

TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE *

P. ALINAT

THOMSON-CSF - Division ASM. - 06802 CAGNES-SUR-MER

RESUME

La réalisation d'une cochlée artificielle et son utilisation pour l'étude des phonèmes de la langue Française sont décrites ici. Les formants sont recherchés par filtrage non récursif du "spectre" fourni par la cochlée. Des critères sont mis en évidence pour distinguer entre les différentes voyelles et consonnes fricatives. Un critère qualitatif est décrit pour la distinction entre /P/, /T/ et /K/. Ces résultats sont utilisés dans un système de reconnaissance très sommaire.

SUMMARY

The implementation of an analog cochlea designed for the study of phonemes of the French language is described. The formants are identified by non-recursive filtering of the "spectrum" issued by the cochlea. Criteria are found for the recognition of vowels and fricative consonants. A qualitative criterion is introduced for recognition of /P/, /T/ and /K/. The results are applied to a simple recognition system.

* Etude financée par la DIRECTION DES RECHERCHES ET MOYENS d'ESSAIS, PARIS (FRANCE)

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

1.-INTRODUCTION

La parole est un signal très étudié à l'heure actuelle, le but ultime étant de façon générale de pouvoir envoyer oralement des informations aux machines. Cela paraît dans une certaine mesure de plus en plus possible et le champ des applications est immense : le seul problème est de construire un dispositif qui, bien qu'opérationnel, soit d'une complexité (donc d'un prix) raisonnable .

Au point de vue traitement de signal, la parole présente l'avantage de pouvoir être représentée par une seule fonction dépendant d'une seule variable : $f(t)$. Les volumes de calcul à effectuer sont donc relativement réduits. Par contre, la parole est liée à l'homme et comme tout ce qui a un rapport avec la vie, elle est dans le fond d'une variabilité et d'une complexité fort grande.

On peut dire que la parole est de façon idéale composée de phonèmes (/p/, /A/ etc..) Par combinaisons successives, on obtient des syllabes, des mots, des groupes de mots, des phrases, Toutefois, ces combinaisons ne sont pas vraiment des juxtapositions mais des codages relativement simples au niveau de la syllabe mais fort complexes au niveau des phrases : c'est le mot "grammaire" qui les définit le mieux. Pour une langue telle que le Français, il y a environ 30 phonèmes, 2000 syllabes, des milliers de mots.

Il faut commencer par s'occuper bien évidemment du niveau le plus bas : les phonèmes (dont la liste est en Annexe A). Ces phonèmes sont eux-mêmes produits par combinaison de critères, c'est-à-dire de traits particuliers propres à un certain nombre de phonèmes. L'étude ici décrite consiste à mettre en évidence certains de ces critères et à les combiner entre eux pour reconnaître les phonèmes (indépendamment du locuteur).



RECOGNISANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

2.- COCHLÉE ARTIFICIELLE ET RECHERCHE DE FORMANTS

La cochlée est la partie interne de l'oreille. Il a été montré par Békésy que la cochlée pouvait être simulée par une batterie de filtres Passe-Bande. C'est une telle batterie de filtres (cochlée artificielle) qui a été utilisée pour notre étude. Elle fait subir à la parole un prétraitement que l'on peut penser être bien adapté. En effet, l'imitation de la nature ne conduit pas forcément à la meilleure solution des problèmes mais dans notre cas particulier il est permis de penser que la parole humaine au cours de sa tente formation tend vers la plus grande facilité d'émission et la plus grande sûreté de compréhension possible.

On n'expose pas ici la façon dont a été déterminée et réalisée la batterie de filtres car cela a déjà été fait par ailleurs [9]. Elle est composée de 96 filtres Passe-Bande, suivis d'une détection intégration (constante de temps 15 ms environ). Toutes les 4 ms, les 96 sorties sont échantillonnées successivement : on obtient ainsi une courbe discrète $F_t(n)$ avec $0 \leq n \leq 95$. Cette courbe représente en quelque sorte le "spectre" de la parole. Cette cochlée artificielle présente par rapport à un analyseur de spectre classique un certain nombre d'avantages : échelle des fréquences presque logarithmique permettant une meilleure répartition de l'information comme on le verra plus loin, mise en évidence de certains détails spectraux qui jouent un rôle important et surtout évolution de $F_t(n)$ en fonction du temps profondément différente de celle de l'analyseur de spectre classique du fait que les filtres sont à $\Delta f/f$ constant.

La principale utilisation de cette cochlée est la recherche des formants pour les phonèmes stationnaires (voyelles et consonnes fricatives).

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Le mot formant est employé en parole depuis de nombreuses années mais sa définition n'a jamais été très précise. On peut dire qu'au début on appelait formant les différentes bandes sombres qui apparaissaient sur les sonogrammes. En les rangeant par ordre de fréquence croissante, on obtenait le 1er, le 2e, le 3e formant. Les expérimentateurs s'étaient rendu compte que la netteté et la précision avec lesquelles on voyait les formants dépendaient énormément de la largeur du filtre Passe-Bande utilisé pour réaliser le sonogramme (50 ou 300 Hz). En général, on caractérisait alors un formant par la position fréquentielle de son sommet et sa largeur de bande.

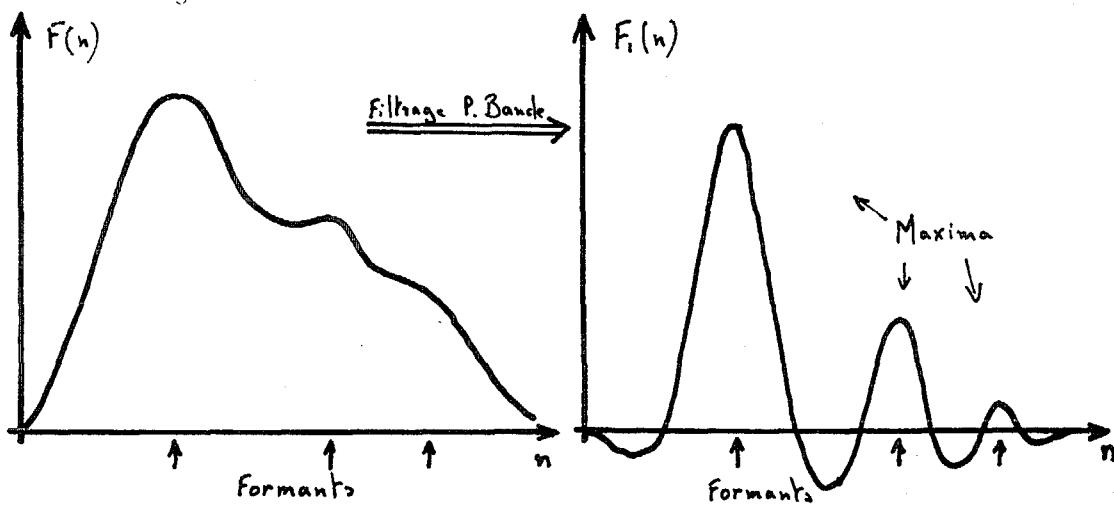
Lorsqu'il fut possible d'obtenir des spectres à courts termes suffisamment rapidement, on chercha à extraire plus ou moins automatiquement de ces spectres les principaux formants et même à les séparer lorsqu'ils étaient trop proches. Pour ce faire, on se servit du fait que les formants sont liés à la fonction de transfert des cavités laryngo-bucco-nasales : il fallait donc retrouver cette fonction de transfert (évoluant par ailleurs dans le temps) à partir du résultat de son action de filtrage sur l'excitation.

Etant donné que nous étudions la parole au moyen d'une cochlée artificielle, nous adopterons une définition légèrement différente des formants. On filtre le "spectre" $F(n)$ par un filtre Passe-Bande adéquat et on dit que les maxima de la courbe $F_1(n)$ obtenue ainsi indiquent la position des formants. Un formant est alors caractérisé par sa position et son amplitude. Bien entendu, pour une courbe $F(n)$ donnée, un filtre Passe-Bande donne certains résultats et un autre filtre des résultats différents. Tout le problème est donc de déterminer le ou les filtres Passe-Bande. La figure 1 illustre cette façon de faire.



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Fig. 1



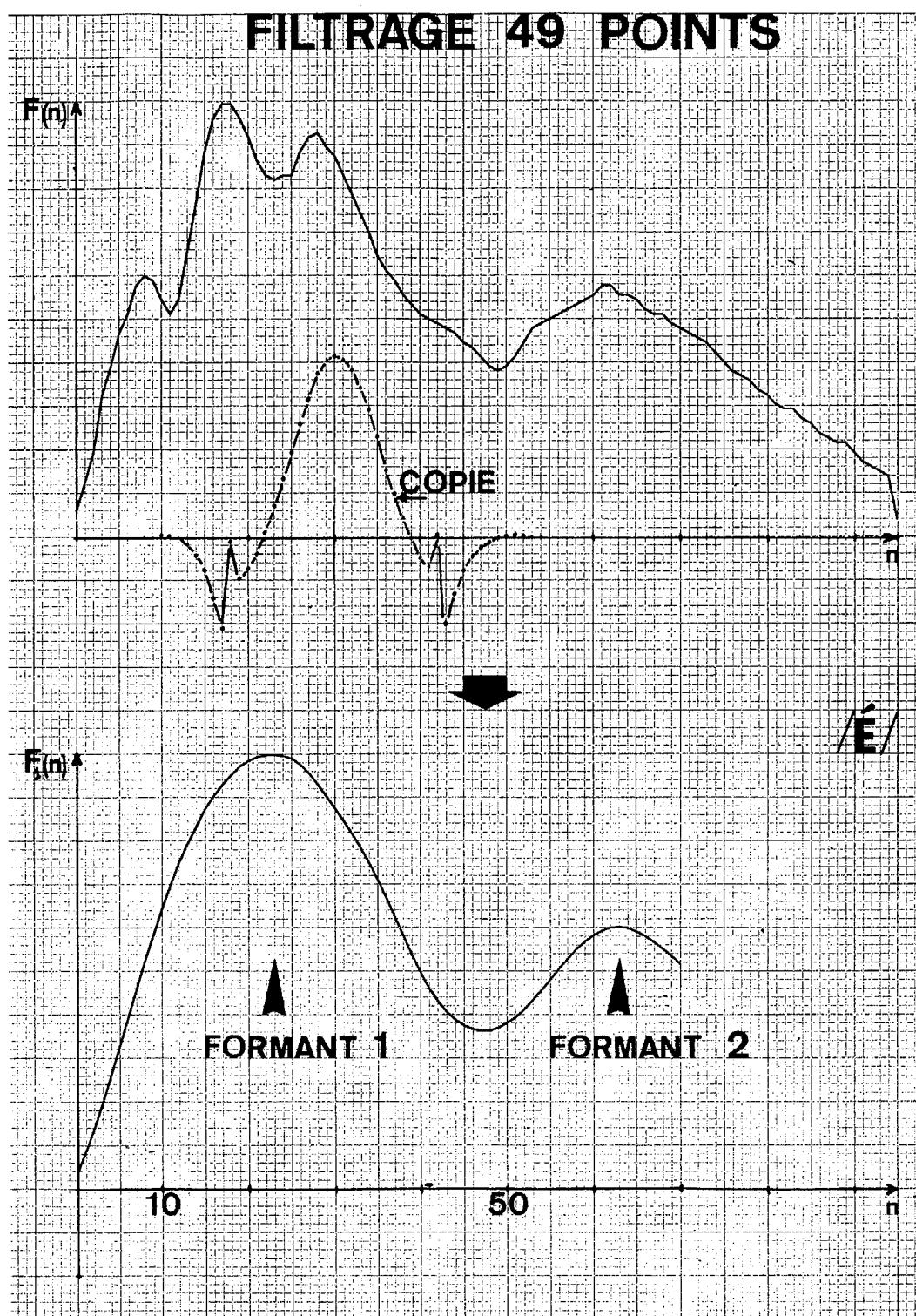
Etant donné que $F(n)$ est une fonction d'une variable discrète, il s'agit de filtrage numérique défini par des fonctions de transfert en z . On utilise des filtres non récursifs. Après de nombreux essais, il est apparu qu'un filtrage dit à 49 points, car il est caractérisé par une réponse impulsionnelle de 49 points, permettait d'obtenir dans tous les cas une localisation précise du premier formant et une localisation plus ou moins grossière du second. Les formants d'ordre plus élevé ne sont pas utiles pour la reconnaissance. La figure 2 donne un exemple. Un second filtrage dit à 29 points permet d'obtenir la position fine du second formant.

Ce problème de la détermination des formants peut être traité par tout un ensemble de filtrages linéaires, de détection, de produit, d'amplification non linéaire et de décision (recherche de maxima par exemple).

Depuis fort longtemps, il était apparu que la position des 2 premiers formants était liée à la nature des voyelles. Nous avons donc relevé les formants des voyelles du Français prononcées par 7 locuteurs (5 hommes et 2 femmes) dans des configurations variées : 190 syllabes couramment employées en Français.

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Fig. 2





RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

En moyenne au total chaque voyelle a été observée 100 fois environ. On a ainsi obtenu des tableaux constituant les planches 1 et 2. On peut estimer que l'erreur de mesure est de ± 1 filtre sauf pour le premier formant des voix de femmes, cas dans lequel elle s'élève à ± 2 filtres environ.

En regardant le tableau de la planche 1 (voix d'hommes) on se rend compte que :

- pour chaque voyelle, il existe 2 zones : une pour chaque formant. On peut dire que la voyelle est caractérisée par ces 2 zones, les formants de cette voyelle se produisant obligatoirement dans ces zones que nous appellerons zones formantiques
- la longueur moyenne des zones formantiques est la même pour les basses et les hautes fréquences,
- il y a un minimum de contraintes pour caractériser chaque voyelle. Par exemple la différence entre /E/ et /É/ porte sur le second formant seulement et celle entre /E/ et /EU/ sur le premier formant. On peut observer les couples de voyelles fermées-ouvertes qui se distinguent seulement par les zones de leur premier formant /É, È/, /E, EU/ et /O, Ò/,
- les limites entre les zones ont tendance à être indépendantes des voyelles, ainsi les limites n° 21 et 27 qui servent pour /I, U, OU, É, È/ et /O, Ò/,
- quand on regarde les tableaux relevés pour chacun des 5 locuteurs (non fournis ici) on se rend compte que la dispersion des formants dans les zones correspondantes est en général comparable à celle obtenue pour l'ensemble des 5 locuteurs.

En regardant le tableau de la planche 2 (voix de femmes) on se rend compte que comme pour les voix d'hommes, il semble qu'on puisse déterminer de nouveau 2 zones pour chaque voyelle. Toutefois, au lieu de faire cette opération indépendamment des résultats obtenus pour les voix d'hommes, on peut remarquer que



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

les points relevés pour les voix de femmes ont tendance à se situer dans le haut des zones formantiques obtenues avec les voix d'hommes et même à combler certains vides quasiment inutilisés ($n = 21, 22$ par exemple). Cependant, pour autant que l'on puisse juger avec le peu de points dont on dispose, les formants des voix de femmes se situent dans les zones formantiques obtenues pour les voix d'hommes si on prend la précaution d'en élargir certaines.

Il faut bien comprendre que toutes ces mesures ont été faites pour des voyelles accentuées, c'est-à-dire en quelque sorte bien prononcées. Pour des voyelles inaccentuées, il y aurait beaucoup plus de confusions surtout entre voyelles ouvertes et fermées. Cela porte d'ailleurs peu à conséquence pour la reconnaissance des mots.

La différence entre voix d'hommes et de femmes porte sur la valeur du fondamental et la position des formants. Toutefois, l'augmentation moyenne de la position des formants ne semble pas incompatible avec des critères de reconnaissance indépendants de la valeur du fondamental.

On a relevé également le second formant des voyelles nasales et le formant unique des consonnes fricatives. Là encore on voit apparaître des zones formantiques.

3.-AUTRES CRITERES ET DECISION

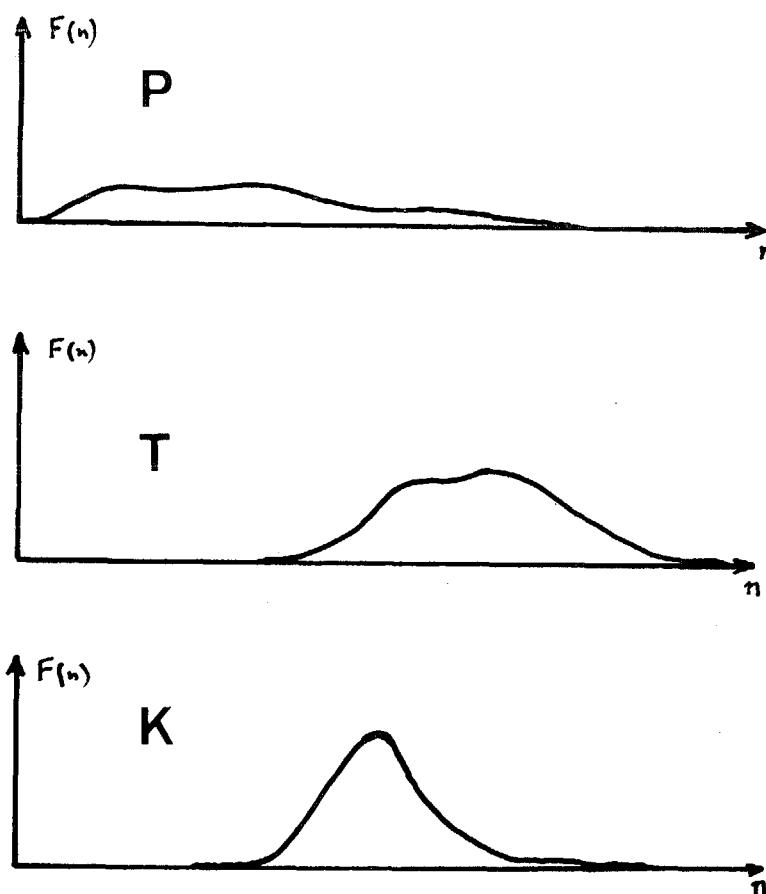
La position des formants n'est pas le seul critère. Pour les phonèmes soutenus, il faut y ajouter la nature de l'excitation (voix, friction ou voix plus friction) et le critère de nasalisation des voyelles. Pour les phonèmes non soutenus (consonnes explosives), il faut faire intervenir 3 critères se succédant dans le temps :



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

une phase soutenue (silence pur, voisé ou nasalisé), une explosion et la nature de la transition vers le phonème soutenu suivant (ou précédent). Ce dernier critère est mal connu : on l'a donc étudié plus particulièrement, tout au moins qualitativement, c'est-à-dire sans chiffrer exactement ses limites. La figure 3 illustre ce qui se passe juste après l'explosion.

Fig. 3



Tous ces critères sont recherchés en parallèle, c'est-à-dire indépendamment les uns des autres. On désigne alors par décision la façon de reconnaître les phonèmes à partir des différents critères mis en évidence.



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Actuellement, dans la maquette construite la décision sur la nature des phonèmes est prise de façon très simple : (figure 4) pour les phonèmes soutenus (voyelles et consonnes fricatives) on mesure le temps pendant lequel les critères caractéristiques sont vérifiés. Dès que ce temps devient supérieur à une certaine durée (appelée "durée imposée") on décide que le phonème a été reconnu. Pour les consonnes explosives, on décide qu'il y a eu présence dès qu'une explosion se produit encadrée par la phase soutenue et la phase transitoire adéquate, la nature de la phase soutenue étant décidée d'une manière tout à fait semblable à celle employée pour les phonèmes soutenus. Cette méthode de décision est fort simple mais même avec une prononciation soignée, elle conduit très fréquemment à reconnaître lors des transitions des phonèmes qui n'existent pas.

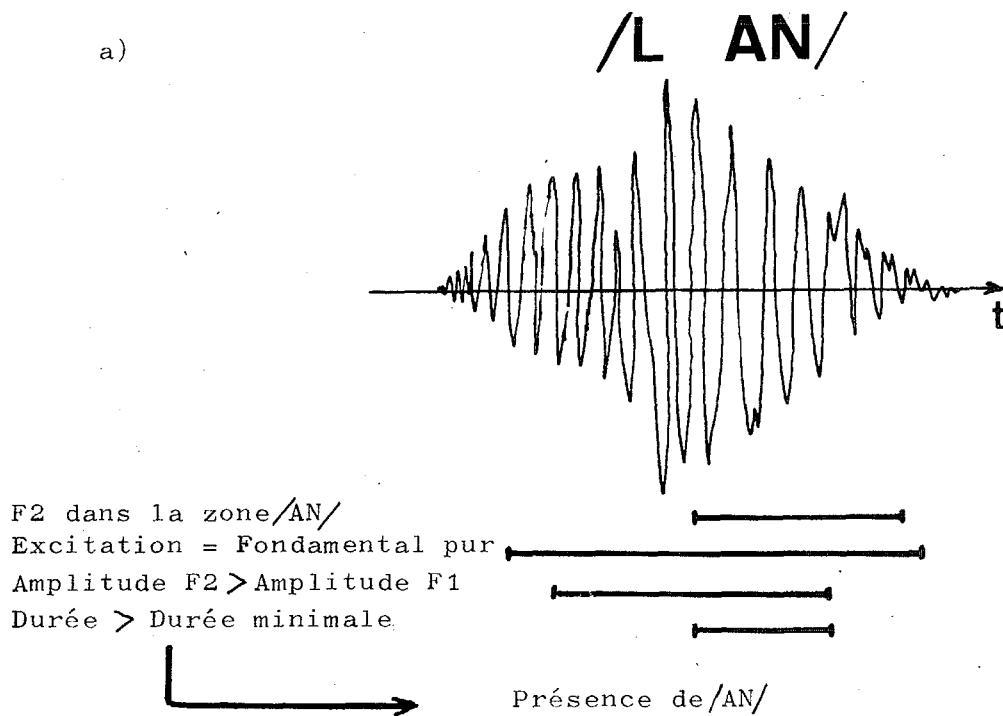
De même qu'une synthèse de parole par règle doit faire intervenir la prosodie (c'est-à-dire l'aspect temporel, l'énergie et la variation du fondamental) pour donner des résultats pas trop désagréables à l'oreille, de même la reconnaissance des phonèmes doit également tenir compte de la prosodie et en particulier des variations d'énergie (notion de syllabe) et de variations du fondamental. On montre sur la planche 3 comment se ferait l'intervention de l'énergie dans les décisions à prendre sur la nature des phonèmes constitutifs du mot "château". Sommairement, on peut dire que les décisions relatives aux phonèmes stationnaires doivent être prises pendant les périodes de stabilité des formants, l'énergie étant proche d'un maximum ou sur un palier. Pour les consonnes explosives, le mode de décision adopté reste valable. Il faut ajouter que dans une langue donnée la probabilité de succession des phonèmes de différentes classes à l'intérieur d'une même syllabe est un élément dont il faut tenir compte : en particulier il n'y a qu'une seule voyelle (ou diphthongue) par syllabe. Enfin, on n'est pas obligé au niveau phonème de prendre des décisions fermes (c'est-à-dire tout ou rien) : il est certainement plus intéressant de chiffrer



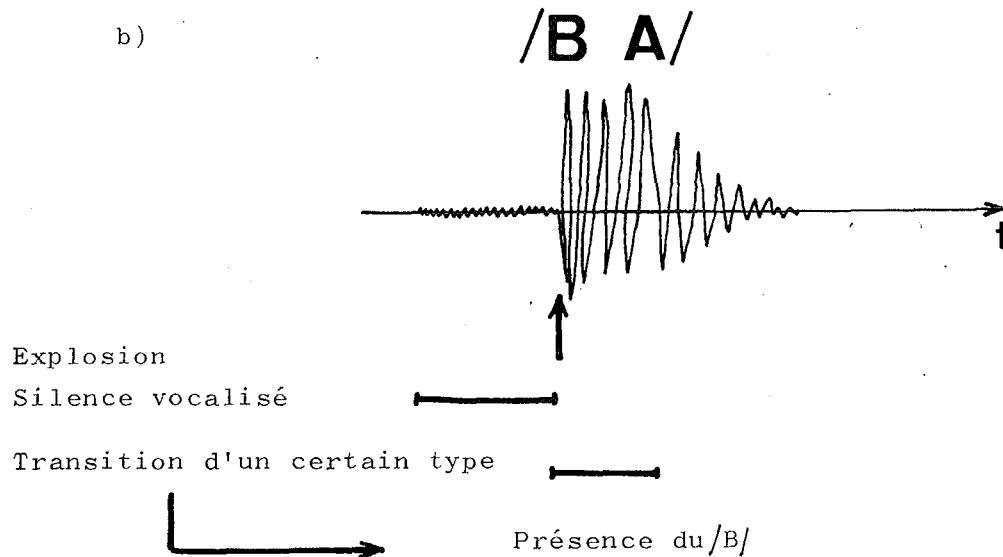
RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Fig. 4

a)



b)



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

la probabilité de présence de tel ou tel phonème. Cela peut d'ailleurs être approximativement fait une fois pour toutes, c'est-à-dire par exemple que si on a reconnu un /A/, on en déduit /A/ 60%, /EU/ 20% et /Ô/ 10 %, sans se préoccuper de savoir si ce /A/ était plus proche d'un /Ô/ que d'un /EU/. La décision réelle est alors reportée au niveau du mot. Il ne faut pas oublier également, que même avec une prononciation soignée de nombreux phonèmes, 40% environ sont mal prononcés, si ce n'est tout à fait omis.

A l'heure actuelle, pratiquement tous les systèmes de reconnaissance de parole visent à reconnaître des mots isolés appartenant à un vocabulaire limité et notre reconnaissance de phonème doit être replacée dans ce cadre. Il faudra alors faire également intervenir la prosodie au niveau du mot, c'est-à-dire le nombre de syllabes et la place de l'accent (ou des accents) si on veut obtenir de bons résultats sans demander d'efforts trop importants aux locuteurs.

4. -RESULTATS

Une maquette de reconnaissance des phonèmes a été construite, plus d'ailleurs comme un moyen d'étude qui a permis la recherche des critères que comme un appareil devant fournir à tout prix les meilleurs résultats possible. De nombreux circuits sont simplifiés à l'extrême au détriment des résultats. C'est la partie relative à la reconnaissance des consonnes explosives qui a été le plus sommairement approximée. L'étude des semi-voyelles n'ayant point été faite, rien n'a été construit pour les reconnaître.

Dans le domaine de la parole, les résultats sont difficiles à chiffrer surtout pour un système qui a une dynamique aussi limitée que la nôtre et on a seulement essayé de tirer



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

des conclusions théoriques plutôt que des résultats de test statistiques. Le tableau 1 donne quelques exemples de résultats pour des mots prononcés isolément et soigneusement. À part les erreurs sur les consonnes explosives et certaines confusions entre voyelles qui sont dues aux simplifications volontaires du système, la plupart des autres erreurs sont dues à ce que la décision ne fait pas intervenir la prosodie.

Ces résultats permettent d'affirmer qu'un système de reconnaissance de mots isolés appartenant à un vocabulaire limité, prononcés sans soin particulier par un grand nombre de locuteurs (hommes et femmes) est parfaitement concevable à l'heure actuelle, la complexité et le prix demeurant raisonnables.

5.-APPLICATIONS

Le principal intérêt de la reconnaissance de la parole est que ce signal représente pour l'homme un moyen naturel, rapide et demandant peu d'efforts pour communiquer sa pensée. De plus, la parole est possible sans contact physique ou visuel.

Toutefois, il est clair qu'un système "comprenant" (et non pas "entendant") aussi bien qu'un être humain semble pour l'instant utopique et que les systèmes actuels ne visent qu'à la transmission d'ordre au moyen d'un vocabulaire relativement limité (200 mots par exemple), les mots étant prononcés séparément. Malgré cette restriction, les applications sont très nombreuses : en fait la reconnaissance de mots est intéressante chaque fois qu'il y a un grand nombre d'ordres différents à donner à une machine et qu'on veut réduire le temps nécessaire à l'apprentissage des utilisateurs. Comme toute technique nouvelle, la reconnaissance de la parole mettra un certain temps à s'implanter mais on peut penser que même limitée à la reconnaissance de mots isolés, elle connaîtra un grand essor.

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

ANNEXE A

PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Les principaux phonèmes de la langue française sont donnés ci-dessous. Ils sont répartis en différentes classes et un exemple est donné pour chacun. Le signe correspondant de l' alphabet phonétique international est donné lorsqu'il y a lieu.

Voyelles pures

[I]	<u>Lit</u>	/i/
[E]	<u>Tasser</u>	/e/
[E]	<u>Retire</u>	/ø/
[E]	<u>Cercle</u>	/ɛ/
[EU]	<u>Cœur</u>	/œ/
[A]	<u>Chat</u>	/a/
[O]	<u>Bordeaux</u>	/ɔ/
[O]	<u>Bordeaux</u>	/o/
[U]	<u>Du</u>	/ü/
[OÜ]	<u>Doux</u>	/u/

Voyelles nasales

/æ/	[IN]	<u>Pain</u>	confondus en français moderne
/œ/	[UN]	<u>Brun</u>	
/ɑ/	[AN]	<u>Plan</u>	
/ɔ/	[ON]	<u>Blond</u>	

Consonnes fricatives sourdes

[CH]	<u>Chat</u>	/ʃ/
[S]	<u>Son</u>	/s/
[F]	<u>Feu</u>	/f/

Consonnes fricatives sonores

[J]	<u>Jean</u>	/z/
[Z]	<u>Zéro</u>	/z/
[V]	<u>Var</u>	/v/
[R]	<u>Rond</u>	/r/



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Consonnes explosives sourdes

[P] Pas /p/

[T] Ta /t/

[K] Coq /k/

Consonnes explosives sonores

[B] Bon /b/

[D] Don /d/

[G] Gan /g/

Consonnes explosives nasales

[M] Mon /m/

[N] Non /n/

[NG] sing /ŋ/ en anglais, mais existe parfois en français sans être reconnue en tant que phonème : "longue"

[L] Long /l/

[Y] Oeil /y/

[W] Roi /w/

semi-voyelles (glides)

Pour chaque phonème, le caractère entre crochet [X] est la représentation que nous avons adoptée lors de cette étude : elle cherche à traduire le ou les lettres les plus employées en français pour décrire graphiquement le phonème. On rajoute si nécessaire une virgule entre 2 caractères pour éviter la confusion avec un caractère symbolisé par 2 lettres.

Ces signes [X] sont plus exacts que les signes de l'alphabet phonétique international car il n'y a aucune raison qu'un phonème (c'est-à-dire en fait les limites de ses critères) soit international.

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE



TABLEAU 1

Mot prononcé (orthographe normale en français)	Traduction phonétique	Sortie du système de reconnaissance (N signifie M ou N)
Chêne	/CHÈNE/	CHÈN
Guèpe	/GÈPE/	GÈP
Eve	/ÈV/	ÈV
Tasser	/TASÉ/	TARSE
Eté	/ÉTÉ/	ÉTÉ
Bandit	/BANDI/	O AN DI
Femme	/FAM/	FRA, N
Guèpe	/GÈP/	GÈP
Maïs	/MAIS/	NAIS
Jeter	/JETÉ/	UJETÉ
Je jette	/JE JÈT/	JE LJET
Epouse	/ÉPOUZ/	É POU OZ
Meule	/MEUL/	NEU UN L
Chêne	/CHÈN/	CHEU ÈN
Chêne	/CHÈN/	CHAÈN
Bateau	/BATO/	EUATO
Grélon	/GRÉLON/	GRÉEILON
Chanter	/CHANTÉ/	CHÔ OU AN TÉ
Loup	/LOU/	LOU
Acheter	/ACHETÉ/	PACHEPÉ
Silence	/SILANS/	SIU LA ANOUS
Europe	/ERÔP/	KEORÔT



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Suite Tableau 1

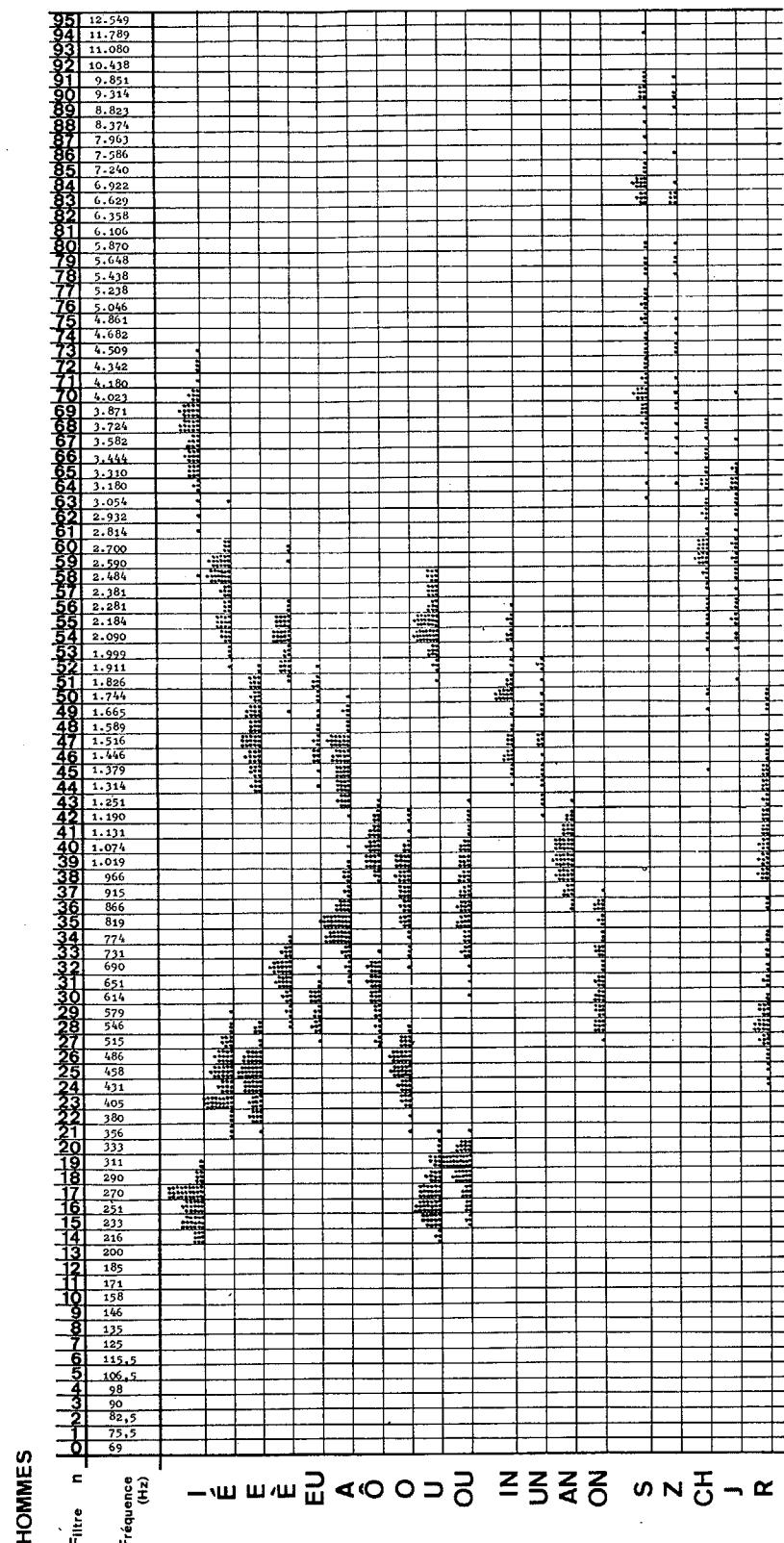
Mot prononcé (orthographe normale en français)	Traduction phonétique	Sortie du système de reconnaissance (X signifie M ou N)
Pâtre	/PATR/	PATR
Frène	/FRÈN/	FRAÈN
Cerise	/SERIZ/	SE ON RIVZ
Chanter	/CHANTE/	CHAN T EU
Aveu	/AVE/	AVE
Pécher	/PÉCHÉ/	PÉCHÉU
Acheter	/ACHETÉ/	ACHETÉ
Fanchon	/FANCHON/	FANCHON

Exemples de résultats. La liste de mots a été prononcée lentement et avec application par une seule personne!

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Planche 1

FORMANTS DES PHONEMES SOUVENTS RELIEVÉS POUR 5 VOIX D'HOMMES

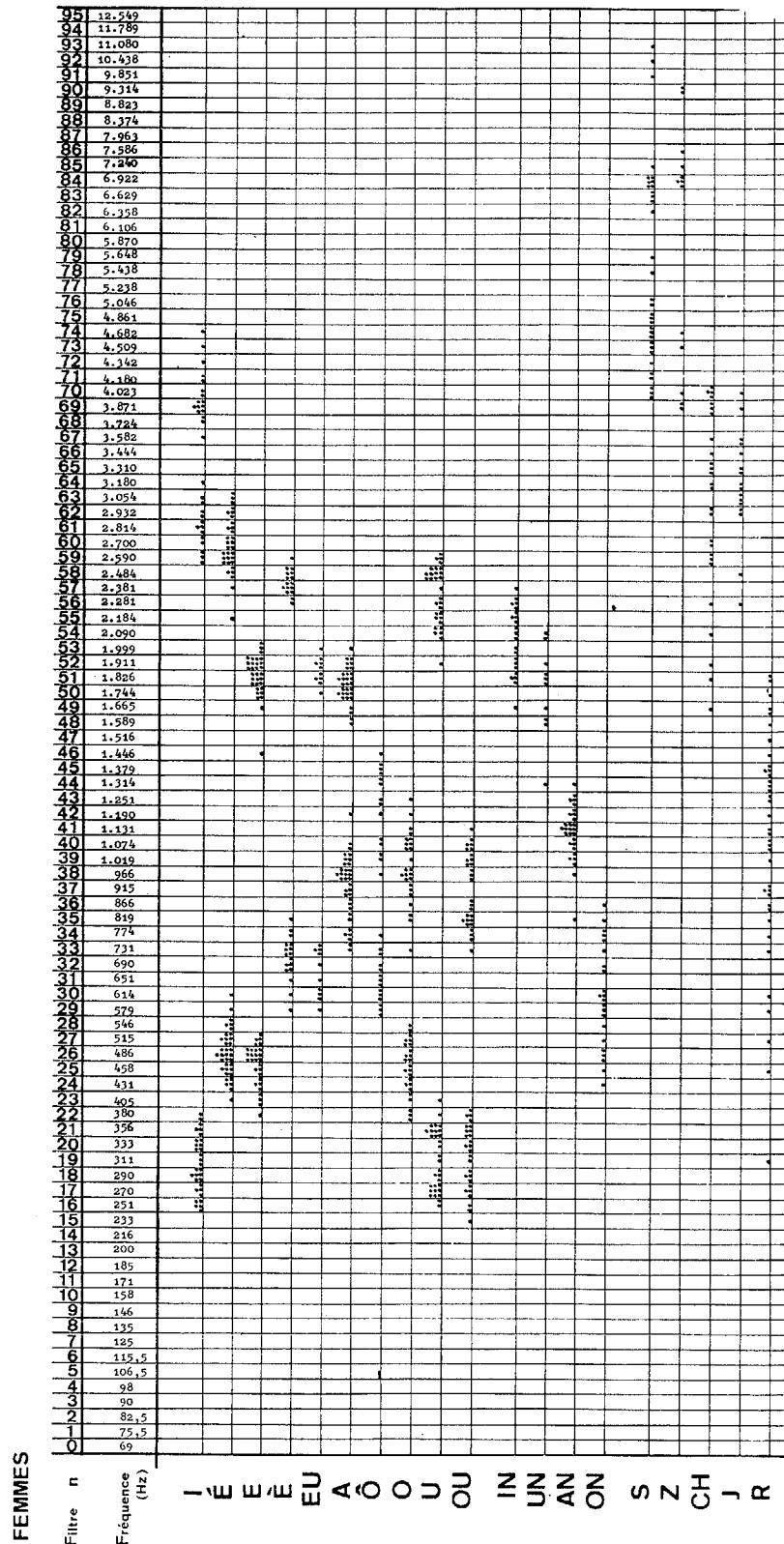




RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Planche 2

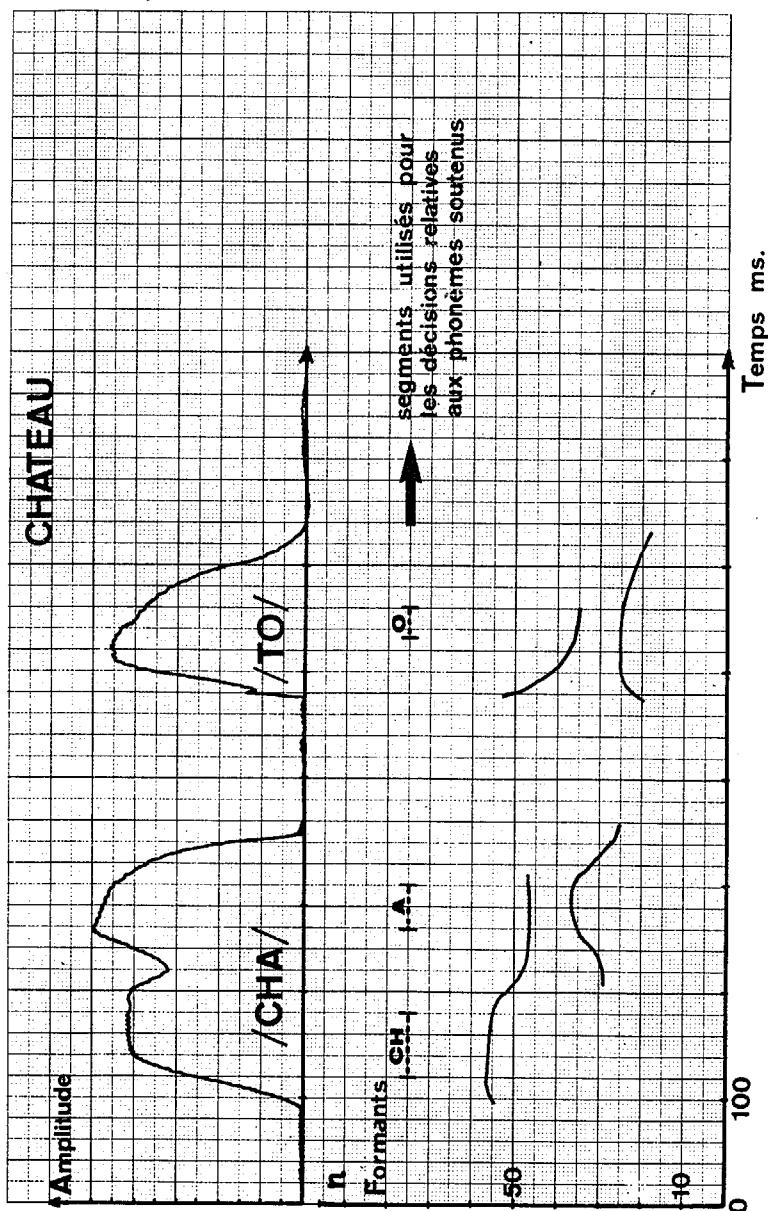
FORMANTS DES PHONEMES SOUTENUS RELEVES POUR 2 VOIX, DE FEMMES



RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

Planche 3

Influence de l'amplitude et de la notion de syllabe sur la décision. Exemple pour le mot "CHATEAU". On ne tient compte que des zones de formants stables correspondants à peu près à des maxima ou des paliers d'amplitude. Si on ne faisait pas intervenir l'amplitude on reconnaîtrait CH EU A TO (cas de la maquette actuelle).





RECOGNISSEMENT DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. VON BEKESY
 "Experiments in hearing"
 Mc Graw Hill, New York 1960
- [2] J.L. FLANAGAN
 "Models for approximating basilar membrane displacement"
 Bell System Techn. J. 39, 1136-1191 (1960) - 41,
 959-1009 (1962)
- [3] S.J. CAMPANELLA, D. PHYFE
 "Application of a model of the analog ear to speech
 signal analysis"
 IEEE Trans. Audio Electro-Acoustics, AU 16, 26-35
 (1968)
- [4] A.W.F. HUGGINS
 "On the perception of temporal phenomena in speech"
 J. Acoust. Soc. Amer. 51, 1279-1289 (1972)
- [5] A.M. LIBERMAN
 "Some results of research on speech perception"
 J. Acoust. Soc. Amer. 29, 117-123 (1957)
- [6] W.S. RHODE
 "Observations of the vibration of the basilar membrane
 in squirrel monkeys using the Mössbauer technique"
 J. Acoust. Soc. Amer. 49, 1218-1231 (1971)
- [7] B.M. JOHNSTONE, K.L. TAYLOR, A.J. BOYLE
 "Mechanics of the guinea pig cochlea"
 J. Acoust. Soc. Amer. 47, 504-509 (1970)

RECONNAISSANCE DES PHONEMES DE LA LANGUE FRANCAISE

[8] W.A. AINSWORTH

"Perception of synthetized isolated vowels and h-d words
as a function of fundamental frequency"

J. Acoust. Soc. Amer. 49, 1323-1324

[9] P. ALINAT

"Essai de reconnaissance des phonèmes au moyen d'une
cochlée artificielle"

Troisième Colloque sur le Traitement du Signal et
ses Applications - NICE du 1er au 5 juin 1971