 178 ou équivalent) -Ce transistor peut être un BF c'est-à-dire un transistor plus rapide -il amplifie la dent de scie qui apparait à la cathode de la diode D_I , et la fournit au transistor T_{10} .
- T_{10} : NPN(BC 107 ou équivalent) -c'est le relaxateur de base.
- T_{11}/T_{12} : NPN(BC 107 ou équivalent) -c'est le multivibrateur bistable ou flip-flop.
- T_{13}/T_{14} : ampli de sortie en collecteur commun;
- T_{13} : PNP(BC 178 ou équivalent) -metteur suiveur complémentaire.
- T_{14} : NPN(BC 107 ou équivalent) - Driver pour le haut-parleur de 50 à 100 Ohms.
- T_{15} : PNP(BC 178 ou équivalent) -c'est un ampli tampon de détection de la position de l'archet; il commande l'enveloppe/.

- T_{I6} : NPN(BC 107 ou équivalent) - en combinaison avec T_{I5}, il remplit la même fonction que ce transistor.
- T_{I7} : PNP(BC 178 ou équivalent) -il commande l'attaque et le maintien.
- T_{I8} : NPN(BC 107 ou équivalent) -il commande l'extinction.
- T_{I9} : PNP(BC 178 ou équivalent) -c'est un ampli tampon et l'écreteur variable, commandé par le signal d'enveloppe.
- T₂₀ : NPN(BC 107 ou équivalent) -en combinaison avec T_{I9}, il remplit le même rôle que ce transistor.
- T₂₁ : PNP(BC 178 ou équivalent) -c'est un transistor qui effectue l'adaptation entre le flip-flop et l'écreteur.

DIODES:

- Z : diode Zener à 5,2 Volts nominal; c'est une BZY 88 ou équivalente.
- D_I : IN 4I48 ou équivalente (IN 9I4) - assure un faible courant de fuite.
- D₂ : IN 4I48 ou équivalente (IN 9I4) - améliore la polarisation de l'ampli de détection T_{I5}/T_{I6}.
- D₃ : IN 4I48 ou équivalente (IN 9I4) - assure une décharge rapide de C_{I0}.

CONDENSATEURS:

- C_I : 10 à 1000 μ F, (chimique de 10 Volts minimum) -il découple les basses fréquences. En pratique nous prendrons 100; 10⁻⁶ farads.
- C₂ : 0,1 10⁻⁶ F non chimique, -découple les hautes fréquences.
- C₃ : 0,47 10⁻⁶ F -il est à très faible bruit; c'est le condensateur de mémoire.
- C₄ : 39 nF .C'est le condensateur d'intégration du relaxateur.
- C₅ : 10 nF .C'est le couplage capacitif vers le flip-flop.
- C₆/C₇ : 100 pF .Ce sont les liaisons capacitives croisées du flip-flop.
- C₈ : 100.10⁻⁶ F .(chimique de 10 Volts minimum). C'est le couplage capacitif du H.P..
- C₉ : 10⁻⁶F au maximum; il sert à la correction entre les de mauvais contact entre stylet et fil résistant. En pratique nous prendrons 0,1 μ F.
- C_{I0} : 10 μ F (chimique de 10 Volts minimum). IL sert à la constante d'attaque.

CII: 10 μ F (2) 10 V, CHIM.) Constante de temps extinction.

POTENTIOMETRES

- P1: 1 K lin. Etendu du clavier (cm/octave).
P2: 100 Ohms lin. Transposition (décalage des notes).
P3: 10 K lin. Ajustage de la compensation de dérive.
P4: 1 Mlog. réglage constante de temps attaque.
P5: 250 à 500 Klog. Réglage niveau de maintien.
P6: 1 M log. Réglage constante de temps extinction.

RESISTANCES

- R1: 6,8 K. Limitent le courant en court-circuit de l'alimentation.
R2: 1 M. dito ci-dessus.
R3: 10K. En combinaison avec l'interrupteur à glissière " lance" l'alimentation.
R4: 1K. Protège l'alimentation contre un court-circuit EC de T1. Influence sur tension de sortie.
R5: 1K. Fixe le courant ZENER. Influence sur la tension de sortie réglée
 $I_z = 0,6$ mA ici.
R6: 1,2 K. Résistance de garde: $I_{fil} = 5$ mA max.
R7: 68K. Applique 700mV aux bornes de P3 .
R8: 1 M. Résistance de garde, limite le courant de compensation d'une dérive de la mémoire.
R10/R9: 470K. Environ. Déterminer expérimentalement pour minimiser le coefficient de température.
R11: 1K. ($I_C \approx 1$ mA). Stabilise un peu le I_C .
R12: < 500 Ohms . Transposition; diminuer sa valeur (par ex. 0,5) augmente la fréquence, à U_{C3} constant.
R13: env. 1K. Protège T9 contre I_d trop fort .
R14/R15: 3,3K. Pont diviseur bloquant T8 pendant la période de conduction de T9/T10 .

- R_{16} : 1k environ; il protège T_{10} , contre le courant de base trop fort.
 R_{17} : 100 ohms environ; il limite le courant de base de T_9 pendant l'impulsion.
 R_{18} : 330 Ohms; c'est la charge de collecteur de T_{10} .
 R_{19} : 330 Ohms; il impose les impulsions négatives de basculement à l'alimentation du flip-flop.
 R_{20} et R_{21} : 3,3k; ce sont les charges collecteur du flip-flop.
 R_{22} et R_{23} : 33k ; liaisons croisées résistives du flip-flop.
 R_{24} et R_{25} : supérieures ou égales à 10 M.; elles imposent la sélection des plus fortes valeurs qui bloquent $T_{15}(T_{17})$ de façon fiable.
 R_{26} : 10 M.; neutralise les courants de fuite sur la base de T_{16} .
 R_{27} : 33k ; elle limite le courant de base pour T_{17} .
 R_{28} : 1k ; elle ne doit pas être plus forte pour décharger C_{10} le plus vite possible.
 R_{29} : 10k ; elle limite le courant de collecteur de T_{17} , quand $P_4 = P_5 = 0$.
 R_{30} : 1k ; elle assure un ton de montée du signal d'environ 10 ns.
 R_{31} : 1M.; absorbe les éventuels courants de fuite.
 R_{32} : 1M.; elle joue sur la fluidité de l'extinction.
 R_{33} : 2,2k ; c'est la résistance d'entrée pour l'écrêteur.
 R_{34} : 2,2k ; c'est la résistance de liaison entre T_{21} et R_{33} ;

pour le fil résistant nous l'avons réglé à 42 ohms/m. Pour les essais pratiques, nous avons utilisé un potentiomètre de 50 Ohms, ce qui doit nous amener à changer les potentiomètres P_1 et P_2 ainsi que la résistance R_6 dans les mêmes proportions.

Conclusions-résultats et interprétations pratiques.

1-)interprétations des résultats pratiques:

Les signaux dents de scie, carré, et ceux de l'enveloppe, ont été obtenus avec des amplitudes cohérentes avec la théorie, puisque qu'elles variaient de 5 à 10% par rapport aux amplitudes désirées.

Le plus sérieux problème est venu du clavier. Le ~~choix~~ que nous avons fait n'est certes pas le meilleur, mais avec beaucoup de soins, nous pensions atteindre une musicalité acceptable.

Malheureusement, nous nous sommes aperçu qu'avec notre plaquette, les points de liaisons (entre d'une part le clavier et le condensateur de mémoire, et d'autre part entre le clavier et la diode D_2 du circuit d'enveloppe) avaient des courants de fuite supérieurs au nanoampère exigé. Ainsi, quand le stylo est mis, les courants utiles venus du fil résistant (qui sont de l'ordre de 200 à 300 nA) sont sensiblement variés par ces courants de fuite, et avec les mauvais contacts ~~stylo-fil~~ ~~résistant~~, nous avons l'introduction de craquements et de ronflements au niveau du signal de sortie du Haut-Parleur.

L'absence d'un H.P. de 50 à 100 ohms, nous a également posé des problèmes d'adaptation en impédance et en puissance, ~~que nous avons~~ partiellement résolu avec un montage en collecteur commun.

2-)Améliorations possibles:

Il est indéniable que de nombreux changements et corrections peuvent y être apportés pour atteindre une excellente musicalité.

Nous pensons particulièrement à des circuits de timbres, au vibrato, aux circuits de réverbération..., qui introduisent avec un minimum de variations. L'introduction de préamplificateurs peut aussi être prévue.

DE tels circuits de préamplification peuvent apporter d'éventuelles corrections notamment:

- pour la correction de rumble (éliminer les fréquences de 25 à 40 Hz).
- pour la correction de scratch, qui enlève les fréquences élevées, correspondant aux "bruits d'aiguilles".
- La correction de loudness, ou correction physiologique, pour atténuer les fréquences voisines de 1000 Hz, quand le volume diminue.
- les corrections graves-aiguës, d'une manière progressive.

L'amélioration par circuits intégrés est aussi possible, et ceci tant au niveau de la génération des signaux que dans l'amplification.

C O N C L U S I O N ;

Arrivés au terme de notre travail, nous souhaitons que notre bibliographie puisse servir un tant soit peu à l'élaboration d'études plus poussées sur les appareils de synthèse et plus particulièrement sur les synthétiseurs de parole, dans le cadre du développement technique de notre pays.

Nous avons vu en effet que les recherches effectuées dans ce domaine sont très diversifiées et englobent un grand nombre de pays (malgré une évidente absence de documentation sur les travaux dans les pays socialistes).

Il est donc indispensable que notre pays y participe, car l'information orale est appelée à connaître un avenir florissant, et ceci dans un avenir pas très lointain.

Aussi vu le développement rapide des techniques d'information et de renseignements dans tous les domaines de la vie active, il est certain que l'ALGERIE sera appelée à s'en servir.

Dans ce sens nous pourrions suggérer à ceux qui viendraient à entreprendre des recherches dans cet axe, de partir avant tout des unités à réponse vocale (URV) qui restent les appareils de synthèse les plus simples dans le sens où leur conception offre de plus grandes facilités.

Le bloc le plus difficile à résoudre est celui de l'adressage des messages ou mots enregistrés, à la sortie vocale, suivant la question posée et la forme et le contenu que l'on veut donner à la réponse.

Pour plus de facilités, on pourrait envisager une entrée par touches dans le but d'éviter la construction d'une partie analyse, qui nécessiterait une reconnaissance automatique des questions vocales.

La sortie pourra se faire sous forme de chiffres émis oralement, comme c'est le cas de l'horloge parlante.

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

X
XXXX

"orgues electroniques" par JUSTER (editions ETSF)

"petits instruments electroniques de musique" par JUSTER (editions ETSF)

TABLE DES MATIERES

I^e PARTIE

P a g e s

I- Introduction

I- But du projet ----- I
2- Définition d'un synthétiseur -----I
3- Historique _ ----- I

II^e PARTIE Synthèse de la parole Appareils de synthèse

A- Synthèse de la parole

I- Définition

I-1 Qu'est-ce-qu'un son?----- 4
I-2 Production naturelle de la parole ----- 4
I-3 L'appareil vocal ----- 5

II-La parole phénomène physique

II-1 Introduction ----- 6
II-é Caractéristiques de la parole ----- 6
II-3 Décomposition du son ----- 7
II-4 Décomposition de la parole ----- 8
II-5 Etude spectrale ----- -9-

B- Les appareils de synthèse

I- Les vocodeurs Voice Opération Coders)

I- Principe des vocodeurs _ _ _----- I8
2- Les différents types de vocodeurs ----- I8
 2-1 Les vocodeurs à canaux ----- I8
 2-2 Les vocodeurs à formants ----- 19
 2-3 Les patterns matching ----- 19
 2-4 Les vocodeurs à auto-correlation ----- 19
 2-5 LES vocodeurs à fonction hertogonale ----- 20
 2-6 Les vocodeurs conservant la phase ----- -20
 2-7 Les vocodeurs à divisions ----- -20
 2-8 Les vocodeurs hybrides eu-à-excitation vocale--20
3- Domaine d'application ----- 21
 3-1 La recherche phonétique ----- 21
 3-2 La recherche médicale ----- -22

II- Les synthétiseurs

I- Le synthétiseur à formants ----- -23
2- Le synthétiseur à enregistrements ----- 25
3- Le synthétiseur à canaux ----- -26
4- Les unités à réponse vocale (U.R.V.) ----- -27

5-	Les relecteur de sonogrammes - - - - -	30
6-	Les synthétiseurs à codage prédectif - - - - -	30
7-	Les simulateurs vocaux - - - - -	31
C- Les répertoires:		
1-	Principaux centres recherche - - - - -	34
2-	Répertoires des recherches, colloques... les plus importants - - - - -	38
3-	Quelques ouvrage de recherche - - - - -	38
III^e - PARTIE		
A-	Avant-propos - - - - -	39
B-	La musique électronique - - - - -	39
I-	Généralités - - - - -	39
2-	Les sons musicaux - - - - -	40
C-	Le synthétiseur de musique - - - - -	45
I-	Généralités - - - - -	45
2-	Analyse des différents blocs de synthèse - - - - -	47
D-	Schéma proposé - - - - -	60
I-	SCH2MA DE principe - - - - -	50
2-	Choix du clavier - - - - -	51
3-	Aspects théoriques - - - - -	53
4-	Etude de l'alimentation - - - - -	55
5-	Le circuit de mémoire - - - - -	57
6-	L'ampli tampon et conversion exponentielle - - - - -	58

CONCLUSION

Bibliographie

7-	Le Relaxeur	60
8-	Le Pip-prop	63
9-	Commande d'enveloppe	64
10-	Propositions	69
11-	Nomenclature	70
12-	Conclusion et interprétations	74
Conclusion		75
BIBLIOGRAPHIE		76