

IRCAM
Centre Georges Pompidou



**NOUVELLES
TECHNIQUES
INSTRUMENTALES**

**COMPOSITION ET
FORMALISATION**

Gérard Assayag
Michèle Castellengo
Claudy Malherbe

N°38

1985

RAPPORTS DE RECHERCHE

**NOUVELLES
TECHNIQUES
INSTRUMENTALES**

COMPOSITION ET
FORMALISATION

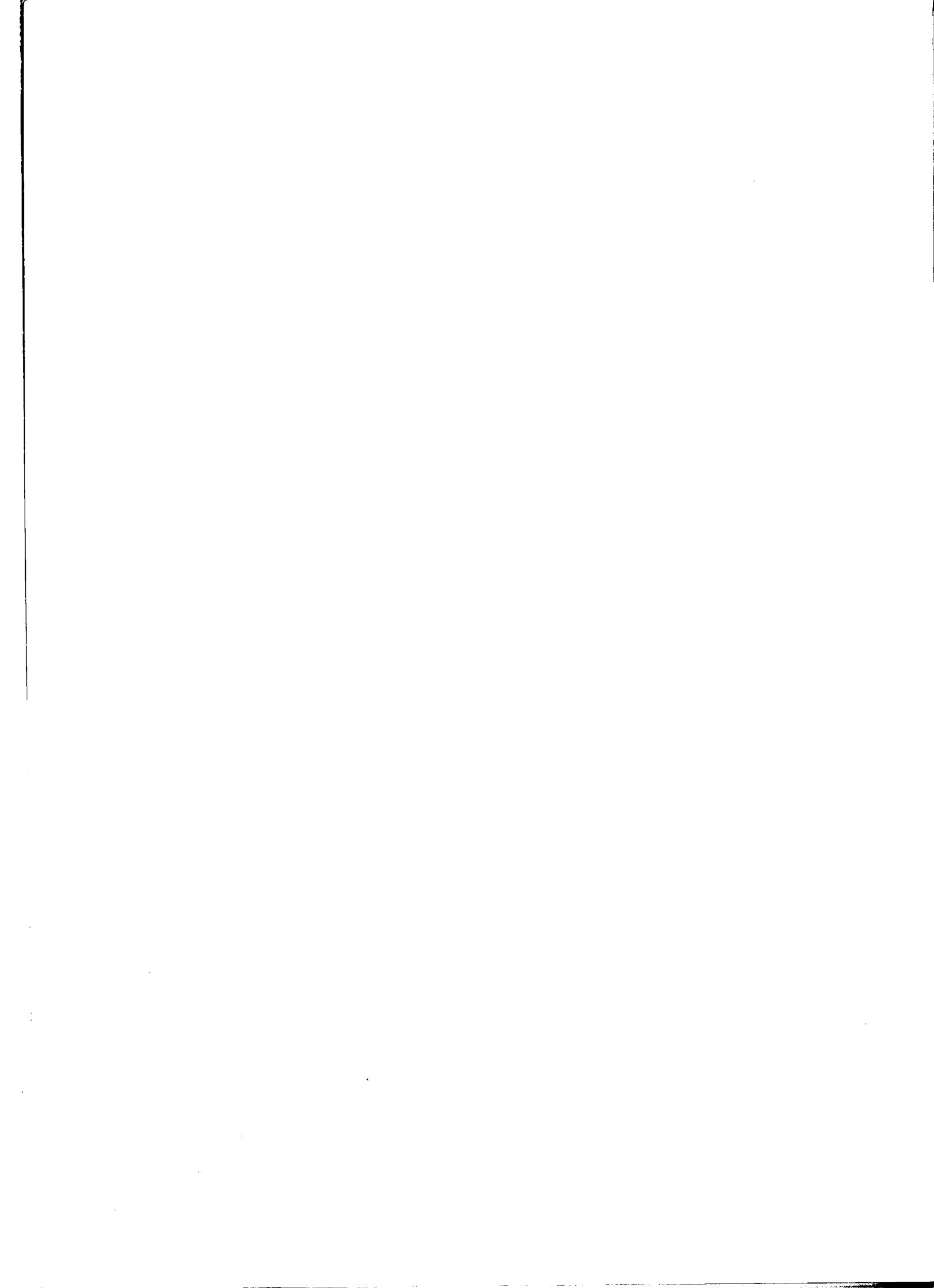
Gérard Assayag
Michèle Castellengo
Claudy Malherbe

N°38

1985

Table

1. PRESENTATION	7
1.1 Modes de jeux	7
1.2 Multiphoniques	8
2. COMMENT DÉCRIRE LES SONS COMPLEXES	10
2.1 A l'oreille	10
2.2 L'analyse acoustique	10
3. DÉFINITION D'UNE MÉTHODE	11
3.1 Établissement d'une base de données	11
3.2 Méthodes d'analyse acoustique	11
4. MODÉLISATION	13
4.1 Le spectre harmonique comme modèle de référence	13
4.2 Le peigne	14
4.3 Organisation discrète	15
4.4 Opérations sur les objets sonores exprimés en n° de partiels ; construction d'échelles	15
4.5 Modèle de mise en relation des objets sonores	16
5. EXEMPLES MUSICAUX	18
6. ANNEXE : musiciens ayant collaboré à cette recherche	26
7. BIBLIOGRAPHIE	26



1. Présentation

1.1 Modes de jeu

Par ce terme on désigne les diverses productions sonores possibles avec un instrument donné.

Les instruments traditionnels de l'orchestre sont le fruit d'une adaptation réciproque entre la facture et la technique de jeu, en vue d'un résultat acoustique souhaité, en accord avec les données esthétiques du lieu et de l'époque. L'évolution qui s'est faite en occident jusqu'au dix-neuvième siècle a contribué à privilégier essentiellement un mode d'émission donné (au détriment des autres possibles), et dont les caractéristiques acoustiques peuvent s'énoncer ainsi :

- Produire un son périodique (donc de hauteur parfaitement définie) plus ou moins riche en harmoniques selon le type d'instruments, susceptible de variations de dynamiques et de timbre, dont la hauteur correspond à une des douze notes de la gamme tempérée. C'est le mode de jeu dit «normal».

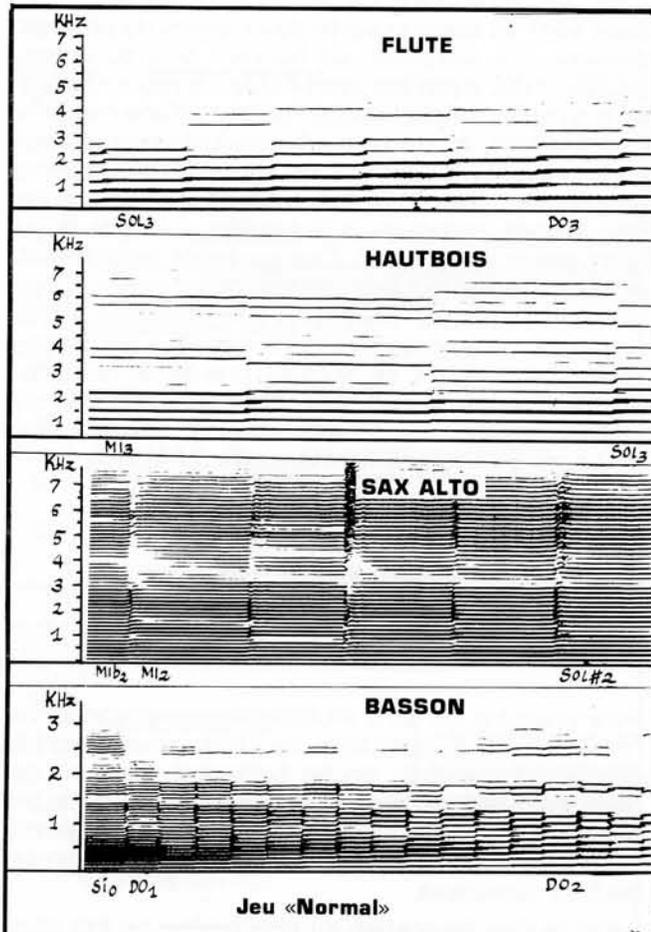


Fig. 1 - Analyse au sonographe de quelques notes d'une gamme jouée sur quatre instruments de la famille des bois. Chaque son de la gamme est représenté par une série de raies horizontales équidistantes (les harmoniques) dont la noirceur et l'épaisseur sont en rapport avec l'intensité.

La recherche d'effets sonores «nouveaux» (pour les occidentaux, mais bien connus des musiciens des autres traditions) a conduit à explorer toutes les possibilités «sonnantes» de l'instrument. On en dénombre une quinzaine que l'on peut regrouper en familles :

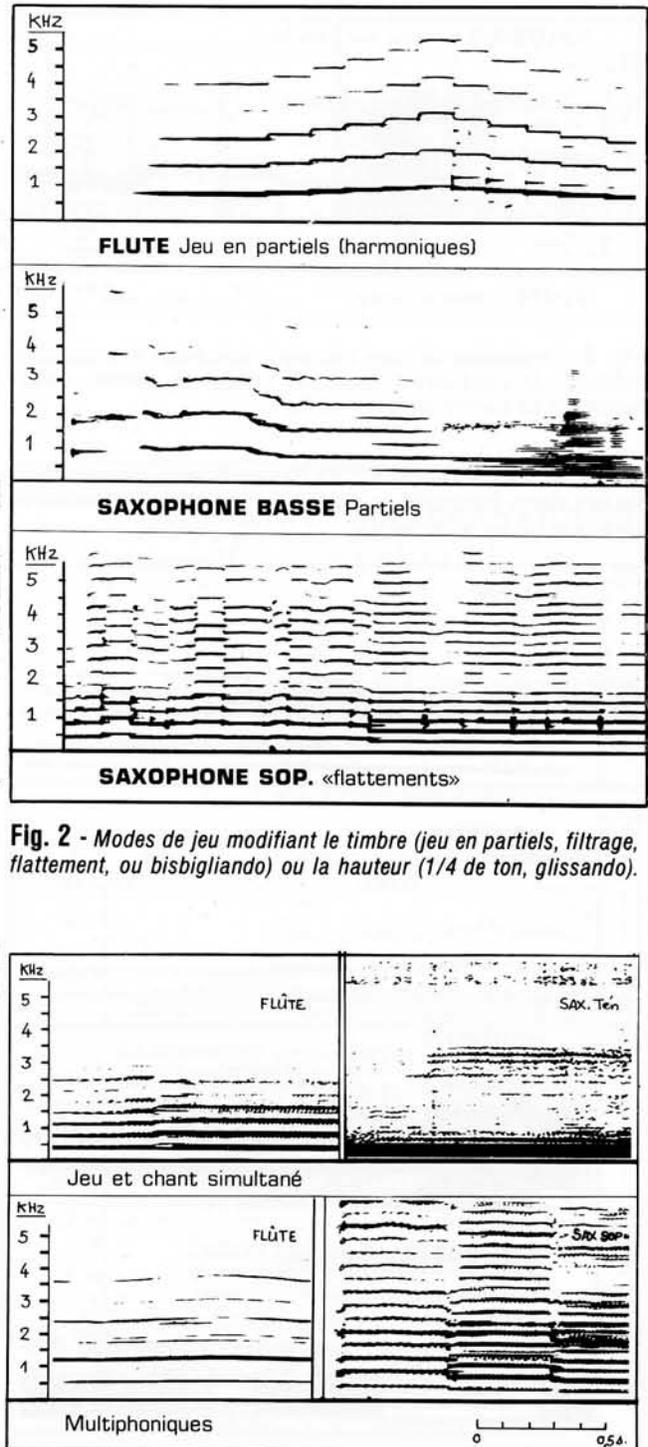


Fig. 3 - Modes de jeu produisant des sons de hauteurs complexes, des accords plus ou moins stables (jeu et chant simultanés, growl, sons multiphoniques).

Jusque là l'instrumentiste ne modifie pas fondamentalement la production du son. Il adapte au besoin les doigtés ou l'émission mais on reconnaît toujours la source (hautbois, saxophone).

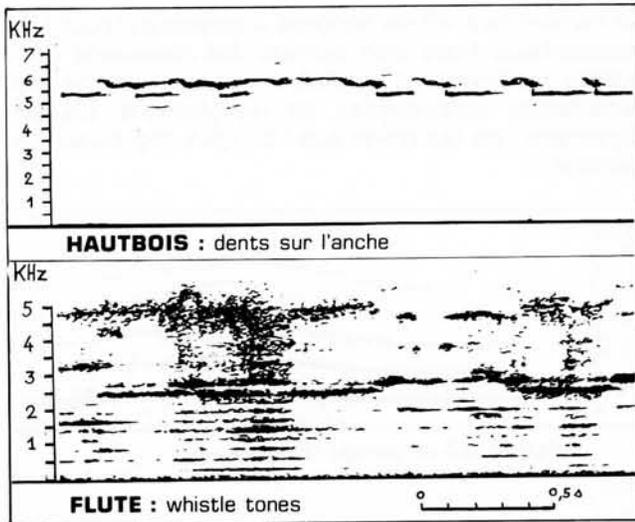


Fig. 4 - Production de sons très aigus échappant à la tessiture ordinaire de l'instrument (sons de biseau ou whistle tones, pincement de l'anche avec les dents).

Les trois familles suivantes rassemblent des modes de jeu dans lesquels le tuyau est excité de manière radicalement différente.

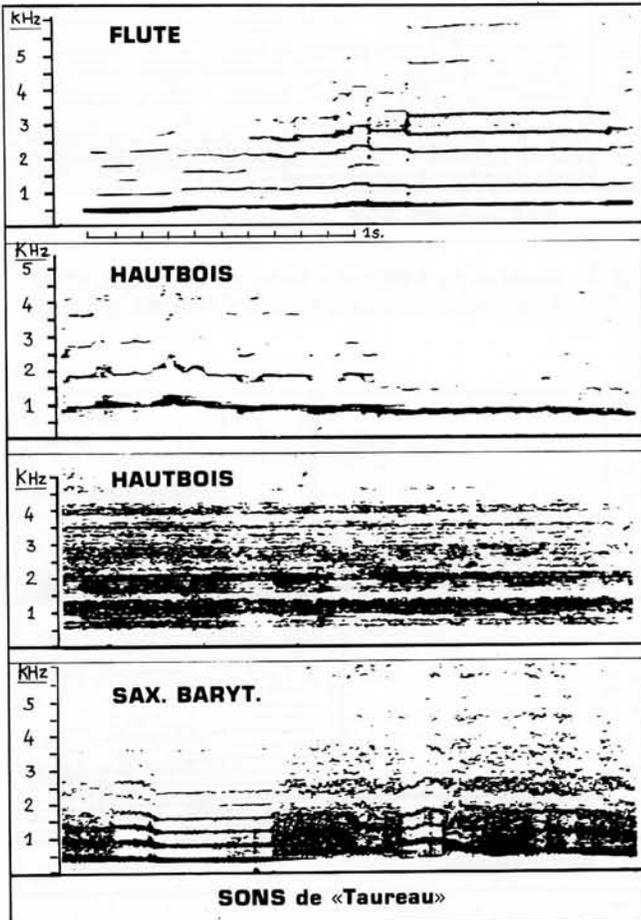


Fig. 5 - Jeu par vibration des lèvres en anches membraneuses (son de taureau ou de trompette).

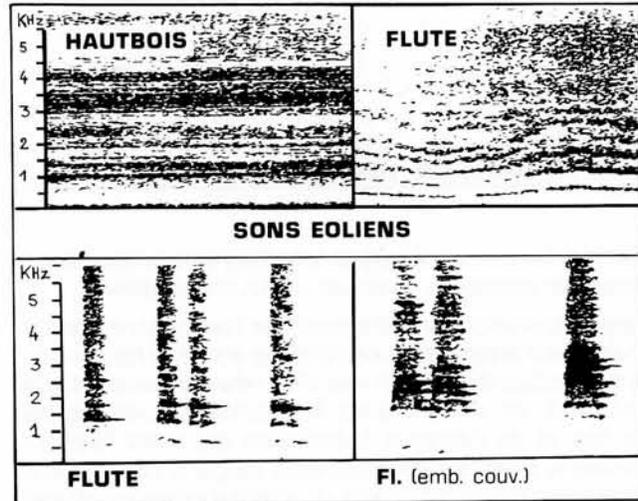


Fig. 6 - Jeu de souffle coloré (sons éoliens continus ou en attaques brèves).

Fig. 7 - Jeu par percussion soit au niveau de la bouche (slap, tongue ram, pizzicati) soit au niveau des doigts (percussion des clés).

Tous ces modes de jeu, à l'exception des multiphoniques sont en quelque sorte des classes de timbres donnant une sensation de hauteur plus ou moins bruitée, mais aisément identifiable ; ils peuvent donc être intégrés au champ des hauteurs d'une manière traditionnelle. Au contraire, les multiphoniques, bien qu'ils respectent l'identité de timbre de l'instrument producteur, résistent, étant donné leur structure fréquentielle complexe, à l'intégration dans le tissu harmonique traditionnel. Ces agrégats constituent un potentiel harmonique ; le fait, d'autre part, qu'ils forment un champ discontinu peu malléable à une manipulation à posteriori, nous amène à les considérer comme point de départ d'une étude centrée, dans un premier temps et par souci de simplification méthodologique, sur l'organisation de l'espace des hauteurs en champs harmoniques (MAL,80).

1.2 Multiphoniques

Pour produire les sons multiphoniques on conserve l'émission caractéristique de l'instrument (anche double, jet oscillant, anche battante) mais on se place dans des conditions acoustiques telles qu'on oblige le tuyau à fonctionner sur plusieurs régimes quasi simultanément, d'où la production d'un son de hauteur complexe.

Selon le cas, l'entretien du phénomène se fait plus ou moins facilement. Certains multiphoniques sont stables (les modes de fonctionnement se synchronisent), d'autres ont des roulements (indice probable d'une alternance entre deux ou trois types de fonctionnement).

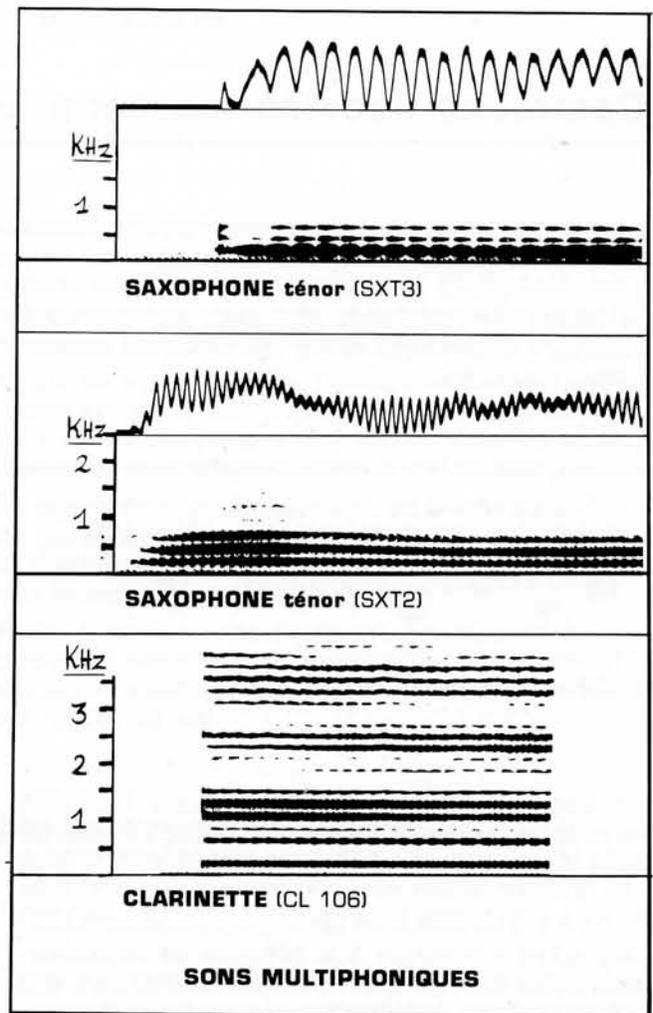
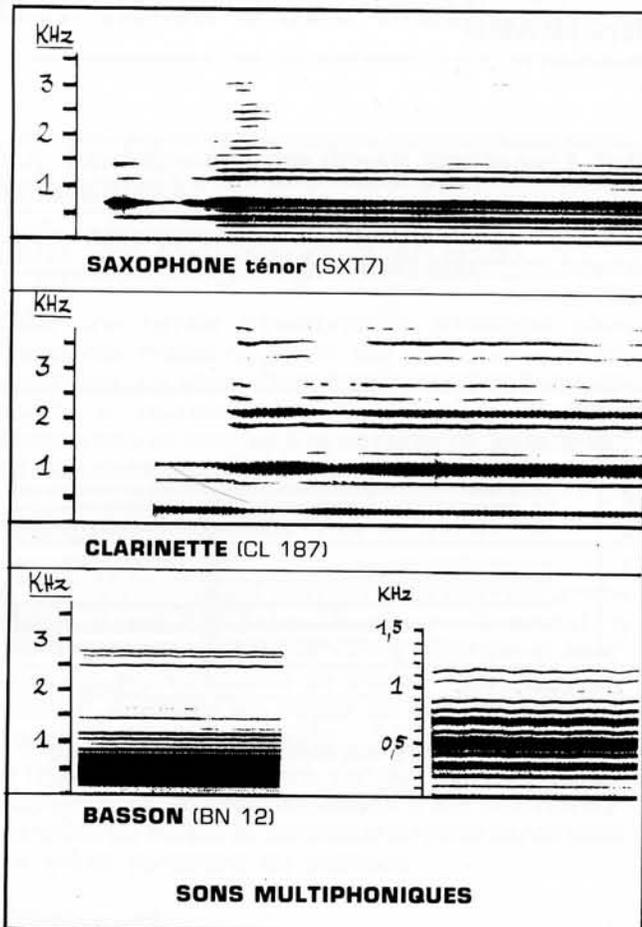
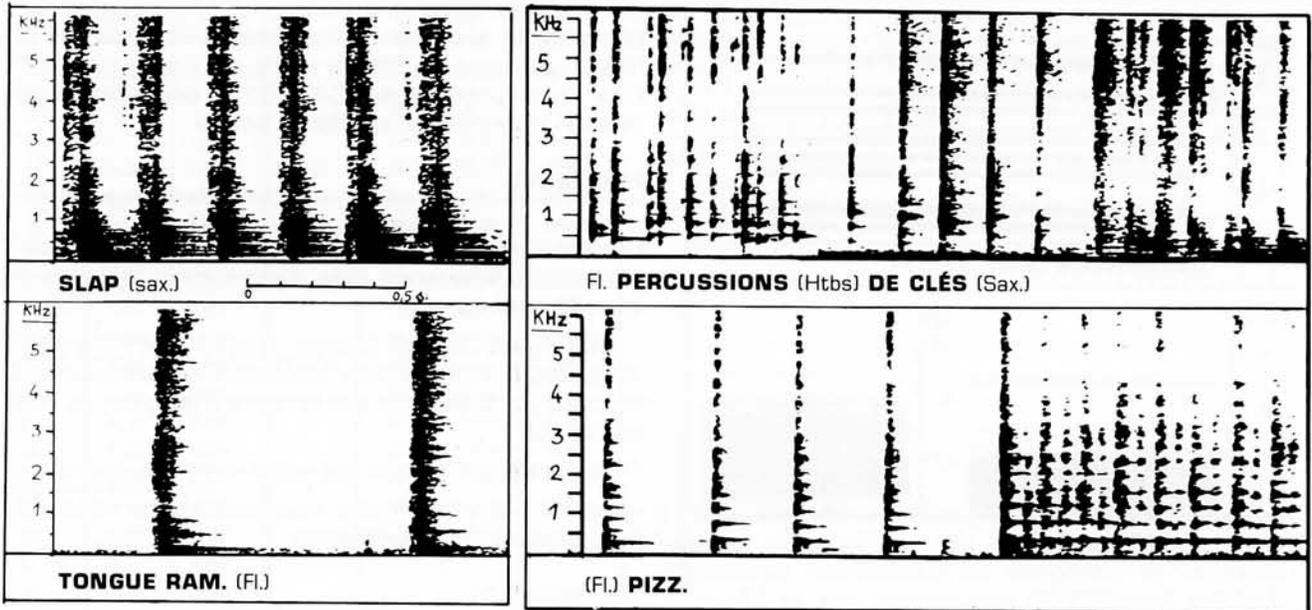


Fig. 8 - Multiphoniques stables pseudo-harmoniques.

Fig. 9 - Roulements simples.

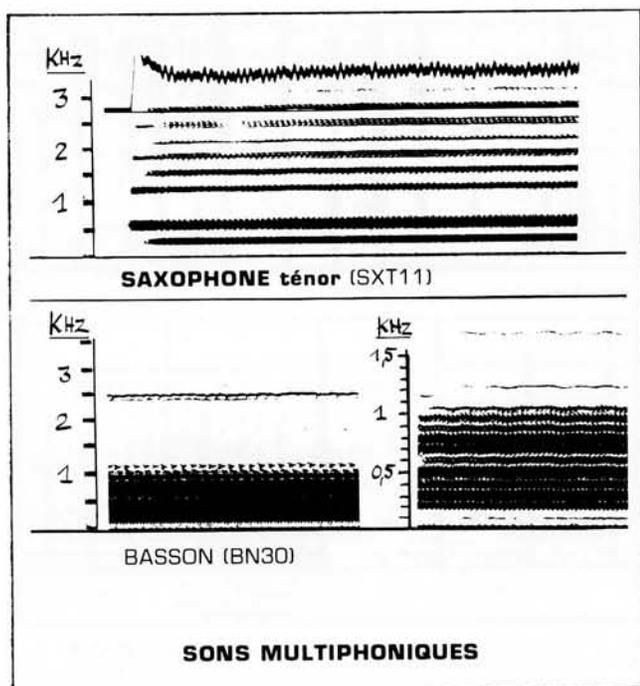


Fig. 10 - Multiphoniques combinant hauteurs et roulements complexes.

D'emblée se pose le problème de la perception de ces entités sonores dont l'identification tient à la fois du domaine du timbre et de celui de la hauteur. Une étude précédente (CAS, 81) a déjà permis de mettre en évidence quelques points :

Hauteurs

Les sons multiphoniques sont constitués de composantes de fréquence bien définie mais difficiles à identifier parce que :

- très aiguës ou très graves ; c'est à dire hors de la zone des fondamentaux musicaux contenus dans les deux portées, d'où des erreurs d'octaves ou des omissions,
- sans relation simple les unes avec les autres,
- formant des intervalles musicaux qui ne rentrent pas dans l'échelle tempérée.

Roulements

Les multiphoniques instables ont des grains dont l'effet perceptif varie avec la vitesse de roulement, celle-ci pouvant interférer avec les fréquences des composantes.

2. Comment décrire les sons complexes

2.1 A l'oreille

La dictée musicale d'un Multiphonique avec des musiciens chevronnés donne des résultats surprenants.



Fig. 11 - Dictée Multiphonique

De plus, elle ne nous informe pas sur la réalité acoustique du Multiphonique. Elle l'inscrit d'autorité dans un espace déjà défini : le tempérament égal. Les approximations sont nombreuses, le nombre de hauteurs trouvées incomplet.

Une autre explication à la difficulté de reconnaissance d'un Multiphonique est que celui-ci tient à la fois de l'accord - objet composé dont les éléments sont perçus de manière distincte - et du phénomène spectral dont les différentes composantes forment une seule entité.

2.2 L'analyse acoustique

Celle-ci, objective, implique la manipulation d'un volume important de données.

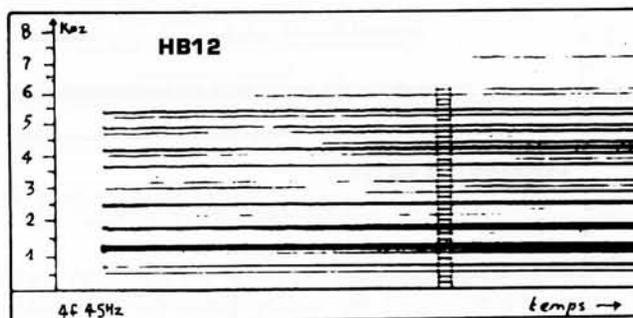


Fig. 12 - Sonagramme d'un son multiphonique de hautbois : HB 12.

N° de la composante	Amplitude	Fréquence (Hz)	Note musicale	N° de la composante	Amplitude	Fréquence (Hz)
1	---	----	FA ₂ -11)	26	0,12	4419
2	---	----		27	0,41	4584
3	0,38	510,4	DO ₄ -11	28	0,56	4754
4	0,51	678,3	FA ₄ -11	29	---	4932
5	---	840,5	LA ₄ -15	30	0,36	5092
6	0,49	1020		31	1,08	5264
7	6,64	1188	Mib ₅ -20/	32	0,27	5435
8	---	1346		33	0,17	5606
9	0,24	1528		34	0,44	5774
10	2,94	1698	LA ₅ -16/	35	---	5949
11	---	1869		36	---	6106
12	0,19	2030		37	---	6286
13	0,22	2203		38	---	6457
14	1,84	2377	Mib ₆ -20/	39	---	6616
15	---	2534		40	---	6789
16	0,32	2717				
17	0,54	2887				
18	0,42	3056				
19	0,19	3224				
20	---	3398				
21	0,60	3563				
22	0,10	3737				
23	0,30	3903				
24	1,64	4075	DO ₇ -11/			
25	0,40	4244				

Fig. 13 - Fréquences et amplitudes des composantes de HB.12 au temps 0.72 seconde. L'amplitude est linéaire, exprimée en unités arbitraires. Les traits visibles sur le sonogramme (Fig. 12) correspondent à une amplitude supérieure à 0.3. On n'a pas mentionné celles inférieures à 0.1. La valeur numérique de la fréquence d'une composante est d'autant plus précise que l'amplitude de cette composante est grande.

Il faut trouver un compromis entre l'analyse à l'oreille, nécessaire mais imprécise, et l'analyse acoustique fournissant un ensemble de données exhaustif et par conséquent difficilement manipulable par le compositeur. Celle-ci doit donc permettre de réduire cet ensemble aux éléments nécessaires et suffisants à une exploitation musicale.

Tout au long du travail s'établit une interaction permanente entre les données de la perception et celles de l'analyse acoustique ; l'oreille s'affine à cette comparaison.

3. Définition d'une méthode

3.1 Etablissement d'une base de données

Choix des Multiphoniques de Bois

C'est une famille d'instruments privilégiée pour l'étude des modes de jeux et des Multiphoniques en particulier. Le choix d'une famille permet aussi de porter la recherche au niveau de la musique d'ensemble, en essayant si possible de généraliser les résultats d'un instrument aux autres.

Acquisition des données

- Des formulaires ont été distribués aux instrumentistes, les questionnant sur leur savoir-faire relatif à ces techniques spéciales. On a cherché à avoir plusieurs représentants de chaque instrument, de manière à établir un noyau de possibilités communes à chaque interprète.

- Une base de données de plusieurs centaines d'échantillons sonores digitalisés a été stockée sur mémoire de masse et constitue le matériau de base sur lequel porteront les analyses.

Remarques

- Le noyau commun évoqué pour les modes de jeux n'existe pas encore pour les Multiphoniques qui

subissent dans leur production des variations importantes liées aux instruments et aux instrumentistes. De plus l'ensemble des Multiphoniques est ouvert et s'enrichit à chaque fois qu'un instrumentiste lui consacre un peu d'attention.

- L'établissement d'une quelconque forme d'unification sur cet ensemble ne peut se faire qu'au prix d'un travail complexe d'analyse des données et de leur mise en relation au sein de cette base.

En attente de systématisation, ce travail a été fait de manière expérimentale et ponctuelle, privilégiant le champ des hauteurs, dans le but de constituer des espaces harmoniques.

- Ce travail sur les hauteurs devrait permettre d'aborder ensuite la problématique du timbre, et d'intégrer à ce moment d'une manière fonctionnelle les modes de jeu.

3.2 Méthodes d'analyse acoustique

Analyse FFT

Cette méthode donne une photographie statique de la structure d'un son analysé en composantes spectrales à un moment choisi. Elle ne prend pas en compte les variations temporelles de ses paramètres (fréquence, amplitude), ce qui est suffisant pour

spécifier sur le champ des hauteurs - dans la mesure où les objets utilisés sont assez stables.

Extraction de crêtes

Il s'agit simplement d'extraire les composantes les plus importantes en amplitude à partir des résultats précédents.

Application de l'algorithme de Terhardt

Cet algorithme propose une pondération des composantes extraites par les méthodes précédentes à partir de critères tels que la courbe de réponse de l'oreille ou le pouvoir de masquage des composantes spectrales entre elles (TER, 82a) (TER, 82b).

Après simplification du spectre de départ par élimination des composantes de poids nul, (i.e. non pertinentes perceptivement d'après Terhardt) on obtient une description à la fois suffisamment significative d'un point de vue acoustique, et suffisamment simple pour être manipulée par un musicien.

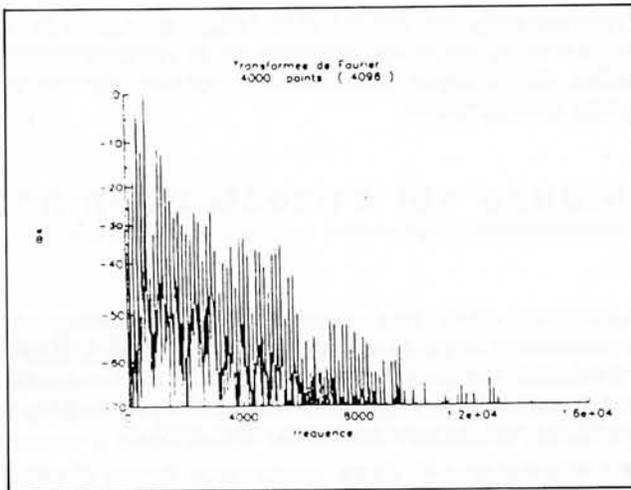


Fig. 14a - Spectre complet d'un Multiphonique de Saxophone Ténor donné par analyse FFT.

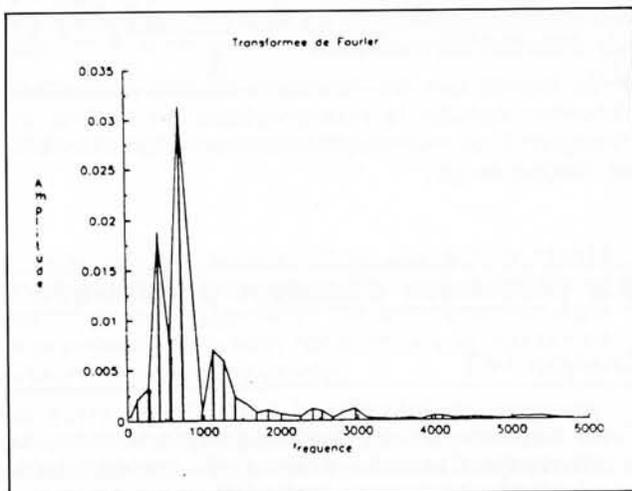


Fig. 14b - Le même spectre est réduit par extraction des pics de fréquence.

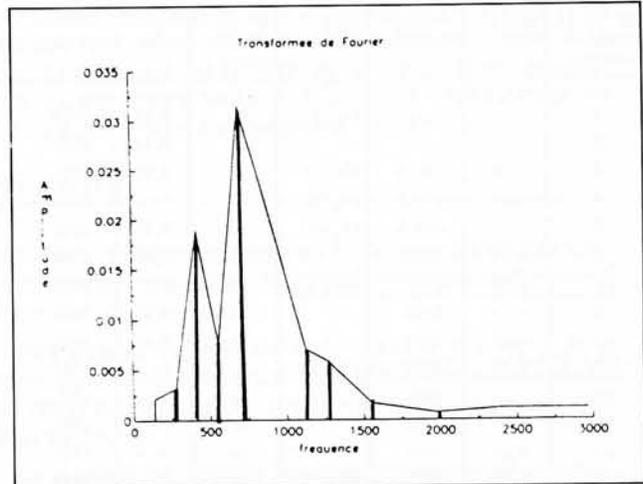


Fig. 14c - Une dernière réduction est faite en supprimant les composantes pour lesquelles l'algorithme de Terhardt donne un poids nul.

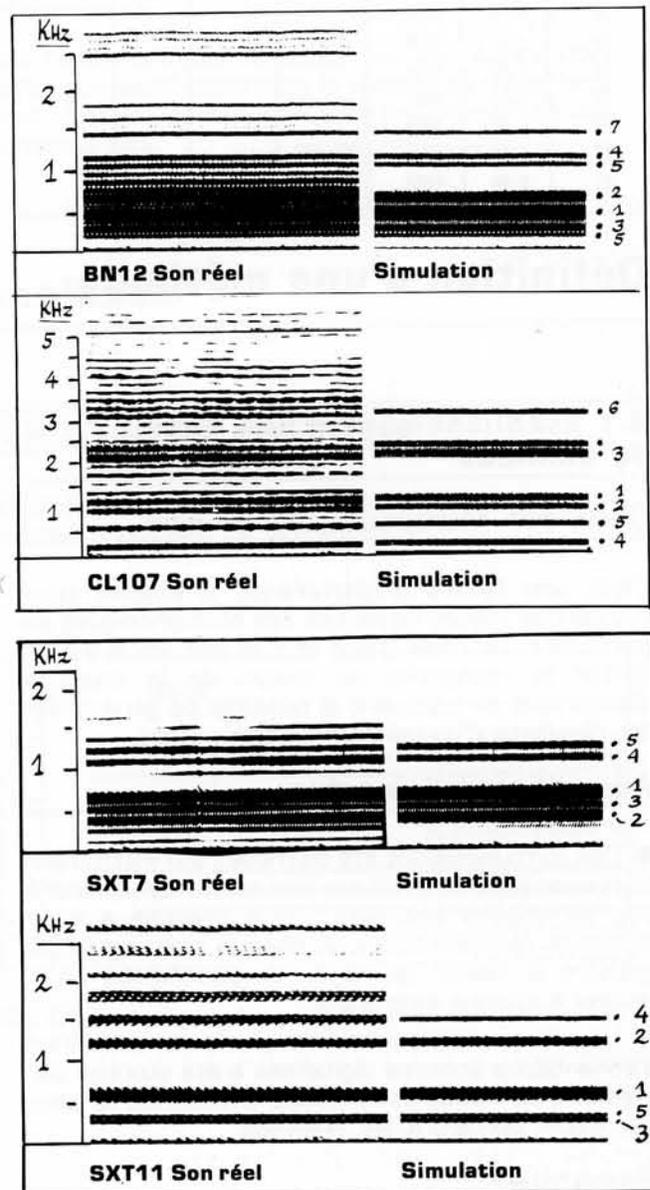


Fig. 15 - Comparaisons entre sonagrammes de sons réels et de sons simulés pour des multiphoniques de Basson, Clarinette Sib, Saxophone ténor.

Il reste à vérifier qu'une réduction aussi importante des données conserve un noyau d'information suffisamment significatif sur la structure accordale du son analysé et sa couleur. Des «simulations» sont donc construites par synthèse additive à partir du résidu de hauteurs spectrales délivrées au bout de la chaîne d'analyses et comparées au son d'origine :

- auditivement grâce à un programme d'écoute interactive permettant de décomposer hauteur par hauteur le son simulé, d'en extraire des sous-ensembles, et d'écouter alternativement le son réel,

- en mettant en regard les sonagrammes du son réel et de son artefact.

(voir Figure 15)

A ce stade, le Multiphonique apparaît comme une collection de fréquences sans liens les unes avec les autres. Il faut trouver un modèle, c'est à dire une construction abstraite permettant de décrire les phénomènes étudiés et de construire de nouveaux espaces cohérents avec eux.

4. Modélisation

A l'écoute, ou bien par un calcul simple de diviseur commun aux fréquences des composantes d'un son complexe, on peut trouver une «fondamentale» telle que ces composantes puissent être exprimées comme numéros de partiels (CAS, 81).

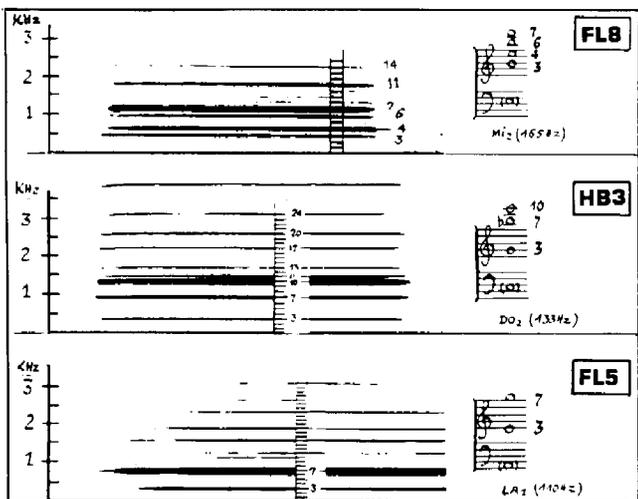


Fig. 16 - Sonagrammes de sons multiphoniques quasi harmoniques et leur transcription en N° de partiels d'une fondamentale.

Le modèle qui va être présenté tente de définir :

- le cadre des approximations nécessaires pour exprimer les sons complexes comme séquences de nombres entiers, en termes d'intervalles musicaux,
- un outil de description suffisamment général pour permettre des manipulations formelles sur ces séquences et unifier des classes d'objets sonores au premier abord disparates.

4.1 Le spectre harmonique (SH) comme modèle de référence

C'est le premier modèle qui vient à l'esprit puisqu'il décrit aussi bien les sons «ordinaires» des instruments que la voix et qu'il est une des bases de la génération harmonique. Un son harmonique s'analyse en composantes dont la fréquence est toujours un multiple entier de sa fréquence la plus grave (fondamentale) ; le Spectre Harmonique peut être considéré dans l'absolu comme une suite d'intervalles relatifs (8ve, 5te, 4te, 3ce M etc.).

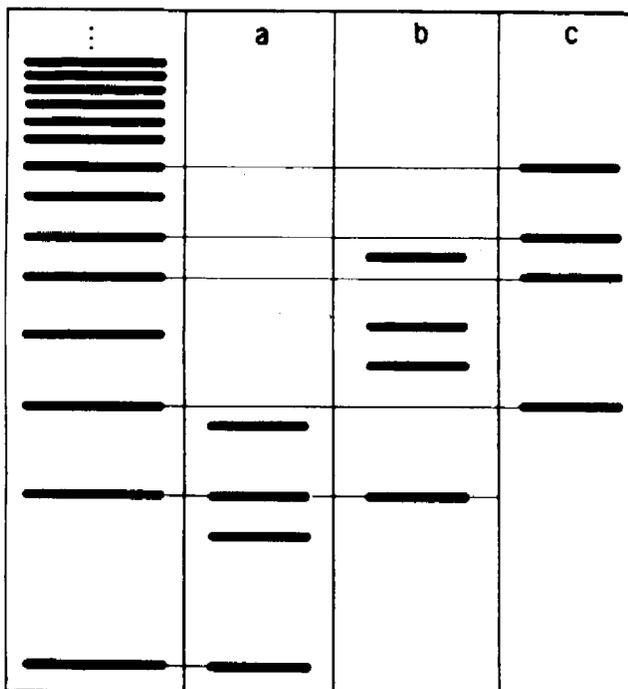


Fig. 17 - Algorithme du «peigne» : la première colonne à gauche représente le Spectre Harmonique, l'axe vertical étant celui des fréquences. Les colonnes de a à c montrent un Multiphonique déplacé le long de cette structure jusqu'à coïncidence complète entre ses composantes et celles du spectre.

4.2 Le peigne

Une collection de fréquences peut être ramenée à un ensemble d'intervalles en prenant le logarithme du rapport de chacun de ses éléments avec la fréquence la plus grave. Le résultat (en unités comme le cent ou le savart) peut être intégré dans divers tempéraments. L'algorithme du «peigne» consiste donc à confronter un Multiphonique, ainsi ramené à une suite d'intervalles, à un Spectre Harmonique considéré comme surensemble de référence, en déplaçant le Multiphonique le long de celui ci jusqu'à ce qu'il y ait coïncidence entre

(voir Figure 17)

La première occurrence d'une coïncidence complète des composantes du Multiphonique avec celles du Spectre Harmonique est évidemment la plus caractéristique puisqu'elle délivre la fondamentale la plus aiguë. Mais il est évident qu'au fur et à mesure que

chacun des éléments du Multiphonique et un élément du spectre. Le Multiphonique est en quelque sorte «reconnu» par la structure hôte (le SH), ce qui implique de définir les tolérances à l'intérieur desquelles un intervalle du Multiphonique et un intervalle du spectre seront considérés comme égaux ; les éléments du Multiphonique une fois positionnés s'exprimeront en n° de partiels d'une fondamentale immédiatement déduite.

Dès lors tout objet sonore qui peut être réduit de la même manière à une Séquence de Numéros de Partiels (SNP) pourra se voir appliquer tous les formalismes qui vont être décrits plus loin.

On déplace le Multiphonique vers l'aigu du Spectre on obtient une suite de solutions de moins en moins informatives, avec des fondamentales de plus en plus graves.

MULTIPHONIQUE CLB27			TEMPERAMENT 1/4 TON		
N° comp	Note		N° comp	Note	
0	RE#3 +17		0	RE#3 +17	
1	SOL#4 +14		1	SOL#4 +14	
2	FAS -21		2	FAS -21	
3	LA#5 +6		3	LA#5 +6	
4	SI6 -1		4	SI6 -1	
5	DO7 -35		5	DO7 -35	
6	RE7 +30		6	RE7 +30	
7	LA7 +7		7	LA7 +7	
8	LA#7 +16		8	LA#7 +16	
9	DO8 -39		9	DO8 -39	
10	MI8 -43		10	MI8 -43	

FONDAMENTALE 1 - RE#3 +17			FONDAMENTALE 3 - SOL#1 +15			FONDAMENTALE 5 - SI0 +31		
N° comp.	Note	N° partiel	N° comp.	Note	N° partiel	N° comp.	Note	N° partiel
0	RE#3 +17	1	0	RE#3 +17	3	0	RE#3 +17	5
3	LA#5 +6	6	1	SOL#4 +14	8	2	FAS -21	22
5	DO7 -35	13	3	LA#5 +6	18	3	LA#5 +6	30
8	LA#7 +16	24	4	SI6 -1	38	4	SI6 -1	63
9	DO8 -39	26	5	DO7 -35	39	5	DO7 -35	65
10	MI8 -43	33	6	RE7 +30	46	6	RE7 +30	76
			7	LA7 +7	67	7	LA7 +7	112
			8	LA#7 +16	72	8	LA#7 +16	120
			9	DO8 -39	78	9	DO8 -39	130
			10	MI8 -43	98	10	MI8 -43	164

FONDAMENTALE 2 - RE#2 +17			FONDAMENTALE 4 - RE#1 +17			FONDAMENTALE 6 - SOL#0 +15		
N° comp.	Note	N° partiel	N° comp.	Note	N° partiel	N° comp.	Note	N° partiel
0	RE#3 +17	2	0	RE#3 +17	4	0	RE#3 +17	6
2	FAS -21	9	2	FAS -21	18	1	SOL#4 +14	16
3	LA#5 +6	12	3	LA#5 +6	24	2	FAS -21	27
4	SI6 -1	25	4	SI6 -1	50	3	LA#5 +6	36
5	DO7 -35	26	5	DO7 -35	52	4	SI6 -1	75
6	RE7 +30	31	6	RE7 +30	51	5	DO7 -35	78
7	LA7 +7	45	7	LA7 +7	90	6	RE7 +30	91
8	LA#7 +7	48	8	LA#7 +16	96	7	LA7 +7	135
9	DO8 -39	52	9	DO8 -39	104	8	LA#7 +16	144
10	MI8 -43	65	10	MI8 -43	131	9	DO8 -39	156
						10	MI8 -43	196

Fig. 18 - L'exemple suivant montre d'abord toutes les 11 composantes d'un Multiphonique de Clarinette (Clb27). Puis pour chacun des essais successifs de déplacement de Clb27 le long du Spectre Harmonique : la fondamentale déduite, les numéros des composantes de Clb27 qui coïncident avec des partiels du spectre, les notes correspondantes, et le rang de ces partiels. A la sixième tentative - pour une fondamentale égale à SOL 0 + 15 cents - apparaît une solution complète (i.e. pour laquelle les 11 éléments de Clb27 sont reconnus). Nous ne retiendrons que ces solutions complètes, en particulier pour le peigne généralisé (cf. § «Modèle de mise en relation des Objets Sonores») ; l'échelle d'approximation choisie est le 1/4 de ton (cf. § «Organisation discrète»).

4.3 Organisation discrète

Le choix des méthodes précédemment exposées, qui implique une représentation discrète des phénomènes étudiés, n'est pas fortuit ; à l'heure actuelle, ce choix est cohérent avec la nature des deux principaux pôles de la musique instrumentale :

- la technique instrumentale est essentiellement discontinue : si les variations de dynamique sont de l'ordre du continu, et si le champ des durées peut être considéré sous cet angle, il n'en va pas de même de celui des hauteurs où, malgré quelques exceptions, le continu n'est pas d'ordre structurel. Pour les timbres, si cette variation est possible, elle est en toute rigueur incontrôlable avec les instruments traditionnels,

- l'écriture instrumentale traditionnelle a des articulations alphabétiques (les signes), lexicales (les figures constituées de groupes de signes), syntaxiques (niveau de la manipulation formelle dans la composition). Elle est donc totalement discrète, comme toute organisation du type du langage écrit.

L'interaction de fait entre ces deux instances de la pensée musicale crée un espace de travail où des domaines pouvant a priori se penser dans le continu vont être formalisés en unités discontinues.

Par exemple, le champ des durées est exprimé par des valeurs rythmiques rationnelles (au sens mathématique), et dont le nombre réduit est légitimé par les limites perceptives aussi bien qu'instrumentales.

Le choix peut être inverse - des exemples montrent qu'on peut aller dans la voie du continu avec les instruments - mais au prix d'une perte de cohérence structurelle (les instruments ne sont pas prévus pour). Parmi tous les problèmes que cela pose, le plus important pour nous, est l'appauvrissement de la relation langage/mise en œuvre instrumentale.

Il nous apparaît pratique de se référer, pour la modélisation des phénomènes étudiés, à un espace «également tempéré» (i.e. divisé régulièrement) : d'une part cela permet de réduire la complexité initiale en plaçant l'objet à décrire dans un système normé, directement utilisable du point de vue de l'écriture instrumentale, d'autre part on peut ajuster la finesse de cette échelle selon le degré d'exactitude avec lequel on désire préserver l'information initialement présente dans le phénomène.

Ainsi, dans l'algorithme du peigne, l'appariement des composantes du Multiphonique avec leur répondant dans le Spectre Harmonique est fait par référence à une division régulière ($1/2, 1/3, 1/4, \dots, 1/n$ de ton) du continuum des hauteurs compatible avec le tempérament égal. Deux composantes seront considérées comme identiques si elles tombent dans la même subdivision.

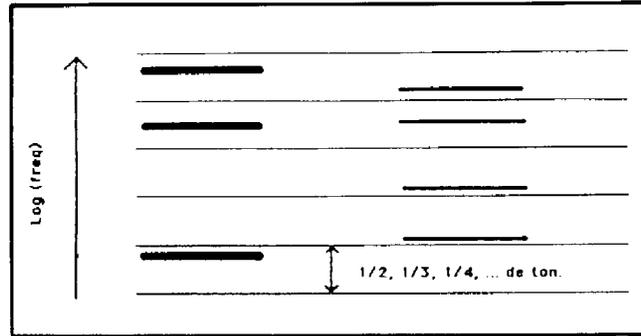


Fig. 19 - Appariement des composantes d'un Multiphonique (colonne de droite) avec leur répondant dans le Spectre Harmonique (à gauche). Les deux composantes les plus graves ne sont pas reconnues.

4.4 Opérations sur les objets sonores exprimés en numéros de partiels d'une fondamentale : construction d'échelles

Soit S une séquence de n^o de partiels pris dans un spectre harmonique de référence.

$$S = (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_p)$$

Il peut être intéressant de considérer une telle séquence comme un fragment d'une organisation régulière plus vaste la contenant.

Construisons sur chacune des composantes C_i de S la suite :

$$C_{ri} = (C_i, 2C_i, 3C_i, \dots, nC_i, \dots)$$

Cette dernière à la fois est incluse dans le spectre de référence (si C_i est un n^o de partiel dans un spectre harmonique, tous ses multiples nC_i le sont) et représente une de ses transpositions (par exemple, si $C_i = 3$, C_{ri} est un spectre harmonique transposé à la quinte par rapport au spectre de référence).

En généralisant ce principe à tous les éléments de la séquence et en fusionnant les spectres obtenus, on obtient une échelle C_r extraite du spectre de référence et contenant la séquence initiale. On appellera «Crible» l'expression comme suite d'entiers de cette échelle, et «Crible Simple» de rang C_i chacun des générateurs C_{ri} qui la forment.

$$C_r = C_{r_1} \cup C_{r_2} \cup \dots \cup C_{r_p}$$

Exemple :

$$S = (3, 5, 11, 12, 15, 17, 22)$$

$$C_{r_1} = (3, 6, 9, 12, \dots, 3n, \dots)$$

$$C_{r_2} = (5, 10, 15, \dots, 5n, \dots)$$

$$C_{r_7} = (22, 44, 66, \dots, 22n, \dots)$$

$$C_r = C_{r_1} \cup C_{r_2} \cup \dots = (3, 5, 6, 9, 10, 11,$$

$$12, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 27, \dots)$$

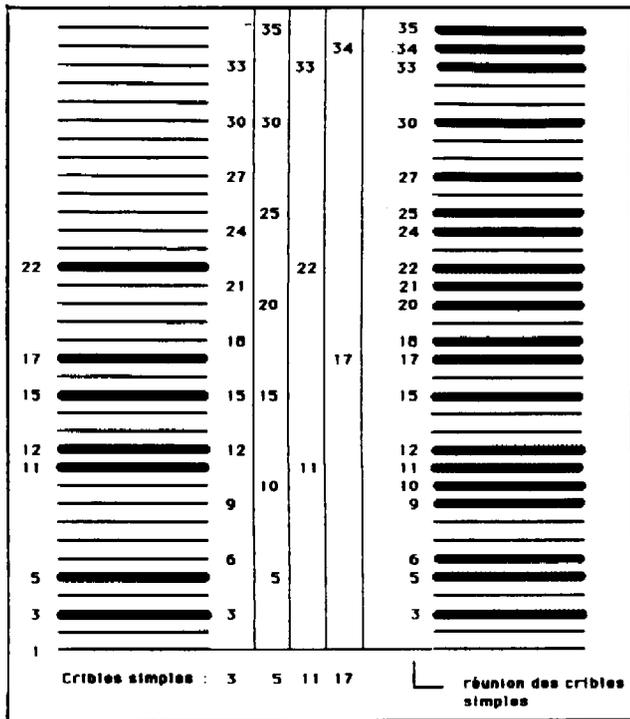


Fig. 20 - Inclusion dans une échelle d'un objet sonore réduit à une séquence de partiels : dans la colonne la plus à gauche, les éléments du spectre, et, en gras, les partiels composant l'objet sonore. Dans la colonne de droite, l'échelle résultat de l'union des cribles simples est indiquée par des barres en grisé. L'expression de cette échelle est suffisante pour décrire l'objet sonore relativement au spectre de référence.

On notera $E = (r_1 + r_2 + \dots + r_n)$ l'échelle composée par union des cribles simples de rang r_1, r_2, \dots, r_n . Dans l'exemple précédent, l'échelle construite se notera :

$$(3 + 5 + 11 + 12 + 15 + 17 + 22)$$

qui se simplifie en :

$$(3 + 5 + 11 + 17)$$

le crible de rang 12 étant contenu dans celui de rang 3 et celui de rang 22 dans celui de rang 11.

On appellera «Plus Grand Crible Commun» aux éléments d'une séquence de N° de partiels (PGCC) cette expression, indiquant par là le crible le moins dense, exprimé en terme d'union de cribles élémentaires, contenant les éléments de cette séquence. Nous voulons suggérer là l'idée d'une échelle «optimale» dans le sens où elle n'ajoute qu'un nombre d'éléments restreint à la séquence de départ, masquant le moins possible la spécificité des agrégats harmoniques présents dans le matériau, ceci de manière cohérente avec le modèle de base puisqu'elle se construit à partir d'intrications de transpositions du Spectre Harmonique.

On peut généraliser le principe à plusieurs séquences de partiels en calculant le PGCC sur leur réunion. Le résultat est une échelle optimale unifiant un ensemble d'objets modélisés sur un même Spectre Harmonique. L'opérateur PGCC sera donc utilisé soit de manière unaire sur une séquence de séquences, soit de manière n-aire sur une collection de séquences.

Cet outil va permettre de construire des espaces de hauteurs grâce à un jeu de transformations et d'opérateurs sur les cribles complètement formalisable : gamme des opérations ensemblistes (union, intersection, décalage), composition de cribles, classes de résidus non nuls, etc. Il permettra, comme nous le verrons plus loin de générer des échelles de transition d'un objet à un autre.

4.5 Modèle de mise en relation des objets sonores

C'est au sein d'un jeu de relations que vont se développer les idées musicales. Il faut donc établir une dialectique entre les divers objets sonores, chacun considéré comme un pôle de structuration.

Nous avons déjà vu comment obtenir une séquence de partiels à partir d'un objet sonore par l'algorithme du Peigne. Celui-ci, généralisé, peut unifier plusieurs objets en les exprimant comme séquences dans un même Spectre Harmonique. En partant d'une classe d'objets, cet algorithme va servir à construire une collection de sous-classes définies chacune par l'appartenance de leurs éléments à un même spectre.

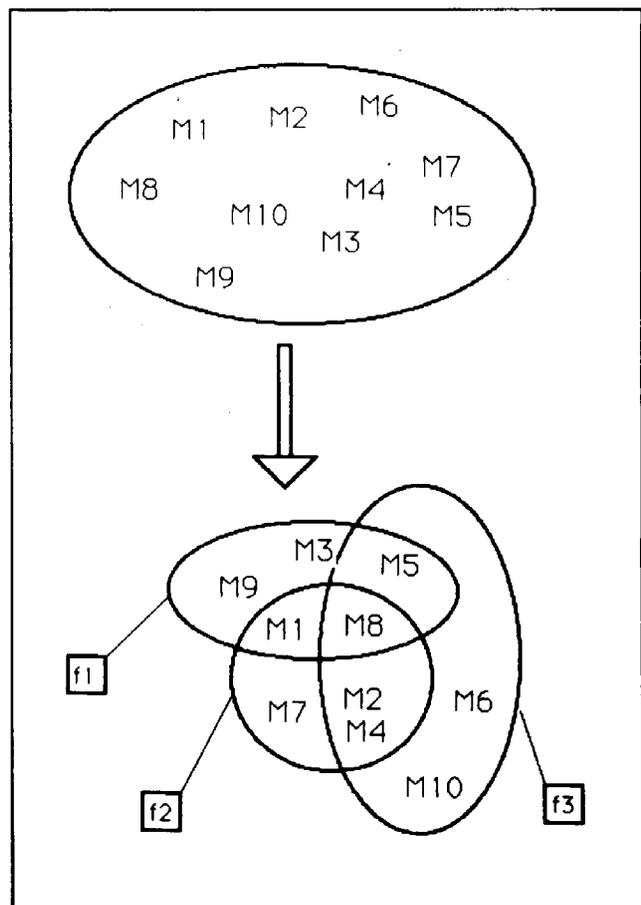


Fig. 21 - Organisation d'un ensemble d'objets sonores en classes d'appartenance à un même spectre. Chaque classe est définie par le fait que ses éléments s'expriment comme séquences de partiels d'une même fondamentale. Un élément commun à deux classes a donc au moins deux expressions comme SNP.

- l'**alphabet d'entrée** est égal à l'ensemble \emptyset des objets sonores,
- une transition étiquetée par **k** entre deux états **i** et **j** dénote l'appartenance de l'objet **ok** à l'intersection des parties **C_i** et **C_j** associées. Un état **i** a donc autant de transition vers lui-même que la classe **C_i** contient d'éléments. (HOP, 69)

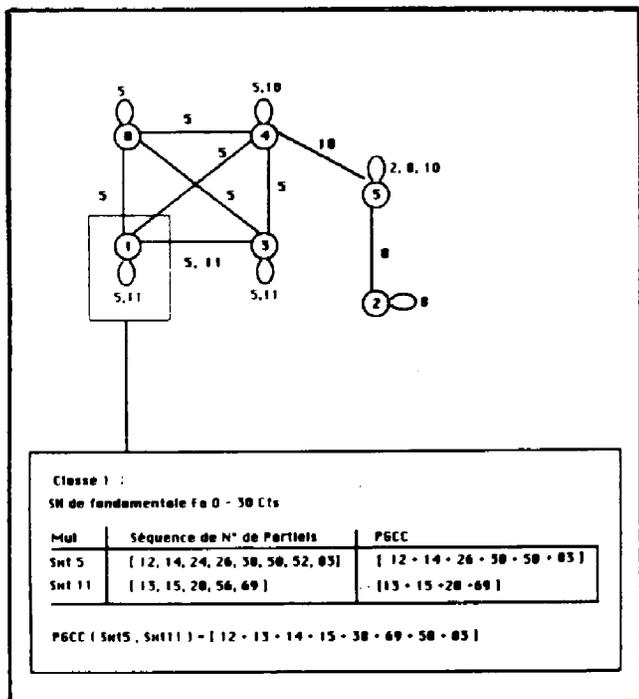


Fig. 24 - Automate construit sur une séquence de 5 Multiphoniques de Saxophone ténor : Les chiffres étiquetant les transitions sont des N° de Multiphoniques, ceux dans les cercles (états) désignent les classes données par le Peigne. Par les Multiphoniques 5 ou 11, on reste dans l'état 1 ou on passe en 3. Le PGCC des objets 5 et 11 donne l'échelle qui les unifie à l'intérieur de la classe 1.

Cette approche peut être considérée de deux manières différentes :

a) La première, constructive, consiste à utiliser l'automate comme **producteur** de cheminements. L'ensemble de ces cheminements et les séquences d'objets associées (i.e. le **langage** reconnu par l'automate) constituent un réservoir de relations, une **préorganisation du matériau** (ASS, 84b) que le compositeur pourra exploiter selon diverses modalités :

- parties communes ou différenciation,
- évolutions d'état à état brusques ou lentes,
- jeu des redondances, mise en jeu de la mémoire,
- dialectiques organisant le déroulement temporel...

b) La seconde approche, analytique, utiliserait l'automate comme un **reconnaisseur** qui indiquerait dans quelle mesure une séquence d'objets est cohérente relativement aux relations extraites du matériau. Elle n'a pour l'instant pas été expérimentée.

Ce modèle a été informatisé de manière à permettre, à partir de la base de données d'objets sonores décrite au § 3.1, de tester toutes les manipulations évoquées : construction du graphe-automate sur des collections choisies d'objets, choix de cheminements donnant des séquences d'objets dans le temps, construction d'échelles à partir d'objets et de transitions entre objets.

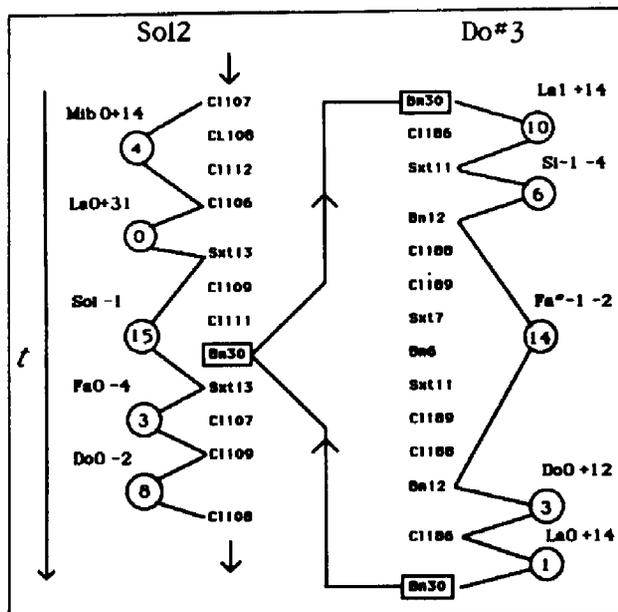


Fig. 25 - Parcours dans un automate : Cet exemple, qui a servi dans l'élaboration de *nonsun* pièce pour quintette à vent de Claudy Malherbe, montre un cheminement possible dans deux automates reliés par un objet pivot : le point d'entrée est le Multiphonique C1107 en haut à gauche. La lecture se fait de haut en bas. Arrivé au Multiphonique Bn30, la jonction se fait avec l'automate de droite, qui est parcouru, puis le cheminement reprend au point de dérivation. Les cercles sont les états de l'automate, avec les fondamentales associées.

5. Exemples musicaux

Les exemples suivants sont tirés de la partition de *nonsun* de Claudy Malherbe ; cette pièce pour cinq bois (Flûte piccolo, Hautbois, Clarinette Sib, Saxophone ténor Sib, Basson) a été écrite à l'automne 84 afin de mettre en pratique les résultats présentés dans ce rapport.

18 **La clarinette et le saxophone ténor sont**

écrits transposés. Les exemples sont commentés en sons réels.

EXEMPLE 1 (mesures 70 à 76)

Alternance d'un multiphonique de Saxophone ténor (**Sxt2, mesure 73 à 75**) dont seules les notes prédominantes (Si 2 et La 2) sont notées et de sa simulation par les autres instruments (**mes. 72 à**

74). La Clarinette et le Basson jouent ces notes prédominantes tandis que le Piccolo et le Hautbois brodent sur les notes secondaires.

EXEMPLE 2 (mesures 115 à 120)

Un multiphonique de Clarinette (**C1106**) et un de Saxophone (**Sxt13**) sont intercalés puis superposés (mes.117). La cohérence de l'enchaînement est établie par l'utilisation d'un redoublement à l'octave de la fondamentale d'un spectre unifiant les deux multiphoniques (La 1 + 1/4 de ton, donnée en pédale par le Basson) ; dans chacun des deux multiphoniques, une des composantes est gardée comme tenue (Sol12 à la Clarinette et Sib 3 + 1/4 ton au Saxophone). Le Piccolo joue alternativement une note aiguë de **C1106** et de **Sxt13**.

Au chiffre III, (mesure 119), une nouvelle fondamentale (Sol 1), redoublée elle aussi, est jouée par le Basson. Les autres instruments parcourent les notes du multiphonique.

EXEMPLE 3 (mesures 141 à 152)

Cette séquence est organisée à partir d'un multiphonique de Saxophone (**Sxt11**).

- Le multiphonique est donné tel quel par le Saxophone.

- Le Hautbois et la Clarinette en utilisent les composants aigus.

- Le basson développe une échelle (**PGCC**) construite sur un spectre contenant **Sxt11**. Son point de départ (Do 3, mes. 146) est une note du multiphonique ; son point d'arrivée (La 1, mes. 150) est un redoublement de la fondamentale de ce spectre.

Au chiffre V (mes. 152), **Sxt11** est simulé par l'ensemble des instruments excepté le Basson qui fait entendre le redoublement d'une nouvelle fondamentale (Si 1).

EXEMPLE 4 (mesures 152 à 158)

Ce fragment qui est la suite du précédent montre la transformation d'un multiphonique de Saxophone, **Sxt11**, simulé, en un multiphonique de Basson **Bn12**, d'abord simulé puis donné comme tel par le Basson (chiffre VI, mes. 158). Dans cette transformation deux notes restent constantes : Do 3 au Saxophone, note commune aux deux multiphoniques, et La 1 au Basson, redoublement de la fondamentale.

EXEMPLE 5 (mesures 100 à 128)

Cette séquence est construite sur le début de l'automate de la figure 25, caractérisé par la note pivot Sol 2, commune à tous les multiphoniques. Elle se termine ici lors de l'entrée du second pivot Do et de la simulation du multiphonique de Basson **Bn30**.

Altérations utilisées dans les exemples musicaux

♯	♯	♯	♯
+0	+1/4	+1/2	+3/4
♭	♭	♭	♭
-3/4	-1/2	-1/4	-0

EXEMPLE 3 (mesures 141 à 152)

RETEINIR

Musical score for measures 141-152, featuring five staves: Piccolo (Pic.), Horn (Hb.), Clarinet (Cl.), Saxophone Tenor (Sx.T), and Bassoon (Bn.). The score includes dynamic markings such as *ppp*, *mp*, and *mp sost*. The Saxophone Tenor part has a *mp* marking at measure 141. The Bassoon part has a *ppp* marking at measure 152. The score is written in a single system with measure numbers 141, 142, 143, 144, and 145 indicated at the beginning of each staff.

TRES LENT

Musical score for measures 146-152, featuring five staves: Piccolo (Pic.), Horn (Hb.), Clarinet (Cl.), Saxophone Tenor (Sx.T), and Bassoon (Bn.). The score includes dynamic markings such as *ppp*, *mp*, and *ppp*. The Saxophone Tenor part has a *mp* marking at measure 147. The Clarinet part has a *ppp* marking at measure 148. The Bassoon part has a *ppp* marking at measure 152. The score is written in a single system with measure numbers 146, 147, 148, 149, and 150 indicated at the beginning of each staff. The lyrics "à l'inst. id" and "à l'inst. ab. chant. de couleur" are present in the Saxophone Tenor and Clarinet parts respectively.

EXEMPLE 4 (mesure 153 à 158)

MODERE

VI

153 Pic. f sfz

153 Hb. f sfz

153 Cl. f sfz

153 Sax. f sfz

153 Bn. f sfz

Lent - Roulement - vite

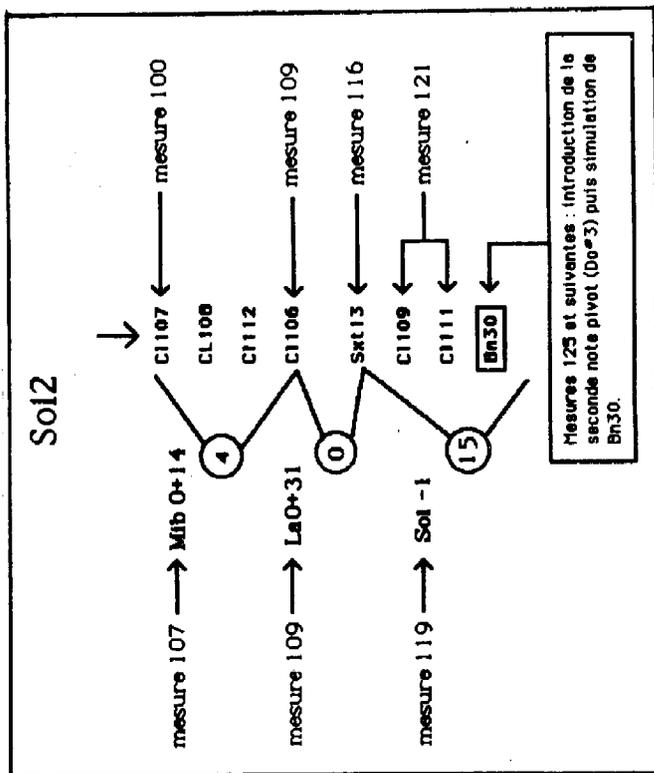


Fig. 25 bis - Sur cet extrait de l'automate de la Fig. 25 sont référencées les mesures correspondantes dans le fragment de partition qui suit.

6. Annexe : musiciens ayant collaboré à cette recherche

FLUTE	Pierre-Yves ARTAUD Gérard GARCIN Istvan MATUZ (Hongrie)	CLARINETTE	Armand ANGSTER Jean-Noël CROCC
HAUTBOIS	Maurice BOURGUE Claude FORAY Didier PATEAU Jacques ZANNETTACCI	SAXOPHONE	Daniel KIENTZY Lauri NYKOPP (Finlande)
		BASSON	Jean-Louis FIAT Alexandre OUZOUNOFF

7. Bibliographie

- (ART,82)** ARTAUD P.Y., GEAY G. (1980) **Flûtes au présent**, Jobert & Transatlantique, Paris.
- (ASS,84a)** ASSAYAG G., MALHERBE C. (1984) **Texte/Musique : un Etabli d'Outils Formels**. Communication au Colloque «Voix Nouvelles», Royaumont, juin 84.
- (ASS,84b)** ASSAYAG G., MALHERBE C. (1984) **Manipulations et représentations d'objets musicaux**, Communication ICMC Musical Editing and Printing Session, IRCAM, Paris, Oct. 1984
- (BAR,67)** BARTOLOZZI B. (1967) **New sounds for woodwind**, Oxford University Press
- (CAS,74)** CASTELLENGO M. (1974) **Sons multiples non harmoniques sur les tuyaux à bouche**, Bulletin GAM n°34, Paris.
- (CAS,82)** CASTELLENGO M. (1981) **Sons Multiphoniques aux instruments à vent**, Rapport IRCAM n°34, Paris.
- (FAR,78)** FARMER G.J. (1978) **Clarinet Multiphonics**, The Instrumentalist, Oct. 1978, 681-683.
- (GON,79)** GONDRAN M., MINOUX M. (1979) **Graphes et algorithmes**, Eyrolles, Paris.
- (HOP,69)** HOPCROFT J.E., ULLMAN J.D. (1969) **Formal langages and their relations to automata**, Addison-Wesley, Reading.
- (KIE,82)** KIENTZY D. (1982) **Les sons multiples aux saxophones**, Salabert, Paris
- (MAL,80)** MALHERBE C. (1980) **Selon pour flûte en Sol : Un modèle compositionnel à partir de sons complexes**, Communication Festival de La Rochelle, juin 1980 ; Colloque sur les Multiphoniques, IRCAM, déc. 1983.
- (OUZ,85)** OUZOUNOFF A. (1985) **Actuellement le basson**, Salabert, Paris.
- (POS,81)** POST N. (1981) **Multiphonics for the oboe**, Interface, 10,2, 113-136.
- (REH,73)** REHFELD P. (1969) **Multiphonics for clarinet**, The Clarinet, 1, 1, 9-15.
- (RIO,79)** RIOTTE A. (1979) **Formalisations de Structures Musicales**, Université Paris VIII Vincennes, Paris.
- (TER,82a)** TERHARDT E., STOLL G., SEEWANN M. (1982) **Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals**, Journal of the Acoustical Society of America, 71, 3, 679-688.
- (TER,82b)** TERHARDT E., STOLL G., SEEWANN M. (1982) **Pitch of complex signals according to virtual pitch theory : tests, examples and predictions**, Journal of the Acoustical Society of America, 54, 671-678.
- (VAL,77)** VALENZIANO N.J. (1977) **Contemporary notational, symbols and performance techniques for the clarinet**, The Instrumentalist, March 1977, 658-666.
- (XEN,76)** XENAKIS Y. (1976) **Musique et Architecture**, Casterman, Paris.

PRIX : 25 F

IRCAM 31, RUE SAINT-MERRE F-75004 PARIS TELEPHONE : 277.12.33 POSTE 48-43