

LE TRAITEMENT NUMÉRIQUE DES SIGNAUX

ACOUSTIQUES: L'ANALYSE BI-CANAL

Jean Nicolas, Gilles Lemire, Blaise Gosselin*
Génie mécanique, Université de Sherbrooke
Sherbrooke, Québec, J1K 2R1

SOMMAIRE

L'analyse bi-canal des signaux acoustiques est scrutée de façon à proposer des solutions aux difficultés provenant d'erreurs de manipulation et d'interprétation. Une attention spéciale est accordée aux problèmes de déphasage, d'erreurs de troncatures, et de délai temporel. Les possibilités et les limites de la fonction de cohérence sont étudiées. La conversation bidirectionnelle instrument-ordinateur est présentée de façon systématique avec des exemples d'application.

SUMMARY

Dual channel analysis of acoustic signals is examined in order to propose solutions to the problems resulting from manipulation and interpretation errors. Special attention is given to phase shift problems, truncation error and time delay. The possibilities and limits of the coherence function are studied. Two-way conversation between instrument and computer is presented in a systematic way, with applications.

INTRODUCTION

Si la décennie 70-80 a été celle de l'avènement du traitement numérique des signaux acoustiques¹, celle des années 80-90 sera marquée par la mesure et l'analyse simultanée de plusieurs canaux d'informations. Le passage d'un traitement mono-canal à une manipulation bi ou multi-canal est beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord. En effet, il faut d'une part prévoir l'acquisition d'un grand nombre de données et ce de façon parfaitement synchrone² et d'autre part, faire face aux difficultés d'un calcul qui est alors vectoriel et non scalaire. Les instruments bi-canaux permettent l'obtention d'une multitude incroyable de fonctions. Cependant ils ne peuvent distinguer si les signaux d'entrée sont entachés d'erreurs (calibration, effet de troncature, désynchronisation, etc.) et surtout ils ne font pas l'analyse des résultats. C'est pourquoi nous nous proposons de mettre à jour un certain nombre de facteurs qui, selon notre expérience, se sont révélés être les plus susceptibles de fausser les données et l'interprétation des résultats.

Partant du problème-clef que représente l'information de phase, nous étudierons ensuite les erreurs de troncature, l'influence du délai temporel, l'interprétation des valeurs de cohérence, pour terminer par les possibilités de conversation bidirectionnelle instrument-ordinateur.

* travaille maintenant pour la firme SILENTEC de Montréal.

Phase

Dès que l'on traite numériquement l'information obtenue de deux signaux ou plus, il devient évident que l'élément phase apporte une dimension supplémentaire en autant que cette information soit valide. Il faut donc d'emblée envisager un système de calibration de phase (et parfois d'amplitude) de ces deux canaux de mesure. Pour ce faire, nous avons utilisé une source de bruit blanc qui débite dans un cône exponentiel à sortie quasi ponctuelle (~ 1 cm) et munie d'un adaptateur d'impédance. Les deux micros peuvent alors être placés nez-à-nez ou côte-à-côte dans l'axe principal et ils sont donc soumis au même champ acoustique. L'ensemble des circuits de mesure sont ainsi calibrés et une fonction de transfert complexe est mémorisée pour fins de correction éventuelle. La figure (1) montre le déphasage qu'il peut exister entre deux canaux d'un analyseur (1a) et entre deux microphones pris au hasard (1b). Il est bien évident que de tels déphasages doivent être corrigés puisqu'ils entraînent dans le cas de la mesure de l'intensité, par exemple, des erreurs de plusieurs dB en basses fréquences. Il est important de noter que cette méthode est beaucoup plus simple que d'autres proposées dans la littérature. De plus, elle possède l'avantage de mesurer une fonction de calibration avec les micros placés exactement dans la configuration géométrique qui sera utilisée pour les mesures, ce qui est très important en intensimétrie, par exemple.

Erreur de troncatures

Ces erreurs sont dues au fait que les analyseurs ou acqui-seurs travaillent normalement avec des mots de 2 octets (16 bits), alors qu'un ordinateur travaillera généralement avec des mots de 8 octets (64 bits). Ainsi lorsqu'on s'approche des valeurs limites, exemple pour une fonction de cohérence (les valeurs 0 ou 1), on constate que le calcul tronqué fait par un analyseur T.R.F. peut amener à des valeurs supérieures à 1.0 et qu'on procède généralement à l'intérieur de l'appareil à une normalisation quelconque (par rapport à la valeur maxi par exemple). Au départ donc, la valeur est entachée d'une erreur qui peut aller dans certains cas jusqu'à 10%, ce qui explique en outre la difficulté du calcul précis des fonctions de cohérences partielles².

Délai temporel et cohérence

Parce qu'on traite deux canaux, il est très important de tenir compte du délai qui peut exister entre le moment où une onde donnée est captée par le premier microphone et le moment où elle est captée par le deuxième microphone, si on veut comparer une onde progressive issue d'une ou plusieurs sources. L'erreur de biais ainsi provoquée sur le calcul d'une fonction de cohérence est donnée² par:

$$\gamma_{ij}^2(f) \approx \left(1 - \frac{\Delta t}{T}\right)^2 \gamma_{ij}^2(f)$$

où $\gamma_{ij}^2(f)$ est la cohérence estimée entre les micros i et j , Δt est le temps mis par l'onde pour aller de i vers j , et T est le temps total d'échantillonnage.

L'effet de ce délai³ est visualisé aux figures 2a, 2b et 3a: on constate combien l'absence d'un délai programmé peut détruire la signification d'une fonction de cohérence; (i.e. laisser croire que la cohérence est faible alors que ce n'est pas physiquement le cas). Ce délai peut prendre toutes les valeurs possibles et c'est pourquoi les délais de T/10 ou T/100 proposés sur la plupart des analyseurs T.R.F. sont nettement insuffisants. Nos études ont montré qu'il est important pour obtenir des résultats précis que le délai soit ajustable à l'échantillon près (T/1024). Ce délai peut d'ailleurs prendre la forme d'ondes réfléchies qui arrivent "en retard" par rapport à l'onde incidente: la figure (3) montre certains de nos résultats obtenus pour un milieu semi-réverbérant (b) pour un milieu très réverbérant (d) et l'effet du bruit de fond sur la valeur de la cohérence (c) et ceci pour des ondes parfaitement cohérentes.

Avec l'analyse bi-canal, la fonction de cohérence est sans doute l'une des fonctions les plus difficiles à interpréter. Physiquement ce paramètre témoigne du degré de linéarité d'amplitude et de phase qui peut exister entre deux signaux. Cependant, il existe de nombreux cas pour lesquels cette fonction est inférieure à 1.0 sans pour cela qu'on puisse conclure à une non-linéarité. Les causes principales sont:

- Erreur de biais dans l'estimation des spectres
- Autres entrées $x_j(t)$ que celle considérée
- Présence d'un bruit provenant de l'instrumentation
- Bruit de fond élevé
- Contamination sur le cheminement.

Dans les quatre derniers cas il faut alors utiliser les cohérences partielles^{3,4}. De plus, bien que la cohérence témoigne de la linéarité possible de deux signaux au niveau de la phase, elle demeure un paramètre scalaire, donc pour lequel le déphasage inter-microphone n'a aucune importance. Pour l'intensité, au contraire, la phase est un paramètre ultra crucial. Il est donc loisible d'en tirer un double avantage: primo, aucune calibration inter-micro n'est nécessaire, secundo, on pourra utiliser deux capteurs de natures différentes, par exemple microphone et accéléromètre. Cet outil s'avère d'ailleurs très puissant pour l'identification des sources. La figure (4) nous montre deux signaux (pression et accélération) provenant d'une source de type impulsionnel quasi-continu:

- a) fréquemment ceux-ci semblent être sans relation (surtout entre 1 k et 2,5 kHz) (figure 4);
- b) pourtant la cohérence est très forte, ce qui indique nettement que des différences au niveau de l'amplitude des spectres de puissance ne sont pas forcément la preuve d'une non-interrelation entre deux signaux (figure 5).

Conversation bidirectionnelle instrument-ordinateur

Comme nous l'avons dit précédemment, lorsqu'on interface convenablement un analyseur T.R.F. à un ordinateur ou un calculateur, les possibilités du système deviennent alors presque illimitées, et on acquiert une versatilité très utile². Actuellement, deux types d'interface sont couramment disponibles

RS 232 et IEEE-488. Il est bon de se rappeler que l'interface RS 232 peut être utilisée pour les longues distances de transmission mais que la vitesse de transfert est généralement de 120 caractères par seconde (1200 bauds). Au contraire, avec l'interface IEEE, on parle de plusieurs dizaines de milliers de caractères par seconde mais pour des distances très courtes (quelques mètres), à moins d'utiliser des câbles à fibres optiques qui sont excessivement onéreux. Examinons maintenant de façon systématique les paramètres à connaître pour effectuer avec succès des transferts bidirectionnels:

a) Position, format et code de données

Position

L'organisation de la mémoire d'un analyseur T.R.F. doit être bien connue. A chaque fonction correspond une adresse décimale qu'il faut utiliser dans le but d'extraire la bonne information (voir tableau I).

Format

Le format dans lequel les données sont connues doit être précisé comme il est montré au tableau II.

Code

Ce code est un des éléments délicats lors de la manipulation. Généralement, il peut s'agir d'un code ASCII, de données codées en binaire, et en binaire complément de deux. Le tableau III donne un exemple de la traduction possible de différentes données.

b) Communications - instructions

L'analyseur et l'ordinateur sont tour à tour "parleur" et/ou "écoutéur". Il est très important de bien définir avant chaque transfert lequel des deux va être "parleur" (envoyé des données) ou "écoutéur" (recevoir des données). A ceci, on peut ajouter que l'utilisation de "drapeaux" levés ou baissés permet de multiplier les combinaisons et d'assurer la logique des instructions.

c) Modes d'interface

Ces modes permettent aux instructions et/ou aux données d'entrer ou de sortir de l'analyseur selon que celui-ci a été défini comme "écoutéur" ou comme "parleur". Le tableau IV nous indique quels sont les modes standards et leurs fonctions pour un analyseur T.R.F. du type 2031 de Bruël et Kjaër (tableau IV).

d) Mémoire tampon

Cette mémoire tampon est une nécessité puisqu'elle permet en quelque sorte de régulariser le débit des transferts de données. En effet, les analyseurs et/ou acquéreurs peuvent en général transférer les données plus vite que le calculateur ou l'ordinateur n'est capable de les recevoir.

Dès lors cet espace tampon devient un réservoir temporaire dans lequel on peut stocker rapidement des données qui seront ensuite extraites au rythme désiré.

e) Exemples d'utilisation

- Transformée complexe de Fourier convenablement référencée en phase

Afin de synthétiser les informations dont nous avons parlé jusqu'ici au sujet de la conversation bidirectionnelle, nous présentons ici le texte (tableau V) d'un programme permettant d'obtenir la T.R.F., dans le domaine complexe et ce, après avoir réorganisé la fonction de temps¹. On constatera que cette manoeuvre simple nécessite cependant quelques 48 instructions, ce qui donne une idée des précautions que l'on doit prendre pour que la conversation bidirectionnelle se fasse convenablement.

- Réalisation d'un analyseur bi-canal à l'aide de deux analyseurs mono-canal⁶

La figure (6) montre le montage nécessaire à une telle réalisation. On notera la présence d'une boîte dite de synchronisation permettant d'assurer une acquisition parfaitement simultanée des données et ce, bien que chacun des analyseurs est un temps de conversion A/D et un temps de programmation du déclenchement légèrement différent. Bien que ce système soit hors temps réel, il offre des facilités non disponibles sur les deux canaux T.R.F. commerciaux: délai ajustable à l'échantillon près, gestion automatique, analyse de signaux ayant 10 k/par canal de données au lieu de 1 k.

Conclusion

L'analyse numérique des signaux, via un processus bi-canal, permet et permettra des analyses de plus en plus sophistiquées et puissantes (voir récemment l'intensité acoustique). Cependant elle ouvre la porte à des erreurs tant sur le plan de l'expérimentation que sur celui de l'interprétation. Nous avons vu que:

- le déphasage inter canal doit être parfaitement quantifié et calibré lors de l'utilisation de fonctions vectorielles;
- les erreurs de troncature peuvent être cruciales dans les cas limites. C'est souvent par là que la gamme dynamique des mesures va se trouver limitée;
- les simples délais temporels doivent être parfaitement corrigés, même pour des fonctions de type scalaire (telle la cohérence);
- la fonction de cohérence est souvent biaisée. C'est sans doute une des fonctions la plus difficile à maîtriser et même si les fonctions de cohérence partielle peuvent aider, elles demeurent délicates d'emplois;
- le fait d'interfacer convenablement un ordinateur ou un ordinateur avec tout instrument en décuple les capacités.

Les perspectives intéressantes se situent évidemment au niveau du traitement multi-canal: il serait en effet très instructif par exemple, d'obtenir

plus d'informations sur la radiation acoustique en développant une cohérence entre la vélocité acoustique (2 canaux) et la vélocité vibrationnelle (1 canal). L'analyse multi-canal nécessite et nécessitera le traitement d'un très grand volume de données; mais les problèmes de bases demeureront les mêmes que ceux vécus pour l'analyse bi-canal.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil national de la recherche en sciences et en génie et l'Institut de recherche en santé et sécurité du travail au Québec qui, par leurs subventions, ont rendu possible les travaux qui ont été présentés dans cet article.

Bibliographie

1. J. Nicolas, "Le traitement digital des signaux acoustiques", C.A.A., Vol. 10, #3, 1982.
2. J.S. Bendat, A.G. Piersol, "Engineering applications of correlation and spectral analysis", J. Wiley, 1980.
3. B. Gosselin, "Méthode et utilisation des fonctions de cohérence pour l'identification des sources de bruit", Thèse de maîtrise, Université de Sherbrooke, 1982.
4. C.J. Dodds, J.D. Robson, "Partial coherence in multivariate random processes", J.A.S.A., 1975.
5. J. Max, "Méthodes et technique de traitement de signal", Tomes I et II, Masson, 1981.
6. J. Nicolas, B. Gosselin, G. Lemire, "Duan channel analysis via two single channels", Inter Noise 82, San Francisco.

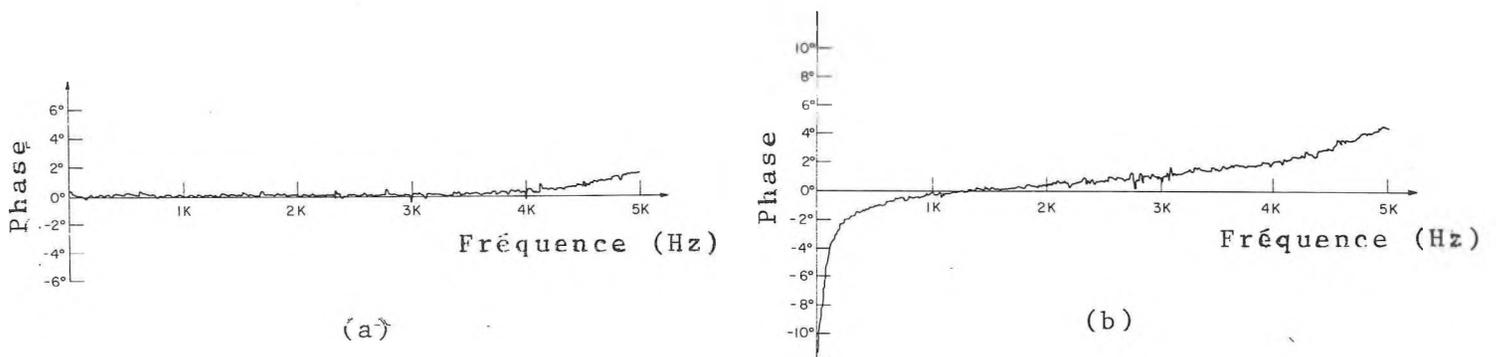


Figure 1. Déphasage a) entre deux canaux
b) entre deux microphones

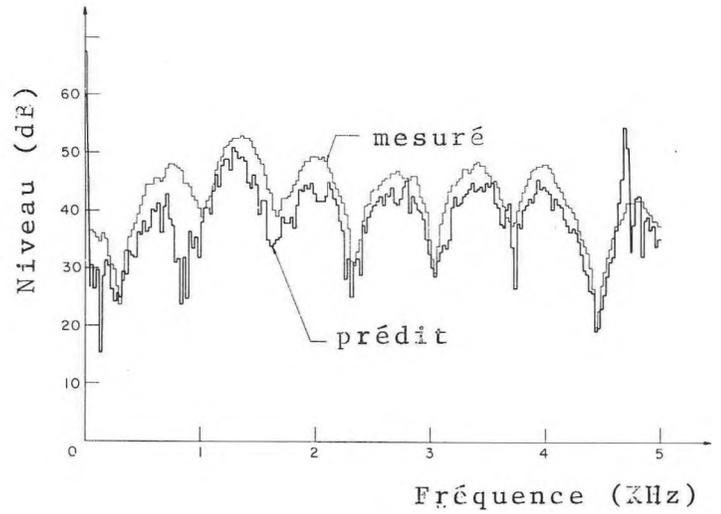
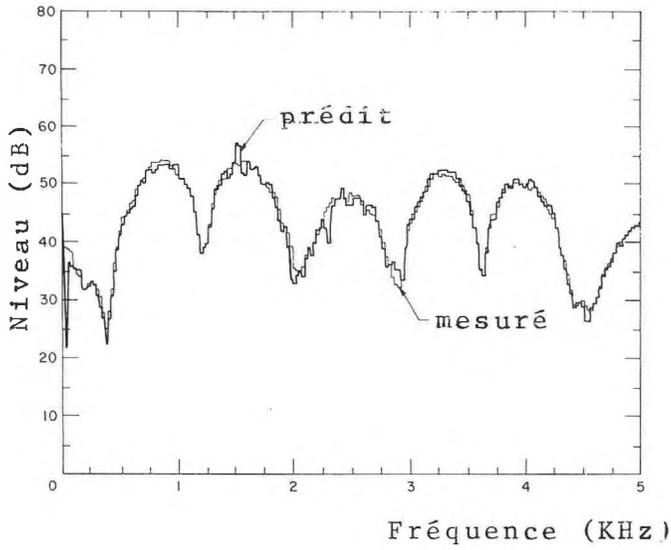
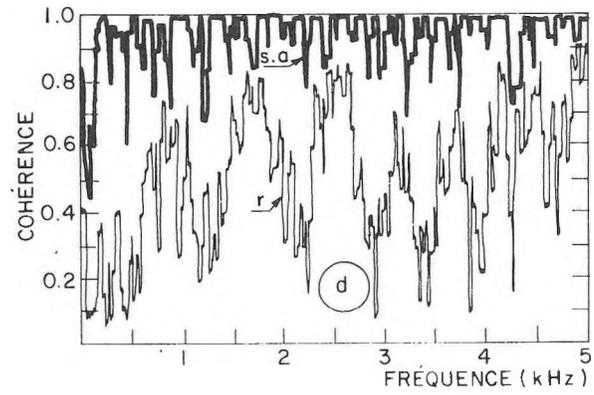
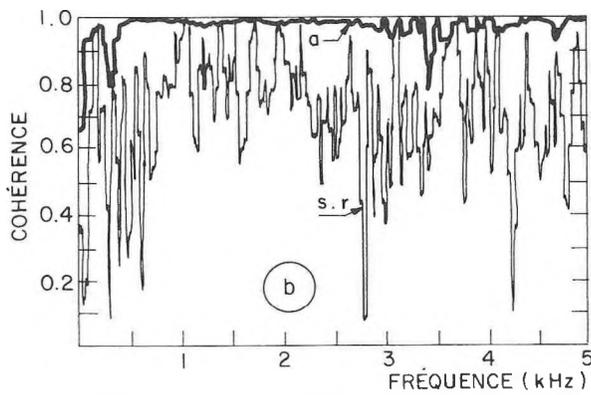
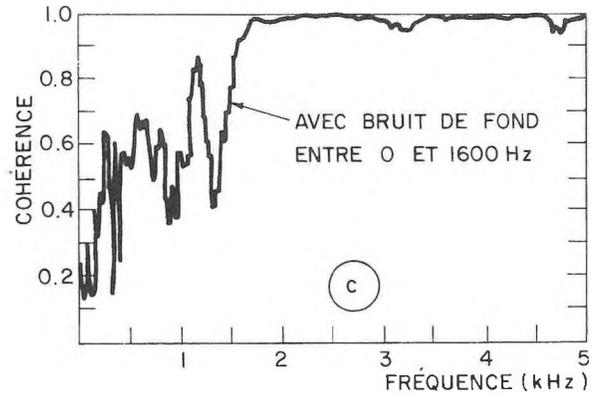
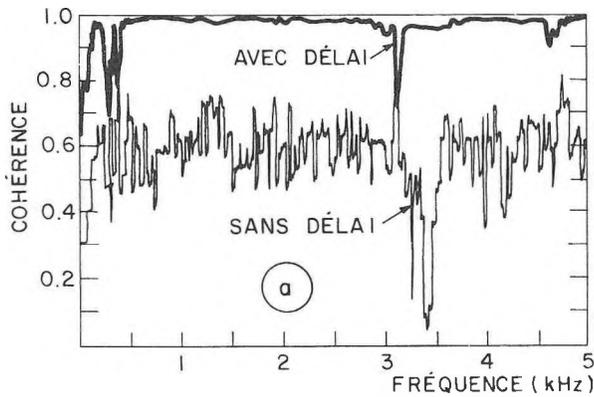


Figure 2. Effet du délai a) sans programmation du délai
b) avec programmation du délai



a = anéchoïque ; s.r = semi-réverbérant

s.a = semi-anéchoïque ; réverbérant

Figure 3. Conditions influençant la cohérence.

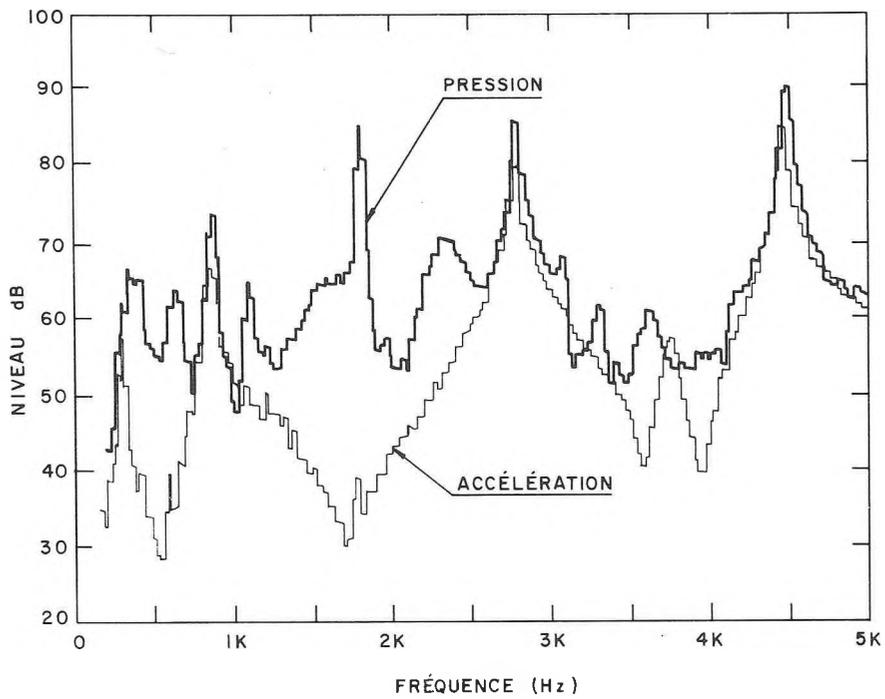


Figure 4. Spectres comparatifs bruit/vibration.

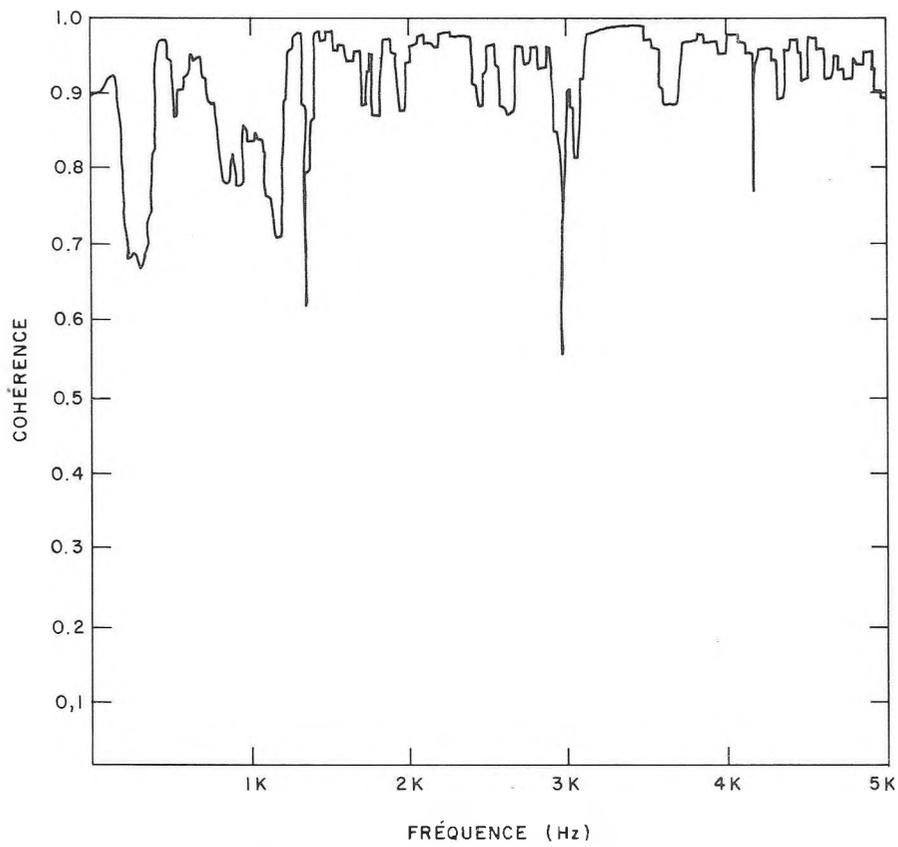


Figure 5. Cohérence entre signaux bruit/vibration.

Adresse décimale	Contenus de la mémoire
0 1023	- Fonction du temps. Spectre complexe ou spectre instantané.
1024 2047	- Fonction du temps. Spectre complexe ou spectre instantané.
2050 2849	- Spectre intégré.
2872 3071	- Registre d'affichage de spectre.
3073 3476	- Mémoire de référence.
3584 4095	- Fonction temporelle 8 bits

TABLEAU I : Organisation de la mémoire (modèle 2031 de B & K)

Place en mémoire	Contenu
2 ou 1026 3 ou 1027 4 ou 1028 5 ou 1029 etc.	Mantisse ligne 1 Exposant ligne 1 Mantisse ligne 2 Exposant ligne 2 etc.
a) Format du spectre de puissance instantané	
Place en mémoire	Contenu
0 ou 1024 1 ou 1025 2 ou 1026 3 ou 1027 etc.	Partie réelle ligne 0 Partie imaginaire ligne 0 Partie réelle ligne 0 Partie imaginaire ligne 1 etc.
b) Format du spectre complexe	

TABLEAU II : Formats dans la mémoire de l'analyseur

Traduction Données codées	Code ASCII	Code binaire Mots de 16 bits	Code binaire Mots de 8 bits	Code binaire Complément à deux mots de 16 bits
0100000100110111	A7	16695	65 et 55	-
1000000000000001	-	32769	128 et 1	-32767

TABLEAU III : Interprétation des données

Code de commande	Réponse de l'appareil	
	adressé écouteur	adressé parleur
#0	Entrée numérique du spectre en ASCII dans la mémoire	Sortie numérique du spectre en ASCII.
#1	Réglage ASCII des touches	Sortie de tous les réglages de touches en ASCII
#2	Entrée numérique et transformation de la fonction temporelle	Sortie numérique de la fonction du temps
#3	Transfert de blocs MSBY-LSBY vers le 2031	Transfert de blocs MSBY-LSBY à partir du 2031
#4	Adressage en ASCII de la touche à actionner	Sortie ASCII de sélection de touches
#5	-	Sortie numérique du spectre codé complément à 2.
#6	Transfert de blocs LSBY vers l'analyseur	Transfert de blocs LSBY à partir de l'analyseur
#7	Transfert de blocs MSBY vers l'analyseur	Transfert de blocs LSBY à partir de l'analyseur
#8	Poursuite des opérations	

où MSBY = "Most significant byte" ou octet le plus significatif
 LSBY = "Least significant byte" ou octet le moins significatif.

TABLEAU IV : Modes de l'interface

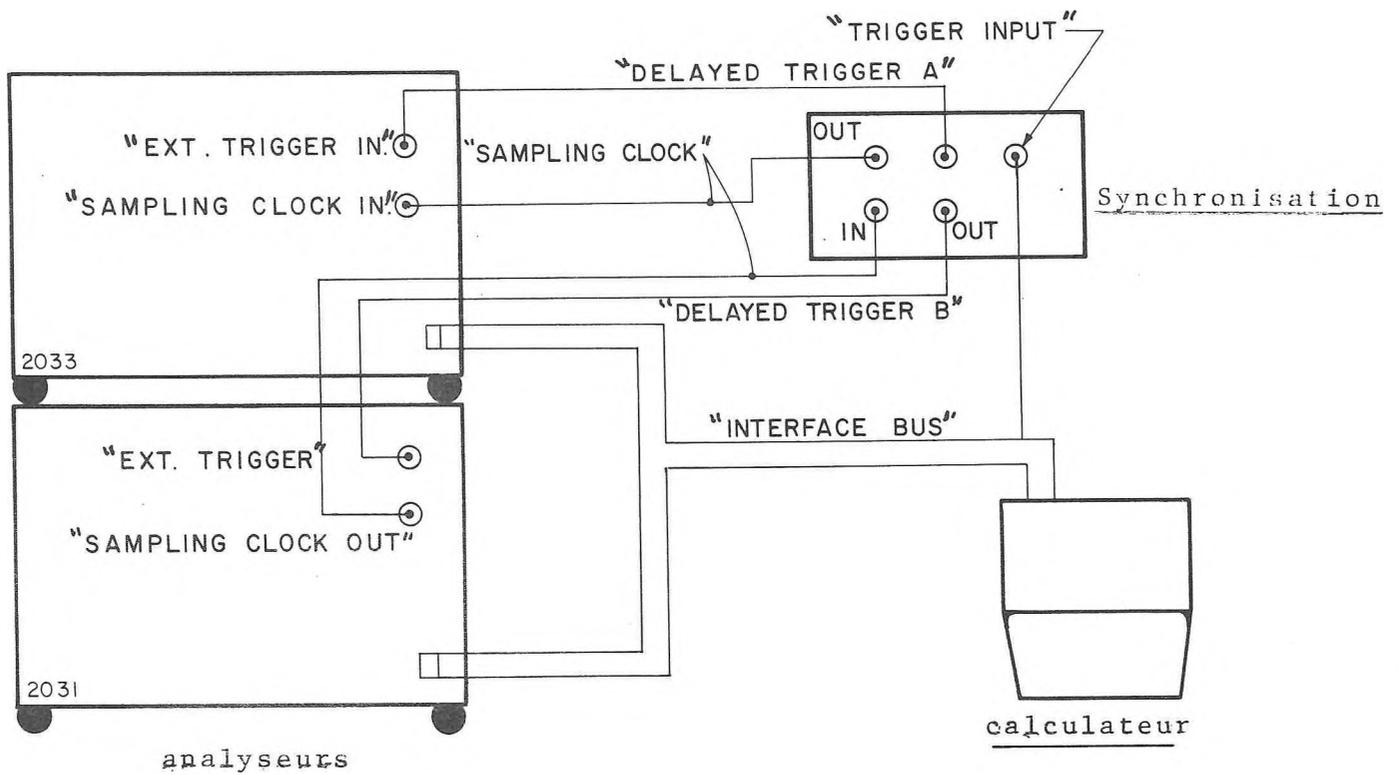
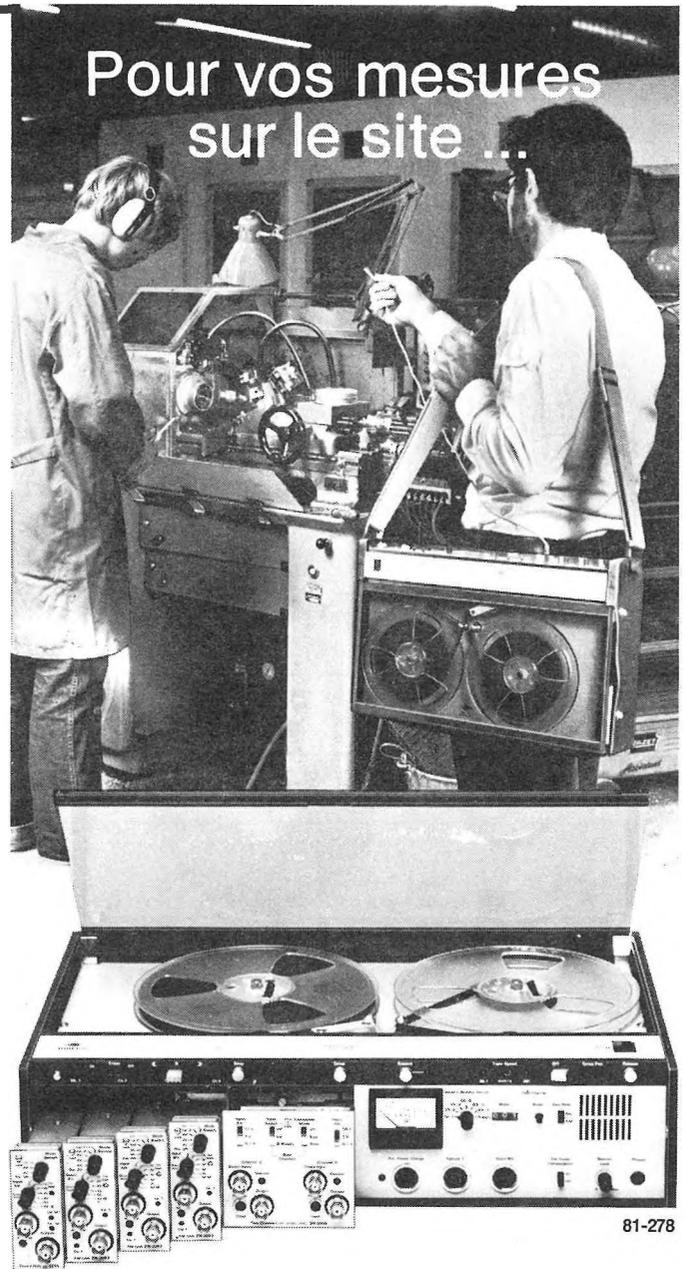


Figure 6. Montage assurant la synchronisation entre deux analyseurs T.R.F.

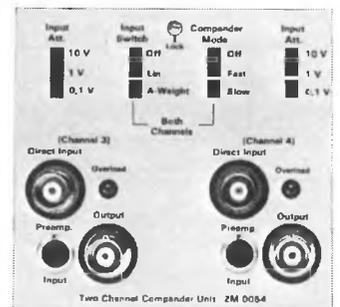
New... from Bruel & Kjaer

Pour vos mesures
sur le site ...



Enregistreurs magnétiques Types 7005 et 7006

- DC à 60 kHz
- 1 voie directe et 3 voies FM (7005) ou 4 voies au choix (7006)
- 2 vitesses 1,5 et 15 pouces/s
- Entraînement différentiel à verrouillage de phase pour une vitesse de défilement stable et précise
- 8,8 kg



- Unité d'extension/compression à 2 voies donnant une gamme dynamique réelle supérieure à 70 dB. Pondération A ou lin. Entrées directes ou pré-ampli. de microphone

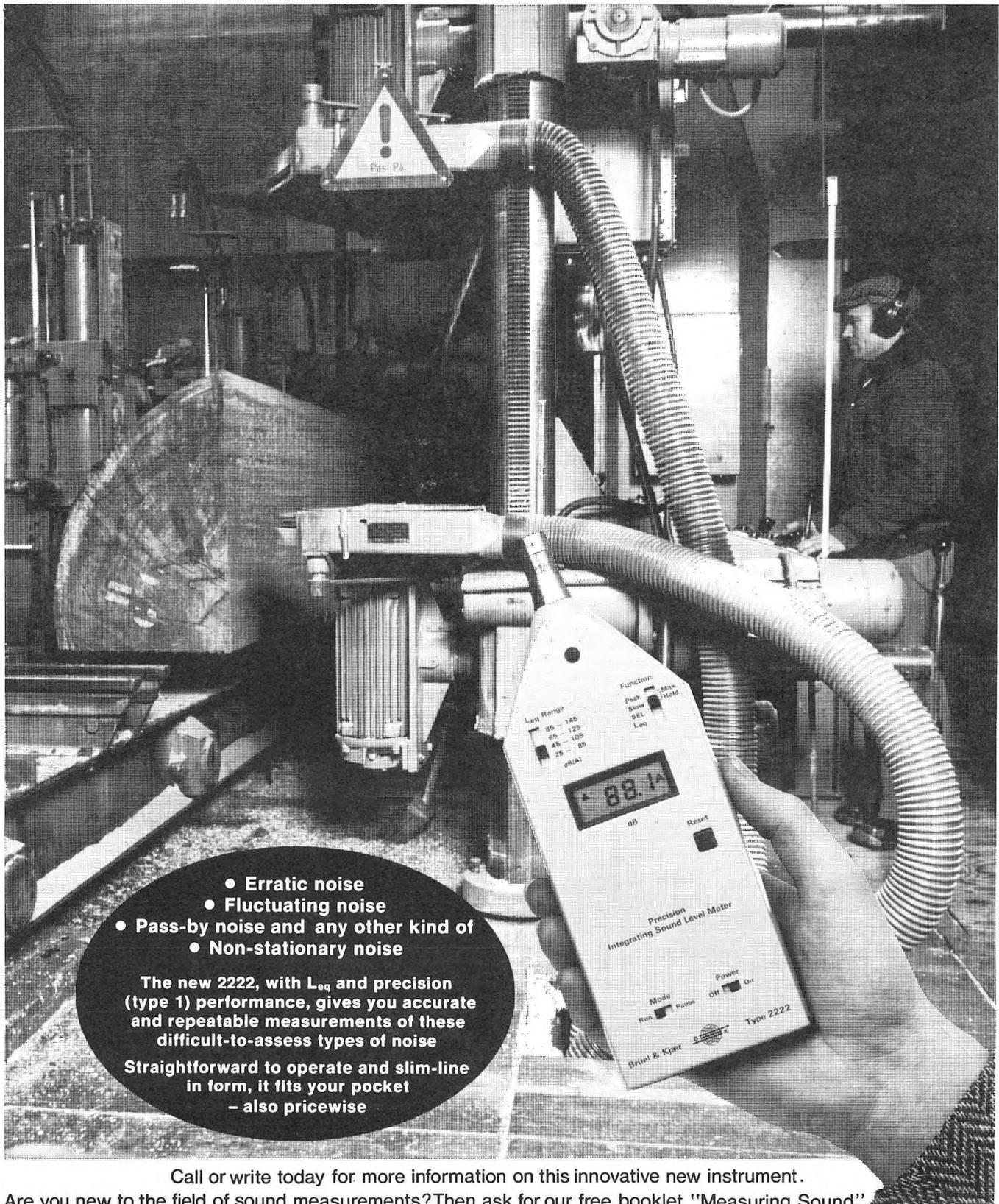


BRUEL & KJAER CANADA LTD.

Specialists in acoustic and vibration measurement

Precision Integrating Sound Level Meter 2222

The First truly pocket-sized precision L_{eq} sound level meter



- Erratic noise
- Fluctuating noise
- Pass-by noise and any other kind of
- Non-stationary noise

The new 2222, with L_{eq} and precision (type 1) performance, gives you accurate and repeatable measurements of these difficult-to-assess types of noise

Straightforward to operate and slim-line in form, it fits your pocket
— also pricewise

Call or write today for more information on this innovative new instrument.

Are you new to the field of sound measurements? Then ask for our free booklet "Measuring Sound!"

MONTREAL
90 Leacock Road
Pointe Claire, Que. H9H 1H1
Tel.: (514) 695-8225

OTTAWA
7 Slack Road, Unit 4
Ottawa, Ont. K2G 0B7
Tel.: (613) 225-7648

TORONTO
71 Bramalea Road, Suite 71D
Bramalea, Ont. L6T 2W9
Tel.: (416) 791-1642

LONDON
23 Chalet Crescent
London, Ont. N6K 3C5
Tel.: (519) 473-3561

VANCOUVER
5520 Minoru Boulevard, Room 202
Richmond, B.C. V6X 2A9
Tel.: (604) 278-4257

```

0: cli 7;clr 7;cmd 7,"?"
1: dim A$[2065]
2: buf "FFT",A$,3
3: dim B$[20]
4: buf "EXP",B$,3
5: dsp "AJUSTEZ LES TOUCHES DU 2031";stp
6: "ON MET L'ANALYSEUR SUR STOP":
7: wtb 725,"#1,X1;"
8: "ECRITURE DU MASQUE":
9: wtb 725,"#6,2855,1,",1
10: spc 1
11: prt "POUR PRENDRE UN SPECTRE, IL SUFFIT DE PRESSER LA TOUCHE SINGLE"
12: prt "SUR LE 2031"
13: spc 2
14: dsp "PRENDRE UN SPECTRE/C.";stp
15: prt "PRESSEZ 'CONT' LORSQUE LE VO- YANT TRIG'D DU"
16: prt "2031 EST ETEINT";spc 2;stp
17: "SORTIE DE LA FONCTION DE TEMPS":
18: wtb 725,"#2;"
19: tfr 725,"FFT",2049
20: jmp rds("FFT")#-1
21: "POURSUITE DES OPERATIONS":
22: wtb 725,"#8;"
23: prt "PRESSEZ 'CONT' LORSQUE LE 2031 EST EN POSITION"
24: prt "RECORD STOP";spc 2;stp
25: "ECRITURE DU MASQUE":
26: wtb 725,"#6,2855,1,",4
27: "ENTREE DE LA FONCTION DE TEMPS":
28: wtb 725,"#2,",A$
29: "LECTURE DE L'ADRESSE DE DEPART DU FFT":
30: wtb 725,"#3,3511,1;"
31: tfr 725,"EXP",3
32: jmp rds("EXP")#-1
33: itf(B$[1,2])>B
34: "LECTURE DU FFT":
35: if B=0;wtb 725,"#3,0,1024;"
36: if B=1024;wtb 725,"#3,1024,1024;"
37: "ON VIDE L'ESPACE TAMPON":
38: buf "FFT"
39: tfr 725,"FFT",2049
40: jmp rds("FFT")#-1
41: "ON VIDE LA MEMOIRE TAMPON":
42: buf "EXP"
43: "LECTURE DE L'EXPOSANT":
44: wtb 725,"#3,3582,1;"
45: tfr 725,"EXP",2
46: itf(B$[1,2])>E
47: "ANNULATION DU MASQUE":
48: wtb 725,"#6,2855,1,",0

```

TABLEAU V : Programme pour l'obtention de transformée (complexe) de Fourier.