

1360367615

[M] 1982 POTARD, Y.

~~S N 82 / 290 B~~

ETUDE SUR LA FUSION D'UN SON HARMONIQUE A L'AIDE DE L'ORDINATEUR.

Yves POTARD

Thèse de Docteur Ingénieur.



Service Commun de la Documentation
INPI
Nancy-Brabois

Thèse soutenue le 23-octobre 1982 à l'école des Mines de Nancy devant le jury:

M.

D. Cou
G. Cha
J.P. Ha
D 136 036761 5



J.C. Risset
X. Rodet
C. Sorin
D. Wessel

MMe
M.

Remerciements

Je remercie tout particulièrement G. Charbonneau dont les travaux personnels ont été pour moi une source d'inspiration continuelle et fructueuse et dont l'aide généreuse tout au long de ce travail a été décisive.

Je remercie M. Coulon d'avoir accepté de présider le jury et ainsi de symboliser le soutien de l'INPL à ce travail.

Je remercie vivement J.P. Haton, qui a su initier ce travail, me guider pour les premiers pas et me soutenir patiemment jusqu'à son achèvement.

Je remercie chaleureusement J.C. Risset dont les interventions dans ce travail ont été éclairantes. Je lui doit aussi de m'avoir fourni le source du programme de synthèse Music5 qui a été utilisé dans ce travail.

Je remercie Xavier Rodet d'avoir participé au jury, et souhaite que notre collaboration à l'IRCAM se poursuive dans le même climat de bonne et fructueuse entente.

Je remercie Cristel Sorin de s'être intéressée à ce travail, n'hésitant pas à user de la critique dans le sens le plus fructueux, et d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie D. Wessel d'avoir consenti à faire partie du jury, manifestant ainsi la présence de la psychoacoustique anglosaxonne.

Je remercie également la DGRST d'avoir soutenue financièrement ce projet deux années durant.

Je remercie l'administration de l'INPL et tout particulièrement Mlle Siret dont la bienveillance et la bonne humeur ne se sont jamais démenties.

Je remercie l'IRCAM pour avoir assuré le soutien logistique nécessaire à la réalisation de ce document.



RESUME

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la psychoacoustique ou science de la perception des sons. L'outil informatique a toutefois été privilégié à deux niveaux, pour la synthèse numérique des stimuli sonores utilisés au cours de l'expérimentation et pour l'analyse statistique des résultats

Dans un premier temps nous décrivons l'environnement informatique du psychoacousticien, qui lui permet de faire des analyses puissantes sur des sons naturels, de synthétiser des stimuli avec une grande sûreté, de disposer de moyens très performants d'analyse statistique des réponses des sujets participants aux expériences. Nous insistons en particulier sur la méthode d'analyse des correspondances de J.P. Benzécri.

Dans la seconde partie, nous tentons un tour d'horizon assez complet des connaissances actuelles sur la fonction auditive, toutefois nous y développons plus particulièrement ce qui touche à la perception de l'attribut de hauteur ainsi qu'au phénomène de fusion, points qui concernent plus directement notre travail.

La troisième partie expose notre travail de recherche. Il s'agit d'une expérience psychoacoustique investiguant la fusion d'un son harmonique. En effet nous montrons que même un son harmonique peut être perçu comme une entité multiple, comme la superposition de plusieurs sources sonores, ceci en fonction de son contenu spectral. Pour cela nous proposons à l'écoute de sujets non entraînés une série de couples de stimuli sonores harmoniques choisis pour leur caractère ambigu. Deux types de jugements sur la fusion sont demandés, l'un indirect sous forme d'un jugement de hauteur, l'autre direct. Les résultats sont analysés par le programme Bentab d'analyse des correspondances. Les données sont présentées de différentes façons. Ces analyses montrent la consistance du jugement de fusion entre les divers sujets et entre les deux types de jugements, direct et indirect. Elles montrent l'importance de la présentation des données pour l'analyse factorielle et la variété des éclairages qui en résultent. Nous nous intéressons en particulier aux effets contextuels ainsi révélés. Puis nous tentons d'en déduire des conséquences sur les théories de la perception de la hauteur et sur la perception des stimuli harmoniques de manière plus générale, dont nous ébauchons une modélisation.



à mon frère, Jean-François.



TABLE DES MATIERES

Chapitre 1

L'ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE POUR L'ETUDE DES SONS PAR ORDINATEUR

1.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX	2
1.1.1 Interet de l'ordinateur pour l'analyse et la synthese des sons	2
1.1.2 L'echantillonnage des signaux	3
1.1.3 La conversion	4
1.2 LES PROGRAMMES	6
1.2.1 L'analyse	6
1.2.2 La synthese	8
1.2.2.1 MUSIC 5	1
Description sommaire de la structure du programme	1
Adaptation du programme Music 5 sur Mitra 125	1
1.2.3 Analyse des correspondances: le programme BENTAB	1
Presentation des donnees	1
Principes de l'analyse des correspondances	1
1.3 BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE PREMIER:	2

Chapitre 2

LA FONCTION AUDITIVE

2.1 - POINT DE VUE PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE	26
2.1.1 Stimulus externe	26
2.1.2. Stimulus interne: etude electrophysiologique	26
2.2 - POINT DE VUE PSYCHOACOUSTIQUE	31
2.2.1 SONS SIMPLES	31
2.2.1.1 Seuil d'audition. Courbes isosoniques. Seuil differentiel de frequences.	31
2.2.1.2 Bande critique	34
2.2.1.3 Separation de sons purs	34
2.2.1.4 Sons de combinaison	36
2.2.2 SONS COMPLEXES	37
2.2.2.1 Hauteur periodique	37
A. Presentation	37
B. Hauteur de sons inharmoniques	37
C. Parametres influencant la perception de la hauteur periodique	37
1. Nombre de composants	38
2. Position des harmoniques	38
3. Phase des composants	39



4. Presentation binaurculaire des harmoniques	39
5. Relation entre hauteur periodique et hauteur des harmoniques	39
D. Conclusions sur la hauteur periodique	40
- Hypothese b? -	40
- Ou hypothese a? -	40
- Les deux -	41
- Hauteur basse -	42
- Essai de reponse -	42
E. 3 Theories sur la hauteur periodique	45
1. Le modele de Terhard : theorie de la hauteur virtuelle	45
2. Theorie de l'anamorphose (pattern transformation theory)	48
3. Theorie du processeur optimal (optimum processor theory).	49
4. Conclusions.	53
2.2.3. FUSION ET MELANGE DE SONS COMPLEXES.	54
Melange de sons complexes	55
2.3 BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE DEUX	57

Chapitre 3

EXPERIENCE PSYCHOACOUSTIQUE SUR LA FUSION D'UN COMPLEXE HARMONIQUE

3.0 INTRODUCTION:	70
3.1 PROTOCOLE EXPERIMENTAL	71
3.2 LES RESULTATS	76
3.2.1 Analyse des Jugements de hauteur.	76
premiere analyse	76
deuxieme analyse	78
troisieme analyse	79
Analyse par couples	79
-Symetrie-	80
Analyse par serie	80
Analyse par classe:series confondues	81
Analyse par classe:series separees	81
3.2.2 Analyse des Jugements de fusion.	84
3.2.3 Tentative de synthese.premieres conclusions.	86
3.3 CONCLUSIONS:	90
-Quelques perspectives-	90
3.4 Bibliographie chapitre trois	92

ANNEXES

1- Utilisation du sous-programme de conversion de J-C Risset.	93
2- Generation de MUSIC5	95
3- Utilisation de la version Music5 pour MITRA 125	99
4- Spectres utilises dans l'experience	101
5- Ordre de presentation des stimuli	102
6- Partitions Music5 utilisees dans l'experience	105
7- LES RESULTATS BRUTS	107



Chapitre 1

L'ENVIRONNEMENT INFORMATIQUE
POUR L'ETUDE DES SONS PAR ORDINATEUR



I. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1.1. Intérêt de l'ordinateur pour l'analyse et la synthèse des sons.

Un son est la propagation d'une variation temporelle de la pression de l'air. On peut le représenter par une fonction de la pression et du temps en un lieu donné. Les sons qui se produisent naturellement sont souvent très complexes et ne peuvent qu'exceptionnellement se traduire par une fonction périodique. Cependant, ils contiennent très souvent des éléments quasipériodiques car ils sont généralement la production d'éléments physiques en état de résonance. C'est pourquoi ils sont étudiés communément avec les instruments mathématiques qui gèrent la périodicité (spectre en premier lieu).

Les sons ont été longtemps analysés puis synthétisés avec des moyens analogiques, mais ceux-ci ne fournissent pas de données exploitables pour maîtriser la complexité des sons à l'analyse et sont d'une précision trop limitée pour la synthèse de sons ayant la complexité des sons naturels.

L'ordinateur se révèle être un instrument d'analyse très précis et fiable. Le signal à analyser est stocké en mémoire et l'ordinateur peut à loisir lui appliquer des traitements sophistiqués à l'abri des lois physiques et des contraintes du temps réel, peut se livrer à une débauche de traitements comparatifs, statistiques, classifiants avec une puissance sans commune mesure avec celle possible à partir de données analogiques.

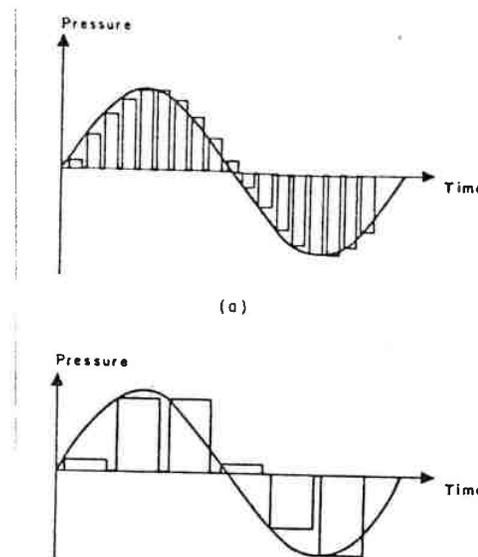
L'ordinateur peut également synthétiser des sons d'une complexité aussi grande qu'on le désire. S'il n'y a pas de limitation théorique à cette complexité, il subsiste toutefois le seuil de complexité que les programmes de synthèse ne peuvent dépasser sans perdre le contrôle des événements sonores produits, limites dues à la structure des programmes, à la science des utilisateurs, à l'état d'avancement des sciences de l'audition, de l'acoustique, en général.

La richesse du résultat de la synthèse et le temps de calcul sont antagonistes, aussi celle-ci ne se fera qu'exceptionnellement en temps réel. Lorsque cette synthèse a des buts scientifiques, par exemple l'étude de la perception auditive, cela n'a pas beaucoup d'importance. Il n'en est pas de même si cette synthèse a un but musical car le musicien réclame une grande production d'une part et d'autre part rêve de synthèse en temps réel dans l'optique du concert et de la manipulation avec un retour (feedback) instantané des sons. C'est pourquoi on a créé des systèmes dits hybrides où l'ordinateur ne synthétise pas directement le signal mais agit sur les entrées d'un synthétiseur analogique (système hybride de Vincennes [5]) ou sur un synthétiseur digital programmable sophistiqué comme les machines de l'IRCAM: 4A, 4C, 4X [6]. Ces solutions nécessitent une technologie raffinée et coûteuse alors que la synthèse directe par ordinateur requière un environnement matériel supplémentaire peu conséquent. Pour ce travail j'ai utilisé un système d'analyse et de synthèse entièrement numérique mis en place à l'Université de Nancy I dans le laboratoire du professeur HATON. Comment fonctionne-t-il? Un ordinateur utilise des données numériques discrètes alors qu'un signal sonore est continu. La solution consiste à échantillonner le signal.

1.2. L'échantillonnage des signaux

L'échantillonnage est la réduction d'un signal continu $s(t)$ à un ensemble de valeurs discrètes régulièrement réparties dans le temps suivant une fréquence dite d'échantillonnage (F) (figure [fond.1]).

Figure [fond.1]



Exemple d'échantillonnage à divers vitesses d'échantillonnage (a) rapide (b) lent.

- Suivant certaines conditions que précise le théorème de Shannon [11] (démontré auparavant par Whittaker(1917)) il y a équivalence (du point de vue de la quantité d'information) entre le signal et l'ensemble des valeurs discrètes.

$$s(t), t \in [0, T] \sim \{s(i/F), i \in [0, T*F]\}$$

Cette équivalence se produit si le signal a un spectre borné et si cette borne est inférieure à $F/2$. Sinon toute fréquence du signal supérieure à $F/2$ se retrouve repliée dans la bande $[0, F/2]$. Si cela peut être utilisé, notamment en synthèse pour obtenir des effets spéciaux, ce repliement (foldover) doit être généralement évité. Pour cela lorsqu'on échantillonne un signal, celui-ci doit être préalablement filtré par un filtre passe-bas éliminant du signal toutes les fréquences dépassant la moitié de la fréquence d'échantillonnage. De la même façon on ne pourra pas synthétiser un signal acoustique contenant des fréquences supérieures à $F/2$. Le choix de la fréquence d'échantillonnage va être un compromis entre le désir de qualité acoustique (possibilité de hautes fréquences) et le souci de minimiser la quantité d'échantillons à

traiter (pour épargner place mémoire et temps de calcul) donc le choix d'une fréquence basse. Une synthèse musicale de qualité est possible avec une fréquence d'échantillonnage de 20000 Hz, une synthèse de parole convenable ne nécessite que la moitié.

Pour réaliser physiquement cette équivalence entre le signal analogique et le signal échantillonné, il est nécessaire de relier à l'ordinateur deux organes appelés convertisseurs.

1.3 La conversion

Le convertisseur analogique-numérique (A/N) assure l'échantillonnage d'un signal et sert donc à introduire des sons réels dans la mémoire de l'ordinateur, ceci à fin d'analyse ou pour une utilisation musicale.

Le convertisseur numérique-analogique (N/A) reconstitue un signal analogique à partir du signal numérique et sert donc à la synthèse.

Les convertisseurs fonctionnent avec un certain nombre de bits qui donnent l'échelle des valeurs discrètes possibles. Ce nombre varie entre 4 et 16 et une valeur courante est 12 bits. C'est celle du convertisseur que j'ai utilisé. L'information se quantifie donc à des valeurs comprises entre -2047 et $+2048$ (2^{11}). L'erreur maximale introduite par la quantification par arrondi est de $.5/4095$ soit 0.0122% . Le bruit $e(n)$ introduit ainsi a des propriétés statistiques bien établies: $e(n)$ est distribué aléatoirement en amplitude sur tout l'intervalle de quantification; $e(n)$ est une suite non corrélée (bruit blanc), sa corrélation avec le signal quantifié est nulle. Si B est le nombre de bits du convertisseur la puissance de ce bruit est, en supposant que la tension crête en entrée est de 1 volt, $2^{-(2B)}/3$ WATTS. Le calcul du rapport signal sur bruit dépend alors de la nature du signal d'entrée dont la puissance à amplitude maximale (qui ne provoque pas de saturation) n'est pas constante. Ainsi une sinusoïde à amplitude maximale a une puissance de $1/2$ Watts soit dans ce cas un rapport signal sur bruit donnée par la formule $S/B = 1.8 + 6B$. Mais avec un signal d'amplitude aléatoire le rapport peut être plus médiocre. Ainsi si l'amplitude suit une distribution gaussienne et si on fixe le niveau du signal de façon à ajuster la saturation sur 3 fois la déviation standard (ce qui veut dire une probabilité de $.2\%$ qu'il y ait saturation) la formule devient $S/B = -5 + 6B$ soit une perte de presque 7 dB.

Programmes gérant la conversion

Pour assurer effectivement la conversion, un système doit comporter deux programmes fonctionnant en temps réel pour assurer le transfert des échantillons entre la mémoire et les convertisseurs. Le synchronisme de ces opérations est assuré par une horloge dont le débit est fonction évidemment de la fréquence d'échantillonnage.

Sur la plupart des systèmes cette conversion se réduit à un transfert entre une mémoire de masse et les convertisseurs, avec un traitement

inexistant sur les échantillons. Le choix de la mémoire de masse dépend du matériel disponible. Les bandes magnétiques ont généralement une grande capacité, se prêtent bien à la conservation de fichiers digitaux à cause de leur coût modique. Mais le manque de souplesse d'accès est un lourd handicap. D'autre part, si sur la plupart des systèmes il existe déjà des lecteurs de disque avec un accès rapide, il est plus rare de rencontrer des dérouleurs de bande présentant une vitesse d'accès compatible avec la conversion (300 000 bits/s). Par contre, le disque magnétique présente l'avantage de sa souplesse d'accès. (Pour la synthèse cela signifie l'écoute de n'importe quelle partie d'un fichier et de n'importe quel fichier à tout instant) et de sa rapidité. Leur capacité de stockage est toutefois souvent plus réduite (à cause d'un prix de revient plus élevé à l'achat.)

Le système d'ORSAY (HP 2100, Charbonneau 1976 [4]) utilise un lecteur de bandes (>15 mn en monophonie et à 20000 Hz). A l'IRCAM (PDP10), le stockage est fait sur disques (16 mn en monophonie et à 20000 Hz pour un disque entier) ainsi qu'à Nancy I (MITRA 125, un peu moins de 2mn dans les mêmes conditions).

A Nancy, les deux programmes utilisent les facilités de programmation en temps réel sur Mitra 125. Cela se traduit par la possibilité de faire tourner simultanément au programme temps-réel assurant la conversion, un autre programme traitant les échantillons par exemple, dans le sens analogique digital (compression, écrétage, vu-mètre digital etc...) Dans l'autre sens le temps subsistant est trop faible pour faire autre chose qu'une synthèse très simple en temps réel.

LES PROGRAMMES

2.1. L'analyse

Pour l'acousticien et le musicien l'analyse des signaux acoustiques présente un grand intérêt. Sur un système permettant la digitalisation d'un signal se développent naturellement d'importants programmes d'analyse. Ceux-ci doivent accomplir deux tâches, d'une part effectuer correctement le traitement du signal désiré par l'utilisateur, d'autre part fournir des résultats sous une forme lisible.

Le premier point dépend des préoccupations de l'utilisateur. Toutefois pour l'étude des signaux quasipériodique, l'extraction de la hauteur du fondamental (pitch), de l'amplitude du signal et de son spectre est d'usage général. Les chercheurs qui étudient la parole, s'intéressent à la segmentation du signal de parole en phonèmes, les musiciens à l'extraction des caractéristiques du vibrato et les deux à la recherche des formants sur les sons où cette notion semble valide. Cette liste est loin d'être exhaustive bien sûr.

Le deuxième point n'est pas négligeable. La sortie graphique de caractères (imprimante, télétype) présente sur tous les systèmes se prête très mal à la représentation des résultats de programmes d'analyse autres que statistiques qui sont souvent des fonctions. Aussi une console de visualisation de graphiques est indispensable. On pourra ainsi visualiser l'évolution du pitch, de l'amplitude, d'un signal au cours du temps, des spectres instantanés, et même des événements à 3 dimensions: comme l'évolution du spectre au cours du temps, soit en simulant les 3 dimensions (spectres en relief), soit en utilisant la représentation en sonagrammes.

Une sortie sur papier de ces représentations graphiques est également très utile pour se constituer des bibliothèques un peu importantes ou faire des comparaisons portant sur un grand nombre de graphiques, mais ce type de sortie graphique (table traçante, hard copy) reste onéreux.

A Orsay, Stéphane Chabrel a développé un programme d'analyse complet et conversationnel. (Chabrel et Charbonneau, 1976 [3]). Celui-ci permet d'écouter une portion quelconque d'un signal de son, de le visualiser, de le transformer par des opérations arithmétiques, logarithmiques, d'intégration, de dérivation, sans oublier la transformée de Fourier. Ces opérations élémentaires peuvent s'enchaîner à la main ou par des macros, multipliant la puissance du programme (sonagramme, enveloppe globale, enveloppes de chaque harmonique, cepstre, transformée de Hilbert, etc...). (pour une description complète des possibilités voir Charbonneau, 1976 [4]).

A Nancy un programme semblable a été développé par Claude Sanchez. Ce programme ("l'observateur") a été écrit pour faire du traitement de signal dans le cadre de travaux sur la reconnaissance de la parole continue. Un premier niveau du programme consiste à définir divers paramètres et notamment une fenêtre globale du signal que l'on veut traiter qui se visualise sur un écran graphique. On peut alors définir une sous-portion de ce signal à partir de repères temporels ou visuels

(curseurs sur l'écran) sur lequel on peut enclancher diverses actions comme calculer la transformée de Fourier ou le spectre LPC (prédiction linéaire) visualisés aussitôt sur l'écran, ainsi qu'un grand nombre d'autres dont l'action d'écoute. Ainsi une relation fort directe peut s'établir entre l'analyse du son et son audition. La gestion astucieuse de l'écran (superposition de tracés, cadrage très libre de ces tracés) pallie largement le manque de sortie de documents graphiques sur papier. La structure modulaire du programme permet facilement l'insertion de nouvelles actions suivant la demande des utilisateurs ou la mise au point d'algorithmes de recherche comme celui de segmentation automatique de la parole en phonème et celui d'extractions d'indices prosodiques.

Pour ce travail, les outils d'analyse ont été peu utilisés, essentiellement ils ont servi de moyen de contrôle de la qualité et de l'exactitude de la synthèse réalisée.

2.2 La synthèse

Un programme de synthèse est destiné à assurer, à partir des représentations abstraites des sons et des événements musicaux de l'utilisateur, la production du signal digitalisé.

Sa face utilisateur est un analyseur syntaxique d'un langage véhiculant des concepts musicaux, acoustiques et algorithmiques. Sa face production est un module dont la tâche est de satisfaire le plus rapidement possible les ordres de synthèse provenant de l'analyseur syntaxique.

Quels sont les qualités d'un programme de synthèse?

- sa généralité, c'est-à-dire sa capacité à produire les signaux les plus divers, sa souplesse, c'est-à-dire la facilité avec laquelle sont décrits un événement sonore et son évolution dans le temps.

- sa puissance et sa rapidité, qualité liées à l'écriture du programme, la première étant la quantité d'événements sonores que l'on peut créer en une exécution et à un moment donné. La seconde peut entraîner des choix dans les algorithmes de synthèse limitant les généralités du programme.

Comment cela se traduit-il concrètement.

. Le programme *Auditu* développé par F. Brown et coll [2] utilise des algorithmes récurrentiels pour la génération du son qui limitent l'événement sonore individuel à des fonctions du type

$$F(\alpha, \beta, \phi, X, k, A(t)) = A(t) \sin(\alpha + \phi) \left[\frac{1-X}{1-X \cos \beta} \right]^k$$

où $A(t)$ est une enveloppe, ϕ une phase initiale, α et β deux incréments, X le taux d'harmonique. La richesse de cet événement élémentaire suffit à former un son mais on peut obtenir des sons beaucoup plus divers en additionnant ces événements de façon à former un objet sonore fusionné (ils peuvent décrire chaque partiel d'un son. Au niveau de l'utilisateur on décrit complètement ces fonctions, notamment $A(t)$ qui est limité à une suite de segments droits ou exponentiels, les variations de X , de fréquence (vibrato, glissando), d'amplitude, l'ensemble des descriptions constituant un instrument catalogable. On peut alors écrire une partition qui dicte la succession dans le temps des notes (fréquence, amplitude, durée) auxquelles on affecte un instrument. La polyphonie est possible.

La principale limitation provient du type d'événement sonore élémentaire qui ne peut être façonné à volonté, mais en contre-partie la génération récurrentielle de cet événement permet une très grande rapidité de calcul. La rigidité de l'interface utilisateur tient à des raisons informatiques (entrée de données par cartes et non conversationnelle).

Un programme qui présente certaines analogies avec le précédent est développé actuellement à l'IRCAM par Xavier Rodet, Gerald Bennett et moi-même. (Xavier Rodet et Gerald Bennett, 1980 [9]). En effet le cœur

de la synthèse est la réalisation d'une FOF (forme d'onde formantique) qui est le produit d'une sinusoïde amortie par une enveloppe (figure [prog.1]). On peut contrôler la fréquence de la sinusoïde, le temps de l'attaque, la quantité d'amortissement et la durée de l'ensemble. Cet événement est encore plus rudimentaire que le précédent. Utilisé comme grain macroscopique, il peut constituer la trame de sons percussifs, mais il peut également être considéré comme un événement microscopique. Répété de façon périodique (figure [prog.2]) on obtient un signal dont le fondamental est la fréquence de répétition et dont le spectre est un formant dont les caractéristiques sont reliées simplement à la forme de l'enveloppe de la FOF, notamment la fréquence du formant est la fréquence de la sinusoïde.. (Figure [prog.3]). La superposition de plusieurs FOF et leur répétition synchronisée produit un son dont le spectre est la superposition des formants correspondants à chaque FOF. On obtient ainsi un son complexe décrit en terme de formants. (Figure [prog.4])

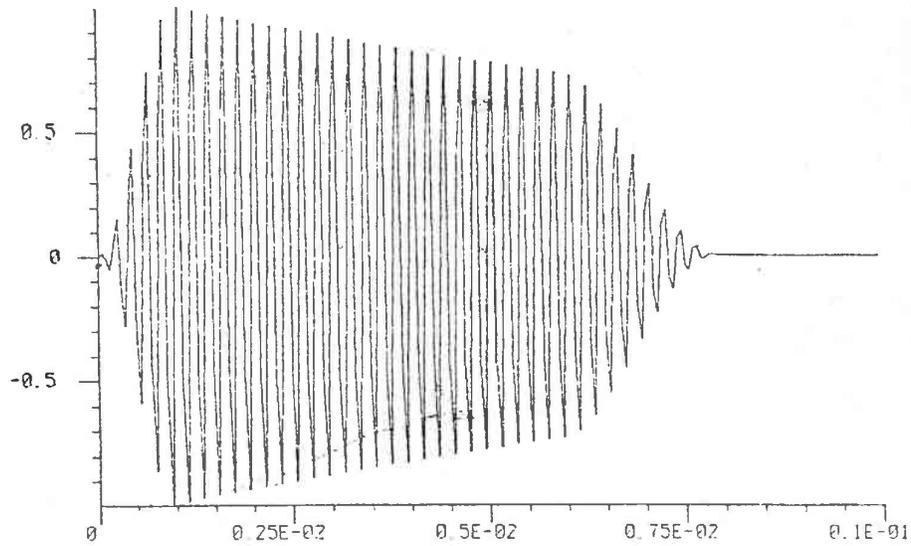
Cette synthèse est physiquement très proche de la façon dont la voix fonctionne (excitation d'un conduit vocal par une onde glottale) et de nombreux instruments (excitation, caisse de résonance).

L'utilisateur manie un instrument monodique gouvernable par un grand nombre de paramètres. Si un paramètre ne doit pas évoluer au cours du temps, il suffit de lui assigner une valeur initiale sinon l'utilisateur peut décrire une fonction définie segment par segment (valeur, temps) relativement à la durée totale de la synthèse.

Une première classe de paramètres décide du spectre: nombre de formants, fréquence, temps d'excitation, amplitude et largeur de bande de chaque formant. Une seconde classe décrit l'évolution du fondamental (sa fréquence moyenne, variation aléatoire de cette fréquence, vibrato, variation aléatoire du vibrato). Une troisième classe contrôle l'amplitude (enveloppe, modulation d'amplitude). Une dernière contient des contrôles sur la synthèse. On peut choisir un fonctionnement "automatique" qui calcule les largeurs de bande et l'amplitude des formants à partir de leurs fréquences et d'un modèle de la voix paramétré. Sont également disponibles un calcul de l'évolution du spectre vocal avec l'intensité, une modélisation des voix d'hommes et de femmes. Chaque paramètre possède une valeur par défaut, ce qui fait que en ne changeant rien le programme produit déjà un résultat sonore riche. L'utilisateur peut petit-à-petit prendre connaissance de chaque paramètre et s'affranchir des valeurs par défaut. Les valeurs sont entrées à partir d'un fichier et/ou entrées directement en mode conversationnel.

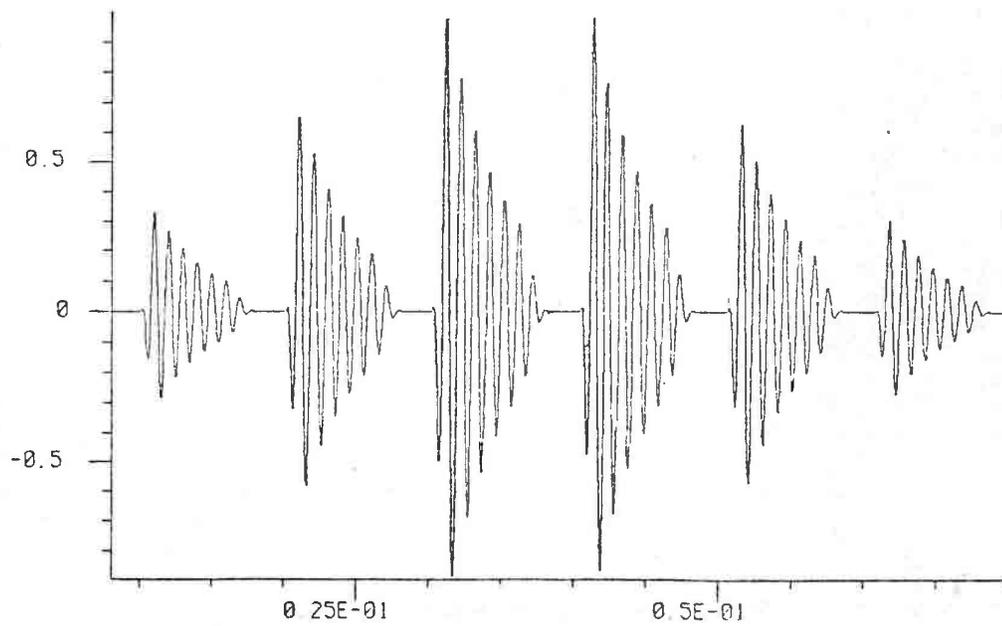
La gestion des "notes" reste sommaire: on peut décrire successivement chaque note par sa fréquence et sa durée, le programme les liant automatiquement. Des procédures mises à la disposition de l'utilisateur permettent à celui-ci d'inclure dans le programme ses propres algorithmes, écrits dans le langage du programme: Sail, un dérivé évolué d'Algol. Il est très facile notamment d'établir des corrélations sophistiquées entre des paramètres existants et d'introduire de nouveaux paramètres de contrôle. Cela peut être utilisé pour modéliser des voix particulières (de tel chanteur) mais aussi pour assurer des transitions entre des notes ou pour tout autre chose.

Figure [prog.1]



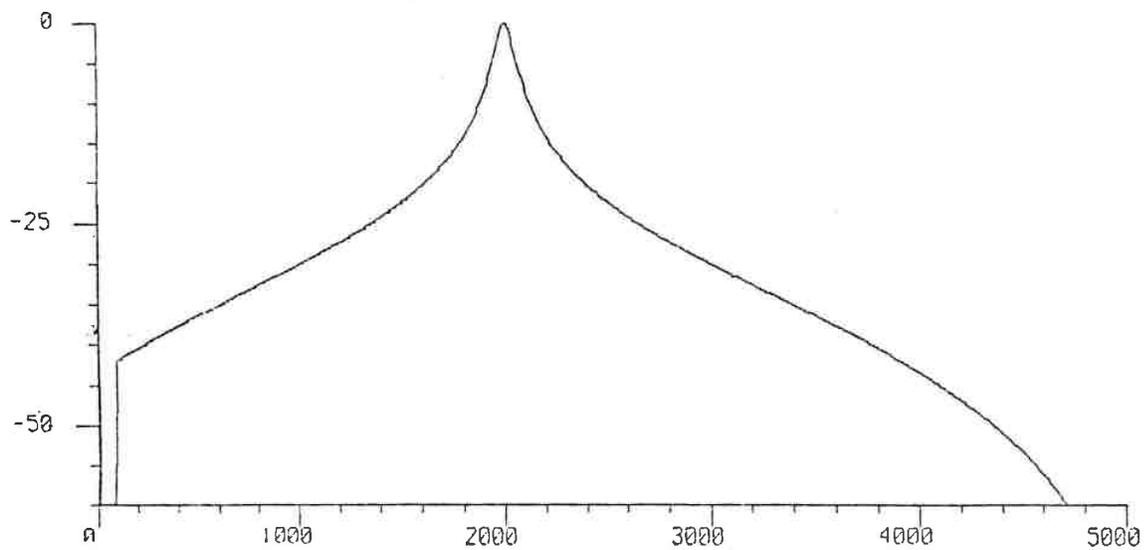
Enveloppe locale

Figure [prog.2]



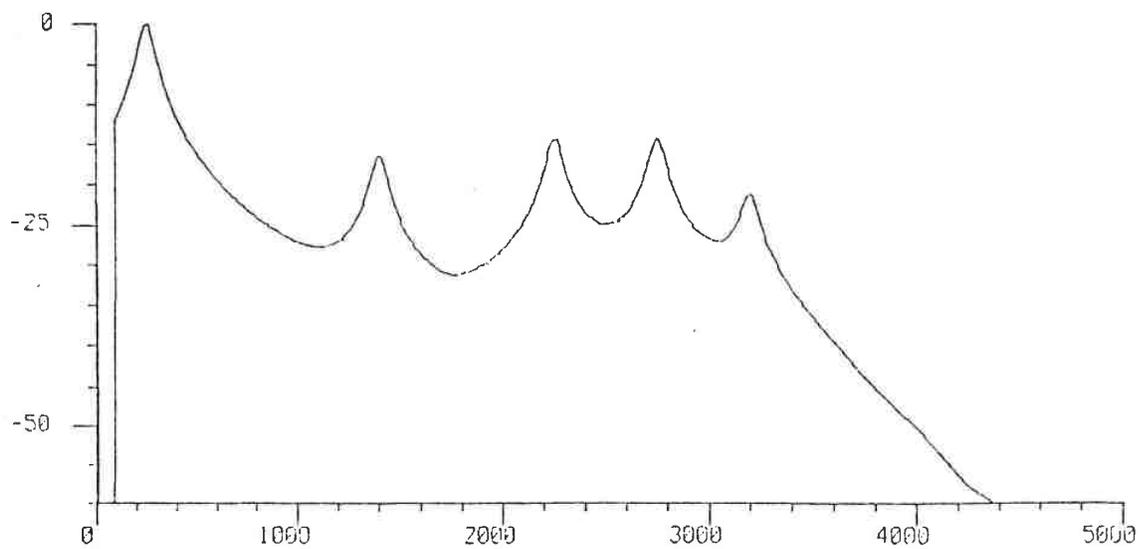
Excitation répétée avec une enveloppe globale.

Figure [prog.3]



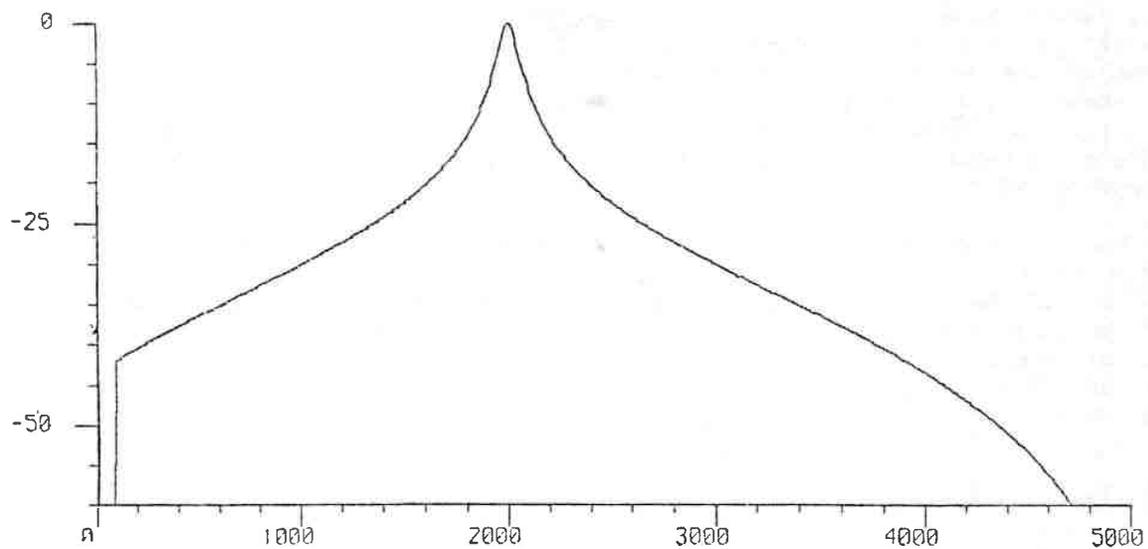
Enveloppe spectrale d'un formant.

Figure [prog.4]



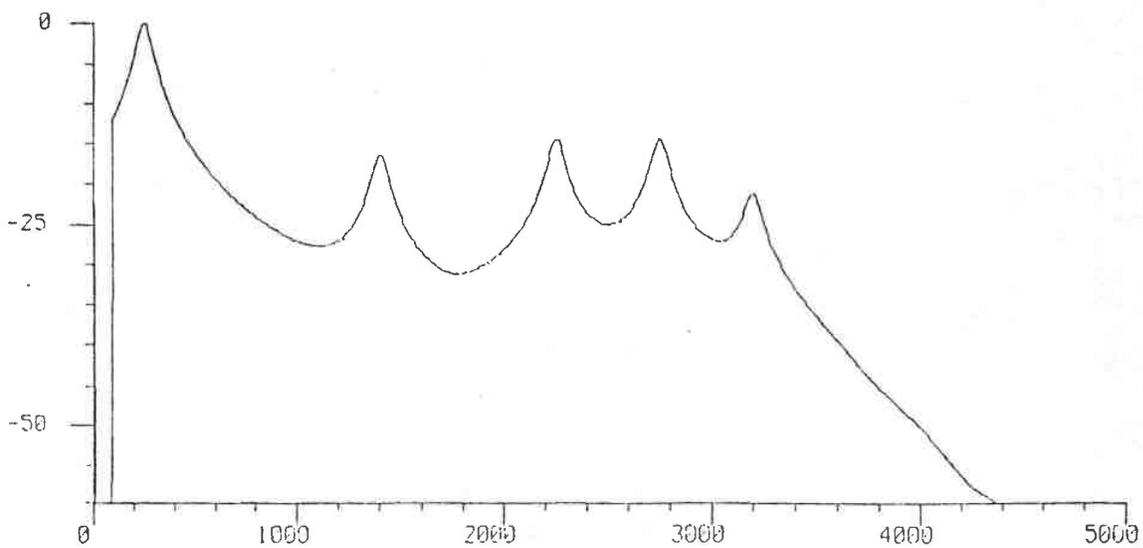
Enveloppe spectrale de plusieurs formants.

Figure [prog.3]



Enveloppe spectrale d'un formant.

Figure [prog.4]



Enveloppe spectrale de plusieurs formants.

Par contraste avec le programme précédent, ce programme fournit peu de moyens de "jouer" facilement une pièce musicale polyphonique d'écriture classique, par contre il traite facilement des mélodies, permet un lié et un phrasé évolué. D'autre part par le jeu de ses nombreux paramètres, des algorithmes internes liant ou corrigeant ces paramètres, il permet un grand raffinement dans la qualité sonore du résultat, permettant notamment de synthétiser des voix chantées d'un très grand naturel. C'est également un outil de recherche acoustique de premier plan.

Une dernière série de programmes (si on écarte ceux destinés à la synthèse hybride) est constituée par la famille des programmes de Max Mathews [8] Music n, le plus célèbre est Music 5, mais il y a également le puissant Music 10 [10 comme pdp 10], Music 11 [pour pdp 11], Music 4 qui utilise des capacités graphiques. Je parlerai plus particulièrement de Music 5 car c'est celui que j'ai utilisé comme outil de synthèse pour ce travail.

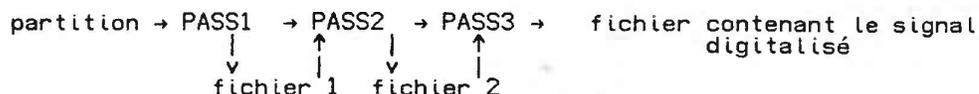
2.2.1. MUSIC 5

Ce programme est construit sur des concepts familiers du musicien et de l'électroacousticien. L'enchaînement des événements sonores est décrit par une "partition" donnant le début et la durée de cet événement. D'autre part, on peut construire des "instruments" qui sont formés par une structure arborescente de "générateurs", d'une façon tout-à-fait similaire à ce qui se passe pour un synthétiseur analogique. Ces instruments possèdent un certain nombre d'entrées, de paramètres. Pour chaque événement sonore, chaque note de la partition, on assigne un instrument et les diverses valeurs des entrées. Voici par exemple sur la figure [prog.5] un instrument très simple.

Les enregistrements 1 à 4 définissent l'instrument, ici un simple oscillateur, l'instruction 5 définit point par point la forme d'onde de l'oscillateur (dessinée en (c)), les instructions NOT, 6 à 16, décrivent une succession d'événements sonores associés à cet instrument, les trois premiers champs servent, respectivement, à donner le début de la note, le numéro de l'instrument et la durée de la note, les deux autres champs servent à assigner des valeurs aux deux entrées de l'oscillateur (P5 et P6 comme 5ème et 6ème champs, le mnémonique NOT constituant en fait le champs no 1 pour le programme. Pour ce générateur (OSC) ils s'interprètent comme l'amplitude et la fréquence des oscillateurs. Grâce à un grand nombre de générateurs (oscillateurs, additionneurs, multiplieurs, filtres, générateurs de signaux aléatoires, d'enveloppes etc...) et la possibilité de les connecter, on peut obtenir des instruments très complexes ayant un timbre évoluant de façon non triviale dans un seul événement sonore. Des points d'entrées dans le programme permettent d'y ajouter des sous-programmes personnels, notamment compositionnels (générations de notes), changeant le tempo ou destinés à tout autre usage. Music 5 présente toutefois quelques inconvénients: la syntaxe par champs et identificateurs indicés n'est pas très naturelle à utiliser et se révèle vite assez pénible. La réalisation des instruments par une arborescence de générateurs prédéfinis, si elle ne présente pas beaucoup de limitations théoriques, n'est toutefois pas toujours très adaptée à ce que l'on veut faire (effet de seuil, insertion d'algorithmes logiques et arithmétiques) et si cela est possible avec un très grand choix de générateurs (comme dans la version la plus évoluée de l'IRCAM) c'est au prix d'un allourdissement du temps de calcul et d'acrobaties intellectuelles. D'autre part, les sous-programmes à la disposition de l'utilisateur sont difficiles à écrire car très dépendants de la structure interne du programme et demandent une bonne connaissance du FORTRAN.

Description sommaire de la structure du programme

Music 5 est écrit en FORTRAN. La taille en mémoire en est fort importante aussi a-t-il été divisé en 3 parties appelées PASS 1, 2 et 3 communiquant entre elles des informations par un fichier de données.



PASS1 est un analyseur syntaxique qui vérifie la syntaxe des enregistrements de la partition et rend une version codée de celle-ci pour les étapes suivantes. C'est dans PASS1 que figurent les sous-programmes PLF, réservées à l'utilisateur, capacités compositionnelles du programme qui peuvent générer des notes ou plus simplement des paramètres supplémentaires aux notes.

PASS2 trie les enregistrements de PASS1 dans l'ordre chronologique de leur temps d'activation (p2), ce qui prépare leur exécution par PASS3. C'est dans cette étape que se trouvent les sous-programmes CONVn, chargés de convertir éventuellement les paramètres des instructions NOT. En effet, les valeurs réclamées par les générateurs ne sont pas toujours exprimées dans des unités aisées à manipuler. Ainsi, l'entrée de fréquence des oscillateurs s'exprime en incrément dans la table de la forme d'onde associée à cet oscillateur, unité fort barbare. Un sous-programme de conversion est alors très utile pour convertir un paramètre exprimé en hertz dans l'unité incrémentale propre à Music 5. De même l'amplitude est linéaire: une conversion en décibel peut se révéler pratique. PASS2 contient également une fonction métronomique.

PASS3, à partir des données tirées par PASS2 engendre le signal. Il s'agit d'une grande boucle qui exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont activées, gérant une pile où sont conservées toutes les notes actives simultanément. Si ces instructions définissent un instrument, la structure arborescente de celui-ci est stockée en mémoire pour son utilisation future. Il construit également les tables contenant les formes d'onde utilisées par les générateurs.

A chaque boucle, le programme calcule le signal entre le temps où il en était arrivé précédemment et le temps de départ du nouvel événement, il calcule ainsi le signal de sortie de toutes les notes, l'additionne, le répartit sur les diverses voies et écrit le signal sur le disque.

On peut utiliser ce programme de deux façons, soit dans une version figée, la plus complète possible et dans ce cas il suffit de connaître le langage propre à Music 5, soit "sur mesure" et avec plus de possibilités mais dans ce cas il faut recharger le programme avec des sous-programmes personnels (CONVT, TEMPO, PLS, PLF).

- Adaptation du programme Music 5 sur Mitra 125 -

Le programme originel est une version de Music 5 pour mini-ordinateur provenant de l'IRCAM, mais issue d'une version mise au point à Marseille (sur T1600) par Jean Claude Risset, Françoise Nayroles et Agnès Mathiez. Les problèmes posés par l'adaptation de ce programme ont été au nombre de 4 et il a fallu environ 1 mois pour résoudre les 3 derniers.

1. Transfert physique du source FORTRAN
2. Compatibilité des compilateurs
3. Réécriture des procédures d'entrée-sortie avec le disque.
4. Modification de la structure du programme de façon à limiter son encombrement en mémoire.

- Transfert physique du source FORTRAN -

Etant donné la grande disparité des matériels entre les deux extrémités du transfert (PDP10 de l'IRCAM, et matériel CII-HB de NANCY 1) il s'est révélé impossible d'utiliser un support magnétique (Bande ou disque) pour le transfert. D'autre part l'IRCAM ne possédant pas de perforateur de cartes, il ne restait plus que le ruban. A part une première fausse manoeuvre (perforation dans un code maison), le ruban perforé, blanc (on m'a menacé de devoir le peindre en noir mais le lecteur de ruban de l'IUCA s'est laissé attendrir), a bien voulu, après deux ou trois ratés et rebobinage à la main, révéler les secrets de ses petits trous, secrets retransformés aussitôt en d'autres multiples petits trous, mais sur des cartes cette fois-ci. Ce qui a permis d'assurer un transfert beaucoup moins tumultueux de l'IUCA à NANCY 1, port d'attache du projet.

- compatibilité de FORTRAN et procédures d'entrée-sortie -

A la première compilation, le programme a rendu son flot attendu (sauf la quantité) d'injures. Après avoir réécrit toutes les instructions READ et WRITE avec le bon numéro d'unité logique et fait de même avec toutes les instructions DO et GO TO (nombreuses) en ajoutant les blancs (pourtant non significatifs en FORTRAN standard) réclamés par le compilateur, l'affaire prenait meilleure tournure.

Après avoir supprimé quelques commentaires indigestes, tous les FIN et les CALL EXIT (STOP), remédié à l'absence de la fonction ISHFT et autres ennuis de cette espèce, il a fallu réécrire les procédures ECR11, ECR12, LECTU2, LECTU3 et SAMOUT qui gèrent la communication entre les étapes du programme par l'intermédiaire de fichiers séquentiels sur le disque et pour la dernière l'écriture des échantillons du fichier de son. Ces programmes ont pu être écrits en FORTRAN, le compilateur du Mitra offrant des instructions d'entrée-sortie avec le disque suffisamment puissantes et rapides.

- Modification de la structure du programme -

PASS1 qui utilise des tableaux de dimension réduite a pu être chargé sans difficulté dans l'espace de mémoire utilisable du MITRA. Il n'en a pas été de même pour PASS2 et PASS3. En utilisant les capacités d'OVERLAY de l'éditeur de lien du système (voir annexe) il a été possible de réduire l'encombrement suffisamment pour pouvoir charger

PASS2. Le gain s'est révélé insuffisant pour PASS3 qui contenait une grande pile de 6700 réels soit 26800 octets dans la version originale. Il fallait se résoudre à diminuer la taille de cette pile. Celle-ci est structurée de façon à pouvoir être utilisée suivant deux configurations, l'une classique, l'autre particulière à la technique de modulation de fréquence exploitée intensivement par John Chowning, utilisant deux générateurs particuliers REV et SPT et des blocs de 128 mots. Nous avons préféré conserver uniquement la configuration classique, ce qui a permis un gain de 1Koctet. Nous avons également réduit le nombre de notes simultanées possible de 63 à 10. Comme chaque note peut comporter jusqu'à 30 paramètres, c'est un gain de 1890 mots qui a été réalisé, soit avec le précédent 2402 mots, ce qui s'est révélé suffisant. Le nombre de notes simultanées peut même être de 20, mais la place mémoire est alors totalement occupée et il n'est plus possible d'insérer des sous-programmes personnels.

Dans la version actuelle les modules aléatoires ne fonctionnent pas. La fonction RANDOM n'est pas disponible sous FORTRAN/MITRA.

Le générateur SET a été modifié de façon à accepter une liaison dynamique des fonctions aux générateurs par l'intermédiaire de variables (SET Vi). On peut ainsi modifier cette liaison par l'instruction Music5 SV3.

L'ensemble fonctionne de manière satisfaisante. Il n'est pas optimisé. La procédure FORSAM qui contient les générateurs, donc fait le calcul des échantillons, gagnerait à être écrite en assembleur, ainsi que la procédure d'écriture des échantillons sur le disque, SAMOUT.

La version actuelle est chargée avec le sous-programme de conversion écrit par J.C. Risset et P. Ruiz et décrit dans l'annexe dédié à ce sujet. Les conversions usuelles deviennent ainsi possibles en évitant la compilation de nouvelles routines de conversions et surtout l'édition de lien qui prend un temps très important. Elle est à peu-près aussi puissante que la version initiale: 8 blocs, 8 fonctions, 10 notes simultanées, blocs de 256 mots contre respectivement 8,8,63,256 mais moins que celle décrite par Mathews (12,12,?,512).

La réduction de la taille des blocs de 512 mots à 256 entraîne une augmentation de la durée des calculs, car cette taille décide du nombre d'itérations de la boucle-système de PASS3 et du nombre d'entrées-sorties. Les autres restrictions limitent les possibilités du programme. 8 fonctions au lieu de 12 peuvent être utilisées simultanément pour un instrument. C'est la restriction la plus contraignante. La limitation à huit blocs peut rendre l'écriture des instruments moins lisibles mais ne constitue un obstacle que pour des instruments particulièrement complexes. L'avantage que représente un système sur miniordinateur mono-utilisateur: occupation raisonnable et file d'attente non transparente, justifie largement ces pertes.

2.3. Analyse des correspondances: le programme BENTAB

Une part importante de notre travail aura été consacrée à l'analyse des données expérimentales, réponses des sujets au cours de l'expérience qui sera décrite au troisième chapitre. A côté d'analyses statistiques classiques sur les moyennes des résultats, nous avons utilisé une puissante méthode d'analyse des données développée par J.P. Benzécri [1], utilisée avec succès par Gérard Charbonneau [4] dans des expériences psychoacoustiques un peu semblables à la nôtre. Cette méthode, appelée *analyse des correspondances*, fait partie des méthodes d'analyses factorielles (multidimensional scaling) fort en vogue chez les psychoacousticiens anglosaxons: (programmes INDSCAL, KIST, HI-CLUS, cf David Wessel, 1973 [12], 1979 [13], Grey, 1977 [7]). Le principe général s'oppose aux méthodes statistiques consistant à trouver un modèle a priori et de le valider sur les données expérimentales. Il consiste au contraire à extraire "objectivement" des données des "facteurs" d'importance décroissante représentant le meilleur moyen de structurer l'*information* contenu dans les données. L'*interprétation* de ces facteurs restant aux bons soins de l'expérimentateur.

La méthode consiste en un premier temps à disposer les données dans une matrice à deux dimensions. Cette opération a beaucoup d'importance et conditionne fortement les résultats.

Nous allons présenter divers types de tableaux de données pour lesquels l'analyse des correspondances a été appliquée avec succès. Nous noterons I et J deux ensembles finis et $KIJ = \{k(i, j), i \in I, j \in J\}$ le tableau des données.

-Présentation des données-

Le cas le plus simple est le *tableau de fréquence*, $k(i, j)$ représente alors la fréquence avec laquelle s'est réalisé un événement constitué par la rencontre de i et j. Le tableau PIJ où $p_{ij} = k(i, j)/k$, k nombre total des événements, constitue un système de masses positives ou nulles de somme 1 donc une loi de probabilité sur $I \times J$. Si les événements (i, j) sont indépendants, le tableau de fréquence constitue une estimation de la loi de probabilité liant réellement I et J.

Le deuxième cas est le *tableau de contingence*. Les données ne résultent plus d'un comptage d'événements mais de l'attribution d'une certaine quantité de même nature pour tous les points. (exemples: dépenses des français où I serait une partition des français et J une partition par budgets.)

Par extension on analyse des tableaux de mesures où le caractère homogène de la mesure n'est plus assuré, l'ensemble J est un ensemble de grandeurs diverses.

Les *tableaux de description logique* constituent un autre panorama. Les valeurs de $k(i, j)$ sont dans ce cas 0 ou 1 et ont un sens logique. Si $k(i, j) = 1$ l'individu i possède la propriété j. Le tableau peut être sous forme *disjonctive complète* si la condition suivante est respectée: il existe une division en classes de l'ensemble J telle que chaque individu possède dans chaque classe une propriété et une seule. Cette caractéristique du tableau de données peut être obtenue notamment à partir du tableau initial en doublant chaque colonne par sa

complémentaire, où les données sont codées de façon à être la négation de l'original. Par exemple si les données sont le résultat d'un questionnaire dont les réponses sont oui ou non. A chaque question (colonne) où une réponse positive sera codée par 1 correspondra une colonne où cette même réponse positive sera codée par 0. Ce type de données est mathématiquement fort proche des tableaux de fréquence. (Benzécri, 1973 [1])

Dans les *tableaux de notes d'intensité*, $k(i, j)$ représente alors la note d'intensité (ou de mérite) de l'individu i en la matière j , celle-ci étant bornée entre 0 et une note maximum. Pour éviter les effets de taille (effets liés à la valeur absolue de la note) on dédouble également ces données en ajoutant des colonnes contenant le *complément* des données par rapport à la note maximum.

On peut également appliquer l'analyse des correspondances à des *tableaux multiples*, où les données sont fonctions de plus de deux entrées. Dans ce cas on est obligé de répartir les ensembles sur deux axes: ainsi pour un tableau ternaire $I \times J \times T$, on pourra constituer une matrice avec $(I \times J) \times T$ ou $I \times (J \times T)$ ou encore $(I \times T) \times J$. Chacune de ces dispositions ne fera pas apparaître les mêmes correspondances et si on ne veut pas faire toutes les combinaisons, le choix doit être bien mesuré.

-Principes de l'analyse des correspondances-

Un *profil* est le système de $\text{Card}(J)$ nombres $f_{i:J} = \{f_{i:j} \mid j \in J\} = \{k(i, j) / k(i) \mid j \in J\}$ où $k(i) = \sum \{k(i, j) \mid j \in J\}$ $f_{i:j}$ est le poids relatif du couple (i, j) parmi tous les couples de la lignes i .

L'analyse des correspondances considère le *nuage* $N(I)$ des profils des éléments de I sur J et son symétrique $N(J)$.

$$N(I) = \{f_{i:J} \mid i \in I\}$$

$$N(J) = \{f_{j:I} \mid j \in J\}$$

On note f_J la loi marginale du tableau:

$$f_J = \{f_j \mid j \in J\} = \{k(j) / k \mid j \in J\} \text{ où } k(j) = \sum \{k(i, j) \mid i \in I\} \text{ et } k = \sum \{k(i, j) \mid i \in I, j \in J\}$$

f_J peut être vue comme le profil moyen.

On munit RJ de la distance du *CHI2* de centre f_J communément appelée distance distributionnelle. Celle-ci est décrite par la formule:

si i' et i'' sont deux profils de $N(I)$

$$|| f_{i':J} - f_{i'':J} || (f_J) = \sum \{ (f_{i':j} - f_{i'':j})^2 / f_j \mid j \in J \}$$

Cette distance vérifie le principe d'*équivalence distributionnelle*:

soient j' et j'' deux éléments de J tels que les colonnes correspondantes aient même profil $f_{j':I} = f_{j'':I}$ (les colonnes sont proportionnelles). Si on substitue dans le tableau une colonne j_S égale à leur somme, alors la distance du CHI2 entre éléments de I n'est pas modifiée.

Le principe de l'analyse des correspondances est de considérer dans RJ muni de la distance du CHI2, le nuage N(I) des profils $f_{i:j}$ affectés respectivement des masses f_i .

De façon symétrique on peut considérer sur RI le nuage N(J) des profils $f_{j:i}$ affectés respectivement des masses f_j .

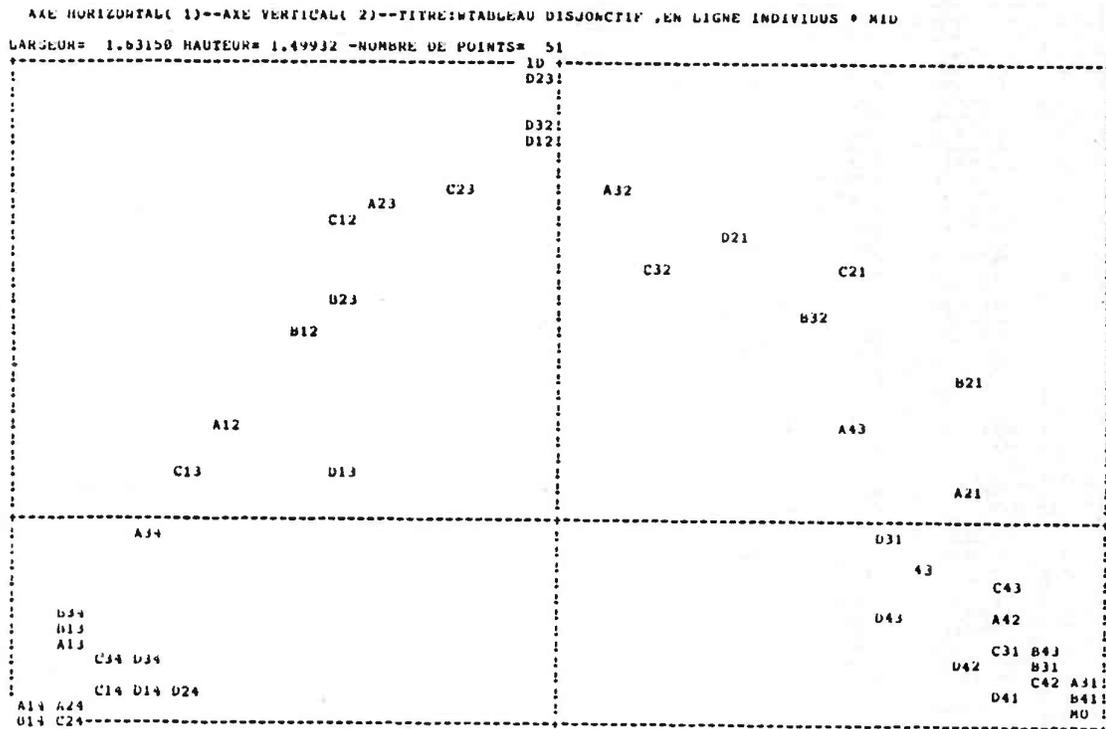
Les axes factoriels sont les directions principales d'allongement du nuage (axes principaux d'inertie).

Le programme extrait ces axes et projette les points du nuage sur le plan formé par deux axes factoriels choisis par l'utilisateur. (cf la figure [prog.6]). La valeur propre de chaque axe représente le moment d'inertie du nuage dans la direction de l'axe. Plus cette valeur est élevée, plus la quantité d'information contenue dans cet axe est importante. Le programme fournit un histogramme de ces valeurs d'une grande utilité pour connaître l'importance à attacher à chaque axe. (cf la figure [prog.7]).

Il est possible d'ajouter aux données des lignes et/ou des colonnes dites *supplémentaires*, qui ne participent pas à la détermination des axes factoriels mais sont projetés sur ceux-ci. Cela est très utile pour projeter des données trop excentriques dont on veut éviter que les axes ne soient trop orientés par celles-ci ou des données représentant le *regroupement par sommation de lignes ou de colonnes*. Ces points supplémentaires se retrouveront au *barycentre* des points dont ils sont la somme. Ce procédé est particulièrement utile dans le cas de tableaux multiples.

L'analyse fournit également les contributions de chaque point à l'inertie des axes. Cela est utile pour l'interprétation des axes et permet également de déceler des éléments trop disparates expliquant à eux-seuls un axe (contribution supérieure à 25 %).

Figure [prog.6]



Exemple de projection de points par BENTAB sur deux axes.

Figure [prog.7]

LES VALEURS PROPRES VAL(1)= .99999996

NUM	ITER	VAL PROPRES	POURCENT	CUMUL	%	HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE
2	1	.23031579	62.952	62.952	100	*****
3	1	.07069711	18.714	79.662	100	*****
4	0	.01409100	3.729	83.391	100	****
5	0	.00532833	1.410	84.801	100	***
6	0	.00419184	1.109	85.910	100	**
7	2	.00400031	1.059	86.969	100	*
8	1	.00330301	0.896	87.865	100	
9	1	.00303193	0.802	88.667	100	
10	1	.00293343	0.776	89.444	100	
11	1	.00286594	0.758	90.202	100	
12	1	.00267615	0.708	90.910	100	
13	2	.00250121	0.662	91.572	100	
14	1	.00225070	0.596	92.168	100	
15	1	.00202449	0.536	92.704	100	
16	2	.00200215	0.530	93.234	100	
17	2	.00199071	0.527	93.760	100	
18	2	.00173898	0.460	94.221	100	
19	1	.00167859	0.444	94.665	100	
20	2	.00162946	0.431	95.096	100	
21	2	.00150813	0.399	95.495	100	
22	2	.00144740	0.383	95.878	100	
23	1	.00126159	0.334	96.212	100	
24	2	.00115083	0.307	96.519	100	
25	1	.00113399	0.300	96.819	100	
26	1	.00105199	0.278	97.097	100	
27	1	.00090481	0.241	97.338	100	
28	2	.00093335	0.247	97.585	100	
29	1	.00084698	0.224	97.809	100	
30	1	.00083358	0.221	98.030	100	
31	2	.00073153	0.194	98.224	100	
32	2	.00070110	0.186	98.409	100	
33	2	.00064237	0.172	98.581	100	
34	1	.00060409	0.160	98.741	100	
35	2	.00058524	0.155	98.896	100	
36	3	.00054258	0.144	99.040	100	
37	3	.00052153	0.138	99.178	100	
38	2	.00047720	0.126	99.304	100	
39	1	.00037081	0.100	99.404	100	
40	2	.00036606	0.097	99.501	100	
41	2	.00032290	0.085	99.586	100	
42	2	.00028370	0.075	99.661	100	
43	3	.00026222	0.069	99.730	100	
44	2	.00021316	0.056	99.786	100	
45	2	.00016919	0.045	99.831	100	
46	2	.00016021	0.045	99.876	100	
47	4	.00015202	0.040	99.916	100	
48	2	.00012261	0.032	99.948	100	
49	3	.00010135	0.027	100.000	100	
50	0	.00000016	0.000	100.000	100	
51	1	.00000013	0.000	100.000	100	
52	1	.00000013	0.000	100.000	100	
53	0	.00000009	0.000	100.000	100	

Histogramme des valeurs propres.

3.1 BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE PREMIER:

- [1] Benzécri J.P. et coll. L'analyse des données. T.II: l'analyse des correspondances. DUNOD 1973.
- [2] Brown F., Klein G. et Lehmann R. AUDITU Le programme de synthèse de sons " AUDITU ". REVUE D'ACOUSTIQUE no 38 -1976 206-215.
- [3] Chabrel S., Charbonneau G. (1976)-Un système d'analyse de sons par ordinateur fonctionnant en mode conversationnel. Paru dans l'Onde électrique.
- [4] Charbonneau G. Réalisation d'un système intégré d'analyse et de synthèse de sons par ordinateur. Application de ce système à l'étude de l'attribut de hauteur sonore et de sa perception. Thèse de doctorat es sciences physiques. Orsay 1976.
- [5] GAIV. Groupe Art et informatique de Vincennes, le système portable de synthèse hybride de Vincennes. CNRS, Informatique 1977, textes de conférences, équipe Eratto, Centre de documentation Sciences Humaines, 1978, 191-204.
- [6] Di Giugno G. et Kott J. Présentation du système 4X. Processeur numérique de signal en temps réel. Rapport IRCAM 1981.46 pages.
- [7] Grey, J.M., 1977, Multidimensional perceptual scaling of musical timbres, JASA 61:1270-1277
- [8] Mathews M.V. (1969)-The technology of computer music. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts.
- [9] Rodet X. et Bennet G. Synthèse de la voix chantée par ordinateur. Conférences des journées d'études. Festival International du son. Paris 1980.

[10]Schaff W.E.(1980). Digital filters and spectral analysis.Course for Integrated computer systems Inc. 1980.

[11]Shannon C.E., Weaver W. (1962). The mathematical Theory of communication. University of Hillinois Press.

[12]Wessel,D.L. psychoacoustics and music: A report From Michigan State University. The bulletin of the Computer Arts Society.1973,page 30.

[13]Wessel, D.L.. Timbre space as a musical control structure. Computer Music Journal 1979,3,No 2,45-52.

Chapitre 2

LA FONCTION AUDITIVE

2.1 - POINT DE VUE PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIQUE

2.1.1 Stimulus externe

Le premier organe qu'un signal sonore rencontre sur le trajet qui le mènera jusqu'à la perception est le pavillon de l'oreille. Celui-ci, par les réflexions et modifications spectrales qu'il introduit sur le signal, fournit des informations temporelles qui semblent être utilisées par l'audition pour localiser le signal (D.W. Batteau, 1968 [4]).

L'oreille moyenne assure de façon adaptative le transfert de l'énergie acoustique aérienne à l'oreille interne, milieu fluide d'impédance plus élevée. Le mécanisme n'est pas encore parfaitement connu, mais l'ancienne théorie, assimilant la cochlée à un milieu d'impédance infinie, se heurte à deux objections.

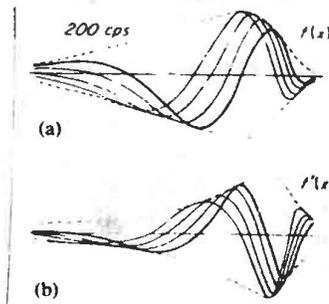
S'il en était ainsi, le signal sonore se transmettrait dans le fluide sous forme d'une onde de compression qui se propagerait sans perte conséquente dans toute la tête qui est de densité équivalente et empêcherait ainsi la séparation binaurculaire de 90 dB relevée par Zwislocki (1953 [124]). D'autre part, la fixation de la fenêtre ronde augmenterait l'impédance de la cochlée, donc l'amplitude de l'onde de compression, donc l'intensité subjective, or c'est le contraire qui se produit (Lawrence, 1958 [53]; Tonndorf et Tabor, 1962 [112]). On penche désormais vers un déplacement de masse de tout le fluide cochléaire, autorisé par la fenêtre ronde de façon à minimiser justement, une onde acoustique de compression (Moller, 1963 [58]).

La cochlée est le véritable organe sensoriel. Elle se présente comme une spirale, le labyrinthe, dont la base communique avec l'apex. Elle est formée de deux rampes, la rampe tympanique et la rampe vestibulaire qui communiquent avec l'oreille moyenne respectivement par la fenêtre ovale et la fenêtre ronde. Les deux rampes sont séparées par la membrane basilaire et ne communiquent qu'à l'extrémité du labyrinthe, l'apex par l'hélicotréme. Le fluide qui baigne ces rampes est mis en mouvement par l'étrier qui est solidaire de la fenêtre ovale. Les organes sensoriels sont situés sur la membrane basilaire entre les deux rampes et forment l'organe de Corti.

Le mouvement de la membrane basilaire a été bien étudié lorsque l'étrier est animé d'un mouvement sinusoïdal stationnaire. Ce mouvement est caractérisé par une onde qui progresse depuis la base en direction de l'apex. Cette onde atteint un maximum d'amplitude en un lieu dépendant de la fréquence, puis s'atténue rapidement. Le maximum se localise près de la base pour les fréquences aiguës, à l'apex pour les fréquences les plus graves. La fonction qui relie la place du maximum à la fréquence est à peu près logarithmique, si bien que les maximums de déplacement de fréquences représentant des octaves successives se répartissent de façon équidistante le long de la membrane. Ainsi on voit que l'oreille interne se comporte comme un analyseur de fréquence.

Von Békésy (1960 [6]) a tout particulièrement étudié le mouvement de la cochlée. On note sur la figure [phys.1] la croissance lente de l'onde, son maximum puis sa décroissance rapide. Le filtrage pour les fréquences utilisées par Von Békésy est faible ($Q < 3$).

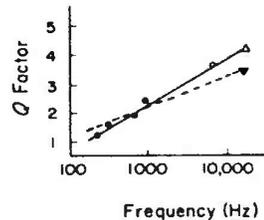
Figure [phys.1]



Ondes de propagation le long de la membrane basilaire à des instants successifs. Les enveloppes sont indiquées en pointillé. (a): l'onde de déplacement (b) la dérivée spatiale. (d'après Von Bekesy, 1960 [6]).

Johnstone et Boyle (1967, [47]) et Rhode (1971, [83]) utilisant une technique fondée sur l'effet Moessbauer ont déterminé l'onde de propagation pour des fréquences plus élevées donc avec des maximums plus proches de la base. Ils ont relevé une nette amélioration du facteur de qualité pour les fréquences élevées. Ces mesures complétées par celles de Johnstone et Taylor (1970, [48]) utilisant une technique capacitive, sont reportées sur la figure [phys.2]. L'amélioration de Q avec la fréquence s'y montre importante et systématique.

Figure [phys.2]



Relation entre le facteur de qualité Q et la fréquence du sommet des courbes de résonance de la cochlée.

(●) Békésy (1960, [6]) (▼) Johnstone et Bayle (1967 [47]) (▲) Johnstone et Taylor (1970, [48]) (○) Rhode (1971, [83])

Rhode (1971, [83]) observe une forte nonlinéarité du mouvement de la membrane basilaire. Au voisinage du maximum la courbe d'amplitude sature lorsqu'on augmente l'intensité. Cette saturation disparaît avec la mort (Rhode, 1973 [84]). Les autres auteurs ne trouvent pas cette nonlinéarité (Bekesy, 1960 [6]; Johnstone et Bayle, (1967 [47]; Wilson et Johnstone (1972, [121]), de Boer (1967, [20]); Moller, 1970 [59]. Evans et Wilson, 1973, [25]).

Les mouvements de la membrane basilaire excitent les cellules ciliées internes et externes. Les cellules ciliées externes voient leurs cils, solidaires à la fois de la membrane basilaire et de la membrane tectoriale, soumis à des efforts de cisaillements alors que les cils libres des cellules internes doivent être sensibles à la vitesse du fluide qui les caresse. Les cellules internes sont le départ de 95% des terminaisons nerveuses centripètes, fournissent le principal de l'information. Comme elles sont sensibles à la vitesse, cela peut améliorer le filtrage mécanique (figure 1.b). La façon dont

l'information est véhiculée des cils aux dendrites des neurones centripètes reste mystérieuse. Les décharges de ces nerfs montrent une sélectivité en fréquence bien supérieure au filtrage mécanique mesuré (cf 1.2). On pense qu'un deuxième filtrage pourrait exister sous une forme encore incertaine entre la membrane basilaire et le nerf auditif. Au moyen d'interaction entre cellules internes et externes, Dolmazon et Bastet (1979, [22]) amorcent une modélisation pouvant expliquer cette sélectivité en fréquence accrue.

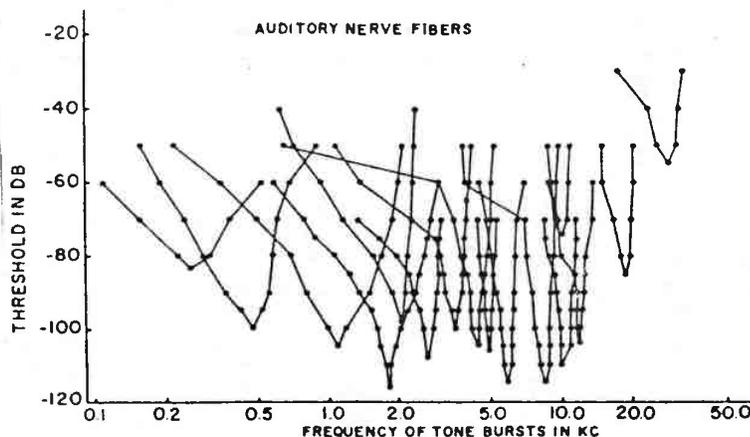
2.1.2. Stimulus interne: étude électrophysiologique

L'étude des décharges nerveuses qui traversent le nerf auditif est très précieuse pour essayer de connaître les informations qui vont aboutir au système nerveux central. Le problème est que l'on ne sait pas a priori quel décodage le système nerveux central fait subir au flux de décharges nerveuses qui traversent une fibre. L'amplitude des décharges ne semble pas véhiculer d'information, la décharge paraissant être une information binaire (Whitfield, 1978 [120]). Trois voies pour décoder cette information sont utilisées actuellement.

1. La présence ou l'absence d'activité nerveuse dans une fibre.
2. Le nombre moyen de décharges pour un temps donné.
3. Les relations temporelles entre les décharges successives d'une fibre ou d'un groupe de fibres.

1. Les études faites par Galambos et Davis (1943, [30]) indiquent que chaque unité neurale possède une courbe de seuil de réponse à un stimulus de fréquence variable qui montre qu'il existe une fréquence caractéristique (Best frequency, BF) de cette fibre pour laquelle le seuil de décharge est le plus bas. Le seuil est défini comme étant la plus petite valeur de l'intensité du stimulus qui produit une augmentation notable du nombre de décharges par seconde de la fibre. Lorsque l'intensité du stimulus dépasse ce seuil, la bande de fréquence pour laquelle cette fibre réagit va en s'étendant. La courbe de réponse type est un triangle plus pentu du côté des hautes fréquences que de celui des basses fréquences. (Kiang, 1966 [51]). Toutefois il existe une grande variabilité dans ces réponses (figure [phys.3]). D'autre part si on choisit une échelle exponentielle pour les fréquences, la réponse des fibres de BF élevées est plus étroite que celle des BF basses.

Figure [phys.3]



Seuil de réponse des fibres nerveuses auditives chez le chat.
(N.Y.S. Kiang, 1965 [50]).

Le lien avec l'étude du mouvement de la membrane basilaire (cf 2.1.1) est donc évident. On retrouve au niveau de la fibre la sélectivité en fréquence. La réponse asymétrique de la membrane: extinction rapide de l'enveloppe du côté des fréquences aigus, se retrouve dans la dissymétrie de la réponse d'une fibre. On note également la croissance du facteur de qualité des fréquences basses aux fréquences élevées.

2. Le nombre moyen de décharge pour un temps donné augmente avec le niveau du stimulus pour saturer à environ 30 dB au-dessus du seuil [120]. Certaines cellules se comportent même de façon plus abrupte, passant de l'activité spontanée à l'activité saturée pour une très faible augmentation de l'intensité [120].

3. La probabilité pour qu'une décharge nerveuse se produise est fonction de la valeur de déplacement de la membrane. Ainsi pour un stimulus sinusoïdal les impulsions sont synchronisées avec un demi-cycle de l'onde, sans qu'il y ait obligatoirement bien sûr une décharge pour chaque demi-cycle. Cette relation se perd progressivement pour les hautes fréquences avec un déphasage aléatoire à partir de 5 Khertz [120]. A cause du temps de repos d'une fibre, elle ne peut décharger à chaque cycle au delà de 1 KHz. Cependant un grand nombre de fibres est activé pour un son donné, chacune déchargeant à différents cycles, l'ensemble peut fournir des décharges pour chaque cycle et ainsi véhiculer l'information sur la fréquence. C'est la célèbre théorie de la volée de Wever (1949 [116]). La périodicité de ces décharges est étudiée à l'aide d'histogrammes des temps entre chaque décharge qui teste la corrélation entre la sortie nerveuse et le signal. On utilise également des histogrammes de période où les temps de décharges sont mesurés par rapport à une phase fixe du signal. Les histogrammes sont supposés avoir une grande analogie avec la forme d'onde du stimulus présent à l'endroit de la mesure, comme cela se vérifie pour des stimuli sinusoïdaux. (Rose, 1970 [93])(cf figure [phys.4]).

Le cerveau dispose ainsi de deux types d'informations, une information spatiale (codage 1 et 2) qui le renseigne sur la localisation du composant du stimulus sur la cochlée et d'une information temporelle liée à la fréquence et la forme d'onde du stimulus (codage 3). Deux théories sur la perception de la hauteur qui valorisent l'une ou l'autre de ces informations se disputent le devant de la scène depuis de longues années.

l'analyse par des interactions latérales inhibitrices. L'étude des histogrammes de période montre un comportement en filtre passe bande dont la courbe de réponse s'aplatit avec l'intensité du côté des fréquences basses.

Bien que le mouvement de la membrane basilaire soit jugée linéaire par de nombreux auteurs (cf 1.1) Smoorenburg et al (1976) [105] ont montré l'existence au niveau électrophysiologique d'importants sons de combinaisons ayant toutes les caractéristiques d'un son pur réellement présent au niveau de la membrane. Lorsque le stimulus est composé de deux primaires f_1 et f_2 on observe pour des niveaux de f_1 et f_2 compris entre 40 et 90 dB des sons de combinaisons $f_2 - f_1$, $2f_1 - f_2$, $f_1 - k(f_2 - f_1)$ dans l'ordre d'importance. Les deux premiers peuvent avoir des niveaux d'intensité de l'ordre des primaires, parfois supérieures, ce qui exclut l'hypothèse d'une non-linéarité du type saturation. Le lieu de cette non-linéarité reste obscur. Smoorenburg (1972) [103] rapporte une expérience qui suggère que cette non-linéarité est liée au système sensitif. Les sons de combinaisons de type additif ne sont pas observées ($f_1 + f_2$, etc) (voir également Buunen et Rhode (1978), [13]).

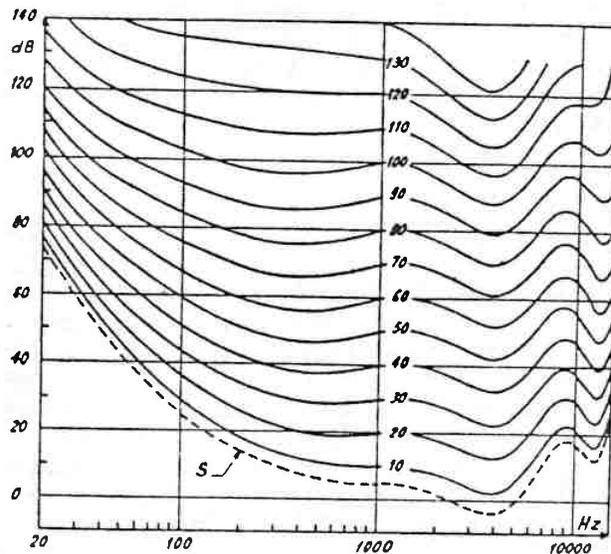
2.2 - POINT DE VUE PSYCHOACOUSTIQUE

2.2.1 SONS SIMPLES

2.2.1.1 Seuil d'audition. Courbes isotoniques. Seuil différentiel de fréquences.

L'étude des variations de sensibilité de l'oreille avec la fréquence, notamment par Fletcher (1923) [27] a conduit aux courbes isotoniques actuelles comme celle de l'Afnor [1] (figure [psy.1]). L'oreille présente un maximum de sensibilité autour de 3Khz, une bande passante de 20 Hz à 20 KHz chez un sujet jeune. La sensibilité de l'oreille aux intensités sonores suit bien une loi logarithmique autour de 1000 Hz.

Figure [psy.1]



Lignes isotoniques normales pour écoute binauriculaire en champ libre.
S = seuil d'audition. La graduation des courbes (niveau à 1000 Hz en dB) est l'échelle des phones [1].

2.2.1.2. Bande critique

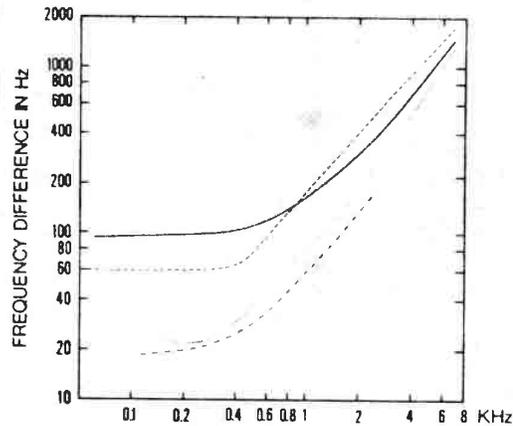
Ce concept est né de diverses études montrant des changements brusques dans la réponse subjective lorsqu'une certaine largeur de bande est dépassée. Par exemple l'intensité d'une bande de bruit reste constante tant qu'elle ne dépasse pas une certaine largeur appelée bande critique au delà elle croît. (Feldkeller et Zwicker, 1956 [26]). De même le seuil d'audition d'une étroite bande de bruit entourée de deux sons masquants reste constant tant que la séparation en fréquence des deux sons ne dépasse pas la bande critique. Au delà le seuil décroît rapidement. (Zwicker, Flottorp et Stevens, 1957 [123]). La largeur de la bande critique est d'environ 1/3 d'octave. Il a été suggéré qu'elle correspondrait à des distances égales sur la membrane basilaire. (Greenwood, 1965 [38]). Cette corrélation se dégrade aux extrémités aussi Zwislocki (1965, [125]) a proposé une amélioration en corrélant bande critique et densité d'innervation de la cochlée (1300 fibres par bande critique chez l'homme).

Ainsi on considère que la bande critique représente une division de l'aire auditive à l'intérieur de laquelle la puissance du signal est additive et des signaux distincts présentés simultanément ne peuvent être séparés [120]. (Plomp 1964 [69]). La bande critique semble donc liée à la surtension de l'analyseur cochléaire.

2.2.1.3. Séparation de sons purs

Plomp (1964, [69]) et Plomp et Mimpen (1968, [80]) ont étudié la capacité de l'oreille à distinguer les partiels d'un son complexe harmonique. Les résultats montrent que les huit au plus et virtuellement les cinq premiers partiels peuvent être entendus séparément, c'est à dire lorsqu'ils sont séparés de plus d'une bande critique. Plomp [69] a étudié également la séparabilité de deux sons purs. La figure [psy.2], où est inscrit également la courbe pour des sons complexes, montre une bonne adéquation avec la bande critique pour les fréquences hautes. La situation se détériore dans le grave. Terhardt (1968) [108]. (cf figure 7) utilisant une autre procédure montre une bien meilleure séparabilité dans les graves mais Nordmark (1978) [67] conteste la procédure utilisée. Le pouvoir de résolution de l'oreille est donc très faible autour de 100 Hz, ce qui contraste avec le fait que cette gamme de fréquence est très utilisée en musique. (Mais gardons à l'esprit qu'il s'agit ici du pouvoir de résolution spectral).

Figure [psy.2]



Trois expériences déterminant la séparabilité de sons purs. La première courbe (--- Plomp et Mimpen, 1968 [121]) montre la séparation en fréquence nécessaire entre les harmoniques d'un son complexe pour les entendre séparément. La seconde courbe (... Plomp 1968) représente la séparabilité de deux sons purs seulement, déterminée de façon semblable à la première expérience. La troisième courbe représente l'expérience de Terhardt (-.-.-1968, [108]) utilisant également deux partiels mais dont le critère est la perception de plus d'un son. En ligne continue figure la bande critique. (D'après Nordmark [67]).

En utilisant d'autres procédures Cardozo et Neelen (1967 [14], Gibson (1971, [32]); Nordmark (1978, [67]) ont montré que l'on pouvait percevoir 12 harmoniques, voire 20, soit donc un pouvoir de résolution nettement supérieur à celui correspondant à la bande critique. Les limites de l'audibilité des partiels dépendent donc clairement des méthodes expérimentales et on ne peut les relier sûrement au pouvoir de résolution de l'oreille. Duifhuis (1970, [23,24]) a montré que l'audibilité des harmoniques pouvait être sensible, suivant leur rang, à leur phase par rapport aux autres harmoniques. Pour un rang < 10 et des fondamentaux de 25,50 et 200 Hz les harmoniques étaient également audibles, quelque soit leur phase, par contre pour des rangs >28 pour des fondamentaux de 25,50 Hz, supérieures à 25 pour 100 Hz, leur audibilité étaient très sensiblement affectée par leur phase. Kubovy et Jordan (1979, [52]) ont montré pour leur part que des harmoniques pouvaient être rendu audibles dans un spectre continu en modifiant leur phase. Ils retrouvent les résultats de Duifhuis en remarquant que cela est plus sensible pour les harmoniques de rang supérieure à 11.

2.2.1.4. Sons de combinaison

En conformité avec les résultats neurologiques, les sons de combinaison de type additif $f_1 + f_2$, etc sont très faibles. Les sons de combinaison les plus importants sont d'une part le son différentiel simple $f_2 - f_1$ et les sons de combinaison du type $f_1 - k(f_2 - f_1)$ notamment le son de combinaison critique (CDT) $2f_1 - f_2$.

Plomp (1965), [70] ne trouve pas de sons différentiels simples $f_2 - f_1$ pour des intensités des primaires inférieures à 50 dB SPL. Toutefois Humes dans une étude récente (1979, [46]) trouve une zone d'existence montrant pour des rapports f_2/f_1 inférieures à 1.3 une nette variation, notamment pour $f_2/f_1 = 1,16$ un niveau de 33 dB SPL est suffisant pour obtenir un son différentiel de 10 dB. Dans cette étude $f_2 - f_1$ est inférieur de 20 dB et souvent beaucoup plus au niveau du son primaire le plus fort. De façon générale le niveau maximum est obtenu pour les rapports f_2/f_1 les plus petits.

Les sons de combinaison du type $f_1 - k(f_2 - f_1)$ restent nettement plus audibles. Des primaires de 20 dB (parfois 13 dB) sont suffisants pour pouvoir les entendre. Pour $f_1 = 40$ dB une intensité de 4 dB pour le second primaire est suffisante pour percevoir le CDT. L'audibilité est presque aussi bonne pour les autres sons ($k > 1$) (Smooenburg, 1972 [102]). Le niveau du CDT est maximum lorsque les deux primaires ont le même niveau et peut être égal ou légèrement supérieur au niveau du primaire le plus faible dans certains cas: par exemple pour un niveau de f_1 de 30 dB de f_2 de 10 dB, le CDT a un niveau de 10 dB. (Smooenburg, 1972 [103]).

L'origine de ces sons de combinaison reste mystérieuse. De très nombreuses études tant au niveau neurologique que psychoacoustiques montrent que les sons de combinaisons sont identiques à un stimulus externe réellement présent (Pour une revue voir Goldstein et al, 1978 [35]) alors que les mesures physiques ont presque toutes échouées pour trouver une non-linéarité du mouvement cochléaire (cf 1.1) et la seule mesure physique portant spécifiquement sur les sons de combinaison n'a pas trouvée un niveau compatible avec celui trouvé au niveau neurologique. (Wilson et Johnstone (1979, [121])).

2.2.2 SONS COMPLEXES

2.2.2.1. Hauteur périodique

A. Présentation : un phénomène bien connu, pierre d'achoppement des théories de la hauteur, est la perception des fondamentaux graves subjectifs: dans certaines conditions un son complexe privé de sa composante fondamentale est perçu comme ayant la hauteur correspondant à la fréquence de celle-ci (en anglais: periodicity pitch, low pitch, residue). (cf Revue dans Plomp, 1975 [77], auquel je suis très redevable pour cette section).

On a cru longtemps que la non-linéarité de l'oreille recréait ce fondamental absent dans le stimulus externe et était la cause de la perception de cette hauteur (Von Békésy, 1972 [7]). Cette hypothèse est maintenant communément rejetée. Lichlider (1954 [55]) a montré qu'une bande de bruit capable de masquer un son pur égal en énergie au complexe sonore et de la fréquence du fondamental n'empêchait pas la perception du résidu. D'autres études de masquage (Small et Campbell, 1961 [99]) de fatigue sélective (Small et Yelen, 1962 [100]); Glatke, 1969 [33]) ont confirmé que la hauteur basse est induite dans des canaux nerveux correspondant aux hautes fréquences: les harmoniques sont signifiants, par un moyen ou un autre dans la perception du résidu.

De Boer (1956, [19]) émet deux hypothèses présentées comme contradictoires:

(a) Le résidu est dérivé des intervalles de temps entre les pics de la structure temporelle fine de la forme d'onde à un endroit donné de la cochlée,

(b) Le résidu est dérivé du spectre de puissance et correspond à la meilleure estimation du plus grand commun diviseur de fréquences des partiels.

La première hypothèse nécessite que les harmoniques qui entrent en jeu dans la perception du résidu ne sont pas résolus par l'analyse cochléaire, la seconde nécessite qu'ils soient résolus.

B. Hauteur de sons inharmoniques

Schouten et al, (1962) [96]) a été un des premiers à étudier le résidu et opter pour la première hypothèse. Il a notamment étudié la hauteur d'un complexe inharmonique. En partant d'un son à 3 composantes (1900, 2000, 2200 Hz) décalé de 30 Hz, le son résultant (1830, 2030, 2230) inharmonique est perçu à 203 Hz. Ce fait invalide également l'hypothèse de sons différentiels pour expliquer le résidu. Toutefois la variation de hauteur est légèrement plus élevée que celle que procurent les hypothèses (a) ou (b). Cette différence, appelée second effect of décalage de hauteur (second effect of pitch shift) a été observée par de nombreux auteurs (Patterson 1973 [68], Smoorenburg 1970 [101], Grennhough et al 1973 [37]). Smoorenburg explique cet effet par la présence de sons de combinaisons qui enrichissent le spectre en harmoniques plus graves. [101]. Van den Brink (1970, [113]) montrant que le second effect disparaît à des intensités très faibles renforce cette hypothèse.

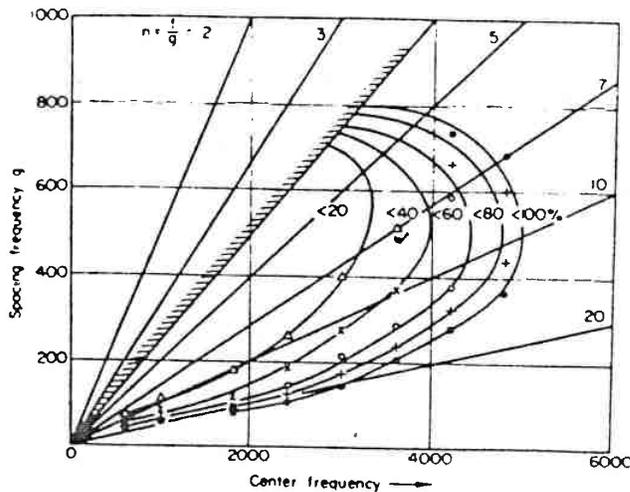
C. Paramètres influençant la perception de la hauteur périodique

1. Nombre de composants

Dans les premières études sur le résidu, on observe que plus le nombre d'harmoniques était grand, plus le résidu était clair. Smoorenburg (1970 [101]) montre que trois ou deux harmoniques suffisent pour qu'il existe.

Un son de 3 harmoniques a été retenu d'ailleurs comme représentatif pour la production des résidus en général, à la suite des études de Ritsma (1962, [89]) sur la zone d'existence du résidu utilisant des stimuli modulés en amplitude donc composés de 3 harmoniques. Ritsma conclut à l'existence d'un résidu si la fréquence centrale est entre 40 et 800 Hz (figure [psy.3]). Moore (1972, [60]) confirme ces résultats en trouvant toutefois des résidus jusque 1400 Hz

Figure [psy.3]



Zone d'existence du résidu tonal. Les lignes continues issues de l'origine représente des valeurs constantes du rapport f/g . En pourcentage figure l'index de modulation (d'après RITSMA[89])

2. Position des harmoniques

Nous avons vu que l'hypothèse (a) de De Boer supposait que les harmoniques entrant en jeu dans la perception du résidu ne devraient pas être résolus donc de rang assez élevé, hypothèse qu'aurait retenue Schouten dans ses travaux. Or l'étude de Ritsma [89] déjà citée montre l'existence pour des sons ne comportant que des harmoniques de rang faible (3,4,5 par exemple) sûrement résolus par l'analyse cochléaire. De plus Ritsma (1967, [90]) allait développer le concept de dominance spectrale qui est un retournement complet de la situation et le choix de l'hypothèse (b). Ce concept affirme qu'une région limitée du spectre située autour du 4e et 5e harmoniques est prédominante pour la perception du résidu. Plomp (1967, [72]) montre pour sa part que le rang des harmoniques prépondérants diminue avec des fréquences croissantes. Au delà de 1400 Hz la hauteur est déterminée par le

fondamental lui-même. Bilsen (1973, [9]) confirme l'existence d'une région dominante. Patterson (1973, [68]) trouve pour un signal composé des 6 fréquences 1260 1460 2260 Hz une hauteur de 209 Hz soit la même hauteur que celle perçue pour un stimulus ne comprenant que les 3 premiers partiels et plus que celle d'un stimulus comprenant les 3 derniers (206 Hz). Hoekstra (1973, [44]) mesure le seuil différentiel de fréquence pour des sons périodiques filtrés par 1/3 d'octave. Le seuil différentiel reste inchangé pour les 8 premiers harmoniques puis augmente entre 8 et 20 pour se stabiliser au delà de 20 à 2%, valeur qu'il obtient également avec un bruit blanc interrompu à la fréquence de 100 Hz. Hoekstra conclut que la résolution spectrale est nécessaire pour la perception d'un résidu.

3. Phase des composants

Ritsma et Engel (1964, [91]) note la disparition du résidu pour des sons modulés en fréquence alors que modulé en amplitude le résidu réapparaît. Nordmark (1978, [67]) trouve un effet analogue. Wightman (1973, [117]) et Patterson (1973, [68]) trouve un résidu indépendant des phases des harmoniques.

4. Présentation binaurale des harmoniques

Houtsma et Goldstein (1972, [43]) ont étudié des stimuli de deux harmoniques présentés soit de façon monaurale (les deux harmoniques dans une oreille) soit binaurale (un harmonique à chaque oreille). Dans les deux cas la perception du résidu était possible à des niveaux d'intensité faible. Les sujets réussissaient des tests de reconnaissance d'intervalle également dans les deux conditions. Dans les deux cas le pourcentage de réponses correctes augmentait lorsque le rang des harmoniques diminuait.

5. Relation entre hauteur périodique et hauteur des harmoniques

Walliser (1969, [114]) montre que, en fonction de l'intensité du son et du niveau d'un bruit superposé, la variation de hauteur du résidu d'un groupe d'harmoniques est corrélée à celle d'un son correspondant à l'harmonique le plus grave et non avec le fondamental (absent). Walliser (1969, [115]) montre également que le seuil de perception de la hauteur pour un son complexe est déterminé par l'harmonique ayant le plus petit seuil plutôt que par le fondamental. Van den Brink (1970, [113]) montre que la diplacousie binaurale pour la hauteur basse d'un son complexe est environ la diplacousie moyenne des composants plutôt que celle du fondamental.

D. Conclusions sur la hauteur périodique

- Hypothèse b? -

Les résultats expérimentaux exposés ci-dessus supportent mal l'hypothèse (a) de De Boer qu'avait choisie Schouten, initiateur des recherches sur le résidu. Celle-ci, rappelons le, suppose que le résidu est issu d'une analyse temporelle de la structure fine du signal. Pour que cette analyse aboutisse à la perception du fondamental il faut qu'elle se fasse sur des harmoniques non résolus par l'analyse cochléaire. Or de nombreuses expériences montrent que la perception du résidu est possible avec des harmoniques résolus. La figure 9 représentant la zone d'existence du résidu le montre clairement, le peu d'influence de la phase sur le résidu également (C,3). Le plus éloquent restent les expériences de Houtsma et Goldstein sur la perception de résidu binaurculaire (C,4). Car au niveau de la cochlée il n'existe aucun stimulus complexe dans ce cas. L'existence d'une région dominante (C,2) autour de l'harmonique 4 (zone où les harmoniques sont sûrement résolus) et la corrélation entre la hauteur du résidu et celle des harmoniques pris individuellement (C,5) indiquent de plus que l'audition utilise le même type d'information pour la perception du résidu et celle des harmoniques isolées. Peut-on alors adopter totalement l'hypothèse (b), à savoir que la résolution est nécessaire et suffisante pour la perception du résidu? Plomp [77] le pense. Nordmark [67] en doute et il est intéressant de le suivre dans cette voie.

- Ou hypothèse a? -

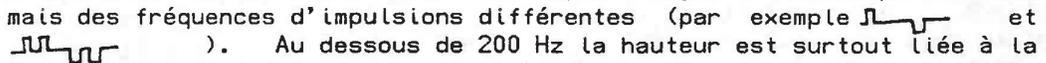
Nordmark observant le tableau de Ritsma (figure [psy.3]) constate qu'on obtient un résidu de 100 Hz pour une fréquence centrale de 1000 Hz et une modulation de 20%. Dans ce cas les harmoniques sont séparés par moins d'une bande critique, les harmoniques latéraux, très faibles, peuvent-ils être considérés comme résolus? s'interroge-t-il. Ritsma observe également des résidus avec des harmoniques de rang voisin de 20, harmoniques sûrement non résolus. Toutefois on peut l'expliquer par la présence de sons de combinaisons plus graves et donc mieux résolus. D'ailleurs l'étude de Moore [64] montre que dans le cas où les sons de combinaisons ont été supprimés (faible niveau, masquage des fréquences inférieures aux stimulus) on n'obtient pas de résidu pour une fréquence centrale supérieur à 10 fois la fréquence de modulation. Selon Moore cela représente encore une séparation plus faible de 50% à celle nécessaire pour percevoir des partiels séparément. Moore conclut à l'existence d'une analyse temporelle. On peut conclure également que les mécanismes qui permettent l'audibilité des partiels ou la perception du résidu sont différents bien qu'utilisant la même information neurale (Plomp [77]). Donc en repoussant un peu la limite de la résolution auditive (10e harmonique résolu) l'existence du résidu pour des stimuli de 3 harmoniques est compatible avec le fait que la résolution est **nécessaire**. Par contre, ce même tableau (Ritsma ou Moore) indique clairement que cela n'est pas **suffisant**. En effet, pour des fréquences élevées, supérieures à 5000 Hz, on ne peut obtenir de résidu même pour des fréquences de modulations élevées supérieures à 1000 Hz donc avec des stimuli composés par exemple des harmoniques 3, 4 et 5 sûrement résolus par l'analyse cochléaire.

Toutefois de nombreux auteurs rapportent la perception d'une hauteur

périodique (correspondant au fondamental) avec des sons ne comportant que des harmoniques ne pouvant être résolus. Nordmark [67] cite deux exemples:

- un disque accompagnant la thèse de Plomp (1966, [71]) fournit l'exemple d'un son de fondamental (absent) 400 Hz filtré jusqu'à 8000 Hz dont on perçoit la hauteur périodique.

- un disque de Meyer, Eppler et al. (1959, [57]) contient une mélodie de sons filtrés avec des fondamentaux entre 65 et 98 Hz. La fréquence de coupure du filtre passe successivement de 180 à 8000 Hz. Lorsque les 21 premiers harmoniques sont retirés la mélodie se reconnaît facilement, elle est encore faiblement perceptible lorsqu'on retire les 80 premiers (sur 122).

Plomp (1976, [78]) fournit une explication pour ce phénomène qu'il dénomme "hauteur de crécelle" (rattle pitch). L'ouïe serait dans ce cas sensible à l'enveloppe du signal, donnant lieu au phénomène de raucité (battement rapide) et limitée à la zone d'existence de celui-ci (50 à 200 Hz, Terhardt, 1968 [108]). La périodicité de l'enveloppe et du signal ne sont pas obligatoirement les mêmes. Cela a été mis à profit par Flanagan et Guttman (1960, [28]) qui ont utilisés des trains d'impulsion de diverses polarités ayant toujours la même périodicité mais des fréquences d'impulsions différentes (par exemple ). Au dessous de 200 Hz la hauteur est surtout liée à la fréquence des impulsions, au dessus à la fréquence du fondamental. Mais même dans ce cas les auteurs rapportent que les deux composantes restent audibles: la composante tonale de la hauteur du fondamental associée à un timbre " tonal " et la composante rauque (buzzlike) ayant une hauteur corrélée à la fréquence des impulsions. Rosenberg (1965, [94]) montre que la composante tonale est due à la partie basse du spectre (autour de 500 Hz pour un fondamental de 150 Hz) et la composante rauque à la partie haute du spectre (autour de 5000 Hz). Plomp conforte son opinion avec l'expérience de Ritsma et Hoekstra (1974, [92]) sur le seuil différentiel en fréquence d'un train d'impulsions filtré sur 1/3 d'octave. Le seuil augmente à partir du 8e harmonique pour atteindre un plafond de 2% à partir du 20e harmonique. Cette asymptote est atteinte également avec des impulsions périodiques de bruit, ce qui renforce l'hypothèse d'une hauteur extraite de l'enveloppe plus que de la structure fine du signal.

- Les deux -

La situation se pose donc en ces termes. Incontestablement on peut extraire un attribut de hauteur d'un groupe d'harmoniques non résolus. Le mécanisme extrayant cet attribut ne peut utiliser d'indices spatiaux donc fonctionne avec des indices temporels (Risset, 1968 [85]). Ces indices temporels sont-ils liés uniquement à l'enveloppe du signal au lieu excité, permettant de détecter la périodicité de celle-ci, hypothèse de Plomp qui exclut a priori toute analyse spectrale? Ou bien, hypothèse de Schouten, une analyse de la structure fine est-elle possible? Le mécanisme de Plomp semble le seul valide pour la perception d'une hauteur avec des bruits interrompus ou des sons harmoniques filtrés au delà de 5000 Hz (Harris 1963 [39]) pour lesquels tout indice temporel sur la structure fine est perdue. Mais on ne peut exclure que pour des fréquences inférieures et surtout pour les harmoniques proches de la résolution, des informations sur la structure

fine du signal ne sont utilisables et utilisées. Les expériences de Duifhuis et de Kubovy et Jordan [23,24,52] sur l'audibilité des harmoniques en sont peut-être un signe.

Deux types de hauteur périodique semblent donc possible: l'une, extraite de l'analyse temporelle d'un groupe d'harmoniques non résolus, l'autre de la perception synthétique d'harmoniques résolus (rattle pitch et low pitch selon la terminologie de Plomp). Ce dernier mécanisme est le plus prégnant et le plus utilisé par l'audition, c'est celui dont elle use pour presque tous les sons musicaux complexes qui possèdent en général des harmoniques de rang faible et notamment le fondamental.

- Hauteur basse -

Nous allons désormais nous intéresser surtout à ce mécanisme qui a fait l'objet de recherches théoriques et expérimentales importantes. Le processeur nerveux le réalisant est certainement central (au moins en partie) car c'est le seul moyen de rendre compte des résidus binauraux (C,4). Les arguments avancés au début de ce paragraphe suggèrent qu'il utilise des informations liées à chaque pic créé par le stimulus le long de la cochlée. Quel est le codage nerveux qui transmet ces informations? La distribution tonotopique des influx, cheval de bataille des tenants de la théorie de la localisation? Les études physiologiques ont montré que la distribution spatiale des influx était conservée jusqu'au niveau du cortex. Il est probable qu'elle soit utilisée mais rien ne montre actuellement que cela soit l'information unique voir dominante pour la hauteur tonale. Selon Plomp [77], un codage temporel est tout aussi plausible, les résultats expérimentaux actuels ne donnant pas de conclusions.

Toutefois plusieurs indices montrent l'importance du codage temporel des fréquences. Comme nous l'avons déjà signalé, que cela soit selon l'étude de Ritsma ou de Moore, on n'obtient pas de résidu avec 3 harmoniques de fréquence supérieure à 5000 Hz, ceci même lorsque le rang de ces harmoniques est très faible (2 ou 3). Or 5000 Hz correspond à la fréquence maximale pour laquelle les influx nerveux sont globalement synchronisés avec le signal, pour laquelle un codage temporel est valide. Si seul le codage tonotopique était utilisé pour la perception du résidu, pourquoi celui-ci disparaît-il au delà de 3000 Hz. On peut également citer l'expérience de Bilsen et Goldstein (1974, [10]). En superposant un bruit blanc et ce même bruit blanc retardé de T secondes, on perçoit une hauteur à $1/T$ Hz ($T \ll 1$) (repetition pitch). En version monaurale, on peut l'expliquer en termes d'analyse spectrale car des pics périodiques à n/T Hz existent dans le spectre. Les deux auteurs ont montré que cette hauteur ne disparaissait pas si l'on présentait le bruit blanc à une oreille et sa version retardée à l'autre. Dans ce cas aucun indice spectral n'est présent aux niveaux périphériques. Les auteurs concluent à l'existence d'un mécanisme de détection de la hauteur central utilisant les informations de fréquence d'un spectre obtenu à un niveau central dans lequel les différences interauriculaires sont réflétées.

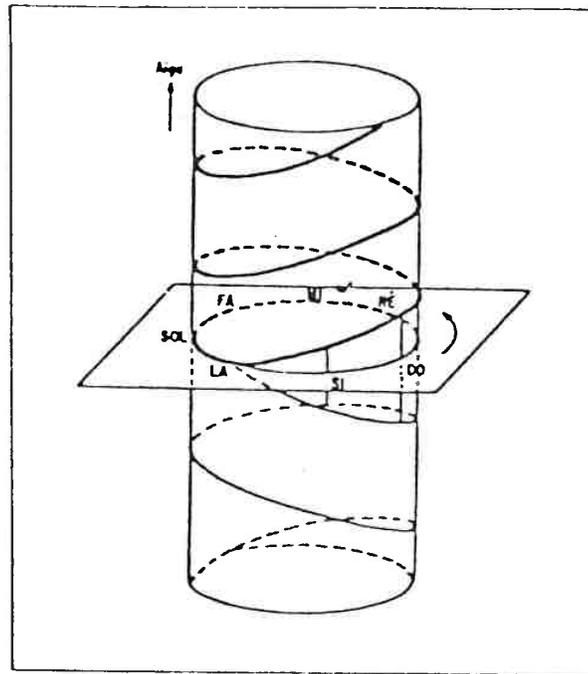
3- Essai de réponse -

Le rôle respectif des informations temporelles et spatiales pour la perception de la hauteur a été éclairé par les travaux de Risset et

Charbonneau [86,87,88,15,16,17]. Les deux indices sensoriels précités sont tous les deux utilisés par l'ouïe pour extraire l'attribut de hauteur qui présente ainsi une certaine duplicité, que l'on retrouve au niveau perceptuel sous la forme d'une hauteur tonale (information temporelle dominante) et d'une hauteur spectrale ou brute (information spatiale dominante). (Pour l'élaboration de ces concepts voir Bachem (1950, [3]) et Teplov (1966, [107])). A la suite des expériences de Shepard (1964, [97]) ces deux auteurs ont utilisé des stimuli dissociant ces deux composantes habituellement corrélées. En effet en utilisant des sons ne comportant que des harmoniques à distance d'octave, créant ainsi une grande ambiguïté d'octave au niveau des indices temporels, la répartition spectrale (en forme de cloche) devient un attribut de hauteur très perceptible. Ainsi en maintenant la périodicité (hauteur tonale) constante, on perçoit une montée (en restant sur la même note) en faisant varier la hauteur spectrale. De même en maintenant la hauteur spectrale (enveloppe spectrale fixe) et en faisant varier la hauteur tonale on peut obtenir des sons variant indéfiniment de hauteur, montant ou descendant perpétuellement. Plus intéressant encore est la situation où les deux dimensions varient simultanément de façon contraire.

Dans ce cas les auditeurs ont alors des réponses variées suivant le poids qu'ils attribuent à la hauteur tonale ou à la hauteur brute [18], poids qui est lié au passé auditif; notamment la hauteur tonale domine parfois de façon exclusive la perception des musiciens, chez les non musiciens l'inverse peut se produire [17]. Une expérience établit également que l'oreille droite perçoit mieux les mélodies tonales et l'oreille gauche les mélodies spectrales [16]. Les résultats sont à rapprocher des conclusions antérieures sur la dissymétrie des hémisphères cérébraux, attribuant à l'hémisphère droit des mécanismes de reconnaissance globaux, synthétiques et à l'hémisphère gauche des vertus analytiques (Bever et Chiarello, 1974 [8]). Compte tenu du chiasme du nerf auditif, cela corrobore une théorie considérant que la hauteur tonale est issue d'une perception analytique des stimuli, extrayant des informations de fréquence à partir d'indices temporels sur chaque harmonique, que la hauteur spectrale est le résultat d'une perception synthétique sur la localisation des harmoniques. Les résultats donnent une assise objective à la notation musicale occidentale qui décrit les sons musicaux suivant un schéma bidimensionnel: le chroma (les 12 notes de la gamme, la hauteur tonale) constituant l'une de ces dimensions, l'octave (hauteur brute) l'autre (figure [psy.4]). Toutefois cette dichotomie entre les deux hauteurs s'estompe lorsque les stimuli sont des sons plus naturels, c'est-à-dire possédant une série harmonique complète. La hauteur tonale possède alors un octave bien défini et est très prégnante. La dimension spectrale est alors plutôt associée perceptivement au timbre (brightness, timbre "aigu" ou "grave") [88]. Il est d'ailleurs vraisemblable que si la localisation des harmoniques n'est ni l'élément exclusif, ni même dominant de la hauteur, il n'en est pas de même pour le timbre des sons périodiques (Plomp, 1971 [75], 1970 [74]) et la localisation des formants permet la reconnaissance des voyelles [74].

Figure [psy.4]



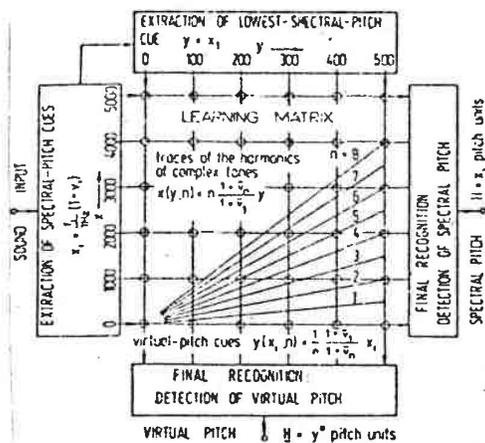
(d'après Risset, [88]).

E. 3 Théories sur la hauteur périodique

1. Le modèle de Terhardt : théorie de la hauteur virtuelle. Selon ce modèle (Terhardt, 1974 [111]) le système auditif extrait des indices binaires spectraux correspondant à la place de chaque harmonique présent et résolu du stimulus. Cette place est liée principalement à la fréquence de l'harmonique mais accessoirement à son intensité et à la présence de partiels adjacents. Pour satisfaire la nécessité de résolution, ces indices sont limités à huit (nombre maximal d'harmoniques résolus selon Plomp, 1964, [69]). Si l'on perçoit en mode "analytique" pour chaque harmonique présent, on perçoit la hauteur "spectrale" correspondant à sa place donc une simple projection des indices spectraux.

Mais il existe un autre mode de perception, le mode "synthétique", qui conduit à la perception d'une seule hauteur, appelée hauteur virtuelle, pour un complexe harmonique. Cette hauteur est considérée comme le fruit d'une perception gestaltiste et suppose un apprentissage antérieure, supposé acquis par l'écoute de la parole. De même qu'en vision on peut percevoir des contours non réellement présents (fig [psy.6]) on peut percevoir une hauteur virtuelle à la hauteur d'un fondamental absent (résidu). La phase d'apprentissage consiste à mémoriser (action symbolisée par une matrice d'apprentissage dans la figure [psy.5]) les corrélations entre les indices spectraux simultanés donc celles des signaux harmoniques puisque l'apprentissage est supposé fonctionner sur des signaux de parole.

Figure [psy.5]



Modèle de la perception de la hauteur spectrale et virtuelle selon Terhardt (1974, [111]).

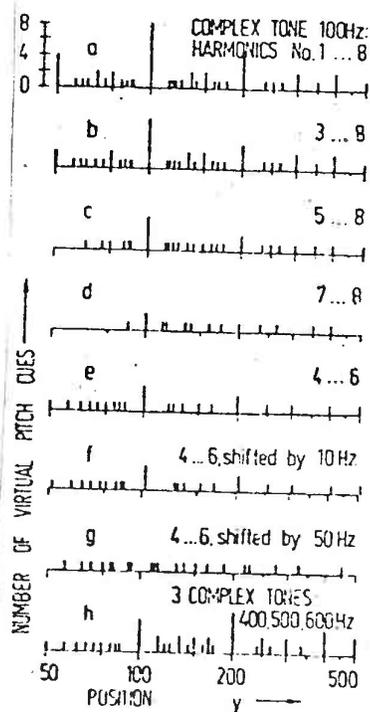
Figure [psy.6]

PITCH

Analogie visuelle de la hauteur virtuelle. [de S. Coren, psych. rev, 79,359-367 (1972)]

La phase de détection de la hauteur virtuelle consiste alors à utiliser cette matrice. Pour chaque indice spectral on peut extraire 8 sous-harmoniques, correspondant aux fondamentaux dont cet indice pourrait être un harmonique. Les indices donnant la même hauteur sont additionnés, la probabilité de percevoir une hauteur virtuelle particulière est une fonction croissante du total des sons harmoniques correspondant à cette hauteur. Ainsi pour un stimulus comportant une série harmonique complète (harmoniques 1 à 8) la hauteur virtuelle perçue la plus probable sera celle correspondant au fondamental (figure [psy.7:a]) avec 8 unités mais les octaves et quintes inférieures et supérieures se retrouvent avec un score non négligeable (respectivement 4 et 2 unités)

Figure [psy.7]



Distribution des indices de hauteur à l'entrée du système de détection de la hauteur virtuelle. (Terhardt, 1974, [111]).

La théorie explique ainsi l'ambiguïté, relevée par certains auteurs de la hauteur d'un son complexe. Elle explique également le phénomène de résidu (fig [psy.7: b à d]), la hauteur des sons inharmoniques étudiées par Schouten (fig [psy.7:eg]) et certains phénomènes musicaux

comme l'importance de la relation d'octaves, l'élargissement des échelles musicales réellement utilisées par rapport à celles dérivées du calcul de rapports de fréquences simples, les fonctions tonales.

2. Théorie de l'anamorphose (pattern transformation theory)

Selon cette théorie (Wightman, 1973 [118]). Le signal passe dans une première étape à travers un filtre passe-bande simulant l'oreille externe et moyenne dont la courbe est l'inverse de celle du seuil auditif, (middle ear bandpass). Puis il est transformé par l'analyse cochléaire en une fonction traduisant l'activité nerveuse au niveau périphérique ("peripheral activity pattern"). Cette transformation est simulée par un banc de filtre passe-bande ayant une forme triangulaire dans une échelle logarithmique et assurant une résolution de 20%. La fonction obtenue (intensité contre fréquence) subit alors une transformée de Fourier dont le résultat est comparable à une fonction d'autocorrélation amortie du signal d'entrée, la quantité d'amortissement dépendant de la résolution spectrale de l'étage précédent. Un détecteur de hauteur opérant sur cette fonction détermine les pics autres que celui à l'origine, trivial, et qui correspondent aux sensations de hauteur (figure [psy.8]).

Figure [psy.8]

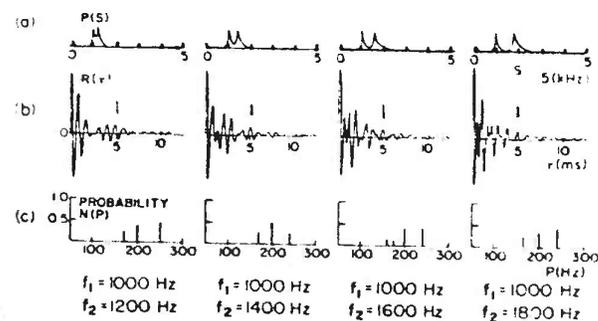
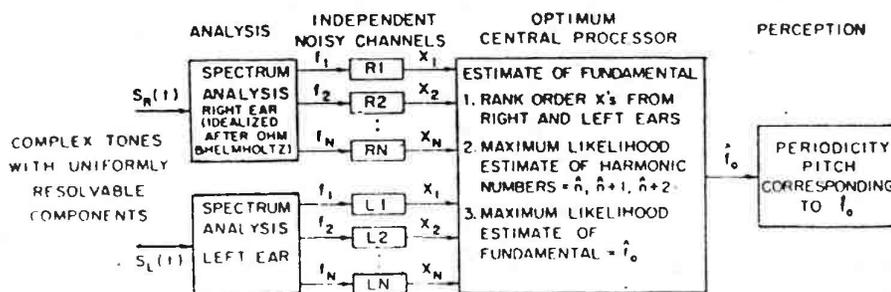


Illustration de la théorie de l'anamorphose dans le cas de complexes à deux partiels. (a) réponses du niveau périphérique, (b) transformée de Fourier de ces réponses, (c) fonctions de probabilité dérivées de cette transformée de Fourier, (complément à la théorie par Houtsma) (d'après Houtsma 1979 [42])

3. Théorie du processeur optimal (optimum processor theory).

Cette théorie (Goldstein 1973, [34]) est celle qui a donné lieu au plus grand nombre de développements et de vérifications expérimentales car elle contient des lois quantitatives. Le modèle comprend deux étapes (figure [psy.9]) une analyse de Fourier sujette à des erreurs aléatoires et à des non-linéarités suivi d'un processeur qui reconnaît des formes harmoniques en procédant à une estimation optimum au sens des probabilités de la période fondamentale des sons musicaux et de parole. La théorie prédit que la hauteur période d'un stimulus donné est une fonction stochastique multimodale, que donc plusieurs hauteurs peuvent être entendues, notamment un signal périodique constitué d'harmoniques successif possède un mode principal important très proche de la vraie période du son.

Figure [psy.9]



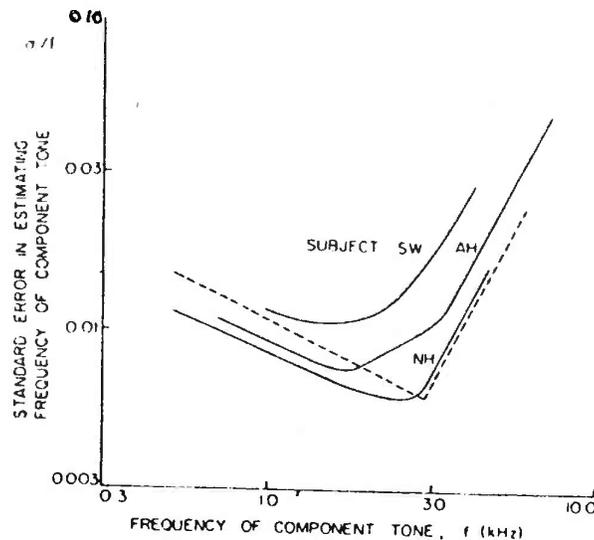
Théorie du processeur optimal pour la formation centrale d'une hauteur périodique des sons complexes. Les analyseurs spectraux fournissent les canaux bruités avec des représentations de chaque composant spectral résolu du stimulus. Une estimation de la fréquence de chacun mais pas son amplitude ni sa phase est envoyée au processeur optimal qui en retour estime la période du stimulus en faisant l'hypothèse qu'il est harmonique. (D'après Goldstein 1973 [34]).

Des erreurs ou des ambiguïtés se produisent, dues à la perception des hauteurs des modes autres que le mode principal. La probabilité des ambiguïtés ainsi que l'écart entre les modes est réduite si on augmente le nombre des harmoniques ou si les erreurs dans l'estimation de la fréquence d'un partiel sont réduites.

Des règles mathématiques simples décrivent les deux étapes du procédé. La première étape, estimation de la fréquence des composants du son, ne tient pas compte de l'amplitude et de la phase de ceux-ci. De façon indirecte, toutefois, la phase intervient sur le nombre des composants par le biais des sons de combinaisons. Deux types de limitation interviennent pour la mesure des fréquences: la résolution de l'analyse de Fourier et la variabilité stochastique de la représentation de la fréquence analysée. La résolution est estimée à 10% pour les signaux monauriculaires et reflète la résolution périphérique de l'oreille.

Le caractère aléatoire des mesures de fréquence des composants résolus est présenté dans la théorie du processeur optimal comme la cause fondamentale des ambiguïtés de hauteur et il est traduit par la déviation standard $\sigma(f)$ dont la figure [psy.10] donne les valeurs obtenues expérimentalement pour 3 sujets et les valeurs théoriques retenues pour simuler le fonctionnement du modèle.

Figure [psy.10]



Erreur standard dans l'estimation de la fréquence d'un composant résolu d'un son complexe. Les trois courbes continues ont été calculées par Goldstein (1973 [34]) avec les données du modèle du processeur optimal de Houtsma et Goldstein (1972 [43]). La courbe en pointillé représente la courbe théorique déduite de ces courbes expérimentales: $\sigma(f)$ proportionnel à $f^{-0.05}$ pour $f < 3$ kHz et $\sigma(f)$ proportionnel à f pour $f > 3$ kHz. (d'après Goldstein et col. 1978 [36])

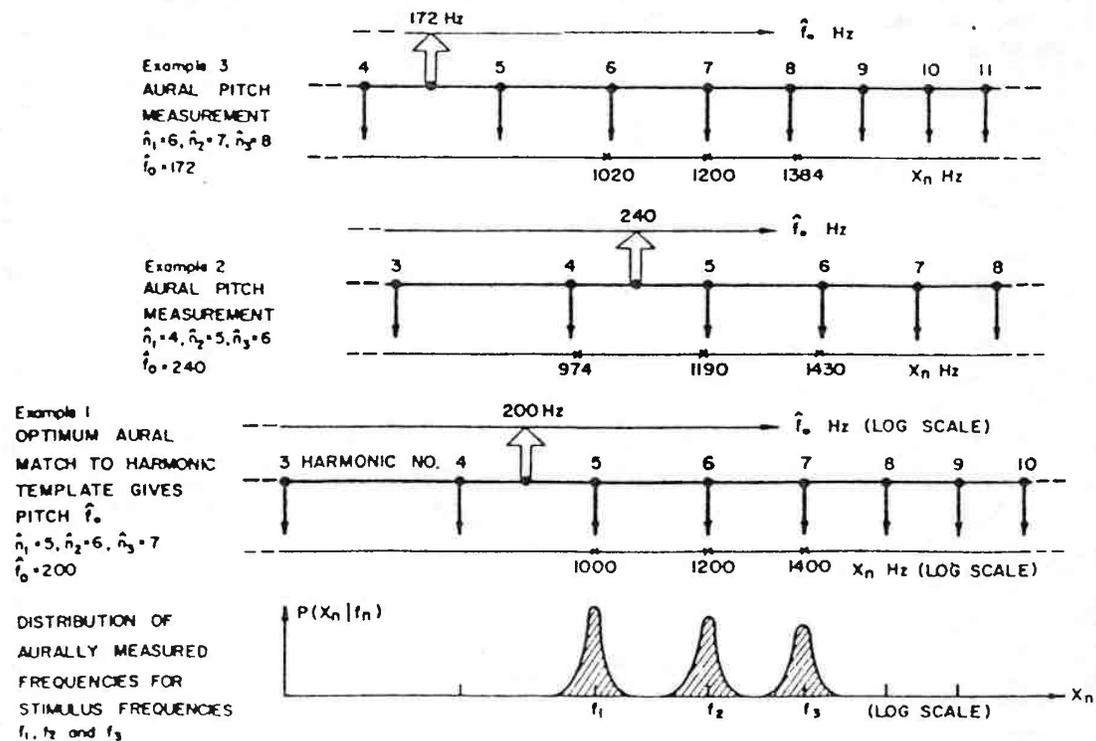
La figure [psy.11] illustre le procédé d'évaluation de la hauteur du système. La dernière ligne montre une distribution stochastique des mesures de fréquence pour un son complexe de 3 composants (1000, 1200, 1400 Hz). A chaque présentation du stimulus le processeur central reçoit une estimation pour chacune de ces fréquences. La hauteur périodique est alors calculée grâce à une règle déterministe de décision qui produit le meilleur accord, au sens des moindres carrés, entre une échelle harmonique (harmonic template) interne au processeur et les fréquences estimées.

Plusieurs exemples de ce mécanisme sont montrés dans la figure [psy.11]. Le premier correspond à une estimation exacte des fréquences et conduit donc à une hauteur périodique correspondant à la vraie période du signal.

Si les estimations sont très éloignées de la valeur exacte, le meilleur accord peut être obtenu avec un autre rang des harmoniques (ex 2: 4,5,6; ex 3: 6,7,8) conduisant à une hauteur franchement différente, déterminant un autre mode. On peut pour un stimulus donné obtenir la distribution stochastique des hauteurs périodiques possibles.

Celle-ci se présente comme une suite de pics gaussiens correspondant aux divers modes. Dans une première version [34] les harmoniques étaient supposés successifs par le processeur central, car c'est ainsi qu'on obtenait la meilleure adéquation entre résultats expérimentaux et théoriques pour les stimuli étudiés. Mais cette contrainte empêchait de rendre compte de la hauteur de sons ne comportant que des harmoniques impairs (entendus généralement à la hauteur du fondamental).

Figure [psy.11]



La hauteur périodique en tant que reconnaissance de formes harmoniques. En bas: distribution de probabilité des estimations par l'oreille des fréquences des composants d'un son complexe de 200 Hz comprenant les harmoniques 5,6 et 7. La variabilité aléatoire de ces mesures est la source des erreurs dans l'estimation de la hauteur périodique. Les exemples 1 à 3 illustrent ces estimations pour trois jeux de valeurs des fréquences des composants. La hauteur périodique estimée est très proche du fondamental du stimulus lorsque l'échelle harmonique interne aligne correctement ses harmoniques avec ceux du stimulus (1). De grandes erreurs se produisent lorsque les harmoniques sont décalés (2 et 3) (d'après Goldstein et col., 1978 [36]).

Dans une étude ultérieure (Gerson et Goldstein, 1978 [31]) cette règle a été supprimée mais pour compenser cette perte une fonction appelée probabilité d'attente a été ajoutée. Celle-ci traduit le contexte en ajustant à volonté la bande dans laquelle le fondamental peut être entendu, réduisant dans la même proportion le nombre de modes

possibles. D'autre part une règle supplémentaire est instaurée. En supprimant la règle restreignant la reconnaissance à des harmoniques successifs, les reconnaissances de type "sous-harmoniques" deviennent équiprobables, le système reconnaissant les composants du stimulus comme étant respectivement les harmoniques (1,2,3), (2,4,6) ou (4,8,12). Pour pallier cet inconvénient, la règle supplémentaire s'énonce ainsi: une reconnaissance "sous-harmonique" est possible uniquement si la reconnaissance "normale" est en dehors de la plage de fréquence attendue, sinon la reconnaissance normale est préférée. De façon générale si deux hauteurs permises sont également proches (au sens des moindres carrés) des fréquences estimées, le processus préfère la hauteur la plus haute (pour laquelle les rangs estimés des harmoniques sont les plus bas).

4. Conclusions.

Ces 3 théories sont très similaires dans leurs prédictions qualitatives. De Boer (1977, [21]) formule d'ailleurs une théorie générale où il établit une relation mathématique entre les 3 théories. Si la variance de l'estimation d'une fréquence défini dans la théorie de Goldstein est très large, causant une superposition considérable des fonctions de densité stochastiques des entrées du processeur central, cette théorie devient équivalente à celle de Wightman, tandis que si la variance est réduite à zéro, on obtient la théorie de Terhardt.

Les valeurs de variance utilisées par Goldstein pour simuler le fonctionnement du processus étant faibles, cette théorie se rapproche en fait beaucoup plus de celle de Terhardt que de celle de Wightman et les deux premières théories décrivent beaucoup mieux le comportement de l'oreille en mode synthétique que la dernière (Houtsma, 1979 [42]).

Les deux théories, celle de Goldstein et de Terhardt, se distinguent nettement cependant, la première est une formulation strictement théorique qui ne fait aucune hypothèse sur la localisation dans le système nerveux des diverses transformations du signal (si ce n'est le caractère central du processeur final) ni sur la manière dont elles sont accomplies. Elle est de nature stochastique et procure une description quantitative complète de la relation entre le stimulus et la réponse subjective pour la plupart des expériences portant sur les sons complexes. La deuxième a une formulation déterministe, fait un grand nombre d'hypothèses plutôt spéculatives sur les détails physiologiques du processus d'apprentissage et d'extraction de la hauteur virtuelle, ne s'attarde pas sur la façon dont la sortie du modèle se relie à la perception subjective et nécessite des hypothèses supplémentaires pour la tester de façon quantitative (tentative menée avec succès par Houtsma [42]).

D'autre part la théorie de la hauteur virtuelle utilise de façon spécifique des indices spectraux qui ne sont pas exactement égaux aux fréquences du stimulus. Mais cela peut être facilement incorporé aux deux autres théories. De plus, elle seule distingue à l'origine le mode analytique et synthétique de perception (voir Risset [85]) qui a été montré de la façon la plus convaincante par Houtgast (1976, [41]). En effet, il a réussi à obtenir la perception d'un résidu avec un seul harmonique, perception grandement facilitée par un faible rapport signal/bruit et une forte focalisation de l'attention autour du fondamental. Houtsma ([42]) rapporte la compétition entre les modes analytique et synthétique.

2.2.3. FUSION ET MELANGE DE SONS COMPLEXES.

Il y a fusion lorsqu'une certaine combinaison de sons purs aboutit à la perception d'un objet sonore unique. Les études portant spécifiquement sur la fusion sont très rares mais celle-ci intervient au second plan dans de nombreuses expériences. Le phénomène de fusion le plus couramment rencontré est évidemment celui de la fusion des partiels d'un son complexe harmonique. Si l'enveloppe spectrale n'est pas trop tourmentée, un son harmonique est perçu comme unique avec une seule hauteur, celle du fondamental et un timbre, lié à l'enveloppe spectrale. L'expérience de Kubovy et Jordan (2.1.3) portant sur l'audibilité des harmoniques peut être considérée comme un moyen d'éviter une fusion complète, consistant à attribuer un caractère particulier à l'harmonique qu'on désire isoler, soit dans ce cas en jouant spécifiquement sur la phase. La notion de perception synthétique ou analytique se relie tout naturellement au phénomène de fusion: telle que le définit Terhardt, elle implique qu'un son complexe harmonique peut être entendu fusionné ou au contraire complètement séparé, la fusion est considéré ici comme un mécanisme reliant les harmoniques en unité active (mode synthétique) ou inactive (mode analytique). Le choix du mode semble dépendre des paramètres physiques des stimuli et de l'expérience auditive de l'auditeur. Un sujet musicien ou entraîné aux expériences psychoacoustiques aura une beaucoup plus forte tendance à écouter de façon analytique qu'un sujet naïf (Houtsma [42]). Les facteurs physiques favorisant le mode synthétique semblent être: la présence de nombreux harmoniques, que ceux-ci soient successifs, présentés de façon monauriculaire plutôt que distribués entre les deux oreilles, un niveau de sensation faible [42]

Il n'y a pas, à ma connaissance, d'études cherchant à relier la forme de l'enveloppe spectrale et la fusion d'un son harmoniques.

Un autre type de problème est celui de la fusion des sons complexes inharmoniques obtenus en décalant d'une même quantité en fréquence les harmoniques d'un son complexe (2.2.1.B). Schouten et al [96] et Gerson et Goldstein [31] rapportent que plusieurs hauteurs peuvent être attribuées à un même stimulus inharmonique de ce type. Goldstein les analyse comme étant les diverses sorties possibles d'un modèle probabiliste, chacune possédant sa propre probabilité d'intervenir, cette façon d'analyser suppose une perception non simultanée de ces hauteurs. Goldstein ne dit rien à ce sujet, par contre il semble bien que Schouten parle d'une perception simultanée de ces hauteurs. Dans cette hypothèse les hauteurs sont toutes issues du mode synthétique, celui se refusant à donner une seule solution. Un même stimulus peut-il avoir plusieurs identités simultanément?

Deux expériences portant spécifiquement sur la fusion sont relatées par Nordmark [77]: Slaymaker (1970 [98]) a étudié des stimuli composés de partiels ayant des fréquences égales à Nf_s ou N est le rang du partiel et s un coefficient d'inharmonicité. Le son est harmonique pour $s = 1$, inharmonique avec des partiels plus espacés que ceux d'un son harmonique pour $s > 1$ et moins espacés pour $s < 1$. Pour $s = 1,08$ le son a une sonorité de cloche, pour $s = 1,26$ l'effet est très prononcé, le son perdant toute unité. La même chose se produit pour $s < 1$. Dans la deuxième expérience, Broadbent et Ladefoged (1957, [11]) produisent des

sons de parole synthétiques en excitant deux circuits résonnants avec des impulsions périodiques de façon à constituer deux formants. Si la modulation est identique pour chaque formant on entend une voix, même avec une présentation binauriculaire (chaque formant dans des oreilles différentes).

Par contre si les circuits sont excités par des modulations différentes, on entend la superposition de deux sons vocaux. La scission s'est produite à cause des deux fondamentaux différents, ce qui semble normal mais le caractère vocal est conservé donc chaque unité semble avoir gardé ses deux formants, condition nécessaire a priori pour sonner comme une voix.

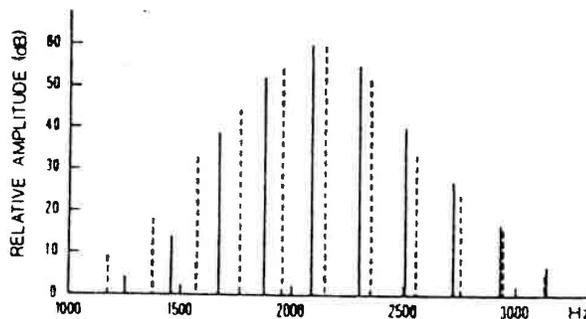
Mélange de sons complexes: bien que le problème de l'identification d'un son dans un mélange de sons semble primordial, les études traitant ce sujet sont quasiment inexistantes [77]. L'expérience musicale montre que l'audition présente une extraordinaire capacité à discriminer des mélanges de sons aussi divers que ceux qui paraissent dans une symphonie. Toutefois, on retrouve la même dichotomie que pour l'écoute d'un seul son: on peut écouter globalement un accord orchestral sans en distinguer les parties. On parle d'ailleurs de couleur orchestrale, qui indique bien une écoute globale au niveau du timbre, ou on reconnaît tel accord tonal qui indique une écoute globale des diverses hauteurs. A cette écoute synthétique qui est le propre d'une audition naïve s'oppose une écoute analytique qui permet de déceler dans une masse orchestrale l'identité des instruments, leur ligne mélodique, etc. L'exemple des chefs d'orchestre montre que l'on peut parvenir à une capacité très importante de discrimination. On peut prévoir qu'à côté de facteurs sémantiques, les facteurs temporelles comme l'attaque et l'enveloppe dynamique de chaque unité sonore jouent un grand rôle dans cette discrimination. Une étude de Rasch (1978, [82]) montre qu'un décalage dans l'attaque de deux instruments augmente considérablement leur discrimination. Toutefois cette même étude montre la capacité de l'audition à analyser un mélange de sons où seuls des indices spectraux et fréquentiels sont disponibles.

Dans le cadre que nous nous sommes fixés, c'est surtout cette capacité qui nous intéresse. En effet le mécanisme qui discrimine plusieurs sons, leur attribuant hauteur et timbre, peut être considéré comme un mécanisme plus général que celui donnant la hauteur d'un son et étudié précédemment (2.2.2.). La fusion peut-être considérée comme une manifestation de ce mécanisme: elle est la reconnaissance par ce système d'un objet sonore unique. Lorsqu'il n'y a pas fusion, il y a un mélange qu'on peut tenter d'analyser en se posant des questions du genre: quel est le nombre d'objets sonores tonaux entendus? Comment peut-on distribuer les indices physiques du stimulus entre les sons pour qu'ils aient la hauteur et le timbre qui leur sont attribués? Un objet sonore tonal est ici défini comme une entité perceptive possédant une hauteur et un timbre. Un stimulus quelconque ne se résume pas obligatoirement à la somme d'objets de ce type, peut ne pas en contenir un seul (bruit blanc par exemple). Mais l'activité perceptive créée par des stimuli composés d'une superposition de sons purs peut être traduite pour une grande part en répertoriant les objets sonores tonaux perçus. C'est ainsi qu'a procédé Schouten [96] pour ses stimuli inharmoniques. Avec cette vision des choses, l'expérience de Slaymaker se traduit par le refus, à partir de $n = 1,081$ du mécanisme de reconnaissance qu'il y ait

un seul objet sonore tonal dans le stimulus. L'expérience de Broadbent et Ladefoged va plus loin. Dans ce cas on sait que le stimulus a été redistribué en deux objets sonores tonaux. Mais la redistribution ne résulte pas de la séparation simple des indices sensoriels en deux classes distinctes contenant chacune toutes les informations sur un seul formant. C'est encore possible pour la hauteur mais pas pour le timbre. Peut-on en conclure que les attributs de chaque objet sonore tonal ne peuvent pas se ramener à une seule partition des indices spectraux puis détermination des attributs à l'intérieur de chaque classe de cette partition? Hypothèse pourtant satisfaisante pour l'esprit.

Si on ne peut pas prédire pour l'instant le résultat du mécanisme de reconnaissance dans le cas où le stimulus n'est pas la superposition de complexes harmoniques qui sont ressentis comme fusionnés lorsqu'ils sont présentés séparément, par contre dans le cas où cela est vérifié on peut imaginer que la reconnaissance se passe sans problème, de façon transparente, les complexes harmoniques présents constituant autant d'objets sonores tonaux. Toutefois même cette situation pose problème et interpelle les théories de la hauteur. Nordmark [77] rapporte des expériences qu'il a menées sur la discrimination d'un mélange de deux sons harmoniques. Celle-ci est étonnamment performante. En effet, des sons complexes de fréquences 100 et 106 Hz sont identifiés avec une précision meilleure que 1%, 15 fois meilleure que celle pour deux sons purs. Cela est évidemment dû à la présence des harmoniques, mais les écarts entre chaque partiel du son résultant n'est dans aucun cas supérieur au 1/3 de la bande critique. Aucun harmonique n'est donc résolu dans ce cas et les systèmes de reconnaissance de la hauteur invalides. Poursuivant dans cette voie, Nordmark étudie la superposition de deux sons filtrés sur 1/3 d'octave à 2000 Hz, le premier de fondamental 136Hz et le second formant avec celui-ci soit une seconde mineure (209 Hz) soit une tierce majeure (fig [psy.12]). Les deux sons restent discriminables avec des seuils différentiels en fréquence de 0.9% dans le cas de la seconde mineure et de 0.5% pour la tierce, ce qui est semblable au seuil des résidus ordinaires (0.5 à 1%) et moindre que le seuil de 2% trouvé par Hoekstra dans le cas où un seul stimulus est présent. D'autre part le sentiment de consonance est très fort lorsque les deux complexes forment une tierce. Nordmark conclut qu'une analyse spectrale est possible à l'intérieur d'une bande critique et que cette analyse ne peut être que temporelle.

Figure [psy.12]



Spectre d'amplitude de deux trains d'impulsions simultanés passés à travers un filtre ayant une bande passante équivalente à une bande critique. Les lignes en pointillé et continu représentent respectivement les harmoniques d'un train d'impulsion de 196 Hz et de 209 Hz (d'après Nordmark, 1978 [77]).

3.1 BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE DEUX :

- [1] AFNOR. Lines isosoniques normales pour sons écoutés en champ libre et seuil binaurculaire en champ libre. AFNOR NF 30003 1965 et ISO R 226.
- [2] Arthur R.H. ,Pfeifer R.R. et Suga N. Properties of "two-tone inhibition" in primary auditory neurons.J.Physiol. 1971 , 212:593.
- [3] Bachem A. Tone height and tone chroma as two different pitch qualities. *acta psychologica* 1950 , 7:80-88.
- [4] Batteau D.W. Role of the pinna in localisation:theoretical and physiological consequences.Dans *Hearing mechanisms in vertebrates*. A. de Ruch et J. Knight editeurs. Boston:Little,Brown 1968.
- [5] Bekesy,G.von. Uber die Resonanzkurve und die Abklingzeit der verschiedenen Stellen der Schneckentrennwand.*Akustische Zeitschrift*,1943,8:66-76.
- [6] Bekesy,G.von. *experiments in Hearings*.Mc Graw Hill,New-York 1960.
- [7] Bekesy,G.von. The missing fundamental and periodicity detection in hearing. *JASA* 1972 , 51:631-637.
- [8] Bever T. et R.J. Chiarello. Cerebral dominance in musicians and non musicians. *Science* 1974 , 185:537.
- [9] Bilsen F.A. On the influence of the number and phases of harmonics on the perception of the pitch of complex signals. *Acustica* 1973 , 28:60-65.
- [10] Bilsen F.A. et Goldstein J.L. Pitch of dichotically delayed noise and its possible spectral basis. *JASA* 1974 , 55:292-96.

- [11] Broadbent D.E. et Ladefoged P. On the fusion of sounds reaching different sense organs. JASA 1957 , 29:708-710.
- [12] Brugge J.F., Anderson D.J., Hind J.E. et Rose J.E. Time structure of discharges in single auditory nerve fibers of the squirrel monkey in response to complex periodic sounds. Journal of neurophysiology, 1969 , 32:386-401.
- [13] Buunen T.J.F. et Rhode W.S. Responses of fibers in the cat's auditory nerve to the cubic difference tone. JASA 1978 , 64:772-81.
- [14] Cardozo b.l. et Neeten J.J.M. Frequentieanalyse en maskering. I.P.O. Report 104 , 1967.
- [15] Charbonneau G. et Risset J.C. circularité de jugements de hauteur sonore. C.R. Acad. Sci. Paris 277 Serie B 1973 p.623.
- [16] Charbonneau G. et Risset J.C. Différence entre oreille droite et oreille gauche pour la perception de la hauteur des sons. C.R. Acad. Sci Paris 281 Serie B 1975 p.281.
- [17] Charbonneau G. et Risset J.C. Jugements relatifs de hauteur:schémas linéaires et hélicoidaux. C.R. Acad. Sci Paris 281 Serie B 1975 p.289.
- [18] Charbonneau G. Realisation d'un système intégré d'analyse et de synthèse de sons par ordinateur. Application de ce système a l'étude de l'attribut de hauteur sonore et de sa perception. Thèse de doctorat es sciences physiques. Orsay 1976.
- [19] de Boer E. On the "residue" in hearing. PhD thesis Univ. Amsterdam 1956 .
- [20] de Boer E. Correlation studies applied to the frequency resolution of the cochlea. Journal of auditory research 1967,45:986-998.

- [21] de Boer E. pitch theories unified. Dans Psychophysics and Physiology of Hearings. E.F. Evans et J.P. Wilson editeurs. Academic Press, London 1977.
- [22] Dolmazon J.M. et Bastet L. Le traitement des informations issues de la membrane basilaire:essais de modélisation des récepteurs sensitifs. Revue d'acoustique 1979 50:180:85.
- [23] Duifhuis H. Audibility of high harmonics in a periodic pulse. JASA 1970 , 48:888-93.
- [24] Duifhuis H. Audibility of high harmonics in a periodic pulse II, time effect. JASA 1970 , 49:1155-62.
- [25] Evans E.F. et Wilson J.P. The frequency selectivity of the cochlea. Dans A.R. Moller (Ed.) : Basic mechanisms in Hearing. NY:Academic Press 1973 , 519-554.
- [26] Feldkeller R. et Zwicker E. Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Stuttgart:Hirzel 1956.
- [27] Fletcher h. Physical measurements of audition and their bearing on the theory of Hearing. Bell System Technical Journal 1923 , 2:145-182.
- [28] Flanagan J.L. et Guttman N. On the pitch of periodic pulses. JASA 1960 , 32:1308-19.
- [29] Fletcher H. Auditory patterns. Review of Modern Physics 1940 , 12:47-65.
- [30] Galambos R. et Davis H. The response of single auditory-nerve fibers to acoustic stimulation. journal of Neurophysiology 1943 , 6:39-57.
- [31] Gerson A. et Goldstein J.L. Evidence for a general template in central optimal processing for pitch of complex tones. JASA , 63:498-510.

-
- [32] Gibson L. The ear as an analyser of musical tones. JASA 1971 , 49:127(A).
- [33] Glattko T.J. Unit responses of the cat cochlear nucleus to amplitude-modulated stimuli. JASA 1969 , 45:419-425.
- [34] Goldstein J.L. An Optimum Processor Theory for the Central formation of the pitch of complex tones. JASA 1973 ,54:1496-1516.
- [35] Goldstein J.L., Buchsbaum G. et Furst M. Compatibility between psychological and physiological measurements of aural combinations tones. JASA 1978 , 63:474-84.
- [36] Goldstein J.L., Gerson A., Sruлович P. et Furst M. Verification of the optimal basis of aural processing in pitch of complex tones. JASA 1978 63:486-97.
- [37] Grennhough M., Williams R.P., Wright J.J. Some experiments on the second effect of pitch schift in three-tone complexes. J. Sound Vib. 1973 , 26:277-82.
- [38] Greenwood D.D. Critical bandwith and frequency coordinates of the basilar membrane. JASA 1961 , 31:1344-1356.
- [39] Harris G.G. Periodicity perception by using gated noise. JASA 1963 35:1229-33.
- [40] Helmholtz, H. Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage fur die Theorie der Musik, Braunschweig: F. Viewig fils, 1863.
- [41] Houtgast T. Subharmonic pitches of a pure tone at low SN ratio. JASA 1976 , 60:405,409.
- [42] Houtsma A.J.M. Musical pitch of two-tone complexes and predictions by modern pitch theories. JASA 1979 , 66:87-99.

- [43] Houtsma A.J.M. et Goldstein J.L. The central origin of the pitch of complex tones:evidence from musical interval recognition. JASA 1972 , 51:520-29.
- [44] Hoekstra A. Het frekwentie analyserend vermogen van het gehoor en het tonale residu. Audiological Institute, Groningen,report,Avril 1973.
- [45] Houtgast T. Lateral suppression and loudness reduction of a tone in noise. Acustica 1974 , 30:214-221.
- [46] Humes L.E. Perception of simple difference tone ($f_2 - f_1$). JASA 1979 66:1064-1074.
- [47] Johnstone,B.M. et Boyle A.F.J. Basilar membrane vibration examined with the the Mossbauer technique. Science 1967 , 158:389-390.
- [48] Johnstone,B.M.,Taylor,K.J. et Boyle A.F.J. Mechanics of the guinea pig cochlear. JASA 1970 47:504-509.
- [49] Johnstone,B.M. et Taylor,K.J. Mechanical aspects of cochlear function.Dans Frequency analysis and periodicity detection in hearing R. Plomp et G.F. Smoorenburg Editeurs.Leiden:Sijthoff 1970 81-90.
- [50] Kiang N.Y.S. Stimulus coding in the auditory nerve. Acta Oto-Laryngologica 1965 59:186-200.
- [51] Kiang N.Y.S. Discharge patterns of single fibers in the cat's auditory nerve. Cambridge,Massachussets:M.I.T Press 1966.
- [52] Kubovy M. et Jordan R. Tone-segregation by phase:on the phase sensitivity of the single ear. JASA 1979 , 66:100-06.
- [53] Lawrence M. process of sound conduction. Laryngoscope 1958 , 68:328-47.

- [54] Licklider J.C.R. A duplex theory of pitch perception. *Experienta* , Suisse 1951 , 7:128-133.
- [55] Licklider J.C.R. Periodicity pitch and place pitch. *JASA* 1954 , 26:945(A).
- [56] Licklider J.C.R. Effects of changes in the phase patterns upon the sound of a 16 harmonic tone. *JASA* 1957 , 29:780.
- [57] Meyer Eppler W., Sendhoff H. et Rupprath R. Residual tone and formant tone. *Gravesaner Blatter*. 1959 , 4:70-91.
- [58] Moller A.R. Transfer function of the middle ear. *JASA* 1963 , 35:1526-34.
- [59] Moller A.R. Studies of the damped oscillatory response of the auditory frequency analyser. *acta physiologica scandinavica* 1970 , 78:299-314.
- [60] Moore B.C.J. Audibility of partials in a complex tone in relation to the pitch of the complex as a whole. In *Symposium on hearing theory*. Eindhoven: Institute for Perception Research. 1972 96-104.
- [61] Moore B.C.J. Some experiments relating to the perception of pure tones. Possible clinical applications. *Sound* 1972 6:73-79.
- [62] Moore B.C.J. Frequency difference limens for short-duration tones. *JASA* 1973 54:610-9.
- [63] Moore B.C.J. Frequency difference limens for narrow bands of noise. *JASA* 1973 54:888-96.
- [64] Moore B.C.J. Some experiments relating to the perception of complex tones. *Quart. J. Exp. Psychol.* 1973 , 25:451-75.

-
- [65] Nomoto M., Suga N. et Katsuki Y. Discharge pattern and inhibition of primary auditory Nerve Fibers in the monkeys. *J. Neurophysiology* 1964 , 27:768.
- [66] Nordmark J.O. Time and frequency analysis. Dans *Foundations of modern auditory*. J. Tobias editeur. New York: Academic Press 1970 55-83.
- [67] Nordmark J.O. Frequency and Periodicity analysis. Dans *Handbook of perception IV: Hearing*. E. C. Carterette et M.P. Friedman editeurs. Academic Press New York 1978 243-282.
- [68] Patterson R.D. The effects of relative phase and the number of components on the residue pitch. *JASA* 1973 , 53:1564-72.
- [69] Plomp R. The ear as a frequency analyser. *JASA* 1964 , 36:1628-36.
- [70] Plomp R. Detectability Threshold for combination tones. *JASA* 1965 , 37:1110-23.
- [71] Plomp R. Experiments on tone perception. Unpublished Ph.D. dissertation. Univ. of Utrecht 1966.
- [72] Plomp R. Pitch of complex tones. *JASA* 1967 , 41:1526-33.
- [73] Plomp R. Beats of mistuned consonances. *JASA* 1967 , 42:462-74.
- [74] Plomp R. Timbre as a multidimensional attribute of complex tones, dans *frequency analysis and periodicity detection in hearing*. R. Plomp et G.F. Smoorenburg Editeurs. Leiden: Sijthoff 1970 397-414.
- [75] Plomp R. Pitch versus timbre. 7th. ICA Congress, Budapest 1971.

-
- [76] Plomp R. Old and new data on tone perception. Dans Contributions to sensory physiology. New York: Academic Press 1971 179-220.
- [77] Plomp R. Auditory psychophysics. Annual Review of Psychology. 1975 , 26:207-232.
- [78] Plomp R. Aspects of tone sensation. Academic Press New York 1976.
- [79] Plomp R. et Levelt W.J.M. Tonal consonance and critical bandwidth. JASA 1965 38: 548-560.
- [80] Plomp et Mimpen A.M. The ear as a frequency analyser II. JASA 1968 43:764-767.
- [81] Plomp R. et Steeneken H.J.M. Interference between two single tones. JASA 1969 43: 883-84.
- [82] Rasch R.A. The perception of simultaneous notes such as in Polyphonic Music. Acustica 1978 , 40:22-33.
- [83] Rhode W.S. Observations of the vibration of the basilar membrane in squirrel monkeys using the Mossbauer technique. JASA 1971,49:1218-31.
- [84] Rhode W.S. An investigation of post mortem cochlear mechanisms using Mossbauer effect. Dans A.R. Moller (Ed.) : Basic mechanisms in Hearing. New York:Academic Press 1973 , 49-63.
- [85] Risset J.C. Sur certains aspects fonctionnels de l'audition. Annales des Télécommunications. 1968 tome 23 No 3-4:91-120.
- [86] Risset J.C. Pitch control and pitch paradoxes demonstrated with computer synthesized sounds. JASA 1969 , 46:88.

- [87] Risset J.C. paradoxes de hauteur: le concept de hauteur n'est pas le même pour tout le monde. Proc. 7th intern. Congress on Acoustics, Budapest 1970 , article 20s10.
- [88] Risset J.C. Hauteur et timbre des sons. Revue d'acoustique 1977 , 42:263-68.
- [89] Ritsma R.J. Existence region of the tonal residue I. JASA 1962 , 34:1224-29.
- [90] Ritsma R.J. Frequencies dominant in the perception of the pitch of a complex sounds. JASA 1967 , 42:191-98.
- [91] Ritsma R.J. et Engel F.L. Pitch of frequency-modulated signals. JASA 1964 36:1637-44.
- [92] Ritsma R.J. et Hoekstra A. Frequency selectivity and the tonal residue. Dans Facts and Models in Hearing E. Zwicker et E. Terhardt ed. Berlin Springer-Verlag 1974 , 156-163.
- [93] Rose J.E. Peripheral nerve-fiber discharges. Dans Frequency analysis and periodicity detection in hearing R. Plomp et G.F. Smoorenburg Editeurs. Leiden:Sijthoff 1970 176-192.
- [94] Rosenberg A.E. Effect of masking on the pitch of periodic pulses. JASA 1965 38:747-758.
- [95] Sachs M.B. and Kiang N.Y.S. Two-tone inhibition in a auditory-nerve fiber. JASA 1969 , 43:1120.
- [96] Schouten J.F., Ritsma R.J. et Lopes Cardozo B. Pitch of the residue. JASA 1962 , 34:1418-1424.
- [97] Shepard R.N. Circularity of judgments in relative pitch. JASA 1964 , 36:2346-53.

-
- [98] Slaymaker F.H. Chords from tones having stretched partials. JASA 1970 , 47:1569-71.
- [99] Small A.M. et Campbell R.A. Masking of pulsed tones by bands of noise. JASA 1961 33:1570-1576.
- [100] Small A.M. et Yelen R.D. Fatigue as a indicator of pitch channels. JASA 1962 34:1987(A).
- [101] Smoorenburg G.F. pitch perception of two-frequency stimuli. JASA 1970 , 45:419-25.
- [102] Smoorenburg G.F. Audibility region of combination tones. JASA 1972 , 52:604-14.
- [103] Smoorenburg G.F. Combination tones and their origins. JASA 1972 , 52:615-32.
- [104] Smoorenburg G.F. On the mechanisms of combination tone generation and lateral inhibition in hearing. Dans Facts and Models in Hearing E. Zwicker et E. Terhardt ed. Berlin Springer-Verlag 1974 , 332-343.
- [105] Smoorenburg G.F., Gibson M.M., Kitzes L.M., Rose J.E. et Hind J.E. Correlates of combination tones observed in the response of neurons in the anteroventral cochlear nucleus of the cat. JASA 1976 , 59:945-62.
- [106] Smoorenburg G.F. et Linschoten D.H. A neurophysiological study on auditory frequency analysis of complex tones. Dans Psychophysics and Physiology of Hearings. E.F. Evans et J.P. Wilson editeurs. Academic Press, London 1977.
- [107] Teplov B.M. Psychologie des aptitudes musicales. P.U.F. Paris 1966.
- [108] Terhardt E. Uber die durch amplitudenmodulierte Sinustone hervorgerufen Horempfindung. Acustica 1968 , 20:210-14.

- [109] Terhardt E. Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke. *Acustica* 1968 20:215-224.
- [110] Terhardt E. Frequency analysis and periodicity detection in the sensations of roughness and periodicity pitch. Dans *Frequency analysis and periodicity detection in hearing* R. Plomp et G.F. Smoorenburg Editeurs. Leiden:Sijthoff 1970 278-290.
- [111] Terhardt E. Pitch, consonance and harmony. *JASA* 1974 , 55:1061-69.
- [112] Tonndorf J. et Tabor J.R. Closure of the cochlear windows. *Annals of Otology, Rhinology Laryngology* 1962 , 71:5-29.
- [113] van den Brink G. Two experiments in pitch perception:diplacsis of harmonic AM signals and pitch of inharmonics AM signals. *JASA* 48:1355-65.
- [114] Walliser K. Zusammenhänge zwischen dem Schallreiz und der Periodentonhöhe. *Acustica* 1969 , 21:319-29.
- [115] Walliser K. Zur Unterschiesschwelle der Periodentonhöhe. *Acustica* 1969 , 21:329-36.
- [116] Wever E.G. *Theory of hearing*. New York:Wiley,1949.
- [117] Wightman F.L. Pitch and stimulus fine structure. *JASA* 1973 , 54:397-406.
- [118] Wightman F.L. The pattern transformation Model of pitch. *JASA* 1973 , 54:407-416.
- [119] Whitfield I.C. Electrophysiology of the central auditory pathway. *British Bulletin* 1956 , 12:105,109.

-
- [120] Whitfield I.C. The neural code . Dans Handbook of perception IV :Hearing.E. C. Carterette et M.P. Friedman editeurs.Academic Press New York 1978 163-242.
- [121] Wilson J.P. et Jonhstone J.R. Capacitive probe measures of basilar membrane vibrations.Dans hearing Theory, Eindhoven:IPO 1972 172-181.
- [122] Wilson J.P. et Jonhstone J.R. silar membrane and middle ear vibration in the guinea pig measured by capacitive probe. JASA 1975 57:705-723.
- [123] Zwicker E.,Flottorp G. et Stevens S.S. Critical bandwith in loudness summation. JASA 1957 , 29:548,557.
- [124] Zwislocki J.J. Acoustic attenuation between the ears.JASA 1953 , 25:752-59.
- [125] Zwislocki J.J. Analysis of some auditory characteristics.Dans Handbook of mathematical psychology.R.D.Luce ,R.R. Bush E. Galanter editeurs.NY:Wiley,1965.
- [126] Zwislocki J.J. A possible neuromechanical sound analys in the cochlea. Acustica 1974 , 31:354-359.

CHAPITRE 3

EXPERIENCE PSYCHOACOUSTIQUE SUR LA FUSION D'UN COMPLEXE HARMONIQUE

3.1 INTRODUCTION:

L'expérience que nous allons présenter visait à donner une suite aux travaux de Charbonneau et Risset sur la hauteur spectrale et la hauteur tonale (cf 2.2.1.D). Ces auteurs avaient utilisé des sons particuliers possédants des harmoniques à distances d'octave de façon à dissocier ces deux composantes. Nous voulions voir s'il était possible de retrouver cette dichotomie avec des sons "naturels", c'est-à-dire ayant une série harmonique complète. Les isoler aurait pu être par exemple obtenir un saut d'octave subjectif entre deux sons ayant un même fondamental en jouant uniquement sur l'enveloppe spectrale. De tels phénomènes semblent se produire réellement: par exemple un ténor semble parfois chanter un octave plus haut qu'une alto chantant la même mélodie. Dans un contexte aussi riche qu'une oeuvre musicale il est toutefois risqué de décrire ce phénomène uniquement en terme de hauteur spectrale, notamment l'impression subjective de l'effort du chanteur peut jouer un rôle (Risset, 1968 [2]). Une série d'expériences informelles, utilisant des stimuli synthétiques, ont été tentées. Pour accentuer l'influence de la hauteur spectrale l'enveloppe spectrale des stimuli harmoniques utilisés avait la forme d'une cloche, focalisant donc l'énergie autour du sommet de cette cloche. En jouant à la fois sur la fréquence fondamentale et sur la fréquence du sommet, les relations de hauteurs perçues ont toujours été dans le sens des mouvements du fondamental, confirmant la prégnance de celui-ci relativement à la hauteur spectrale pour les sons possédant une série harmonique complète. Par contre en manipulant la largeur de cette cloche (donc le nombre et l'amplitude des harmoniques du stimulus) nous avons obtenu, pour un même fondamental, d'importantes modifications du timbre bien sûr, mais également de la hauteur tonale perçue. De plus cette modification de hauteur ne se résumait pas au cas trivial: Hauteur du fondamental lorsque la largeur était suffisante puis brusquement hauteur du sommet lorsque la cloche était suffisamment étroite pour isoler un seul partiel (dans le cas où le sommet coïncide avec un partiel). Une gamme intéressante de percepts intermédiaires se produit, les sons présentant en fait plusieurs hauteurs perçues simultanément, comme si l'oreille se refusait à ne voir qu'un objet sonore, qu'une image dans le stimulus. Autrement dit il s'agissait d'un phénomène de fusion (cf 2.2.3)

Nous avons voulu éclaircir ce point en réalisant une expérience dans laquelle une série de stimuli de la même famille que ceux que nous avons décrits était présentée par couples à des sujets, à qui on demandait deux types de jugements, l'un sur la relation de hauteur entre les deux membres du couple présenté, l'autre sur le caractère plus ou moins fusionné de chacun d'eux.

3.2 PROTOCOLE EXPERIMENTAL:

Nous avons synthétisé avec l'ordinateur une succession de 144 paires de stimuli harmoniques, appartenant à l'ensemble des signaux périodiques dont l'enveloppe spectrale est décrite par la formule:

$$F(S) = A \uparrow \exp(-x ((\log S / \log S_0) - 1) \uparrow 2)$$

où $S = f/f_0$

\uparrow représente l'opération d'exponentiation. F décrit une cloche de sommet S_0 et dont la largeur dépend du paramètre x . f_0 est la fréquence fondamentale du signal.

Nous nous sommes limités aux 8 premiers harmoniques.

Le paramètre le plus important est celui qui régit la largeur de la cloche (x), c'est le seul qui différencie les deux sons d'une paire, c'est donc lui qui déterminera les jugements demandés. Les deux autres, fondamental et sommet de la cloche, interviendront au second degré.

L'ensemble de l'expérience est organisé en 3 séries de 48 paires de stimuli chacune correspondant aux trois fondamentaux retenus.

La série 1 a pour fondamental $f_0 = 82,406$ Hz (mi1)

La série 2 a pour fondamental $f_0 = 261,625$ Hz (do2)

La série 3 a pour fondamental $f_0 = 1174$ Hz (re4)

Ces trois fondamentaux ont été choisis de façon à recouvrir une bonne portion de l'ensemble des hauteurs musicales, celles pour lesquelles la perception de la hauteur tonale reste excellente. A l'intérieur de chaque série nous avons retenu 4 valeurs possibles pour le sommet des enveloppes, définissant ainsi quatre classes.

La classe A dont le sommet est sur l'harmonique 3

La classe B dont le sommet est sur l'harmonique 4

La classe C dont le sommet est sur l'harmonique 5

La classe D dont le sommet est sur l'harmonique 7

Chaque classe contient une cellule de base formée de 12 paires de sons non identiques qu'on peut former avec les sons correspondant aux 4 largeurs de cloche retenues, que nous numérotions de 1 à 4, le son 1 ayant le spectre le plus étroit et le son 4 le plus large. La figure [exp.1] montre les spectres de ces 4 sons pour les 4 classes. Nous donnons en annexe les valeurs exactes en amplitude des spectres utilisés.

les 144 stimuli possibles ont été synthétisés et enregistrés sur bande magnétique dans l'ordre suivant: les séries se succèdent dans l'ordre de leur numéro. Il en est de même pour les classes à l'intérieur de chaque série.

L'ordre des 12 stimuli à l'intérieur d'une cellule a été déterminé aléatoirement et de façon indépendante pour toutes les cellules de la 1^{ère} série. Le même ordre a été réutilisé pour les 2 autres séries avec un décalage d'une classe. (voir l'ordre exact en annexe)

Chaque stimulus (paires de sons) se déroule dans le temps comme l'indique la figure [exp.2], s'étale donc sur 10 secondes. Un intervalle de silence un peu plus important sépare chaque cellule, un message parlé annonce chaque série. La durée totale de l'ensemble est d'environ 1440 secondes soit 24 minutes.

Les stimuli ont été synthétisés avec le programme Music5 à l'aide de 16 partitions (elles sont données en annexe). Ce morcellement a été nécessité par la taille maximum possible du fichier magnétique de stockage des échantillons. (environ 2 minutes à 20000 Hz de taux d'échantillonnage). Les huit premières cellules ont nécessitées une partition chacune, les quatre dernières ont été dédoublées à cause de leur fréquence d'échantillonnage plus élevées. En effet celle-ci a été de 20000 Hz pour les huit premières et de 30000 Hz pour la dernière série qui correspond au fondamental le plus élevé (1174 Hz). Les phases initiales sont identiques pour les huit partiels du stimuli (0 degré). L'amplitude des sons est identique quelque-soit le spectre.

Un questionnaire (figure [exp.3]) était présenté à chaque sujet. Dans un premier passage de la totalité des stimuli il était demandé aux sujets d'émettre un jugement de hauteur sur chaque paire de sons. Ils disposaient de 8 secondes de silence entre chaque stimulus pour se décider et inscrire une croix dans la (les) colonne(s) correspondant à leur réponse. Ces colonnes sont repérées par les lettres M D I respectivement Monte, Descend, Identique. Par exemple si le 2ème son était jugé plus bas que le premier le sujet mettait une croix dans la colonne D. Comme l'ambiguïté des jugements de hauteur pouvait être grande il a été permis de répondre de façon plus nuancée. Si les sujets hésitaient entre déclarer les deux sons de hauteur identique ou bien percevoir une variation de hauteur, ils inscrivaient deux croix, l'une dans la colonne I l'autre dans la colonne correspondant à la variation perçue.

Dans un deuxième passage il était demandé aux sujets de juger l'unité de chaque son, c'est-à-dire s'ils entendaient une hauteur unique ou la superposition de plusieurs. Ils devaient donc donner deux réponses pour chaque stimulus. Dans deux colonnes étiquetées 1 et 2

Remarque: Nous avons choisi 3 hauteurs de fondamental s'étendant sur tout le spectre des sons musicaux de façon à discerner éventuellement une variation des réponses avec la hauteur absolue du spectre. De même le choix de plusieurs sommets pour le spectre cherche à tester l'importance du numéro de l'harmonique privilégié. Nous avons choisi 8 harmoniques de façon à nous placer dans le cadre de sons complexes ayant leurs partiels résolues et donc relevant des théories sur la hauteur périodique (cf Chapitre second). Le choix du nombre de largeur d'enveloppe (4) a été fait pour ne pas allonger outre mesure l'expérience (2 fois 24 mn). Le choix de ces quatre enveloppes a été plus difficile à faire. Nous avons procédé subjectivement à partir d'une palette de 13 largeurs. Nous avons tout d'abord fixé les deux extrémités au delà desquelles la perception ne variait plus beaucoup. Les deux autres enveloppes ont été choisies de façon à être discernables l'une de l'autre, tout en étant proches et à égales distance subjectives des extrémités. La répartition dans le temps a été inspiré par les expériences au

protocole similaire de Gérard Charbonneau (1976, [1])

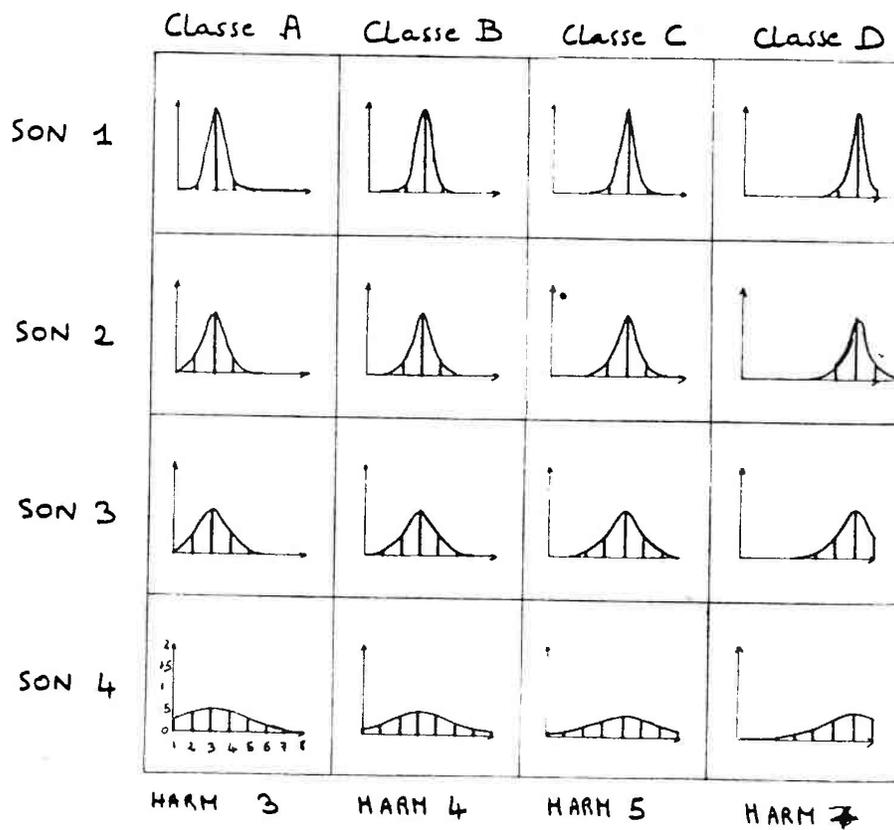
L'expérience s'est déroulée sur deux écoutes collectives de respectivement 8 et 15 sujets dans des salles différentes et non sourdes. Le son était transmis à partir d'une bande magnétique sur deux enceintes. Le niveau sonore a été réglé sur une intensité d'écoute confortable. Entre les deux passages une heure de repos a été aménagée.

Des réactions des sujets au protocole expérimental on peut retenir deux aspects:

-Il faut essayer d'éviter des temps de silence fixe entre chaque stimulus (8 secondes dans notre expérience). Trop court au début, période d'apprentissage, ce temps devient trop long et favorise la déconcentration. Si le support est une bande magnétique, il n'y a guère de solution, sinon de l'accélérer petit à petit la présentation des sons dès la synthèse. Une solution beaucoup plus élégante consiste à laisser les sons sur support digital (disque) séparés et à y accéder en temps réel. Ainsi on peut laisser au sujet le soin de déclencher chaque stimulus et ainsi de choisir son propre rythme. Cela suppose évidemment l'environnement informatique adéquat.

-Il faut préparer le questionnaire de façon à ce que le sujet ait à inscrire quelque-chose à chaque stimulus, quelque soit sa réponse. Sinon le sujet risque de ne plus avoir de repère pour localiser l'endroit où déposer sa réponse. Cela a pu se produire dans notre cas pour la deuxième partie de l'expérience. En effet si un sujet n'entendait ni le premier son ni le second comme un accord, il n'avait rien à noter. En changeant de convention, par exemple écrire 1 si on entend plusieurs sources, 0 dans le cas contraire évite le problème.

Figure [exp.1]



Spectres utilisés dans l'expérience.

Figure [exp.2]



Déroulement temporel d'un stimulus.

Figure [exp.3]

1 ^{ère} Série															JPH															H
M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2						
		I	x				I	x	x		D	I	x	x		D					D		x	x						
M				x	D		x	x				I	x	x		D											x			
M		I			M			x			D	I	x	x	M												x			
M			x	x	D		x				D		x		M						D						?	x		
	D		x		M			x	M				x		M												x			
	D		?			I	x	x	M				x		M												x			
	D				D			x	M				x		M												x			
	D	I			D				M												D						x	x		
	D		x	x	M			x			D		x		M												x			
	D		x		M		I	x		M			x		M												x	x		
M			x		M		x			D		x				D	I									D	I		x	

2 ^{ème} Série																			
M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2
	D		?	x		D			x		I	x	x				I		
	D						I	x	x	D		x		M					
M			x		M		I		x	M			x	M					
	D		x		D				M				x	M					x
	D				D		x			D		?					I	x	
M			x	M					M				x		D				x
M			x	M				x		D	I		x		D				x
	D		x	M				?			I		x		D			x	x
	D			M	D	I		?		D		?	?				I	x	
M			x		D	I		x	M				x				I		x
M			x	M			x	x	M				x			D			x
M			x		D					D			x	M					x

3 ^{ème} Série																			
M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2	M	D	I	1	2
	D					D			?	M			x	x			I		
		I				D				M			x	x	D				x
M					M				?	M			x	x	M			x	x
	D				M					M			x				I	x	x
	D				D			x		M								x	x
M					M					D			x		D				
M					M		I			D		x					I		x
M			x	M				x		D		?		M				x	x
M			x		D					D	I	x	x	M				x	
	D	I	x	?	M			x			I		x		D			x	x
M			x		M					D					M		I	x	x
	D		x		D			x	M						D				x

Questionnaire utilisé dans l'expérience.

3.2 LES RESULTATS:

Une fois les réponses collectées, nous avons donc choisi de les soumettre à l'analyse des correspondances. Il faut pour cela introduire les réponses dans une matrice, donc les réduire à deux dimensions. (cf BENTAB: tableaux multiples). En effet on peut considérer que celles-ci ont 5 ou 6 dimensions: celles des sujets, des séries, des classes, des couples d'enveloppes choisies, de la réponse. Nous avons choisi quelques-unes des nombreuses combinaisons possibles. Nous présenterons plusieurs analyses pour les jugements de hauteur et une pour les jugements de fusion.

3.2.1 Analyse des jugements de hauteur.

Pour opérer ce choix dans la représentation des données sur les deux dimensions de la matrice, on peut s'aider de diverses considérations. La disposition sur deux axes différents de deux dimensions favorise l'apparition de facteurs traduisant leurs relations. S'ils figurent sur un même axe on pourra au contraire juger les variations de leurs comportements par rapport à des facteurs traduisant la nature commune de leurs relations avec les autres dimensions. Ainsi on pourra opposer les sujets qui échantillonnent un phénomène dont on cherche les règles aux dimensions qui décrivent les stimuli. Parmi celles-ci on peut distinguer entre les paramètres de classe et de série des paramètres de l'enveloppe spectrale qui interviennent au coeur des stimuli à juger. On peut procéder en décidant d'abord l'organisation du tableau de données pour les paramètres d'enveloppe spectrale puis multiplier par les autres dimensions.

La disposition utilisée par Gérard Charbonneau dans des expériences similaires (Charbonneau, 1976) consiste à disposer les couples (SON_i, SON_j) de façon à former une matrice carrée 4x4. Mais il faut alors coder en une seule valeur numérique la réponse de nos sujet qui est constituée au départ de trois valeurs binaires (MID). J'ai utilisé le codage suivant:

M=0 MI=1 I=2 DI=3 D=4

Ce codage arbitraire qui permet la construction de la matrice risque d'introduire un effet de taille dans l'analyse. Toutefois on peut assimiler cette représentation à des notes d'intensité (chap 1:2.3). Aussi peut-on utiliser la technique de complémentation recommandée dans ce cas. D'autre part pour remplir complètement la matrice, il faut compléter la diagonale (couples d'enveloppes identiques) avec des 2 (jugement d'identité). C'est ce que nous avons fait dans l'analyse qui suit.

première analyse

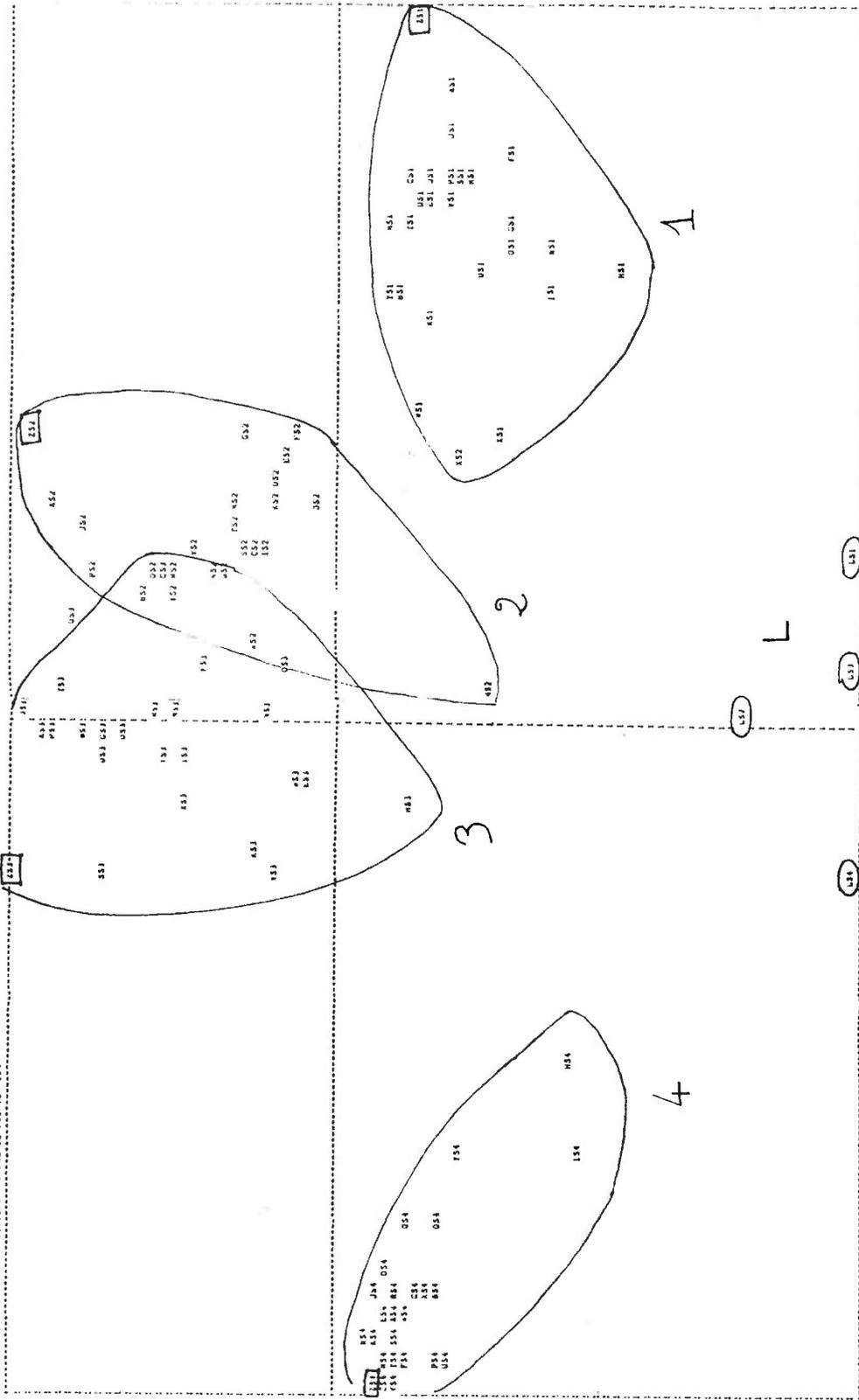
Sur les colonnes figurent les éléments obtenus en combinant les classes, les séries et les 4 enveloppes du premier son des stimuli, doublés des colonnes contenant leur complément à 4, soit 96 colonnes. Sur l'autre figurent les enveloppes du second son combinées avec les 25 sujets qui ont répondu au questionnaire, doublées des lignes contenant leur compléments à 4 soit 200 lignes. Les résultats de l'analyse sont

LES VALEURS PROPRES VAL(1) = .99999999

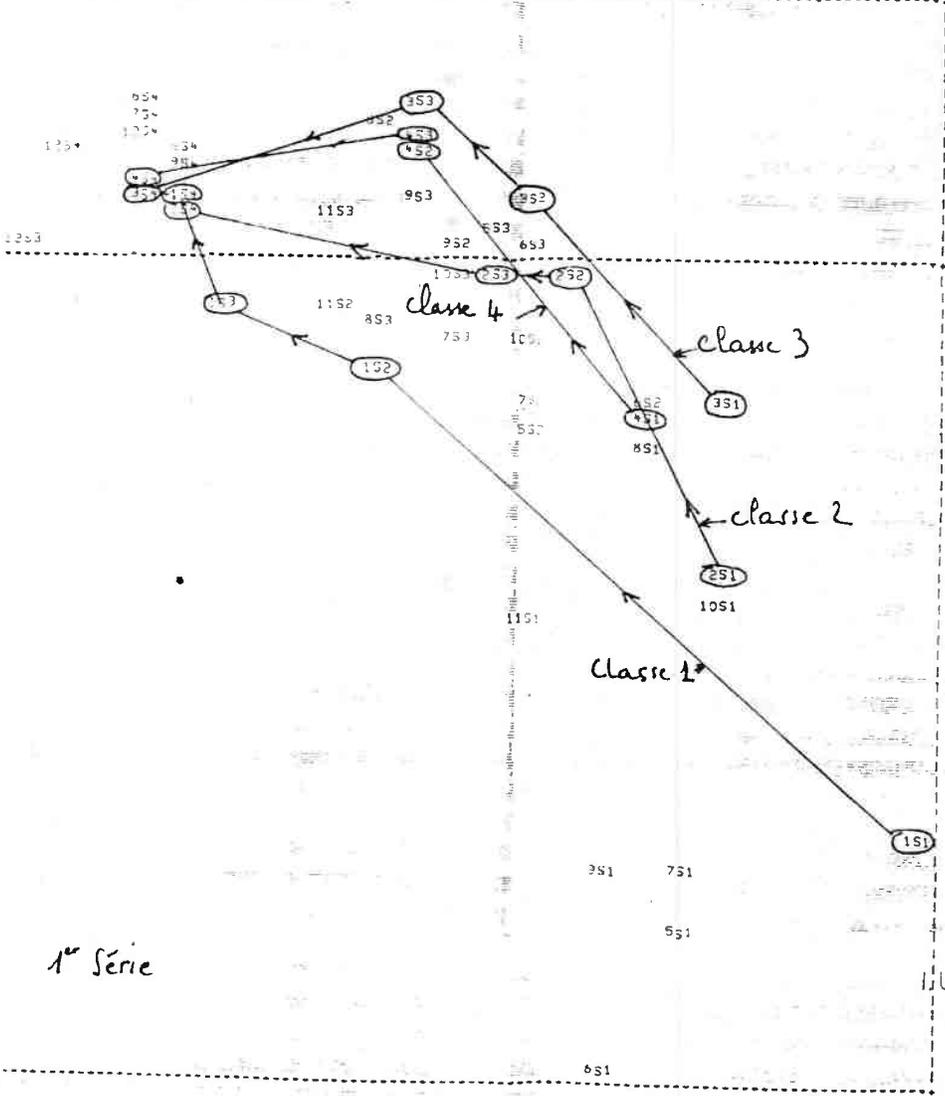
NUM ITER	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE
2	.206355608	47.844	47.844	*****
3	.037586210	8.713	56.557	*****
4	.019225909	4.465	61.022	*****
5	.01470531	3.409	64.432	*****
6	.01261533	2.925	67.357	*****
7	.01156921	2.682	70.039	*****
8	.01033896	2.397	72.436	*****
9	.00992579	2.301	74.737	*****
10	.00922448	2.139	76.876	*****
11	.00752542	1.745	78.621	*****
12	.00685680	1.590	80.211	*****
13	.00677508	1.571	81.701	*****
14	.0058341	1.526	83.308	*****
15	.00591598	1.372	84.679	*****
16	.00535294	1.241	85.920	*****
17	.00482137	1.118	87.038	*****
18	.00472792	1.096	88.134	*****
19	.00429232	0.995	89.130	*****
20	.00365475	0.847	89.977	*****
21	.00346743	0.804	90.781	*****
22	.00328639	0.762	91.543	*****
23	.00303035	0.697	92.240	*****
24	.00282928	0.656	92.896	*****
25	.00266050	0.617	93.513	*****
26	.00247527	0.574	94.087	*****
27	.00226928	0.526	94.613	*****
28	.00209256	0.485	95.098	*****
29	.00205596	0.477	95.575	*****
30	.00195345	0.453	96.028	*****
31	.00181577	0.421	96.449	*****
32	.00155013	0.359	96.808	*****
33	.00151689	0.352	97.160	*****
34	.00138710	0.322	97.482	*****
35	.00137763	0.319	97.801	*****
36	.00120934	0.280	98.081	*****
37	.0011846	0.259	98.341	*****
38	.00109693	0.255	98.595	*****
39	.00104168	0.242	98.837	*****
40	.00092211	0.214	99.051	*****
41	.00078938	0.183	99.234	*****
42	.00071108	0.165	99.399	*****
43	.00065033	0.151	99.549	*****
44	.00053905	0.125	99.674	*****
45	.00049606	0.115	99.789	*****
46	.00041500	0.096	99.886	*****
47	.00025031	0.058	99.944	*****
48	.00017837	0.041	99.985	*****
49	.00006442	0.015	100.000	*****
50	.00000002	0.000	100.000	*****
51	.00000001	0.000	100.000	*****
52	.00000000	0.000	100.000	*****

[Direct.1]

MARSHALL ISLANDS (1973) MARSHALL ISLANDS (1973) MARSHALL ISLANDS (1973)



[direct.2]



1^{re} Série

[direct. 3]

préfixés "direct". La figure [Direct.1] représente l'histogramme des valeurs propres. Celui-ci montre l'importance des deux premiers facteurs qui contiennent 57% de l'information (48% pour le premier à lui tout seul). Les figures [direct.2] et [direct.3] représentent respectivement les lignes et les colonnes. La première s'interprète aisément, les points se divisant en 4 classes représentant les 4 enveloppes. Nous avons introduit un individu supplémentaire Z (il ne participe donc pas à l'analyse) dont les données ont été constituées de la manière suivante:

	1	2	3	4
1	2	0	0	0
2	4	2	0	0
3	4	4	2	0
4	4	4	4	2

soit une réponse caricaturale où les jugements de hauteur sont parfaitement tranchés (pas de panachage ni de réponse d'identité hors la diagonale), respectant l'ordre suivant: l'intervalle est descendant si la succession dans le couple correspond à un élargissement spectral. Les points Z1 à Z4 se projettent bien dans les zones 1 à 4 de plus le mouvement circulaire de l'ensemble des points est respecté par Z. On peut certainement interpréter cette représentation graphique comme résultant d'un jugement de hauteur respectant l'ordre des enveloppes. Le fait que Z suive un schéma circulaire montre que le codage utilisé provoque une distorsion géométrique empêchant de représenter ce jugement sur un seul axe. La distance curviligne entre les points de Z est à peu près constante avec un léger accroissement de 1 jusqu'à 4. On peut considérer Z comme un étalonnage pour les intervalles intersons et cela permet d'interpréter les variations de distance subjective entre les sons. Ainsi l'intervalle le plus important est entre 4 et 3, vient ensuite l'intervalle (1,2) les sons 2 et 3 étant jugés les plus proches. Le nuage montre également la dispersion interindividuelle des jugements pour chaque son. Elle est la plus faible pour le son 4 puis suivent dans l'ordre les sons 1 2 et 3. Ainsi les deux extrêmes provoquent les jugements les plus stables.

Cette analyse montre un résultat supplémentaire. En effet on peut constater que l'individu L voit ses réponses réparties sur un cercle de très petit diamètre (H également) alors que Z se retrouve sur un diamètre maximal. L a déclaré être gêné par l'épreuve, notamment par la difficulté d'étiqueter la différence perçue en "monte" ou "descend". Les réponses montrent en effet des inversions nettes où les intervalles sont jugés systématiquement dans le sens opposé. Ainsi il apparaît que le diamètre représente le degré de différenciation des intervalles ou encore la surté de jugement. (A noter la performance tout à fait homogène aux autres des sujets X et Y âgés de 7 ans et de 9 ans moins le quart).

La projection des variables [direct.3] apparaît moins claire. Les sons ne se regroupent pas en zones disjointes. Toutefois, si on suit pour une classe et une série donnée l'évolution des enveloppes (par exemple 1S1 1S2 1S3 1S4 pour la première série et la première classe) on observe que celles-ci se rangent systématiquement de gauche à droite et de haut en bas permettant d'interpréter le premier facteur également comme un axe de hauteur. A nouveau le son 4 est très peu dispersé par

contre la place du son1 varie considérablement.

deuxième analyse

Pour remédier au manque de symétrie des matrices 4x4 des cellules de bases induisant un manque de symétrie pour les espaces I et J reliés arbitrairement aux variables sujets et aux variables séries+classes, il est apparu souhaitable de traiter les matrices 4x4 par la distance de Carroll(Charbonneau,1976)

$$m(i, j) = \sum \{ |m(k, i) - m(k, j)|, j \in [1, 4] \}$$

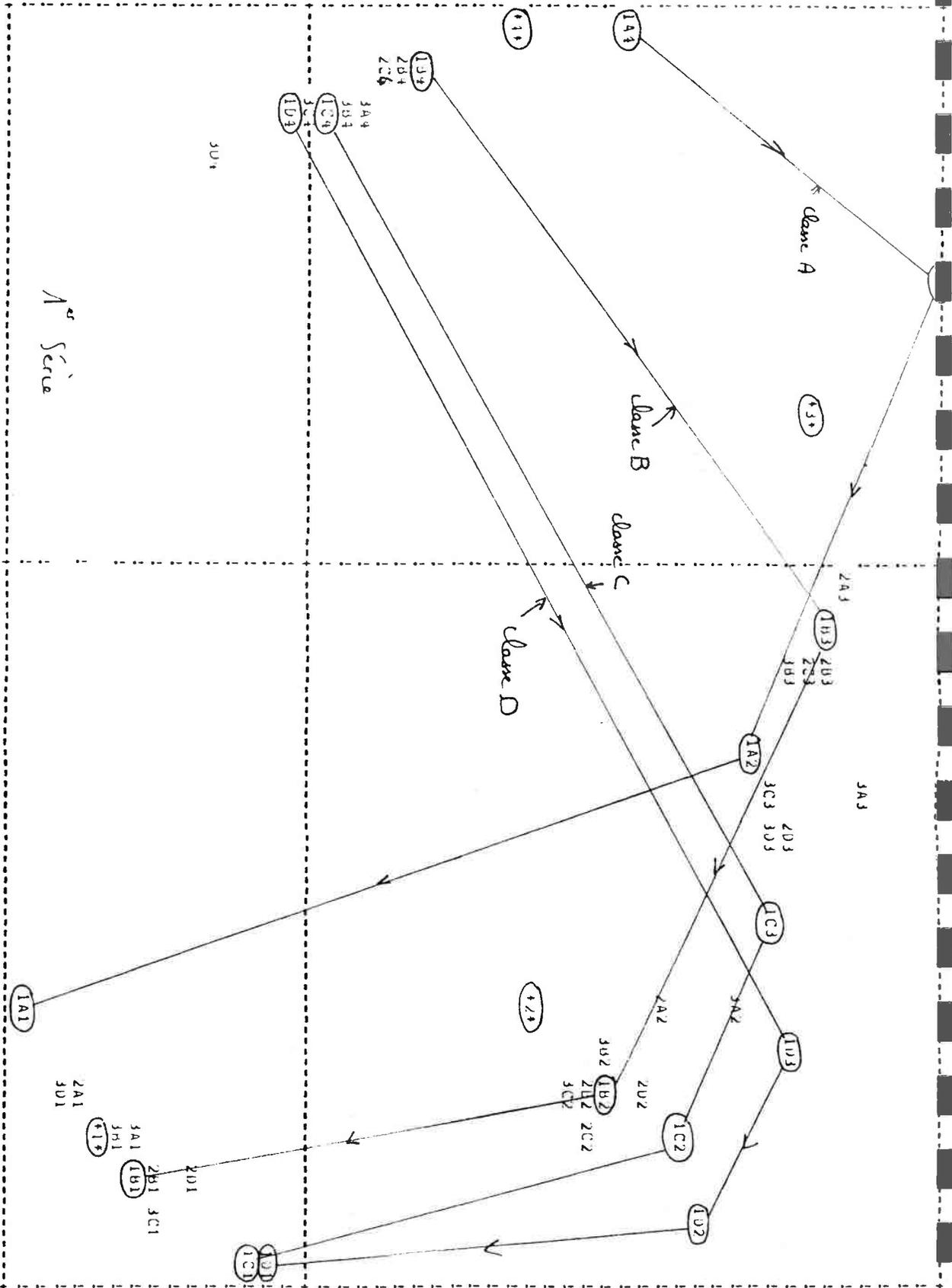
La figure [car.1] montre la concentration des informations sur les deux premiers facteurs. La figure [car.2] montre un schéma circulaire identique à [dir.2], hormis la dimension diamétrale qui semble avoir disparue. La projection de l'autre dimension [car.3] montre clairement l'effet de la symétrisation de la matrice par la distance de Carroll. Les points se rassemblent également en 4 groupes correspondant aux 4 enveloppes spectrales. On peut voir sur cette figure la projection de 4 colonnes supplémentaires notées *1 à *4 construites de façon similaire à l'individu Z. Ces points supplémentaires montrent également que le jugement de hauteur suit l'évolution spectrale, donne les mêmes distances subjectives entre chaque sons. Toutefois les variations semblent importantes suivant les séries et les classes.

Notamment si on observe la distribution des points correspondant au son1 et au son4 on constate que ces points s'organisent sur une droite dans le sens des classes, avec un déplacement dépendant de la série. Ceux de la série 1 ont une variation beaucoup plus importante que les autres. Cette importante variation se trouve encore amplifiée pour les sons 2 et 3, notons en particuliers la distance entre 1A3 et 1D3. Si l'on relie par classe les points de la série 1 on peut observer de manière synthétique la variation de distance des enveloppes avec l'ordre de la classe (la position du sommet de l'enveloppe). On peut constater un très fort accroissement de la distance entre 4 et 3 une diminution de la distance entre 3 et 2, ainsi qu'à un moindre degré entre 2 et 1. Les variations n'ont pas la même amplitude d'une classe à l'autre, très grande de la classe A à la classe B elle reste importante entre B et C les classes C et D ayant un comportement presque identique. Le même mouvement d'ensemble est notable pour la série 2 avec une amplitude bien moindre. Les mouvements sont différents pour la série trois mais cette série est entachée par un artefact dans la synthèse. Le mouvement global de rotation avec la classe, s'il est notable, est difficile à interpréter.

HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MAIRICE

ORDRE	LIBRE	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL
1	1	.07069711	18.714	18.714
2	1	.01409108	3.729	22.443
3	0	.00532833	1.410	23.853
4	0	.00419184	1.109	24.962
5	0	.00400031	1.059	26.021
6	1	.00338501	0.896	26.917
7	1	.00303193	0.802	27.719
8	1	.00293343	0.776	28.495
9	1	.00286594	0.758	29.253
10	1	.00267615	0.708	29.961
11	1	.00250121	0.602	30.563
12	1	.00225070	0.596	31.159
13	1	.00220249	0.536	31.695
14	1	.00200215	0.530	32.225
15	1	.00199071	0.527	32.752
16	1	.00173898	0.460	33.212
17	1	.00167859	0.444	33.656
18	1	.00162986	0.431	34.087
19	1	.00150813	0.399	34.486
20	1	.00144740	0.383	34.869
21	1	.00126159	0.331	35.200
22	1	.00115883	0.307	35.507
23	1	.00113399	0.300	35.807
24	1	.00105199	0.278	36.085
25	1	.00098481	0.261	36.346
26	1	.00093335	0.247	36.593
27	1	.00084698	0.221	36.814
28	1	.00083358	0.221	37.035
29	1	.00073150	0.194	37.229
30	1	.00070118	0.185	37.414
31	1	.00064237	0.170	37.584
32	1	.00060409	0.160	37.744
33	1	.00058524	0.155	37.899
34	1	.00054258	0.144	38.043
35	1	.00052153	0.138	38.181
36	1	.00047720	0.125	38.306
37	1	.00043788	0.100	38.406
38	1	.00035686	0.097	38.503
39	1	.00032290	0.085	38.588
40	1	.00028378	0.075	38.663
41	1	.00022622	0.069	38.732
42	1	.00021316	0.056	38.788
43	1	.00016919	0.050	38.838
44	1	.00015282	0.045	38.883
45	1	.00012261	0.032	38.915
46	1	.00010135	0.027	38.942
47	1	.00007016	0.020	38.962
48	1	.00000013	0.000	38.962
49	1	.00000013	0.000	38.962
50	1	.00000013	0.000	38.962
51	1	.00000013	0.000	38.962
52	1	.00000013	0.000	38.962
53	1	.00000013	0.000	38.962

[car. 1]



[car. 3]

troisième analyse

Dans les analyses précédentes nous présentions les données de façon à disposer les deux éléments d'un stimulus sur deux axes différents avec le jugement codé à l'intersection. Cette disposition a la conséquence de forcer l'analyse à donner un résultat synthétique sur les 12 jugements de hauteurs pour chaque unité. en disposant les 4 enveloppes dans le plan. L'avantage en est évident pour l'interprétation. Par contre cette méthode introduit un biais difficilement contrôlable, celui du codage qui a au moins l'inconvénient d'être directement responsable de la disposition des quatre sons dans l'espace donc de leur projection sur le plan principal. Nos points supplémentaires Z_i et $*i$ y remédient partiellement en instituant un étalonnage. D'autre part une éventuelle dissymétrie dans les jugements due à l'ordre des sons dans un couple ne peut pas apparaître.

Nous avons décidé de choisir une autre représentation pour éviter ce biais en disposant les 12 jugements par cellule sur le même axe opposés aux réponses mises sous forme disjonctive complète, en formant trois colonnes MID contenant la réponse sous forme binaire (0 ou 1) complétées à 1. Ces six colonnes ont été multipliées pour chaque sujet de façon à opposer ces derniers aux couples pour provoquer des axes principaux disposant les couples de manière synthétique par rapport aux variations interindividuelles. Par contre les séries et les classes multiplient les cellules. Ainsi nous disposons sur les colonnes les 3 possibilités de réponse des 25 sujets plus leur pendants complétés à un, soit $3 \times 2 \times 25 = 150$ colonnes. Sur les lignes on retrouve les 12 stimuli pour toutes les classes de chaque série, soit $12 \times 4 \times 3 = 144$ lignes.

La figure [Mid.1] révèle deux facteurs très importants totalisant 60% de l'information et étant eux-mêmes du même ordre (respectivement 37% et 23%).

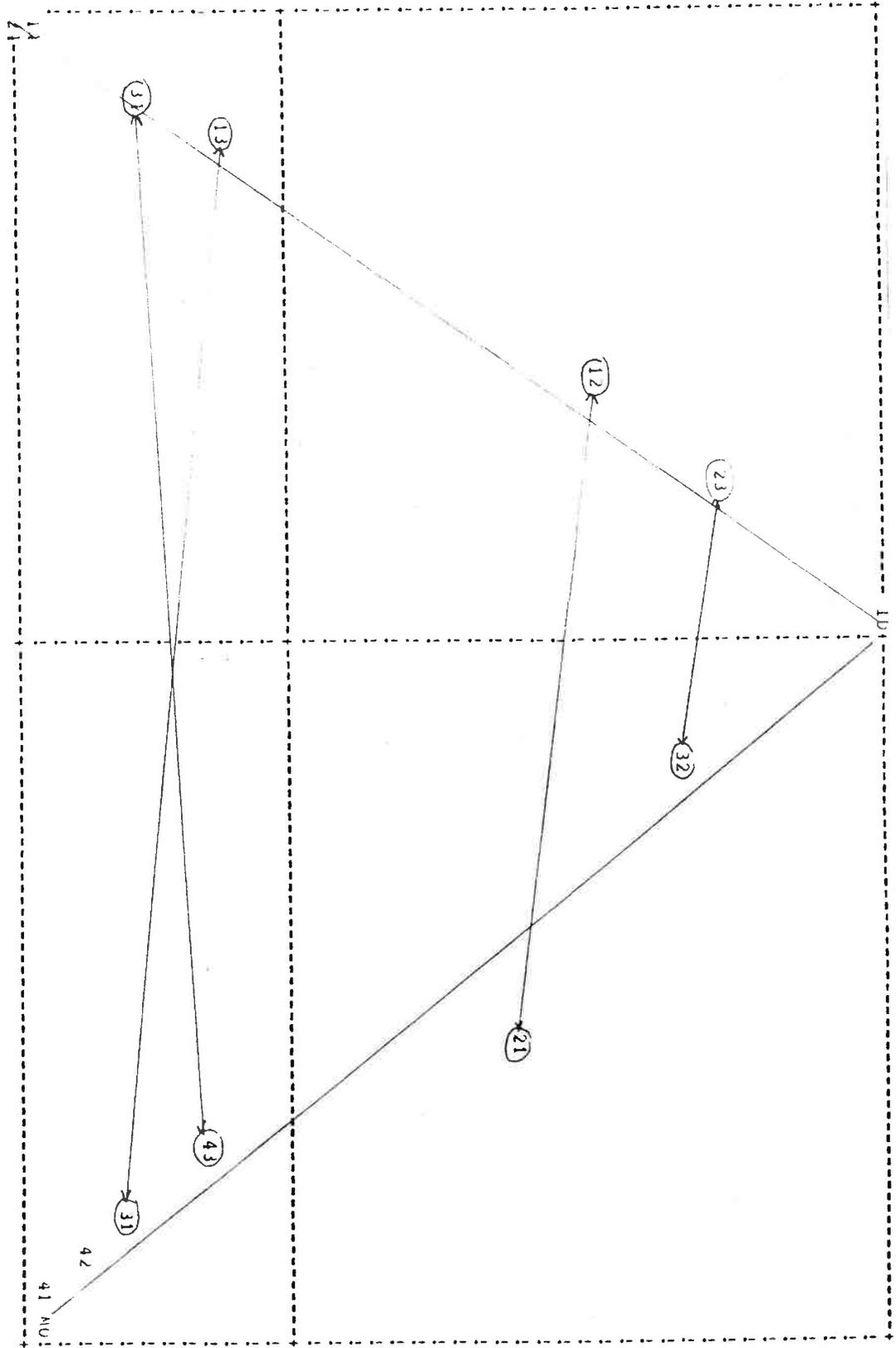
La figure [Mid.2] qui représente la projection des colonnes montre d'emblée une interprétation des axes. Le premier oppose Monte et descend donc est un axe de jugement de hauteur. Le second oppose identique à monte et descend donc rend compte de l'identité entre les sons.

Analyse par couples

La figure [Mid.3] représente la projection des couples: ces points ont été obtenus en introduisant des lignes supplémentaires, sommes des résultats pour chaque classe de chaque série (voir le chapitre un pour la technique). L'interprétation se montre également particulièrement aisée. Les 2 axes gardent la même signification que pour les colonnes et les 12 stimuli se répartissent suivant un triangle dont les sommets correspondent aux trois jugements MID. Les intervalles dépendent toujours de la même façon des enveloppes et notamment les stimuli (1,4) et (4,1) qui sont les plus grands intervalles se retrouvent sur deux sommets du triangle. Les enveloppes 2 et 3 confirment leur proximité et donc les couples (2,3) et (3,2) se retrouvent proches du sommet d'identité. Suivent (1,2) et (3,4) pour les intervalles conjoints. La disposition des résultats sur le triangle montre que les jugements sont collectivement régulièrement gradués comme une balance entre la possibilité ou non d'émettre un jugement sûr, ce jugement existant toujours cependant. Ce schéma permet potentiellement de distinguer deux

NO	ITEM	VAL PROPRE	PURCENT	CUMUL	%	HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE
1	1	.0099997	37.000	37.000	100.000	*****
2	1	.23033285	23.033	60.033	162.333	*****
3	0	.03010533	3.011	63.044	165.344	*****
4	0	.02404955	2.405	65.449	167.749	*****
5	1	.02124696	2.125	67.573	169.873	*****
6	1	.01972986	1.973	69.546	171.846	*****
7	1	.01799172	1.799	71.346	173.645	*****
8	1	.01633985	1.634	72.980	175.279	*****
9	1	.01530252	1.530	74.516	176.809	*****
10	1	.01416847	1.417	75.933	178.226	*****
11	1	.01374164	1.374	77.307	179.600	*****
12	1	.01349980	1.350	78.657	180.950	*****
13	2	.01248542	1.289	79.945	182.239	*****
14	1	.01204399	1.204	81.150	183.443	*****
15	1	.01072835	1.073	82.222	184.516	*****
16	1	.00966733	0.987	83.233	185.503	*****
17	1	.00950339	0.956	84.220	186.459	*****
18	1	.00896708	0.895	85.176	187.354	*****
19	1	.00801598	0.802	86.071	188.156	*****
20	1	.00760241	0.760	86.933	188.916	*****
21	1	.00713532	0.714	87.749	189.630	*****
22	1	.00665893	0.665	88.510	190.299	*****
23	1	.00625065	0.625	89.288	190.924	*****
24	1	.00591602	0.591	90.025	191.515	*****
25	1	.00542530	0.543	90.756	192.058	*****
26	1	.00499543	0.495	91.427	192.553	*****
27	1	.00460078	0.462	92.120	193.015	*****
28	1	.00420318	0.426	92.794	193.441	*****
29	1	.00389091	0.391	93.425	193.832	*****
30	1	.00351739	0.352	94.099	194.184	*****
31	1	.00330262	0.306	94.751	194.490	*****
32	1	.00297708	0.298	95.310	194.788	*****
33	1	.00272074	0.272	95.880	195.060	*****
34	1	.00242861	0.243	96.423	195.303	*****
35	1	.00220692	0.226	97.020	195.529	*****
36	1	.00200150	0.190	97.620	195.719	*****
37	1	.00196228	0.190	98.247	195.889	*****
38	1	.00176215	0.170	98.846	196.035	*****
39	1	.00160150	0.160	99.423	196.175	*****
40	1	.00146310	0.146	99.994	196.306	*****
41	1	.0013409	0.113	98.983	196.419	*****
42	1	.001105035	0.105	99.199	196.524	*****
43	1	.00087517	0.088	99.286	196.612	*****
44	1	.00081301	0.081	99.368	196.693	*****
45	1	.00078713	0.079	99.446	196.772	*****
46	1	.00076329	0.076	99.523	196.848	*****
47	1	.00001366	0.001	99.584	196.919	*****
48	1	.00000000	0.000	99.584	196.919	*****

[Mid. 1]



[Mid-3]

ordres de confusion, l'un résultant de jugements de hauteur très sûrs mais contradictoire entre sujets, l'autre résultant de difficultés à donner un jugement de hauteur parce que les sons sont proches. [mid.3.1]

-Symétrie- On peut également observer la symétrie de jugement entre les intervalles montants et descendants [mid.3].

Le couple (1,2) est un bel exemple de dissymétrie. L'intervalle (2→1) est jugé plus sûrement que son homologue (1→2). - On peut noter à ce propos de cet intervalle que (2→1) est le jugement qui est le plus à l'extérieur du triangle MID, ce qui peut être interprété comme le jugement d'une grande proximité tout en ayant une bonne assurance sur la relation de hauteur entre les deux sons. - Le même sens de dissymétrie s'observe pour (3,2), (3,1), le sens inverse pour (4,2) et (4,3). on n'observe aucune dissymétrie pour (4,1). Cette inversion de la dissymétrie lorsqu'on passe des intervalles entre sons proches de 1 à ceux entre sons proches de 4 peut être décrite de façon synthétique par un schéma bipolaire. La dissymétrie correspond à reclassement des sons 2 et 3 entre les extrémités 1 et 4 suivant le schéma [mid.3.2]. Le pôle entendu le premier "attire" à lui les sons les plus proches par un effet contextuel de continuité (continuity effect). Dans le cas des intervalles descendants, le son₁ qui est entendu presque sans ambiguïté à la hauteur du partiel du sommet de la cloche induit cette hauteur sur ceux qui sont proches, affaiblissant chez ceux-ci la perception du fondamental et créant un "trou" entre le 4ème et le 3ème son. Inversement dans le sens montant le son₄ renforce la perception du résidu dans le son qui le suit, s'il est assez proche (3 ou 2), creusant l'écart entre 1 et 2.

Toutes ces remarques sont fondées sur la figure [mid.3] où les résultats pour les séries et les classes ont été confondus. Nous allons "déplier" les résultats pour les séries.

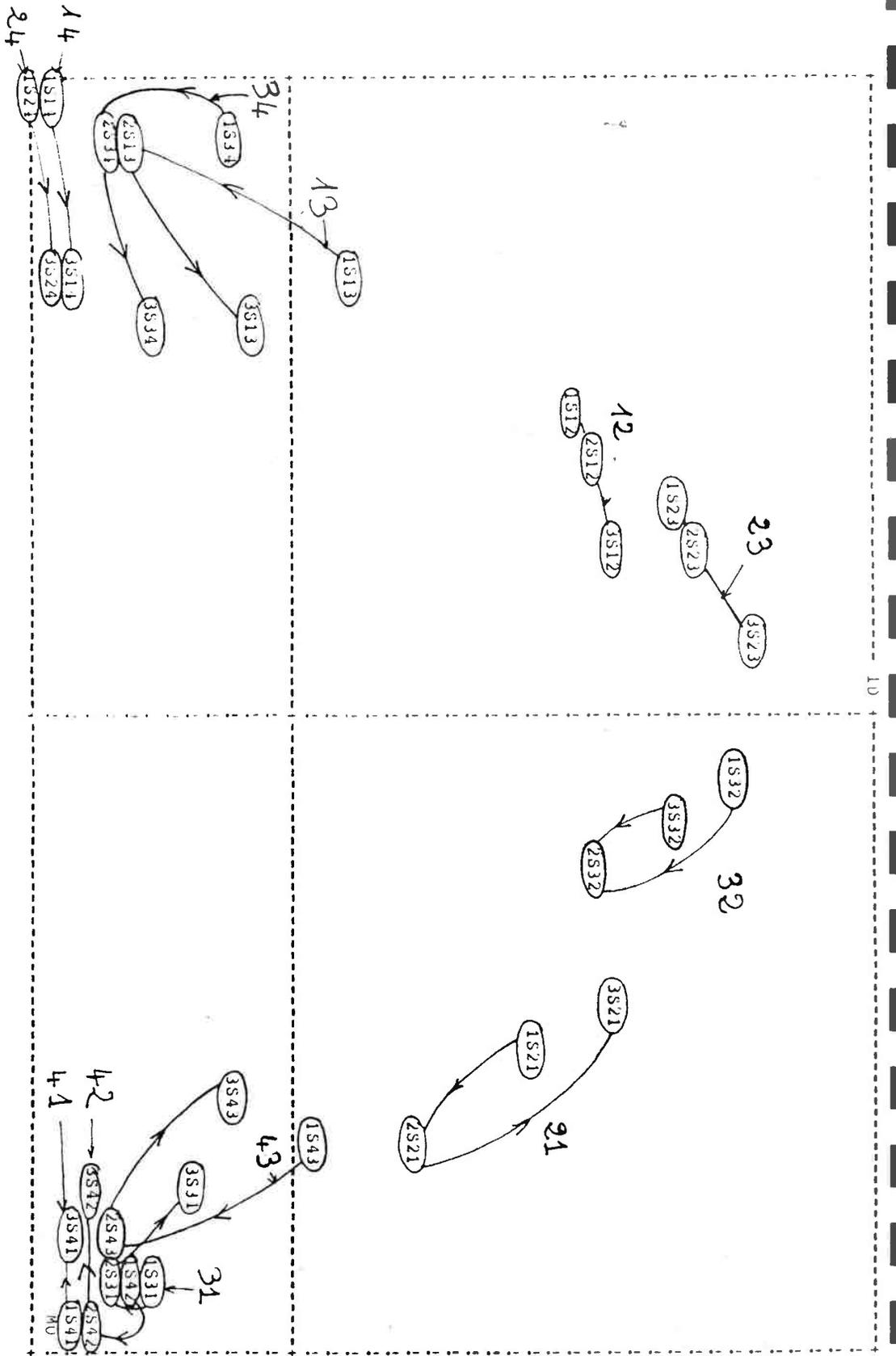
analyse par série

Les résultats figurent sur [mid.4]. On a relié les intervalles de même nom pour les 3 séries de façon à faciliter la vision des mouvements avec le fondamental.

La première constatation est le comportement global de la 3ème série où les jugements semblent se resserrer vers l'axe du 2ème facteur pour les grands intervalles. Si on regarde tout de suite la figure [mid.8] qui représente les jugements par classes pour la 3ème série on constate ce mouvement surtout pour les séries C et D. Ceci est sans doute lié au bruit de distortion constaté pour cette série qui d'une part a amoindri la perception des intervalles mais aussi, comme ce mouvement l'indique, induit des erreurs [mid.3.1]. Il s'agit donc ici sans conteste d'un artefact de la chaîne de synthèse. - Ce bruit n'est pas apparu avec les mêmes stimuli synthétisés et reproduits à l'IRCAM. Dans la suite nous éviterons d'interpréter les résultats de cette série.

La deuxième constatation repose sur la comparaison entre la première série et la seconde. Les couples (3→2), (2→1), (4→3), (3→1), (1→3), (3→4) sont mieux perçus dans la série 2, à l'inverse de (1→2) et (2→3) presque stationnaires.

La discrimination en hauteur s'effectue globalement mieux à 261 Hz qu'à 82 Hz.



On peut noter l'évolution importante de la dissymétrie de la série 1 à l'autre. La dissymétrie de (4,3) et (3,1) disparaît, celle de (2,1) augmente sensiblement celle de (2,3) s'inverse. Cela va dans le sens du renforcement de l'influence du pôle 4.

analyse par classe:séries confondues

La figure [Mid.5] montre la disposition des couples suivant la classe, les trois séries étant cumulées. D'importants remaniements se produisent avec la position du sommet de l'enveloppe. On retrouve, surtout pour les grands intervalles (4,1), (4,2) etc., un déplacement horizontal vers l'axe central pour les classes C et D. Rappelons qu'il est dû à la 3ème série ([Mid.8]) et que pour ce mouvement nous soupçonnons un artefact. Plus intéressant est le mouvement important sur les cotés du triangle avec l'ordre des classes. Le couple (1,2) a un ample mouvement qui traduit une nette dépréciation de l'intervalle séparant ces deux sons avec la classe. La même chose est observable à un moindre degré avec (1,3). Pour l'intervalle (2,3) il se produit un curieux retournement de situation: à une croissance de A à B succède une décroissance qui aboutit à un résultat de discrimination très faible pour la classe D. Les couples (4,3) et (4→2) - (2→4) est stable - croissent au contraire d'une classe à l'autre (ce sera plus clair sur les figures par séries séparées qui suivent). *L'ensemble suggère une nette décroissance de la discrimination avec la classe.*

analyse par classe:séries séparées

Les trois figures suivantes ([mid.6],[mid.7],[mid.8]) montrent les résultats bruts sans sommation présentés séparés pour chaque série.

- Série 1 -

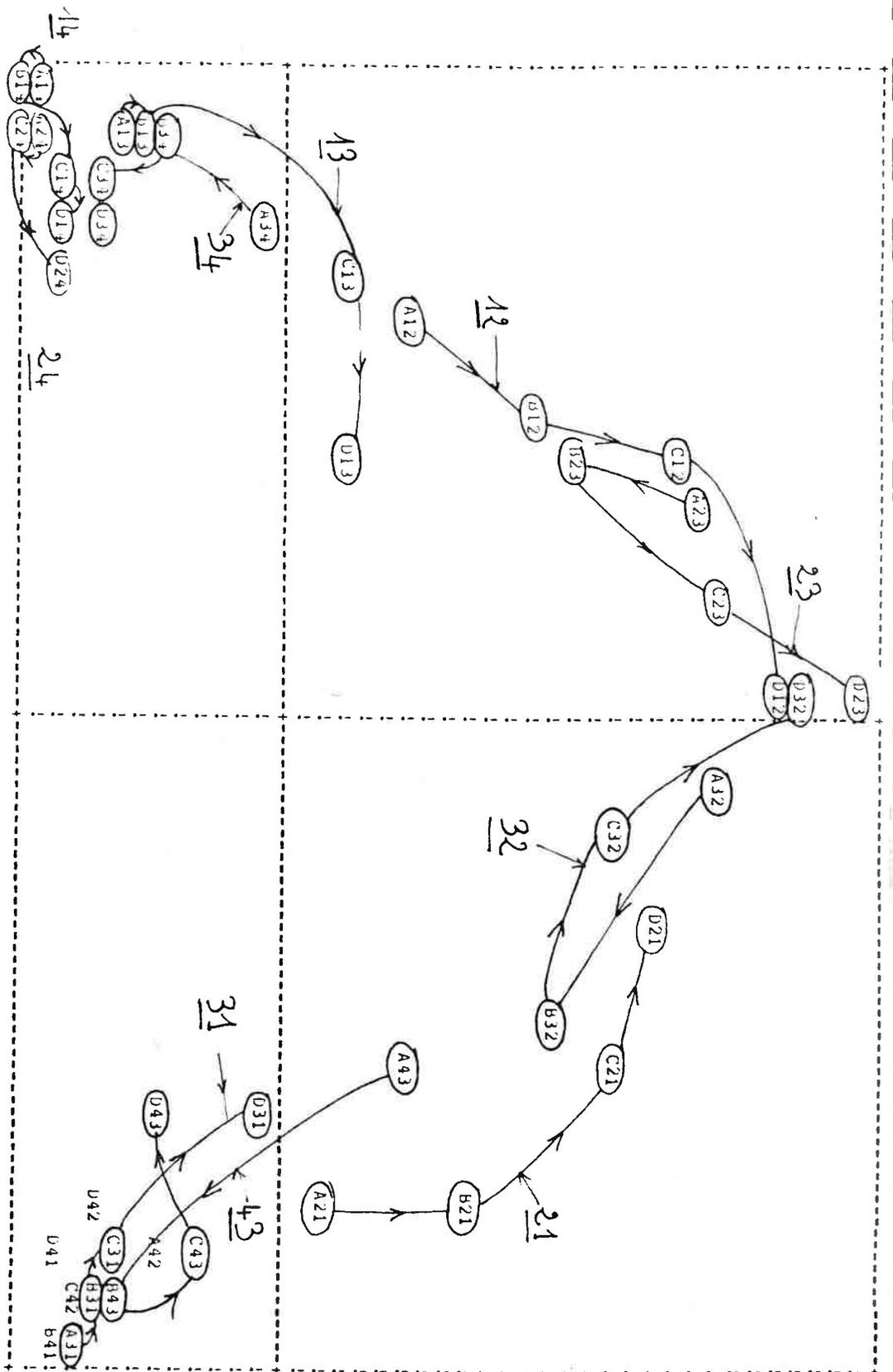
La figure [Mid.6] montre les résultats pour la première série. Nous décrivons les résultats par couples.

(1,2)

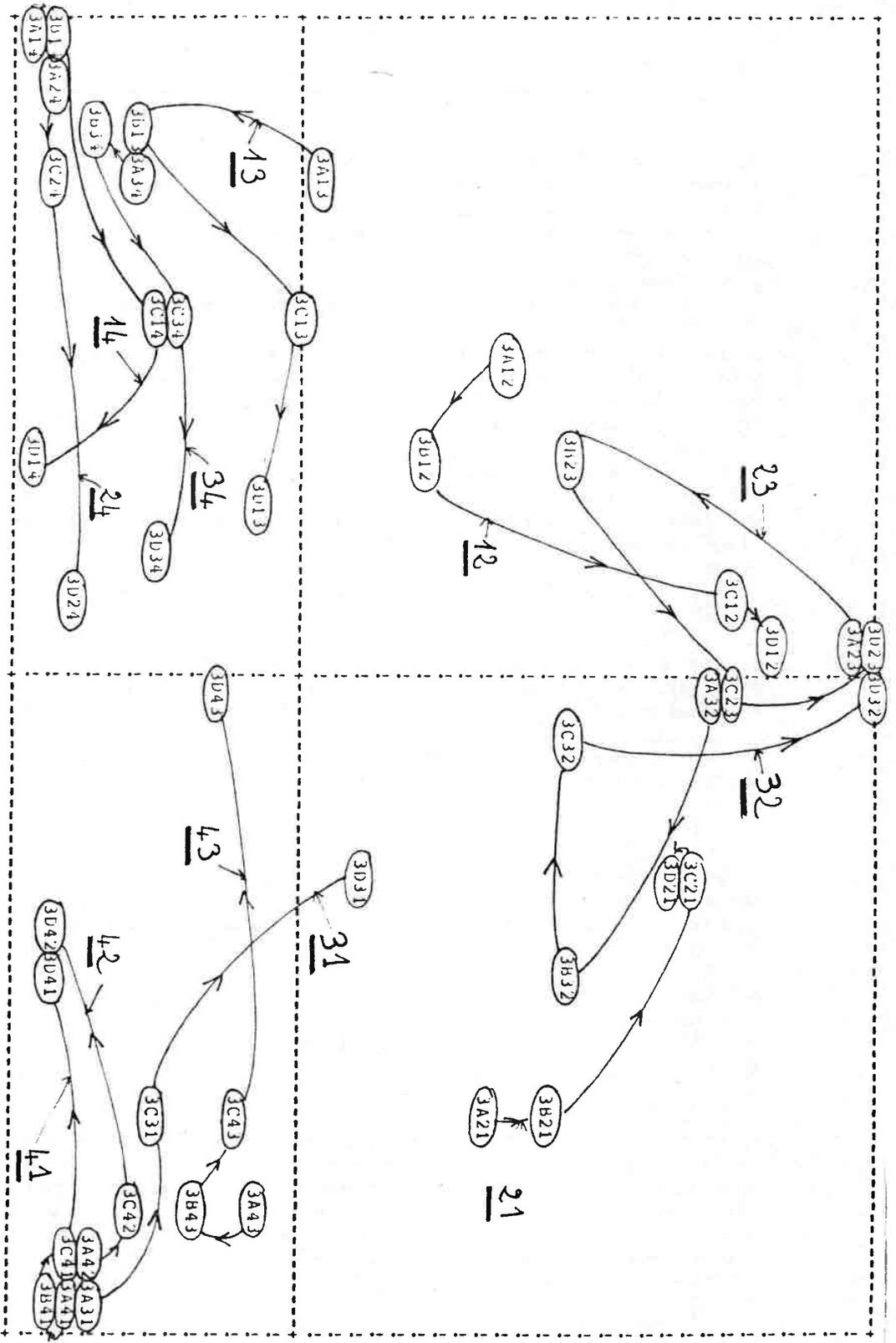
Le couple (1,2) présente une énorme variation de discrimination avec la classe et une dissymétrie sans direction franche. Dans la classe D, (2→1) est nettement mieux discriminé que (1→2) mais A et C sont à peu près symétriques et la dissymétrie est inverse pour la classe B. Toutefois il faut signaler pour ce cas un phénomène qui se reproduira plusieurs fois à notre avis, c'est le contexte global au stimulus, le contexte de la cellule. Dans ce cas-ci le stimulus (1→2) est le premier de la cellule B de la série 1 (l'ordre des sons est en annexe) et comme nous le verrons à d'autres reprises, il y a un phénomène d'apprentissage très net à l'entrée de chaque cellule, le premier stimulus au moins ayant un handicap de ce fait pour la discrimination. (Voir A32, C13, D23 pour cette série). Il semble valide d'attribuer à l'apprentissage la mauvaise prestation de B12 dans cette série et nous pensons donc que la dissymétrie est faible pour ce couple en s'accroissant toutefois en D.

(2,3)

La variation avec la classe de ce couple est bien moindre que la précédente. D'autre part ce couple est globalement moins bien discriminé que (1,2). Les intervalles montants se comportent de façon assez différente des intervalles descendants. Ces derniers ont une discrimination régulièrement décroissante avec la classe et globalement meilleure que leurs homologues qui présentent en plus un accident avec



[Mid.5]



3^{ème} Série

[Mid. 8]

la classe A. En effet le stimulus A32 a un score très faible. Toutefois ce stimulus est le premier de sa cellule et le premier de toute l'expérience, ce qui peut aisément expliquer le score et sans cet effet on peut imaginer une figure plus régulière. Toutefois il se peut que son score eut été faible tout de même dans un autre contexte car globalement pour les trois séries on trouve que A32 a un moins bon score que B32, le contexte ne ferait qu'amplifier le mouvement.

(1,3)

La dissymétrie est dans ce cas flagrante et même si la mauvaise position de C13 est accentuée par sa première place dans la cellule, on peut affirmer que le score décroît beaucoup plus vite avec la classe du côté des intervalles descendants.

(3,4)

On observe un net mouvement ascendant avec la classe à l'exception de B43 et une très forte dissymétrie, notamment pour la classe A. Encore une fois le contexte global a pu amplifier les choses, l'intervalle A43 étant le 3ème intervalle présenté depuis le début de l'expérience, juste après 31 très bien discriminé, mais pas au point de créer l'effet. Le contexte global peut également expliquer le bon score de B43 (voir infra).

(4,2)

Les scores sont très bons sauf pour A42 dont la faible valeur peut être due au contexte global (4ème valeur) ou à un effet de dissymétrie analogue à 43.

(4,1)

Les scores sont uniformément bons. La discrimination s'opère parfaitement, quelque soit la classe.

- Série 2 -

La figure [Mid.7] montre les résultats pour les 4 classes de 2ème série. Nous essaierons de faire simultanément à la description des résultats la comparaison de ceux-ci à ceux de la première série.

(1,2)

On observe deux caractéristiques: la discrimination diminue nettement avec la classe, la dissymétrie est très importante, l'intervalle montant étant systématiquement bien mieux discriminé. Si la variation avec la classe va dans le même sens que pour la première série, elle est beaucoup plus réduite, c'est le contraire pour la dissymétrie.

(2,3)

La figure de repliement observée sur [mid.4] (séries confondues), ambiguë dans la première série est ici très franc. Le mouvement général avec la classe est ample. L'intervalle (2,3) reste globalement plus petit que (1,2). A noter ce fait unique dans l'expérience: le croisement de D32 et D23. Les jugements sur cet intervalle pour cette classe sont contraires au mouvement de l'enveloppe. D32 est jugé nettement descendant. La dissymétrie est assez complexe.

(1,3)

La superbe dissymétrie de la première série a disparu. Le mouvement avec la classe est faible et complexe à part la nette détérioration de D.

(3,4)

On observe à nouveau une croissance avec la classe et une dissymétrie à l'inverse de la précédente mais surtout beaucoup plus faible.

(2,4) et (1,4)

Ces intervalles restent parfaitement discriminés avec de légers mouvements hasardeux à prendre en compte comme l'augmentation de l'incertitude de 42 avec la classe.

Nous tenterons de faire une synthèse de toutes ces remarques par la suite mais nous voulons y adjoindre les arguments provenant de l'analyse des jugements de fusion que nous présentons à la suite.

3.2.2 Analyse des jugements de fusion.

Dans un deuxième passage de la bande contenant les stimuli il a été demandé aux sujets (19 ont participé à l'expérience) de signaler pour chaque son s'ils entendaient une seule source sonore (une seule hauteur) ou plusieurs. Les résultats ont été mis sous forme disjonctive complète pour l'analyse. Les sujets en colonnes et les deux sons de chaque couple pour chaque classe et chaque série en lignes. A l'intersection d'une ligne et d'une colonne on trouve la réponse codée 0 ou 1 du sujet pour les conditions de la ligne. Les colonnes ont été complétées par leur complément à 1. Au total c'est une matrice de 288 (2x12x3x4) lignes et de 38 (2x19) colonnes qui a été soumise à l'analyse factorielle. Un certain nombre de lignes supplémentaires a été ajouté, représentant diverses sommations des 288 lignes.

La figure [acco.1] montre l'histogramme des valeurs propres de la matrice. Le premier facteur, avec 25% de l'information, domine nettement le second à 10%. Toutefois l'information est moins concentrée que lors des analyses sur les jugements de hauteur. Cela peut s'expliquer par la plus grande difficulté de l'épreuve qui a provoquée une dispersion des réponses et des attitudes. Dans les commentaires qui suivront nous nous attacherons à décrire uniquement les résultats sur le premier axe, n'ayant pas réussi à extraire une matière suffisamment cohérente des facteurs suivants.

La figure [acco.2] montre la disposition des sujets sur le premier axe. Les sujets sont bien groupés sur une extrémité de l'axe opposés à leur complément, seuls les sujets V, L et N s'écartent du groupe.

La figure [acco.3] montre la projection de plusieurs vecteurs supplémentaires. SO_iJ est la projection de la ligne formée en additionnant toutes les réponses pour toutes les classes, les séries et les couples contenant le son i . Sur le premier facteur les sons s'ordonnent ainsi : son4, son1, son3 et son2. Si on compare ceci aux résultats bruts de l'expérience (ils sont donnés en annexe) l'interprétation est aisée. Le nombre total de réponses positives ont été:

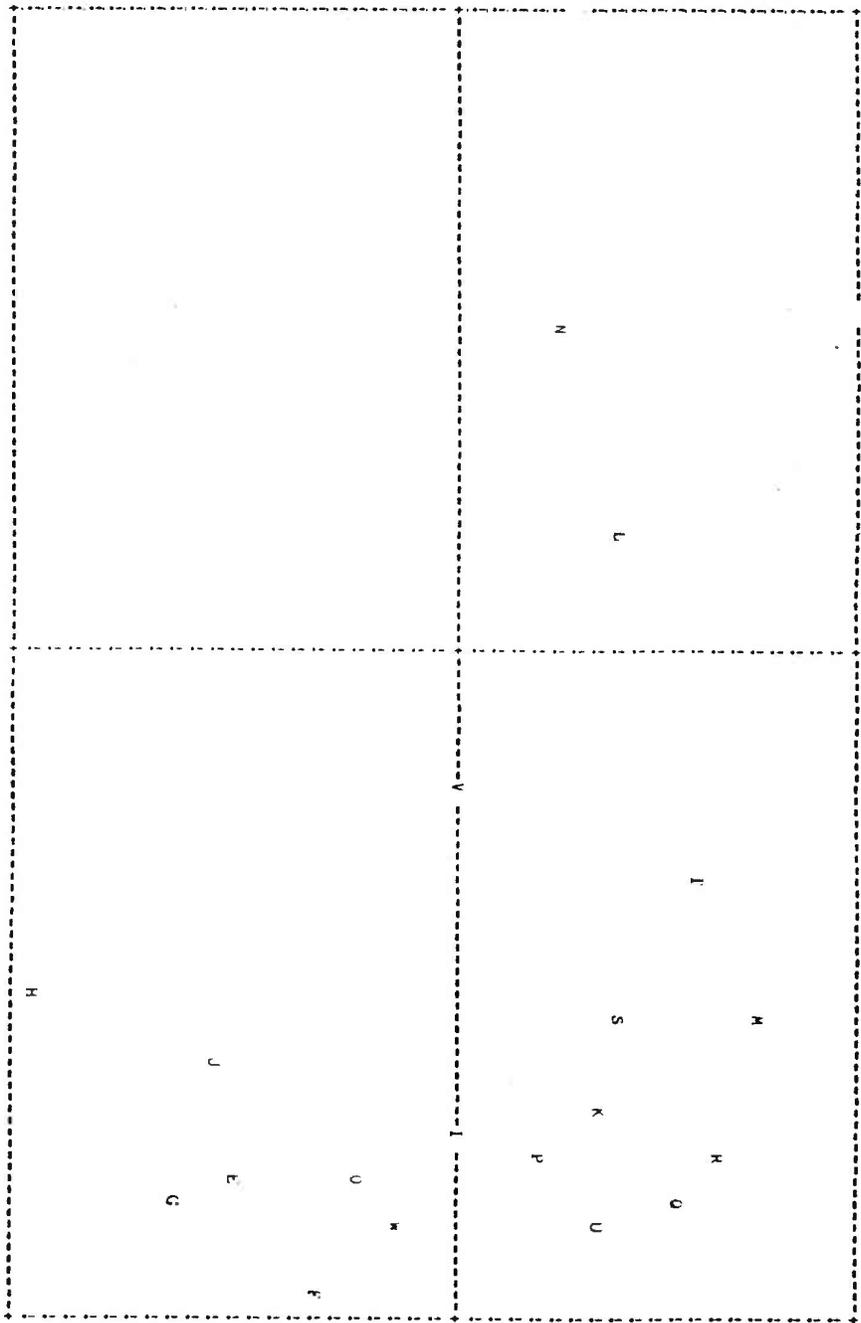
Son1: 686 Son2: 820 Son3: 750 Son4: 483

soit le même ordre que celui donné par l'analyse si on les range de gauche à droite dans l'ordre croissant du nombre de réponses positives. Le premier facteur est donc un facteur de *fusion/scission*. Le maximum de fusion est à gauche le maximum de scission à droite. On trouve ainsi les résultats suivants: globalement le son4 à grande largeur spectrale est jugé le plus fusionné puis l'impression de scission augmente du son4 au son3 atteint un maximum pour le son2. Par contre le son1 qui a l'enveloppe la plus étroite est jugé à nouveau très fusionné.

Pour juger l'influence absolue d'un son sur son voisin dans un couple nous avons généré les 8 lignes supplémentaires SO_iI et SO_iC . Les valeurs des lignes SO_iI (I comme Influent) sont obtenues en faisant la somme des réponses au partenaire de i dans tous les couples où i figure. Ainsi SO_{1I} est la somme de réponses pour 2 dans (1,2) et (2,1), 3 dans (1,3) et (3,1) et 4 dans (1,4) et (4,1). SO_iC (C comme complément) est la somme des réponses pour tous les couples où i ne figure pas. De la comparaison des deux, on constate que les effets contextuels de cette ordre sont très faibles, les deux familles étant fort proches. Toutefois on constate que la présence du son4 augmente légèrement la scission de ses partenaires (écart de 74 dans l'unité de longueur du

NUM	ITER	VAL PROPRE	POURCENTI	CUMUL	HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE
2	0	.24255898	24.256	24.256	*****
3	0	.10145210	10.145	34.401	*****
4	1	.08587649	8.588	42.989	*****
5	1	.06653598	6.654	49.642	*****
6	1	.05553186	5.553	55.196	*****
7	1	.05245622	5.246	60.441	*****
8	1	.04663977	4.664	65.105	*****
9	2	.04346160	4.346	69.451	*****
10	2	.04034317	4.034	73.486	*****
11	3	.03747843	3.748	77.233	*****
12	2	.03141832	3.142	80.375	*****
13	3	.03118326	3.118	83.493	*****
14	2	.03005658	3.006	86.499	*****
15	2	.02805064	2.805	89.304	*****
16	2	.02661448	2.661	91.965	*****
17	3	.02338225	2.338	94.304	*****
18	2	.02152804	2.153	96.457	*****
19	2	.01967687	1.968	98.424	*****
20	2	.01575764	1.576	100.000	*****
21	0	.00000005	0.000	100.000	*****
22	1	.00000004	0.000	100.000	*****
23	1	.00000003	0.000	100.000	*****
24	1	.00000003	0.000	100.000	*****
25	1	.00000002	0.000	100.000	*****
26	1	.00000002	0.000	100.000	*****
27	2	.00000002	0.000	100.000	*****
28	3	.00000002	0.000	100.000	*****
29	2	.00000002	0.000	100.000	*****
30	5	.00000001	0.000	100.000	*****
31	2	.00000001	0.000	100.000	*****
32	3	.00000001	0.000	100.000	*****
33	3	.00000001	0.000	100.000	*****
34	2	.00000001	0.000	100.000	*****
35	2	.00000001	0.000	100.000	*****
36	2	.00000001	0.000	100.000	*****
37	2	.00000001	0.000	100.000	*****
38	2	.00000001	0.000	100.000	*****

[0.00.1]



[acc.2]

programme), les autres les renforçant: son1 le moins (écart de 13), vient ensuite son3 (29) puis son2 (32). L'influence se traduit donc par l'attribution au partenaire du caractère opposé au sien (effet de contraste).

La figure [acco.4] montre les résultats lorsqu'on somme les résultats de toute une classe ou de toute une série. Il y a une forte **augmentation de la scission, régulièrement, de classe en classe**. Les résultats suivant la série sont bien plus resserrés: la série 2 est jugée légèrement moins fusionnée que la série 1, la série 3 a un comportement plus sectaire avec notamment un fort déplacement sur l'axe 2. Nous aurons plus loin confirmation que l'axe 2 discrimine la 3ème série et nous soupçonnons à nouveau un artefact pour ce phénomène.

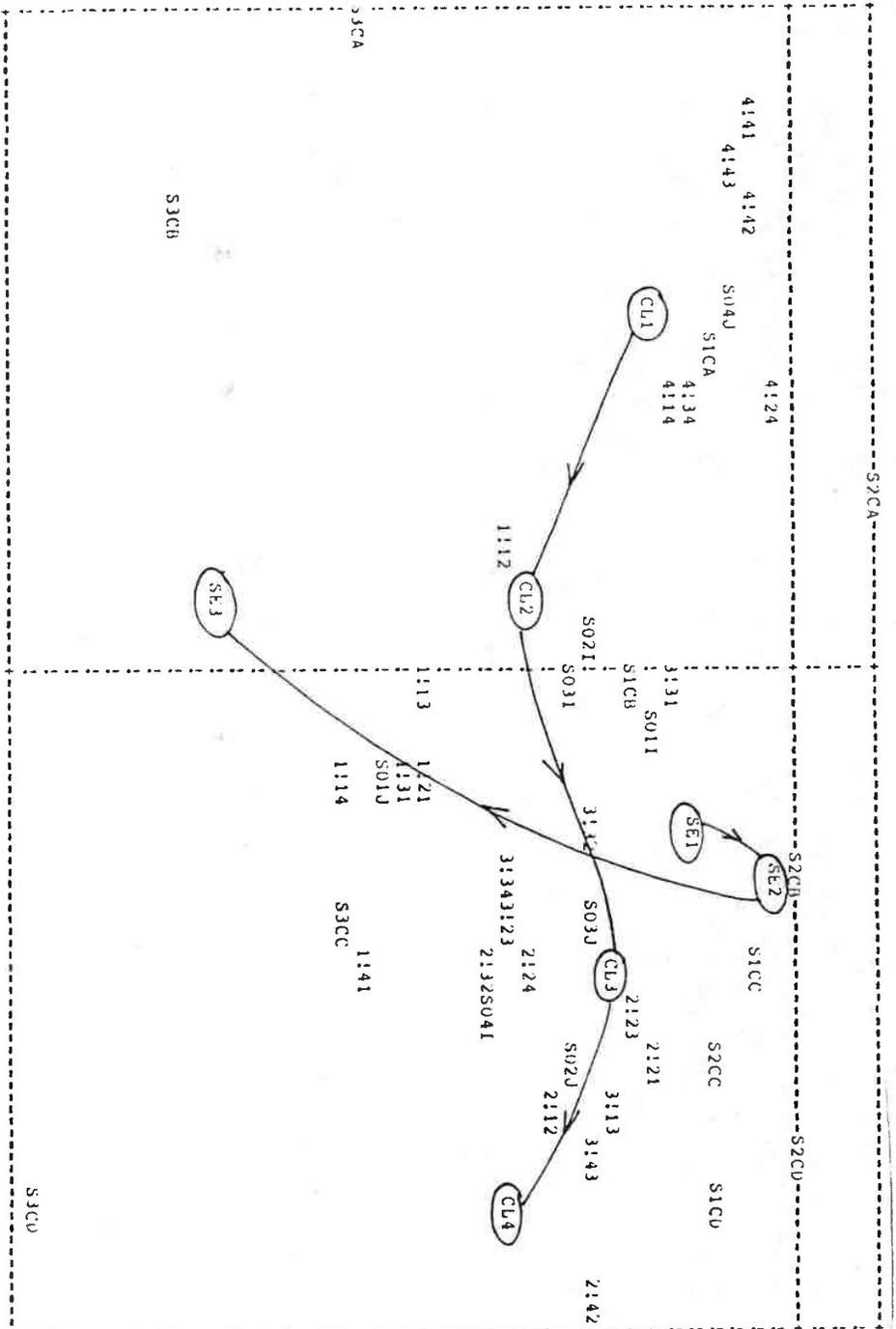
La figure [acco.5] reprend la distribution par classe et par série séparées. On voit apparaître que la série 2 n'est effectivement pas plus fusionnée que la première mais que ses résultats montrent une moins grande dispersion avec la classe. On aperçoit également que l'écart va en s'amenuisant pour les deux séries de la classe A à la classe D. La série 3 confirme son comportement singulier.

La figure [acco.6] aborde l'effet contextuel sur la fusion à l'intérieur d'un couple. Les lignes SOiJ ont été decouplées en deux lignes contenant la somme de résultats pour le son1 placé en premier (1SiJ) et placé en second (2SiJ). L'effet est clair. **Un son est jugé plus fusionné s'il est entendu en premier**. L'effet est le plus fort pour 3 (écart de 191) puis pour 4 (174), 1 (123) et 2 (94).

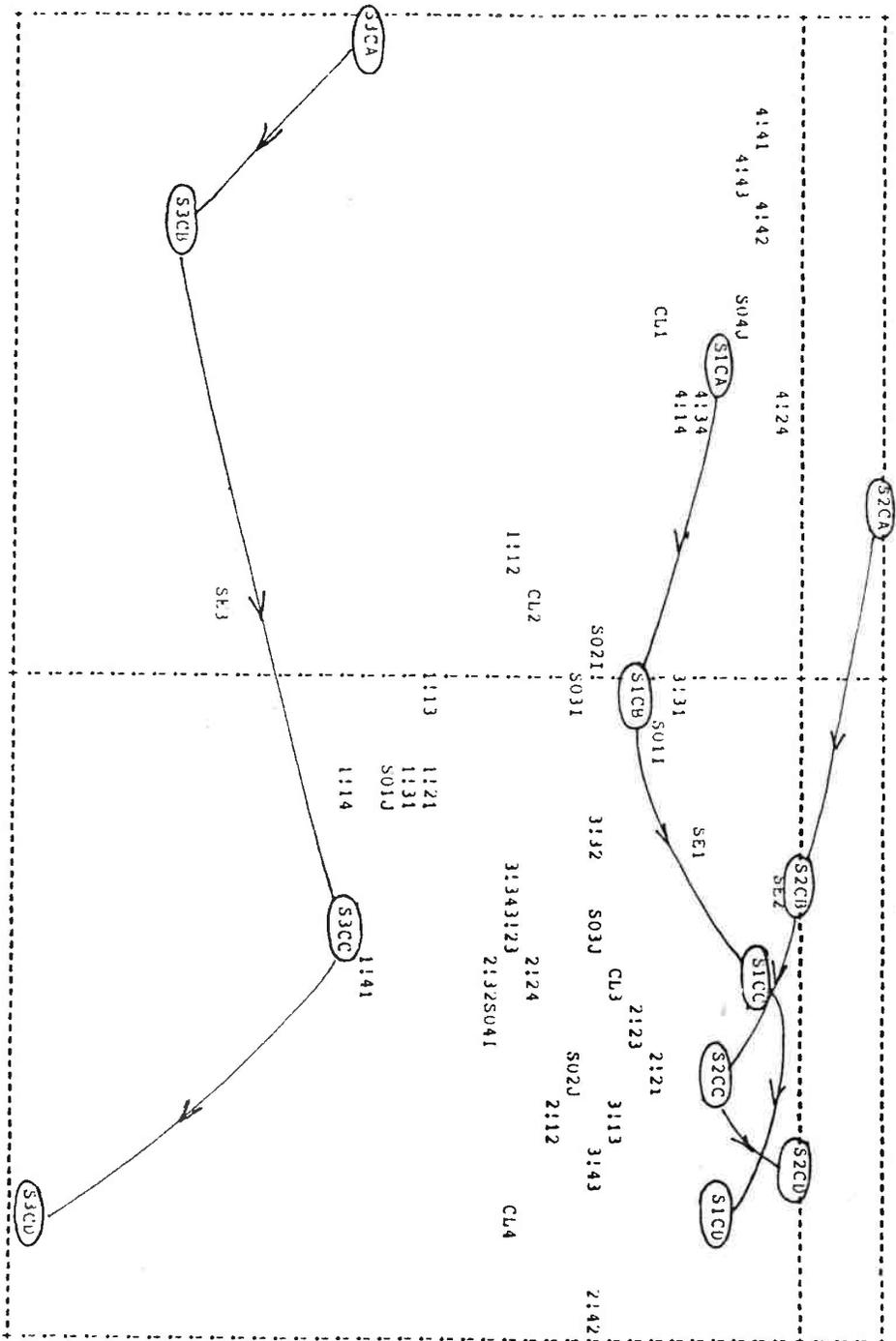
La figure [acco.7] présente le jugement d'un son au sein des divers couples qui le contiennent, classes et séries sommées. On retrouve évidemment la différence due à l'ordre de présentation qui se vérifie partout mais on aperçoit aussi de grandes variations avec le partenaire. Curieusement ces variations sont également importantes lorsque le son est placé en premier, ce qui implique un effet contextuel rétroactif.

Les figures [acco.8] à [acco.10] représentent l'évolution des jugements de fusion pour chaque son par séries et classes séparées. Il révèle d'énormes variations avec la classe cachées dans les figures précédentes. Sur la figure [acco.11] on a redispesé les abscisses (projections sur le 1er facteur) des points considérés de façon à faciliter la lecture des résultats. Les résultats de la 3ème série ont été retranscrits pour mémoire. Nous avons joint les sons par classes et nous nous intéressons à l'évolution de la fusion lorsque l'enveloppe se rétrécit. La courbe moyenne allant du son4 au son1 que montre la figure [acco.3] (dessinée par les 4 points SOiJ) se retrouve effectivement mais avec une déformation importante d'une classe à l'autre suivant une loi qui paraît fort plastique et régulière. La classe A montre une croissance de la scission progressive avec l'enveloppe puis du fait des mouvements de divers points la courbe va s'incurver en forme de crochet. Cela provient du mouvement fort inégal des divers sons vers la scission avec la classe. En effet le mouvement vers la droite va en diminuant du son4 au son1 et même change de sens pour le son1 de la 1ère série, si bien que les positions vont jusqu'à s'échanger.

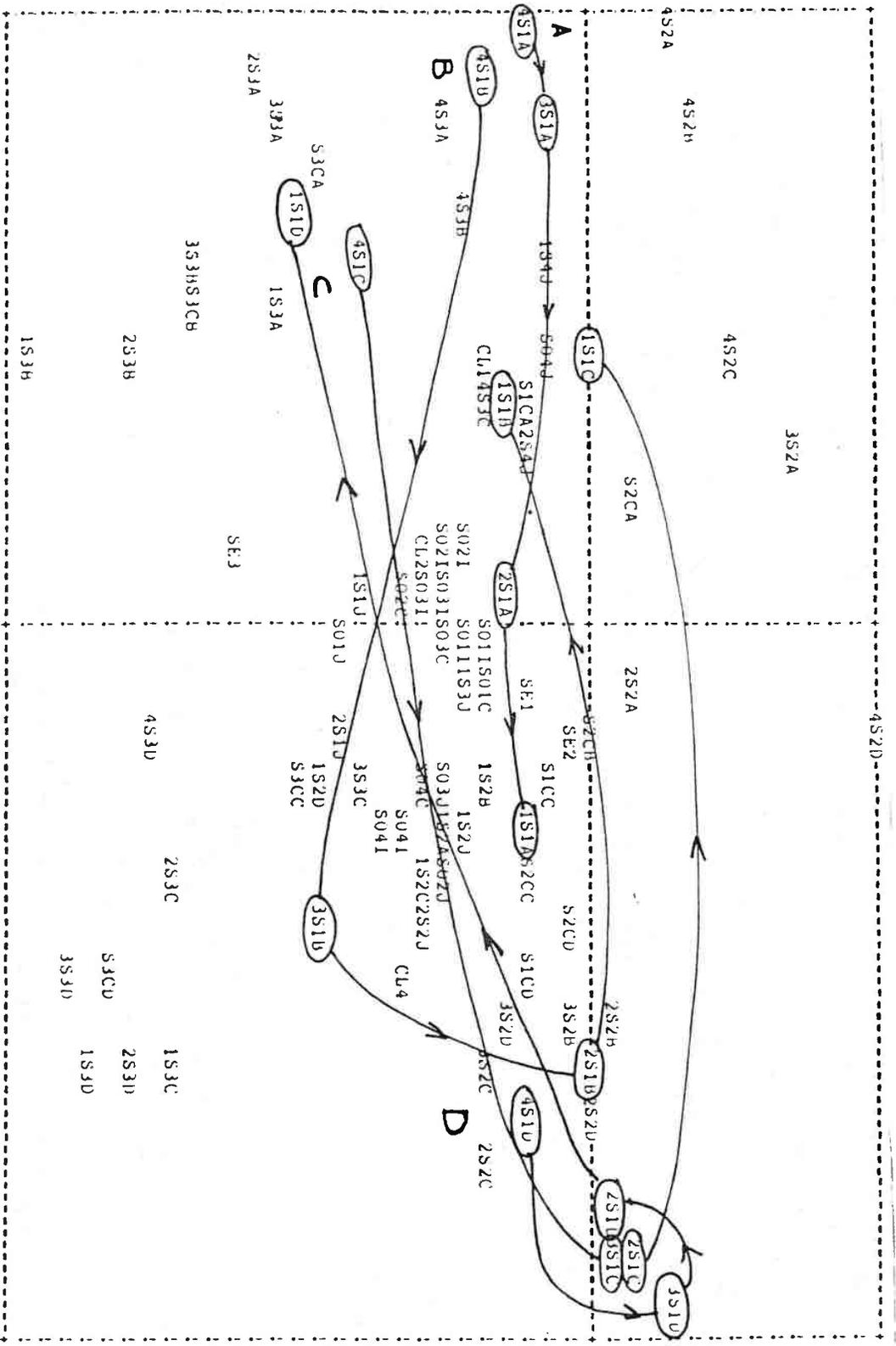
Dans la série1, où le phénomène est spectaculaire, le son1 et le son4 ont deux mouvements contraires qui provoquent une inversion brutale entre la classe C où les deux sons sont encore dans l'ordre initial (son4 plus fusionné que son1) et la classe D où le son4 est entendu



[acc. 4]

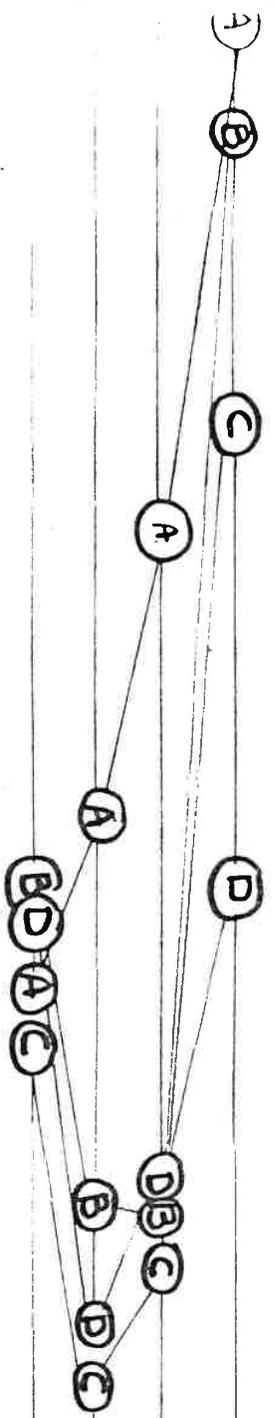


[acc. 5]



1^{ère} Série

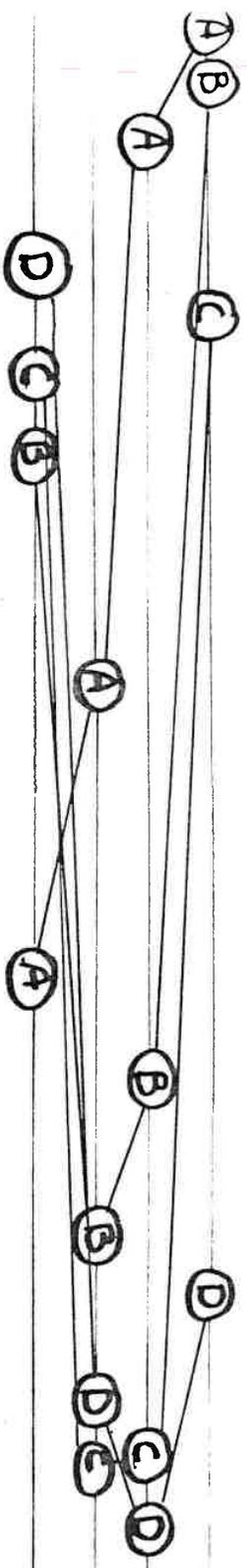
[acc. 8]



Serie 2

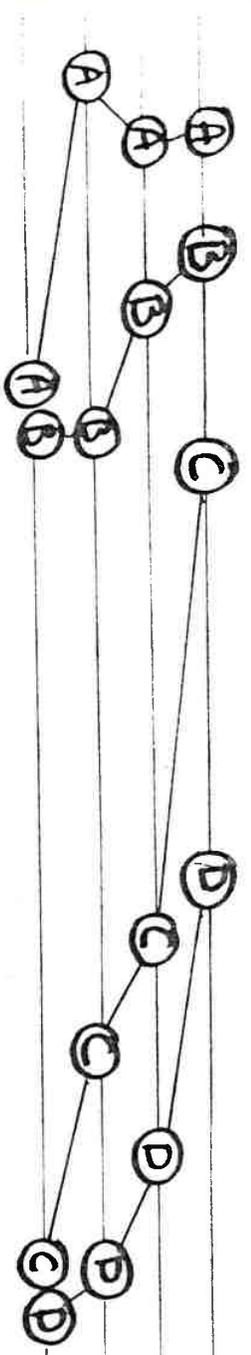
4
3
2
1

[ano. 11]



Serie 1

4
3
2
1



Serie 3

4
3
2
1

comme très peu fusionné contrairement au son1.

Dans la série 2 un mouvement dans le même sens se dessine mais bien moins drastique, notamment le son4 demeure plus fusionné, le son1 étant quasiment stable.

3.2.3 Tentative de synthèse. premières conclusions.

Les résultats sur les hauteurs convergent tous vers un schéma unidirectionnel où les sujets forment des jugements très cohérents disposant les 4 sons sur une échelle allant du son4 au son1. Le jugement de hauteur est bien relié à la largeur spectrale des sons. D'autre part la qualité de continuité est indéniable, la distance entre les sons n'a rien à voir avec un effet de seuil coupant en deux familles les 4 sons, par exemple deux sons graves et deux sons aigus, mais il ne s'agit pas non plus d'une échelle de hauteur continue comme avec un générateur à fréquence variable: la constitution physique des stimuli où les partiels sont à hauteur fixe et dont seule l'amplitude varie ne peut que permettre un jeu de hauteurs discrètes comme réponses du système de détection de hauteur. Les réponses à la deuxième partie montre d'autre part que dans la plupart des stimuli plusieurs hauteurs sont présentes simultanément. De façon générale ces stimuli peuvent être vus comme un groupement d'objets sonores de diverses hauteurs. Le jugement s'est fait sur la modification de ce contenu entre les deux sons d'un couple. Bien sûr le contenu exact de ces stimuli n'est pas révélé directement par l'expérience. Cela ne pourrait d'ailleurs l'être que par une expérimentation très délicate à réaliser. Pour que les sujets décrivent directement les sons entendus nous ne voyons pas comment nous pouvons éviter d'utiliser un protocole où le sujet ajuste un son quelconque sur un des objets qu'il entend, moyen le plus direct ou encore qu'il le chante où le décrive d'une manière quelconque. Ce genre d'expérimentation introduit un biais important. Il oblige le sujet à une écoute analytique, prendre suffisamment conscience des divers objets qu'il entend pour accomplir la tâche demandée. L'écoute "analytique" n'est pas sûrement, à mon avis, la suppression des "couches synthétiques" du système auditif mais peut parfaitement être la mise en place de processus mentaux de haut niveau venant s'infiltrer dans et à travers ces couches. Ce qui ajoute un écran intelligent (c'est le pire) supplémentaire à percer pour démonter le mécanisme perceptif. La première partie du dispositif expérimental permet au sujet de garder une écoute globale, synthétique. La seconde partie oblige déjà le sujet à une écoute analytique mais encore peu. Il est à noter que cette partie a été ressentie comme beaucoup plus difficile et les réponses sont bien plus dispersées que celles concernant les jugements de hauteur.

Evidemment ce dispositif accroît par contre considérablement la tâche de l'expérimentateur qui doit remonter la filière qui a abouti au jugement global de hauteur pour atteindre des niveaux plus intimes, plus explicatifs de la perception. Nous avons choisi une méthode de modélisation pour résoudre cette tâche: supposons que le stimulus physique soit analysé de telle façon à un niveau du processus perceptif, imaginons que les sujets utilisent tel procédé pour formuler leurs jugements de hauteur sur les résultats de l'analyse et testons le pouvoir explicatif de ce modèle sur les résultats expérimentaux. Cette méthode court bien-sûr le risque d'aboutir à un modèle très explicatif et pourtant complètement différent de la réalité. Ce sera la tâche d'expériences supplémentaires de le supporter ou de l'invalidier.

Nous allons d'abord modéliser de manière générale le processus par lequel les sujets produisent les jugements de hauteur au cours de cette expérience. (figure [mod.1]). Nous avons divisé l'opération en deux sous-processus. Le processus 1 est celui qui aboutit à l'analyse du stimulus physique en terme d'objets sonores. Il sera activé deux fois pour chaque son du stimulus. Le deuxième processus, spécifique de cette expérience, cherche à former un jugement de hauteur sur la sortie des deux activations du processus 1. L'intervention du contexte peut être modélisée comme une modification du processus 1 au cours du temps suivant les sons présentés, comme si la nature du stimulus physique présenté introduisait un effet de bord sur le processus qui l'analyse.

Sur la figure [mod.2] nous avons tenté de représenter un peu plus finement le processus 1. On peut le décomposer en trois étapes. Une première étape consisterait à produire une analyse spectrale du stimulus physique donc une liste de fréquences et d'amplitudes, analyse dont les théories actuelles sur la résolution de l'oreille prédisent qu'elle est possible pour nos stimuli.

Dans une seconde étape 3 processus procédant plus ou moins parallèlement extraient de la sortie précédente des hauteurs, des timbres et des amplitudes qui fournissent la matière utilisée par la troisième étape pour produire des objets sonores, associations de hauteur, d'amplitude et de timbre.

Nous avons choisi une structure avec un certain parallélisme dans le but de marquer que l'association en objets sonores pouvait éventuellement être une tâche active n'allant pas de soi, bien que nous décrivions la perception d'un stimulus harmonique. C'est bien ce que montre notre expérience où la perception de nos stimuli n'aboutit pas à la perception d'un seul objet. L'attribution d'un timbre et d'une amplitude à chaque objet n'est alors plus du tout évidente et c'est une perspective intéressante qui s'ouvre là.

L'enchaînement des processus est sûrement beaucoup plus complexe que ne le montre notre modèle. Notamment on peut imaginer que l'analyse n'est pas un processus de transformation de l'information remontant uniquement depuis le niveau périphérique jusqu'aux niveaux centraux, des "feedbacks" sont probables. D'autre part les processus qui produisent la transformation de l'information ne peuvent être vu sans simplification comme des boîtes noires retrouvant leur état initial après l'analyse, on doit imaginer des effets de bord sur ceux-ci, bon moyens d'expliquer les effets contextuels, d'apprentissage en général. Nous n'affirmons pas non plus que les objets sonores existent réellement avant l'intervention du second processus. Au minimum ils sont potentiellement présents et peuvent se révéler à travers un processus introspectif.

Le processus 1 s'il n'est pas trop détourné de sa position de repos par des effets contextuels produit pour le son₄ un objet sonore prégnant au timbre riche et à la hauteur du fondamental. Comme le montre les résultats sur les accords, il est dans beaucoup de cas le seul perçu. Réciproquement le son₁ produira un objet sonore dominant au timbre pauvre et à la hauteur de l'harmonique favorisé. Nous appellerons F (comme fondamental) le premier objet sonore et S (comme sommet) le second. Notre modèle va reposer sur l'idée que les résultats s'expliquent bien par un schéma bipolaire, réduisant la perception de nos stimuli à une combinaison de F et de S à diverses intensités. Ma propre écoute confirme la prégnance de ces deux pôles bien que parfois le son éclate en plus de deux unités. A partir de ce modèle on peut

Processus 1

Processus 2

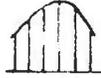
premier Stimulus physique



Objet sonore 1
.....
Objet sonore N

Processus 1 modifié

second Stimulus physique



Objet sonore 1
.....
Objet sonore N

JUGEMENT DE



HAUTEUR

Stimulus physique

analyse spectrale



extracteur de hauteur

hauteur 1
.....
hauteur Nh

extracteur de timbre

timbre 1
.....
timbre Nt

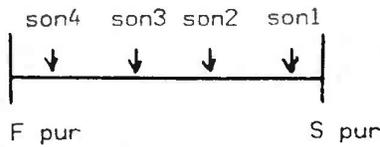
extracteur d'amplitude

amplitude 1
.....
amplitude Na

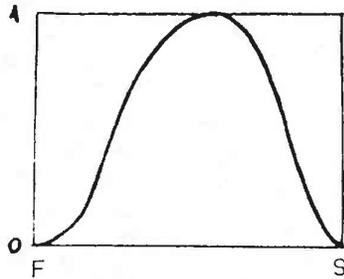
Constitution

d' OBJETS

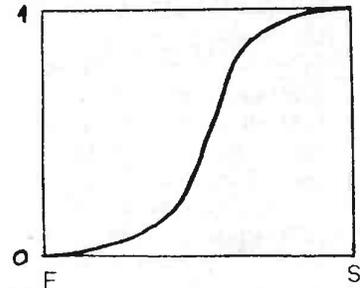
SONORES



[Mod. 3]



[Mod. 4]



[Mod. 5]

représenter la sortie du processus 1 comme une combinaison de F et S avec deux intensités dépendant du stimulus. Si son4 contient presque exclusivement F et son1 S, son2 et son3 sont deux étapes intermédiaires où la force de chaque pôle est plus équilibrée (figure [mod.3]). Le jugement de hauteur se traduit alors par la perception du changement d'intensité de chaque pôle. Si le pôle F est renforcé dans le deuxième son l'intervalle est jugé descendant, montant dans le cas contraire. Ce modèle rend compte du lien entre jugement de hauteur et largeur de l'enveloppe. Il rend compte également du jugement de fusion: l'impression de scission sera grande entre les deux pôles, faibles dessus. La figure [mod.4] montre comment pourrait se présenter une courbe de fusion en fonction de l'intensité respective de F et S.

La position du sommet de l'enveloppe spectrale facilite la scission (cf [acco.4]), autrement dit renforce l'objet S pour une même largeur avec la classe. Dans ce sens pour une enveloppe donnée un mouvement de classe revient à provoquer un déplacement du son sur la droite de l'axe F S, donc est susceptible de modifier la distance entre les sons, ce que l'on observe ([mid.5]).

De la combinaison des deux informations sur la fusion et la hauteur on peut donc à l'inverse positionner les divers sons sur l'axe FS et esquisser leur évolution avec la classe. Toutefois pour cela il faudrait pouvoir traduire les jugements d'intervalle (mid) par une certaine distance sur l'axe FS dont on peut douter qu'elle soit constante. En effet on peut imaginer que la même distance sur l'axe FS provoquera un plus fort intervalle si les deux sons se retrouvent dans des zones de dominances différentes donc dans la partie médiane qu'aux extrémités où le même pôle domine dans les deux sons, où on juge donc juste le renforcement du pôle dominé. On peut représenter ceci avec la courbe [mod.5].

Nous avons vu que la sensibilité contextuelle (dissymétrie des réponses avec l'ordre de présentation des sons) était très variable, avec les couples concernés mais aussi avec leur classe et leur série. Ainsi le couple 13 de la première série [mid.5] est très sensible au contexte pour les classes C et D, beaucoup moins pour les autres. D'autre part l'analyse de ce phénomène a clairement montré que c'était un phénomène d'attirance vers un pôle du second son sous l'influence du précédent. Existe-t-il des zones sur FS où les sons présentent une grande sensibilité contextuelle. Dans ce cas le son 3 se trouverait sur une telle zone en C et D, en l'occurrence zone d'attirance vers S. Pour que cette attirance soit possible il faut que le pôle concerné soit au moins en germe dans le son concerné hors de tout contexte, ce qui exclut la zone de dominance de l'autre pôle, mais il faut également que le pôle influent ne soit pas trop prégnant, ce qui exclut sa zone de franche dominance. On peut prédire la présence des zones d'influence contextuelle dans des zones intermédiaires. D'autre part le partenaire qui exercera l'influence ne doit pas être subjectivement trop éloigné, ces effets se produiront d'abord entre voisins. Pour mieux apprécier cela nous pouvons regarder la figure [mid.6]. Le son 3 est impliqué dans les intervalles 43, 23 et 13 qui présentent tous une dissymétrie notable. Celle-ci n'est toutefois pas constante avec la classe: forte en A pour 43 et 23, encore sensible pour 32 en B, elle devient très forte pour 13 en C et D. En A 3 est attiré par F au point d'annihiler sa composante S, 2 est attirée par 3 vers F (d'ailleurs par 4 également). De A à D 3 se déplace vers S (voir aussi [acco.12], 1er série) et voit donc sa composante S renforcée. Il n'est plus attiré par

4 bien qu'il semble encore attirer 2 en B, en C et D il est attiré par 1 vers S. 1 semble exercer la même influence sur 2 mais plus faible toutefois.

3.3 CONCLUSIONS:

Les jugements de hauteur émis au cours de cette expérience ne sont pas assimilables à un jugement de hauteur spectrale, incompatible avec les jugements émis sur la fusion. La corrélation observée entre ces deux jugements montre que le jugement de hauteur se fait sur la base des diverses hauteurs entendues dans les stimuli. Il s'agit bien d'un phénomène de fusion/scission. Le jugement semble bien se faire en fonction des variations d'amplitude des divers objets tonaux perçus. Un modèle simple ramenant le phénomène à la perception de deux objets tonaux, l'un à la hauteur du fondamental, l'autre à la hauteur du sommet, ayant des amplitudes respectives liées à l'enveloppe fonctionne correctement pour décrire les résultats, notamment les effets contextuels.

Les théories sur la hauteur doivent prendre en compte ce phénomène, puisqu'il intervient clairement sur les hauteurs perçues. Celles-ci ne peuvent être tenues comme dépendantes de tout le stimulus présenté mais peuvent provenir d'une partie seulement isolée par le système de reconnaissance d'objets tonaux. La théorie du processeur optimal qui se fonde sur des expériences relatant la perception de hauteurs multiples est interpellée par le phénomène de fusion. Il est vrai que cette théorie ne parle pas vraiment de hauteurs simultanément perçues et ne tient pas compte de l'amplitude des partiels. Il en est de même pour la théorie de Terhardt qui toutefois semble mieux se prêter à une adaptation. Si dans son état actuel (Terhardt, 1974) elle ne rend pas compte du phénomène observé, elle contient en germe l'idée de fusion puisque le résultat d'une analyse fournit plusieurs hauteurs dont l'auteur admet qu'elles puissent être entendues simultanément. Actuellement l'amplitude des divers objets tonaux fournit par cette théorie n'est pas réaliste (il seul partiel fournit huit hauteurs d'égale intensité) et de plus elle est indépendante de l'amplitude des partiels. Toutefois le modèle peut facilement être adapté pour lever cette dernière objection, en ayant par exemple une contribution à l'extraction de hauteur virtuelle des sous-harmonique d'un indice spectral dépendant de l'amplitude de celui-ci.

L'effet de continuité observé est aussi interpellant. Il suggère que le mode synthétique d'écoute n'est pas seulement l'apprentissage d'un modèle sur un long terme puis son utilisation (modèle de Terhardt) mais un mode actif où l'extraction d'un objet tonal ressemble plus à une démarche descendante (hypothèse-test) qu'à une démarche ascendante. Dans cet esprit l'effet de continuité se traduit par la tentative conservatrice du système auditif de retrouver dans le stimulus présent ce qu'il vient d'analyser dans le stimulus précédent.

-Quelques perspectives-

Ce type de stimuli peut-être à la base d'expérimentations cherchant à mieux comprendre le phénomène de fusion dans son intimité. Notamment il serait intéressant de pouvoir connaître exactement quels sont les objets tonaux perçus, avec leur hauteur, leur amplitude et leur timbre. Cela permettrait de comprendre comment le système auditif distribue les caractéristiques originales "objectives" du stimulus, amplitudes et fréquences de chaque partiel réellement présent. Cela peut

éventuellement permettre de percevoir le degré de parallélisme entre les divers "extracteurs" (timbre, hauteur, objets ...) - parallélisme compris non pas comme fonctionnement simultané, ce qui est évidemment le cas, mais comme la mesure dans laquelle les processus extracteurs tiennent compte du travail de leur congénères - Par exemple, l'extracteur du timbre reçoit-il uniquement le résultat final de l'extracteur d'objets tonaux où les deux processus procèdent-ils de manière beaucoup plus imbriqués?

Les effets contextuels rapportés se ramènent à un problème plus général. Quel est l'influence des informations extérieures (stimulus) sur les processus mentaux eux-mêmes (leurs méthodes)? Quels effets de bord produisent-ils à court terme comme dans notre cas ou à plus long terme: apprentissage en général. Ces effets sont extrêmement importants et ils peuvent entrer au cœur d'une expérimentation. Par exemple si pour connaître les diverses hauteurs perçues dans un stimulus comme les nôtres, l'expérimentateur propose la comparaison avec un étalon quelconque, il lui sera préférable de bien maîtriser les effets introduits par l'instrument de mesure sur la chose mesurée.

3.1 BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE TROIS:

Charbonneau G. Realisation d'un systeme integre d'analyse et de synthese de sons par ordinateur. Application de ce systeme a l'etude de l'attribut de hauteur sonore et de sa perception. These de doctorat es sciences physiques. Orsay 1976.

Risset J.C. Sur certains aspects fonctionnels de l'audition. Annales des Telecommunications. 1968 tome 23 No 3-4:91-120.

UTILISATION DU SOUS-PROGRAMME DE CONVERSION DE J.C. RISSET.

Il y a 3 appels de routines de conversion (CONVi) possibles dans Music5 . L'appel à l'une ou l'autre est décidé par la valeur du 3eme élément du tableau I, s'il est compris entre 1 et 3 ,avec la correspondance naturelle

$I(3) \leftarrow i \sim \text{CALL CONV}i$

La valeur de ce paramètre est modifiée par l'instruction SIA. Ainsi l'instruction SIA 0 3 1 appelle la routine CONV1 qui est dans la version actuelle celle écrite par J.C. Risset.

Comme c'est l'esprit des routines de conversion , ce sous-programme est destiné à convertir les valeurs numériques données dans le champs des instructions NOT de la représentation la plus adéquate à l'utilisateur à la représentation interne exigée par l'instrument Music5 concerné. Ainsi on peut convertir des valeurs de fréquences(Hz), de durées(secondes) , d'enveloppe en incrément pour les OSCs .Les informations qu'utilise CONV1 pour mener à bien cette conversion doivent être contenus dans le tableau I , donc introduites par des instructions SIA. La syntaxe obéit à une distribution des données sur ce tableau suivant ces règles. Un certain nombre d'éléments sont réservés pour chaque instrument(Nic:nombre d'instructions de conversions).

Ce nombre est placé dans I (10*No de l'instrument). Ainsi l'instruction SIA 0 20 5 indiquera que l'on desire faire 5 operations de conversions sur les parametres des notes activant l'instrument 2.

Ces opérations sont codées sous forme numérique et devront être placées à la suite de Nic. La conséquence du système est que si on dépasse 9 opérations de conversions pour un instrument donné on déborde sur la zone réservée à l'instrument suivant.Cela est possible à condition de ne pas utiliser cet instrument.

Les codages numériques des instructions de conversions obéissent à la syntaxe générale $\text{code_conversion} * 100 + \text{No}$ du parametre sur lequel s'opère l'opération de conversion.

ex: 103 opération de conversion de type 1 sur le 3ème parametre(3ème champs de la carte NOT considérée.

Suivent la liste des codes disponibles et leur signification

le mot **incrément** signifie l'entrée de fréquence des oscillateurs music5 qui est exprimée en terme d'incrément dans la table qui contient la forme d'onde.

0 conversion fréquence(Hz)→incrément

1 conversion amplitude(dB)→incrément

2 conversion temps(s)→incrément

3 conversion enveloppe (pour le generateur ENV)

calculé à partir de deux paramètres donnant en secondes la durée de l'attaque et de l'extinction les trois paramètres nécessaires à ENV

ex: (307)

les paramètres p7 p8 p9 sont calculés à partir de p7 et p9.

- 4 conversion duree de la note (p4) → incrément
- 5 conversion frequence centrale,1/2 largeurde bande(en Hz) pour le générateur FIT; les deux paramètres doivent occuper deux champs conjoints.

suivent diverses opérations arithmétiques qui utilisent aussi les variables de Pass2 assignées par l'instruction SV2 et comportent un code et des arguments donc peuvent porter sur plusieurs variables de I. Les arguments désignent les opérands de l'opération. Si l'argument est positif, il désigne l'un des champs de la carte Not (Pi) sinon une des variables Vi

- 6 multiplication
ex: dans I (605 8 -4) entraine l'exécution de l'opération $P5+P8*V4$
- 7 additions
ex: dans I (705 8 -4) entraine l'exécution de l'opération $P5+P8+V4$
- 8 assignation pfields←(pfields ou variable)
ex: dans I (805 -8) entraine l'exécution de l'opération $P5+V8$
- 9 transfert variable←pfields
ex: dans I (905 -87) entraine l'exécution de l'opération $V87+P5$
attention le deuxième item (-87 dans l'exemple) doit toujours être négatif.
- 10 soustraction
ex: dans I (1005 8 7) entraine l'exécution de l'opération $P5+P8+P7$
- 11 division
ex: dans I (1005 8 7) entraine l'exécution de l'opération $P5+P8/P7$

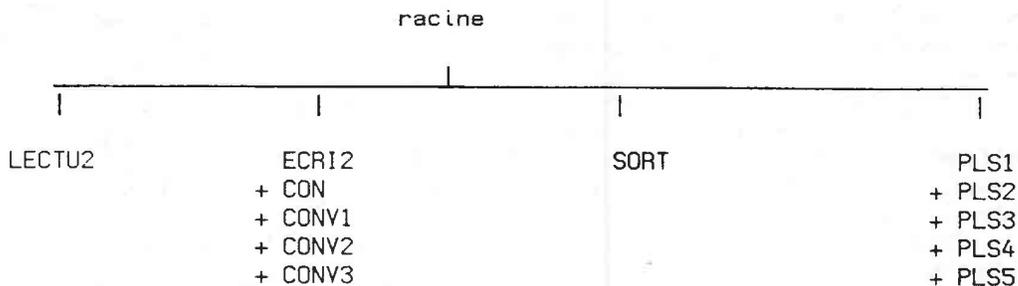
GENERATION DE MUSIC5.

La version actuelle de Music5 est actuellement chargée avec la routine de conversion écrite par JC Risset donc nous décrivons l'utilisation en annexe, les autres routines (CONV2 et CONV3, PLFi,PLSi ,TEMPO et RANDOM) ne comportent qu'un message signalant leur appel.On peut désirer remplacer ces sous-programmes par sa propre version ,il faut pour cela générer une nouvelle version de music5 en compilant le source des nouveaux sous-programmes et en le liant aux modules restants.

De même on peut insérer de nouveaux générateurs qui prendront place dans FORSAM (Voir quelques idées dans [ref] ainsi que de nouveaux gérateurs de fonctions. Ces gérateurs de fonction sont des sousprogrammes et par le biais de la compilation séparée on peut facilement les insérer. Sept appels sont effectués dans Music5 GEN1 ,GEN2 ... GEN7. Dans la version actuelle quatre sont utilisés GEN1,GEN2 et GEN3 sont identiques aux générateurs du même nom décrits dans Mathews[1].GEN7 est identique à GEN1 dans la syntaxe de ses paramètres mais au lieu de décrire des tronçons de droites ceux-ci décrivent des tronçons d'exponentielles.

Modifier PASS1 ne présente pas de difficulté du fait de son encombrement réduit.Il suffit de recompiler le source avec les nouvelles sous-routines (PLFs)

PASS2 doit être liée en utilisant une structure d'overlay car son encombrement est trop important. Voici l'arbre que j'ai utilisé

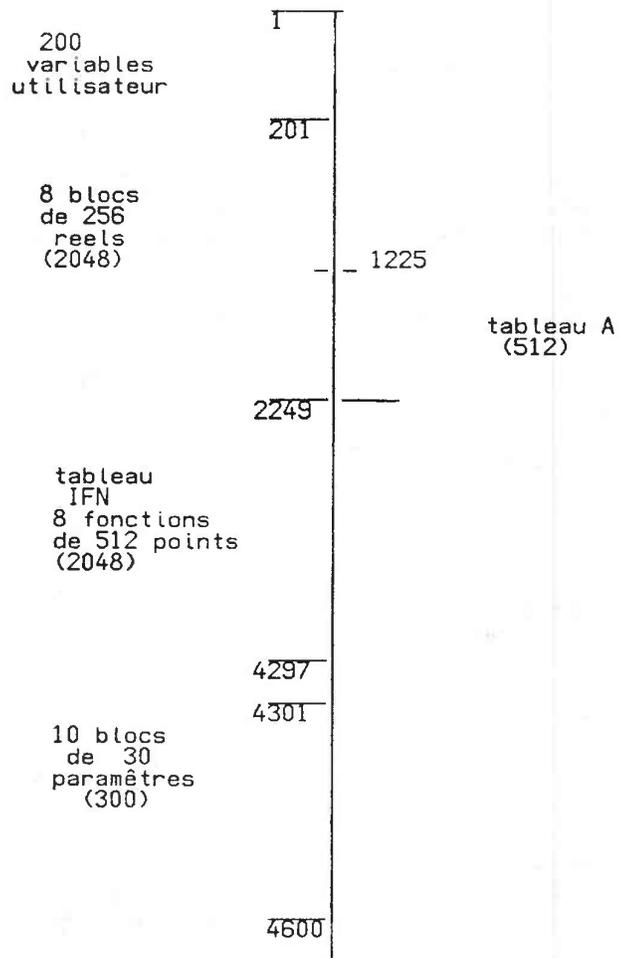


Mise à part la deuxième branche , les appels sont au même niveau, l'arbre peut donc être largement modifié. Comme les appels aux CONVi sont dans ecri2, ceux-ci doivent figurer dans cette branche, mais peuvent bien sur être étalés en plusieurs nouvelles branches si ils sont trop importants.

Pour PASS3 les difficultés liés à sa taille sont plus grandes encore. Un surcroit d'instruction peut facilement provoquer un débordement de la place mémoire disponible. Le seul moyen disponible est alors de raccourcir la pile I (voir figure). Voici quelques indications pour mener à bien cette opération.

La pile est gérée à l'aide de pointeurs qui sont dans le tableau IP. IP(5) pointe sur la fin de la zone réservée aux paramètres des notes.

IP(7) pointe sur le début de cette zone.



Organisation de la pile I (4600 flottants)

UTILISATION DE LA VERSION MUSIC5 POUR MITRA 125.

(tous les fichiers indiqués se trouvent sur le disque music5)

1. Sous MTRD positionner le background à l'adresse 6F98
2. Assigner sous BATCH ou à la télétype (pour les as du clavier) les divers fichiers utilisés aux étiquettes logiques requises par le programme. Les fichiers sont de type séquentiel le 1er et le 2eme sont des fichiers de travail passant des données entre les passes du programme. Ils sont courts (cela dépend de l'importance de la partition. 100 secteurs paraissent amplement suffisants. Le troisième contient les échantillons du signal et doit être calculé en fonction de la durée T (s) du signal produit et de la fréquence d'échantillonnage F (Hz): taille en secteurs $T * F / 128$

Par ex: à un taux d'échantillonnage de 20000 Hz ,10000 secteurs représentent 64 secondes de sons.

3. lancer l'exécution des trois passes de MUSIC5

%C/PASS1/ (les cartes de données sont lues)

%C/PASS2/

%C/PASS3/ (synthèse du signal)

4. Ecouter le signal.

Le plus simple utiliser le programme EC
%C/EC/ (EC réclame une carte de donnée contenant en format 15 (FORTRAN) la taille en secteur du fichier à lire . Cette taille est donnée par PASS3 sur l'imprimante.

Dans ce cas l'unité logique 4 devra être préalablement assignée au fichier de son, et le convertisseur positionné à la bonne fréquence d'échantillonnage et sur 12 bits.

Autre solution: l'Observateur.



Exemple d'utilisation

à la télétype

%F0/@800
%C/BATCH/

sur le lecteur de carte

%C/UGF15E/MO/L:MUSIC5
%DF/N:MUSIC1,L:100,K:91,R:256,T:DC,BN
%DF/N:MUSIC2,L:100,K:91,R:256,T:DC,BN
%DF/N:MUSIC,L:20000,K:91,R:256,T:DC,BC
%AS/U:1,N:MUSIC1,T:DC,K:91,RW,BN
%AS/U:2,N:MUSIC2,T:DC,K:91,RW,BN
%AS/U:3,N:MUSIC,T:DC,K:91,RW,BN
%AS/U:4,N:MUSIC1,T:DC,K:91,RW,BN,X

%AB
%C/PASS1/

les cartes de données pour MUSIC5

%C/PASS2/
%C/PASS3/
%C/EC/

14567 <TAILLE REELLE DU SIGNAL
14567 <ENCORE UNE FOIS
0 <FINI

SPECTRES UTILISES DANS L'EXPERIENCE:

Amplitude des huit partiels pour chaque classe et chaque son
(respectivement chaque sommet et chaque largeur de l'enveloppe).

classe A

SON1 : 2 108 1825 108 2 0 0 0
SON2 : 19 327 1353 327 19 2 0 0
SON3 : 65 448 1011 448 65 8 2 0
SON4 : 249 429 520 429 249 111 43 16

classe B

SON1 : 0 2 109 1826 109 2 0 0
SON2 : 2 19 327 1352 327 19 2 0
SON3 : 8 65 446 1006 446 65 8 1
SON4 : 107 238 409 495 409 238 107 42

classe C

SON1 : 0 0 2 108 1825 108 2 0
SON2 : 0 1 19 327 1351 327 19 1
SON3 : 1 8 65 446 1006 446 65 8
SON4 : 42 107 238 409 495 409 238 107

classe D

SON1 : 0 0 0 0 2 109 1827 109
SON2 : 0 0 0 1 19 330 1366 330
SON3 : 0 0 1 8 66 461 1046 461
SON4 : 7 17 47 123 280 488 595 488

ORDRE DE PRESENTATION DES STIMULIS:

< SERIE1 CLASSE1>

10	(1,2)	1	(3,2)
6	(1,3)	2	(3,1)
7	(1,4)	3	(4,3)
5	(2,1)	4	(4,2)
9	(2,3)	5	(2,1)
11	(2,4)	6	(1,3)
2	(3,1)	7	(1,4)
1	(3,2)	8	(3,4)
8	(3,4)	9	(2,3)
12	(4,1)	10	(1,2)
4	(4,2)	11	(2,4)
3	(4,3)	12	(4,1)

< SERIE1 CLASSE2>

1	(1,2)	1	(1,2)
8	(1,3)	2	(3,4)
9	(1,4)	3	(4,2)
11	(2,1)	4	(2,3)
4	(2,3)	5	(2,4)
5	(2,4)	6	(4,3)
12	(3,1)	7	(3,2)
7	(3,2)	8	(1,3)
2	(3,4)	9	(1,4)
10	(4,1)	10	(4,1)
3	(4,2)	11	(2,1)
6	(4,3)	12	(3,1)

< SERIE1 CLASSE3>

10	(1,2)	1	(1,3)
1	(1,3)	2	(2,3)
4	(1,4)	3	(3,2)
8	(2,1)	4	(1,4)
2	(2,3)	5	(3,4)
12	(2,4)	6	(4,2)
11	(3,1)	7	(4,3)
3	(3,2)	8	(2,1)
5	(3,4)	9	(4,1)
9	(4,1)	10	(1,2)
6	(4,2)	11	(3,1)
7	(4,3)	12	(2,4)

< SERIE1 CLASSE4>

7	(1,2)	1	(2,3)
12	(1,3)	2	(1,4)
2	(1,4)	3	(4,2)
4	(2,1)	4	(2,1)
1	(2,3)	5	(2,4)
5	(2,4)	6	(4,1)
10	(3,1)	7	(1,2)
8	(3,2)	8	(3,2)
9	(3,4)	9	(3,4)
6	(4,1)	10	(3,1)
3	(4,2)	11	(4,3)
11	(4,3)	12	(1,3)

< SERIE2 CLASSE1 >

1	(1,2)	1	(1,2)
8	(1,3)	2	(3,4)
9	(1,4)	3	(4,2)
11	(2,1)	4	(2,3)
4	(2,3)	5	(2,4)
5	(2,4)	6	(4,3)
12	(3,1)	7	(3,2)
7	(3,2)	8	(1,3)
2	(3,4)	9	(1,4)
10	(4,1)	10	(4,1)
3	(4,2)	11	(2,1)
6	(4,3)	12	(3,1)

< SERIE2 CLASSE2 >

10	(1,2)	1	(1,3)
1	(1,3)	2	(2,3)
4	(1,4)	3	(3,2)
8	(2,1)	4	(1,4)
2	(2,3)	5	(3,4)
12	(2,4)	6	(4,2)
11	(3,1)	7	(4,3)
3	(3,2)	8	(2,1)
5	(3,4)	9	(4,1)
9	(4,1)	10	(1,2)
6	(4,2)	11	(3,1)
7	(4,3)	12	(2,4)

< SERIE2 CLASSE3 >

7	(1,2)	1	(2,3)
12	(1,3)	2	(1,4)
2	(1,4)	3	(4,2)
4	(2,1)	4	(2,1)
1	(2,3)	5	(2,4)
5	(2,4)	6	(4,1)
10	(3,1)	7	(1,2)
8	(3,2)	8	(3,2)
9	(3,4)	9	(3,4)
6	(4,1)	10	(3,1)
3	(4,2)	11	(4,3)
11	(4,3)	12	(1,3)

< SERIE2 CLASSE4 >

10	(1,2)	1	(3,2)
6	(1,3)	2	(3,1)
7	(1,4)	3	(4,3)
5	(2,1)	4	(4,2)
9	(2,3)	5	(2,1)
11	(2,4)	6	(1,3)
2	(3,1)	7	(1,4)
1	(3,2)	8	(3,4)
8	(3,4)	9	(2,3)
12	(4,1)	10	(1,2)
4	(4,2)	11	(2,4)
3	(4,3)	12	(4,1)

< SERIE3 CLASSE1>

10	(1,2)	1	(1,3)
1	(1,3)	2	(2,3)
4	(1,4)	3	(3,2)
8	(2,1)	4	(1,4)
2	(2,3)	5	(3,4)
12	(2,4)	6	(4,2)
11	(3,1)	7	(4,3)
3	(3,2)	8	(2,1)
5	(3,4)	9	(4,1)
9	(4,1)	10	(1,2)
6	(4,2)	11	(3,1)
7	(4,3)	12	(2,4)

< SERIE3 CLASSE2>

7	(1,2)	1	(2,3)
12	(1,3)	2	(1,4)
2	(1,4)	3	(4,2)
4	(2,1)	4	(2,1)
1	(2,3)	5	(2,4)
5	(2,4)	6	(4,1)
10	(3,1)	7	(1,2)
8	(3,2)	8	(3,2)
9	(3,4)	9	(3,4)
6	(4,1)	10	(3,1)
3	(4,2)	11	(4,3)
11	(4,3)	12	(1,3)

< SERIE3 CLASSE3>

10	(1,2)	1	(3,2)
6	(1,3)	2	(3,1)
7	(1,4)	3	(4,3)
5	(2,1)	4	(4,2)
9	(2,3)	5	(2,1)
11	(2,4)	6	(1,3)
2	(3,1)	7	(1,4)
1	(3,2)	8	(3,4)
8	(3,4)	9	(2,3)
12	(4,1)	10	(1,2)
4	(4,2)	11	(2,4)
3	(4,3)	12	(4,1)

< SERIE3 CLASSE4>

1	(1,2)	1	(1,2)
8	(1,3)	2	(3,4)
9	(1,4)	3	(4,2)
11	(2,1)	4	(2,3)
4	(2,3)	5	(2,4)
5	(2,4)	6	(4,3)
12	(3,1)	7	(3,2)
7	(3,2)	8	(1,3)
2	(3,4)	9	(1,4)
10	(4,1)	10	(4,1)
3	(4,2)	11	(2,1)
6	(4,3)	12	(3,1)

ANNEXE:PARTITIONS MUSIC5 UTILISEES DANS L'EXPERIENCE.:

exemple de la partition de la première classe de la première série

```
sia 0 4 20000;
sia 0 3 1;
sia 0 10 2 6 207;
lms 0 1;
set v3;
osc p5 p6 b2 f1 p30;
osc v1 p7 b3 f5 p29;
mlt b2 b3 b2;
out b2 b1;
end;
sv3 0 1 1;
gen 0 1 2 0 0 .05 1 .1 2 .9 18 .95 19 1 20 1 486 .9 488 .1 504 .05
506 0 507 0 511;
gen 0 2 1 2 108 1825 108 2 0 0 0 8;
gen 0 2 3 19 327 1353 327 19 2 0 0 8;
gen 0 2 4 65 448 1011 448 65 8 2 0 8;
gen 0 2 5 249 429 520 429 249 111 43 16 8;
sv3 0 3 4;
sv3 0 3 3;
sv3 10 3 4;
sv3 11 3 1;
sv3 20 3 5;
sv3 21 3 4;
sv3 30 3 5;
sv3 31 3 3;
sv3 40 3 3;
sv3 41 3 1;
sv3 50 3 1;
sv3 51 3 4;
sv3 60 3 1;
sv3 61 3 5;
sv3 70 3 4;
sv3 71 3 5;
sv3 80 3 3;
sv3 81 3 4;
sv3 90 3 1;
sv3 91 3 3;
sv3 100 3 3;
sv3 101 3 5;
sv3 110 3 5;
sv3 111 3 1;
not 0 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 1 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 10 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 11 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 20 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 21 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 30 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 31 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 40 1 0.5 2000 82.406 0.5;
```

not 41 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 50 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 51 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 60 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 61 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 70 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 71 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 80 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 81 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 90 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 91 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 100 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 101 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 110 1 0.5 2000 82.406 0.5;
not 111 1 0.5 2000 82.406 0.5;
ter 112;

Résultats bruts

	S01 1	S01 2	S01 3	S01 4
CLASSE 1 SERIE 1	1: 2:2 1:1 3:5 1:1 0:0 1	2: 1:1 2:2 3:3 2:2 4:4 2	3: 1:1 3:3 2:2 3:3 0:0 3	4: 1:1 3:4 2:2 4:3 3:3 4
	14: 17:1 1: 0:1 1: 2	14: 17:1 1: 0:1 1: 2	25: 24:1 1: 0:1 0: 0	25: 25:1 1: 0:1 1: 12
	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0	0: 0: 0: 2: 4: 0: 3	0: 0: 0: 5: 0: 1: 4
	3: 2:1 0: 0: 0: 0: 0	2: 5:1 12: 2:2 0: 5	0: 0: 0: 2: 12: 7: 12	0: 0: 0: 5: 0: 1: 7
	3: 0:1 0: 0: 0: 0: 0	0: 0: 1: 4: 2: 0: 5	0: 0: 0: 0: 0: 6: 3	0: 0: 0: 0: 0: 3: 0
CLASSE 2 SERIE 1	17: 14:1 24: 25:1 25: 25	1: 1:1 4: 1: 24: 13	0: 0: 1: 0: 1: 12: 1	0: 0: 1: 0: 1: 12: 1
	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0	7: 0:1 0: 0: 0: 0: 0	23: 22:1 6: 7: 0: 1	24: 25:1 25: 25:1 22: 17
	1: 0:1 0: 0: 0: 0: 0	10: 3:1 1: 0:1 0: 0	1: 0:1 3: 5: 0: 0	0: 0: 0: 0: 0: 1: 3
	13: 0:1 3: 1: 0: 1	0: 15:1 12: 16:1 0: 0	0: 1: 3: 16: 12: 5: 14	1: 0:1 0: 0: 1: 5
	5: 10:1 0: 1: 0: 0	0: 0: 1: 5: 3: 0: 0	0: 0: 0: 0: 1: 3: 1	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
CLASSE 3 SERIE 1	8: 7:1 22: 23:1 23: 24	0: 0: 7: 6: 25: 25	0: 0: 0: 0: 0: 17: 22	0: 0: 0: 0: 0: 1: 0
	0: 0: 1: 1: 1: 0: 0	0: 5:1 0: 0: 0: 0: 0	14: 8:1 5: 0:1 0: 0	25: 25:1 25: 25:1 19: 22
	0: 0: 0: 1: 0: 0: 0	7: 7:1 1: 3:1 0: 0	0: 0: 0: 2: 1: 0: 0	0: 0: 0: 0: 0: 4: 1
	13: 12:1 1: 1: 0: 1	12: 15:1 19: 15:1 0: 0	1: 1:1 15: 19: 2: 2	0: 0: 0: 0: 0: 2: 2
	7: 7:1 0: 0: 0: 0: 0	0: 0: 1: 1: 2: 0: 0	0: 0: 1: 3: 1: 1: 0	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
CLASSE 4 SERIE 1	5: 0:1 3: 10:1 25: 25	0: 0: 1: 4: 5: 25	1: 1:1 0: 0: 0: 22: 10	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
	1: 0:1 5: 0:1 0: 0: 0	0: 0: 0: 0: 1: 0: 1	18: 5:1 4: 1: 0: 0	25: 22:1 24: 23:1 22: 22
	3: 2:1 0: 2:1 0: 0: 0	0: 0: 0: 0: 1: 0: 0	2: 10:1 0: 1: 0: 1	0: 0: 2:1 0: 1: 1: 2
	17: 15:1 0: 3:1 1: 0	19: 17:1 23: 19: 1: 0	3: 0:1 19: 23: 1: 1	0: 0: 1:1 0: 1: 1: 1
	0: 0: 1: 10:1 2: 0: 0	2: 5: 1: 1: 0: 1: 0	2: 0:1 1: 0: 1: 1	0: 0: 0: 0: 0: 1: 0
CLASSE 1 SERIE 2	0: 0: 1: 2:1 1: 1: 1	17: 11:1 1: 1: 2: 2	22: 24:1 7: 0:1 3: 1	23: 23:1 22: 21:1 2: 15
	1: 0:1 5: 0:1 0: 0: 0	0: 0: 1: 0: 1: 0: 0	1: 0:1 1: 4: 0: 0	0: 0: 0: 1: 0: 1: 4
	0: 0: 0: 0: 1: 1: 1	3: 0:1 18: 1:1 2: 0	0: 0: 0: 19: 16:1 3: 2	1: 1:1 0: 0: 2: 3
	0: 0: 0: 1: 0: 0: 0	1: 0:1 4: 1: 0: 1	0: 0: 0: 2: 0: 0: 1	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
	11: 17:1 24: 22:1 23: 23	0: 0: 1: 0: 7:1 2:1 22	2: 1:1 1: 1: 15: 2:1	1: 1:1 2: 2:1 1: 3
CLASSE 2 SERIE 2	0: 0: 1: 1: 1: 2	17: 13:1 1: 0: 1: 1	22: 19:1 13: 8: 1: 1	22: 23:1 24: 24:1 0: 0: 2
	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0	3: 2:1 0: 1: 0: 0	1: 3:1 6: 2: 0: 0	1: 0:1 0: 0: 1: 2
	13: 5:1 2: 1: 0: 0	5: 15:1 14: 5: 0: 0	1: 2:1 5: 14: 1: 0	0: 0: 0: 0: 0: 0: 1
	2: 3:1 3: 1: 0: 1	0: 0: 0: 1: 0: 0	0: 0: 0: 1: 0: 2: 0	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
	10: 17:1 19: 22:1 24: 22	0: 0: 0: 4: 13:1 24: 24	1: 1:1 0: 1: 1: 2: 24	2: 1:1 1: 1: 1: 1
CLASSE 3 SERIE 2	0: 0: 0: 0: 2: 1: 1	10: 6:1 1: 0: 1: 1	23: 23:1 4: 5: 2: 3	24: 24:1 22: 24:1 1: 23
	2: 0:1 0: 0: 0: 0: 0	6: 7:1 2: 3: 0: 0	0: 2:1 3: 3: 0: 0	0: 0: 0: 2: 0: 3: 0
	10: 9:1 0: 0: 0: 0: 0	9: 19:1 14: 1:1 0: 0	0: 0: 0: 1: 1: 14: 0: 1	0: 0: 0: 0: 0: 1: 0
	7: 0:1 2: 0: 0: 0: 0	0: 2:1 3: 1: 0: 2	0: 0: 0: 3: 2: 0: 3	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
	6: 10:1 23: 23:1 24: 24	0: 0: 0: 5: 8: 24: 22	2: 0:1 0: 1: 23: 18	1: 1:1 1: 1: 1: 3: 2
CLASSE 4 SERIE 2	1: 1:1 3: 3: 0: 0: 0	9: 5:1 1: 3: 0: 0	17: 16:1 0: 0: 0: 2	25: 25:1 20: 24:1 19: 24
	3: 0:1 1: 0: 0: 0: 0	3: 1:1 3: 1: 0: 0	3: 3:1 1: 3: 0: 1	0: 0: 0: 0: 1: 3: 0
	17: 12:1 2: 2: 0: 0: 0	12: 17:1 18: 20:1 0: 1	2: 2:1 20: 18: 1: 0	0: 0: 0: 1: 0: 0: 1
	1: 3:1 3: 3: 0: 0: 0	0: 0: 3: 3: 1: 1: 4	0: 0: 1: 1: 3: 0: 3	0: 0: 0: 0: 0: 1: 0
	3: 9:1 16: 17:1 25: 25	1: 1:1 0: 0: 0: 24: 20	3: 3:1 3: 1: 24: 19	0: 0: 0: 0: 0: 1: 2: 0
CLASSE 1 SERIE 3	2: 0:1 2: 2: 0: 1	11: 0:1 0: 2: 2: 2	21: 12:1 3: 1: 3: 1	23: 25:1 21: 22:1 16: 17
	2: 1:1 0: 0: 0: 0: 0	5: 5:1 1: 1: 0: 0	2: 7:1 2: 0: 0: 0	1: 0:1 2: 1: 5: 4
	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0	0: 0: 23: 17:1 0: 0	0: 0: 0: 17: 23: 1: 3	0: 0: 0: 0: 0: 1: 3: 1
	5: 5:1 7: 2: 0: 1	1: 2:1 0: 2: 1: 2	0: 0: 0: 1: 1: 4: 5	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
	0: 1:1 12: 2:1 25: 23	0: 2:1 1: 3:1 22: 2:1	2: 2:1 2: 0: 17: 16	1: 0:1 2: 2: 1: 3
CLASSE 2 SERIE 3	3: 0:1 1: 2: 1: 0	9: 10:1 1: 2: 1: 1	21: 20:1 7: 7: 2: 1	25: 23:1 23: 23:1 18: 20
	3: 0:1 1: 0: 0: 0: 0	7: 3:1 2: 0: 0: 0	2: 2:1 5: 3: 1: 1	0: 0: 0: 0: 1: 4: 2
	6: 9:1 1: 0: 1: 0	9: 6:1 12: 1:1 0: 1	0: 0: 1: 1: 12: 0: 1	0: 0: 1: 1: 0: 1: 0
	3: 7:1 2: 2: 0: 0	0: 3:1 3: 5: 1: 0	0: 0: 1: 0: 2: 2: 4	0: 0: 0: 0: 0: 1: 1
	10: 9:1 20: 2:1 23: 25	0: 0: 3:1 7: 1: 23: 23	2: 2:1 1: 2: 1: 20: 18	0: 0: 1: 1: 1: 1: 2
CLASSE 3 SERIE 3	0: 0: 1: 4: 3: 0: 2	5: 0:1 2: 4: 4: 4	18: 12:1 4: 2: 5: 3	22: 15:1 17: 20:1 15: 15
	3: 0:1 1: 1: 0: 0: 0	5: 1:1 3: 2: 0: 0	2: 0:1 0: 2: 0: 0	1: 2:1 0: 0: 1: 4: 2
	17: 15:1 4: 1: 2: 0	15: 17:1 16: 1:1 1: 0	1: 0:1 1: 16: 1: 3	0: 0: 2:1 0: 1: 3: 3
	1: 5:1 4: 1: 2: 1	0: 0: 3:1 2: 4: 7: 4	1: 1:1 2: 3: 2: 4	0: 0: 0: 0: 0: 0: 0
	4: 5:1 12: 18: 15: 22	0: 0: 0: 2: 4: 20: 17	3: 0:1 0: 2: 15: 15	2: 6:1 4: 4: 3: 5
CLASSE 4 SERIE 3	2: 1:1 0: 1: 9: 7	4: 1:1 0: 0: 12: 8	11: 9:1 0: 0: 9: 9	17: 16:1 16: 12:1 9: 12
	0: 1:1 1: 1: 0: 0: 0	6: 2:1 1: 0: 0: 1	2: 0:1 1: 1: 0: 2	1: 0:1 0: 0: 1: 3: 2
	20: 13:1 3: 7: 0: 0	13: 20:1 23: 24: 1: 0	7: 3:1 24: 23: 2: 2	0: 0: 0: 0: 1: 2: 2
	2: 6:1 4: 2: 0: 1	1: 0:1 1: 1: 0: 0	1: 0:1 0: 1: 2: 3	0: 0: 0: 1: 0: 1: 2: 0
	1: 0:1 9: 1: 16: 17	1: 2:1 0: 0: 12: 16	4: 0:1 0: 0: 12: 9	7: 9:1 8: 12:1 9: 9

SORTED TEST RESULTS FOR CLASSES 1-4 AT 7000S, INDIVIDUAL COUPLES

SERIE 1 CLASSE 1

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 7	(2,1)= 11	(2,1)= 10	(1,2)= 10	(3,1)= 3	(1,3)= 8	(4,1)= 2	(1,4)= 5
(1,3)= 12	(3,1)= 13	(2,3)= 5	(3,2)= 5	(3,2)= 5	(2,3)= 4	(4,2)= 5	(2,4)= 5
(1,4)= 7	(4,1)= 14	(2,4)= 3	(4,2)= 15	(3,4)= 4	(4,3)= 6	(4,3)= 5	(3,4)= 4
TC1= 26	TC2= 36	TC1= 24	TC2= 30	TC1= 12	TC2= 16	TC1= 12	TC2= 14
TOTAL = 64		TOTAL = 54		TOTAL = 30		TOTAL = 26	

SERIE 1 CLASSE 2

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 9	(2,1)= 5	(2,1)= 15	(1,2)= 16	(3,1)= 8	(1,3)= 12	(4,1)= 2	(1,4)= 6
(1,3)= 4	(3,1)= 9	(2,3)= 16	(3,2)= 11	(3,2)= 9	(2,3)= 11	(4,2)= 3	(2,4)= 5
(1,4)= 7	(4,1)= 9	(2,4)= 13	(4,2)= 15	(3,4)= 13	(4,3)= 15	(4,3)= 3	(3,4)= 4
TC1= 20	TC2= 23	TC1= 33	TC2= 42	TC1= 30	TC2= 37	TC1= 8	TC2= 15
TOTAL = 43		TOTAL = 30		TOTAL = 68		TOTAL = 23	

SERIE 1 CLASSE 3

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 3	(2,1)= 5	(2,1)= 12	(1,2)= 17	(3,1)= 16	(1,3)= 15	(4,1)= 6	(1,4)= 8
(1,3)= 11	(3,1)= 6	(2,3)= 14	(3,2)= 16	(3,2)= 16	(2,3)= 14	(4,2)= 4	(2,4)= 7
(1,4)= 6	(4,1)= 8	(2,4)= 13	(4,2)= 15	(3,4)= 15	(4,3)= 16	(4,3)= 4	(3,4)= 6
TC1= 20	TC2= 22	TC1= 39	TC2= 49	TC1= 47	TC2= 45	TC1= 14	TC2= 21
TOTAL = 42		TOTAL = 58		TOTAL = 92		TOTAL = 35	

SERIE 1 CLASSE 4

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 4	(2,1)= 7	(2,1)= 16	(1,2)= 11	(3,1)= 16	(1,3)= 15	(4,1)= 13	(1,4)= 15
(1,3)= 4	(3,1)= 4	(2,3)= 17	(3,2)= 15	(3,2)= 17	(2,3)= 17	(4,2)= 15	(2,4)= 16
(1,4)= 8	(4,1)= 7	(2,4)= 13	(4,2)= 15	(3,4)= 12	(4,3)= 16	(4,3)= 12	(3,4)= 15
TC1= 16	TC2= 18	TC1= 46	TC2= 41	TC1= 45	TC2= 48	TC1= 40	TC2= 46
TOTAL = 34		TOTAL = 87		TOTAL = 93		TOTAL = 86	

SERIE 2 CLASSE 1

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 10	(2,1)= 13	(2,1)= 8	(1,2)= 12	(3,1)= 5	(1,3)= 7	(4,1)= 4	(1,4)= 5
(1,3)= 12	(3,1)= 14	(2,3)= 8	(3,2)= 11	(3,2)= 7	(2,3)= 6	(4,2)= 2	(2,4)= 5
(1,4)= 12	(4,1)= 13	(2,4)= 4	(4,2)= 12	(3,4)= 8	(4,3)= 14	(4,3)= 2	(3,4)= 4
TC1= 34	TC2= 40	TC1= 20	TC2= 35	TC1= 20	TC2= 27	TC1= 8	TC2= 14
TOTAL = 74		TOTAL = 55		TOTAL = 47		TOTAL = 22	

SERIE 2 CLASSE 2

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 10	(2,1)= 13	(2,1)= 12	(1,2)= 16	(3,1)= 10	(1,3)= 14	(4,1)= 5	(1,4)= 4
(1,3)= 11	(3,1)= 15	(2,3)= 13	(3,2)= 14	(3,2)= 12	(2,3)= 12	(4,2)= 4	(2,4)= 4
(1,4)= 9	(4,1)= 12	(2,4)= 12	(4,2)= 15	(3,4)= 14	(4,3)= 17	(4,3)= 4	(3,4)= 6
TC1= 30	TC2= 40	TC1= 37	TC2= 45	TC1= 36	TC2= 43	TC1= 13	TC2= 15
TOTAL = 70		TOTAL = 82		TOTAL = 79		TOTAL = 28	

SERIE 2 CLASSE 3

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 11	(2,1)= 13	(2,1)= 13	(1,2)= 16	(3,1)= 11	(1,3)= 14	(4,1)= 3	(1,4)= 7
(1,3)= 10	(3,1)= 10	(2,3)= 17	(3,2)= 15	(3,2)= 12	(2,3)= 13	(4,2)= 6	(2,4)= 4
(1,4)= 15	(4,1)= 13	(2,4)= 13	(4,2)= 13	(3,4)= 10	(4,3)= 15	(4,3)= 3	(3,4)= 7
TC1= 36	TC2= 36	TC1= 43	TC2= 40	TC1= 33	TC2= 42	TC1= 12	TC2= 14
TOTAL = 72		TOTAL = 87		TOTAL = 75		TOTAL = 30	

SERIE 2 CLASSE 4

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 12	(2,1)= 9	(2,1)= 14	(1,2)= 15	(3,1)= 10	(1,3)= 15	(4,1)= 9	(1,4)= 12
(1,3)= 9	(3,1)= 10	(2,3)= 16	(3,2)= 11	(3,2)= 13	(2,3)= 13	(4,2)= 9	(2,4)= 13
(1,4)= 8	(4,1)= 15	(2,4)= 11	(4,2)= 15	(3,4)= 11	(4,3)= 12	(4,3)= 11	(3,4)= 10
TC1= 29	TC2= 34	TC1= 41	TC2= 41	TC1= 34	TC2= 40	TC1= 29	TC2= 35
TOTAL = 63		TOTAL = 82		TOTAL = 74		TOTAL = 64	

SERIE 3 CLASSE 1

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 7	(2,1)= 8	(2,1)= 8	(1,2)= 3	(3,1)= 4	(1,3)= 6	(4,1)= 6	(1,4)= 6
(1,3)= 4	(3,1)= 6	(2,3)= 4	(3,2)= 3	(3,2)= 7	(2,3)= 4	(4,2)= 6	(2,4)= 6
(1,4)= 5	(4,1)= 7	(2,4)= 4	(4,2)= 4	(3,4)= 4	(4,3)= 4	(4,3)= 3	(3,4)= 6
TC1= 16	TC2= 21	TC1= 16	TC2= 10	TC1= 15	TC2= 14	TC1= 15	TC2= 18
TOTAL = 37		TOTAL = 26		TOTAL = 29		TOTAL = 33	

SERIE 3 CLASSE 2

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 6	(2,1)= 5	(2,1)= 4	(1,2)= 7	(3,1)= 4	(1,3)= 8	(4,1)= 4	(1,4)= 3
(1,3)= 5	(3,1)= 6	(2,3)= 7	(3,2)= 8	(3,2)= 7	(2,3)= 3	(4,2)= 5	(2,4)= 10
(1,4)= 6	(4,1)= 7	(2,4)= 7	(4,2)= 7	(3,4)= 3	(4,3)= 9	(4,3)= 4	(3,4)= 6
TC1= 17	TC2= 15	TC1= 18	TC2= 22	TC1= 14	TC2= 20	TC1= 13	TC2= 21
TOTAL = 35		TOTAL = 40		TOTAL = 34		TOTAL = 34	

SERIE 3 CLASSE 3

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 11	(2,1)= 12	(2,1)= 14	(1,2)= 11	(3,1)= 6	(1,3)= 13	(4,1)= 2	(1,4)= 9
(1,3)= 13	(3,1)= 13	(2,3)= 10	(3,2)= 7	(3,2)= 13	(2,3)= 8	(4,2)= 5	(2,4)= 6
(1,4)= 15	(4,1)= 14	(2,4)= 10	(4,2)= 15	(3,4)= 11	(4,3)= 13	(4,3)= 6	(3,4)= 12
TC1= 39	TC2= 39	TC1= 34	TC2= 33	TC1= 30	TC2= 34	TC1= 13	TC2= 27
TOTAL = 78		TOTAL = 67		TOTAL = 64		TOTAL = 40	

SERIE 3 CLASSE 4

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2)= 10	(2,1)= 12	(2,1)= 14	(1,2)= 8	(3,1)= 10	(1,3)= 12	(4,1)= 7	(1,4)= 10
(1,3)= 12	(3,1)= 14	(2,3)= 14	(3,2)= 9	(3,2)= 9	(2,3)= 12	(4,2)= 12	(2,4)= 12
(1,4)= 12	(4,1)= 14	(2,4)= 12	(4,2)= 15	(3,4)= 11	(4,3)= 11	(4,3)= 9	(3,4)= 12
TC1= 34	TC2= 40	TC1= 40	TC2= 32	TC1= 30	TC2= 35	TC1= 28	TC2= 34
TOTAL = 74		TOTAL = 72		TOTAL = 65		TOTAL = 62	

SOITIF DES RESULTATS, CLASSES SEPARÉES, SERIES COMPOSÉES

CLASSE 1

S001		S002		S003		S004	
(1,2)= 24	(2,1)= 52	(2,1)= 26	(1,2)= 25	(3,1)= 12	(1,3)= 21	(4,1)= 12	(1,4)= 16
(1,3)= 28	(3,1)= 33	(2,3)= 18	(3,2)= 19	(3,2)= 19	(2,3)= 14	(4,2)= 13	(2,4)= 16
(1,4)= 29	(4,1)= 54	(2,4)= 16	(4,2)= 31	(3,4)= 16	(4,3)= 24	(4,3)= 10	(3,4)= 14
TC1= 76	TC2= 90	TC1= 60	TC2= 75	TC1= 47	TC2= 59	TC1= 35	TC2= 46
TOTAL = 175	TOTAL = 135	TOTAL = 106	TOTAL = 81	TOTAL = 106	TOTAL = 81	TOTAL = 81	TOTAL = 81

CLASSE 2

S001		S002		S003		S004	
(1,2)= 25	(2,1)= 23	(2,1)= 31	(1,2)= 39	(3,1)= 22	(1,3)= 34	(4,1)= 11	(1,4)= 13
(1,3)= 20	(3,1)= 30	(2,3)= 30	(3,2)= 33	(3,2)= 28	(2,3)= 26	(4,2)= 12	(2,4)= 20
(1,4)= 22	(4,1)= 28	(2,4)= 32	(4,2)= 37	(3,4)= 30	(4,3)= 41	(4,3)= 11	(3,4)= 18
TC1= 67	TC2= 41	TC1= 93	TC2= 109	TC1= 80	TC2= 101	TC1= 34	TC2= 51
TOTAL = 148	TOTAL = 202	TOTAL = 181	TOTAL = 85	TOTAL = 181	TOTAL = 85	TOTAL = 85	TOTAL = 85

CLASSE 3

S001		S002		S003		S004	
(1,2)= 25	(2,1)= 33	(2,1)= 39	(1,2)= 44	(3,1)= 33	(1,3)= 42	(4,1)= 11	(1,4)= 24
(1,3)= 34	(3,1)= 29	(2,3)= 41	(3,2)= 38	(3,2)= 41	(2,3)= 35	(4,2)= 15	(2,4)= 17
(1,4)= 36	(4,1)= 35	(2,4)= 36	(4,2)= 44	(3,4)= 36	(4,3)= 44	(4,3)= 13	(3,4)= 25
TC1= 95	TC2= 97	TC1= 116	TC2= 126	TC1= 110	TC2= 121	TC1= 39	TC2= 66
TOTAL = 192	TOTAL = 242	TOTAL = 231	TOTAL = 105	TOTAL = 231	TOTAL = 105	TOTAL = 105	TOTAL = 105

CLASSE 4

S001		S002		S003		S004	
(1,2)= 26	(2,1)= 24	(2,1)= 44	(1,2)= 54	(3,1)= 36	(1,3)= 42	(4,1)= 29	(1,4)= 37
(1,3)= 25	(3,1)= 28	(2,3)= 47	(3,2)= 35	(3,2)= 39	(2,3)= 42	(4,2)= 36	(2,4)= 41
(1,4)= 28	(4,1)= 36	(2,4)= 36	(4,2)= 45	(3,4)= 34	(4,3)= 39	(4,3)= 32	(3,4)= 37
TC1= 79	TC2= 92	TC1= 127	TC2= 114	TC1= 109	TC2= 123	TC1= 97	TC2= 115
TOTAL = 171	TOTAL = 241	TOTAL = 232	TOTAL = 212	TOTAL = 232	TOTAL = 212	TOTAL = 212	TOTAL = 212

SORTIE DES RESULTATS PAR SERIE, CLASSES COORDONNES

SERIE 1

S001		S002		S003		S004	
(1,2) = 23	(2,1) = 31	(2,1) = 53	(1,2) = 50	(3,1) = 43	(1,3) = 50	(4,1) = 23	(1,4) = 30
(1,3) = 31	(3,1) = 32	(2,3) = 47	(3,2) = 47	(3,2) = 47	(4,3) = 46	(4,2) = 27	(2,4) = 33
(1,4) = 28	(4,1) = 38	(2,4) = 47	(4,2) = 61	(3,4) = 40	(4,3) = 53	(4,3) = 20	(3,4) = 29
TC1 = 82	TC2 = 101	TC1 = 47	TC2 = 162	TC1 = 130	TC2 = 149	TC1 = 74	TC2 = 96
TOTAL = 1183	TOTAL = 1101	TOTAL = 309	TOTAL = 162	TOTAL = 283	TOTAL = 149	TOTAL = 74	TOTAL = 170

SERIE 2

S001		S002		S003		S004	
(1,2) = 43	(2,1) = 48	(2,1) = 47	(1,2) = 59	(3,1) = 36	(1,3) = 50	(4,1) = 21	(1,4) = 28
(1,3) = 42	(3,1) = 49	(2,3) = 54	(3,2) = 51	(3,2) = 40	(2,3) = 44	(4,2) = 21	(2,4) = 27
(1,4) = 46	(4,1) = 54	(2,4) = 40	(4,2) = 55	(3,4) = 43	(4,3) = 58	(4,3) = 20	(3,4) = 27
TC1 = 129	TC2 = 150	TC1 = 41	TC2 = 164	TC1 = 123	TC2 = 152	TC1 = 62	TC2 = 82
TOTAL = 279	TOTAL = 150	TOTAL = 306	TOTAL = 164	TOTAL = 275	TOTAL = 152	TOTAL = 62	TOTAL = 144

SERIE 3

S001		S002		S003		S004	
(1,2) = 34	(2,1) = 37	(2,1) = 40	(1,2) = 29	(3,1) = 24	(1,3) = 30	(4,1) = 19	(1,4) = 28
(1,3) = 34	(3,1) = 39	(2,3) = 35	(3,2) = 27	(3,2) = 36	(2,3) = 27	(4,2) = 28	(2,4) = 30
(1,4) = 38	(4,1) = 42	(2,4) = 33	(4,2) = 41	(3,4) = 29	(4,3) = 37	(4,3) = 22	(3,4) = 38
TC1 = 106	TC2 = 118	TC1 = 68	TC2 = 97	TC1 = 89	TC2 = 103	TC1 = 69	TC2 = 100
TOTAL = 224	TOTAL = 118	TOTAL = 205	TOTAL = 97	TOTAL = 192	TOTAL = 103	TOTAL = 69	TOTAL = 169

Sortie des Resultats, Classes Supportes, Series 1 Et 2 Composees

CLASS 1

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2) = 17	(2,1) = 24	(2,1) = 18	(1,2) = 22	(3,1) = 8	(1,3) = 15	(4,1) = 4	(1,4) = 10
(1,3) = 24	(3,1) = 27	(2,3) = 14	(4,2) = 16	(3,2) = 12	(2,3) = 10	(4,2) = 7	(2,4) = 10
(1,4) = 19	(4,1) = 27	(2,4) = 12	(4,2) = 27	(3,4) = 12	(4,3) = 20	(4,3) = 7	(3,4) = 8
TC1 = 60	TC2 = 74	TC1 = 44	TC2 = 65	TC1 = 32	TC2 = 45	TC1 = 20	TC2 = 28
TOTAL = 138	TOTAL = 108	TOTAL = 77	TOTAL = 48	TOTAL = 77	TOTAL = 48	TOTAL = 48	TOTAL = 48

CLASS 2

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2) = 19	(2,1) = 18	(2,1) = 27	(1,2) = 32	(4,1) = 18	(1,3) = 26	(4,1) = 7	(1,4) = 10
(1,3) = 15	(3,1) = 24	(2,3) = 23	(4,2) = 25	(3,2) = 21	(2,3) = 23	(4,2) = 7	(2,4) = 10
(1,4) = 16	(4,1) = 21	(2,4) = 25	(4,2) = 30	(3,4) = 27	(4,3) = 32	(4,3) = 7	(3,4) = 10
TC1 = 50	TC2 = 63	TC1 = 75	TC2 = 87	TC1 = 66	TC2 = 81	TC1 = 21	TC2 = 30
TOTAL = 113	TOTAL = 162	TOTAL = 147	TOTAL = 51	TOTAL = 147	TOTAL = 81	TOTAL = 21	TOTAL = 30

CLASS 3

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2) = 14	(2,1) = 21	(2,1) = 25	(1,2) = 33	(3,1) = 27	(1,3) = 29	(4,1) = 9	(1,4) = 15
(1,3) = 21	(3,1) = 16	(2,3) = 31	(4,2) = 31	(3,2) = 28	(2,3) = 27	(4,2) = 10	(2,4) = 11
(1,4) = 21	(4,1) = 21	(2,4) = 26	(4,2) = 29	(3,4) = 25	(4,3) = 31	(4,3) = 7	(3,4) = 13
TC1 = 56	TC2 = 59	TC1 = 62	TC2 = 93	TC1 = 80	TC2 = 87	TC1 = 26	TC2 = 39
TOTAL = 114	TOTAL = 175	TOTAL = 167	TOTAL = 65	TOTAL = 167	TOTAL = 87	TOTAL = 26	TOTAL = 65

CLASS 4

SON1		SON2		SON3		SON4	
(1,2) = 16	(2,1) = 14	(2,1) = 30	(1,2) = 26	(3,1) = 26	(1,3) = 30	(4,1) = 22	(1,4) = 27
(1,3) = 13	(3,1) = 14	(2,3) = 33	(4,2) = 26	(3,2) = 30	(2,3) = 30	(4,2) = 24	(2,4) = 29
(1,4) = 14	(4,1) = 22	(2,4) = 24	(4,2) = 30	(3,4) = 23	(4,3) = 28	(4,3) = 23	(3,4) = 25
TC1 = 45	TC2 = 52	TC1 = 67	TC2 = 82	TC1 = 79	TC2 = 88	TC1 = 69	TC2 = 81
TOTAL = 97	TOTAL = 169	TOTAL = 167	TOTAL = 150	TOTAL = 167	TOTAL = 88	TOTAL = 69	TOTAL = 150

SOM 1		SOM 2		SOM 3		SOM 4			
		SOM 1		SOM 2		SOM 3		SOM 4	
(1,2) = 66	(2,1) = 79	(2,1) = 100	(1,2) = 115	(5,1) = 79	(1,3) = 100	(4,1) = 44	(1,4) = 62	(4,2) = 48	(2,4) = 60
(1,3) = 78	(2,1) = 81	(2,3) = 101	(3,2) = 98	(3,2) = 91	(2,3) = 90	(4,2) = 48	(2,4) = 60	(4,2) = 48	(2,4) = 60
(1,4) = 72	(4,1) = 91	(2,4) = 87	(4,2) = 116	(3,4) = 87	(4,3) = 111	(4,3) = 44	(3,4) = 56	(4,3) = 44	(3,4) = 56
TC1 = 211	TC2 = 251	TC1 = 208	TC2 = 327	TC1 = 257	TC2 = 301	TC1 = 136	TC2 = 178	TC1 = 136	TC2 = 178
TOTAL = 462	TOTAL = 615	TOTAL = 558	TOTAL = 314	TOTAL = 558	TOTAL = 314				

SOM 1		SOM 2		SOM 3		SOM 4			
(1,2) = 79	(2,1) = 92	(2,1) = 112	(1,2) = 124	(5,1) = 87	(1,3) = 114	(4,1) = 54	(1,4) = 71	(4,2) = 59	(2,4) = 76
(1,3) = 82	(3,1) = 93	(2,3) = 112	(3,2) = 109	(3,2) = 105	(2,3) = 97	(4,2) = 59	(2,4) = 76	(4,2) = 59	(2,4) = 76
(1,4) = 85	(4,1) = 105	(2,4) = 98	(4,2) = 127	(3,4) = 94	(4,3) = 124	(4,3) = 51	(3,4) = 70	(4,3) = 51	(3,4) = 70
TC1 = 204	TC2 = 290	TC1 = 322	TC2 = 358	TC1 = 206	TC2 = 335	TC1 = 164	TC2 = 217	TC1 = 164	TC2 = 217
TOTAL = 534	TOTAL = 601	TOTAL = 621	TOTAL = 341	TOTAL = 621	TOTAL = 341				

SOM 1		SOM 2		SOM 3		SOM 4			
(1,2) = 100	(2,1) = 116	(2,1) = 140	(1,2) = 142	(3,1) = 103	(1,3) = 139	(4,1) = 63	(1,4) = 90	(4,2) = 76	(2,4) = 94
(1,3) = 107	(3,1) = 120	(2,3) = 136	(4,2) = 125	(3,2) = 127	(2,3) = 117	(4,2) = 76	(2,4) = 94	(4,2) = 76	(2,4) = 94
(1,4) = 110	(4,1) = 133	(2,4) = 120	(4,2) = 157	(3,4) = 116	(4,3) = 148	(4,3) = 66	(3,4) = 90	(4,3) = 66	(3,4) = 90
TC1 = 317	TC2 = 360	TC1 = 306	TC2 = 424	TC1 = 306	TC2 = 404	TC1 = 205	TC2 = 278	TC1 = 205	TC2 = 278
TOTAL = 606	TOTAL = 820	TOTAL = 820	TOTAL = 750	TOTAL = 820	TOTAL = 750				

SORTIE DES RESULTATS, CLASSES ET SERIES CONFONDUES