

Rapports IRCAM



Michèle Castellengo

Sons Multiphoniques aux Instruments à Vent

Centre Georges Pompidou

MC/MTJ

SONS MULTIPHONIQUES
AUX INSTRUMENTS A VENT

MICHÈLE CASTELLENGO

MAI 1981

P L A N

=====

1. Définitions
2. Position du problème

I. RAPPELS D'ACOUSTIQUE

3. Régimes d'un tuyau
4. Conditions physiques favorisant la production de régimes non harmoniques.
5. Les systèmes excitateurs.
6. Phénomènes se produisant aux périodes transitoires.
7. Transitoire d'attaque.
8. Changement de régime.
9. Battement et roulement.
10. Sons de combinaison.
11. Perception des sons harmoniques.
12. Perception des sons inharmoniques.

II. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE QUELQUES SONS MULTIPHONIQUES

13. Méthodes d'analyse.
 14. Analyse de deux sons de hautbois de type "multiphonique harmonique"
 - 1) HB12
 - 2) HB14
 15. Analyse de CLSOD2 : son à roulement.
 16. Son multiphonique au trombone.
 17. Remarques sur la notation des sons multiphoniques harmoniques.
 18. Planches montrant l'analyse de quelques sons multiphoniques.
 19. Champs de liberté des sons multiphoniques.
 20. Conclusions.
- Bibliographie.

Un enregistrement sur bande magnétique des sons analysés, dans ce rapport, est disponible à l'IRCAM.



SONS MULTIPHONIQUES AUX INSTRUMENTS A VENT

=====

INTRODUCTION

Cette étude rend compte de recherches menées d'une part, au laboratoire d'acoustique de l'Université Paris VI, lors de la préparation d'une thèse d'université, et d'autre part, à l'IRCAM, dans le cadre d'un contrat DGRST.

Le sujet : "Production et perception des sons multiphoniques des instruments à vent" a donné lieu à une recherche de caractère général. En effet, des méthodes pratiques pour instrumentistes avec des tableaux de doigtés existent déjà depuis quelques années, mais il nous manquait :

- de situer le phénomène "multiphonie" dans le fonctionnement de plusieurs types d'instruments à vent,
- de répertorier les différentes manifestations acoustiques se produisant lors de l'émission multiphonique,
- de les relier aux données perceptives et musicales déjà consignées par les musiciens.

L'étude systématique des sons multiphoniques sur chaque type d'instrument (catalogue exhaustif) est une seconde étape. Le projet en a été ajourné.

Le travail porte sur un nombre limité de sons échantillons pris sur 5 instruments. Les enregistrements ont été faits à l'IRCAM au département "Instruments et Voix" (Vinko GLOBOKAR) avec :

| | | |
|-----------------|---|--------------------|
| Trombone | : | Vinko GLOBOKAR |
| Flûte | : | Pierre Yves ARTAUD |
| Hautbois | : | Zoltan MAGYAROSY |
| Basson | : | Heinz RIEDELBAUCH |
| Clarinete basse | : | Michel PORTAL. |

Nous employons abondamment la représentation sonographique facilement accessible aux musiciens : elle donne une bonne traduction visuelle de la sensation auditive.

Dans une telle recherche, l'ordinateur est un outil précieux. Malheureusement, dans le cadre de ce contrat, le temps que nous avons dû passer pour apprendre à l'utiliser nous a privé d'autant de disponibilités pour l'exploiter et nous n'avons pu qu'en entrevoir l'intérêt en synthèse :

- analyse et synthèse de sons réels pouvant être modifiées en vue de tests.
- synthèse avec Music 10 de sons expérimentaux destinés à confirmer certaines hypothèses : effet des variations d'amplitude (roulement, battements).
- exploitation des données numériques de l'analyse FFT, venant en complément d'autres modes d'analyse.

Nous remercions René CAUSSÉ qui nous a aidé pour l'analyse des sons de hautbois et qui a participé à l'élaboration et à la passation des tests.

1. DEFINITIONS

L'émission dite normale d'un instrument à vent correspond à l'entretien d'un son harmonique (bien défini) que tous les musiciens désignent par une même note de musique, quelquefois à l'octave près. La hauteur perçue est sans ambiguïté et le son est stable et reproductible dans la mesure où toute l'évolution de la facture instrumentale occidentale a justement eu pour but de favoriser ce mode d'émission.

L'émission multiphonique peut se présenter de différentes façons. Schématiquement, deux cas sont à distinguer :

- l'entretien d'un son stable perçu comme un accord. Les musiciens entendent 2, 3 hauteurs ou plus, mais ne sont pas toujours du même avis.
- La production de sons complexes évoluant rapidement dans le temps, affectés de grincements, roulement, "battements" plus ou moins rapides, phénomènes attestant une instabilité d'émission souvent habilement "entretenu" par le musicien.

2. POSITION DU PROBLEME

L'émission multiphonique qui est l'objet depuis quelques années d'une investigation approfondie pour les besoins de la musique contemporaine, fait partie du fonctionnement "naturel" d'un instrument à vent, mais n'a jamais été exploitée en tant que telle dans la musique occidentale de tradition écrite (exception faite de cette méthode de flûte de BAYR (ca.1825) citée par R. MEYLAN.

Par contre on en trouve de nombreux exemples dans le jeu des instruments à vent traditionnels, populaires ou non, comme la gasba tunisienne, la flûte de Nô japonaise, la trompe australienne Didjeridu. Mais ces phénomènes ont été si bien éliminés du jeu des instruments à vent occidentaux que leur étude physique est devenue "matière à scandale"! Un physicien acousticien note à propos de la polyphonie de certains tuyaux d'orgue : "j'ai pris cet exemple (tuyau à cheminée émettant un accord dissonant) comme en opposition formelle avec les idées reçues. "Bouasse" in tuyaux et résonateurs, p.3 (1925).

L'étude de l'émission multiphonique soulève plusieurs problèmes :

- d'ordre physique : fonctionnement des instruments à vent, conditions nécessaires à la production de sons multiphoniques, applications éventuelles à la facture et au jeu.
- d'ordre perceptif : perception d'intervalles différents de ceux de l'échelle tempérée, sons dans l'extrême grave et l'extrême aigu, perception des différentes sortes de variations temporelles, rapports entre les perceptions de la hauteur et celle du timbre.

Connaissant mieux la nature et la perception des différentes sortes de sons multiphoniques, nous devrions pouvoir aider instrumentistes et compositeurs dans l'utilisation de ceux-ci.

/I. RAPPELS D'ACOUSTIQUE/

3. REGIMES D'UN TUYAU

Un tuyau possède plusieurs régimes de fonctionnement, chacun correspondant à un état vibratoire donné et à une fréquence d'émission ou son partiel. Ordinairement, les régimes sont produits successivement.

Un régime donné s'établit au détriment des autres, mais ceux-ci ne disparaissent pas totalement. On peut dire que le son produit est une sorte de coopération de tous les régimes potentiels, la fréquence et le timbre de ce son dépendant des rapports de fréquence qu'ont entre eux les régimes du tuyau. Plus ces rapports sont voisins de la série harmonique, plus les partiels sont justes, plus l'énergie est répartie sur un grand nombre d'harmoniques. En d'autres termes, la justesse des partiels conditionne le timbre du son émis.

Les instruments actuels, flûte Boehm, hautbois, clarinette, trombones représentent l'aboutissement d'une longue évolution de la facture pour satisfaire des besoins et des goûts bien définis : son intense, homogène, sur toute l'étendue chromatique, utilisation du régime 2 comme octave (flûte, hautbois) ou comme douzième (clarinette) sans changement de doigté. Le basson, par contre, a résisté en partie aux transformations qu'ont subi les autres instruments à trous latéraux, pour garder son timbre spécifique.

4. CONDITIONS PHYSIQUES FAVORISANT LA PRODUCTION DE REGIMES NON HARMONIQUES PARTICULARITES DU TUYAU.

Si pour produire un son donné intense, pourvu d'harmoniques, on doit rechercher le tuyau donnant les partiels les plus justes possibles, la démarche est inverse pour l'émission multiphonique, le résultat étant d'autant plus varié et riche de possibilités que les partiels seront distincts de la série harmonique.

Plusieurs voies sont possibles et peuvent se combiner.

a) Altérations de la perce.

Avec un tuyau cylindrique de taille fine comme la flûte Boehm, doigté du DO₃ grave, la suite des partiels est 1:DO₃ 2:DO₄ 3:SOL₄ 4:DO₅ 5:MI₅ 6:SOL₅ 7:SIb₅, etc... Introduisons un corps étranger obstruant partiellement le tube en son milieu : on constate que certains partiels (2, 4, 8) sont abaissés. Les intervalles entre les partiels successifs sont complètement modifiés. La flûte Nô Japonaise en est un exemple particulièrement élaboré. (Cf. bibliographie M. Castellengo .2.)

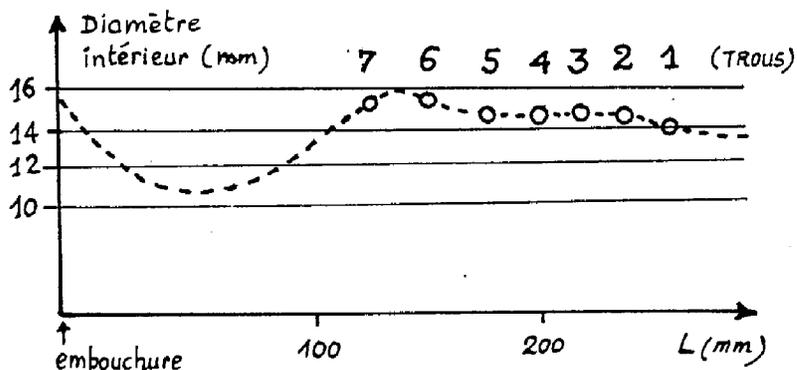


Fig. 1 - Perce longitudinale de la flûte Nô

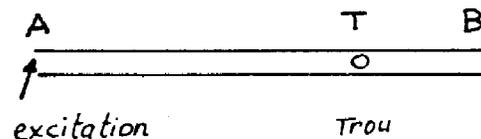


Fig. 2

b) Rôle des trous latéraux

Percer un trou T dans un tuyau c'est, de façon schématique créer 3 tuyaux AT, TB et AB (Fig. 2). Chacun possédant ses modes propres de fréquence. Quand l'ouverture du trou est très grande, TB et AB peuvent être négligés, les seuls régimes utilisables étant ceux de AT. Toute l'évolution de la facture des instruments à vent à trous latéraux s'est faite dans ce sens depuis 200 ans.

Si au contraire le trou est petit et loin de l'extrémité B, le système excitateur pourra entretenir simultanément les régimes des différentes portions du tuyau. C'est pourquoi beaucoup de doigtés de sons multiphoniques se font avec des demi-trous ou des clés de trille. Remarquons au passage que les instruments anciens dans lesquels les trous étaient nécessairement petits pour être bouchés avec les doigts se prêtent mieux à l'émission multiphonique que les instruments modernes.

c) Cheminées des trous latéraux

L'exemple type est celui du basson. Pour percer des trous présentant un écart convenable pour les doigts et s'approchant au mieux de la place acoustique souhaitée, les facteurs ont réalisé un épaulement dans l'épaisseur duquel des conduits, percés en biais, font communiquer l'intérieur du tuyau avec l'extérieur. Ces conduits, ou cheminées, sont responsables d'importantes perturbations dans la suite des partiels, ce qui se traduit par certaines caractéristiques du timbre de l'instrument. (Cf. Bibl. Kergomard). L'adaptation du système Boehm au basson a échoué; en contrepartie l'instrument se prête très bien à l'émission multiphonique.

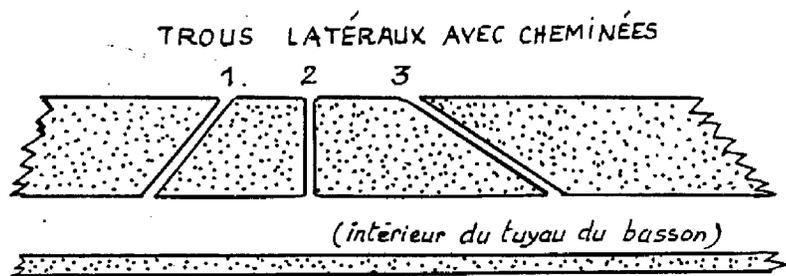


Figure 3

5. LES SYSTEMES EXCITATEURS

Les systèmes excitateurs possèdent également plusieurs régimes de fonctionnement auxquels correspondent autant de fréquences propres. Les interactions entre fréquences du système excitateur et fréquences du tuyau dépendent du rapport de force qui existe entre les deux systèmes. Schématiquement, le système lame d'air-biseau de la flûte est faible, alors que l'association lèvres + embouchure du trombone est fort. On peut rencontrer tous les degrés avec les anches de roseau. On pourra retrouver les fréquences propres d'un système excitateur lors de l'attaque des sons et dans l'entretien de certains sons multiphoniques.

6. PHENOMENES COMPLEXES SE PRODUISANT AUX PERIODES TRANSITOIRES

La plupart des études sur le fonctionnement ordinaire des instruments à vent se limitent au régime permanent : les périodes transitoires dont on sait qu'elles jouent un rôle capital dans la perception du timbre vont nous apporter de précieux renseignements. Ce sont : l'attaque et le changement de régime. On va voir qu'on y trouve déjà toutes les caractéristiques de l'émission multiphonique.

7. TRANSITOIRES D'ATTAQUE

Pendant la durée de l'établissement de la vibration dans le tuyau (de 5 à 50 ms selon les instruments) se produisent des interférences entre les modes propres du système exciteur et ceux du tuyau. Prenons quelques exemples :

Exemple I : Flûte à bec, tuyau d'orgue

C'est le cas le plus net et le plus typique. On voit apparaître successivement :

- le son de bouche, complexe et autonome, dont une des composantes se stabilise sur la fréquence d'un des régimes du tuyau, ici le régime 3 ;
- accrochage du partiel 3 ;
- lancement du régime I et, simultanément apparition de sons de combinaisons entre les deux partiels qui coexistent ;
- le régime 1 pour lequel l'entretien est adapté, seul subsiste. C'est le fonctionnement "normal".

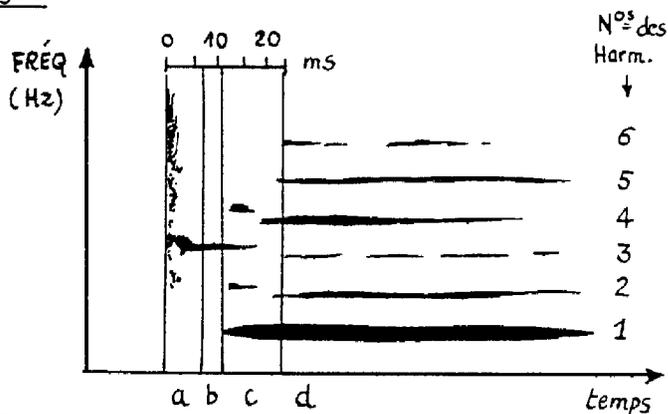


Figure 4

Le bruit du transitoire d'attaque comporte donc une phase d'émission multiphonique (c), mais trop courte et trop instable pour être exploitée musicalement.

Exemple II : la flûte traversière

Les phénomènes sont moins nets à la flûte traversière où le son de bouche est moins bien défini et plus aigu. Par contre, du fait de l'absence de trou d'octave, le fonctionnement en régime 2 et 3 montre bien la présence caractéristique des régimes inférieurs. Fig. 5 - Apparition du régime 2 (sol_3) à l'attaque du sol_4 .

Ce type de multiphonie est directement exploitable. Il suffit d'adapter l'embouchure (forme et orientation du jet) pour stabiliser le phénomène.

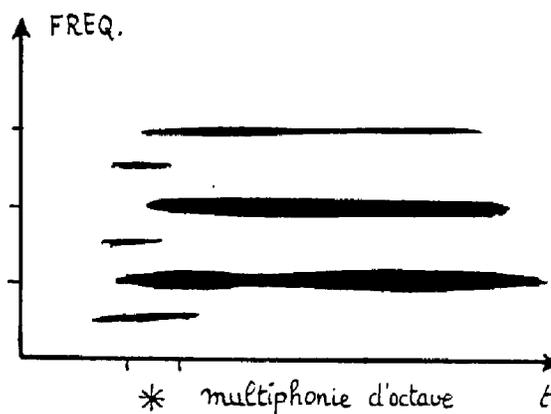


Figure 5

Exemple III : le trombone

L'analyse montre une instabilité plus ou moins marquée à l'attaque du son. Sur une note mal attaquée (roulée) on voit nettement une interruption périodique du son qui ressemble de très près aux sons multiphoniques que nous avons analysés.

Là encore, le phénomène, accidentel
devra être stabilisé et maîtrisé
pour pouvoir être utilisable.

L'attaque des instruments à anche ne
montre pas de "partiels" d'attaque.
On constate un "démarrage" du
spectre dans la zone formantique
due à l'anche.

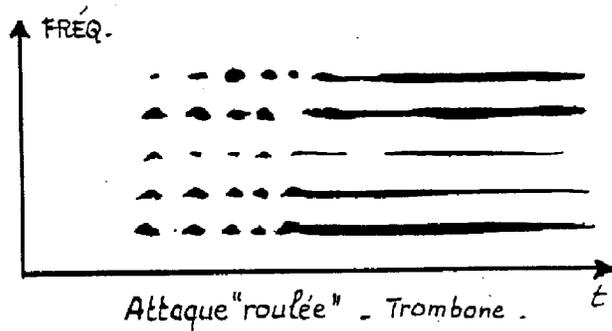
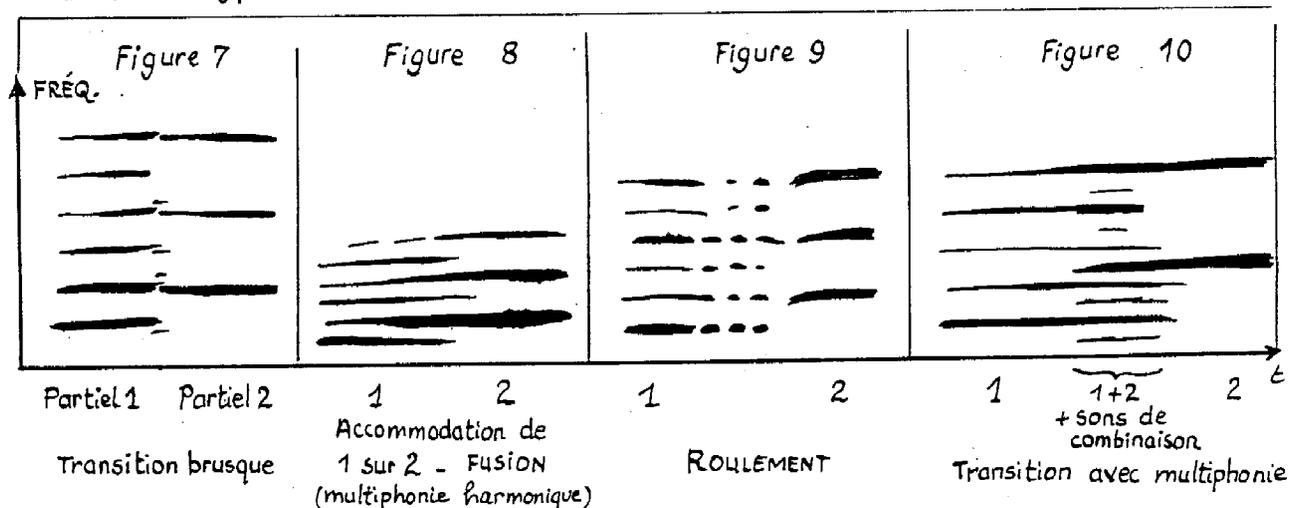


Figure 6

8. CHANGEMENTS DE REGIME

Le passage d'un régime au suivant en "legato" (souffle continu) donne
lieu à des phénomènes très complexes qui vont être largement exploités
dans l'émission multiphonique.

Selon le type de système excitateur (lame d'air-biseau, anche, embouchure),
selon les rapports de fréquence des partiels des deux régimes voisins et
la stabilité de ceux-ci, les transitions pourront se ramener à l'un ou
l'autre des types suivants.



a) Figure 7 - Saut brusque du partiel I au partiel 2

Même si le musicien prend toutes les précautions pour mener le régime I
le plus loin possible, il ne pourra le maintenir quand le 2 s'établira.
La transition est nette, du moins pour l'oreille, car l'analyse révèle
toujours une trace de superposition due à l'hystérésis du régime I dont
la production ne peut pas, physiquement, cesser de façon instantanée.

b) Figure 8 - Accommodation, attirance.

Alors que le tuyau fonctionne encore en régime I, le régime 2 produit sur
celui-ci, une attirance en fréquence. I s'accommode sur 2 jusqu'à la
fusion. La transition se produit par élimination progressive des
harmoniques du partiel I non communs à 2. A la transition on a multiphonie
"harmonique", d'octave, de quinte, de tierce...

c) Figure 9 - Roulement

Cette fois l'accommodation n'est pas possible. Le Régime I, instable, fonctionne par intermittence : on entend un roulement. Celui-ci peut prendre des formes très complexes. Nous y reviendrons plus loin.

d) Figure 10 - Superposition de deux régimes autonomes stables.

Les deux régimes ont en commun une zone de stabilité assez grande. La pression, le réglage du jet ou de l'anche convenant également à l'un et à l'autre, ils coexistent avec plus ou moins de réaction mutuelle. On voit apparaître des sons de combinaison. Il est quelquefois possible de poursuivre l'entretien des deux régimes jusqu'au partiel suivant.

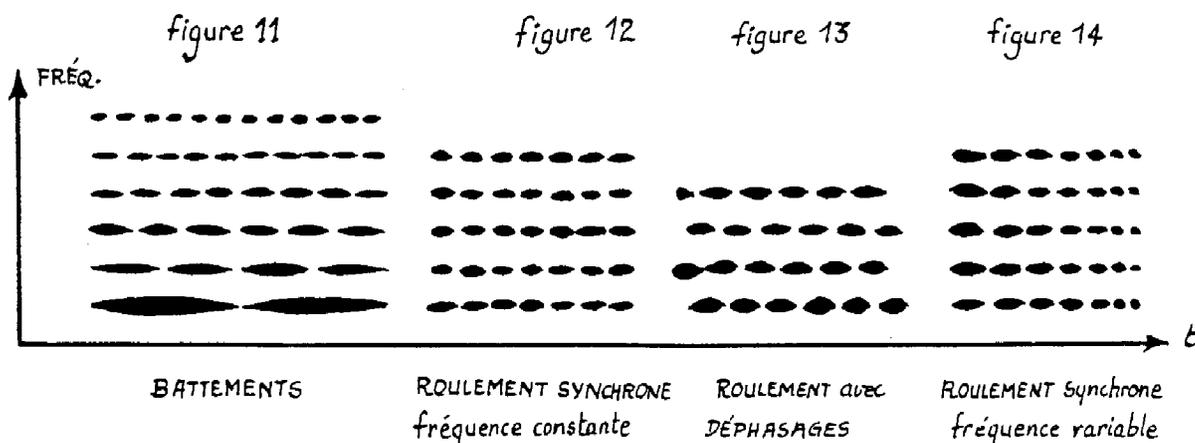
Remarque : Ce que nous avons dit du passage d'un régime inférieur à un régime supérieur s'applique à la succession prise dans l'ordre descendant ; mais les phénomènes acoustiques ne sont pas exactement réversibles ; la transition de 2 à 1 pourra être de nature différente de celle de 1 à 2.

9. BATTEMENT ET ROULEMENT

Le mot "battement" est souvent employé par les musiciens à propos de l'interruption périodique décrite Figure 9. A l'aide du sonographe, établissons la différence entre battement et roulement.

Battement - Deux sources indépendantes de fréquences voisines produisent des battements perçus comme variation périodique de l'intensité du son résultant dont la fréquence est la moyenne des deux fréquences initiales.

La rapidité des battements croît avec le rang de l'harmonique



Roulement - C'est le cas du sifflet à roulette : un son est périodiquement interrompu, soit mécaniquement (bille, instabilité de régime) soit électroniquement (modulation d'amplitude). La rapidité du roulement est la même pour toutes les composantes.

L'interruption peut être synchrone (Figure 12) ou présenter des déphasages plus ou moins compliqués (Figure 13). Le roulement peut être une modulation d'amplitude ou de fréquence et peut s'accompagner ou non d'une variation périodique de fréquence. Il est rarement stable (Figure 14)

10. SONS DE COMBINAISON

La question est complexe et a été traitée en détail par divers auteurs. Donnons seulement un exemple pour mieux déchiffrer les sonagrammes de sons multiphoniques.

Soient deux sifflets A et B produisant chacun un son sinusoïdal. Joués successivement, nous obtenons l'analyse de la Figure 15. Soufflons maintenant dans les deux sifflets simultanément. On entend l'accord formé par les deux sons plus un son grave et quelquefois un son plus aigu.

Aux deux sons originaux des deux sifflets sont venus s'ajouter un son différentiel B-A et un son additionnel A + B.

La perception des sons de combinaison dépend :

- de l'intensité des sons primaires.
- de leur situation en fréquence.

La situation se complique très vite lorsque les deux sons primaires possèdent des harmoniques car toutes les combinaisons de sons additionnels et différentiels entre toutes les composantes peuvent se produire.

Le rapport de fréquence des deux sons primaires est une donnée importante. Quand il est de la forme $(N + I)/N$, le différentiel joue le rôle d'un fondamental dont les deux fréquences sont les harmoniques de rang N et $(N + I)$.

On peut dire également que le différentiel est dans ce cas le PGCD (plus grand commun diviseur) des deux fréquences primaires.

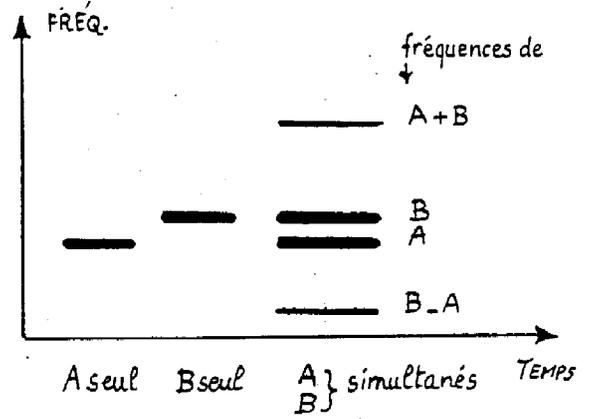
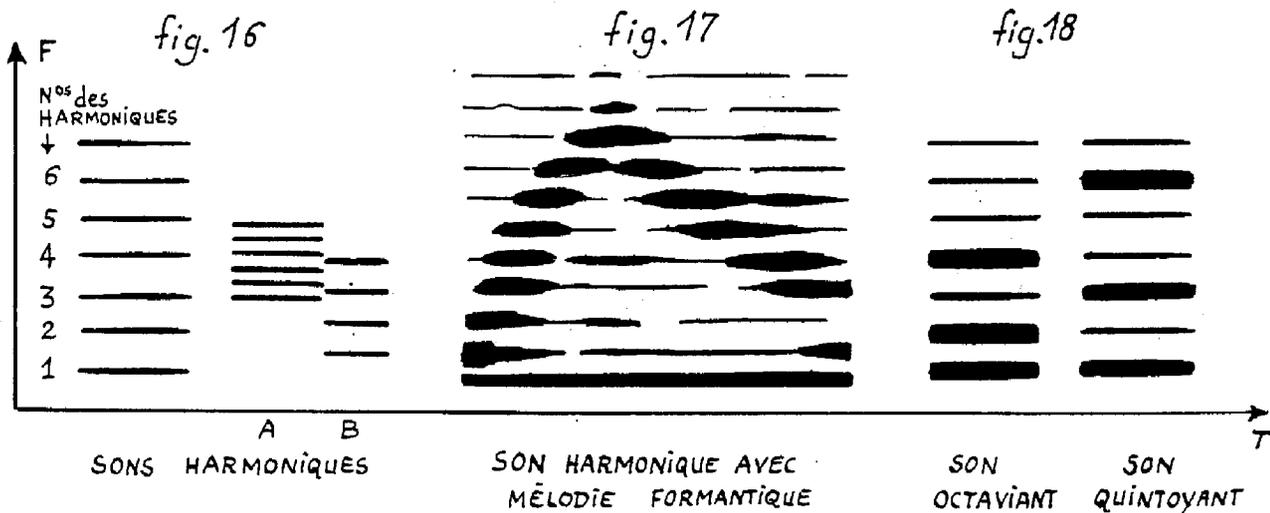


Figure 15

11. PERCEPTION DES SONS HARMONIQUES



1) Son harmonique

Un son ordinaire de hautbois, de clarinette offre une structure clairement lisible sur le sonagramme : raies parallèles équidistantes, chacune correspondant à un harmonique. La hauteur, bien définie pour les musiciens est clairement représentée par cette équidistance. Le filtrage ne modifie pas fondamentalement la hauteur perçue. Sur la Figure 16, on voit que le son A est plus grave que le son B, lequel a pourtant des harmoniques de fréquence plus basse.

2) Son harmonique avec mélodie formantique.

Si l'on renforce l'intensité de certains harmoniques, ceux-ci peuvent être perçus isolément et former une mélodie indépendante du son générateur. A un instant donné, on perçoit alors deux hauteurs. C'est le cas du chant "diphonique", de la guimbarde et de l'arc musical, où l'on a d'ailleurs souvent deux ou trois mélodies formantiques en contrepoint.

3) Son octaviant, quintoyant.

Un son dont les harmoniques 2, 4, 6 ou 3,6,9 sont renforcés donnera également une sensation de hauteur double : le fondamental + l'octave ou le fondamental + la douzième.

Dans tous les cas, il s'agit de sons périodiques : les fréquences des composantes successives sont invariablement $N, 2N, 3N, 4N, \text{etc...}$

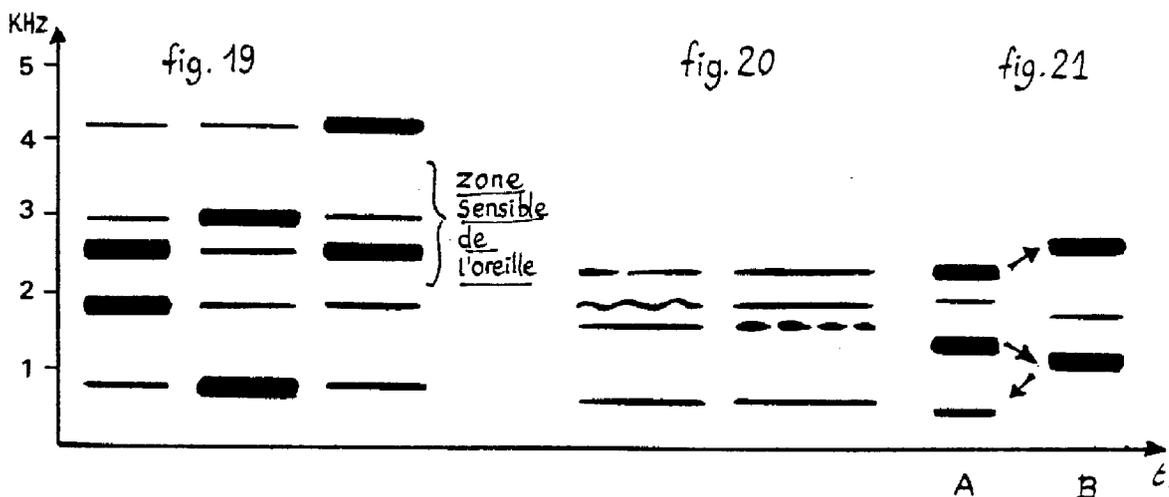
12. PERCEPTION DES SONS INHARMONIQUES

Tout entre en ligne de compte : les fréquences des composantes pouvant être quelconques, la, ou les hauteurs perçues qui pourront différer grandement d'un musicien à l'autre, dépendent d'un grand nombre de facteurs.

1) Répartition de l'énergie dans le spectre de fréquence (Figure 19)

Des sons composés des mêmes fréquences donnent lieu à des sensations de hauteur différentes.

La transposition, en modifiant la position relative des composantes par rapport à la zone sensible de l'oreille peut bouleverser complètement les hauteurs perçues.



2) Variations temporelles (Figure 20)

Les variations temporelles d'amplitude ou de fréquence nombreuses dans les sons inharmoniques jouent un grand rôle. L'attention auditive étant attirée par "ce qui change", une composante fluctuante sera perçue isolément avec plus de netteté.

3) Les relations de proximité.

La perception de l'enchaînement de deux sons inharmoniques soulève bien des problèmes. L'auditeur tend à chercher un mouvement mélodique mais souvent plusieurs sont possibles (Figure 21)

De plus, l'insertion d'un son dans un enchaînement peut modifier la perception de sa hauteur. Ainsi, la première composante de A qui a peu de poids, pourra devenir prépondérante dans l'enchaînement B A, comme aboutissement d'un mouvement mélodique descendant.

Ce point est important pour les sons multiphoniques : leur "effet" dépend du contexte (les sons qui précèdent ou qui suivent).

4) Les variabilités perceptives individuelles.

Elles jouent un grand rôle et sont une des difficultés rencontrées dans la description et la classification des sons multiphoniques à l'oreille.

La sensibilité de l'oreille à la fréquence, aux variations temporelles, les capacités d'analyse, fort différentes d'une personne à l'autre, interviennent à tout moment dans le jugement.

5) Zone sensible de l'oreille et zone d'écoute des fondamentaux musicaux.

Par la pratique des instruments et l'écoute du répertoire classique, les musiciens sont formés et entraînés pendant de nombreuses années à analyser les sons qui se trouvent dans la zone de fréquence correspondant aux deux portées traditionnelles de musique, soit du D01 au SOL5, c'est-à-dire, entre 65 Hz et 1500 Hz.

Les fréquences plus basses sont rarement bien perçues, sauf par les instrumentistes spécialisés. Le problème est plus complexe pour les fréquences plus aiguës situées entre 2000 et 4000 Hz. Les sons multiphoniques de flûte, clarinette, hautbois, possèdent souvent des composantes intenses dans cette zone. Or, c'est précisément la zone la plus sensible de l'oreille. Pourtant, rares sont les musiciens aptes à analyser correctement ces fréquences aiguës. Il arrive qu'elles soient véritablement oubliées, bien qu'entendues comme le montrent les expériences de synthèse où on les supprime. Le plus souvent, on constate des erreurs d'octave dans la notation. Les musiciens les ramènent dans la zone des fondamentaux habituels ; il peut alors y avoir conflit avec les composantes existant effectivement dans la même zone.

Ces habitudes auditives peuvent être modifiées par un entraînement conscient et approprié.

★ ★

★

II. ANALYSE ET SYNTHÈSE DE QUELQUES SONS MULTIPHONIQUES/

13. METHODES D'ANALYSE

a) Sonographe.

L'analyse sonographique est un bon point de départ. Dans le mode "standard", bande passante 8 kHz, filtre 45 Hz, elle permet de préciser les phénomènes en correspondance avec l'analyse à l'oreille : étendue spectrale, présence ou non d'une trame harmonique, types de variations temporelles et fréquentielles. Elle est complétée par des analyses plus adaptées aux paramètres que l'on se propose d'étudier en usant de transpositions, en choisissant la largeur du filtre : 10, 45, 150 ou 300 Hz. Pour un son donné, plusieurs sortes d'analyses sont généralement nécessaires car si l'on veut gagner en précision dans la définition de la fréquence, c'est au détriment de la résolution temporelle. Dans certains cas (roulement), l'aspect de l'image peut changer radicalement selon le filtre utilisé. (Figure 22)

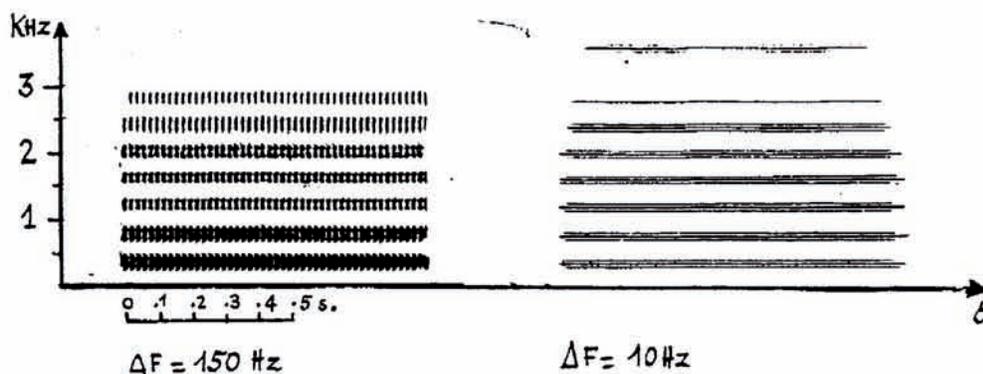


figure 22 - Sonagrammes d'un son de 400 Hz interrompu 50 fois/seconde

b) Accordeur et enregistreur de niveau.

Pour connaître avec précision la fréquence des différentes composantes, on utilise la méthode classique qui consiste à mettre le son sur boucle, puis, ayant filtré une composante on en mesure la fréquence en exprimant l'écart en savarts ou en cents qu'elle présente avec la note la plus voisine de la gamme tempérée. Toutefois, les sons musicaux même stables, présentent toujours des fluctuations non négligeables et à défaut d'enregistreur de fréquence, les résultats ne sont guère exploitables.

De la même façon, on peut explorer les variations d'amplitude et en obtenir le tracé sur un enregistreur graphique.

c) Analyse à l'ordinateur.

Elle a permis de lever des imprécisions, mais il reste des difficultés pour l'analyse de la fréquence de sons rapidement fluctuants.

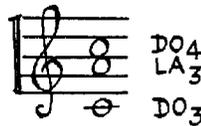
Lorsque le son a été analysé on peut sortir le contenu numérique des fichiers fréquence et amplitude, d'une composante donnée et en imprimer les courbes représentatives de l'évolution temporelle de l'une ou

de l'autre grandeur.

Prenons pour exemples trois sons typiques de hautbois et de clarinette baptisés pour les besoins de l'entrée en ordinateur : HB 12, HB 14 et CLS0D2.

Remarques :

1. Nous employons la numérotation des sons de l'octave conventionnellement utilisée en France :



2. Le savart est la 1/50ème partie du ton tempéré. Un savart vaut approximativement 4 cents.

14. ANALYSE DE DEUX SONS DE HAUTOIS DE TYPE "MULTIPHONIKES HARMONIQUES"

1. Analyse de HB 12

A l'audition, HB 12 donne la sensation d'un accord complexe de tessiture aiguë. Ce qui en rend l'analyse difficile. Peu de personnes sont capables d'identifier les composantes et les erreurs d'octave sont nombreuses.

a) Analyse au sonagramme (Figure 23)

Le son est très riche : au moins 25 composantes identifiables dont certaines sont particulièrement intenses vers 1200, 1700 et 2400 Hz. La mesure précise de la fréquence des cinq premières composantes par la méthode de la boucle, permet de les relier aux principales notes identifiées par les musiciens. Ce sont : $Si_3 + 14$ sav., $Mi_4 + 14$, $RE_5 + 5$, $SOL_5 + 9$, $RE_6 + 5$.

Le sonagramme montre l'aspect frappant d'un son harmonique dont il manquerait certaines composantes et en particulier celles de basse fréquence. Complétons ce spectre harmonique jusqu'au fondamental : nous obtenons un son générateur de 170 Hz ($Mi_2 + 14$ savarts) à partir duquel on peut interpréter toutes les composantes comme étant les harmoniques.

On a bien : (figure 23)

$$\begin{aligned} 3 \times 170 \text{ Hz} &= 510 \text{ Hz} \\ 4 \times 170 \text{ Hz} &= 680 \text{ Hz} \\ 7 \times 170 \text{ Hz} &= 1\ 190 \text{ Hz} \\ 10 \times 170 \text{ Hz} &= 1\ 700 \text{ Hz} \\ 14 \times 170 \text{ Hz} &= 2\ 380 \text{ Hz} \end{aligned}$$

pour ne citer que les principales.

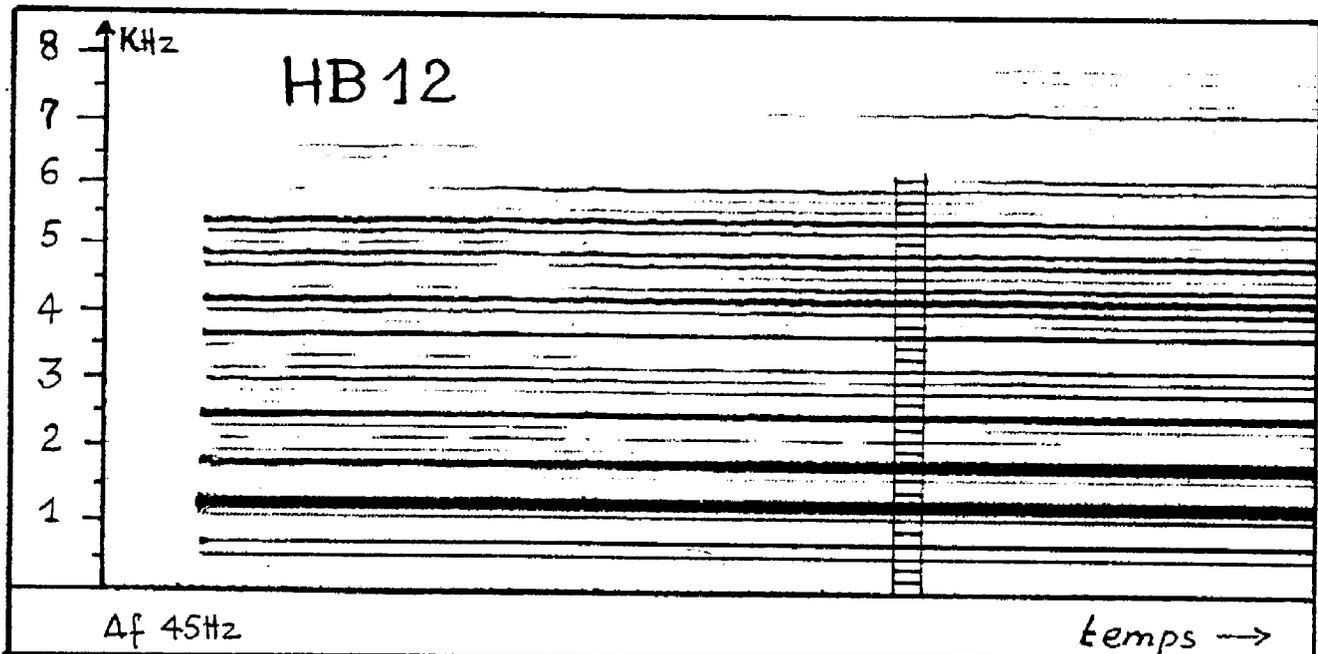
Les deux sons primaires, A et B se synchronisent sur le plus grand commun diviseur (PGCD), ici 170 Hz, qui sert "d'horloge des temps" au son multiphonique.

b) Analyse et synthèse à l'ordinateur

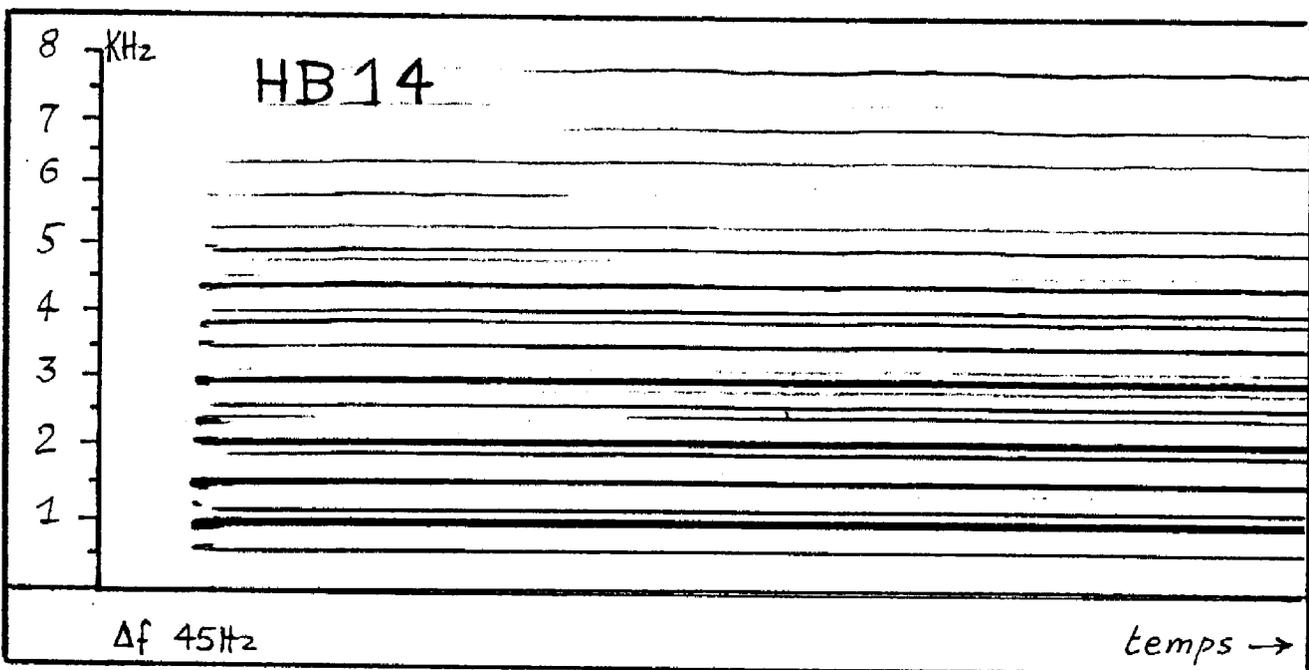
En prenant cette fréquence comme "fenêtre" d'analyse, nous avons pu utiliser les programmes existant (analyse F F T).

Le son ayant été converti numériquement, on utilise successivement les programmes PVCMP, DFSYN, MFSYN et CONVRT.

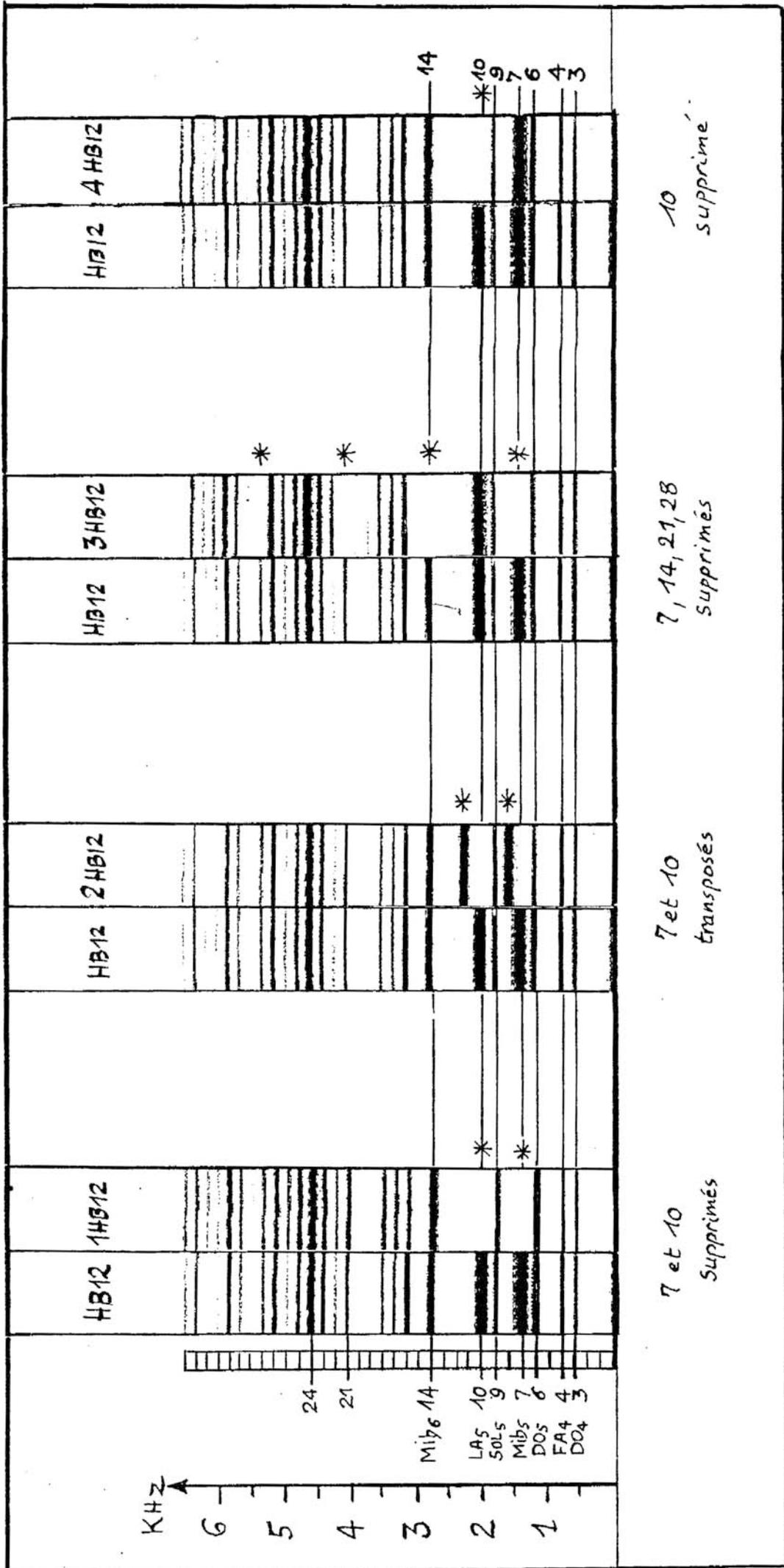
SONAGRAMMES DE SONS MULTIPHONIQUES DE HAUTBOIS



23



26



Les valeurs numériques de la fréquence et de l'amplitude au point 0,72 sec. sont publiées dans le tableau de la figure 24.

Le son synthétisé que l'on obtient finalement est une somme de fonctions de l'amplitude et du temps. On peut renouveler cette synthèse en modifiant les données :

- affecter 0 à l'amplitude d'un canal c'est supprimer la composante correspondante.
- multiplier la fréquence d'une composante par un facteur K c'est la transposer.

En essayant ces différentes possibilités, nous avons pu synthétiser 4 variantes de HB 12 :

- 1HB12 ; suppression des composantes 7 et 10.
- 2HB12 ; 7 et 10 sont transposés au ton supérieur.
- 3HB12 ; suppression des composantes 7, 14, 21, 28, 35.
- 4HB12 ; suppression de la composante 10.

On peut voir l'analyse de ces sons (Figure 25).

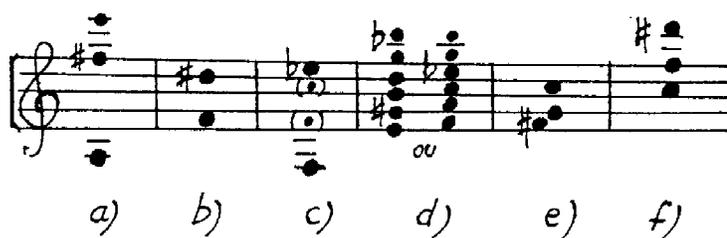
A l'écoute, les résultats ont été moins nets que ceux auxquels nous nous attendions ; on peut donner quelques raisons. Ce son ayant finalement une structure harmonique, il résiste bien au filtrage, et la suppression ponctuelle d'une ou deux composantes n'en affecte pas fondamentalement la perception. D'autre part, le fait qu'il soit dans une tessiture aiguë ne permet pas de bien identifier les composantes.

Toutefois, les modifications 2 (transposition) et 3 (suppression de tous les harmoniques de rang 7) sont assez convaincantes.

c) Tests auditifs et interprétation

- HB12 seul

Quelques personnes (compositeurs, interprètes) ont bien voulu se prêter à la notation des sons. Pour HB12, les résultats sont fort variés d'un individu à l'autre, voire déroutants, ... mais l'interprétation en est possible quand on possède l'analyse acoustique du son.



Le diapason, intermédiaire entre LA3 440 et LA3 466 Hz a gêné certains auditeurs.

- a) identifie la 7ème et note un demi ton plus haut.
- b) a perçu les sons 4 et 7 mais une octave trop bas.
- d) sensible à la structure harmonique du son, note deux agrégations de sons à un demi ton d'intervalle (diapason).
- e) identifie la 4te augmentée ; erreurs de notes et d'octave.
- f) seule notation correcte, à la bonne octave. Toutefois le son 10 (LA5) pourtant très intense n'est pas perçu, sans doute en raison de la tessiture (2000 Hz).

- Enchaînements de HB12 et de ses modifications.

On fait entendre par paires successives : le son original et le son modifié. Les résultats de deux auditeurs montrent que l'analyse auditive se porte préférentiellement sur la zone des fondamentaux musicaux, en gros, au-dessous de 1500 Hz. Quand un phénomène se passe au-dessus, ou il n'est pas perçu, ou il est reporté à l'octave inférieure.



On a demandé aux auditeurs de ne noter que le mouvement mélodique le plus frappant. On constate que le deuxième auditeur est plus porté à écouter dans l'aigu que le premier. La comparaison de ces résultats avec le montage de la figure 25 est très instructive, (voir en particulier 0 à 3 et 0 à 4).

2. Etude de HB 14

Au vu du sonagramme (Figures 26 et 27) HB14 peut sembler harmonique, mais en fait, aucun des intervalles visibles ne se rapporte au 0. C'est-à-dire que les spectres équidistants que l'on peut déceler (on en compte au moins 3) sont décalés par rapport à l'origine:

Les deux fréquences apparaissant au début de l'attaque : A = 912 Hz et B = 1 444 Hz donnent lieu à des sons de combinaison : A + B, A - B, 2B - A, etc... repérés figure 27.

Poursuivant l'analyse on trouve finalement un PGCD voisin de 76 Hz (Ré1 + 15s) dont les sons A et B sont respectivement les 12ème et 19ème harmoniques. Leur différence (7) donnant l'écart typique d'un des spectres équidistants.

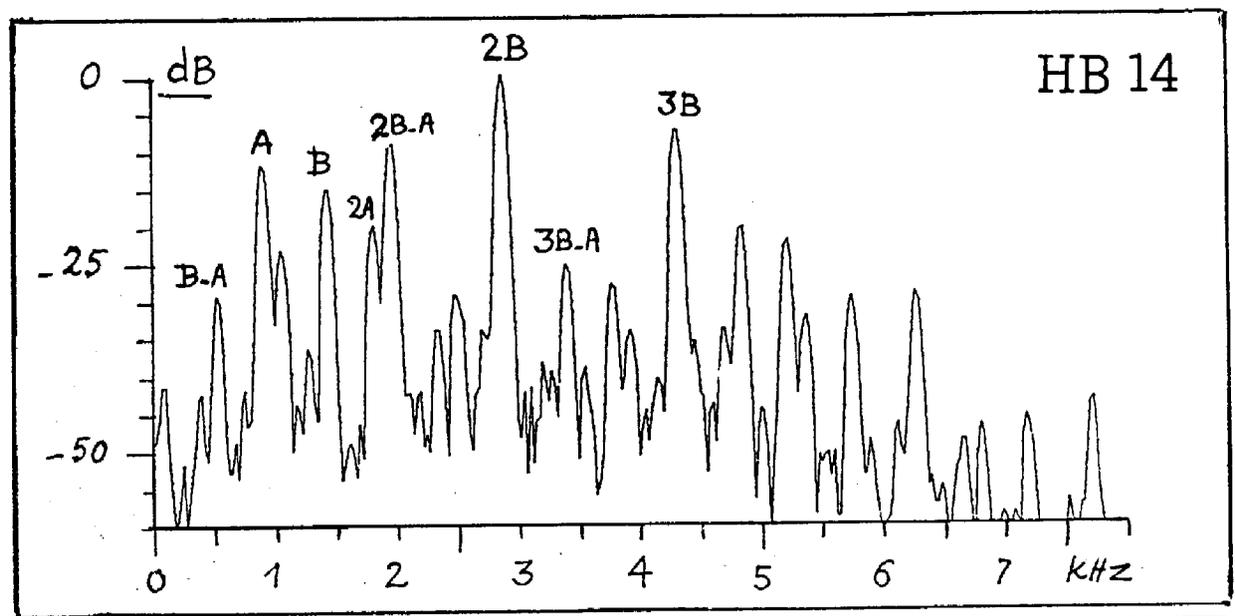
L'analyse en termes d'harmoniques d'un son grave facilite le repérage des sons de combinaison : on fait les opérations sur les numéros des harmoniques. Exemple : $2B - A = (2 \times 19) - 12 = 26$.

Figure 28, on peut lire l'amplitude relative des composantes entre 1 et 1,02 seconde. Les principales pointes du spectre sont identifiées comme combinaisons de A et B.

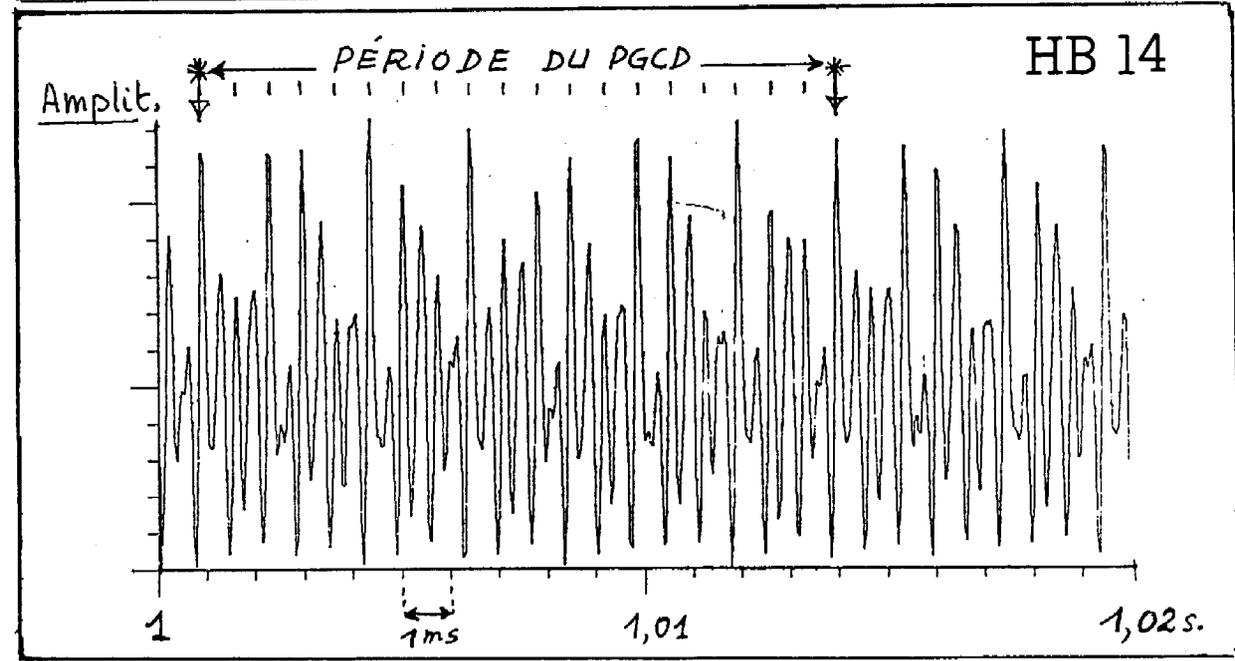
La Figure 29 montre la courbe amplitude/temps de l'onde sonore dans le même intervalle de temps. La période la plus apparente : 0,68 ms est celle de B. Elle divise très exactement en 19 parties celle du PGCD indiquée sur la Figure (13 ms). Les périodes de 2B et 3B apparaissent également.

Il semble bien que tous les sons multiphoniques stables produits par les instruments à vent puissent être analysés de cette manière, par la recherche d'un fondamental grave, présent ou non, dont la fréquence est le PGCD des sons primaires.

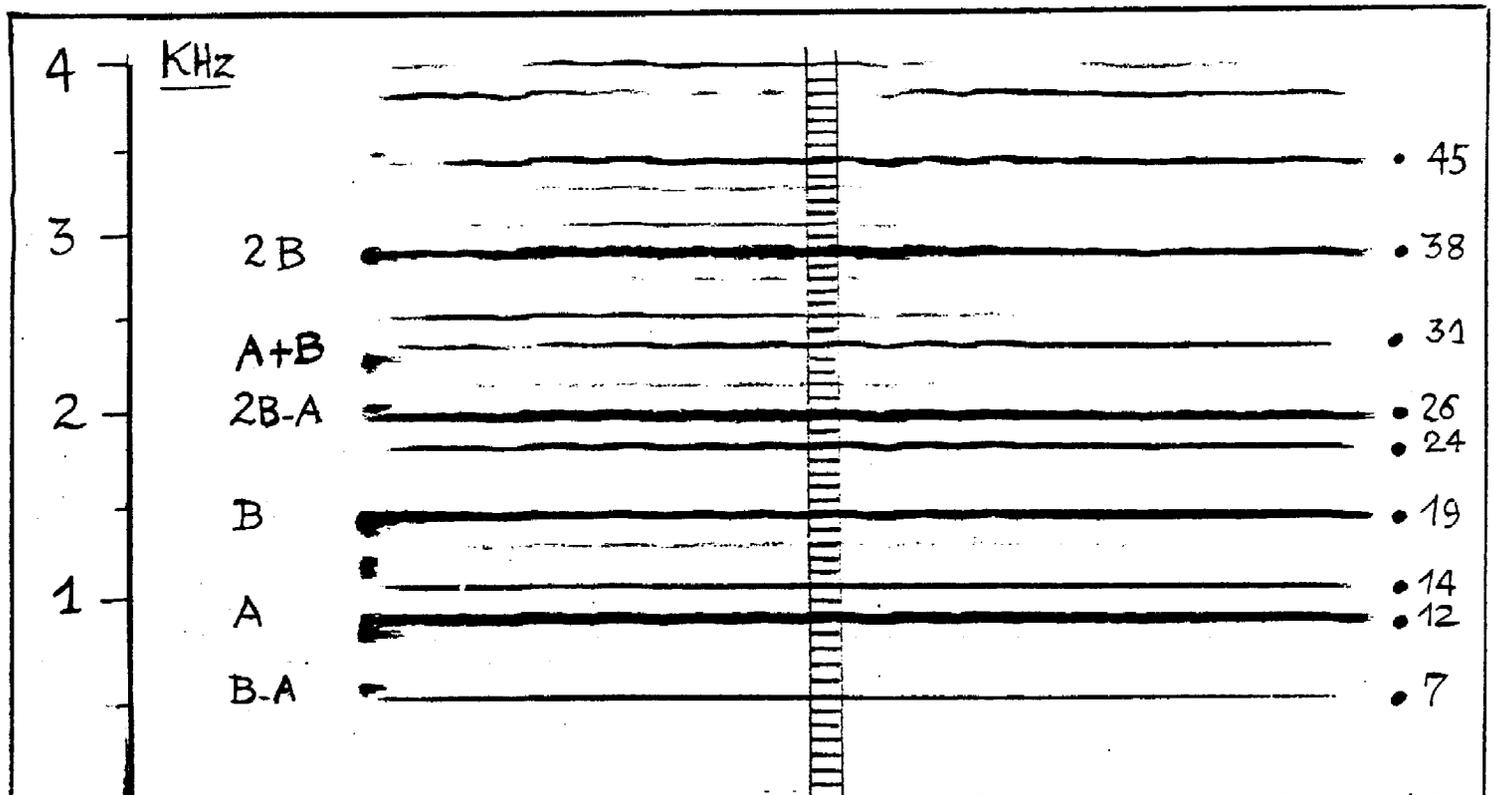
28



29

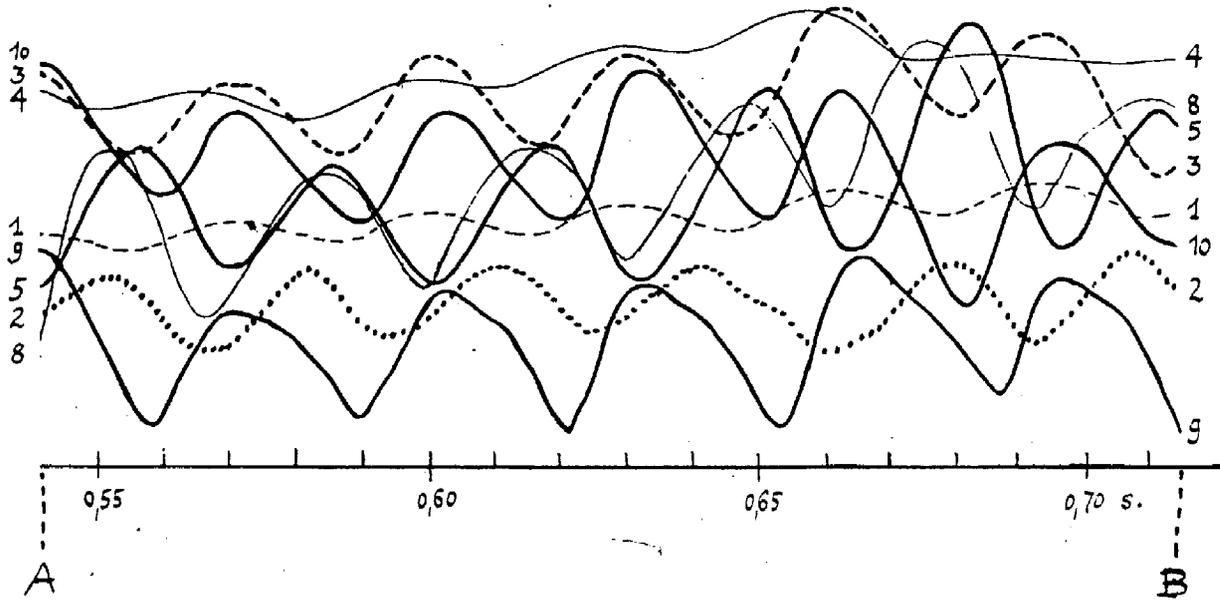


27



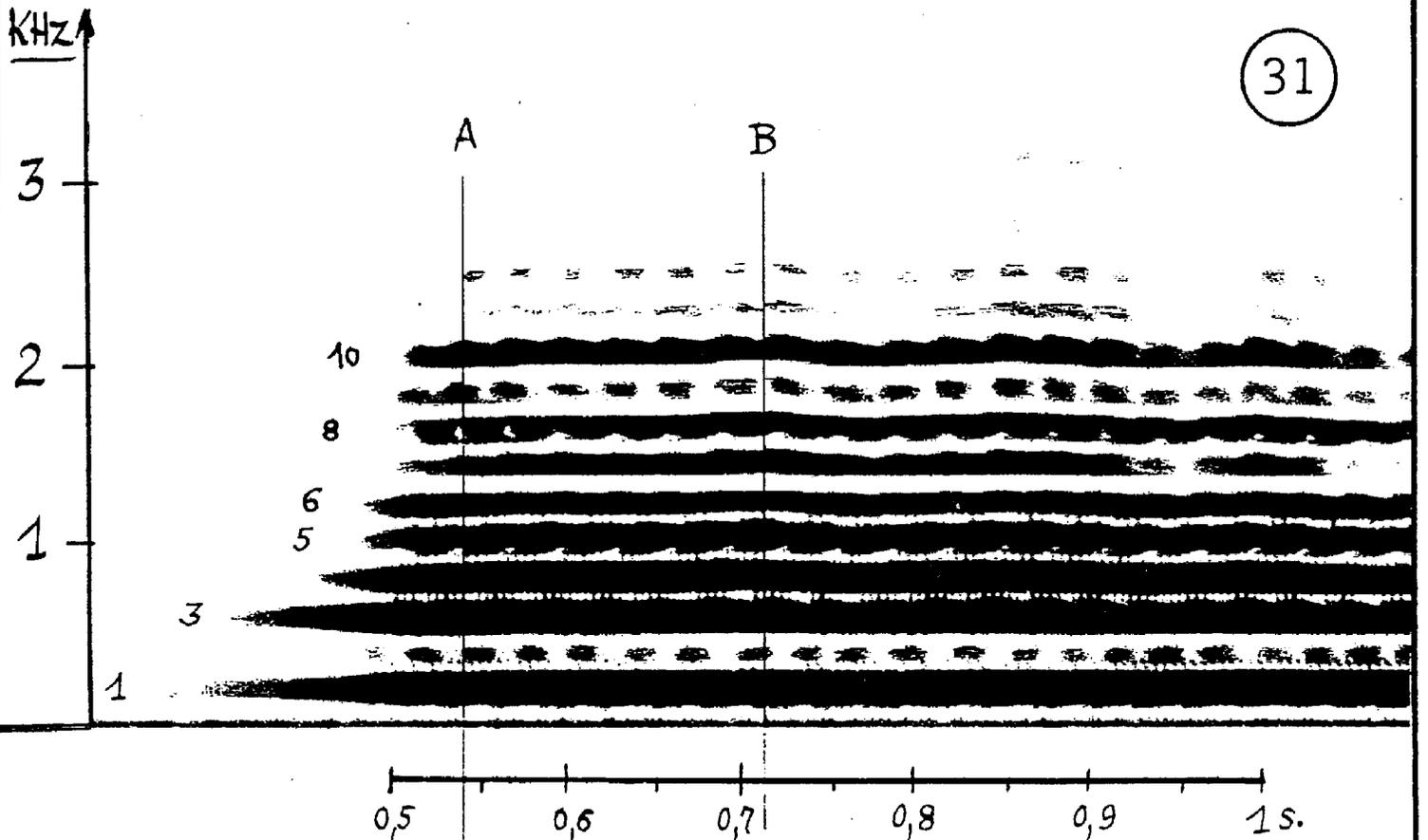
CLSOD2 o CLARINETTE BASSE : Amplitude des Composantes — no. Pars 80

30



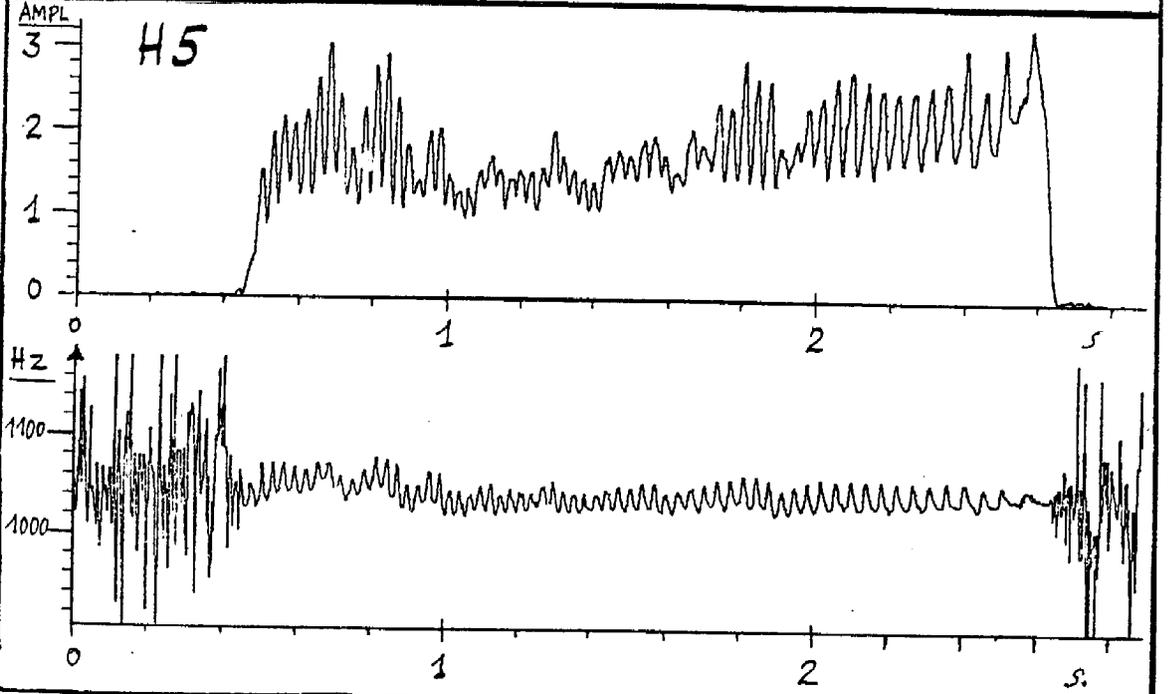
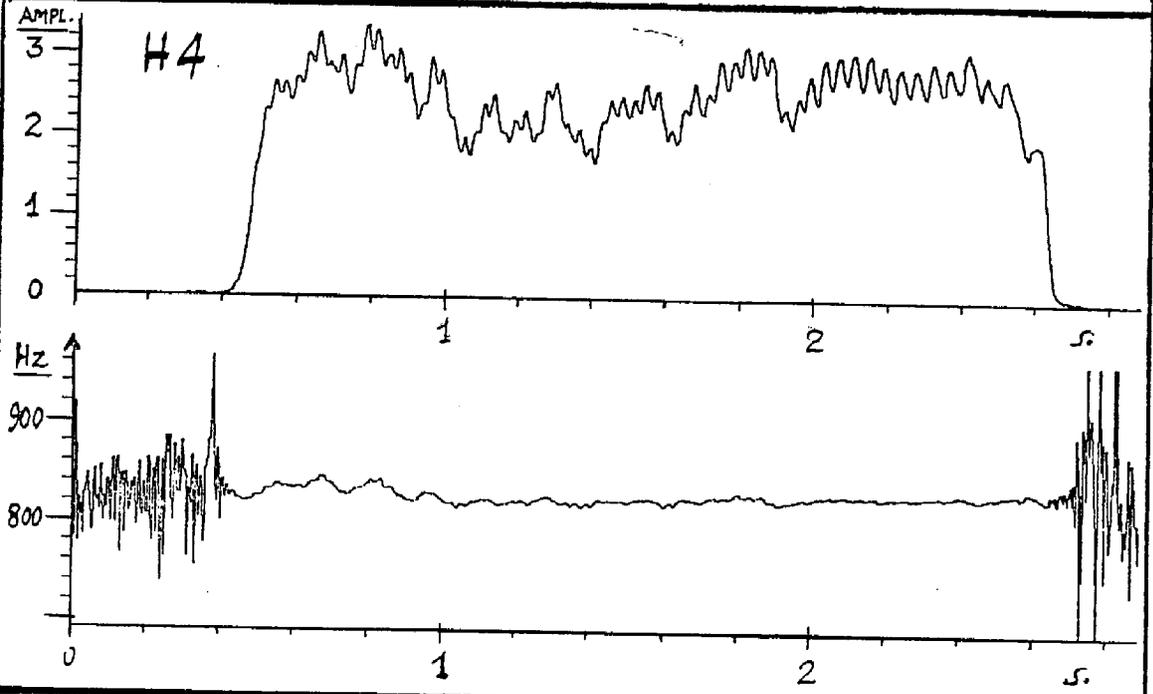
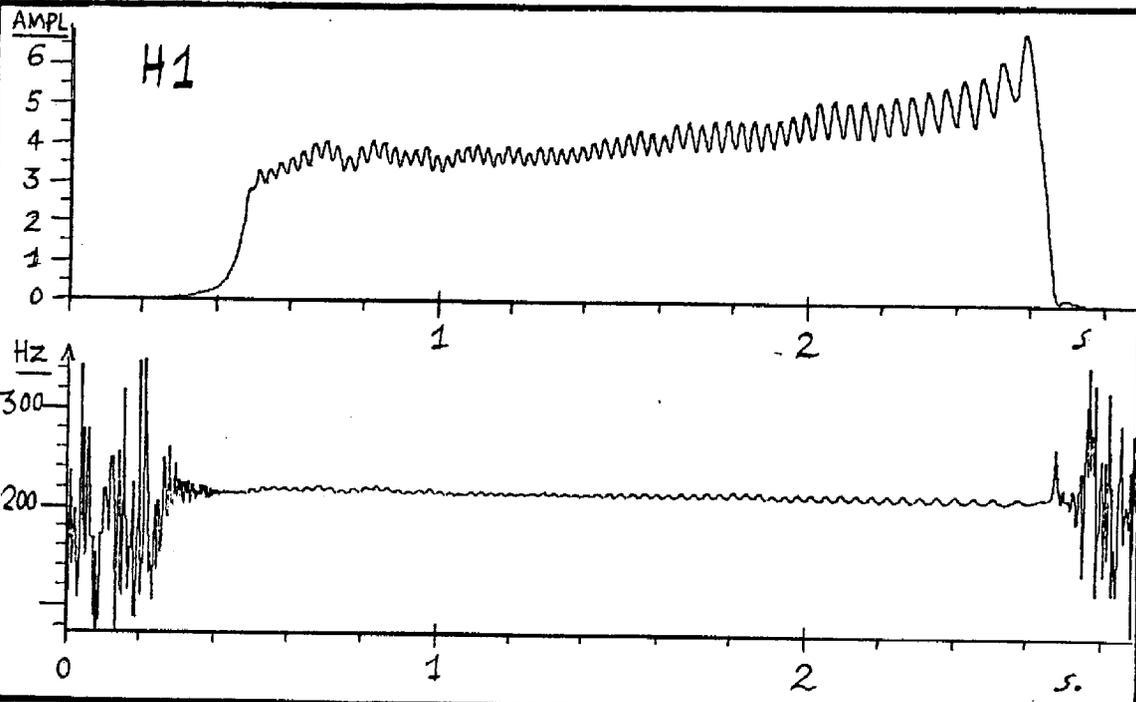
SONAGRAMME DU DEBUT DU SON CLSOD2 — [clarinette Basse]

31



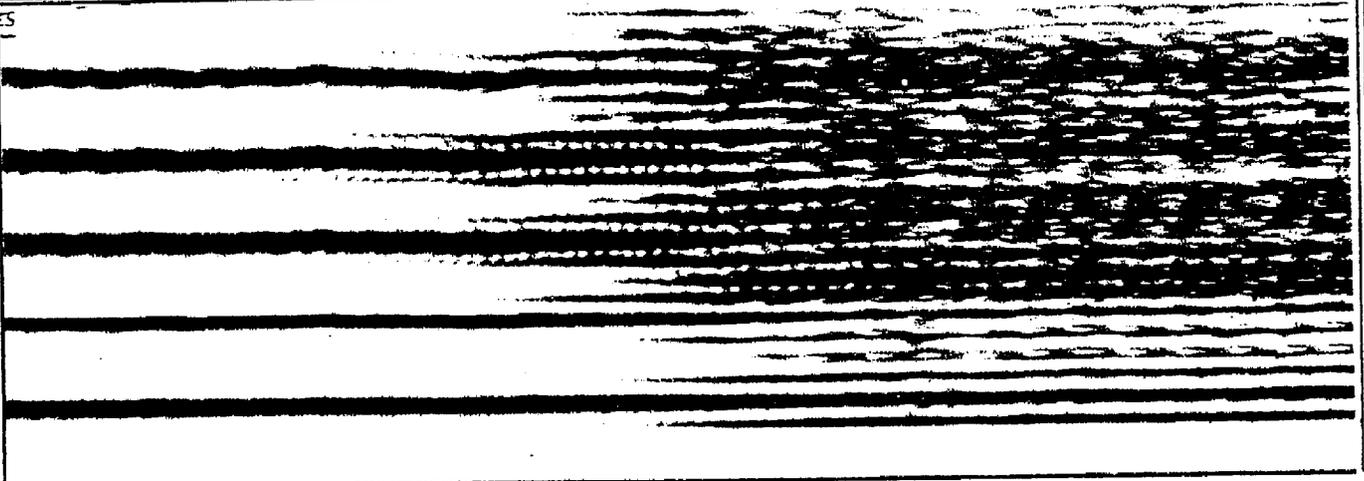
EVOLUTION DE LA FRÉQUENCE ET DE L'AMPLITUDE DE 3 COMPOSANTES DE CLSOD2

32



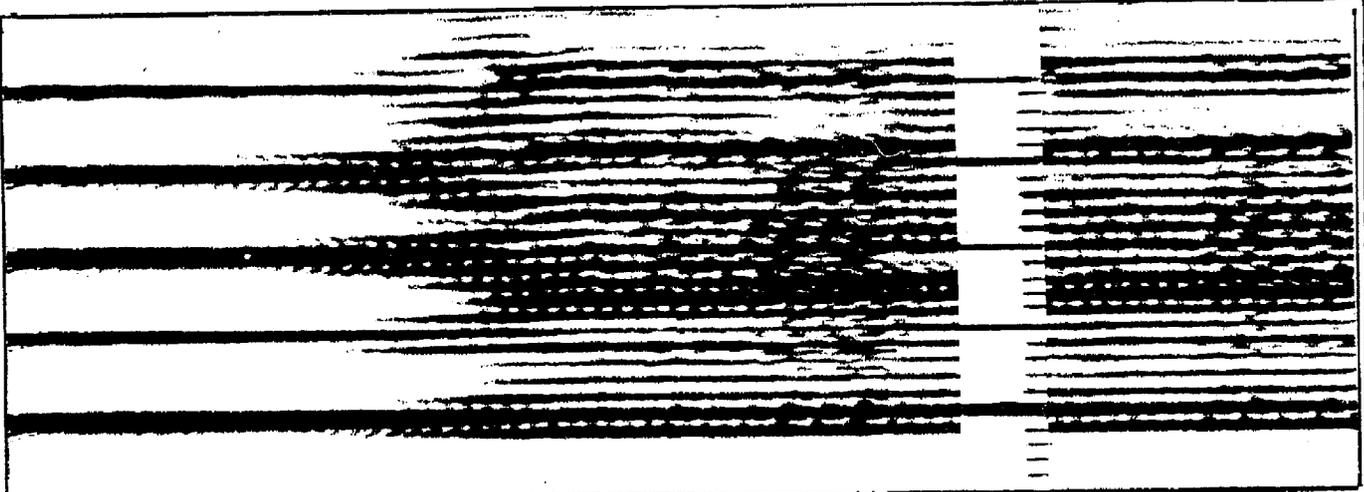
HARMONIQUES

H5
H4
H3
H2
H1



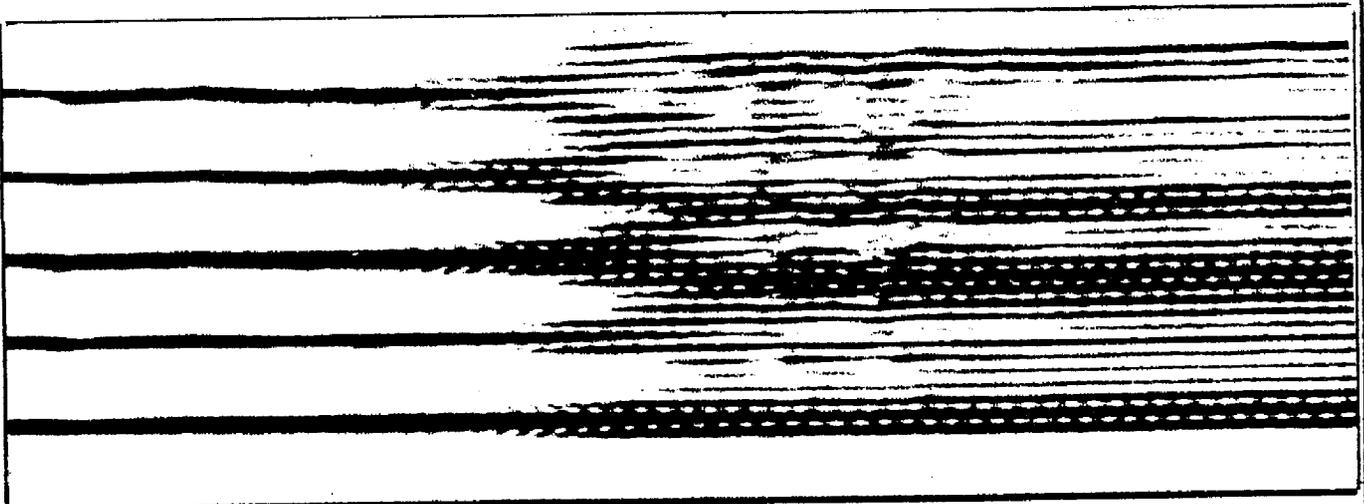
FA₂ 3^e partiel (f=174Hz)...TRANSITION MULTIPHONIE f' = f/4

H5
H4
H3
H2
H1



FA₂ 4^e partiel (f=174Hz) multiphonie , f' = f/5

H5
H4
H3
H2
H1



FA₂ 5^e partiel ... TRANSITION ... Emission multiphonique f' = f/6

TEMPS —>

Analyses au sonogramme de la transition du son normal au multiphonique

15. ANALYSE DE CLSOD2 : SON A ROULEMENT

Ce son de clarinette est un bel exemple de roulement.
 La note fondamentale est un sol \sharp_2 (210 Hz). On voit sur le sonagramme (Figure 31) que toutes les composantes sont affectées d'une modulation d'amplitude d'environ 30 Hz au début du son, ralentissant à 20 Hz vers la fin. Si la fréquence de modulation est la même pour toutes les composantes, les maxima d'amplitude ne sont pas synchrones. On a reporté (Figure 30) l'évolution détaillée de l'amplitude pendant 3/10^{ème} de seconde. Certaines composantes sont en phase : 1, 3, 9, 10 ; d'autres en opposition avec les précédentes : 5, ou décalées : 2,4.

La modulation d'amplitude peut s'accompagner d'une modulation de fréquence typique, en arceaux



dans un intervalle d'environ 1/4 de ton. Cette variation de fréquence, (Figure 32), très marquée pour les composantes 5, 6 et 8 est quelquefois en phase avec l'amplitude (6), mais le plus souvent en opposition de phase (1, 5, 8) ou décalée par rapport à la modulation d'amplitude.

On rencontre de nombreuses sortes de roulements dans l'analyse des sons multiphoniques. Nous nous proposons d'étudier ultérieurement l'incidence de la fréquence du roulement sur la perception, le rôle des variations de fréquence associées, et la capacité de discrimination des décalages en amplitude. Le présent travail nous a surtout permis de mettre au point les méthodes d'analyse.

16. SONS MULTIPHONIQUES AU TROMBONE

L'émission multiphonique aux instruments à embouchure n'est pas courante: très peu de musiciens la pratiquent. Dans le cas du trombone on va voir que c'est sur une sorte de roulement très stable et très reproductible. Prenons l'exemple du FA2 que l'on peut produire au trombone pour différentes positions de la coulisse :

Par exemple: FA2 partiel 3 de SIB₀

FA2 partiel 4 de FA₀

FA2 partiel 5 de RE \flat_0

Sur chaque FA2, on peut produire un son multiphonique distinct perçu, selon les individus comme une interruption rapide du son ou un intervalle musical. Pour faciliter l'analyse à l'oreille on peut transposer l'enregistrement à l'octave supérieure, les intervalles deviennent alors très clairs.

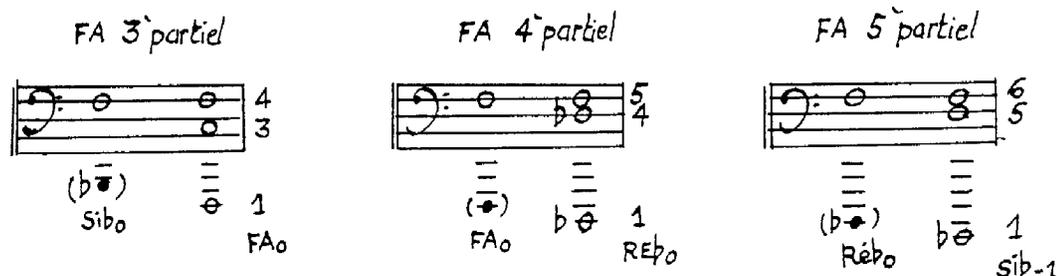


Figure 33.

Sur la Figure ci-dessus, on a noté successivement pour les 3 positions de la coulisse :

- le fondamental du tuyau sur lequel le partiel est émis,
 - l'intervalle multiphonique et le nouveau fondamental résultant.
- Les chiffres indiquent le rang harmonique des deux sons de l'intervalle.

Les intervalles produits sont toujours les mêmes pour un partiel de rang donné quelle que soit la note d'origine. Ainsi, pour Do₂ partiel 3, on aura l'intervalle DO₂ SOL₁, soit une quarte. La différence en Hertz entre les deux sons de l'intervalle est la fréquence du roulement. Sur le sonagramme, le phénomène apparaît de deux façons très différentes selon le mode opératoire comme on l'a vu plus haut (Figure 22).

Analysons la transition du son "normal" au multiphonique d'un FA₂ 3ème partiel.

- Filtre étroit, $f = 10$ Hz (Figure 34)

Quand on rentre dans le régime multiphonique, on voit apparaître des fréquences collatérales de part et d'autre des harmoniques du FA₂ ; leur nombre s'accroît jusqu'à diviser exactement l'intervalle entre deux harmoniques en 4 parties égales. On a donc affaire à un nouveau fondamental, situé deux octaves plus bas que le précédent ($f = 174 : 4 = 43,5$ Hz), et privé des deux premiers harmoniques. Les harmoniques 3 et 4 forment précisément l'intervalle de 4^{te} identifié plus haut. De la même façon, on peut analyser le passage au son multiphonique du FA 4ème partiel et du FA 5ème partiel (Figure 34, b et c).

- Filtre large, $f = 150$ Hz (Figure 35)

Lors de la transition vers l'émission multiphonique, on voit nettement une oscillation rapide de la fréquence des harmoniques, en dents de scie, qui se transforme très rapidement en une interruption synchrone de toutes les composantes à la fréquence de 43,5 Hz.

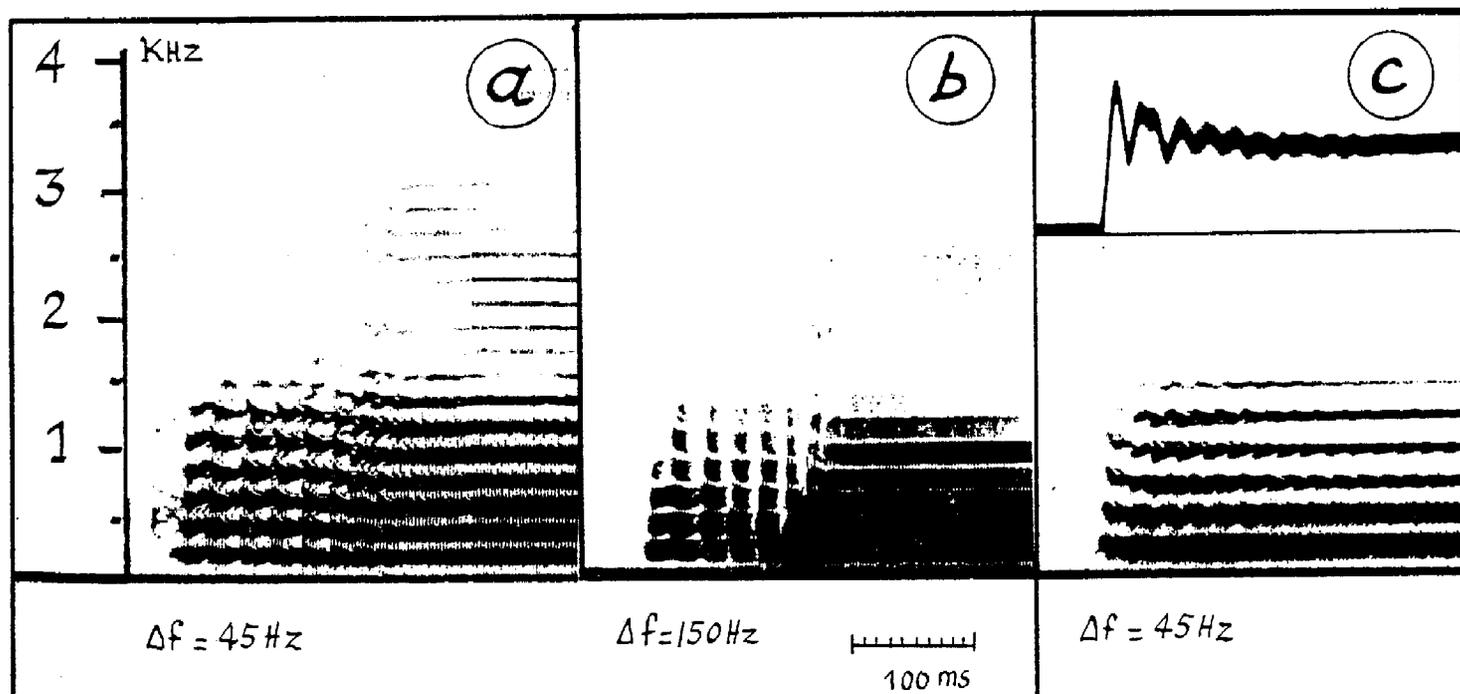
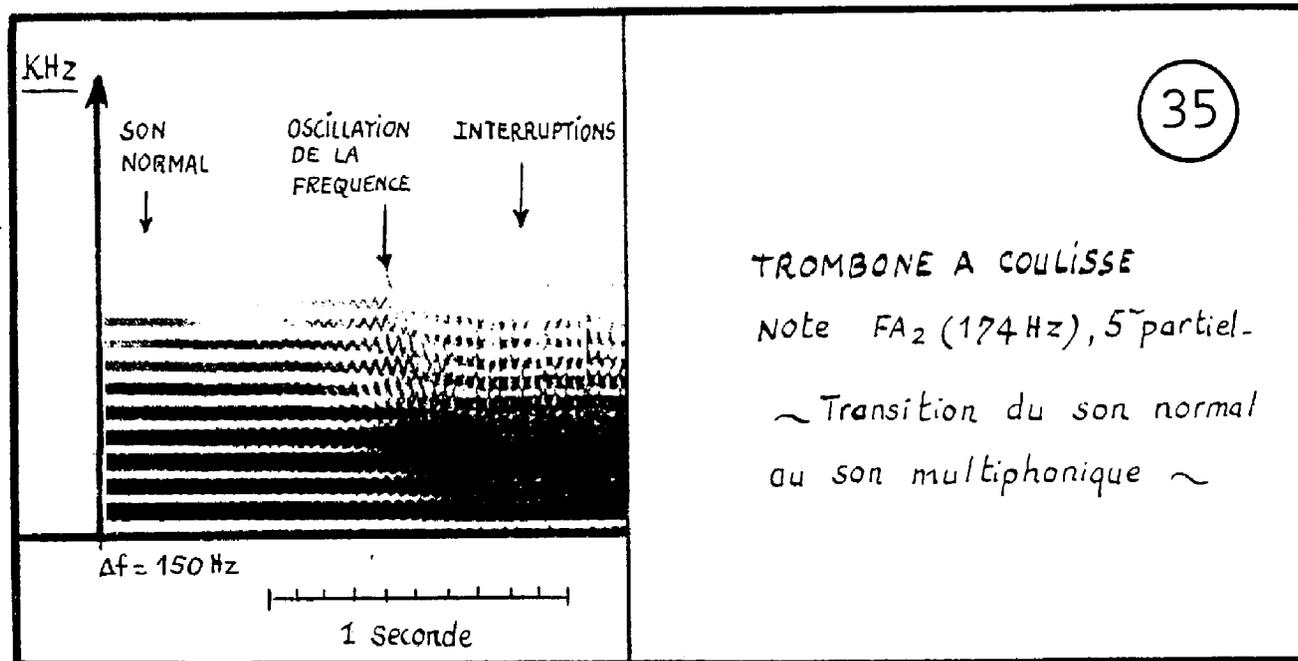
De même que l'image sonographique dépend du type de filtre utilisé, notre perception d'un roulement ou plutôt d'un intervalle musical dépendra de notre "constante de temps" auditive.

On peut rapprocher ces sonagrammes de ceux de "mauvaises" attaques, lorsqu'il n'y a pas concordance entre la fréquence d'excitation des lèvres et le partiel qui tendrait à s'établir pour une position de coulisse et une pression données. On observe les mêmes phénomènes : variation de fréquence et roulement. (Figure 36).

17. REMARQUES SUR LA NOTATION DES SONS MULTIPHONIQUES

La plupart des sons multiphoniques sont difficiles à noter à l'oreille ; Outre, les difficultés provenant de la tessiture, très aigüe ou très grave, et provoquant souvent des erreurs d'octave ou les instabilités dues aux roulements, on rencontre deux problèmes :

- a) Les sons multiphoniques sont le plus souvent "entre deux notes". Dus à l'interférence de régimes qui s'accommodent avec le déplacement de fréquence ils sont étrangers à l'échelle de l'instrument ; pourtant, il faut mettre un nom de note. L'émission est souvent critique et il n'est pas toujours possible de les ajuster.
- b) Les intervalles entre les sons d'un multiphonique stable sont ceux de la série harmonique ; ils sont distincts de ceux de la gamme tempérée qui nous sert de référence pour l'écoute et pour la notation des hauteurs. Prenons un exemple courant : les deux composantes principales sont comme les harmoniques 3 et 7 du fondamental supposé.



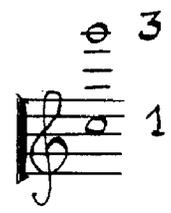
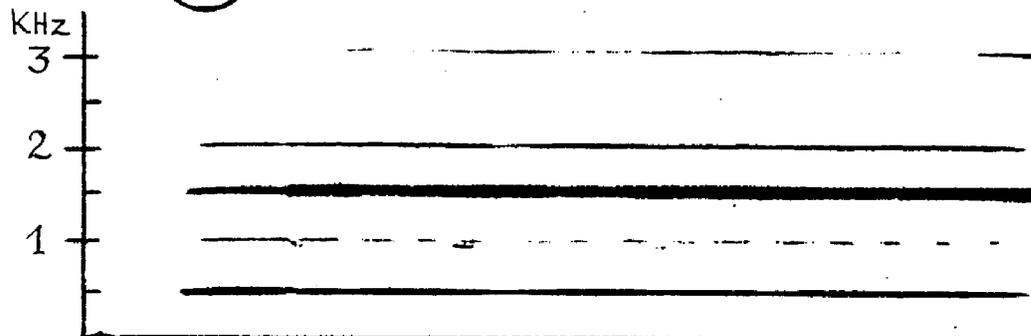
36

TROMBONE A COULISSE

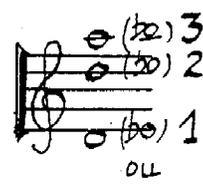
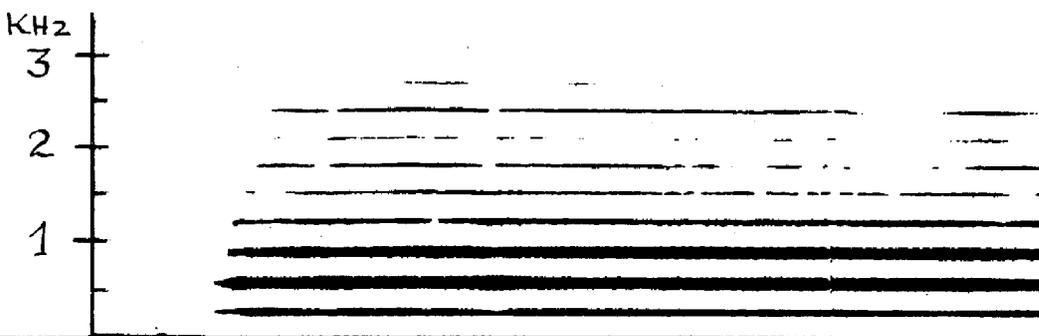
a et b : "mauvaise" attaque - Analyses avec 2 filtres différents : étroit (45 Hz) et large (150 Hz) ~ NOTE FA#₂ (185 Hz)

c : autre attaque ratée ~ NOTE sib₂ (240 Hz)

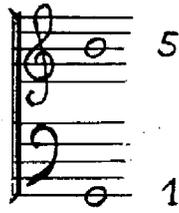
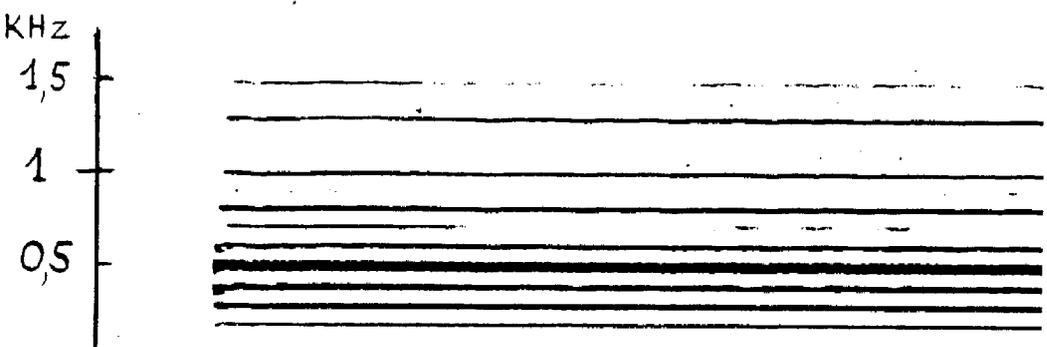
37 ~ MULTIPHONIKES HARMONIQUES ~



FL2

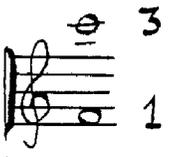
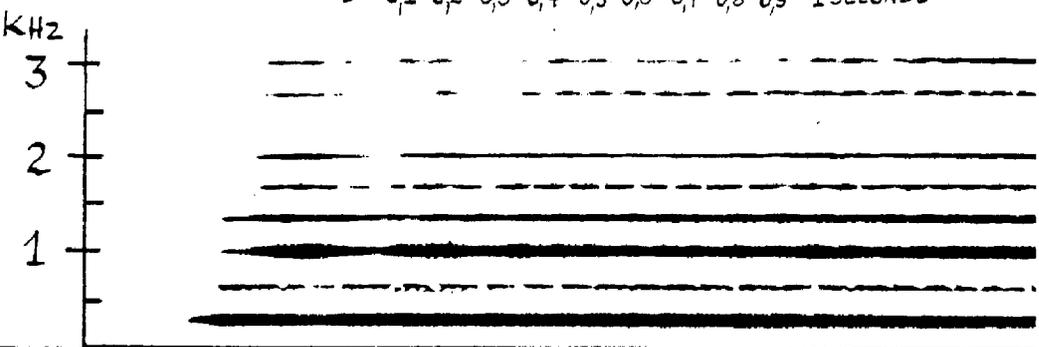


FL6



BAS5

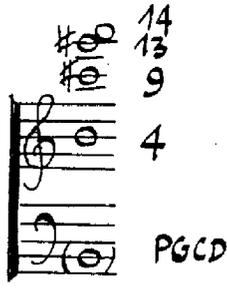
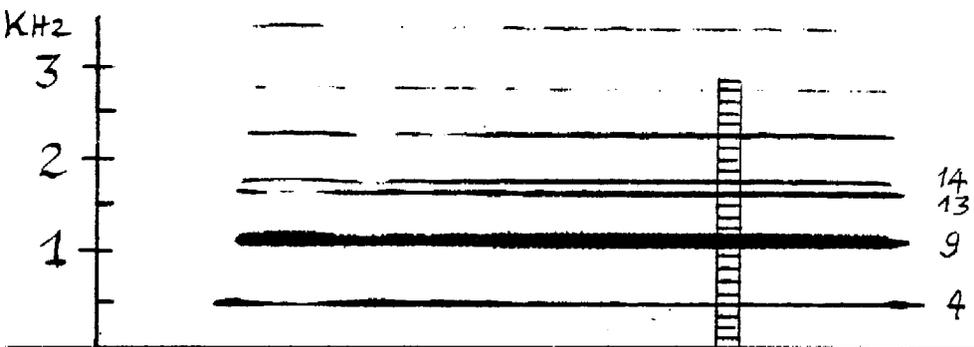
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1 SECONDE



FL4

roulement 13Hz

38 ~ SYNCHRONISATION SUR UN PGCD ~



FL1

Si₁ (126 Hz)

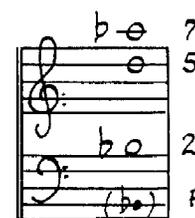
On a $\text{Log}_{10} 7/3 = 368$ savarts, soit une octave (300 savarts), plus un intervalle de 68 savarts, intermédiaire entre le ton tempéré (50 savarts) et la tierce mineure (75 savarts). Plus près de la 3^{ce}, il sera vraisemblablement perçu comme telle à moins que l'intensité ou les rapports de fréquence avec le son précédent n'agissent dans l'autre sens.

Les intervalles entre les sons de la série harmonique sont immuables. Dès lors qu'on s'y réfère, il est inutile de multiplier les signes spéciaux de corrections des notes que l'on voit dans les méthodes. Il suffit de noter le rang de la composante. De plus, cette notation rend plus cohérentes certaines dispositions hétéroclites :

Ainsi, au lieu de



On écrira



Fondamental de synchronisation

On sait que l'harmonique 5 donne une 3^{ce} majeure plus petite que la 3^{ce} tempérée, et que l'harmonique 7 donne une septième majeure petite.

Enfin, il pourra être précieux pour le compositeur de voir apparaître la structure harmonique du son : 2, 5, 7 ou 3, 7, 10 etc... De même, la connaissance du fondamental commun (PGCD), même s'il n'est pas perçu, pourra l'inciter à des combinaisons de hauteur ou de timbre nouvelles.

18. PLANCHES MONTRANT L'ANALYSE DE QUELQUES SONS MULTIPHONIQUES.

Nous avons réuni sur ces planches la plupart des sons choisis pour être analysés à l'ordinateur. Ils sont regroupés par catégories. Tous les genres se trouvent aux divers instruments, mais les sons stables sont plus fréquents au hautbois, à la flûte, et les roulements sont particulièrement nets au basson.

Les abréviations désignent : FL-flûte, BAS-basson, HB-hautbois, CLR-clarinette basse.

1) Sons multiphoniques harmoniques (Figure 37)

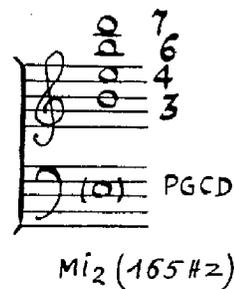
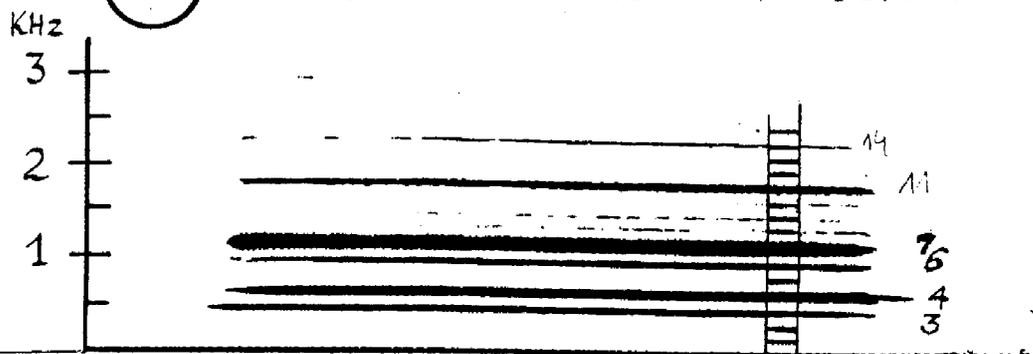
Les sons regroupés sous ce titre sont les plus simples. Le fondamental, toujours nettement audible, forme avec certains des harmoniques particulièrement intenses, des intervalles consonants au sens traditionnel (octave, quinte). L'émission est stable ou accompagnée d'un roulement assez peu marqué, n'entraînant pas de modulation de fréquence.

Il s'agit, le plus souvent d'octavation, de quintolement volontairement entretenus par une excitation appropriée.

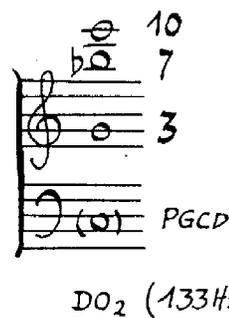
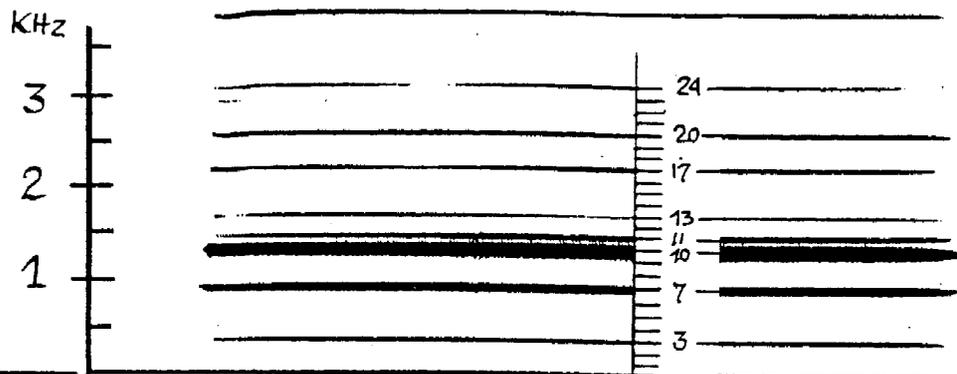
Dans tous les cas, le sonagramme montre, pour chaque son, un réseau harmonique unique et bien défini.

38

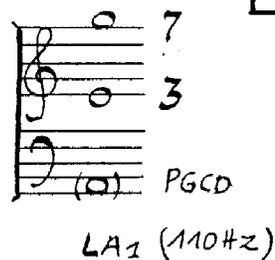
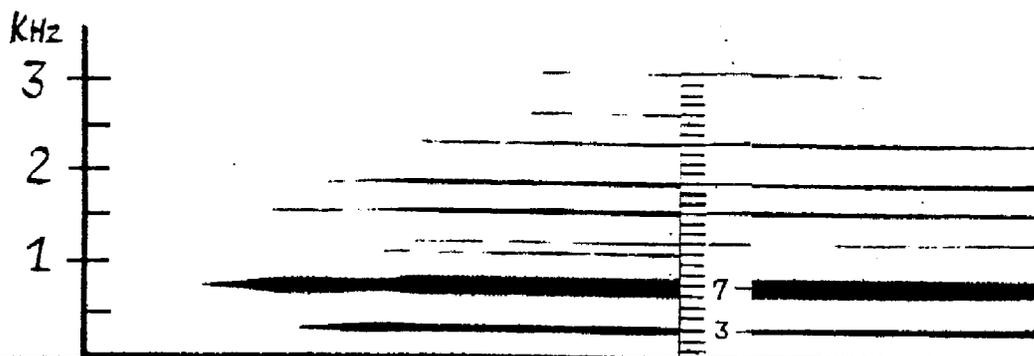
~ SYNCHRONISATION SUR UN PGCD ~



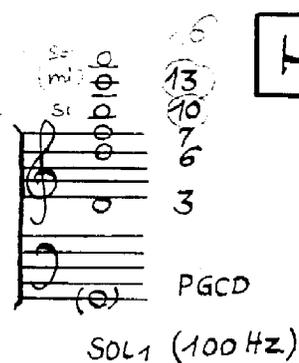
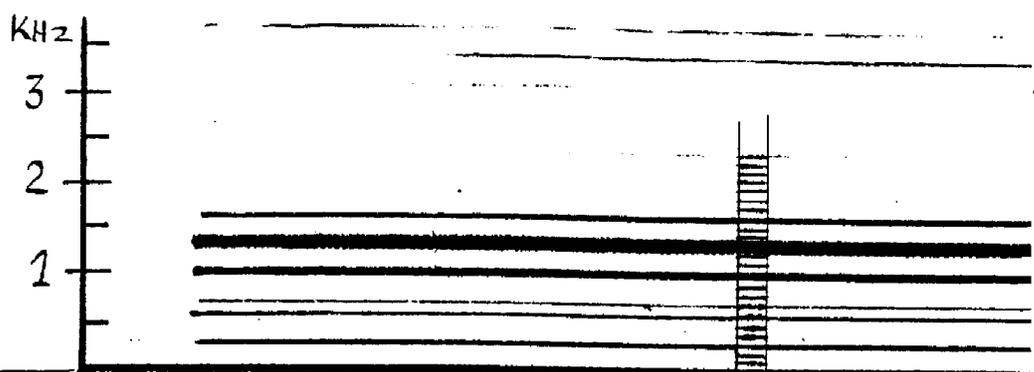
FL8



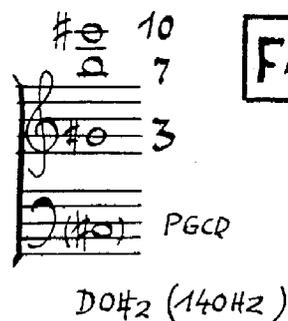
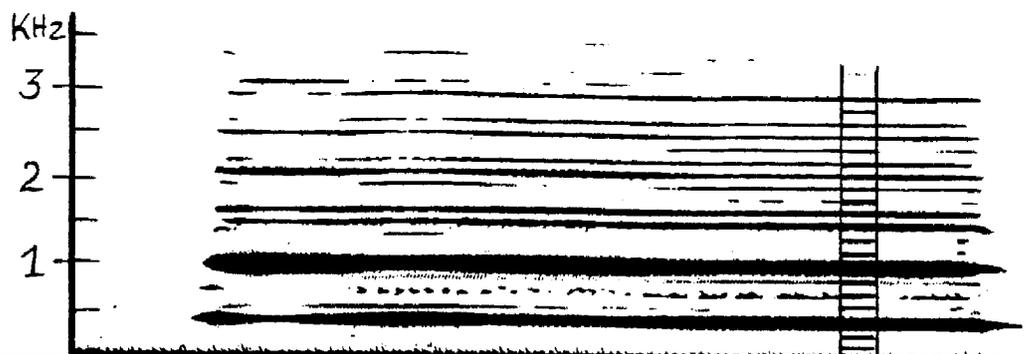
HB3



FL5

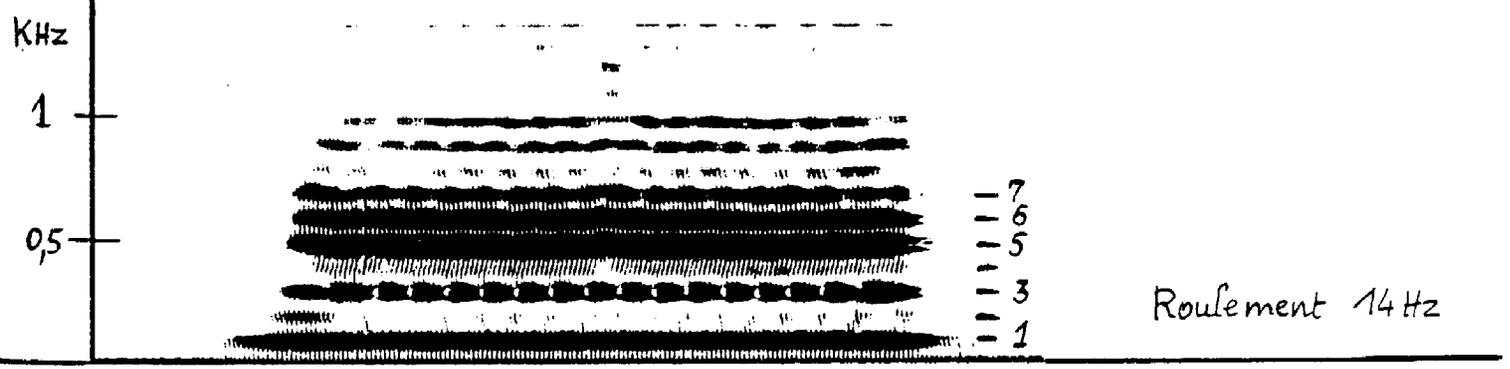
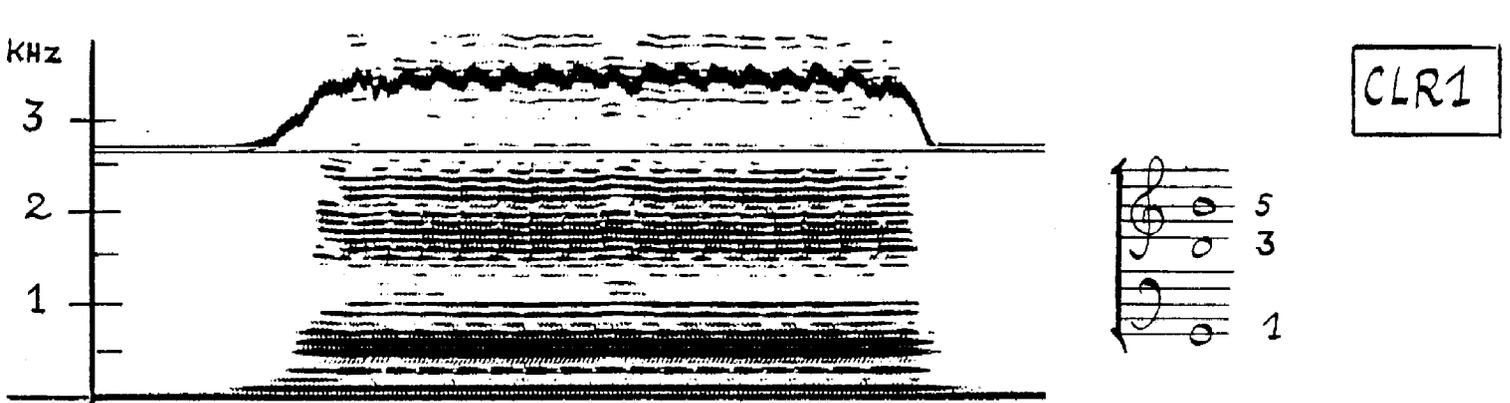
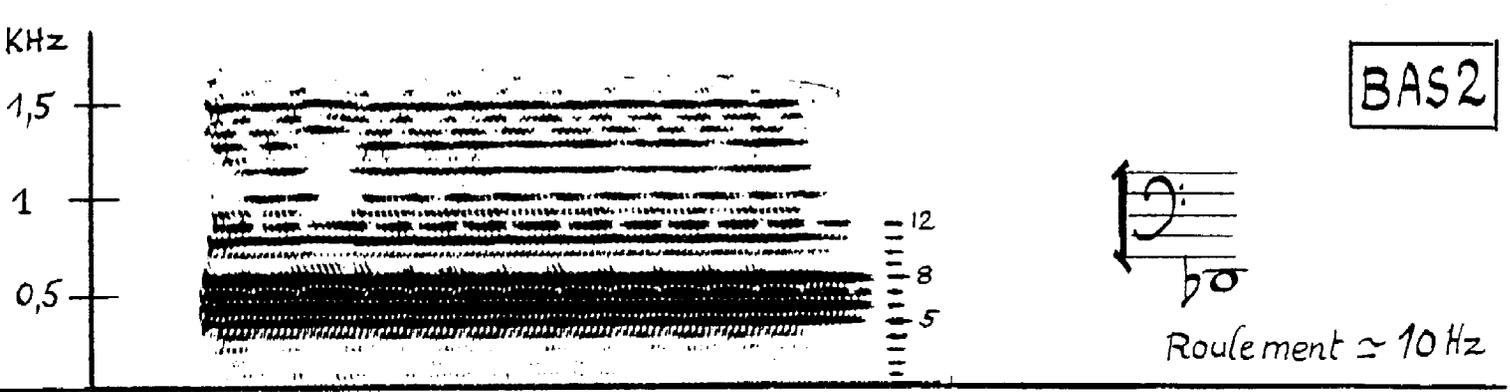
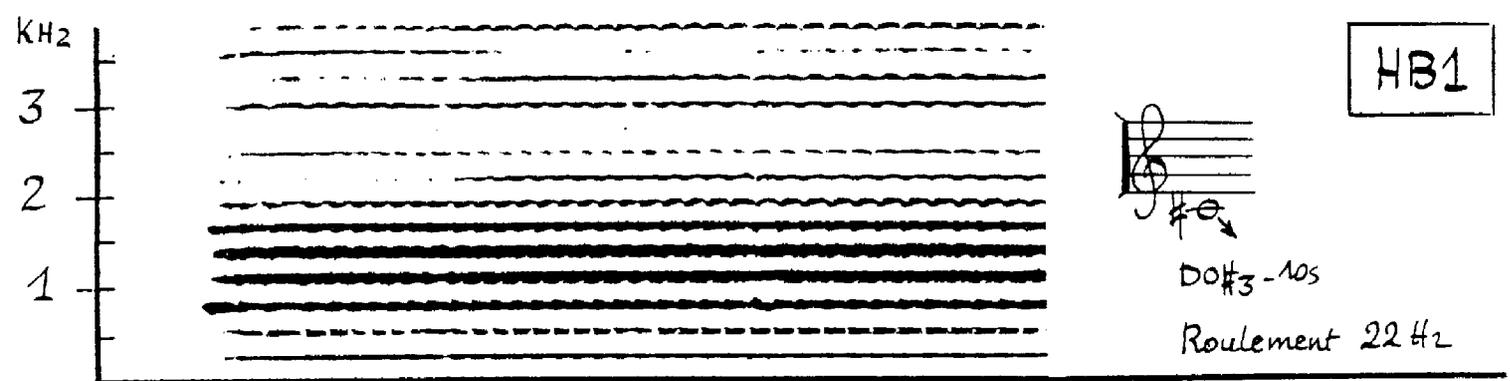


HB2



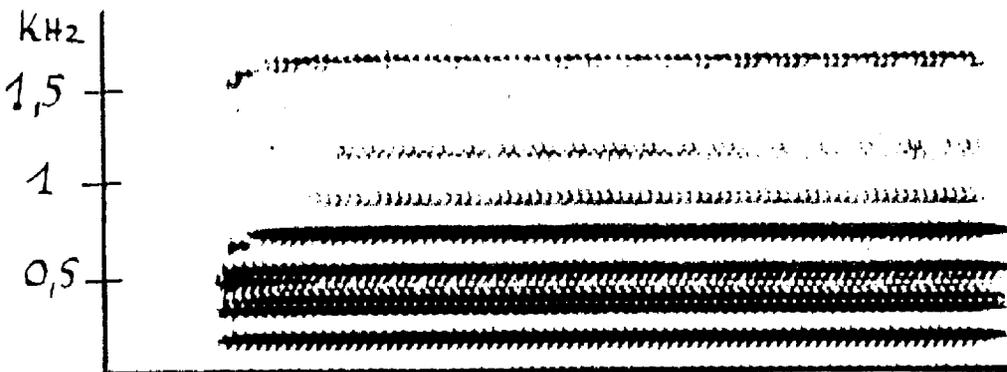
FL3

39 ~ Roulements simples ~



1 SECONDE

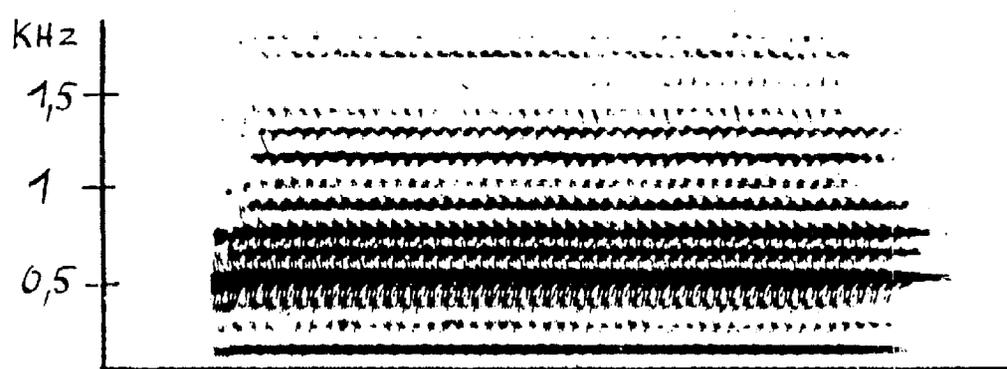
40 ~ Roulements complexes ~



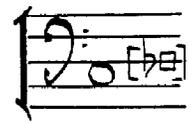
BAS1



Roulement 50 Hz

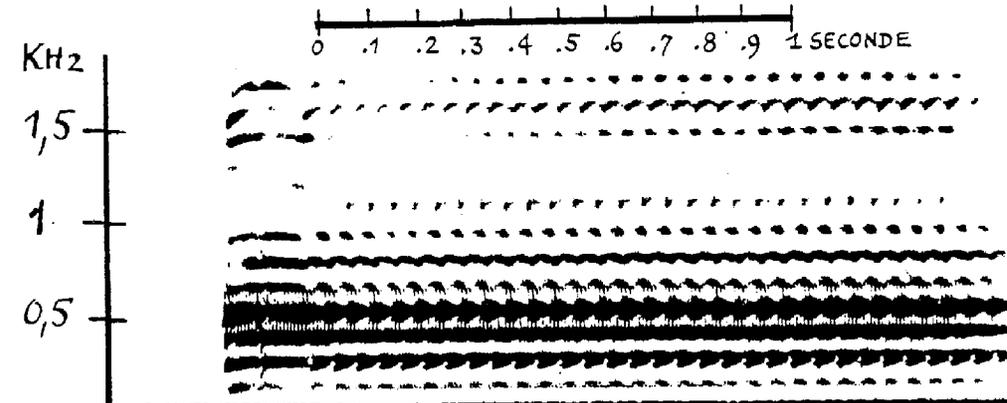


BAS3



Si₁+12s.

Roulement 34 Hz

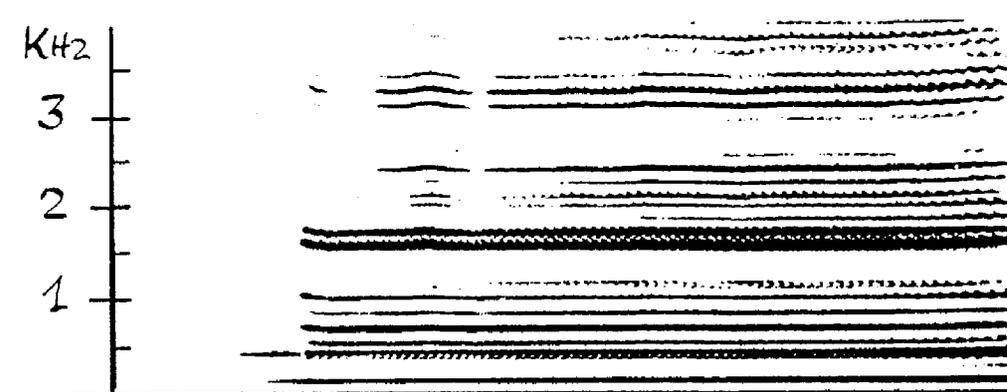


BAS4



DO₂-10s.

Roulement 21 Hz

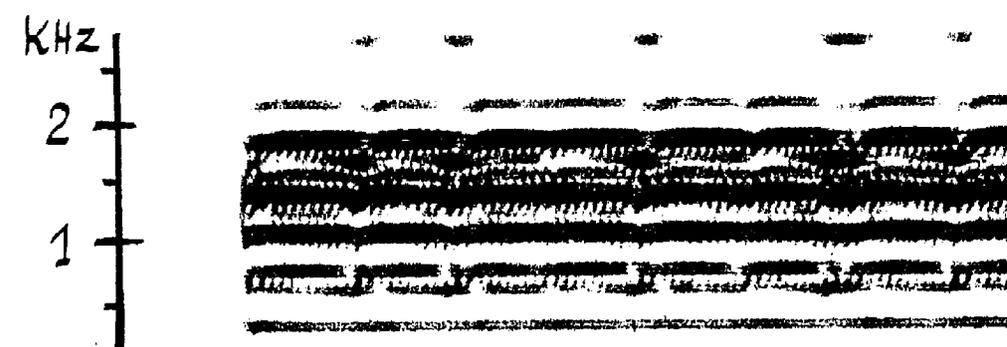


CLR3



attaque

Roulement 50 Hz



HBX



← oscillation

Très instable

100 ms [pour HBX seulement]

2) Sons stables admettant un son fondamental de synchronisation dont la fréquence est le PGCD des composantes principales (Figure 38)

Remarque : il faut prendre "stable" dans un sens instrumental : émission franche et entretien facile (on observe quelquefois des traces d'instabilité sur le sonogramme).

L'aspect visuel est celui de sons inharmoniques, mais on peut trouver un module commun figuré ici sous forme d'une échelle verticale, de sorte que toutes les composantes sont comme les harmoniques plus ou moins éloignés d'un son grave. Celui-ci n'est ordinairement pas perçu mais permet de comprendre la structure du son : il est noté entre parenthèses.

Exemple : FL1, FL8, HB3, FL5, HB2, FL3.

3) Roulements de sons simples (en rapport d'octave ou de quinte (Figure 39))

Lorsque les régimes en présence ne peuvent pas s'accommoder l'un sur l'autre, ils s'établissent tour à tour selon une alternance dont la fréquence est celle du roulement perçu.

Dans le cas où les régimes ont des rapports de fréquence voisins de ceux de l'octave ou de la quinte, la hauteur perçue, unique, est celle du régime 1. Le roulement produit alors une incidence sur le timbre qualifié de rugueux, granuleux... selon la vitesse du roulement. HB1, BAS2, CLR1 (roulement de quinte) appartiennent à cette classe.

Pour tous ces sons, la hauteur perçue se conserve à travers les transpositions au magnétophone.

4) Roulements de sons complexes (Figure 40)

Il s'agit ici de sons multiphoniques fort difficile à analyser, aussi bien à l'oreille qu'avec des appareils dont nous disposons. Les régimes en présence, quelconques, peuvent être perçus isolément ; souvent ils appartiennent à deux séries harmoniques voisines d'un ton ou d'un demi-ton. Aux sons différentiels qu'ils produisent, se combine la fréquence de roulement. Dans certains cas (BASI) celle-ci peut-être le PGCD d'une des séries.

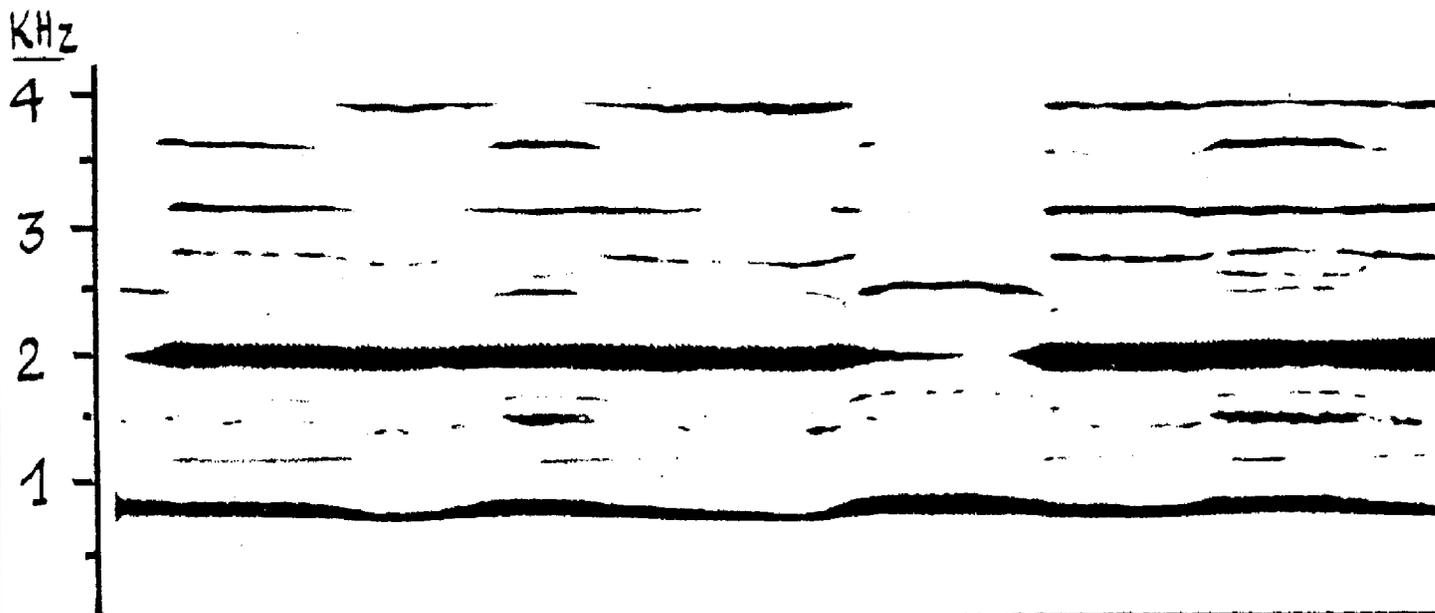
La ou les hauteurs perçues changent avec la transposition et diffèrent grandement selon les auditeurs.

19. CHAMPS DE LIBERTE DES SONS MULTIPHONIQUES

La flûte, la clarinette, le hautbois, le basson, le trombone sont des instruments où le musicien contrôle directement les paramètres de l'excitation. On peut, pour chaque doigté, définir un champ des variables de la hauteur, du timbre, de l'intensité, lesquels d'ailleurs, ne sont pas indépendants les uns des autres.

On sait, par exemple, que sur la flûte traversière, les variations dépendent principalement du degré de couverture de l'embouchure, de la pression de l'air dans la bouche, de l'ouverture des lèvres, et de l'orientation du jet.

CHAMP DE LIBERTÉ D'UN SON MULTIPHONIQUE DE FLÛTE (FL3)



(41) - flûte traversière { $\begin{matrix} 1234 \\ 235 \end{matrix}$

On devra, de même, explorer les possibilités de variations fréquentielles, dynamiques et de timbre lors de l'émission multiphonique.

La figure 41 montre un exemple qui illustre bien la complexité de ce mode d'émission. En découvrant plus ou moins l'embouchure, une des deux composantes du son reste fixe, l'autre varie d'environ un demi-ton. On réalise ainsi la modulation de hauteur suivante :



associée à une variation notable de timbre.

20. CONCLUSIONS

Nos connaissances en acoustique musicale reposent principalement sur l'étude des phénomènes périodiques largement utilisés en musique et pour lesquels les notions de fréquence, d'intensité et de timbre commencent à être bien connues. Les sons multiphoniques jettent le trouble dans ce corpus, ils ne rentrent pas dans nos catégories. Plus précisément, certains phénomènes comme l'irritante question des roulements nous amènent à poser des questions de fond :

- Comment se produit l'entretien d'un tuyau lors de la production de régimes non harmoniques émis alternativement à une cadence rapide de sorte que le résultat semble stable, voire "périodique" ?
- Quelle est la perception des roulements selon leur rapidité, leur déphasage, le contenu harmonique du son, la tessiture, et les variations de fréquence qui y sont généralement associées ?

Si l'emploi d'outils comme le sonographe, les filtres, l'ordinateur complète heureusement l'analyse à l'oreille, il ne la remplace pas car l'interprétation des résultats physiques en fonction des données de la perception nous fait encore largement défaut dans bien des cas.

Toutefois les résultats des analyses nous ont permis d'arbitrer des divergences, d'expliquer à plusieurs musiciens en présence comment et pourquoi leur perception individuelle pouvait différer.

Nous avons montré que l'émission multiphonique participait du fonctionnement normal des instruments à vents et quelles conditions étaient nécessaires pour favoriser son établissement et son entretien.

Dans la réalité, deux cas se présentent :

- Soit l'entretien des régimes distincts est stable et produit un son périodique donnant lieu à une sensation multiphonique plus ou moins complexe selon les intensités relatives des composantes et leur situation en fréquence,
- Soit l'entretien est instable et constitué par l'alternance de plusieurs régimes inharmoniques. Cette alternance peut elle-même être stable (roulements périodiques) ou instable, irrégulière.

Nous proposons donc quatre catégories de sons multiphoniques auxquelles il semble que l'or puisse rattacher la plupart des sons, quel que soit l'instrument qui le produit, en précisant que plus l'instrument a d'harmoniques (basson, hautbois), plus les phénomènes sont compliqués.

- a) Les sons multiphoniques harmoniques qui n'offrent aucun problème d'analyse. Les intervalles produits sont identifiés sans ambiguïté. BAYR les mentionne déjà dans sa méthode de flûte en 1825.
- b) Les sons multiphoniques stables pour lesquels on peut trouver un PGCD.
Ils offrent plus de difficultés à la notation du fait de la non concordance entre certains intervalles de la série harmonique et ceux de la gamme tempérée à laquelle on se réfère plus ou moins implicitement dès qu'on utilise les noms des notes. Nous avons proposé d'utiliser les chiffres de la série harmonique, ce qui permettrait, en outre, des rapprochements entre sons ayant la même composition harmonique. Nous avons montré également que les erreurs d'octave à la notation provenaient souvent d'un repliement de sons perçus dans la zone sensible de l'oreille ramenés dans la zone des fondamentaux musicaux.
- c) Les roulements simples ; ils posent le problème des relations entre hauteur, timbre et tessiture. Dans certains cas (sons graves ou roulements rapides) la dominante perceptive oscille entre hauteur ou timbre selon les individus (constante de temps personnelle).
- d) Les roulements complexes qui demanderaient une étude plus approfondie. C'est de loin le cas le plus compliqué à traiter, tant pour en expliquer le fonctionnement physique que pour relier les sons entendus à une notation acceptable. Il est d'ailleurs illusoire de vouloir chercher là une trop grande précision dans la notation et ceci pour plusieurs raisons :
 - Les instruments à vent possédant un champ de liberté réglable par le musicien, le son correspondant à un doigté multiphonique donné est souvent variable en hauteur et en timbre.
 - Le contexte musical peut modifier du tout au tout la perception des sons inharmoniques.
 - La variabilité perceptive des roulements est grande selon les individus, selon la tessiture, la fréquence de roulement, l'intensité des composantes...

Pour déboucher sur la pratique musicale, il nous a manqué d'avoir pu faire un travail suivi avec des musiciens possédant bien le répertoire des sons multiphoniques de leur instrument, et avec des compositeurs.

Nous pensons, toutefois, que ces catégories issues de l'analyse physique sont en bon accord avec celles des musiciens et que cette recherche préalable permet d'envisager un travail approfondi sur de bonnes bases.

Enfin, cette étude nous a convaincus de l'intérêt fondamental de la synthèse sous ses deux formes :

- transformation de sons "réels" avec suppression ou transpositions de composantes choisies ;
 - création de sons imaginaires pour tester des hypothèses perceptives.
- Nous commençons seulement à utiliser cette technique pour l'étude des modulations de fréquence, d'intensité, afin de mieux comprendre les phénomènes baptisés "roulements". Ce sera, nous l'espérons, l'objet d'un autre travail.

BIBLIOGRAPHIE

=====

- BACKUS J. - Multiphonic Tones in the Woodwind Instruments.
JASA 63 (2), février 1978
- BARTOLOZZI B. - New Sounds for Woodwind Instruments.
Oxford University Press, Londres 1967
- BOUASSE H. - 1. Tuyaux et Résonateurs.
Delagrave, Paris 1929
2. Instruments à vent. Deux Tomes
Delagrave, Paris 1929 et 1930
TI § 111, § 96
TII § 16
- CASTELLENGO M. - 1. Les cloches
Bulletin GAM N°18, Paris 1966
2. La musique du théâtre Nô (Collab. A. TAMBA)
Bulletin GAM n°39, Paris 1969
3. Sons multiples non harmoniques sur les tuyaux à bouche.
Bulletin GAM n° 74, Paris 1974
4. Contribution à l'étude expérimentale des tuyaux à bouche.
Thèse Université Paris 6, Paris 1976.
- CAUSSÉ R. et
ASSELINÉAU M. - Etude de multiphoniques particuliers à la clarinette et à
la flûte à bec.
Compte-rendu de stage. IRCAM, Paris 1979.
- KERGOMARD J. - Le Basson, Histoire, acoustique.
Bulletin GAM N°82-83, Paris 1975.
- LEIPP E. - Les sons nouveaux avec instruments de musique mécaniques.
GAM N°74, Paris 1974.
- MEYLAN R. - La flûte
Payot ed., Lausanne 1974

METHODES INSTRUMENTALES

- ARTAUD P.Y. et
GEAY G. - Flûtes au présent (Livre + 1 disque)
Jobert, Paris 1980
- DICK R. - The other flute, (Livre + 1 disque)
Oxford University Press, Londres 1975

Abréviations : GAM : Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale du Laboratoire
d'Acoustique de l'Université Paris VI
JASA : Journal of Acoustical Society of America