

Utilisation de la pseudo-distribution
de Wigner-Ville lissée pour la détermination
de l'instant de fermeture de la glotte

Determination of the instant of glottal closure

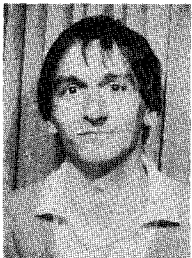
with the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution



Jean F. ALLARD

Laboratoire d'Acoustique, UA 1101, Université du Maine, BP n° 535, route de Laval, 72017 LE MANS CEDEX.

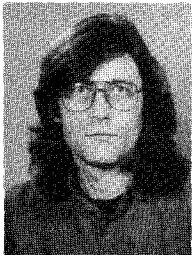
Ingénieur ESE, Docteur es Sciences (Physique Corpusculaire). Professeur à la faculté des Sciences du Mans. Domaines de recherche actuels : Propagation dans les milieux poreux, mesure des impédances acoustiques en champ libre, restauration des enregistrements historiques par les techniques de traitement numérique du signal.



Renaud BOURDIER

Laboratoire d'Acoustique, UA 1101, Université du Maine, BP n° 535, route de Laval, 72017 LE MANS CEDEX.

DEA d'Acoustique Appliquée. Prépare sa thèse de troisième cycle en collaboration avec l'Université de Paderborn (RFA) sur le filtrage adaptatif appliqué à la restauration des enregistrements historiques.



Claude DEPOLLIER

Laboratoire d'Acoustique, UA 1101, Université du Maine, BP n° 535, route de Laval, 72017 LE MANS CEDEX.

DEA de Physique Nucléaire. Enseigne à l'IUT du Mans. Domaines de recherche actuels : Propagation dans les milieux désordonnés et les milieux poreux. Applications du traitement du signal à l'analyse de la parole.

RÉSUMÉ

Pour différents signaux de parole voisée, l'instant de la fermeture de la glotte a été déterminé en utilisant la pseudo-distribution de Wigner-Ville lissée et la méthode de Wong. Les deux méthodes donnent des résultats équivalents quand cette détermination est facile. Quand la détermination devient difficile, la pseudo-distribution de Wigner-Ville lissée peut être encore employée dans certains cas où la méthode de Wong cesse d'être utilisable.

MOTS CLÉS

Wigner-Ville, analyse de la parole.

SUMMARY

For several voiced speech signals, the measurement of the instant of glottal closure was get by using the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution and the Wong method. Both methods give similar results when measurements are easy. For some difficult cases, for which the Wong method becomes unaccurate, the smoothed pseudo Wigner-Ville distribution can still be used.

KEY WORDS

Wigner distribution, speech analysis.

1. Introduction

La pseudo-distribution de Wigner-Ville [1, 2] a été utilisée pour analyser des signaux à large bande non stationnaires, en particulier des réponses impulsionnelles de filtres et de haut-parleurs [3]. Plus récemment, cette distribution a été utilisée en analyse de la parole dans l'étude des consonnes [4]. La pseudo-distribution de Wigner-Ville est dans cette étude utilisée pour la détermination de l'instant de fermeture de la glotte sur des signaux de parole voisée. Cette détermination est importante en synthèse de la parole car elle permet l'évaluation de la période du fondamental. Elle permet aussi de définir des intervalles de temps pendant lesquels le conduit vocal n'est plus excité, et devient le siège d'oscillations libres décroissantes. La connaissance de ces intervalles de temps peut être utile pour déterminer la réponse fréquentielle du conduit vocal, et ultérieurement le signal d'excitation par filtrage inverse. Enfin, une méthode suffisamment sensible de localisation temporelle des instants d'excitation du conduit vocal devrait permettre de détecter et de préciser les cas où la fermeture de la glotte est incomplète, soit à cause de particularités physiologiques propres au locuteur, soit à cause de la nature des sons émis (sons voisés fricatifs par exemple). Plusieurs méthodes ont été proposées pour cette détermination à partir d'une analyse du signal de parole [5-7]. Ces méthodes peuvent devenir inutilisables quand la fréquence du fondamental est élevée et pour certaines voyelles [7], d'où l'emploi dans des travaux récents [8, 9] d'un second capteur, l'électroglottographe, pour détecter plus directement le moment où la glotte se ferme. Les résultats obtenus avec la pseudo-distribution de Wigner-Ville sont comparés dans cette étude avec la méthode de Wong [6] dont les performances sont représentatives des méthodes utilisant l'analyse du signal de parole. Enfin, l'analyse par la pseudo-distribution de Wigner-Ville des signaux à large bande peut être rendue d'interprétation difficile à cause des interférences entre les différentes composantes du spectre [10]. Il peut être utile d'effectuer un lissage temporel pour atténuer l'effet de ces interférences [11]. Nous montrerons l'effet de ce lissage temporel quand la pseudo-distribution de Wigner-Ville est utilisée pour la détermination de l'instant de fermeture de la glotte.

2. La pseudo-distribution de Wigner-Ville

La distribution de Wigner-Ville (DWV) [12, 13] associée à un signal temporel $x(t)$ la fonction W_x dépend

du temps t et de la fréquence f ci-dessous :

$$(1) \quad W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f\tau} d\tau.$$

Cette distribution est une représentation temps-fréquence de l'énergie du signal $x(t)$. Elle a l'inconvénient de comporter, à cause de sa structure bilinéaire, des interférences entre les différentes composantes fréquentielles et/ou temporelles du signal. Les interférences entre composantes de fréquence positive et de fréquence négative peuvent être éliminées par remplacement du signal $x(t)$ par le signal analytique $z(t)$ associé. Cette opération permet aussi de placer la fréquence de repliement à la moitié de la fréquence d'échantillonnage alors qu'elle est au quart de la fréquence d'échantillonnage si $x(t)$ est utilisé [14]. Une partie des interférences subsistantes peut être supprimée en utilisant une fenêtre d'observation temporelle $h(t)$ (à valeurs réelles) qui isolera les composantes fréquentielles non simultanées [10]. La nouvelle représentation temps-fréquence ainsi obtenue est la pseudo-distribution de Wigner-Ville (PDWV) [1]. Si elle est associée au signal analytique et non au signal $x(t)$ lui-même, elle a pour expression :

$$(2) \quad PW_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h^2\left(\frac{\tau}{2}\right) z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \times z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2\pi i f\tau} d\tau.$$

Cette représentation temps-fréquence peut fournir une description des signaux temporels beaucoup plus précise que la transformée de Fourier à court terme. Elle a été utilisée après numérisation pour caractériser des réponses impulsionnelles de filtres et de haut-parleurs [3]. Des interférences subsistent entre composantes de fréquence positive. Un lissage temporel [15] permet de diminuer leur amplitude. La distribution associée est la pseudo-distribution de Wigner-Ville lissée (PDWVL). Son expression est :

$$(3) \quad PW_z(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t-u) PW_z(u, f) du.$$

Dans cette expression, $g(t)$ est la fenêtre de lissage temporel. Pour affaiblir sensiblement un terme d'interférence entre deux composantes fréquentielles distantes de Δf , la largeur T de la fenêtre de lissage doit vérifier la relation [11] :

$$(4) \quad T \geq 1/\Delta f.$$

Pour un signal échantillonné, on peut faire choix pour la PDWVL de l'expression ci-dessous [16] :

$$(5) \text{PWL}_z(t, f) = 2 \sum_{\tau=-N+1}^{N-1} h^2(\tau) \times \sum_{k=-M+1}^{M-1} g(k) z(t+k+\tau) z^*(t+k-\tau) e^{-i4\pi f\tau}$$

Cette formulation permet l'utilisation de la transformée de Fourier rapide. En effet l'égalité (5) peut être réécrite sous la forme :

$$(6) \text{PWL}_z\left(t, \frac{n}{2N}\right) = 4 \operatorname{Re} \left[\sum_{\tau=0}^{N-1} e^{-2\pi i(n\tau/N)} h_N^2(\tau) \times \sum_{k=-M+1}^{M-1} g(k) z(t+k+\tau) z^*(t+k-\tau) - \frac{1}{2} \sum_{k=-M+1}^{M-1} g(k) |z(t+k)|^2 \right]$$

Cette dernière expression légèrement modifiée a été utilisée pour l'analyse de signaux simples non stationnaires [2]. Nous l'utiliserons dans la suite de cette étude. Cette quantité est de signe quelconque. C'est sa valeur absolue qui sera représentée graphiquement. La PDWV associée est obtenue en prenant pour fenêtre de lissage l'impulsion unité.

3. La localisation temporelle de l'instant de fermeture de la glotte pour la parole voisée avec la PDWVL et la méthode de Wong

MÉTHODE DE WONG [6]

Une voyelle est générée par une excitation périodique du conduit vocal apparaissant essentiellement au moment où la glotte se ferme [17]. Après chaque excitation, le conduit vocal est le siège d'oscillations libres amorties jusqu'à la réouverture de la glotte. A partir de ces simples considérations Wong [6] a montré que si on utilise les matrices de covariance [18] pour déterminer par prédiction linéaire le filtre associé au conduit vocal, l'erreur résiduelle quadratique totale calculée pour un temps t situé dans la période de fermeture de la glotte, pouvait théoriquement être nulle. En pratique, l'évolution de cette erreur après normalisation par l'énergie du signal initial doit indiquer les intervalles de temps pendant lesquels la glotte est fermée. Pour améliorer les performances de cette méthode, le signal initial doit d'abord être préfiltré pour tenir compte de l'effet des lèvres.

UTILISATION DE LA PDWVL

Si on effectue l'analyse temps-fréquence d'un signal sinusoïdal, ou sinusoïdal amorti, par transformée de Fourier à court terme ou par PDWVL, on observe des spectres très similaires avec les deux méthodes. Si on introduit une variation brutale, en phase ou en amplitude, sur le signal analysé, il apparaît que les

spectres obtenus par PDWVL centrés sur des points situés sur cette variation présentent un aplatissement très marqué. Le même phénomène existe avec la transformée de Fourier à court terme quand la fenêtre d'analyse contient la variation, mais le phénomène est alors beaucoup moins net et moins localisé dans le temps. Pour préciser la position de la perturbation créée par la fermeture de la glotte, le signal sera analysé par PDWL avec une fenêtre glissante, et on tentera de localiser un aplatissement des spectres obtenus. Le point milieu de la fenêtre d'analyse associée à un spectre présentant un aplatissement doit, d'après les considérations précédentes, être très proche de l'instant où la glotte se ferme.

4. Exemples d'utilisation de la PDWVL et de la méthode de Wong

Les voyelles qui seront étudiées dans ce paragraphe ont été extraites d'un répertoire standard de phrases directement enregistrées numériquement avec une fréquence d'échantillonnage de 16 kHz dans des conditions optimales.

LOCALISATION DE LA FERMETURE DE LA GLOTTE POUR UN [a]

Sur les figures 1 a et 1 b sont représentés le signal temporel et l'erreur résiduelle quadratique totale normalisée utilisée dans la méthode de Wong. La fenêtre est une fenêtre de Hamming de 96 points et le filtre est d'ordre 24. Une décroissance très rapide de l'erreur résiduelle permet de localiser une fermeture de la glotte au temps 0,0256 seconde, avec une précision qui est celle de la période d'échantillonnage.

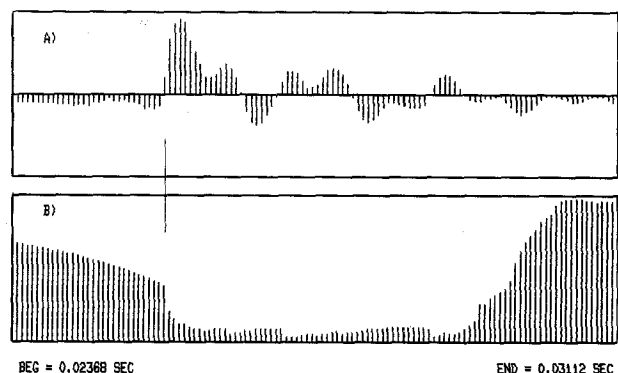


Fig. 1 a. — Représentation temporelle de la voyelle a.

Fig. 1 b. — Erreur de prédiction pour le signal préfiltré. Fenêtres de Hamming de 96 points, ordre du filtre 24. L'instant de fermeture de la glotte apparaît à $T=0,0256$ seconde.

Sur les figures 1 c, 1 d, 1 e sont représentées les PDWV et les PDWVL calculées à partir du signal analytique, et les transformées de Fourier à court terme. Dans tous les cas, la fenêtre d'analyse utilisée est une fenêtre de Kaiser-Bessel de 69 points. Pour la PDWVL la fenêtre de lissage est une fenêtre Kaiser-Bessel de 25 points. L'aplatissement des

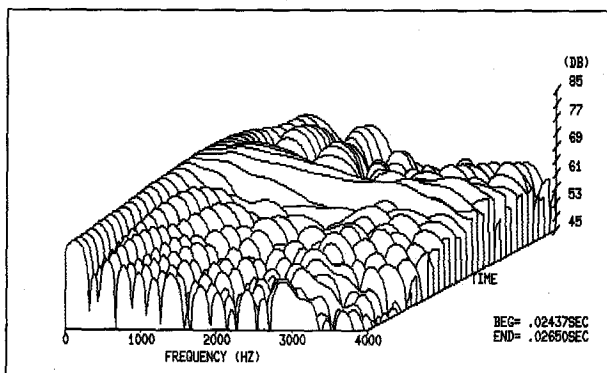


Fig. 1 c. — Représentation par PDWV du signal analytique associé à celui de la figure 1 a. Fenêtre d'analyse de Kaiser-Bessel de 69 points. L'instant de fermeture de la glotte apparaît à $T=0,0256$ seconde.

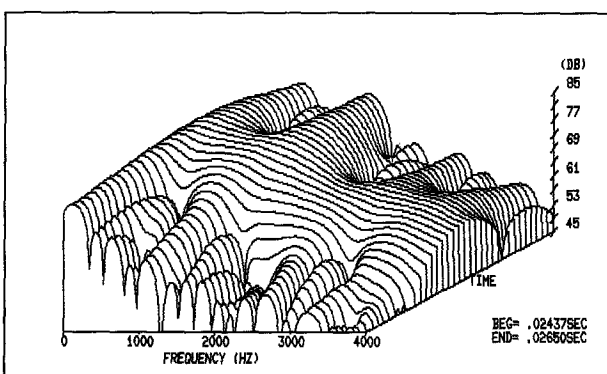


Fig. 1 d. — Représentation par PDWVL du signal analytique associé à celui de la figure 1 a. Fenêtre d'analyse de Kaiser-Bessel de 69 points. Fenêtre de lissage de 25 points.

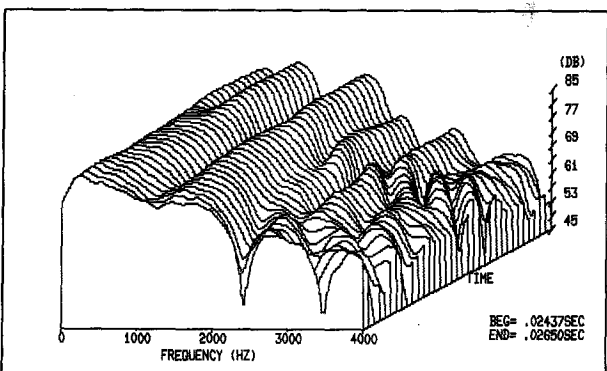


Fig. 1 e. — Représentation par transformée de Fourier à court terme du signal de la figure 1 a. Fenêtre d'analyse de Kaiser-Bessel de 69 points.

spectres de PDWV en figure 1 c apparaît quand le point central de la fenêtre d'analyse est à $t=0,0256$ seconde, on obtient donc le même résultat que par la méthode de Wong. De même, la zone dans laquelle cet aplatissement subsiste est de l'ordre de la période d'échantillonnage. L'aplatissement du spectre est moins net avec la PDWVL en figure 1 d à cause de la longue durée de la fenêtre de lissage, mais apparaît beaucoup plus nettement qu'avec la transformée de Fourier à court terme en figure 1 e. D'autre part il est possible d'effectuer une analyse fréquentielle dans de bonne conditions avec la PDWVL, le lissage ayant

considérablement diminué l'amplitude des interférences. Cet exemple est caractéristique des cas où la détermination de l'instant où la glotte se ferme est facile, la méthode de Wong et la PDWV permettant alors d'obtenir des résultats d'une précision similaire. L'analyse, menée dans les mêmes conditions, des voyelles [e], [ε], [φ], [ɔ] aboutit aux mêmes conclusions.

LOCALISATION DE LA FERMETURE DE LA GLOTTE POUR UN [u]

Sur les figures 2 a et 2 b sont représentés le signal temporel et l'erreur résiduelle quadratique totale normalisée associée à une fenêtre de Hamming de 64 points et à un filtre d'ordre 14. L'erreur résiduelle évolue lentement en fonction du temps et il n'est pas possible de déduire avec précision de la figure 2 b le moment où la glotte se ferme. Le comportement de l'erreur résiduelle obtenue en faisant varier l'ordre du filtre dans de larges limites, entre 6 et 26, ne permet pas de mieux préciser le moment où la glotte se ferme. Sur les figures 2 c et 2 d sont représentées successivement les PDWVL calculées à partir du signal analytique, et du signal initial, avec une fenêtre d'analyse de Kaiser-Bessel de 63 points, et une fenêtre de lissage de Hamming de durée 17 points. La zone dans laquelle l'aplatissement subsiste est de l'ordre de quatre périodes d'échantillonnage, plus grande dans les deux cas que pour le [a] étudié précédemment. Les PDWV

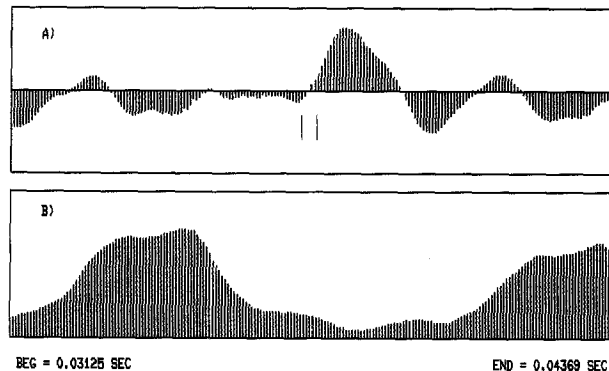


Fig. 2 a. — Représentation temporelle de la voyelle u.

Fig. 2 b. — Erreur de prédiction pour le signal préfiltré. Fenêtres de Hamming de 64 points, ordre du filtre 14.

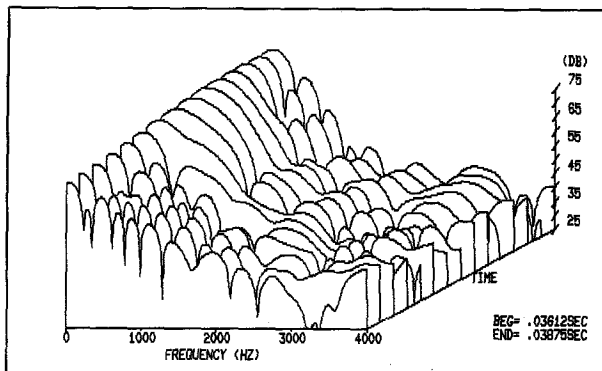


Fig. 2 c. — Représentation par PDWVL du signal analytique associé à celui de la figure 2 a. Fenêtre d'analyse de Kaiser-Bessel de 63 points. Fenêtre de lissage de Hamming de 17 points. L'instant de fermeture de la glotte apparaît entre $T=0,03725$ seconde et $T=0,0375$ seconde.

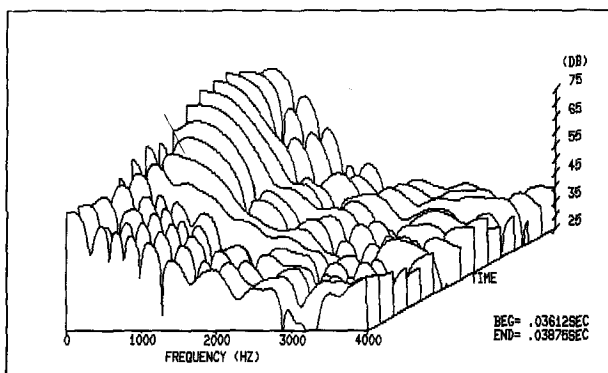


Fig. 2 d. — Représentation par PDWVL du signal temporel de la Figure 2 a. Mêmes conditions que pour la figure 2 c.

n'ont pas été représentées car la zone d'aplatissement est de largeur similaire, dans cet exemple, en l'absence de lissage.

On constate d'autre part en comparant les figures 2 c et 2 d que le calcul effectué avec le signal analytique donne un résultat de précision comparable à celui effectué avec le signal initial. La zone où le spectre présente un aplatissement marqué a été limitée par deux traits verticaux sur la figure 2 a et paraît raisonnablement pouvoir être associée à une excitation du conduit vocal. Nous avons noté d'autres cas, pour un [i] et un [o], où la méthode de Wong est en défaut et où il est encore possible d'utiliser la PDWVL, mais nous n'avons pas observé la situation inverse. Sur tous les exemples que nous avons étudiés pour lesquels la PDWVL ne fournit pas d'indications sur l'instant de fermeture de la glotte, un [u], un [y], et un [i], la méthode de Wong est aussi inutilisable.

SENSIBILITÉ DES DEUX MÉTHODES AUX CONDITIONS D'ENREGISTREMENT

Successivement, le [a] précédemment étudié a été filtré par un filtre passe tout à phase non linéaire, et un bruit blanc a été ajouté au signal. L'analyse effectuée sur ces deux signaux n'a pas permis de conclure que l'une ou l'autre des deux méthodes était plus sensible à une distorsion de phase ou à l'adjonction de bruit.

5. Évaluation de l'instant de fermeture de la glotte par des critères objectifs simples à partir de la PDWVL

La localisation d'une zone d'aplatissement du spectre de PDWVL permet de repérer l'instant de la fermeture de la glotte. Un critère objectif permettant de caractériser cet aplatissement est nécessaire pour l'utilisation ultérieure d'un algorithme de décision sur la localisation de cet instant. La présence de pics dans le spectre de PDWVL est liée à la présence de dérivées d'ordre supérieur à 1 par rapport à la fréquence dans le spectre continu associé. On peut mettre simplement en évidence la présence de ces dérivées en observant, par exemple, l'évolution en fonction du temps de la

quantité A (t) :

$$(7) \quad A(t) = \sum_{n=n_1}^{n_2} \left| \text{PWL}_z \left(t, \frac{n-1}{2N} \right) + \text{PWL}_z \left(t, \frac{n+1}{2N} \right) - 2 \text{PWL}_z \left(t, \frac{n}{2N} \right) \right|$$

Les quantités n_1 et n_2 sont choisies de sorte que seul soit utilisé un domaine de fréquences dans lequel l'aplatissement du spectre soit particulièrement accentué. La quantité A (t) présente l'inconvénient d'être sensible aussi à l'amplitude moyenne du spectre de PDWVL et devrait être normalisée. En fait, l'expérience montre que dans le cadre de cette étude, une bonne appréciation de l'aplatissement du spectre et de la disparition des pics est obtenue avec la quantité B (t), d'expression :

$$(8) \quad B(t) = \log \sum_{n=n_1}^{n_2} \left| \log \left| \text{PWL}_z \left(t, \frac{n-1}{N} \right) \right| + \log \left| \text{PWL}_z \left(t, \frac{n+1}{N} \right) \right| - 2 \log \left| \text{PWL}_z \left(t, \frac{n}{N} \right) \right| \right|$$

Pour le [a] étudié précédemment, l'évolution de B (t) est représentée sur les figures 3 a et 3 b. Pour ces deux figures les limites n_1 et n_2 sont telles que l'exploration en fréquence est effectuée de 80 à 3 600 Hz et l'intervalle de temps choisi fait apparaître quatre fermetures de la glotte. Sur la figure 3 a, il n'y a pas de lissage temporel et les conditions de calcul de la PDWV sont

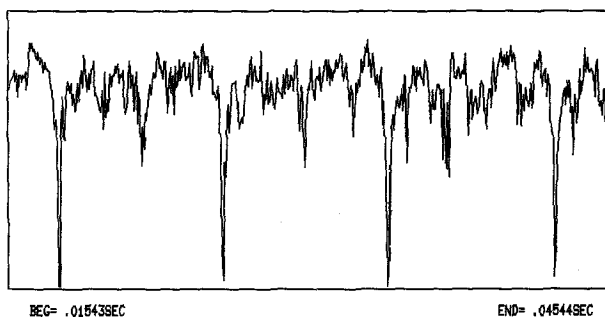


Fig. 3 a. — Représentation de B (T) faisant apparaître quatre fermetures de la glotte pour le a étudié précédemment. La PDWVL est calculée dans les conditions de la figure 1 c, sans lissage temporel.

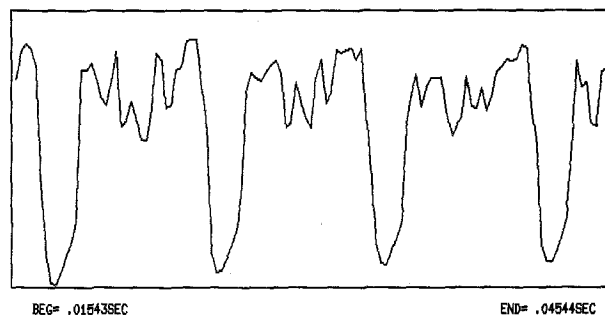


Fig. 3 b. — Représentation de B (T) faisant apparaître quatre fermetures de la glotte pour le a étudié précédemment. La PDWVL est calculée dans les conditions de la figure 1 d, avec une fenêtre de lissage temporel de 25 points.

celles utilisées pour la figure 1c. On trouve quatre minimums très accentués de $B(t)$ aux instants de fermeture de la glotte. D'autres minimums secondaires existent, mais ils peuvent être écartés car ils sont significativement moins marqués que ceux associés aux instants de fermeture de la glotte. Enfin, les minimums associés à la fermeture de la glotte sont localisés, comme il a été signalé dans le paragraphe précédent, avec une précision qui est de l'ordre de la période d'échantillonnage.

Sur la figure 3b, les conditions de calcul de la PDWVL sont celles utilisées pour la figure 1d. Une fenêtre de lissage de 25 points a été utilisée. Les minimums associés aux instants de fermeture de la glotte apparaissent toujours, mais l'instant de la fermeture de la glotte est déterminé avec moins de précision, la variation de $B(t)$ étant beaucoup moins brutale. Les formants sont suffisamment éloignés les uns des autres pour que les interférences, en l'absence de lissage, ne génèrent pas un aplatissement du spectre. Au contraire, de nouveaux pics apparaissent. L'absence de lissage, dans le cadre des signaux étudiés dans cette étude, n'est pas gênante pour l'observation de l'aplatissement du spectre de PDWV. Ainsi qu'il a été noté dans le paragraphe précédent, la précision avec laquelle on peut évaluer l'instant de fermeture de la glotte est maximale en l'absence de lissage temporel.

Conclusion

La PDWV et la PDWVL associées à une fenêtre de lissage courte, paraissent être plus performantes que la méthode de Wong pour localiser l'instant où la glotte se ferme. D'autre part, quand on accroît suffisamment la durée de la fenêtre de lissage de la PDWVL, la mesure de ce moment s'effectue avec une précision moindre, mais on obtient alors une description temps fréquence qui présente des performances intéressantes par rapport à la transformation de Fourier à court terme. La PDWVL paraît donc être un outil efficace dans l'analyse de la parole, dont toutes les possibilités n'ont pas encore été explorées.

Remerciements

Manuscrit reçu le 28 octobre 1986.

Nous remercions M. le professeur Marc Baudry pour ses conseils et son hospitalité et M. Jean C. Valière pour l'aide qu'il nous a apportée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. A. C. M. CLAASEN et W. F. G. MECKLENBRAÜKER, The Wigner distribution — A tool for time-frequency signal analysis, *Philips J. Res.*, 35, 1980, p. 217-250.
- [2] P. FLANDRIN et B. ESCUDIE, Principe et mise en œuvre de l'analyse temps-fréquence par transformation de Wigner-Ville, *Traitement du Signal*, 2, 1985, p. 143-151.
- [3] P. JANSE et J. M. KAIZER, Time-frequency distributions of loudspeakers: The application of the Wigner distribution, *J. Audio Eng. Soc.*, 31, 1983, p. 198-223.
- [4] H. GARUDADRI, M. P. BEDDOES, J. H. V. GILBERT et A. P. BENGUEREL, Identification of invariant acoustic cues in stop consonants using the Wigner distribution, *IASTED Int. Symp.*, "Applied Signal Processing and Digital Filtering", Paris, 1985.
- [5] H. W. STRUBE, Determination of the instant of glottal closure from the speech wave, *J. Acoust. Soc. Am.*, 56, 1974, p. 1625-1629.
- [6] D. Y. WONG, J. D. MARKEL et A. H. GRAY, Least squares glottal inverse filtering from the acoustic speech wave form, *IEEE Trans. on ASSP*, 27, 1979, p. 350-355.
- [7] T. V. ANANTHAPADMANANBHA et B. YEGNANARAYANA, Epoch extraction from linear prediction residual for identification of closed glottis interval, *IEEE Trans. on ASSP*, 27, 1979, p. 309-319.
- [8] D. E. VEENEMAN et S. L. BEMENT, Automatic glottal inverse filtering from speech and electroglottographic signals, *IEEE Trans. on ASSP*, 33, 1985, p. 369-377.
- [9] P. MILENKOVIC, Glottal inverse filtering by joint estimation of an AR system with a linear input model, *IEEE Trans. on ASSP*, 34, 1986, p. 28-41.
- [10] F. HLAWATSCH, Interferences terms in the Wigner distribution in *Digital Signal Processing 84*, V. CAPELLINI et A. G. CONSTANTINIDES éd., North-Holland, Amsterdam, 1984, p. 363-367.
- [11] P. FLANDRIN, Some features of time-frequency representations of multicomponents signals, *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP-84*, San Diego, 1984.
- [12] E. P. WIGNER, On the quantum correction for thermodynamic equilibrium, *Phys. Rev.*, 40, 1932, p. 749-759.
- [13] J. VILLE, Théorie et applications de la notion de signal analytique, *Cables et Transm.*, 2A, (1), 1948, p. 61-74.
- [14] T. A. C. M. CLAASEN et W. F. G. MECKLENBRAÜKER, The aliasing problem in discrete-time Wigner distributions, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-31, (5), 1983, p. 1067-1072.
- [15] W. MARTIN et P. FLANDRIN, Analysis of non-stationary processes: short-time periodograms versus a pseudo-Wigner estimator in *Signal Processing: theories and applications II*, H. SCHÜSSLER éd., North-Holland, Amsterdam, 1983, p. 455-458.
- [16] P. FLANDRIN, W. MARTIN et M. ZAKHARIA, On a hardware implementation of the Wigner-Ville transform in *Digital Signal Processing-84*, V. CAPELLINI et A. G. CONSTANTINIDES éd., North-Holland, Amsterdam, 1984, p. 262-266.
- [17] R. L. MILLER, Nature of the vocal cord wave, *J. Acoust. Soc. Am.*, 31, 1959, p. 667-677.
- [18] B. S. ATAL et S. L. HANAUER, *J. Acoust. Soc. Am.*, 50, 1971, p. 637-655.