Utilisation d'un système de reconnaissance de la parole comme aide à l'acquisition orale d'une langue étrangère

M. T. Janot-Giorgetti, M. Lamotte

► To cite this version:

M. T. Janot-Giorgetti, M. Lamotte. Utilisation d'un système de reconnaissance de la parole comme aide à l'acquisition orale d'une langue étrangère. *Revue de Physique Appliquée*, 1983, 18 (9), pp.595-610. 10.1051/rphysap:01983001809059500 . jpa-00245121

HAL Id: jpa-00245121

<https://hal.science/jpa-00245121>

Submitted on 1 Jan 1983

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
43.70

Utilisation d'un système de reconnaissance de la parole comme aide à l'acquisition orale d'une langue étrangère

M. T. Janot-Giorgetti (*) et M. Lamotte

Centre de Recherche en Automatique de Nancy, E.R.A. 905,
Université de Nancy I, B.P. n° 239, 54506 Vandœuvre-Lès-Nancy Cedex, France

(Reçu le 1^{er} juin 1982, révisé le 23 mars 1983, accepté le 27 mai 1983)

Résumé. — Le système présenté ici est essentiellement une méthode de reconnaissance de la parole implantée sur un microprocesseur. Cette méthode est spécialement conçue pour l'aide à l'acquisition orale d'une langue étrangère et permet de signaler automatiquement à « l'étudiant » les fautes de prononciation, préalablement répertoriées, sur les mots d'un lexique constituant une « leçon ». Des tests effectués sur un important corpus représentatif des difficultés phonétiques et d'accent tonique de la langue anglaise, montrent les qualités et les limites du procédé.

Abstract. — A computerized system of assistance in oral learning of a foreign language is presented. In this system a speech recognition method has been implemented on a microprocessor. Mispronunciations are automatically detected among those previously memorized in the system for each word of a given « lesson ». Difficulties in phonetics and position of the stressed syllables which are typical of the spoken english language have been tested to determine the effectiveness of the system.

1. Introduction.

Un des apports de la linguistique moderne est la mise en relief de l'importance primordiale de l'aspect oral de toute langue. Or, l'acquisition d'une prononciation correcte et d'un bon accent, ainsi que la maîtrise de l'expression orale sont souvent difficiles dans une langue étrangère. L'introduction des techniques audiovisuelles en pédagogie des langues a été une tentative dans cette voie. L'ordinateur, également, peut apporter une aide et on a vu, durant ces dix dernières années, se multiplier les projets d'Enseignement Assisté par Ordinateur, principalement aux Etats-Unis mais aussi au Japon et en Europe.

Parmi ceux qui s'adressent aux étudiants de langues, citons :

— le système PLATO développé à l'Université de l'Illinois (Etats-Unis) pour le français, l'espagnol, l'allemand, le russe, l'hébreu, le latin et même l'esperanto [1];

— le projet JACUDI, au Japon, implanté à l'Institut

Kanda à Tokyo, pour l'anglais, l'allemand, le français, l'espagnol et le chinois (cité par Simon J. C. [2]);

— le projet OPE, à l'Université de Paris VII, pour l'anglais [3];

— les travaux de Nelles R. et Sennekamp M. [4] à l'Université de Fribourg, en R.F.A., sur le français.

Ces réalisations présentent un intérêt pédagogique certain, mais limité par le fait qu'elles ne s'appliquent qu'à la langue écrite. Il nous a semblé intéressant d'apporter à l'Enseignement Assisté par Ordinateur le concours de la reconnaissance automatique de la parole, offrant ainsi à l'élève un contrôle de son expression orale [5].

A notre connaissance, peu de recherches ont été faites dans cette voie. On note les travaux de Nordmann B. J. [6], à l'Université de l'Illinois, qui a proposé un projet limité à la simulation sur écran des différences de prononciation entre le professeur et l'élève, de telle sorte que ce dernier puisse se rapprocher le mieux possible du modèle proposé.

De leur côté, Kalikow D. W. et Swets I. A. [7] présentent un système de correction phonétique mis au point chez « Bolt Beranek and Newman Inc. », à Cambridge (aux Etats-Unis) pour l'apprentissage d'une langue étrangère. Il s'agit en fait, seulement d'un instructeur automatique de prononciation utilisant les capacités de mémorisation de données.

(*) Nouvelle adresse : Laboratoire de la Communication Parlée, E.N.S.E.R.G., 23 avenue des Martyrs, 38031 Grenoble Cedex, France.

Signalons aussi le système A.P.I. (Automated Pronunciation Instruction) développé dans le cadre du projet ARPA, initialement pour l'apprentissage du français par des espagnols, puis, dans sa seconde version, pour la rééducation des enfants mal-entendants. Le T.T. System (Teaching Training) conçu au Japon [8] est également un appareil de rééducation vocale assistée par ordinateur.

En France, des recherches récentes ont été entreprises au C.N.E.T. par Lebras J. [9] qui a mis en œuvre un algorithme rendant compte de certaines erreurs de prononciation de sujets anglophones apprenant le français (en particulier des fautes d'aspiration sur les consonnes occlusives sourdes et des fautes de diptongaison).

On peut citer également, quoiqu'il s'agisse d'un enseignement de physique et non de langues, le processus de reconnaissance de parole continue réalisé par Bellissant C. [10] dans le cadre d'un dialogue d'enseignement assisté par ordinateur.

Le système qui fait l'objet de ce travail est baptisé MicroLEA. Ses premiers utilisateurs seront les élèves dont s'occupent les chercheurs de l'Institut de Cybernétique de Paderborn, en République Fédérale Allemande. C'est la raison pour laquelle les premiers essais [11] ont porté sur une langue normalisée (la langue internationale esperanto) que ces enseignants-chercheurs apprennent à des élèves d'une dizaine d'années dans le but de leur faciliter l'acquisition ultérieure d'une langue étrangère. MicroLEA a ensuite été testé sur d'autres langues (en particulier l'anglais, et également le français étudié par des anglophones).

Cet article présente le système MicroLEA et son application à l'apprentissage de la langue anglaise par des francophones. Les résultats concernant l'esperanto ont déjà été publiés [13].

2. Présentation du système MicroLEA.

Pour réaliser un appareil peu volumineux, simple et robuste, nous avons choisi, pour traiter le signal vocal, un analyseur à 8 canaux conçu au laboratoire par Vigneron C. [12] et nous avons construit un ensemble préamplificateur, accentuateur, analyseur, convertisseur analogique-numérique qui tient sur deux cartes (Fig. 1). Bien que le système ne dispose ainsi que d'informations spectrales rudimentaires, les expériences en reconnaissance de parole menées au labo-

ratoire du C.R.A.N. [14, 15] ainsi que par d'autres équipes (du L.I.M.S.I. à Orsay ou du C.N.E.T. à Lannion, par exemple) ont permis de conclure à la validité d'une telle analyse [16].

Le traitement numérique est effectué par un microprocesseur qui, entouré de ses périphériques classiques, constitue une configuration informatique complète sur laquelle il a été possible d'implanter un programme conçu en fonction de l'objectif pédagogique à atteindre, c'est-à-dire permettre à l'élève de savoir si sa prononciation est correcte et, dans le cas contraire, connaître sa faute. L'idée de base de MicroLEA est très simple : si on « apprend » à MicroLEA une liste de mots bien prononcés et également ces mêmes mots entachés des erreurs les plus courantes, il lui est ensuite possible de « reconnaître » ces fautes, grâce au programme de reconnaissance. En cas de prononciation erronée de l'élève, le système soulignera dans le libellé orthographique du mot qui apparaît sur l'écran de visualisation, soit le (ou les) phonème mal prononcé, soit une faute d'accent tonique. S'il s'agit d'une faute non prévue, il indiquera seulement que la prononciation est mauvaise. De plus, la réaudition de la voix du professeur, enregistrée sur cassette, aide l'élève à s'auto-corriger.

Les objectifs ainsi fixés impliquent que le système puisse être utilisé par un grand nombre de personnes différentes et également qu'il soit commode d'emploi aussi bien pour l'élève que pour le professeur (dans la phase « conception de la leçon »). Enfin, il paraît important, d'un point de vue didactique, de réaliser un fonctionnement en temps réel.

Sur le plan informatique, on s'est donc efforcé de remplir ces trois conditions. Si les deux dernières sont relativement faciles à satisfaire (quoique contraignantes), il n'en est pas de même pour la première car il n'est pas aisé de réaliser un système multilocuteur. En effet, toutes les expériences effectuées en reconnaissance de parole (y compris nos propres essais [17]) montrent bien que le taux de reconnaissance chute sensiblement lorsque le locuteur qui utilise l'appareil comme système de reconnaissance est différent de celui qui a réalisé l'apprentissage. La solution que nous proposons ne résoud pas complètement ce problème mais les résultats obtenus montrent qu'elle en constitue une assez bonne approche. En effet, les performances du système se trouvent nettement améliorées lorsque l'apprentissage est effectué avec plusieurs locuteurs

Fig. 1. — Schéma d'ensemble du matériel inclus dans le système MicroLEA.

[General description of the MicroLEA hardware.]

4) Constituer un « répertoire » des mots de la leçon, indiquant, pour chaque mot, le nombre de versions (bonnes et erronées) enregistrées et les numéros repérant ces mots (commande **L**).

5) Procéder à l'enregistrement sur cassette du « répertoire » et de l'ensemble des données de référence mémorisées pendant la phase d'apprentissage.

6) Définir la durée Z_x du déroulement de la cassette pour passer d'un mot au suivant.

7) Choisir le nombre de répétitions V_n offertes à l'élève dans le cas de mauvaise prononciation. De plus, s'il estime qu'une bonne prononciation n'est acquise avec certitude et de façon durable qu'après plusieurs essais, il peut choisir le nombre de répétitions W_n offertes à l'élève dans le cas d'une bonne prononciation.

8) Procéder à l'écriture sur cassette de ces paramètres.

9) Enregistrer sa voix sur la même cassette pendant le temps Z_x .

10) Demander éventuellement un listing des mots de référence (commande **W**).

Fig. 3. — Schéma descriptif des opérations à effectuer par le professeur lors de la conception d'une leçon.

[Sketchy description of what to do for the recording of one lesson in MicroLEA memories.

Cette phase de conception étant achevée, il restera, le jour de la leçon, à charger les mémoires de MicroLEA en procédant à la lecture des données numériques (commande **F**). C'est l'élève qui le fait lorsque le système le lui demande au début de la leçon.

3.2 LE TRAVAIL DE L'ÉLÈVE. — Quant à l'élève, il travaille de la façon suivante [Fig. 4] : après avoir

Fig. 4. — Illustration du déroulement d'une leçon pour un élève utilisant MicroLEA.

[Pictural representation of the use of MicroLEA by a « student ».

entendu le mot « Laser », par exemple, il le dit à son tour dans un microphone, puis regarde sur la console de visualisation quel est le message délivré par MicroLEA.

* Si sa prononciation a été incorrecte, il verra BAD suivi de REPEAT et le libellé du mot souligné à l'endroit de la faute de prononciation.

Par exemple LASER s'il a dit /lezə/ au lieu de /leizə/

ou bien LASER s'il a placé l'accent tonique sur la dernière syllabe au lieu de la première.

* Si le mot prononcé s'éloigne trop du modèle proposé par le professeur, en particulier s'il présente une faute non prévue par l'apprentissage, il n'y aura que le message BAD REPEAT sans autre indication.

* Si sa prononciation est correcte, il lira GOOD.

Dans les deux premiers cas, il entendra automatiquement la voix de son professeur répéter le mot étudié.

Dans le dernier cas, il peut être invité :

— soit à passer directement à l'audition du mot suivant et à la suite du travail ;

— soit à répéter le mot immédiatement (et ceci W_n fois) si le professeur le désire.

Il lira alors le message GOOD suivi de REPEAT tant qu'il lui sera demandé de répéter et seulement le message GOOD lorsque le moment sera venu de passer au mot suivant.

Toutes ces possibilités font de MicroLEA un appareil très simple qui permet d'instaurer un vrai dialogue avec l'élève, même en l'absence du professeur.

4. Le processus de reconnaissance : Résultats.

Cette partie de MicroLEA correspondant au processus de reconnaissance, a été testée séparément pour avoir des informations quantitatives sur sa validité et, en particulier, sur son aptitude à séparer deux mots phonétiquement très voisins. Des essais systématiques portant sur un vaste corpus en anglais (de l'ordre de

300 mots) ont été effectués avec l'aide des enseignants-chercheurs du Centre de Pédagogie et d'Applications Pédagogiques en Langues de Nancy.

Les difficultés de prononciation que l'anglais présente pour un français sont sur trois niveaux :

— au niveau de certains sons correspondant à des positions articulatoires malaisées pour un Français. Les bases articulatoires du français et de l'anglais sont en effet très différentes, parfois complètement opposées ;

— au niveau du mot car la mise en relief de certaines unités plus grandes que les phonèmes (diphones ou syllabes, par exemple) ne suit pas de règles bien établies. En anglais, la place de l'accent tonique varie d'un mot à l'autre et, de plus, c'est un phénomène phonétique porteur de signification. Il joue donc un rôle linguistique important qu'il importe de bien connaître (c'est ainsi que le mot « export » est un substantif qui signifie « exportation », si l'accent expiratoire porte sur la première syllabe, ou un verbe signifiant « exporter » si on met l'accent sur la deuxième syllabe [23]) ;

— au niveau de la phrase car, en plus de « l'accent de mot » (suivant la terminologie traditionnelle [24]), il existe un rythme et une intonation propres à l'anglais et difficiles à acquérir pour un francophone.

Seuls les deux premiers points seront abordés ici puisque le système ne traite pour le moment que des mots isolés.

Les listes de mots-tests utilisés sont extraites d'un manuel de phonétique et de phonologie anglaise [25], rédigé à l'intention de francophones. Le tableau I illustre, par des exemples de mots, les oppositions consonantiques fondamentales de l'anglais, le tableau II les oppositions vocaliques et le tableau III

Tableau I. — *Les oppositions consonantiques fondamentales de l'anglais.*

[Basic consonantal oppositions in English.]

Groupe n° 1	b b	≠ p ≠ m	bin boor	pin moor	cub rib	cup rim
Groupe n° 2	d d	≠ t ≠ n	down dame	town name	bid bead	bit bean
Groupe n° 3	n g	≠ ŋ ≠ k	ton goat	tongue coat	sin bag	sing back
Groupe n° 4	v z	≠ f ≠ s	van rise	fan rice	leave seize	leaf cease
Groupe n° 5	z s	≠ ʒ ≠ θ	breeze sin	breathe thin	sees force	seethe fourth
Groupe n° 6	ʃ dʒ	≠ tʃ ≠ tʃ	ship Jane	chip chain	wish age	witch "h"
Groupe n° 7	tʃ dʒ	≠ tr ≠ tr	chain Jane	train train	chick Jim	trick trim
Groupe n° 8	dʒ h	≠ dr ≠ φ (=0)	Jane hair	drain air	jam hedge	dram edge

Tableau II. — *Les oppositions vocaliques fondamentales de l'anglais.*

[Basic vocalic oppositions in English.]

Groupe n° 1	i: i:	≠ i ≠ iə	leave bee	live beer	sheep fee	ship fear
Groupe n° 2	iə i	≠ eə ≠ e	beer pin	bear pen	cheers bitter	chairs better
Groupe n° 3	e ei	≠ ei ≠ ai	pen pane	pane pine	pepper fate	paper fight
Groupe n° 4	e ə	≠ ə ≠ a:	pan ham	pan harm	mess hat	mass heart
Groupe n° 5	ɑ: ɑ:	≠ ɔ ≠ ɔ:	guard card	god cod	cart cot	cot
Groupe n° 6	ɔ ɔ:	≠ ɔ: ≠ ɔ:	cod sod	cord sword	cot pot	court port
Groupe n° 7	ɔ ɔ:	≠ ou(əu) ≠ ou(əu)	cod rod	code road	cot cock	coat coke
Groupe n° 8	ɔ: ou(əu) ou(əu)	≠ ou(əu) ≠ au	ball tone	bowl town	cork boat	coke bout
Groupe n° 9	u u	≠ u: ≠ ə	full good	fool god	pull could	pool cod
Groupe n° 10	u u:	≠ ou(əu) ≠ ou(əu)	full foal	fool foal	pull pool	pool pole
Groupe n° 11	u: u:	≠ ou(əu) ≠ uə	tool two	toll tour	rule cue	roll cure
Groupe n° 12	ʌ ʌ	≠ ɜ: ≠ ə	gull cub	girl cab	bud cup	bird cap
Groupe n° 13	ʌ ʌ	≠ ɑ: ≠ ɔ	bun rub	barn rob	cup bus	carp boss
Groupe n° 14	ʌ ɑ:	≠ ɔ: ≠ ɔ i	bud corn	board coin	cut caught	caught
Groupe n° 15	aɪ ei	≠ aɪə ≠ eiə	tie play	tyre player	lie lie	liar liar
Groupe n° 16	aɪə ou(əu) ou(əu)	≠ eiə ≠ ouə	liar low	layer lower	mow mow	mower mower
Groupe n° 17	əu aɪə	≠ əuə ≠ uə	bow tyre	bower tower	buyer buyer	bow bow

Tableau III. — *Les voyelles et les diphtongues anglaises.*

[Basic consonantal oppositions in English.]

i:	bead
i	bid
iə	beard
ei	bade
e	bed
ɛə	bear
æ	bad
qi	buy
qu	bowed
q:	bard
ɔ	boss
ɔi	boy
ɔ:	board
ou	bow
u	bull
uə	boor
u:	bood
ə:	bird
ʌ	bud
ə	cup-board
eiə	payer
aɪə	buyer
ɔiə	employer
quə	power
ouə	grower

concerne les voyelles et diphtongues anglaises. Ces mots sont généralement de durées voisines et ils ne diffèrent, deux à deux, que par des paires minimales.

Les conditions expérimentales sont les suivantes :

— les mots du lexique-référence ont été prononcés par une Anglaise, puis répétés par un Anglais et enregistrés sur cassette ;

— l'apprentissage par MicroLEA a été fait à partir de la cassette, par groupe de 8 mots pour se placer dans les conditions dans lesquelles le système travaille effectivement lors d'une leçon (les groupes sont numérotés) ;

— la reconnaissance se fait également à partir de cette cassette, apprentissage et reconnaissance utilisant le même locuteur.

Les taux de reconnaissance sont établis sur dix essais avec la voix féminine et dix essais avec la voix masculine pour chacun des mots.

Pour les mots du tableau I (groupes n° 1, 2, 3, 6, 7, 8), ils sont de 100 % aussi bien pour la voix masculine que pour la voix féminine.

— Pour le groupe n° 4 : 97 % pour la voix masculine, 92 % pour la voix féminine, par suite de confusions entre FAN et VAN, LEAVE et LEAF.

— Pour le groupe n° 5 : 92 % pour les 2 voix, par suite de confusions entre SEES et SEETHE, SEETHE et SEES ou BREATHE.

Pour les mots du tableau II (groupes n° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17), on obtient encore 100 % pour les 2 voix. Pour les groupes n° 8 et 11, seulement 95 %.

Pour les mots du tableau III, les taux de reconnaissance obtenus sont de 100 % pour tous les groupes.

Il semble que l'on puisse attribuer la plupart de ces confusions à une mauvaise acquisition (soit en apprentissage, soit en reconnaissance) lorsque le mot commence (ou finit) par un phonème peu « énergétique » tel que /f/ ou /l/. En effet, le processus d'acquisition est déclenché (ou arrêté) lorsque l'énergie recueillie par les filtres est supérieure (ou inférieure) à un seuil déterminé expérimentalement. On minimise effectivement ces confusions en prenant en compte systématiquement quelques échantillons supplémentaires en début et en fin de mot.

Par contre, pour les confusions portant sur des phonèmes autres que le premier ou le dernier du mot, aucun remède n'a été trouvé. Les tests effectués avec une analyse à partir d'un plus grand nombre de filtres (16 au lieu de 8) n'ont pas apporté l'amélioration escomptée.

Pour chaque mot à reconnaître, le processus de reconnaissance inscrit sur l'écran de visualisation les trois mots du lexique déterminés comme les plus proches du mot prononcé au sens du score $S^{(1)}$ de la comparaison dynamique. Ces trois mots sont classés

dans l'ordre des taux de dissemblance croissants et les valeurs numériques des scores sont fournies. La connaissance de ces scores est intéressante car elle permet de montrer la cohérence des résultats obtenus. On constate que le taux de dissemblance est petit lorsque le mot du lexique classé en tête est identique au mot à reconnaître. Les scores deviennent relativement peu élevés lorsqu'il s'agit de deux mots phonétiquement voisins (VAN, FAN ou LEAVE, LEAF, etc...). Par contre, les taux de dissemblance obtenus deviennent très grands lorsque les mots comparés sont très différents. Ceci apparaît sur les exemples typiques des tableaux matriciels IV, V, VI, VII où les éléments diagonaux sont effectivement les plus petits et où figurent peu d'éléments non nuls loin de la diagonale.

Les mots phonétiquement voisins (tels que VAN et FAN du tableau IV) étant écrits l'un derrière l'autre dans les lexiques, il en résulte effectivement que les scores classés deuxième dans ces tableaux font surtout apparaître des éléments proches de la diagonale. Les scores classés troisième apparaissent un peu plus loin.

Ainsi qu'il a déjà été dit, la phonématique de l'anglais n'est pas le seul problème rencontré par les anglicistes. Tout aussi difficile est l'acquisition d'un bon accent tonique. Or, ceci est fondamental. En effet, ainsi que l'indique Martinet A. [26] : « Un mot mal accentué n'est pas compris même si les phonèmes qui le composent sont prononcés à la perfection ».

L'expérience montre que si on « apprend » à MicroLEA des prononciations erronées du point de vue de l'accent tonique, il lui est ensuite possible de reconnaître ces fautes. Ceci a été vérifié sur des mots (Tableau VIII) pour lesquels le « pattern » accentuel est un signe indiquant la catégorie grammaticale à laquelle appartient le mot (dans les exemples choisis soit nom, soit verbe). Les scores indiqués au tableau matriciel IX montrent clairement qu'une faute d'accent tonique entraîne des taux de dissemblance, mesurés par MicroLEA, très élevés.

L'ensemble de ces résultats montrent les capacités de MicroLEA à différencier des mots phonétiquement très voisins, et par là-même à détecter les fautes couramment faites par l'apprenti angliciste s'exerçant par exemple à prononcer les consonnes interdentes [θ] et [ð], ou bien les occlusives, ou encore toutes les diphtongues qui n'existent pas en français, ainsi que les innombrables fautes d'accent tonique.

Pour conclure sur l'utilité de MicroLEA, il importe de tester ses capacités à détecter ces mêmes fautes lorsque le locuteur effectuant la reconnaissance est différent de celui qui a réalisé l'apprentissage. Ce point est essentiel car ce sont là précisément les conditions normales de fonctionnement du système si on veut l'utiliser en didactique des langues.

Les tests ont été réalisés sur un locuteur francophone possédant déjà la maîtrise de l'anglais écrit et s'exprimant oralement de façon très correcte sur le plan syntaxique, mais non parfaite quant à l'accent.

⁽¹⁾ (Voir définition mathématique en annexe).

Tableau IV. — *Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance pour des exemples d'opposition consonantique.*

[Typical matricial presentation of recognition scores for examples of consonantal oppositions.]

<div>mot prononcé</div> <div>mot reconnu</div>	VAN	FAN	LEAVE	LEAF	RISE	RICE	SEIZE	CEASE
VAN	13	26		78				
FAN	38	22					81	
LEAVE			13	50	65			
LEAF			49	12			61	
RISE			68		7	47		
RICE				63	49	9		
SEIZE				59			6	32
CEASE				68			28	8

Tableau V. — *Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance pour des exemples d'opposition consonantique.*

[Typical matricial presentation of recognition scores for examples of consonantal oppositions.]

<div>mot prononcé</div> <div>mot reconnu</div>	SHIP	CHIP	WISH	WITCH	JANE	CHAIN	DRAIN	TRAIN
SHIP	6	25						
CHIP	26	15						
WISH			9				82	86
WITCH			25	11				
JANE					14	29		46
CHAIN					32	12		45
DRAIN						48	15	34
TRAIN						36	35	16

Tableau VI. — *Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance pour des exemples d'opposition vocalique.*

[Typical matricial presentation of recognition scores for examples of vocalic oppositions.]

<div> <div>mot prononcé</div> <div>mot reconnu</div> </div>	LEAVE	LIVE	SHEEP	SHIP	BEE	BEER	FEE	FEAR
LEAVE	12	52						
LIVE	52	10						
SHEEP			14	29	42			
SHIP			28	6	47			
BEE			43	52	12			
BEER					63	13		68
FEE			53				8	36
FEAR				47	54			16

Tableau VII. — *Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance pour des exemples d'opposition vocalique.*

[Typical matricial presentation of recognition scores for examples of vocalic oppositions.]

<div> <div>mot prononcé</div> <div>mot reconnu</div> </div>	TOOL	TOLL	RULE	ROLE	TWO	TOUR	CUE	CURE
TOOL	7	46					46	
TOLL	46	19		43				
RULE		60	12	54				
ROLE		42	52	9				
TWO					13	25		
TOUR		41				14		48
CUE						86	15	48
CURE						47	46	9

Tableau VIII. — *Liste de mots pour lesquels la place de l'accent tonique est un indice de la catégorie grammaticale.*

[Typical words in which the stressed syllable is a grammatical information.]

(sur la première syllabe → nom)
(sur la dernière syllabe → verbe)

Absent
Contract
Contrast
Export
Object
Perfect
Permit
Produce
Progress
Protest
Rebel
Record
Refuse
Subject
Survey

L'expérience montre qu'après plusieurs répétitions, sa prononciation se rapproche suffisamment de celle du « modèle » pour que le système « reconnaisse » le mot testé. Il est intéressant de noter les scores délivrés par le système dans les deux cas suivants :

— lorsque apprentissage et reconnaissance sont exécutés à partir de la « cassette-leçon », donc avec la même voix ;

— lorsque l'apprentissage est réalisé à partir de la « cassette-leçon » (enregistrement du locuteur anglophone) et la reconnaissance effectuée par le locuteur francophone essayant d'imiter de son mieux la prononciation « modèle ».

Les résultats correspondants figurent dans le tableau X.

La partie supérieure de ce tableau correspond au premier cas et les commentaires qui peuvent être faits sont analogues à ceux correspondant aux tableaux IV, V, VI, VII. La partie inférieure donne les taux de dissemblance obtenus dans le deuxième cas, après plusieurs essais infructueux et en nombre variable suivant les difficultés de prononciation à surmonter. Ces scores finaux demeurent toujours plus élevés que ceux obtenus dans le premier cas, mais restent néanmoins groupés le long de la diagonale du tableau matriciel.

5. Tests d'efficacité sur le déroulement d'une leçon.

Là encore, les enseignants-chercheurs du C.R.A.P.E.L. nous ont apporté leur aide en enregistrant une cassette qui nous a permis de réaliser plusieurs exemples de leçon. Les mots choisis figurent dans le tableau XI.

Chacun de ces mots a été prononcé par trois anglophones : un Britannique, une Australienne et une Américaine. Les versions erronées ont été fournies par quatre étudiants francophones (deux garçons et deux filles) (Tableau XII).

L'apprentissage par MicroLEA a été réalisé à partir des voix britannique et américaine, pour les « modèles », et par les voix des étudiants pour les versions entachées d'erreurs.

Lors du déroulement de la leçon, ont joué le rôle d'élèves :

- l'enregistrement de l'Australienne,
- une Française professeur d'anglais,
- un Canadien anglophone,
- l'enregistrement des étudiants,
- deux « cobayes » francophones (un homme et une femme).

Tableau IX. — *Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance pour des exemples de mots pour lesquels la place de l'accent tonique est un indice de la catégorie grammaticale.*

[Typical recognition scores for examples of words whose stressed syllable is a grammatical information.]

mot prononcé mot reconnu								
	Absent	Absent	Contract	Contract	Contrast	Contrast	Export	Export
Absent	12	28	50					
Absent	25	10					49	
Contract			7	34	33			
Contract			37	7			44	
Contrast			37		18	37		
Contrast				38	39	9		
Export	56						6	33
Export		49					31	9

Tableau X. — *Comparaison des scores de reconnaissance entre « professeur et élève » (voir texte).*

[Typical recognition scores for « teacher » and « student » as compared to each other (see the text).]

mot reconnu \ mot prononcé	Professeur/Professeur							
	Sees	Seethe	Force	Fourth	Sin	Thin	Breeze	Breathe
Sees	10	32	67					
Seethe	25	14						49
Force			14	35			63	
Fourth			35	12		80		
Sin		47			15	49		
Thin					47	18		
Breeze	50						8	40
Breathe		56					37	6

mot reconnu \ mot prononcé	Professeur/Elève							
	Sees	Seethe	Force	Fourth	Sin	Thin	Breeze	Breathe
Sees	32	34			55			
Seethe	43	36			62			
Force			46	49		100		
Fourth			43	41			80	
Sin					50	52		
Thin					70	56		76
Breeze	57						51	57
Breathe		77					64	60

Les résultats sont les suivants :

MicroLEA a jugé bonne la prononciation de l'Australienne, du Canadien et du professeur d'anglais, a reconnu correctement les fautes des étudiants (sans aucune erreur de la part du système) a permis aux « cobayes » d'améliorer leur prononciation en répétant les mots jusqu'à ce que le système délivre le message BON plusieurs fois de suite.

Tableau XI. — *Lexique correspondant à une leçon-test.*

[Lexical example corresponding to a tested lesson.]

Solid
Enjoyable
Tripod
Aggregate
Warehouse
Outnumber
Theories
Physical
Laser
Prepare
Comfortable
Assistant
Measure

Pour évaluer de façon plus « quantitative » l'efficacité du système, voici un exemple de leçon et, pour chacun des mots étudiés (TRIPOD, LASER, COMFORTABLE), un tableau permettant de comparer les scores obtenus par les « professeurs » et par les « élèves ». Les conditions expérimentales sont les suivantes :

— Pour TRIPOD, l'apprentissage par MicroLEA a été réalisé à partir des voix britannique et américaine pour les modèles et par les voix d'un étudiant et d'une étudiante pour les versions entachées d'erreurs. Ces erreurs sont soit seulement une mauvaise prononciation du *i* (| i | au lieu de | ai |), soit en plus une faute d'accent tonique.

La reconnaissance a été effectuée à partir de l'enregistrement des deux anglophones, de celui des étudiants, ainsi que par ces mêmes étudiants essayant de corriger leurs fautes et de se rapprocher le plus possible des « modèles ».

Les résultats correspondants sont rassemblés dans le tableau XIII. On constate de nouveau que les scores des professeurs sont nettement meilleurs que ceux obtenus par les élèves lorsqu'ils parviennent à se rapprocher suffisamment de la prononciation correcte fournie par les modèles.

Tableau XII. — *Exemple typique des fautes de prononciation commises par des élèves francophones sur un lexique de mots anglais.*

[Typical mispronunciations by french native speakers in some English words.]

Premier élève	Deuxième élève	Troisième élève	Quatrième élève
so'lid	so'lid	so'lid	solid
enjoyable	enjoyable	enjoyable	enjoyable
tripod	tri'pod	tripod	tri'pod
'agregate	a'gregate	a'gregate	agre'gate
ware'house	warehouse	warehouse	warehouse
outnumber	outnumber	outnumber	outnumber
theories	theories	the'ories	theories
physi'cal	phy'sical	physical	physical
laser	laser	laser	laser
'prepare	'prepare	'prepare	prepare
com'fortable	com'fortable	comfortable	comfor'table
assis'tant	assis'tant	assistant	'assistant
meásure	mea'sure	measure	measure

Les apostrophes indiquent les fautes d'accent tonique et les tirets les fautes de prononciation sur les phénomènes.
 En cas de bonne prononciation phonétique mais d'absence d'accent tonique, il n'y a ni apostrophe, ni tiret.

Tableau XIII. — *Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance obtenus par deux professeurs et deux élèves prononçant le mot anglais TRIPOD.*

[Typical matricial presentation of recognition scores obtained by two teachers and two learners in pronouncing the English word TRIPOD.]

Apprentissage \ Reconnaissance	Anglais	Américaine	Elève (F)	Elève (H)	Elève (F)	Elève (H)
			Faute sur le <u>i</u>		Faute sur le <u>i</u> + accent tonique	
Anglais	6	32		41		
Américaine	44	7	58			
Elève (F) Bonne prononciation	49	45	81			
Elève (H) Bonne prononciation	34	28		52		
Elève (F) Faute sur le <u>i</u>	47		40	41		
Elève (H) Faute sur le <u>i</u>	49			21	72	
Elève (F) Faute sur le <u>i</u> + accent tonique			40		22	30
Elève (H) Faute sur le <u>i</u> + accent tonique			40		39	16

Avant de parvenir à ce résultat, lorsque les élèves commettent les erreurs connues du système, les scores qu'ils obtiennent montrent d'une part que la faute a été identifiée et d'autre part que le système est plus sensible à la nature de l'erreur qu'au type de la voix (masculine ou féminine).

— Pour LASER, les conditions expérimentales sont les mêmes, à ceci près qu'on a utilisé pour l'apprentissage un troisième « modèle » fourni par la voix de l'Australienne. Les fautes sont soit une mauvaise prononciation du a (| e | au lieu de | ei |), soit une faute d'accent tonique.

Les résultats, rapportés dans le tableau XIV, sont analogues aux précédents.

— Pour COMFORTABLE, les fautes sont soit une mauvaise prononciation du a (| ei | au lieu de | æ |) avec, en plus, l'accent tonique placé sur la dernière syllabe au lieu de la première, soit seulement une faute

d'accent tonique (la deuxième syllabe accentuée au lieu de la première).

Il faut noter, à propos des résultats du tableau XV, que les élèves ont eu beaucoup de mal à bien prononcer ce mot et que les scores indiqués ont été obtenus après de nombreux essais.

6. Conclusion.

Pour conclure sur l'intérêt pédagogique de cet appareil, il faudrait attendre le verdict des utilisateurs, c'est-à-dire des enseignants d'anglais. Cependant, les tests effectués au laboratoire montrent d'ores et déjà que le système fonctionne correctement dans la plupart des cas.

Cela tient à l'algorithme de reconnaissance fondé sur la comparaison dynamique, sur l'utilisation en apprentissage de plusieurs voix de référence. De plus, il faut noter qu'en réalité la comparaison se fait chaque

Tableau XIV. — Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance obtenus par deux professeurs et deux élèves prononçant le mot anglais LASER.

[Typical matricial presentation of recognition scores obtained by two teachers and two learners in pronouncing the English word LASER.]

Apprentissage Reconnaissance	Anglais	Américaine	Australienne	Elève (F)	Elève (H)	Elève (F)	Elève (H)
				Faute sur le <u>a</u>		Faute d'accent tonique	
Anglais	11	41				50	
Américaine	38	11	40				
Australienne	45	33	6				
Elève (F) Bonne prononciation	31	39				47	
Elève (H) Bonne prononciation	28	48				59	
Elève (F) Faute sur le <u>a</u>	54			12	44		
Elève (H) Faute sur le <u>a</u>				41	28	71	
Elève (F) Faute d'accent tonique				57		17	54
Elève (H) Faute d'accent tonique					71	37	22

Tableau XV. — Exemple typique de tableau matriciel donnant les scores de reconnaissance obtenus par deux professeurs et deux élèves prononçant le mot anglais *COMFORTABLE*.

[Typical matricial presentation of recognition scores obtained by two teachers and two learners in pronouncing the English word *COMFORTABLE*.]

Apprentissage Reconnaissance	Anglais	Américaine	Australienne	Elève (F)	Elève (H)	Elève (F)	Elève (H)
				Faute d'accent tonique		Faute d'accent tonique + faute sur le a	
Anglais	10	40			43		
Américaine		14	50				
Australienne		48	10				67
Elève (F) Bonne prononciation		37		39			46
Elève (H) Bonne prononciation		39	54				51
Elève (F) Faute d'accent tonique				23	29	41	
Elève (H) Faute d'accent tonique				36	10		33
Elève (F) Faute sur le a + accent tonique					40	23	31
Elève (H) Faute sur le a + accent tonique				43		39	22

fois entre le mot prononcé et un très petit nombre de mots (ceci quel que soit le volume total de la leçon).

Un tel système ne peut pas reconnaître toutes les erreurs possibles, mais lorsque l'élève fait une faute inconnue du processus, celui-ci se borne à délivrer le message « Mauvais » et la réaudition de la voix du professeur permet à l'élève de s'auto-corriger.

Enfin, il convient de remarquer que la conception de la leçon peut évoluer en fonction de l'âge des élèves et de l'objectif envisagé. On peut imaginer un prolongement aux premiers exercices décrits dans ce travail : lorsque l'étape d'acquisition de la prononciation est franchie, le dialogue entre la machine et l'élève peut être modifié de la façon suivante : chaque mot est d'abord enregistré en français et l'élève doit le dire dans la langue étudiée. L'élève n'entend la traduction

enregistrée par le professeur que s'il a fait une erreur, soit de traduction, soit de prononciation. Ainsi seraient à la fois testées la mémorisation et l'acquisition de la prononciation correcte du vocabulaire étudié.

D'autres développements sont possibles. Par exemple : enregistrer la voix de l'élève et inclure dans le programme son écoute automatique, ce qui lui permettrait de mieux prendre conscience de son erreur de prononciation.

Une autre point mérite d'être souligné : c'est la possibilité pour l'étudiant de travailler seul. Un tel système ne se substitue certes pas complètement au professeur (de toutes manières, l'organisation des leçons incombe à l'enseignant) et il ne permet pas de détecter toutes les fautes de prononciation (en particulier il serait sans doute bon de prendre en compte

des informations prosodiques telle que la hauteur de la voix). Toutefois, en son état actuel, MicroLEA constitue une ébauche intéressante en tant qu'outil de travail pour un apprentissage autodidactique, surtout à l'usage d'adultes non débutants dans la langue et cherchant à améliorer leur prononciation.

Remerciements.

Les auteurs tiennent à remercier les chercheurs du Centre de Recherches et d'Applications Pédagogiques en Langues de Nancy, qui les ont aidés à mener à bien ce travail.

Bibliographie

- [1] SHERWOOD, B. A., *Int. J. Man-Machine Studies* **10** (1978) 669.
- [2] SIMON, J. C., L'éducation et l'informatisation de la société. Rapport au Président de la République Ed. par Fayard (1981).
- [3] BESTOUGEFF, H., Thèse d'Etat Université de Paris VII (1970).
- [4] NELLES, R. et SENNEKAMP, M., *Gr. K. G.* **18/4** (1977) 37.
- [5] GIORGETTI, M. T. et LAMOTTE, M., Actes des XI^e Journées d'Etudes sur la Parole (1980) 202.
- [6] NORDMANN, B. J., *A comparative study of some visual speech displays* Rapport de contrat (1971) Univ. Illinois. USA.
- [7] KALIKOW, D. W. et SWETS, I. A., Proc. of the I.E.E.E. Fall Electronics Conference (1971) 19.
- [8] HARADA, K. I., Annual Bulletin Research Institute of Logopedics and Phoniatrics **5** (1971) 51.
- [9] LEBRAS, J., Thèse de 3^e Cycle Université de Rennes II (1981).
- [10] BELLISSANT, C., Thèse d'Etat Université de Grenoble (1978).
- [11] MAS, M. T., VIGNERON, M. J., LAMOTTE, M., *Gr. K. G.* **18/4** (1977) 97.
- [12] VIGNERON, C., Thèse de Doctorat d'Université Université de Nancy I (1978).
- [13] JANOT-GIORGETTI, M. T. et LAMOTTE, M., *Gr. K. G.* **23/2** (1982) 81.
- [14] DUROC, M., Thèse de 3^e Cycle Université de Nancy I (1978).
- [15] BREMONT, J., Thèse d'Etat Université de Nancy I (1975).
- [16] GOLD, B., BLANKENSHIP, P. E., MCAULAY, R. J., *On Acoustics, Speech and Signal Processing. I.E.E.E. Trans.* **29/1** (1981) 13.
- [17] LAMOTTE, M. et MAS, M. T., *Méc. Mat. Elec.* **336** (1976) 3.
- [18] JANOT-GIORGETTI, M. T., Thèse d'Etat Université de Nancy I (1982).
- [19] BARS, J. F., GRESSER, J. Y., QUERRE, M., Actes des IV^e Journées d'Etudes sur la Parole (1973) 327.
- [20] HATON, J. P., Thèse d'Etat Université de Nancy I (1974).
- [21] SAKOE, H. et CHIBA, S., Proc. of the 7th International Congress on Acoustics, Budapest (1971).
- [22] VINTSIUK, T. K., *Kibernetika* **1** (1968) 81.
- [23] CARTON, F., *Introduction à la phonétique du français* (Ed. par Bordas) 1979.
- [24] MALMBERG, B., *La phonétique* (Ed. par P.U.F.) 1975.
- [25] ADAMCZEWSKI, H. et KEEN, D., *Phonétique et Phonologie de l'anglais contemporain* (Ed. par Armand Colin) 1979.
- [26] MARTINET, A., *Eléments de linguistique générale* (Ed. par Armand Colin) 1974.

Annexe. — Méthode de reconnaissance par « comparaison dynamique » : principes généraux.

1. Introduction.

Nous ne nous étendrons pas sur la méthode en elle-même car elle a fait l'objet de nombreux ouvrages et publications (cf. la bibliographie) mais, après avoir posé le problème et énoncé le principe de sa résolution, nous montrerons la simplification qui en est faite ici dans son application à la reconnaissance de la parole.

Soit un système dont l'état est repéré par une variable scalaire (ou vectorielle) qui évolue sous l'effet de décisions, et soit à trouver dans l'espace des états possibles du système envisagé, une trajectoire optimale pour une certaine fonction de valeur, en choisissant convenablement les variables de contrôle.

Ce type de problème se rencontre aussi bien en physique (exemple : recherche d'une trajectoire optimale pour un mobile devant rester en contact avec une surface) qu'en économie [1] et peut être résolu par une technique mathématique développée initialement par

l'équipe de Bellman R. : la programmation dynamique. Cette méthode est fondée sur le « principe d'optimalité », énoncé comme suit dans l'ouvrage de Bellman R. [2] :

« Une politique optimale est telle que, quels que soient l'état initial et la décision initiale, les décisions suivantes doivent constituer une politique optimale par rapport à l'état résultant de la première décision. »

En reconnaissance de la parole, il s'agit d'identifier un mot inconnu c'est-à-dire déterminer quel est le mot d'un lexique de référence auquel il ressemble le plus. Cela revient à minimiser un « taux de dissimilitude » entre deux formes.

2. Application à la reconnaissance de la parole.

Ainsi qu'il a été indiqué, le signal vocal émis par le locuteur est analysé par un banc de n filtres qui évalue, toutes les 20 ms, sous forme numérique, l'état du spectre du signal vocal. Ces données sont transmises au calculateur sous la forme « d'échantillons » à n composantes, si bien qu'un mot i de durée T_i échan-

tillonné N_i fois ($N_i = 50 T_i$) sera représenté par la matrice R_i .

$$R_i = [x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n]$$

avec x_j vecteur-colonne d'éléments x_j^k (k variant de 1 à n) où x_j^k est la réponse de k -ième filtre à l'instant $t = j \times 20$ ms.

Durant la phase dite « d'apprentissage », il est possible d'emmagasiner, en mémoire du calculateur, un nombre L de formes sonores qui constitueront le lexique de référence. Chacune des formes est caractérisée par la matrice R de dimensions $n \times N$, n étant égal au nombre de filtres constituant l'analyseur et N étant variable.

Lors de la reconnaissance, l'acquisition se fera de la même façon, c'est-à-dire que le mot prononcé sera représenté par la matrice :

$$M = [Y_1, Y_2, \dots, Y_i \dots Y_p]$$

p étant le nombre d'échantillons constituant le mot prononcé et Y_i étant un vecteur-colonne d'éléments y_i^k (k variant de 1 à n).

Il s'agit ensuite de rechercher la plus grande ressemblance (ou encore la dissemblance minimale) entre le mot prononcé et un des mots du lexique. Pour ce faire, chaque échantillon Y_i du mot à reconnaître est comparé aux échantillons X_j du mot du lexique, en partant du début des mots et en progressant vers leur fin.

On peut représenter schématiquement cette démarche sur un diagramme bidimensionnel (Fig. 5) où l'on place en abscisse des points figuratifs des échantillons X_j pour un mot du lexique donné, et en ordonnée des points figuratifs analogues Y_i pour le mot prononcé.

L'ensemble forme un graphe dont chaque nœud (j, i) tel que $C(X_j, Y_i)$ est l'image de la comparaison entre X_j et Y_i définie ainsi :

$$d(X_j, Y_i) = d(i, j) = \sum_{k=1}^n |Y_i^k - X_j^k|. \quad (1)$$

La recherche du taux de dissemblance minimal revient à chercher le chemin optimal en « coût » entre A et B dans le graphe composé d'arcs qui sont orientés dans le sens de la séquence d'échantillons constituant les mots. Notons qu'en chaque point du maillage peuvent arriver plusieurs arcs.

La détermination du chemin optimal par programmation dynamique consiste à se définir une fonction coût, calculée au point d'arrivée de l'arc, à partir de la fonction coût du point d'origine $d(X_1, Y_1)$. Puis, il faut choisir, en chaque point, l'arc par lequel il convient d'arriver pour rendre la fonction coût optimale (c'est-à-dire, dans ce cas, le taux de dissemblance minimale). Ce choix constitue la « fonction retour ».

La procédure se déroule étape par étape (de A vers B) et les résultats intermédiaires (fonction coût et choix de l'arc) sont conservés. Il suffit ensuite de parcourir le

Fig. 5. — Représentation schématique bidimensionnelle du processus de reconnaissance par programmation dynamique.

[A two dimensional picture of speech recognition procedure using dynamic programming.]

graphe en sens inverse, de B vers A, en utilisant la fonction retour pour découvrir le chemin optimal.

En reconnaissance de mots isolés, cette procédure est assez longue. En outre, cela conduit à comparer certains couples d'échantillons qui, à priori, n'ont pas lieu de l'être (exemple : X_1 et Y_p). On préfère donc se définir à chaque étape, c'est-à-dire pour chaque échantillon du mot à reconnaître, un nombre de chemins élémentaires raisonnables à l'intérieur d'une cellule donnée (voir Fig. 6) où l'on prend seulement en compte des échantillons chronologiquement voisins dans un mot de référence et le mot à reconnaître. Cette méthode peut être désignée sous le nom de « comparaison dynamique ».

On choisit celui qui donne le coût optimal, c'est-à-dire celui pour lequel la distance $d(i, j)$ est minimale. Soit, à l'étape k :

$$s_k = \text{Min} [d(i, j+1), d(i+1, j+1), d(i+1, j+2), d(i+2, j+1), d(i+1, j)] \quad (2)$$

avec $s_1 = d(1, 1)$.

Fig. 6. — Illustration du procédé de limitation des chemins de comparaison pris en compte dans le processus de reconnaissance.

[Pictorial description of the cut-off procedure used to restrict the number of reasonable comparison paths in the recognition process.]

A partir du point obtenu, on réitère la procédure jusqu'à ce que X_j soit égal à X_N ou bien Y_i à Y_P .

La fonction coût optimale (soit S le « score final ») est obtenue en sommant les fonctions coûts intermédiaires, c'est-à-dire les scores partiels s_k :

$$S = \sum_{k=1}^K s_k \quad (3)$$

K : nombre total de pas.

L'avantage essentiel de la comparaison dynamique réside dans la normalisation temporelle qu'elle réalise, par la prise en compte automatique des répétitions ou des omissions dans les séquences d'échantillons (Fig. 6). Par contre, le choix du chemin optimal étant fait localement et non en considérant l'ensemble, il peut en résulter des erreurs de parcours et, par suite, un taux de dissemblance plus élevé qu'il ne devrait l'être.

Soient, par exemple, deux occurrences d'un même mot par le même locuteur. En principe, le chemin optimal devrait suivre d'assez près la diagonale principale du graphe de la figure 7. Par suite d'une dissimilitude locale importante dans la prononciation d'un phonème déterminé, le chemin trouvé peut s'en éloigner sensiblement et, de ce fait, le taux de dissemblance obtenu se trouver accru de façon excessive, ce qui risque de conduire ensuite à des conclusions erronées. Ceci est illustré sur la figure 7.

Les chiffres indiqués sont les distances $d(i, j)$ entre un échantillon Y_i du mot M_p à reconnaître et un échantillon X_j du mot M_1 du lexique. On a tracé, en trait plein, le chemin trouvé par l'algorithme de comparaison dynamique. Il lui correspond un score total ($S = 16$) supérieur à celui obtenu en suivant la

Fig. 7. — Exemple de calcul de scores pour deux occurrences d'un même mot prononcé par un seul locuteur.

[Typical score computations corresponding to two different occurrences of the same word said by one speaker.]

diagonale ($S = 10$). Il peut arriver que la comparaison avec un autre mot M_2 du lexique conduise à un score inférieur à 16, si bien que le processus de reconnaissance décidera que le mot prononcé ressemble davantage à M_2 qu'à M_1 - conclusion qui est inexacte.

On peut pallier à cet inconvénient :

- soit en limitant arbitrairement les écarts permis par rapport à la diagonale ;
- soit en favorisant davantage encore la diagonale principale par pondération préférentielle des scores partiels à l'extrémité des chemins ;
- soit en combinant les deux méthodes.

Bibliographie sur la « comparaison dynamique »

- [1] KAUFMANN, A. et CRUON, R., *La programmation dynamique* (Ed. par Dunod) 1965.
- [2] BELLMAN, R., *Dynamic programming* (Ed. par Princeton University Press) 1957.
- [3] LAURIÈRE, J. L., *Eléments de programmation dynamique* (Ed. par Gauthier-Villars) 1979.
- [4] SAKOE, H. et CHIBA, S., *I.E.E.E. Trans. Acoust. Speech Signal Processing* **26** (1978) 43.
- [5] MYERS, C. S., RABINER, L. R., ROSENBERG, A. E., *I.E.E.E. Trans. Acoust. Speech Signal Processing* **28** (1980) 622.
- [6] QUERRE, M., MERCIER, G., GRESSER, J. Y., *Note technique du C.N.E.T. Lannion CEI/CSI/44* (1974).
- [7] HATON, J. P., *Actes du 7th Int. Cong. on Cybernetics* — Namur (1973).
- [8] WHITE, G. M., *Proc. of the I.E.E.E. Int. Conf. Acoust. Speech Signal Processing* (1978) 413.
- [9] MYERS, C. S. et RABINER, L. R., *I.E.E.E. Trans. Acoust. Speech Signal Processing* **29** (1981).
- [10] RABINER, R. et LEVINSON, S. E., *I.E.E.E. Trans. Commun.* **29/5** (1981) 621.
- [11] FORNEY, G. D., *Proc. I.E.E.E.* **61** (1973) 268.
- [12] LEA, W., *Trends in Speech Recognition* (Ed. par Prentice-Hall) 1980.