

DETECTION DE RUPTURES DE MODELES ET APPLICATIONS
EN TRAITEMENT ADAPTATIF DU SIGNAL

Michèle Basseville*, Gérard Favier**, André Smolders**

*IRISA/CNRS - Campus de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex
**LASSY/CNRS - 41, Bd Napoléon III - 06041 Nice Cedex
(GRECO 69 SARTA)

L'objet de cette communication est la présentation de deux exemples typiques d'application, en traitement adaptatif du signal, de méthodes de détection de ruptures de modèles dynamiques. La première application concerne la segmentation du signal de parole continue, et la seconde un problème de poursuite et de prédiction de trajectoires de mobiles manoeuvrants.

This paper is devoted to the presentation of two typical application examples, in adaptive signal processing, of change detection algorithms for dynamical processes. The first application is concerned with the segmentation of continuous speech signals, and the second one with a problem of tracking and prediction of trajectories of maneuvering targets.

I. INTRODUCTION

Les questions de détection et diagnostic de ruptures de modèles dynamiques, ou encore de changements brusques dans les caractéristiques de signaux, interviennent dans de nombreux problèmes de Traitement du Signal, que l'on peut regrouper dans les deux catégories suivantes:

- 1. segmentation de signaux, en vue de la reconnaissance, mais aussi pour la surveillance de systèmes;
- 2. adaptation des gains des algorithmes de filtrage et d'identification adaptatifs en présence de variations rapides des paramètres.

En Traitement d'Images, ces questions se posent dans les mêmes termes; et en Automatique elles interviennent de plus pour la détection de pannes.

On décrit dans cet article des algorithmes paramétriques qui résolvent les deux problèmes de base que sont la détection de changements de moyenne (§2) et la détection de changements de caractéristiques spectrales (§3). Ces algorithmes séquentiels sont soit du type méthodes de vraisemblance exactes ou approchées, soit du type surveillance de paramètres estimés. Dans ce dernier cas, la clef de l'efficacité de l'algorithme réside essentiellement dans le choix de la règle de décision ou encore mesure de distance entre modèles utilisée.

Dans une deuxième partie, on présente l'application de ces algorithmes à des problèmes de Traitement du Signal relevant des deux catégories mentionnées plus haut.

L'aspect "segmentation de signaux" est illustré par l'utilisation d'un algorithme de détection de changements de caractéristiques spectrales pour la segmentation de la parole continue (§4).

L'aspect "adaptation des gains des algorithmes adaptatifs" est illustré par un problème de poursuite et de prédiction de trajectoires de mobiles manoeuvrants, les tests de rupture servant à la détection de manoeuvres (§5). Cette détection de manoeuvres est basée sur la surveillance de l'erreur de prédiction à p pas et, en cas d'alarme, déclenche une réactualisation de la trace dans l'algorithme de lissage par moindres carrés à trace bornée.

II. DETECTION DE CHANGEMENTS DE MOYENNE

Le problème le plus simple de ruptures de modèles est celui des sauts de moyenne dans un signal (y_n) constant par

morceaux perturbé par un bruit blanc gaussien (ϵ_n) de variance σ^2 . Dans un contexte de traitement en ligne, considérons la détection d'un de ces sauts se produisant à un instant inconnu r:

$$y_n = \mu_n + \epsilon_n, \text{ où } \mu_n = \begin{cases} \mu_0 & \text{si } n \leq r-1 \\ \mu_1 & \text{si } n \geq r \end{cases} \quad (1)$$

Supposons d'abord μ_0 et μ_1 connues. On montre aisément ([2], ch.1) que le test de vraisemblance revient à détecter un saut de moyenne la première fois que:

$$g_n = S_1^n(\mu_0, \nu) - \min_{1 \leq k \leq n} S_1^k(\mu_0, \nu) > \lambda \quad (2)$$

où

$$\nu = \mu_1 - \mu_0 \text{ et } S_i^j(\mu, \nu) = \nu \sum_{k=i}^j (y_k - \mu - \frac{\nu}{2}) \quad (3)$$

Ce test est connu sous le nom de test de Page-Hinkley. Il peut être utilisé plus généralement pour détecter tout changement entre deux lois de probabilité connues p_{θ_0} et p_{θ_1} : il suffit alors de calculer:

$$S_i^j(p_{\theta_0}, p_{\theta_1}) = \sum_{k=i}^j \text{Log} \frac{p_{\theta_1}(y_k)}{p_{\theta_0}(y_k)} \quad (4)$$

Ses propriétés théoriques sont analysées en ([2], ch.5) par exemple.

Dans le cas où l'amplitude ν du saut est inconnue, on peut utiliser deux approches. On suppose, dans un contexte de traitement en ligne, que μ_0 est connue, quitte à l'identifier. La première approche consiste à remplacer ν par son estimateur du maximum de vraisemblance $\hat{\nu}_n(r)$ pour r fixé, et le test de vraisemblance s'écrit:

$$\max_{1 \leq r \leq n} S_r^n(\mu_0, \hat{\nu}_n(r)) \geq \lambda \quad (5)$$

où

$$\hat{\nu}_n(r) = \frac{1}{n-r+1} \sum_{k=r}^n (y_k - \mu_0)$$



La deuxième approche consiste à activer deux tests (2) en parallèle, correspondant à une amplitude de saut minimum v_m à détecter et à deux directions possibles de saut (augmentation ou diminution de la moyenne). On trouvera les détails en ([2], ch.1). Cette approche a été utilisée avec succès pour la détection, ligne par ligne, de contours dans des images numérisées. Un autre exemple d'utilisation sera décrit au paragraphe 5.

III. DETECTION DE CHANGEMENTS DE CARACTERISTIQUES SPECTRALES

On s'intéresse maintenant au problème de détection de changements de caractéristiques spectrales d'un signal, problème typique de la segmentation de signaux, que l'on aborde à l'aide de modèles AR ou ARMA et de tests basés sur la comparaison de modèles estimés dans des fenêtres glissantes ou de taille croissante situées à des endroits différents dans le signal.

En effet, dans ce cas le test de vraisemblance consiste à utiliser les lois de probabilités conditionnelles des observations pour le calcul de la somme cumulée (4) et à employer la règle de décision (2). Une interprétation possible de ce test ([2], ch.6 ou [3]) est qu'il compare - à l'aide du rapport de vraisemblance - un modèle à long terme M_0 identifié sur une fenêtre de taille croissante et un modèle à court terme M_1 identifié sur une fenêtre glissante de taille fixe. Cette comparaison entre modèles peut être effectuée à l'aide d'autres mesures de distance ([2], ch.6). On verra au paragraphe 4 que la divergence de Kullback entre les lois conditionnelles fournit un outil de segmentation intéressant. La détection est alors réalisée à l'aide de la statistique:

$$w_n = -2 \frac{e_n^0 e_n^1}{\sigma_1^2} + \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} + 1 \right) \frac{(e_n^0)^2}{\sigma_0^2} + \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} - 1 \quad (6)$$

(où e_n^i et σ_i^2 sont l'innovation et la variance d'erreur relatives au modèle M_i) dont on surveille les changements de moyenne à l'aide du test de Page-Hinkley (2)-(3).

D'autres mesures de distance sont discutées en [2], ch.6 et [3]. Dans le même esprit, on peut comparer les modèles à long terme et à court terme simplement à l'aide des variances d'erreur respectives. On en verra l'application au paragraphe 5.

IV. APPLICATION A LA SEGMENTATION DU SIGNAL DE PAROLE CONTINUE

Une démarche possible pour reconnaître automatiquement de la parole continue consiste à utiliser, comme première étape de traitement, une segmentation automatique du signal de parole [1]. Cette segmentation effectuée, sans utilisation d'informations phonétiques, un découpage du signal en unités qui seront ensuite étiquetées et traitées dans la deuxième étape dite de décodage acoustico-phonétique.

L'algorithme utilisé en [1] est basé sur le test (6) présenté au paragraphe précédent, et on trouvera à la figure 10 un exemple de segmentation ainsi obtenue. Cette figure montre successivement, de bas en haut, le signal de parole, les segments détectés et le sonagramme qui permet d'évaluer visuellement la qualité de la segmentation obtenue.

De plus, il convient de souligner une particularité intéressante de l'algorithme: le réglage des paramètres est indépendant du locuteur. Cet algorithme est utilisé pour traiter la base de données de parole du GRECO "Communication parlée".

On renvoie à [1] pour des détails complémentaires.

V. APPLICATION A LA PREDICTION DE TRAJECTOIRES DE MOBILES MANOEUVRANTS

Nous présentons dans ce paragraphe quelques résultats de simulation obtenus lors de l'application des tests de rupture de modèles pour la prédiction de trajectoires de mobiles manoeuvrants. Le problème consiste à prédire la position d'un mobile à l'instant $(k+p)T$, $p > 0$, à partir des mesures de position (distance, angles de site et de gisement) effectuées sur l'intervalle de temps $[0, kT]$.

La procédure de calcul utilisée comporte, à chaque période d'échantillonnage T , les cinq étapes suivantes [4]-[5]:

1. Lissage adaptatif de la trajectoire sur la fenêtre $[(k-m)T, kT]$, la trajectoire étant représentée à l'aide d'un modèle polynomial en t .

2. calcul et lissage des dérivées de la position

3. identification de l'ordre du modèle de lissage et de prédiction

4. calcul des prédictions de la position

5. application d'un test de détection de rupture de modèle pour détecter une manoeuvre du mobile.

L'étape 1 est réalisée en utilisant un algorithme d'identification à trace adaptative [6], le niveau de trace étant fixé en fonction du résultat du test de détection de l'étape 5.

Deux types de test ont été utilisés. D'une part un test basé sur la comparaison de deux estimés, à court terme et à long terme, de la variance de l'erreur de prédiction à p pas. D'autre part le test de Page-Hinkley, appliqué pour détecter un saut de moyenne de l'erreur de prédiction à p pas.

a. Utilisation du test basé sur la variance de l'erreur de prédiction à p pas

La trajectoire simulée est une trajectoire plane dans le plan (X, Y) , composée de cinq portions dont les caractéristiques cinématiques sont décrites dans le Tableau 1.

Portion	Durée (nbre iter.)	Γ_N (m/s ²)	Γ_T (m/s ²)	μ	R (m)
1	300	0	26	-1	0
2	200	0	0	-1	0
3	260	-47	0	1	3500
4	420	0	0	-1	0
5	540	$(\mu+1)VA$	0	3	$(\mu+1)A/V$

Tableau 1: Caractéristiques cinématiques de la trajectoire avec :

R = Rayon de courbure

A = Vitesse azimutale

μ = Coefficient de navigation proportionnelle

Γ_T, Γ_N = Accélération tangentielle et normale

La constante de temps utilisée pour les variations d'accélération Γ_T et Γ_N a été prise égale à 0,3s.

Les résultats de simulation présentés ci-après concernent le traitement des mesures projetées sur l'axe X pour les trois premières portions de la trajectoire (itérations 200 à 900). Les figures 1, 2 et 3 montrent les projections sur l'axe X de la position, de la vitesse et de l'accélération. La longueur de la fenêtre de lissage a été choisie fixe et égale à $m=90$ itérations. Le pas de prédiction utilisé dans le test de détection est égal à $p=10$.

Les figures 4 et 5 présentent le critère de détection de manoeuvre et l'erreur de prédiction à 10 pas obtenue à partir des données lissées à l'aide de l'algorithme d'identification à trace adaptative dont la trace passe de 4 à 200 lorsqu'une manoeuvre est détectée. La figure 6 montre l'erreur de prédiction à 10 pas résultant de l'utilisation d'un algorithme d'identification à trace bornée (égale à 4).

Par comparaison des figures 5 et 6, nous pouvons voir l'amélioration apportée par la trace adaptative au niveau des transitoires relatifs à chacune des manoeuvres, en termes de dépassement (valeur maximum de l'erreur de prédiction) et de durée du transitoire.

b. Utilisation du test Page-Hinkley appliqué à l'erreur de prédiction à p pas

Différents essais sont montrés pour illustrer le comportement du test face à des manoeuvres d'amplitude variable. Ces essais sont réalisés en considérant une manoeuvre obtenue à partir d'une modification de l'accélération tangentielle γ_T (portions de trajectoire rectilignes uniformément accélérées).

Caractéristiques cinématiques:

$V_0=100$ m/s (vitesse initiale); $\gamma_{1T}=15$ m/s² (accélération tangentielle de la 1ère portion).

Le changement d'accélération a lieu à la 200ème itération suivant une loi exponentielle, avec une constante de temps de 0,3s.

Le Tableau 2 renferme la valeur de l'accélération tangentielle γ_{2T} de la 2^{ème} portion.

Trajectoire	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT6
γ_{2T} (m/s ²)	17	20	25	35	40	45

Tableau 2: valeurs de γ_{2T}

Les simulations ont été effectuées avec les réglages suivants:
 Longueur de la fenêtre de lissage=m=90 itérations
 Valeur de la trace minimum avant détection de manoeuvre =4
 Valeur de la trace après détection de manoeuvre =200 (pendant 40 itérations)
 Pas de prédiction utilisé pour construire le test: p=10 ou 20.

Les essais ont été réalisés avec les projections des différentes trajectoires sur l'axe X, les bruits de mesure ayant été simulés comme des bruits blancs d'écart type: 1m pour les distances et 0,0001 rd pour les angles.

Le tableau 3 décrit les résultats obtenus avec le test de détection de Page-Hinkley en fonction de différentes valeurs des paramètres de réglage, à savoir le saut de moyenne ν et le seuil de détection λ , le pas de prédiction utilisé étant égal à p=10.

Ces résultats sont exprimés en termes de:
 - Instant de détection de manoeuvre \hat{t} (numéro de l'itération)
 - ND = Non Détection; FA = Fausse Alarme

ν	5		3		2,5		2	
λ	4	3,5	2,5	2	3,5	3	5	4
TT1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	FA
TT2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	FA
TT3	ND	236	236	236	233	232	230	FA
TT4	231	226	225	225	225	223	221	FA
TT5	227	223	221	220	220	220	218	FA
TT6	224	220	219	219	219	218	217	FA

Tableau 3: Résultats du test de Page-Hinkley pour p = 10

A noter qu'il n'y a pas de détection de manoeuvre dans le cas des trajectoires TT1 et TT2 pour lesquelles la variation d'accélération tangentielle est trop faible. Cependant cette détection peut être rendue possible, pour la trajectoire TT2, en augmentant le pas de prédiction, comme le montre le tableau 4 correspondant à p=20.

ν	4		3,5		2,5
λ	3,5	3	5	3,5	5
TT1	ND	ND	ND	ND	FA
TT2	243	243	239	239	FA

Tableau 4: Résultats du test de Page-Hinkley pour p = 20

Les figures 7 et 8 montrent l'erreur de prédiction à 10 pas obtenue pour chacune des trajectoires, avec les réglages suivants: $\nu=3$; $\lambda=3,5$.

L'analyse des résultats présentés à l'aide des tableaux 3 et 4 et des figures 7 et 8 nous permet de conclure que:

*après détection de la manoeuvre et application de la trace élevée (200), l'erreur de prédiction converge vers la même valeur quelle que soit l'amplitude $\Delta\gamma_T = \gamma_{2T} - \gamma_{1T}$ de la manoeuvre.

*en diminuant la valeur de ν ou, pour ν fixé, en diminuant le seuil λ , nous réduisons le retard à la détection. Cependant pour une valeur trop faible de ν des risques de FA apparaissent.

*Lorsque l'amplitude $\Delta\gamma_T$ de la manoeuvre augmente, le retard à la détection diminue tandis que l'erreur de prédiction croît durant le transitoire causé par la manoeuvre.

*En augmentant le pas de prédiction relatif à l'erreur de prédiction prise en compte dans le test de Page-Hinkley, il est possible de détecter de faibles manoeuvres (voir trajectoire TT2), au détriment bien entendu de retards à la détection élevés.

A noter enfin que le test de détection est plus sensible au choix de ν qu'à celui de λ .

L'ensemble des résultats précédents est résumé à l'aide de la figure 9 qui correspond à une abaque permettant de faciliter le réglage des facteurs (ν, λ) en fonction de l'amplitude de la manoeuvre attendue et du retard à la détection désiré, et pour un niveau de bruit fixé ($\sigma_D=1m$, $\sigma_\theta=0,0001$ rd).

Une étude détaillée des tests de détection de ruptures de modèles appliqués à la prédiction de trajectoires de mobiles manoeuvrants a été réalisée dans [5].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. André-Obrecht (1986): "A new statistical approach for the automatic segmentation of continuous speech signals". **Rapport de Recherche IRISA n°287/INRIA n°511.**
- [2] M. Basseville, A. Benveniste (Ed.) (1986): "Detection of abrupt changes in signals and dynamical systems". **LNCIS n°77, Springer-Verlag.**
- [3] M. Basseville (1987): "Detecting changes in signals and systems - A survey". **Rapport de Recherche IRISA n°351.**
- [4] G. Favier, A. Smolders (1984): "Adaptive smoother-predictors for tracking maneuvering targets". **Proc. CDC 84, Las Vegas, NV, pp.831-836.**
- [5] A. Smolders (1986): "Etude d'algorithmes de détection de ruptures de modèles et de prédiction adaptative. Application à un problème de poursuite de mobiles manoeuvrants". **Thèse de Doct. Ing., Univ. Nice, Fev. 86.**
- [6] G. Favier (1987): "Algorithmes d'identification adaptatifs numériquement efficaces". **GRETSI 87.**

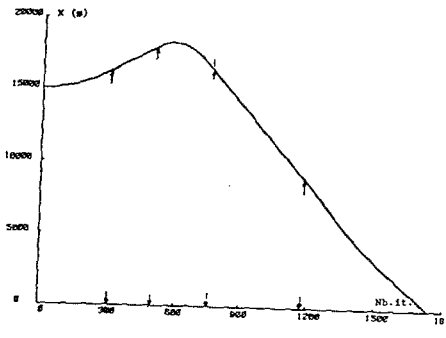


Fig.1: Position sur l'axe X

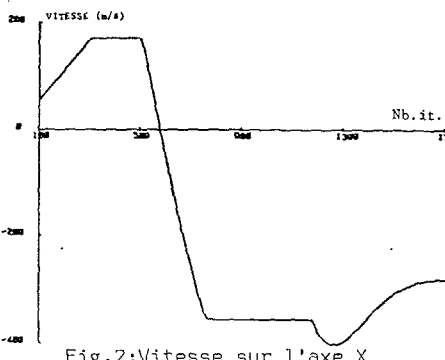


Fig.2: Vitesse sur l'axe X

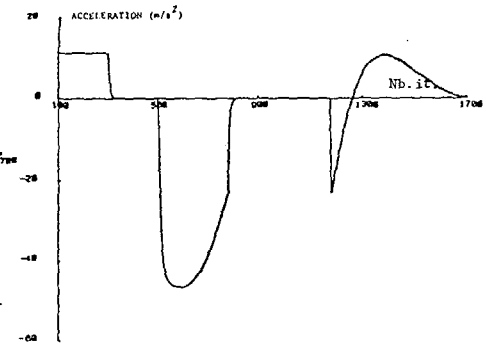
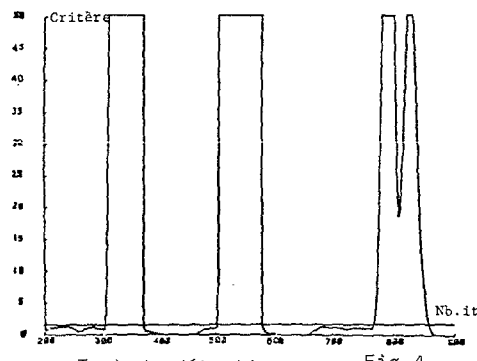


Fig.3: Accélération sur l'axe X



Test de détection Fig.4

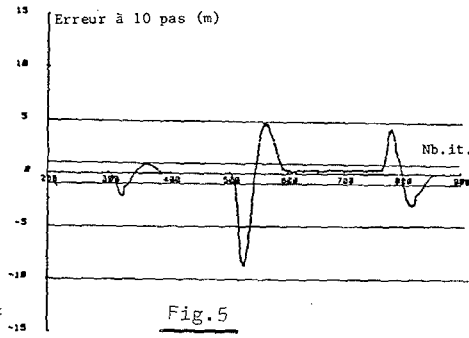


Fig.5 (algo. à trace adaptative)

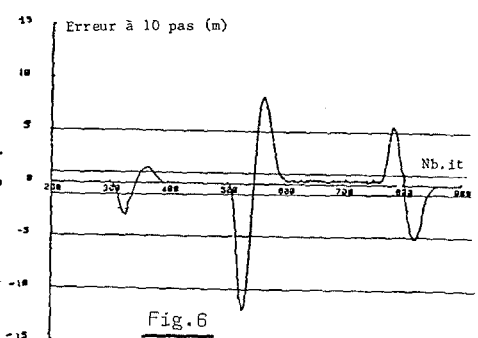


Fig.6 (algo. à trace bornée)

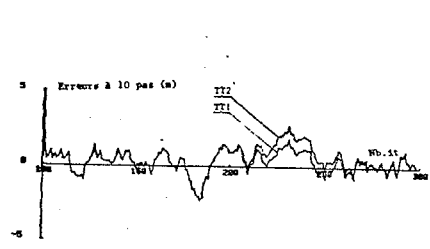


Fig.7: erreur sur TT1,2

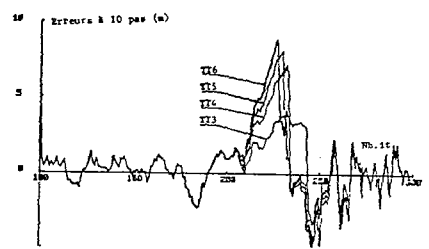


Fig.8: erreur sur TT3,4,5,6

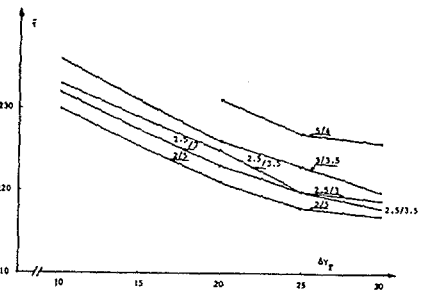


Fig.9: Abaque de réglage (v, lambda)

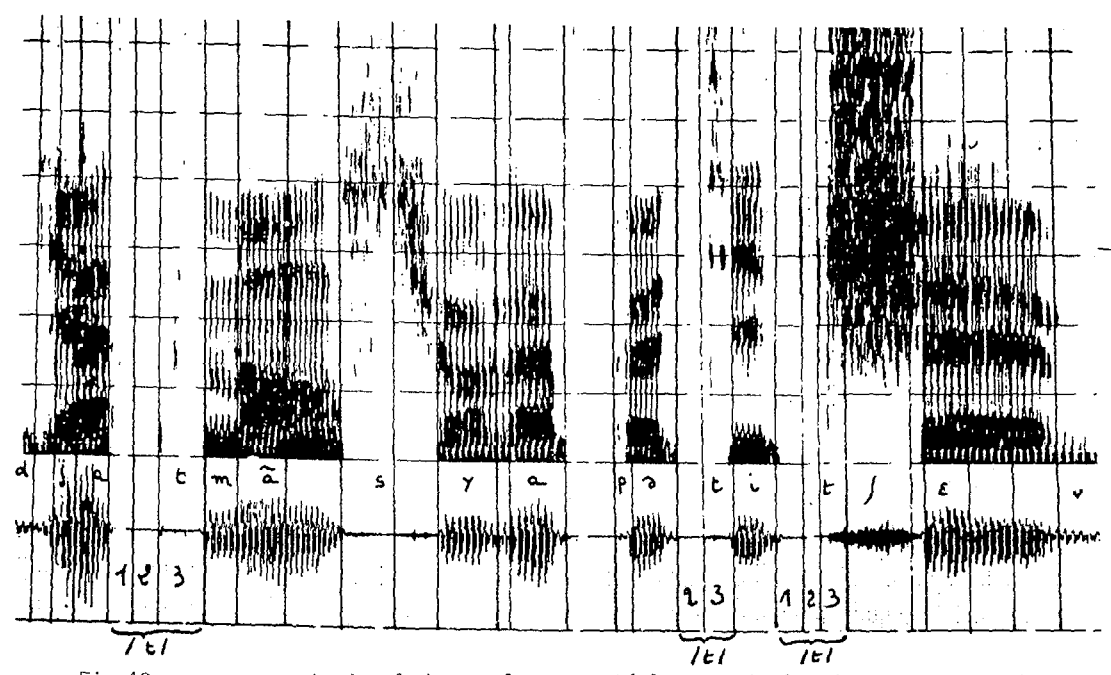


Fig.10: sonagramme et signal de parole segmenté-les verticales indiquent les détections