



MESURES OBJECTIVES DE LA REDUCTION DE BRUIT

G. FAUCON, R. LE BOUQUIN, A. AKBARI AZIRANI

Laboratoire de Traitement du Signal et de l'Image - Université de Rennes I
Campus de Beaulieu - 35042 Rennes Cedex - FRANCE

RÉSUMÉ

Ce papier traite du problème de l'évaluation de techniques de réduction de bruit pour les télécommunications mains-libres. Après un rappel des principales mesures objectives utilisées dans ce contexte, nous présentons une nouvelle mesure, qui prend en compte la distorsion du signal évaluée sur les blocs où la parole prédomine ainsi que le bruit résiduel estimé sur les blocs où le bruit est prépondérant. Des tests montrent que cette mesure apparaît bien corrélée avec les tests informels d'écoute.

1. INTRODUCTION

Avec l'apparition des télécommunications mains-libres, le problème de la réduction de bruit sur la parole est devenu un point clé du rehaussement de la parole. Celle-ci doit permettre de réduire le bruit ambiant perturbateur, sans distordre le signal de parole et sans ajouter de bruits particuliers spécifiques aux traitements tels que le bruit musical. De nombreuses solutions ont été proposées et ont été évaluées. Si l'évaluation et la comparaison de celles-ci peuvent être faites par des tests subjectifs, ceux-ci sont néanmoins longs et coûteux. De plus, les résultats dépendent d'un grand nombre de paramètres tels que l'entraînement et la fatigue des auditeurs, le choix et la durée du test et sont par conséquent difficilement reproductibles. D'autre part, tous les laboratoires travaillant sur le problème de la réduction du bruit n'ont pas forcément les moyens pour mener à bien de tels tests d'écoute. Une alternative est donc de procéder à des mesures objectives prenant en compte la qualité globale du signal estimé : bruit résiduel, distorsion subie par le signal de parole, bruits apportés par le traitement. Celles-ci nécessitent la comparaison du signal de parole pur au signal estimé en sortie du traitement. Aussi le signal de parole doit-il être accessible et pour ce, signal et bruit doivent être enregistrés séparément puis additionnés avant d'être appliqués au système réducteur de bruit. Ce faisant, bien que l'effet Lombard ne soit pas pris en compte, ceci permet d'évaluer l'effet apporté par chacune des méthodes. L'avantage d'un test objectif, fortement corrélé avec les tests d'écoute, est sa reproductibilité et l'obtention rapide du résultat. Aussi, des mesures objectives doivent-elles être proposées pour l'évaluation des méthodes de réduction de bruit afin de disposer de moyens fiables de comparaison. Si un grand nombre de mesures ont été proposées et étudiées dans l'évaluation de codeurs [1], peu ont été essayées dans le problème qui nous intéresse. Nous donnerons au paragraphe 2 une revue succincte des méthodes couramment utilisées pour l'évaluation des méthodes de réduction de bruit ; de plus, nous rappellerons l'expression de la mesure combinée M que nous avons déjà proposée, qui englobe deux quantités évaluées séparément, à savoir un taux de distorsion estimé sur la parole et un facteur de réduction de bruit. Cette mesure, si elle s'avère bien corrélée avec les tests d'écoute, nécessite toutefois que

ABSTRACT

This work addresses the problem of evaluating noise reduction techniques for hand-free telecommunications. It presents some objective measures that are used in such a context. Finding a high correlation between objective and subjective tests remains a key point. In this paper, we propose a new composite measure which is easy to implement in the processing algorithm.

le traitement puisse se mettre sous la forme d'un filtrage appliqué et au signal seul et au bruit seul, ce qui augmente la complexité du programme de traitement. Nous proposerons alors, au paragraphe 3, une nouvelle mesure M' combinant deux grandeurs directement apprises sur le signal estimé en sortie du traitement. Nous expliquerons ensuite comment sont menés nos tests informels d'écoute. Finalement des résultats seront présentés avant de conclure.

2. MESURES OBJECTIVES

Dans le problème du débruitage, lorsque signal pur et signal estimé sont effectivement disponibles, la puissance de l'erreur d'estimation permet de calculer un gain sur le rapport signal à bruit (RSB) [2] [3]. Bien que couramment utilisé, celui-ci n'est pas toujours significatif et ne s'accorde pas systématiquement avec les tests subjectifs. Une évaluation plus rationnelle consiste à rechercher des critères objectifs qui se rapprochent des tests subjectifs. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes orientés vers des mesures de distances très utilisées en reconnaissance de la parole. Les distances spectrales les plus utilisées s'avèrent être la distance cepstrale, la distance d'Itakura-Saito (IS) [4], la mesure cosh [3] ou distance IS symétrisée, la distance LLR [5]. D'autres mesures objectives, telles que le "root mean square log spectra" (rmsls) [6], la fonction de cohérence [7] ou l'indice d'information [8] ont également été avancées mais peu utilisées jusqu'à ce jour. D'autre part la validité de ces mesures restant à prouver, nous avons préféré ne retenir que deux des mesures les plus fréquemment rencontrées dans la littérature : le gain sur le RSB et la distance cepstrale, dont nous rappelons les expressions ci-après. Nous citerons ensuite une mesure composée déjà introduite dans [9] ainsi que la mesure WSM (Weighted Slope Metric) pouvant être utile dans l'élaboration d'une nouvelle mesure. Dans la suite, nous noterons x le signal pur à estimer et x' le signal bruité à l'entrée du système ou le signal estimé en sortie du système.

2.1. Le gain sur le RSB (Rapport Signal à Bruit)

Mieux corrélé avec les tests d'écoute que le RSB conventionnel, le rapport signal à bruit segmental RSB_{seg} se note :



$$RSB_{seg} = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x(i+Nk)^2}{\sum_{i=0}^{N-1} (x(i+Nk) - x'(i+Nk))^2} \right) \quad (1)$$

Le signal est divisé en L blocs de N échantillons chacun. Le RSB_{seg} est obtenu en moyennant le RSB exprimé en décibels sur tous les blocs. Dans notre application, la valeur de N est fixée à 256 (ce qui correspond à une tranche de signal de 32ms si le signal est échantillonné à 8kHz). Le gain G est naturellement obtenu par différence du RSB_{seg} de sortie et du RSB_{seg} d'entrée.

2.2. La distance cepstrale

Nous nous intéressons ici au cas particulier où les spectres sont appréhendés par le biais des modèles paramétriques AR ; il est en effet possible d'identifier les signaux de parole avec des modèles autorégressifs d'ordre p et de travailler ensuite sur des coefficients issus de ce modèle tels que les coefficients cepstraux. La distance cepstrale est une version tronquée de la norme L_2 de la différence des logarithmes des spectres. Elle est définie comme suit :

$$d_{cep} = \sum_{n=1}^{2p} (c_n - c'_n)^2 \quad (2)$$

où c_n et c'_n sont les coefficients cepstraux correspondant à x et x' respectivement ; l'ordre p du modèle est ici fixé à 8.

2.3. La mesure composée M

Initialement proposée dans [9], cette mesure apparaît mieux corrélée avec les tests d'écoute que les deux précédentes. Son principe repose sur le fait que le traitement appliqué à l'observation peut généralement être mis sous forme de filtrage applicable au signal de parole seul et au bruit seul, quantités disponibles pour l'évaluation de nos méthodes. L'idée consiste à déterminer la distorsion réelle subie par la parole en envoyant sur le système réducteur de bruit le signal de parole seul x ; on obtient ainsi un signal filtré x_f dont la partie distordue s'écrit $\varepsilon_x = x - x_f$. De même, on peut évaluer la réduction de bruit en envoyant sur ce même système le bruit seul, b , pour obtenir un bruit résiduel ε_b . Nous calculons alors une distorsion segmentale du signal x , notée D :

$$D = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \varepsilon_x(i+Nk)^2}{\sum_{i=0}^{N-1} x(i+Nk)^2} \right) \quad (3)$$

ainsi qu'un facteur de réduction de bruit segmental, R , défini par :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \varepsilon_b(i+Nk)^2}{\sum_{i=0}^{N-1} b(i+Nk)^2} \right) \quad (4)$$

Une combinaison appropriée de ces deux grandeurs conduit à la mesure M :

$$M = \alpha H_{\beta}^{\gamma}(D) + 1/R$$

$$\text{où } H_{\beta}(u) = \begin{cases} u - \beta & \text{si } u > \beta \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

Comme on peut le remarquer cette mesure ne prend en compte que les distorsions sur le signal supérieures à un seuil qui reste à définir. Les paramètres α , β et γ sont à fixer lors d'une période d'apprentissage.

2.4. La mesure WSM (Weighted Slope Metric)

Cette distance qui sert de base dans la mesure M définie dans le prochain paragraphe a été initialement introduite pour modéliser la perception de la parole et proposée par Klatt [10]. Cette mesure peut être calculée en estimant tout d'abord le spectre du signal en utilisant un banc de filtres puis en trouvant la pente spectrale dans chaque bande. Rappelons les points fondamentaux de cette mesure :

- la décomposition en fréquence est basée sur les bandes critiques ;
- les pentes des logarithmes des spectres sont les quantités à comparer plutôt que les spectres eux-mêmes ;
- les différences de pentes sont pondérées de telle sorte que les pics sont plus accentués que les vallées ;
- l'intensité dans les bandes de fréquence est mesurée en décibels.

Soient $X_r(i)$ le spectre de référence et $X'_r(i)$ le spectre déformé, tous deux mesurés en décibels, $S_r(i)$ et $S'_r(i)$ les pentes de ces spectres :

$$S_r(i) = X_r(i+1) - X_r(i) \quad (6)$$

$$S'_r(i) = X'_r(i+1) - X'_r(i)$$

où i est l'indice de la bande. Une pondération $W(i)$ doit être calculée pour chaque bande. Pour ce faire, on tient compte de deux facteurs essentiels : il s'agit de savoir si la bande considérée est proche d'un pic spectral ou d'une vallée et si le pic est le plus large du spectre. Cette pondération est calculée ainsi :

$$W(i) = \frac{K_{GMAX}}{K_{GMAX} + X_{GMAX} - X(i)} \frac{K_{LMAX}}{K_{LMAX} + X_{LMAX}(i) - X(i)} \quad (7)$$

où i est l'indice de la bande. Cette fonction de pondération est composée de deux termes. Le premier terme pondère les bandes dont l'amplitude spectrale est la plus proche de l'amplitude spectrale maximale parmi toutes les bandes. Dans ce terme, X_{GMAX} est la plus grande amplitude spectrale. Le second terme accroît le poids des bandes qui se situent près d'un maximum spectral local. Dans celui-ci, $X_{LMAX}(i)$ est la valeur du pic qui est le plus près de la bande i . K_{GMAX} et K_{LMAX} sont des constantes à ajuster. $W(i)$ est à calculer pour les deux spectres séparément (à savoir $W_r(i)$ et $W'_r(i)$), la moyenne de ces deux spectres donnant la valeur finale $W_a(i)$:

$$W_a(i) = \frac{1}{2} [W_r(i) + W'_r(i)] \quad (8)$$

La distance spectrale s'écrit alors :

$$d_{WSM} = K_E |E_r - E'_r| + \sum_{i=1}^Q W_a(i) [S_r(i) - S'_r(i)]^2 \quad (9)$$

où Q est le nombre de bandes de fréquence, $|E_r - E'_r|$ est la différence d'énergie absolue entre le signal de référence et le signal estimé. K_E est un coefficient de pondération qui peut varier pour obtenir la meilleure performance. La distance peut être moyennée sur l'ensemble des trames et conduire à une distance spectrale globale.

3. NOUVELLE MESURE M' PROPOSEE

Dans le paragraphe 2.3., nous avons proposé une mesure combinant distorsion sur le signal et facteur de réduction de bruit, évalués séparément. Cette mesure a donné de bons résultats comme le montreront la Figure 1 du paragraphe 5.2. et la corrélation calculée entre tests objectifs et subjectifs. Cependant la complexité du programme de traitement est augmentée, puisqu'il est nécessaire d'appliquer le filtrage correspondant au débruitage et au signal de parole seul, x , et au bruit seul, b . L'idée que nous voulons exploiter maintenant est de calculer des grandeurs similaires à D et $1/R$ direc-



tement à partir du signal estimé, x' , sans avoir à dupliquer le filtrage. Un facteur de réduction R' est chiffré en présence de bruit supposé seul ; bien entendu, il ne sera pas le même que précédemment puisque, en présence de bruit seul, le filtrage doit tendre vers zéro, alors que précédemment, ce filtrage était déterminé en présence de signal. Sur L_1 trames de faible puissance, nous évaluons R' de la façon suivante :

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{L_1} \sum_{k=0}^{L_1-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x'(i+Nk)^2}{\sum_{i=0}^{N-1} b(i+Nk)^2} \right) \quad (10)$$

Un taux de distorsion, noté D' , sera évalué en présence de signal important. Aussi considérerons-nous que, sur les blocs où la puissance est suffisamment élevée, le bruit est supposé négligeable vis-à-vis de la parole. Dans ce cas, le gain du filtrage tend vers 1 et n'est pas nécessairement représentatif de ce qui se passe sur l'ensemble du signal. Nous définissons :

$$D' = \frac{1}{L_2} \sum_{k=0}^{L_2-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} [x(i+Nk) - x'(i+Nk)]^2}{\sum_{i=0}^{N-1} x(i+Nk)^2} \right) \quad (11)$$

Notons également que ce terme tient compte de la puissance du bruit résiduel en sortie. La façon dont nous avons présenté les définitions de $1/R'$ et D' permet un rapprochement avec la mesure M . Nous pouvons élargir un peu ces définitions car nous savons que $1/R'$ et D' seront à combiner et qu'il peut y avoir une redondance entre ces deux informations. C'est pourquoi nous procéderons ainsi : une localisation du signal de parole est effectuée (sur le signal pur) afin de connaître les débuts et fins de phrase. Puis, sur l'ensemble des phrases traitées, entre le début et la fin de chacune, on évalue D' . Puis, sur les séquences de silence (bruit seul), on évalue la quantité $1/R'$. De plus, on décide de prendre une marge de 2 blocs de part et d'autre des localisations trouvées.

On se propose maintenant de combiner les deux mesures D' et $1/R'$ en une seule mesure M' suivant la loi :

$$M' = \alpha D'^{\beta} + \frac{\gamma}{R'} \quad (12)$$

Les paramètres α , β et γ seront à fixer lors d'une phase d'apprentissage.

Nous avons également étudié une autre mesure combinant une grandeur révélatrice de la distorsion donnée par la distance WSM et le facteur de réduction de bruit R' défini précédemment. Un des problèmes est la normalisation de d_{WSM} . La mesure M' pourrait également être donnée par une loi du type :

$$M'' = \alpha d_{WSM}^{\beta} + \frac{\gamma}{R'} \quad (13)$$

où d_{WSM}^N représenterait la distance d_{WSM} normalisée. Jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvé de normalisation ou de loi satisfaisante. C'est la raison pour laquelle dans les résultats proposés nous nous intéresserons à la mesure M' .

4. TESTS INFORMELS D'ECOUTE

Ces tests ont été conduits ainsi :

- les signaux de parole (correspondant à des phrases phonétiquement équilibrées) ont été enregistrés dans une voiture à l'arrêt et les bruits ambiants dans une voiture en roulement ;
- ces signaux ont ensuite été sommés avant d'être envoyés sur différents systèmes de réduction de bruit.

Les résultats des divers traitements sont présentés de la manière suivante :

- le signal de parole pure et le signal bruité sont tout d'abord enregistrés trois fois consécutives ; ceux-ci servent seulement de références et ne seront pas notés ;

- les résultats des traitements sont enregistrés à la suite ; chacun d'eux est répété trois fois et enregistré trois fois sur une bande audio de façon aléatoire.

Ces enregistrements sont alors soumis à dix auditeurs qui doivent apprécier à la fois la réduction du bruit et la distorsion encourue par le signal puis noter chaque séquence de signal traitée de 0 à 5 points par ordre de performance croissant (0 correspond à un signal jugé inacceptable et 5 à un signal transparent vis-à-vis du signal original pur). Une note finale est alors attribuée pour chaque traitement en moyennant les 30 notes données par tous les auditeurs.

5. RESULTATS

5.1. Phase d'apprentissage

Cette première phase a pour but d'établir les paramètres de la nouvelle mesure proposée. Pour ce faire, nous cherchons à évaluer objectivement et subjectivement huit méthodes différentes de réduction de bruit et à trouver la meilleure correspondance entre ces deux types d'évaluation. Les mesures objectives et les tests d'écoute sont ceux décrits dans les paragraphes 2 et 4 respectivement. Le but poursuivi ici n'étant pas de rechercher les traitements les plus efficaces, les techniques de débruitage notées A à H ne seront pas explicitées. En pratique, le bruit perturbateur est enregistré dans une Citroën BX à 130km/h ; la séquence traitée est la suivante : "le tribunal doit bientôt rendre son jugement. Mes yeux s'accoutument lentement à la pénombre". Le RSB_{seg} d'entrée est de l'ordre de 1dB. Les paramètres utilisés dans la mesure M valent : $\alpha = 1/0.3$, $\beta = 0.3$ et $\gamma = 2$. Notons que ces valeurs ont permis d'optimiser la mesure M vis-à-vis de tests d'écoute effectués lors d'une phase préliminaire décrite en [9]. Quant au calcul de la mesure M' , deux lois ont été trouvées qui permettent de parvenir à des classements pratiquement identiques pour cette grandeur et les tests d'écoute. La première loi est donnée par $\alpha = 1$, $\beta = 5$ et $\gamma = 1$ et la seconde par $\alpha = 1$, $\beta = 1$ et $\gamma = 5$. Il nous a semblé qu'une combinaison linéaire de D' et $1/R'$ est probablement plus proche des critères de perception. Nous avons donc conservé cette deuxième loi par la suite. Les résultats correspondants sont reportés dans le Tableau 1.

G (dB)	d_{cep}	M	M'	Tests d'écoute
3.260	0.2710	0.1994	0.13025	H (3.591)
2.826	0.2462	0.1978	0.136	F (3.4697)
3.404	0.1923	0.2192	0.1487	E (3.106)
-0.467	0.3627	0.0889	0.1871	B (3)
-0.461	0.2489	0.0902	0.18925	C (2.8182)
3.844	0.1898	0.2275	0.1613	G (2.6515)
3.868	0.1389	0.2533	0.2077	D (2.2878)
2.604	0.1033	0.2638	0.553	A (0.9621)

Tableau 1

Ces chiffres traduisent un bon comportement de la mesure M' vis-à-vis des tests d'écoute. En ce qui concerne les résultats obtenus sur le gain et la distance cepstrale, ceux-ci se révèlent tout à fait désordonnés. La mesure M , si elle n'est pas optimale, suit toutefois relativement bien l'évolution des tests subjectifs.

5.2. Phase de validation

Afin de confirmer les précédents résultats une phase de validation s'impose. Il s'agit d'expérimenter d'autres techniques de débruitage correspondant à de nouvelles configurations. La séquence de signal traitée est inchangée. Par contre, les conditions de bruit sont modifiées : celui-ci est désormais enregistré dans une Renault 25 à 130km/h et le RSB_{seg} d'entrée est de 2dB. Pour les différentes méthodes A' à H' nous avons évalué le gain sur le rapport signal à bruit, la distance cepstrale, la mesure M , la mesure M' calculée



suivant les paramètres obtenus en 5.1. et conduit les tests informels subjectifs décrits en 4. Les résultats regroupés dans le Tableau 2 sont tout à fait révélateurs. La mesure M' suit pratiquement le classement donné par les tests d'écoute.

G (dB)	d_{cep}	M	M'	Tests d'écoute
5.74	0.3756	0.1079	0.303	H' (4)
5.4	0.3298	0.1055	0.322	F' (3.5)
5.717	0.2771	0.1242	0.313	E' (3.4375)
2.987	0.3196	0.1481	0.457	C' (3)
5.918	0.2755	0.1331	0.323	G' (2.875)
3.073	0.4351	0.1588	0.4573	B' (2.75)
5.817	0.2287	0.1553	0.3822	D' (2.5625)
4.267	0.2457	0.1902	0.93	A' (0.5625)

Tableau 2

Afin de mieux juger les performances de la nouvelle mesure M', nous avons choisi de représenter les résultats précédents sous forme de graphique (Figures 1 et 2) : chaque mesure est classée suivant le rang qu'elle a obtenu pour un traitement donné, les traitements étant rangés par ordre décroissant d'appréciation subjective sur l'axe des abscisses. La Figure 1 met en parallèle les résultats obtenus avec la mesure M et ceux obtenus sur le gain et la distance cepstrale. Pour la Figure 2, la mesure M est remplacée par la mesure M'.

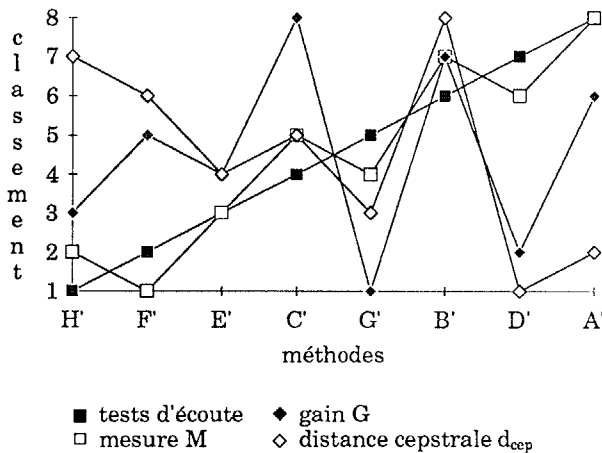


Figure 1

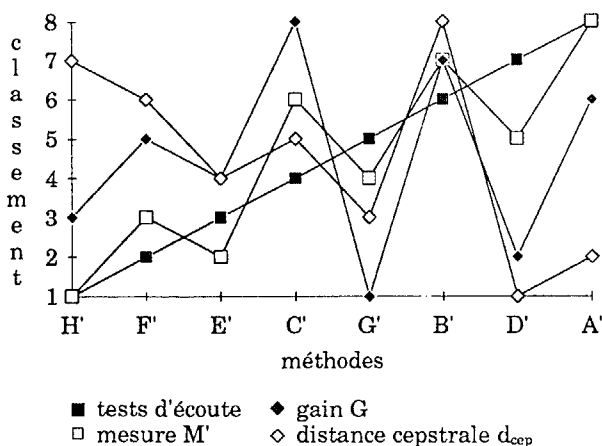


Figure 2

Il se dégage nettement de ces deux figures que les écarts entre la mesure M' (ou M) et les tests informels subjectifs sont très faibles en comparaison de ceux obtenus pour le gain G et la distance cepstrale d_{cep} . D'autre part, il nous a semblé intéressant de calculer la corrélation entre tests objectifs et tests subjectifs [1] ; celle-ci s'exprime par :

$$\rho = \frac{\sum_p (s - \bar{s})(o - \bar{o})}{\left(\sum_p (s - \bar{s})^2 \sum_p (o - \bar{o})^2\right)^{1/2}} \quad (14)$$

où o et s représentent respectivement les résultats objectifs et subjectifs, \bar{o} et \bar{s} étant les grandeurs moyennes associées à o et s. Après calculs, nous trouvons que :

$|\rho| = 0.319$ pour le gain, $|\rho| = 0.917$ pour la mesure M et $|\rho| = 0.938$ pour la mesure M', ce qui renforce les précédents résultats. Cependant, ces valeurs doivent être considérées avec précaution du fait du nombre réduit de grandeurs à partir desquelles sont déduites les statistiques.

6. CONCLUSION

Le problème de l'évaluation objective des méthodes de réduction de bruit est un problème difficile mais d'un grand intérêt. Les mesures objectives usuelles ne semblent pas suffisamment corrélées avec les tests d'écoute. Précédemment, nous avons proposé une mesure M combinant distorsion et réduction de bruit évaluées indépendamment. Si cette mesure reflète une bonne corrélation avec les tests d'écoute, elle nécessite d'être prise en compte dans le programme de réduction de bruit et alourdit celui-ci. Aussi, une nouvelle mesure évaluée sur le signal estimé sur différents intervalles est-elle proposée. Elle combine également deux grandeurs, chacune d'elles privilégiant ou le signal ou le bruit. La limitation des tests ne permet pas de certifier que cette mesure M' est parfaitement corrélée avec les tests d'écoute mais les résultats obtenus s'annoncent prometteurs. Des mesures combinées devraient pouvoir ainsi être proposées et validées sur un nombre plus important de conditions de bruit et de traitements.

REFERENCES

- [1] S.R. Quackenbush et al., "Objective Measures of Speech Quality", Prentice-Hall, 1988.
- [2] H.L. Nguyen Thi, C. Jutten, J. Caelen, "Speech Enhancement : Analysis and Comparison of Methods on Various Real Conditions", Signal Processing VI, EUSIPCO 92, pp. 303-306, Brussels, 1992.
- [3] E. Masgrau, J. Salavedra, A. Moreno, A. Ardanuy, "Speech Enhancement by Adaptive Wiener Filtering Based on Cumulant AR Modelling", Speech Processing in Adverse Conditions, Cannes, pp. 143-146, 10-13 Nov. 1992.
- [4] J.H. Hansen and M.A. Clements, "Iterative Speech Enhancement with Spectral Constraints", ICASSP, Dallas, pp. 189-192, 1987.
- [5] M.S. Ahmed, "Comparison of Noisy Speech Enhancement Algorithms in Terms of LPC Perturbation", IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 37, n°1, pp. 121-125, Jan. 1989.
- [6] Y.M. Cheng, D. O'Shaughnessy and P. Kabal, "Speech Enhancement using a Statistically Derived Filter Mapping", Speech Processing in Adverse Conditions, Cannes, pp. 127-130, 10-13 Nov. 1992.
- [7] R.F. Kubichek, "Standards and Technology Issues in Objective Voice Quality Assessment", Digital Signal Processing, 1, pp. 38-44, 1991.
- [8] J. Lalou, "The Information Index : an Objective Measure of Speech Transmission Performance", Annales des Télécommunications, 45, n°1-2, pp. 47-65, 1990.
- [9] R. Le Bouquin, G. Faucon, A. Akbari Azirani, "Proposal of a Composite Measure for the Evaluation of Noise Cancelling Methods in Speech Processing", EUROSPEECH 93, Berlin, 20-23 Sep. 1993 (à paraître).
- [10] N. Nocerino, F.K. Soong, L.R. Rabiner and D.H. Klatt, "Comparative Study of Several Distortion Measures for Speech Recognition", Speech Communication 4, pp. 317-331, 1985.

Ce travail a été partiellement financé par la CEE sous contrat ESPRIT 6166 FREETEL "Enhancement of Handsfree Telecommunications".