

VALIDATION EXPÉRIMENTALE DE L'ANALYSE DES SOURCES DE BRUIT CYCLIQUE  
AU MOYEN DE LA TECHNIQUE DE FENÊTRAGE TEMPOREL

Y. CHAMPOUX, P. TRUCHON, G. BERGERON  
Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke  
Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke  
Sherbrooke, Québec (Canada), J1K 2R1

RÉSUMÉ

Cet article aborde la problématique de l'analyse temps/fréquence de signaux acoustiques non stationnaires et répétitifs. La technique de fenêtrage temporel ("Gating Technique") sera examinée au moyen d'un système de calibration spécialement développé à cette fin. Nous mettrons en évidence la présence d'un délai interne du système ainsi que son rôle crucial lors de l'analyse des résultats. L'importance de la variabilité de la vitesse de révolution des machines tournantes sera examinée. Nous illustrerons ensuite comment cette technique peut être utilisée afin de prédire l'efficacité d'un traitement acoustique à la source.

SUMMARY

This article considers the problem of the time/frequency analysis of non-stationary, repetitive acoustic signals. The technique of temporal gating is examined by means of a calibration system specially developed for this purpose. The presence of an internal system delay, and its crucial role during the analysis of results, are demonstrated. The importance of the variability of the speed of rotation of rotating machines is also examined. Finally, it is shown how the technique can be used to predict the efficacy of an acoustic treatment of the source.

1. INTRODUCTION

L'analyse des signaux acoustiques et leur représentation temps/fréquence ont fait l'objet ces dernières années de nombreuses recherches. Une approche particulièrement prometteuse pour l'analyse des signaux non stationnaires consiste à utiliser la transformée de Wigner-Ville [1-2]. Plusieurs auteurs ont utilisé cette transformée [3-6] afin d'étudier la relation temps/fréquence du signal. On obtient, grâce à cette transformée, l'évolution en fonction du temps du spectre instantané du signal. La mise en oeuvre de la transformée de Wigner Ville requiert toutefois de longs calculs itératifs et elle est pour le moment peu adaptée pour l'analyse in situ des problèmes de bruit. De plus, cette méthode est encore très nouvelle et nécessitera encore quelques études avant de devenir parfaitement maîtrisée.

Dans le domaine de l'ingénierie acoustique une approche poursuivant le même objectif a été développée en s'appuyant cette fois-ci non pas sur un calcul utilisant la transformée de Fourier (FFT) mais plutôt sur le contrôle temporel de filtres digitaux récurrents. Cette technique, appelée fenêtrage temporel ("Gating Technique"), a été développée pour l'analyse des signaux acoustiques et vibratoires émis par des machines tournantes et donc pour des sources cycliques. Rasmussen et al. [7-10] ont démontré que le fenêtrage temporel permet d'examiner, comme la transformée de Wigner Ville, la variation du spectre d'intensité ou de pression acoustique en fonction du temps de signaux non stationnaires. On peut ainsi, pour une machine cyclique, identifier les relations de cause à effet entre les mécanismes mobiles et le rayonnement acoustique produit. Jusqu'à maintenant plusieurs ont utilisé cette approche dans des cas concrets sans se pencher toutefois sur les limites de la technique et de l'instrumentation qui lui est associée. Comme il n'existait pas de façon simple de calibrer un tel système on était donc contraint à s'en remettre aux fabricants. L'objectif premier de cette étude consistait donc à valider la technique de fenêtrage temporel tout en mettant à l'épreuve la chaîne instrumentale utilisée.

Dans cet article nous présenterons dans un premier temps une brève description de la technique. Nous décrirons ensuite la démarche utilisée afin de vérifier les limites d'utilisation des systèmes employés. Nous décrirons également le système de calibration spécifiquement développé à cette fin. Nous verrons par la suite, lors de l'analyse des données, comment un délai interne peut perturber les résultats en provoquant un déphasage temporel par rapport au signal de synchronisation. Finalement, nous verrons dans un cas concret comment cette technique peut permettre de prédire le niveau de réduction du bruit associé à la modification du mécanisme générateur.

## 2. REVUE DE LA TECHNIQUE

Grâce à l'emploi de filtres digitaux récurrents, il est possible d'analyser les signaux en temps réel. Le système de fenêtrage temporel (Gating System) que nous avons utilisé (voir figure 1) a été développé par le fabricant Brüel and Kjaer. Il est composé d'un

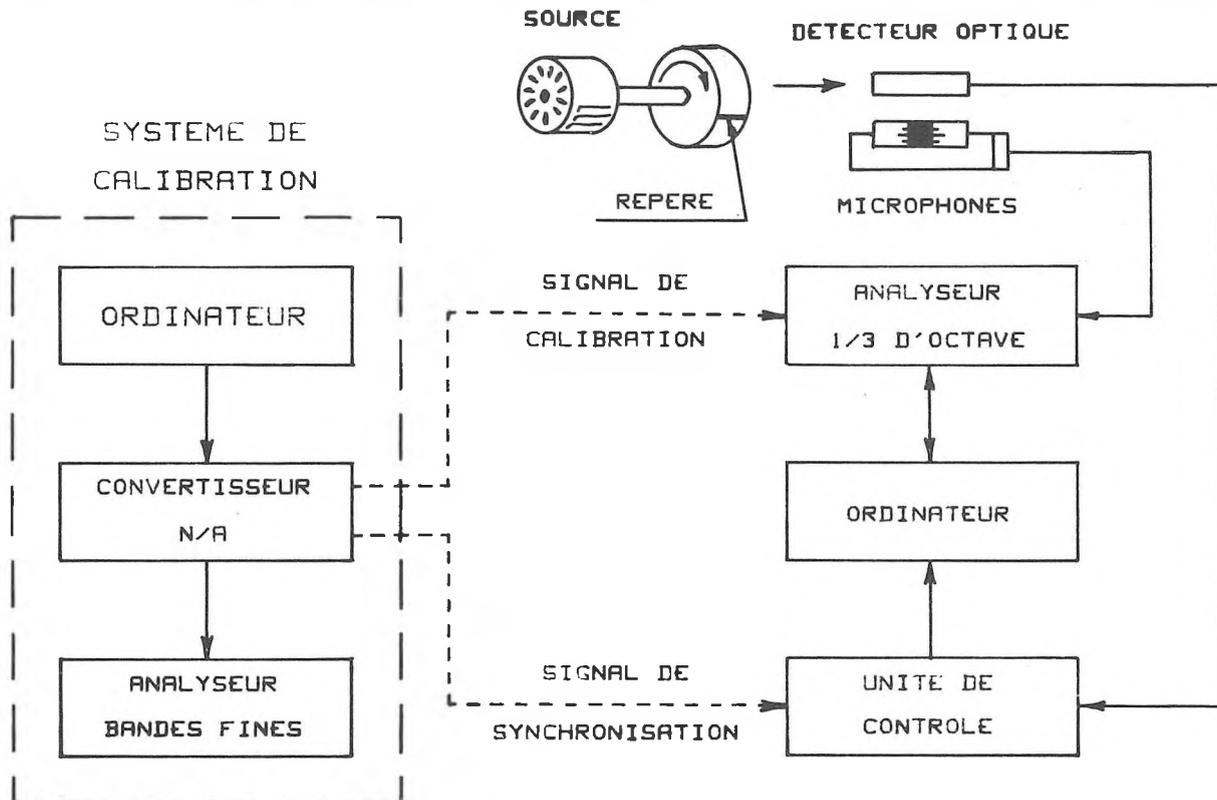


Figure 1 - Système de fenêtrage temporel et de calibration

système d'analyse intensimétrique, d'un ordinateur et d'une unité de contrôle. La synchronisation s'effectue grâce à un capteur optique. Définissons les différents paramètres:

- t : temps (s)
- N : nombre de cycle (rotation)
- T : période d'un cycle (s)
- $t_w$  : durée d'une fenêtre (s)
- $n_w$  : nombre total de fenêtres dans un cycle

Le diagramme temporel de la figure 2 illustre le principe de la technique. La durée totale d'un cycle est représentée par le cercle. Ce cycle est subdivisé en un certain nombre de fenêtres, appelées aussi tranches, chacune d'une durée de  $t_w$  égale à  $T/n_w$ .

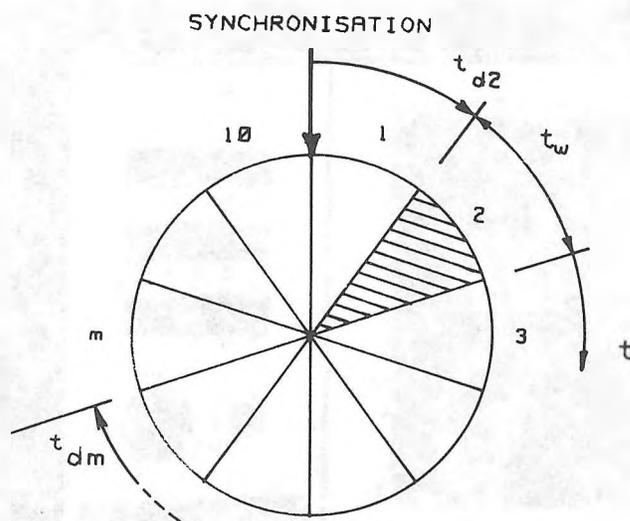


Figure 2 - Diagramme temporel illustrant la technique du fenêtrage temporel

Un délai  $t_{dm}$  permet de contrôler, relativement à un signal de synchronisation donné, le début de l'intégration. Le principe de la mesure de la pression ou de l'intensité acoustique contenue dans la fenêtre m s'exprime par la relation suivante:

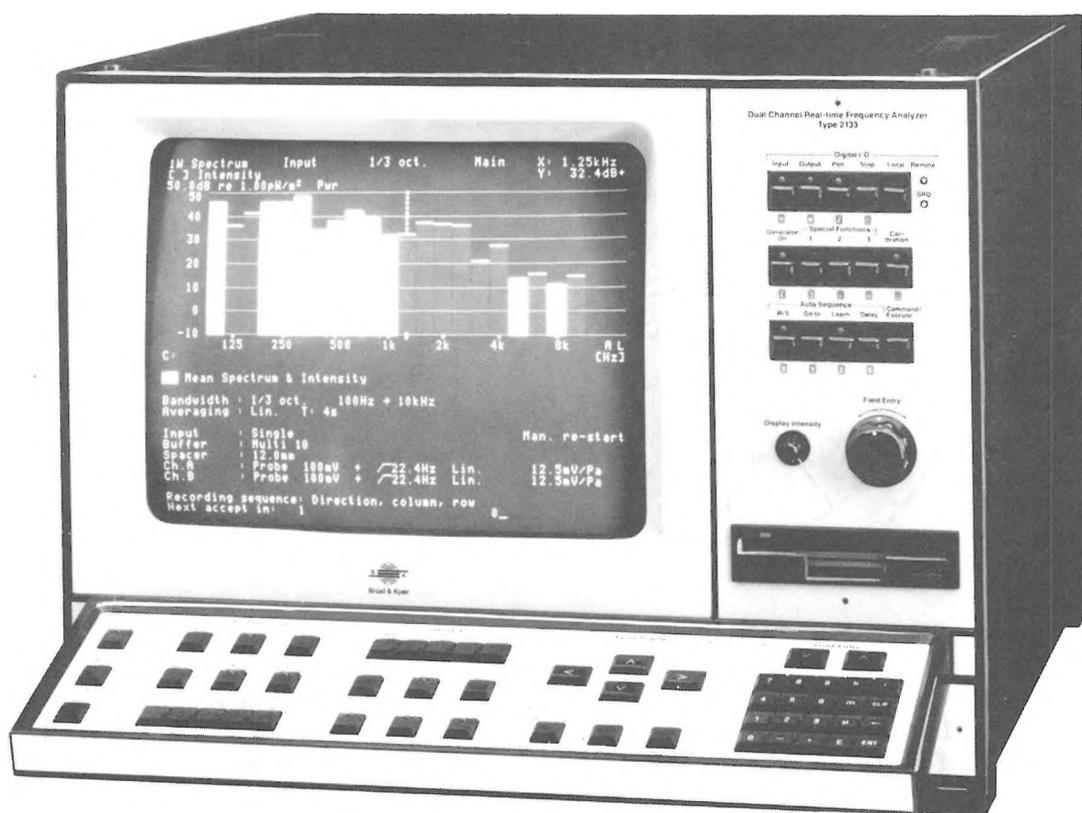
$$p_m^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \int_{t_{dm}}^{t_{dm}+t_w} \frac{1}{t_w} \cdot p^2 (1+(n-1).T) dt \quad (1)$$

$$t_{dm} = (m-1) t_w \quad (2)$$

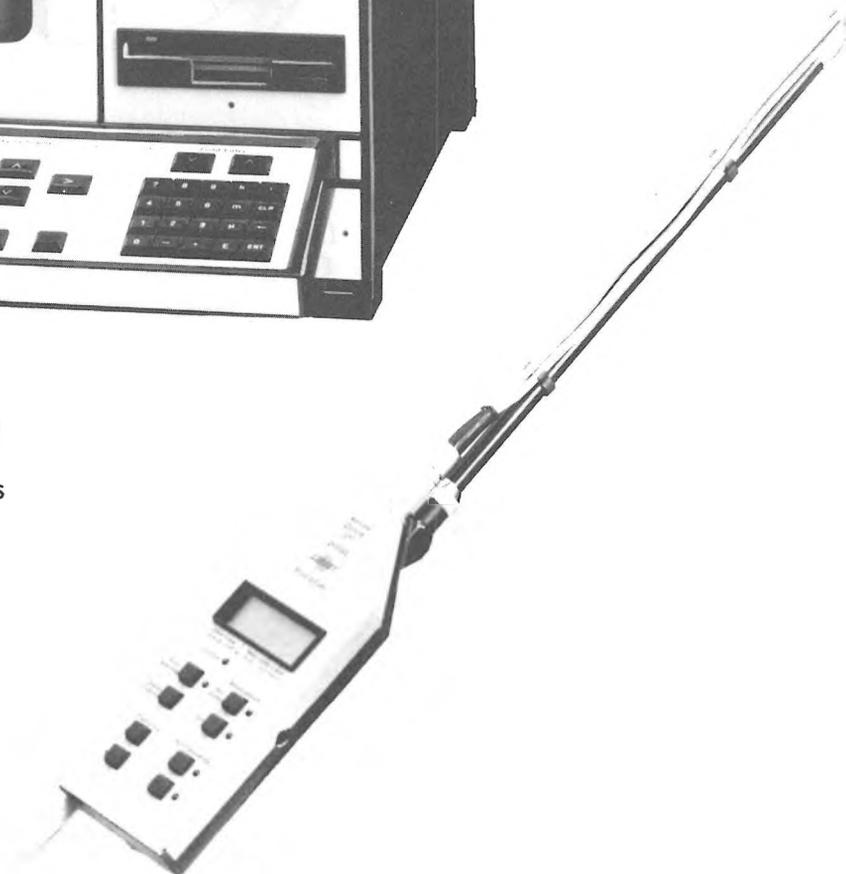
Il est donc possible en contrôlant  $t_{dm}$  de ne considérer qu'une partie bien spécifique du cycle de la machine. Afin d'améliorer la précision de la mesure on effectue la moyenne des valeurs obtenues pour plusieurs cycles. En répétant le même processus pour chacune des fenêtres on peut déterminer un spectre sonore pour chacune d'elle et conséquemment on est à même d'évaluer la variation temporelle du spectre. Une représentation graphique type de cette variation est illustrée à la figure 3. L'axe vertical représente les niveaux exprimés en dB. Les axes de fréquence et de temps définissent un plan horizontal. On obtient donc un graphique en trois dimensions. Connaissant la vitesse de rotation, l'axe de profondeur peut être converti soit en temps, soit en tranche ou en degré de rotation (0-360°) comme c'est le cas ici. Notons à la figure 3 la présence de deux évènements bien distincts.

# THE COMPLETE ACOU

Our state-of-the-art instruments do far more than measure the intensity of sound in any given situation. With this system, Brüel & Kjaer



The dual-channel real-time analyzer Type 2133: It has extensive data processing features along with built-in storage capabilities. One of two such analyzers created by Brüel & Kjaer, its measurements range from 1/3-octave dual-channel real-time analysis to 11 kHz (1/1-octave to 22 kHz).

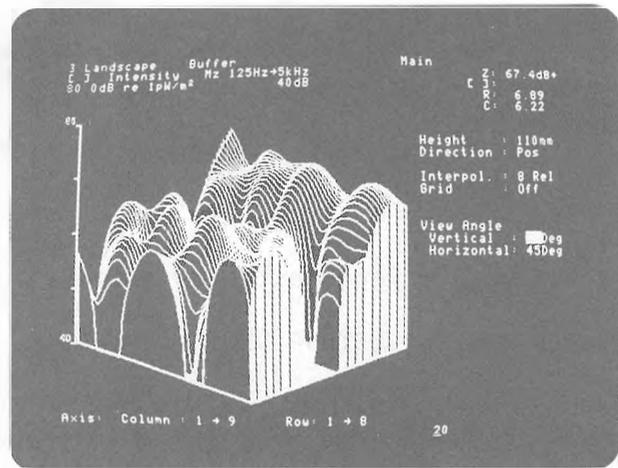


# ISTICS LABORATORY

instruments can map, graph, record and analyze sound events. It's like having an entire laboratory calibrated to the highest possible accuracy.



New intensity probe 3545 and remote control unit ZH 0354, for direct connection to, and control of, Analyzer 2133.



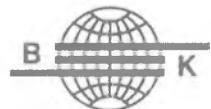
An MS-DOS compatible data storage is used in the built-in disc drive. An optional intensity mapping software package, the BZ 7021, is also available.



Sound intensity calibrator 3541, an innovation in intensity measurements.



## Brüel & Kjær



Brüel & Kjær Canada Ltd., 90 Leacock Road, Pointe Claire, Que., H9R 1H1

Montreal: (514) 695-8225 Ottawa: (613) 225-7648 Toronto: (416) 677-5472  
Winnipeg: (204) 694-2884 Edmonton: (403) 484-4228 Vancouver: (604) 278-4257

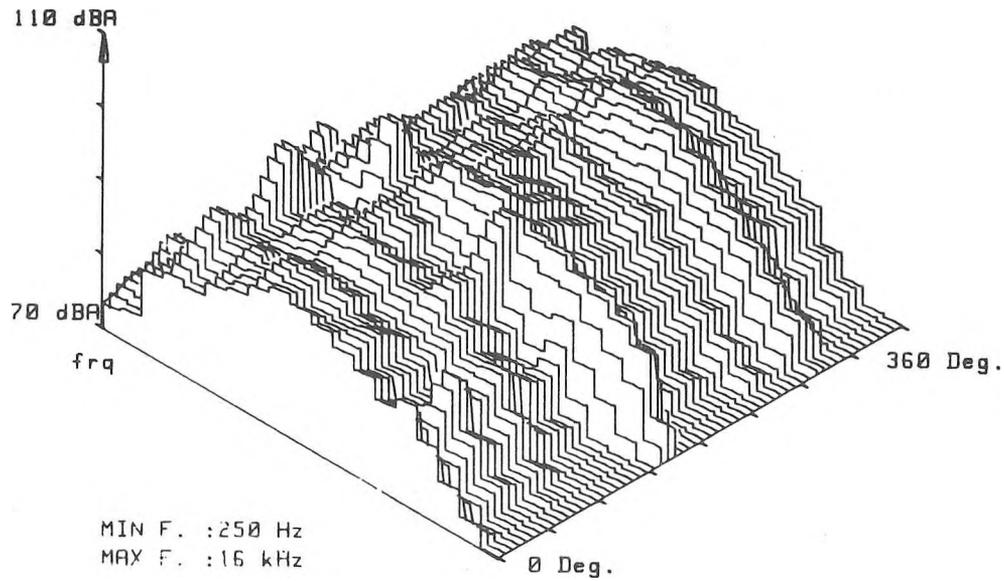


Figure 3 - Représentation graphique de la variation temporelle d'un spectre

### 3. DESCRIPTION DU SYSTÈME DE CALIBRATION

Dans le but d'étudier les limites d'utilisation de la technique de fenêtrage temporel, un système de calibration a été développé. Ce système permet de générer un signal dont l'amplitude est variable au cours d'un cycle et dont le contenu spectral est contrôlé et donc connu. Le système de calibration utilisé est illustré à la figure 1. Un ordinateur synthétise un signal prédéterminé dont on connaît le contenu spectral. Ce signal est converti du numérique à un signal analogique par un convertisseur N/A. Celui-ci peut, de plus, répéter le même signal à un rythme prédéterminé. Parallèlement, un signal de synchronisation très précis est aussi produit par le convertisseur N/A afin d'annoncer le début du cycle. La position du signal de calibration relativement au signal de synchronisation peut être contrôlée par  $t_e$  qui représente ainsi le délai temporel entre ces deux signaux. Un analyseur FFT est utilisé afin d'évaluer précisément  $t_e$  et de contrôler le contenu spectral du signal de calibration.

Le signal temporel choisi pour la calibration est illustré à la figure 4a. Ce signal a un front de montée très abrupt et peut être représenté par une impulsion de Dirac. Sa durée est de l'ordre de 0.02 ms. Son spectre est illustré à la figure 4b.

#### • Signification du temps d'intégration

Lors de l'analyse classique d'un évènement unique de nature impulsionnelle, le temps d'intégration est habituellement associé à la période durant laquelle l'énergie sonore sera cumulée. On divise ensuite cette valeur par le temps d'intégration pour en faire la moyenne. Par exemple pour la mesure de la pression sonore, la moyenne quadratique se calcule comme suit:

$$p_{\text{rms}}^2(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} p^2(t) dt \quad (3)$$

$T_i$  étant ici le temps d'intégration

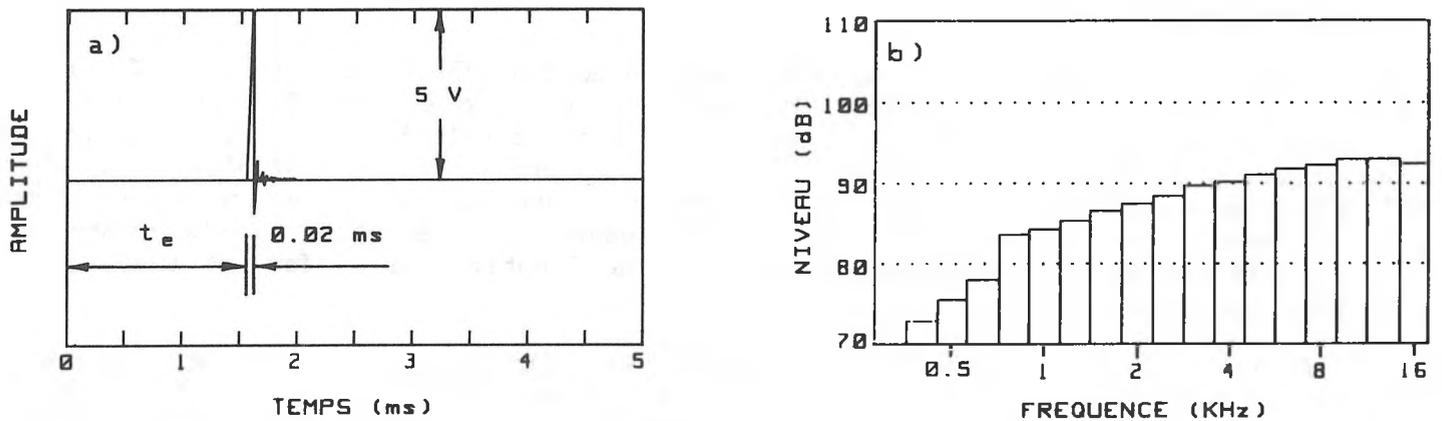


Figure 4 - Signal de calibration. a) Représentation temporelle b) Contenu spectral

Pour une même impulsion de l'onde à  $t = 0$  sec et dont la durée est inférieure à  $T_i$ , plus le temps d'intégration est court, plus le niveau mesuré sera élevé. À la limite, si  $T_i$  tend vers zéro, on mesurera la valeur crête.

Lors de l'analyse de signaux répétitifs (que l'on assume ici rigoureusement identiques d'un cycle à l'autre) la situation n'est plus la même. L'amplitude du spectre mesuré ne varie plus en fonction du temps d'intégration (pour un nombre fini de cycles). Même si le temps d'intégration est doublé, le nombre de cycle considéré est aussi doublé de même que l'énergie comptabilisée par l'intégrateur. La figure 5 illustre ce comportement. En utilisant le système de calibration pour fournir à l'analyseur un signal répétitif (sans utiliser de technique de fenêtrage) trois temps d'intégration différents ont été utilisés. Comme on peut le constater les trois cas fournissent la même quantité d'énergie moyenne.

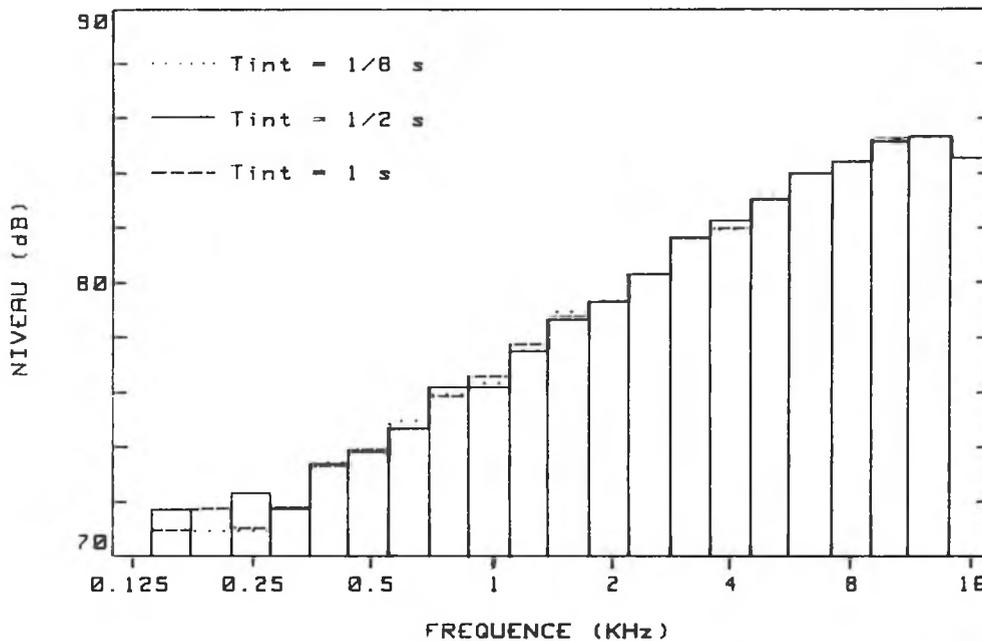


Figure 5 - Comparaison des spectres d'un même signal impulsif pour trois temps d'intégration différents

- Signification du temps d'intégration pour la technique du fenêtrage temporel

Pour la technique du fenêtrage temporel, on ne considère plus cette fois-ci la moyenne de l'énergie sur tout un cycle. On subdivise ce cycle en une série de tranches. En comparant les équations 1 et 3 on s'aperçoit que le temps d'intégration est représenté maintenant par la longueur d'une tranche  $t_w$ . Plus le nombre de tranche est élevé plus le temps d'intégration sera court et ainsi, les variations temporelles du spectre seront d'autant plus visibles. Le fait de répéter  $N$  fois la mesure (voir équation 1) n'augmente pas le temps d'intégration mais améliore la précision de l'estimation en faisant une moyenne de plusieurs essais.

L'analyse spectrale classique d'un signal répétitif nous fournit le spectre moyen quel que soit le nombre de cycle considéré. L'analyse temps/fréquence nous permet de visualiser la variation du spectre au cours du cycle. Cependant, en calculant la somme des niveaux de toutes les tranches comprises dans un cycle et en divisant cette somme par le nombre de tranche, on devrait retrouver le spectre moyen obtenu par l'analyse classique. Afin de démontrer cette allégation, le système de calibration a été mis à contribution et le spectre moyen a été mesuré à la fois avec l'analyseur seul et avec le système de fenêtrage temporel. Les résultats illustrés à la figure 6 démontrent qu'effectivement les deux façons d'analyser le signal conduisent aux mêmes résultats et donc nous assurent du bon fonctionnement du système de fenêtrage temporel.

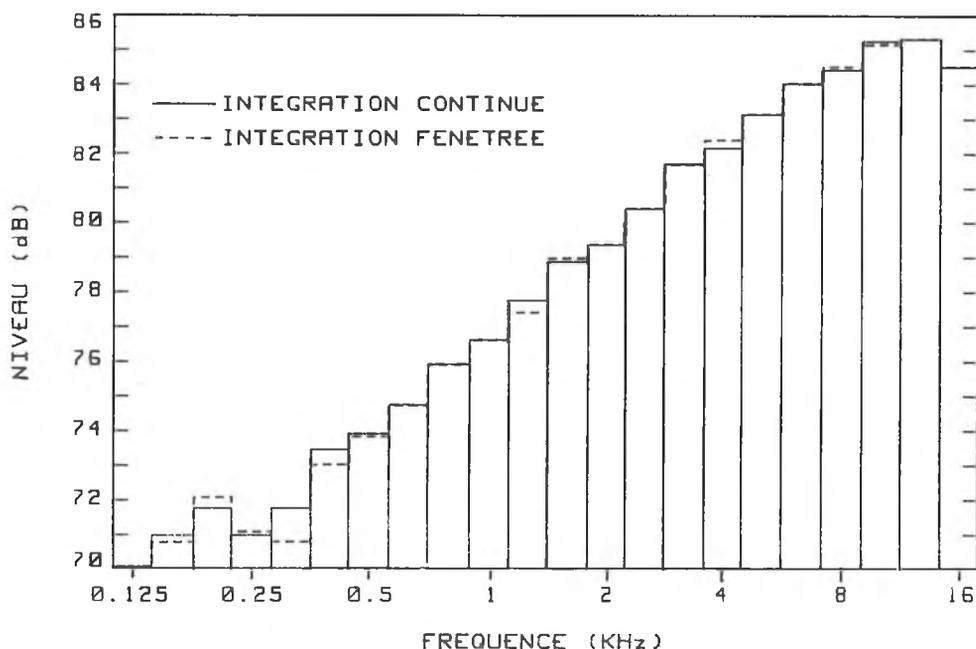


Figure 6 - Comparaison des spectres obtenus par intégration continue versus moyennage sur l'ensemble des fenêtres

#### 4. CARACTÉRISATION D'UN DÉLAI INTERNE

Le fenêtrage temporel nous permet de quantifier, pour une portion d'un cycle de la machine, l'énergie rayonnée au cours de ce laps de temps. On peut ainsi identifier les contributions respectives des divers éléments de la machine au cours d'un cycle. Une parfaite synchronisation s'impose donc. Notons également que le fenêtrage temporel ne peut

être utilisé s'il y a glissement entre les différents éléments mécaniques de la machine étudiée.

La synchronisation s'effectue généralement au moyen d'un capteur optique pointé sur une partie tournante du mécanisme. Afin de vérifier la précision de la synchronisation, le système de calibration fut mis à contribution. Le convertisseur N/A génère un pulse de synchronisation au début de chaque cycle. Comme il est possible de déplacer le signal synthétisé à l'intérieur du cycle (en variant  $t_e$ , voir figure 4) et comme ce signal ressemble à un Dirac, il est donc possible de vérifier la précision de synchronisation du système en faisant apparaître l'évènement dans la fenêtre (tranche) de notre choix. La figure 7a) montre que lorsque  $t_e$  vaut 6.8 ms il y a encore de l'énergie dans la dernière tranche (10° tranche). Ce n'est que lorsque  $t_e$  vaut 7.1 ms (figure 7b) que toute l'énergie se retrouve dans la première tranche. La figure 8 montre schématiquement que par rapport au signal de synchronisation il existe un délai interne dont on doit absolument tenir compte afin de pouvoir obtenir un diagnostic précis. En effet, pour une machine tournant à 1000 RPM, ce

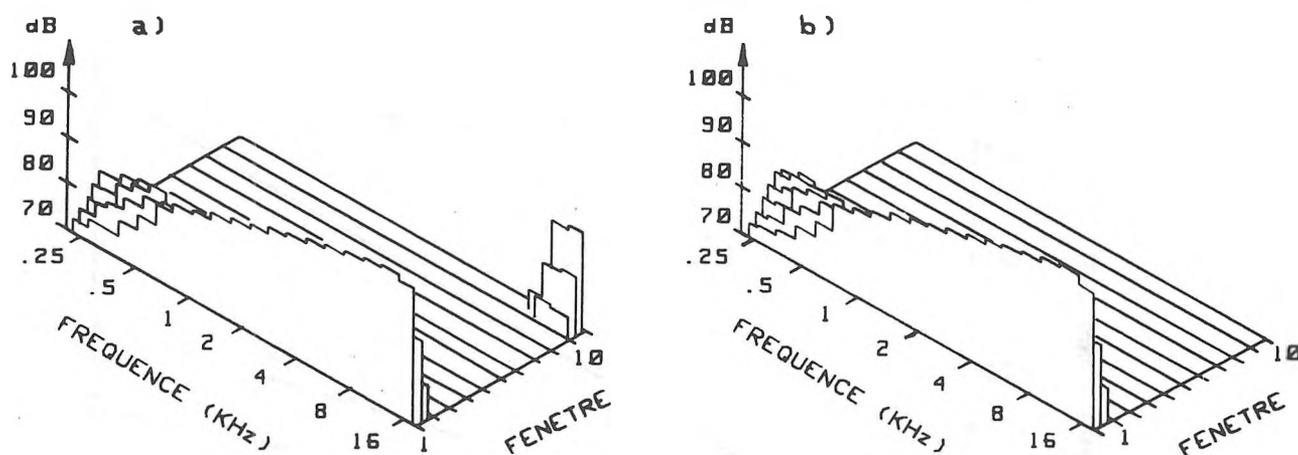


Figure 7 - Évaluation du délai interne par la variation de la position du signal de calibration. a)  $t_e = 6,8$  ms b)  $t_e = 7,1$  ms

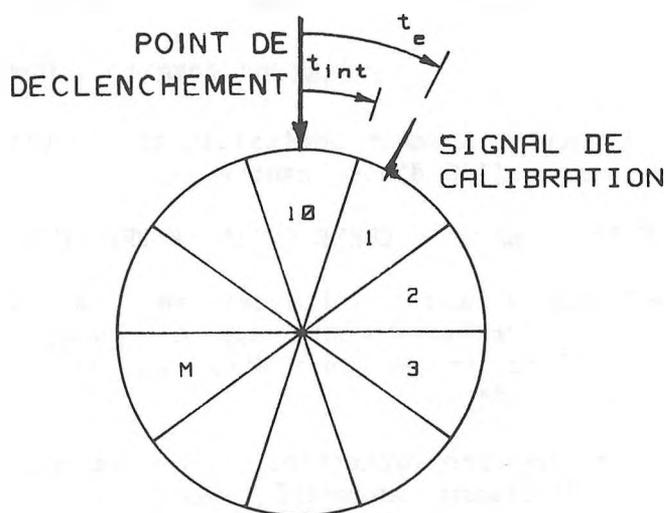


Figure 8 - Illustration du délai interne par rapport au point de déclenchement

décalage équivaut à une rotation par rapport à la marque de synchronisation de 43 degrés. Il est donc impérieux de connaître ce déphasage pour localiser adéquatement l'évènement par rapport à la position des mécanismes cycliques.

## 5. FLUCTUATION DE LA VITESSE DE ROTATION

La vitesse de rotation des machines tournantes n'est pas toujours constante et des variations peuvent être notées sur des périodes de temps plus ou moins longues. Ces variations de vitesse peuvent fausser la mesure en déplaçant des évènements d'une fenêtre à l'autre. Dépendant des gammes de vitesses et du nombre de tranches considérées, une instabilité plus ou moins grande de la vitesse de rotation peut être tolérée. Afin de quantifier l'ordre de grandeur de ces instabilités, la figure 9 fournit pour différents nombres de tranches une relation entre la vitesse de rotation de la machine et l'écart de variation maximal permis. Cet écart serait responsable du glissement du phénomène d'une fenêtre seulement. On peut noter que plus le nombre de fenêtres est élevé, plus la variation de vitesse permise est faible.

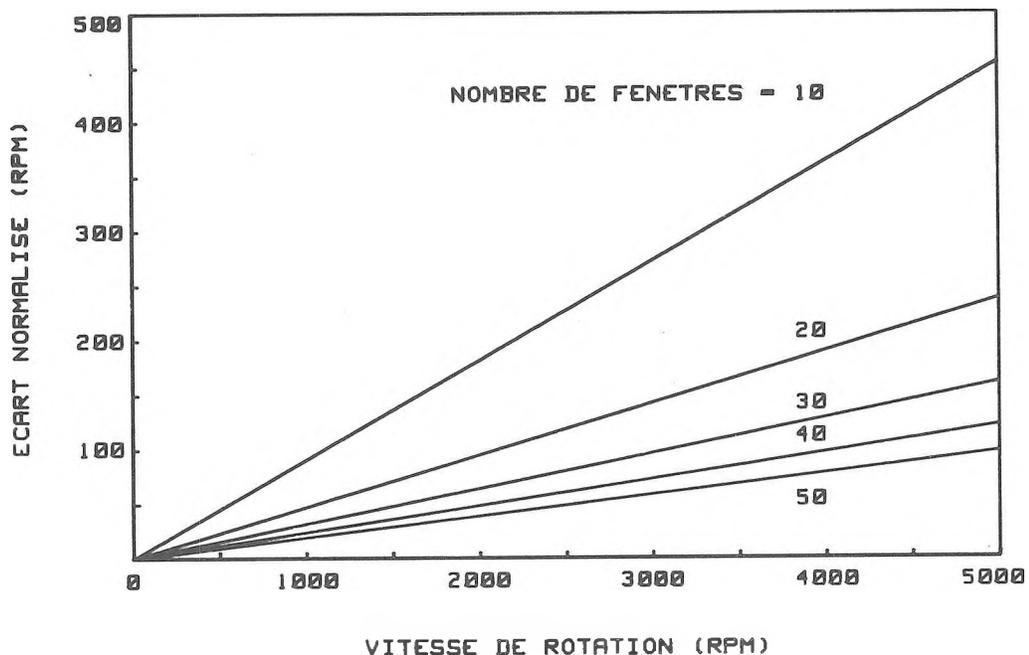


Figure 9 - Abaque illustrant l'écart admissible sur la vitesse de rotation pour un glissement normalisé d'une tranche

## 6. LA TECHNIQUE DE FENÊTRAGE TEMPOREL COMME OUTIL DE PRÉDICTION

La technique du fenêtrage temporel a été utilisée jusqu'à ce jour principalement comme outil d'identification des sources. Cette approche peut être également utilisée afin d'évaluer le potentiel de réduction de bruit d'un traitement à la source. Voyons comment cette technique a été mise à profit.

Dans une imprimerie une machine permettant de brocher des magazines produisait un bruit de nature répétitive. Le diagramme temps-fréquence (voir figure 3) enregistré grâce à la technique du fenêtrage temporel près de cette machine, nous laisse voir qu'au cours d'un cycle deux évènements remarquables se produisent. Connaissant le fonctionnement des mécanismes et prenant en considération le délai interne quantifié précédemment, des mesures

préliminaires ont permis d'identifier deux sources de bruit appelés S1 et S2. La source 1 génère dans la 17e tranche et la source 2 dans la 9e du cycle. Deux mesures supplémentaires ont été enregistrées respectivement près des deux sources. Les résultats sont illustrés à la figure 10. Nous pouvons constater ici la variation temporelle du niveau total exprimé en dBA, mais aussi l'augmentation de l'importance relative de chaque source suivant que la mesure est prise près ou loin de celle-ci. Ainsi on a pu arriver à localiser physiquement cette fois-ci la position de chacune des sources. On peut identifier grâce à cette figure que la source 2 est dominante. Il était possible de modifier temporairement la source 2 afin de diminuer son influence. La figure 11 illustre l'efficacité réelle de la modification apportée. On peut constater que le niveau de la tranche 9 a été diminué de 5 dB. Cependant, en

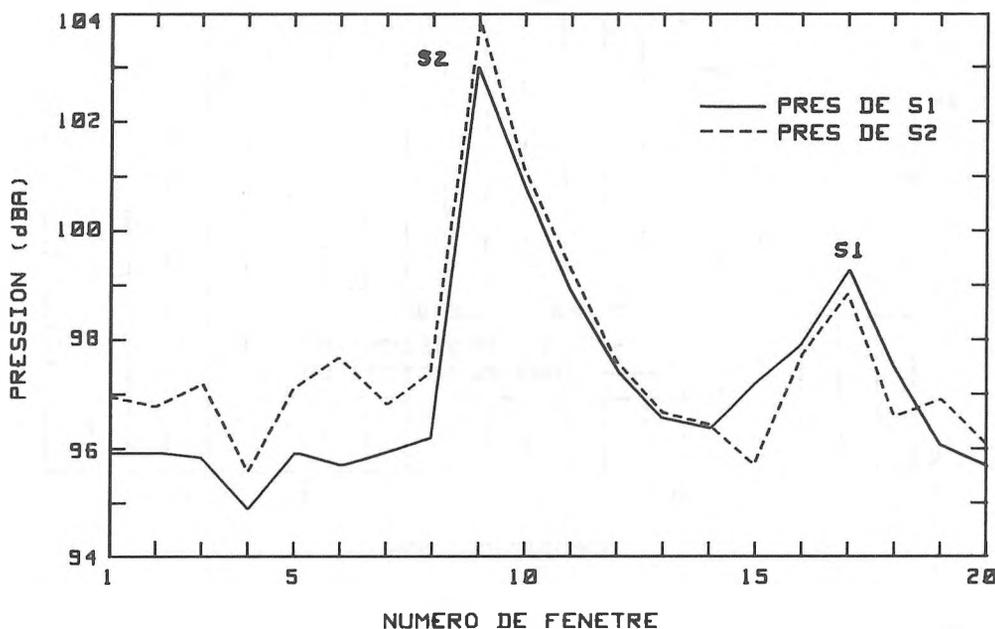


Figure 10 - Variation temporelle du niveau sonore mesuré respectivement près des sources S1 et S2

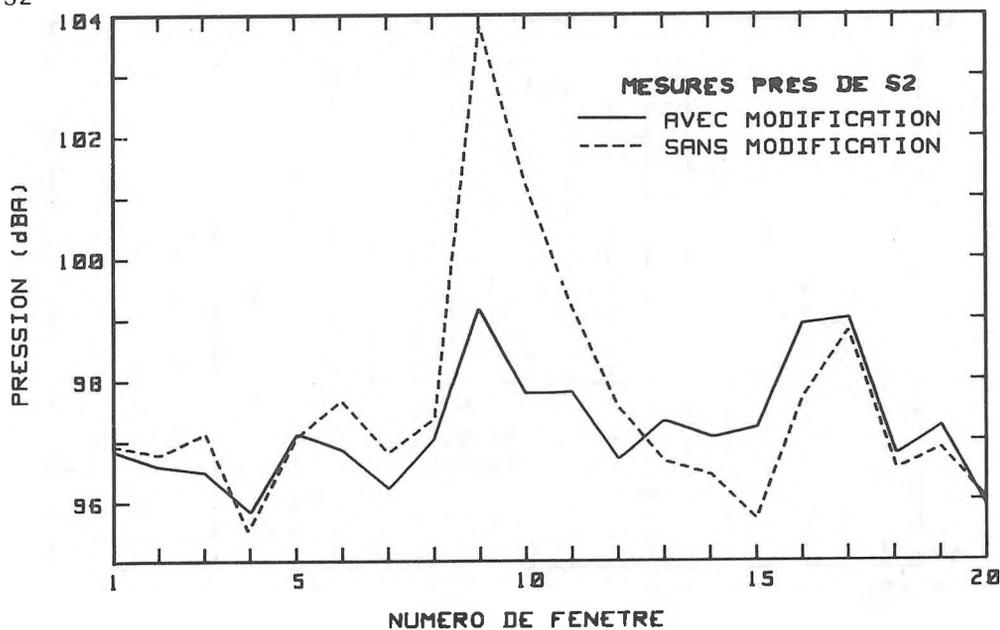


Figure 11 - Variation temporelle du niveau avant et après traitement de la source 2

examinant les spectres de la figure 12, on constate que le traitement de cette source diminue peu le niveau moyen. Afin de vérifier s'il aurait été possible de prédire ce comportement au moyen de la technique de fenêtrage temporel, les données de la figure 10 furent utilisées. Les niveaux des tranches 9, 10 et 11 furent abaissés au niveau des tranches 8 et 12. On avait pu ainsi, par calcul, éliminer artificiellement la source 2. La figure 13

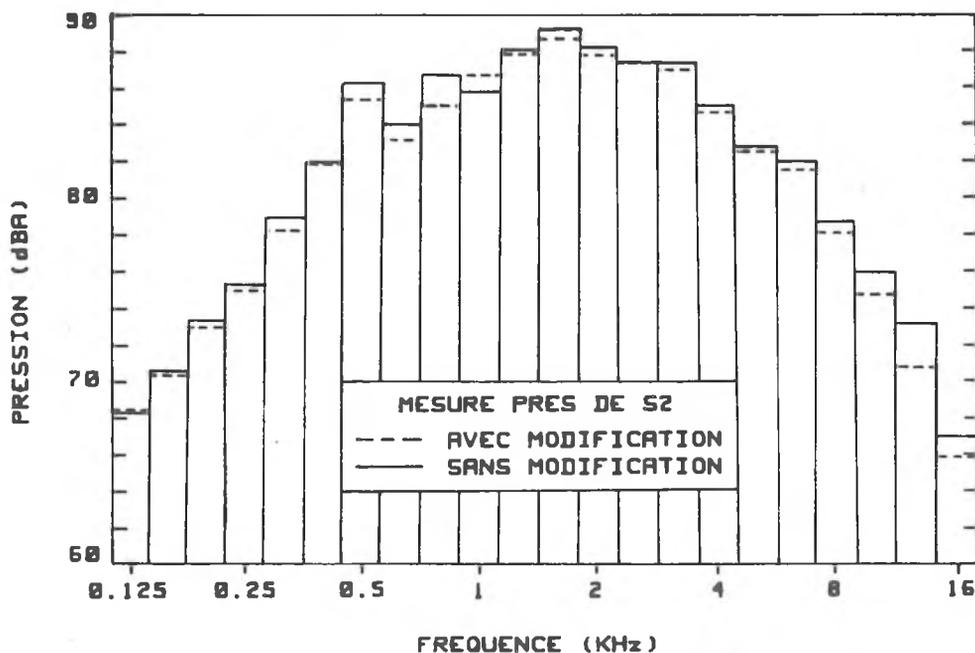


Figure 12 - Mesure en terme de pression moyenne (valeur efficace) de l'efficacité du traitement de la source 2

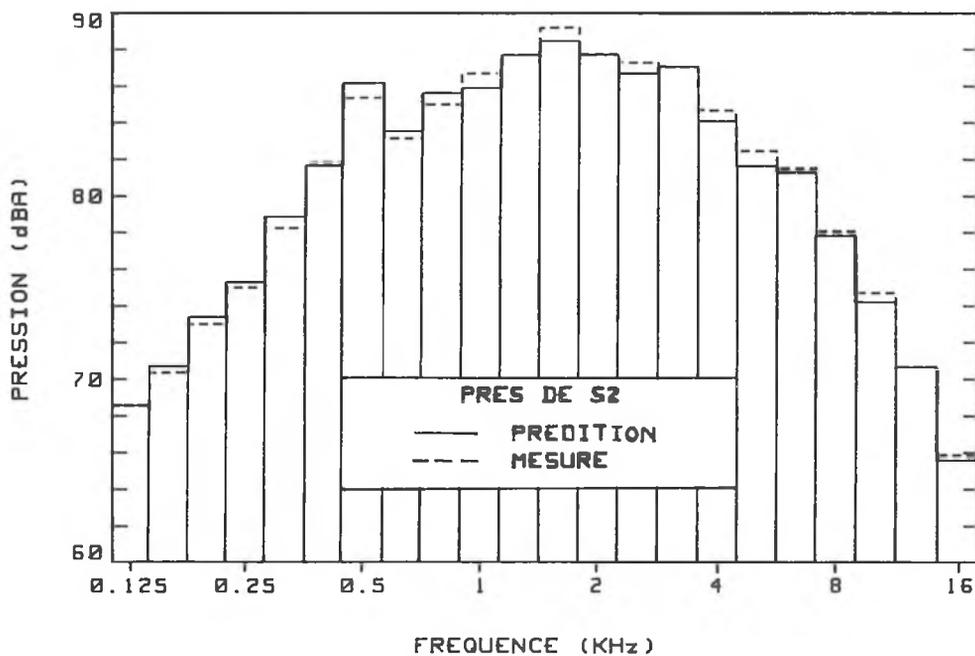


Figure 13 - Comparaison des niveaux prédits et mesurés associés à un traitement à la source 2

compare les niveaux prédits et mesurés. Les niveaux du spectre sonore moyen prédits sont très près des niveaux mesurés. Notons que ceci ne peut être imputable seulement au fait que l'élimination de la source 2 n'avait pas d'effet remarquable car, il a été démontré à la section 3 que le calcul d'un niveau moyen ne peut être que rigoureusement évalué par la moyenne des niveaux de chaque tranche. Dans ce cas-ci, l'utilisation du fenêtrage temporel nous aurait permis de constater, sans avoir à modifier la source, du faible potentiel de réduction du niveau moyen associé à l'élimination de la source 2.

Un impact mécanique génère des vibrations qui peuvent se transmettre au bâti de la machine et aux tôles qui y sont fixées. Ces tôles en vibrant, peuvent rayonner de façon importante. Un fait intéressant à noter ici est que la technique du fenêtrage temporel, qui permet d'éliminer artificiellement l'impact, fournit une limite inférieure du potentiel de réduction du niveau de bruit associé à l'élimination d'un impact mécanique.

## CONCLUSION

La technique de fenêtrage temporel permet d'obtenir pour des sources cycliques l'évolution du spectre en fonction du temps. Nous avons démontré grâce à un système de calibration, que la quantification des spectres s'effectuait adéquatement. Nous avons identifié qu'il était essentiel de tenir compte d'un délai interne au système. Ce délai par rapport au signal de synchronisation a été évalué dans ce cas-ci à 7.1 ms. Nous avons également évalué l'importance de la variation de la vitesse de rotation. Cette variation ne peut excéder certaines limites car les phénomènes se chevauchent et la technique perd alors de sa précision. Finalement, en considérant le délai interne préalablement identifié, nous avons démontré comment la technique du fenêtrage temporel pouvait être mise à profit afin de prédire le potentiel de réduction du bruit associé à l'élimination d'un impact mécanique.

## RÉFÉRENCES

- [1] E. Wigner, On the quantum correction for thermodynamic equilibrium, Phys. Rev., USA (1932), 40, pp 749-759.
- [2] J. Ville, Théorie et applications de la notion de signal analytique, Câbles et Transmissions, Fr. (1948) I, pp 61-74.
- [3] P. Flandrin, B. Escudié, Time and frequency representation of finite energy signals; a physical property as a result of an Hilbert condition, Signal Proc. NL (1980) 2, n° 2, pp 95-100.
- [4] Y. Zhu, F. Peyrin, R. Goutte, Transformation de Wigner-Ville: description d'un nouvel outil de traitement du signal et des images", Ass. Telecommun., (1987) 42, n° 3-4, pp 105-118.
- [5] N. Yen, Time and frequency representation of acoustic signals by means of the Wigner distribution fonction implementation and interpretation, J. Acoust. soc. Am. (June 1987) 81 (6), pp 1841-1850.
- [6] J.F. Allard, R. Bourdier, C. Depollier, Utilisation de la pseudo-distribution de Wigner Ville lissée pour la détermination de l'existence de fermeture de la glotte, Traitement du Signal (1987), n° 4, pp 305-320.
- [7] P. Rasmussen, Gating technique, Brüel and Kjaer report, (June 1986), Department 13, G1-G6.
- [8] P. Rasmussen, Gated spectrum analysis program, Brüel and Kjaer report, (August 1986), Department 13.
- [9] G. Rasmussen, P. Rasmussen, Gated analysis of time varying signals, Am. Soc. of Mechanical Engineers, (December 1986), winter annual meeting, 86-WA/NCa-21.
- [10] P. Rasmussen, T.L. Moller, Gated sound intensity measurement on a Diesel engine, Application Notes 30-0203-M, Brüel and Kjaer.

NOISE/VIBRATION CONTROL PROJECT ENGINEERS

To work as consultants on a selection of speciality areas including:

- \* Architectural Acoustics
- \* HVAC Noise and vibration control
- \* Seismic Engineering
- \* Vibration analysis/measurement
- \* Structural dynamics
- \* Ground borne vibration control
- \* Noise and vibration product R & D and design

A candidate having relevant experience and an applicable graduate degree is preferred.

Contact: Dr. D.L. Allen  
VIBRON LIMITED  
1720 Meyerside Drive  
Mississauga, Ontario  
L5T 1A3

(416) 677-4922



EMPLOYMENT OPPORTUNITY

Hatch Associates Ltd. has an opening to assist in acoustical consulting to industrial and government clients.

Good communication skills and training in acoustics essential, french useful, experience optional.

Please contact Tim Kelsall at 416-962-6350 or write to:

21 St. Clair Avenue East  
Toronto, Ontario  
M4T 1L9