Timbre et causalité

Claude Cadoz

▶ **To cite this version:**

Claude Cadoz. Timbre et causalité. [Rapport de recherche] ACROE-LIFIA / INPG. 1987. hal-01022947

HAL Id: hal-01022947
https://hal.science/hal-01022947

Submitted on 11 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

TIMBRE ET CAUSALITE

Claude CADOZ

A.C.R.O.E.
LIFIA-INPG, 46 Av. Felix Viallet, 38000 Grenoble

INTRODUCTION

Un des premiers paradoxes qui surgit du débat sur le timbre est que certains discours posent ou au moins évoquent au travers d'énoncés divers, la difficulté de sa définition :

"*Le timbre, étrange et multiple "paramètre" défini par ce qu'il n'est pas - ni hauteur, ni durée, ni intensité*" ...

alors que d'autres semblent pouvoir se passer totalement d'un tel préalable, comme si la seule question qui avait cours était : comment fonctionne-t-il et comment l'employer?

Il est bien clair que la question du timbre ne se réduit pas à celle de sa définition, que le débat qu'elle suscite est bien un débat total sur la musique elle-même. Mais dans la mesure où le mot avait à l'origine une signification simple, ne serait-ce qu'en renvoyant à l'objet, à l'instrument, et où ce dernier disparait dans le nouveau contexte qui est fait à la création musicale - celui de l'ordinateur et de l'informatique - on ne peut éviter, à un moment ou un autre du développement, sinon de tenter une définition, du moins de la mettre en question.

Le rapprochement des deux termes "timbre" et "causalité" n'a pas pour fonction de restaurer la définition primitive du timbre, mais de poser d'emblée le problème dans toute son envergure et de rappeler en particulier que, même à son plus haut degré d'abstraction et de formalisation, la pensée ne s'extériorise pas sans support matériel, et que, en dépit de leur haut degré de sophistication, nos outils contemporains appartiennent au monde réel et ne peuvent échapper en aucune façon à leur matérialité et au fait qu'ils sont, d'une manière ou d'une autre, des "causes".

S'il faut parler du timbre c'est en tant qu' attribut perceptuel. Ce qu'il faut entendre par là, c'est que sa valeur, sa fonction finale, c'est l'oreille et l'intelligence musicale qui en décident quel que soit le dispositif de production. Cependant il y a deux relations possibles de la perception à la cause productrice. Il y a un lien fonctionnel primitif, que l'on peut justifier par le rôle premier des sens : identifier les objets ou les évènements du monde extérieur.
Schaeffer affirme d'ailleurs (Schaeffer 1966) :

"C'est nier l'évidence que de croire que la musique pure puisse dispenser l'oreille de sa fonction la plus essentielle : celle de renseigner l'homme sur les évènements qui surviennent".

Et il existe aussi, indépendamment de la fonction, un lien matériel : il n'y a pas de perception sonore sans vibration acoustique et pas de vibration acoustique sans objet matériel, sans cause physique qui la produit. Cependant l'oreille, plus généralement tout le système sensoriel, a la particularité de se laisser jouer par l'artifice, de chercher ou de trouver des causes, ou autre chose de relativement indépendant des causes réelles. La représentation, d'une manière générale, est fondée sur la substitution, sur l'évocation par un objet réel, d'un autre objet qui est absent, éloigné dans le temps ou dans l'espace, ou qui n'a aucune réalité matérielle possible.
Pour l'oreille, la cause peut être réelle ou virtuelle, évoquée, imaginaire, représentée, mais dans les deux cas il existe une cause nécessaire, identique à la cause réelle dans le premier, différente, artificielle dans le deuxième.
Le lien primitif du timbre à l'instrument s'apparente à la première catégorie, celui de la perception du timbre à l'ordinateur synthétisant le son est d'une autre nature. C'est ce qui se passe de l'un à l'autre qui nous intéressera ici. Il nous semble en effet que derrière cette question de nombreux problèmes propres à la "musique des technologies contemporaines" sont en cause, non seulement pour savoir comment l'entendre et la comprendre, mais comment la faire, avec quels outils, et comment construire ces outils.

Notre propos, ici, n'est donc pas un propos de musicologue, ni de compositeur, mais de chercheur persuadé qu'il faut créer l'outil de création et que dans le cadre de l'utilisation de l'ordinateur et de l'informatique, cette question est d'une importance et d'une complexité sans précédent.

A l'origine, le lien du timbre à la cause physique productrice du phénomène sonore est une évidence naturelle qui n'appelle aucune question. Le mot désignait d'ailleurs, au départ, un instrument, une sorte de tambour comportant des cordes tendues et donnant au son une "couleur" caractéristique.

Deux évolutions se sont opérées depuis le début du siècle sans que l'on puisse assigner définitivement à l'une une influence unilatérale sur l'autre : c'est d'une part l'émergence du timbre comme référent fondamental, comme fonction centrale, élément de langage dans la musique occidentale après le début du XXème siècle, et d'autre part le développement d'outils matériels nouveaux, en passant de la mécanique (qui est la technologie primitive des moyens de production du phénomène sonore), à l'électricité, l'électronique, la transmission, l'enregistrement, l'ordinateur, l'informatique.

Cette seconde évolution est pressentie, désirée, nécessaire à la pensée musicale de la première moitié du siècle. Mais elle n'est pas la conséquence de cette nécessité. La musique, si elle fréquente systématiquement les laboratoires de recherche les plus prestigieux, comme ceux de la Bell Telephone, si elle cotoie des disciplines comme l'Intelligence Artificielle depuis ses débuts et a elle-même suscité des découvertes, n'est pas le facteur essentiel de cette évolution.
De fait, la création musicale, plongée dans ce nouveau contexte, trouve des ouvertures, des perspectives inespérées, mais en même temps de nouveaux problèmes qui eux, n'avaient sans doute été ni pressentis ni désirés.
Varèse rêvait "*les instruments obéissant à la pensée*", l'ordinateur propose depuis trente ans un univers sonore sans limites, mais nous sommes encore incapables de le faire obéir *à la main...*

I. Emergence du timbre comme fonction musicale.

La prédominance de la hauteur, mise en échelle dans le tempérament égal, mise en structure dans toute la science et l'art de l'harmonie, relègue, dans le développement de la musique occidentale jusqu'à une phase récente, le timbre à un rôle secondaire.
Le timbre n'est pas une fonction du langage, il n'est qu'une matérialité obligée du processus producteur de la vibration sonore. On l'a souligné de nombreuses fois dans le séminaire (Risset, Piencikowski, Boulez, Dufourt, 1985), les instruments classiques ont été construits de façon à éliminer du son tout ce qui peut gêner la reconnaissance des hauteurs. L'instrumentarium pré-classique était très riche en particularismes. La lutherie classique s'est évertuée à éliminer ces particularismes, à épurer, stabiliser les sources sonores.
Il faut remarquer toutefois que malgré cette "épuration", l'instrumentarium classique est constitué d'éléments très caractérisés, employés certes pour servir, avec une relative interchangeabilité, une logique des hauteurs, mais néanmoins identifiés et rangés en classes et en types précis. En l'absence d'un rôle fonctionnel musical explicite, rationalisé, il est tout naturel que le concept de timbre tende à renvoyer sans plus de précision à la cause productrice du son : l'instrument.
Le lien causalité instrumentale - timbre, est en quelque sorte un lien primitif, naturel.

Cependant, malgré cette prédominance de l'attribut de hauteur, la musique occidentale n'a jamais complètement évacué une fonction du son composé qui ne tient ni à la ligne mélodique, ni à la structure harmonique, mais à une qualité intrinsèque, une "sonorité" résultant parfois d'accords sur un même instrument, parfois de combinaisons d'instruments. Cette qualité qui n'est ni hauteur, ni durée, ni intensité et qui résulte d'une combinaison, est timbre sans être instrument.
Mais cet intérêt pour la sonorité en soi ne s'affirme explicitement qu'au début du XXème siècle.
Une première explication du développement de cet intéret pour le timbre consiste à considérer une saturation, une limite intrinsèque aux systèmes fondés exclusivement sur la hiérarchie des hauteurs et à relier cette évolution à une nécessité de la pensée musicale.

Selon Dufourt (Dufourt 1985), deux phénomènes extrinsèques à l'évolution de la pensée musicale ont suscité, à partir de la seconde moitié du XXème siècle, une remise en cause de la fonction prédominante de la hauteur et cette émancipation du timbre, c'est-à-dire l'émergence d'un rôle fonctionnel de celui-ci, non seulement complémentaire des autres attributs du son, mais prédominant, "déterminant de tous les aspects de l'oeuvre" : c'est d'une part l'évolution de la connaissance physique du phénomène sonore au travers de la science acoustique.
"*Il n'y a pas de pensée du timbre jusqu'au début du XXème siècle parce qu'il n'y a jusque là pas d'autre science acoustique que celle des hauteurs*".
Il y a d'autre part un phénomène de civilisation. La civilisation industrielle instaure progressivement un nouvel environnement sonore, sollicite l'oreille avec des phénomènes qualifiés jusque là de bruits. Les bruiteurs futuristes, Varèse, etc. sont les pionniers de cette intégration du "bruit" dans l'espace musical, d'une "musique de la totalité sonore".
Il nous paraît important de considérer a priori que les facteurs sont simultanément intrinsèques et extrinsèques à la pensée musicale, car précisément, ce que l'on peut dire des premières décades du développement de l'informatique musicale, c'est que ce sont bien les conditions technologiques qui ont tendance à mener, avec plus ou moins de succès et à son corps défendant, le compositeur par le bout du nez.

Les faits nous permettent cependant de considérer deux contextes qui, tout en se recouvrant historiquement, se présentent dans un ordre chronologique : le contexte de l'instrumentarium classique, et celui de la technologie informatique.

Timbre et "causalité orchestrale".

Ce que Boulez, de même que Piencikowski (Boulez 1985, Piencikovski 1985) montrent en considérant le timbre au niveau de l'écriture, c'est l'émergence d'un timbre en soi résultant de l'organisation elle-même, comme composante du langage, avec des critères esthétiques et des critères formels propres.
Au travers des exemples évoqués ("Farben" de Schoenberg, le "double concerto" de Carter, les Antistrophes de "Chronochromie" de Messiaen, "Eclats Multiples" de Boulez, ...), un fait indiscutable est mis en évidence, c'est la rupture d'isomorphie entre le système des instruments et le "système" d'un timbre. Ce dernier émerge au dessus du premier. Les instruments et le jeu se combinent en des processus complexes minutieusement organisés et maîtrisés par l'écriture, pour collaborer à la réalisation d'une "identité timbrique" spécifique, elle même évolutive.
Dans "Farben", par exemple, Schoenberg utilise la clarinette comme un constituant d'une texture dans laquelle elle perd son identité propre.

Boulez évoque également une sorte de loi de complexité limite répartie entre l'objet et la structure à laquelle il participe, avec comme double corollaire, la difficulté de mettre en structure un objet trop complexe en lui-même, et réciproquement la nécessaire indétermination relative d'un objet devant participer à une structure complexe. Cette observation renforce l'idée de l'autonomie du "système" du timbre par rapport au système instrumental, les objets élémentaires étant entre autres les objets produits par les instruments.

Dans cette vision du "timbre écrit", il est clair qu'il n'y a plus de correspondance terme à terme entre les composantes pertinentes du timbre perçu et les éléments de l'instrumentarium. L'instrumentarium propose un ensemble de timbres. Ce qui différencie les instruments est bien en particulier leur timbre, mais le système des timbres instrumentaux n'est qu'un sous-ensemble du système du timbre, un ensemble de composants pour une "synthèse orchestrale" du timbre. La relation causale directe est de toute évidence délocalisée, dissoute.

Cependant, cet instrumentarium, que l'on pourrait appeler "mécanico-acoustique" reste essentiellement présent. Les conditions de production du son, même dominées par les exigences d'un langage, même si elles sont fortement composées, combinées, structurées, restent les conditions de la technologie mécanique. De fait, aussi "écrit" soit-il, le timbre reste dans cette approche entièrement contingent d'une catégorie très déterminée de conditions. Si la relation causale terme à terme se dissout, il reste une relation causale globale. Ce "timbre écrit" est, pourrait-on dire le timbre de la "causalité orchestrale", d'un "hyper instrument" acoustico-mécanique, un timbre dans l'écriture, certes, mais avec un ancrage persistant dans la matérialité des instruments.
Ceci nous permet de dire que si timbre et causalité instrumentale sont manifestement dissociables, on ne peut déduire de cette première approche qu'ils le sont totalement.
Remarquons également que la définition du timbre reste ici indéterminée.

Timbre instrumental, registration et cause physique

Dans ce qui précède, nous avons assimilé l'instrument à la cause physique. Par ailleurs, si l'instrument apparait comme composante du timbre, ne faut-il pas aussi considérer, inversement, l'instrument comme un "composé" du timbre ?
Schaeffer retient un premier énoncé empirique où le timbre se définit comme "*l'ensemble des caractères du son qui le réfèrent à un instrument donné*". Mais il remarque immédiatement que l'on peut parler du "*timbre d'un son sans le rapporter clairement à un instrument déterminé, mais plutôt en le considérant comme une caractéristique propre de ce son*" et évoque ce paradoxe "*qui veut à la fois que les instruments aient un timbre, et que chaque objet sonore qu'on en tire ait, pourtant, son timbre particulier*" (Schaeffer 1966).
Le timbre d'un objet et le timbre d'un instrument sont donc deux choses distinctes.

A partir de l'exemple du piano, ce que Schaeffer met en évidence, c'est bien en effet deux niveaux. Cet instrument "*semble produire des notes dont les caractéristiques* (autres que la hauteur), *varient en fonction du registre* (...) *mais possèdent néanmoins une sonorité d'ensemble caractéristique, bref, un timbre clairement identifiable*".
Schaeffer montre alors, toujours dans le cas du piano que l'identité et l'unité de son timbre peuvent être attribuées à deux logiques simultanées dont l'une ne rend compte d'aucune nécessité mécanique. La première logique est causale : c'est le processus "corde frappée", mais, explique Schaeffer, "*à la permanence causale fait pendant une certaine variation musicale des effets, voulue par le luthier, dosée en fonction d'exigences artistiques et obtenues mécaniquement par des moyens divers : doublage ou triplage des cordes dans l'aigu, filage des cordes graves,* (...) *feutrage plus ou moins épais des marteaux ...*". Plus loin, il précise, s'appuyant sur une série d'expériences, la nature de cette "variation musicale" sous la forme d'une certaine "loi du piano" qui régit les ajustements mécaniques sur l'étendue de sa tessiture et qu'il exprime ainsi :

"raideur dynamique X richesse harmonique = constante ".

Schaeffer propose alors plus généralement une définition du timbre instrumental : "*une variation musicale assouplissant et compensant une permanence causale*".
La registration, pour tout instrument, s'établit par un assujetissement du mécanisme à des conditions qui ne sont pas physiquement nécessaires, mais déterminées par un but esthétique.
Cette variation "musicale", cependant reste difficile à caractériser. En quoi la loi du piano est-elle "musicale" ? Quels sont les facteurs qui ont conduit (d'une manière en fait toute expérimentale et empirique) précisément à cette loi. Est-ce sa simplicité qui s'est en quelque sorte comportée comme un "attracteur" , et dans ce cas, pourquoi cet attracteur plutôt qu'un autre ? L'oreille aurait-elle, comme une sorte de processeur, le pouvoir d'effectuer, sur une classe de sons donnée, une évaluation de la raideur dynamique, de la richesse harmonique et le calcul de leur produit pour en constater la constance ?
Enfin, une autre loi, peut-être aussi simple, mais tout aussi arbitraire par rapport à la permanence causale d'appui, n'aurait-elle pas, soumise à une aussi longue habitude, conduit à associer tous les phénomènes sonores qu'elle relie à une même unité, un même timbre ?
La "musicalité" est-elle liée à de telle formes implicites, cachées ? Peut-on d'ailleurs définir la musicalité a priori ?
Ce rôle attracteur peut-il se définir de manière purement intrinsèque à l'instrument ? Probablement pas. C'est sans doute un système d'attracteurs qu'il faut considérer globalement, c'est-à-dire relativement au contexte des autres instruments dans leur emploi dans le discours musical.

Quoi qu'il en soit, ce qu'il faut conclure de cela, c'est qu'instrument et cause physique ne doivent pas être confondus. En fait, on peut considérer l'instrument de deux points de vue. Comme objet hautement élaboré, il n'est pas une "causalité naturelle". La registration l'en distancie, elle est comme une écriture, mais une écriture permanente, en quelque sorte figée dans les "gènes" de l'instrument.
Comme objet relativement permanent au cours des phases de l'évolution musicale - le violon de la musique baroque est quasiment le même que le violon d'aujourd'hui - soumis à un long apprentissage, à une longue habitude, il acquiert le statut d'une cause, moins essentielle, moins naturelle que le processus physique sur lequel il est construit, mais stable par rapport à l'expérience sensorielle.
Enfin, on peut dire que le timbre instrumental comporte à la fois une composante encore énigmatique, mais aussi une relation persistante à la cause physique.

Pour faire le lien avec les propos précédents, on peut résumer cette première partie dans une formule simple :

" timbre => cause physique + registration + écriture ".

Il ne s'agit que d'un repère, le timbre implique cela mais ne se définit pas comme cela. On sait décrire et analyser ce qu'est la registration, ce qui est écrit, mais en dehors de son ancrage à la cause, on n'a pas défini le timbre.

II. Timbre et synthèse.

L'évolution technologique est une mutation, et le premier aspect de cette mutation concerne précisément ce qui est le centre de notre propos : la relation causale.
Comme nous l'avons signifié plus haut, dans le contexte "pré-informatique" - mais il faudrait dire plus généralement pré-électronique - même si le système de production du son peut être relativement complexe, composé, il n'en n'est pas moins entièrement fondé sur une technologie déterminée : la mécanique acoustique. La vibration sonore, quelle que soit sa subtilité, est produite par une cause physique "naturelle", un corps matériel qui vibre, et est dirigée par une pensée qui s'extériorise nécessairement à un moment ou un autre, par un autre intermédiaire naturel : le geste humain s'appliquant à cet objet.

La mutation technologique transforme radicalement cette relation. Il s'introduit, et c'est là à la fois une situation positivement nouvelle et une source d'interrogations inattendues, une sorte de duplicité de la cause, qui détruit la relation causale primitive.
Cette duplicité apparait dès le principe de la transmission à distance du phénomène sonore, par fil ou par ondes. Les localisations spatiales de la cause et de l'effet se désolidarisent. Le processus se poursuit avec l'enregistrement : les localisations temporelles de la cause et de l'effet se désolidarisent à leur tour.
Mais l'ordinateur, depuis la mise au point de la synthèse numérique directe par Mathews (Mathews 1969), radicalise la situation en montrant qu'à lui seul, comme cause unique, de l'unité centrale à la chaîne de sortie acoustique, il est à même de produire tous les effets sonores possibles.

Boulez rappelait incidemment que l'instrument était la condition première de la musique. L'ordinateur n'est pas un instrument, or il peut être l'outil de toute musique.
Dans ce contexte, il est clair que la question du timbre ne peut plus se poser de la même manière.

La psychoacoustique.

La Musique Concrète avait déjà consacrée la "coupure causale". Schaeffer l'a théorisée en introduisant l'"acousmatique", et c'est dans ce cadre que les termes de la psychoacoustique actuelle se sont précisés. Avec la synthèse directe du son par ordinateur, cependant, la "rupture causale" est définitive et la psychoacoustique prend toute sa valeur opératoire.

La synthèse institue une nouvelle chaîne, faisant intervenir le signal acoustique, sa perception, son analyse et sa synthèse. Et le signal acoustique acquiert son statut de vis-à-vis objectif de la perception à partir du moment où il peut être mémorisé, représenté, analysé, parfaitement maîtrisé dans sa production et sa reproduction.
La psychoacoustique s'établit alors comme un dipôle reliant l'analyse physique de cet objet et l'analyse de sa perception.

Remarquons ici que ces deux pôles correspondent à deux des trois niveaux de la "tri-partition" de Molino sur lesquels Nattiez s'appuie dans son étude sur une sémiologie de la musique (Nattiez, 1987) : le niveau poiétique, le niveau neutre et le niveau esthésique.
Evoquant cette tri-partition à propos de la phonétique, Nattiez précise que "*cette science s'est refusée à considérer que la description physique des sons corresponde à la manière dont ils sont produits et la façon dont ils sont perçus*" et ajoute plus loin, qu'"*une fois que l'on admet que, dans les oeuvres humaines, les phénomènes de production* (niveau poiétique), *les traces qui en résultent* (niveau neutre) *et les faits de perception* (niveau esthésique) *ne se correspondent pas nécessairement, alors une première application de la perspective sémiologique* (pour la musique) *est possible*".
Transposée dans le champ de la synthèse du son, cette tri-partition a toute sa validité, car aux trois niveaux correpondent respectivement celui des modèles de synthèse, celui de l'analyse du signal et celui de sa perception.
Le second niveau est qualifié de neutre précisément parce qu'il repose sur une base a priori indépendante de la logique perceptuelle ou de la logique de production.
Dans un premier temps, nous nous cantonnerons aux deuxième et troisième niveaux que l'on pourrait supposer seuls impliqués dans la psychoacoustique, et dans la mesure où, à partir des systèmes de synthèse généraux comme MUSIC V (Mathews 1969) et tous ceux qui en ont découlé, une relative symétrie peut s'établir entre les modèles d'analyse et les modèles de synthèse (abstraction faite du critère d'efficacité technique de ces derniers).

Le niveau neutre, dans la problèmatique de la psychoacoustique est représenté par la caractérisation physique du signal, en particulier par l'analyse de Fourier, qui tient une place centrale.
L'analyse de Fourier doit son succès à un certain nombre de vertus. La première est sans doute liée à la conjoncture historique : dans le contexte musical du XIXième siècle, la hauteur étant encore l'attribut fonctionnel prépondérant, la décomposition de tout signal périodique en séries harmoniques offre une réprésentation mathématique simple et élégante de tels phénomènes bien identifiés en hauteur.

Mais il y a plus que cela.
La transformation de Fourier, qui généralise la décomposition en séries harmoniques, donne de tout phénomène sonore (en fait de tout signal continu) une représentation unifiée sous la forme d'une combinaison linéaire d'éléments d'une base (infinie) de forme simple : la fonction sinusoïdale, caractérisée seulement par deux paramètres : sa fréquence et sa phase.
Il faut ajouter l'évidence suivante, qui est que ces éléments de décomposition sont beaucoup plus fins que les constituants les plus élémentaires produits par les instruments mécanico-acoustiques et qu'ils permettent alors une pénétration à l'intérieur de ces derniers.
Enfin, ce système d'analyse est complet, c'est-à-dire qu'il peut s'appliquer à tout signal et qu'il en conserve toute l'information.
Ces vertus fondamentales font qu'analyse acoustique est presque synonyme d'analyse de Fourier. Quand on parle des "paramètres physiques" du son, on précise rarement qu'il s'agit en général des paramètres de l'analyse de Fourier. De fait, on oublie souvent que d'autres systèmes de décomposition sont possibles, qui sont tout aussi complets que la décomposition de Fourier, entre autres, la décomposition en fonction de Walsh ou le développement de Gabor en signaux gaussiens élémentaires (Risset & Wessel 1982). Et l'on oublie aussi que la décomposition de Fourier a un aspect idéal gênant pour la mise en pratique : la fonction sinusoïdale est une abstraction. Ce n'est pas un signal possible puisqu'elle se définit sur une durée infinie.

Il ne s'agit cependant pas pour l'instant de rejeter l'analyse de Fourier, mais de l'envisager dans sa neutralité vis-à-vis des conditions naturelles de production, des causes physiques et instrumentales.
Cette liberté vis-à-vis des causes mécaniques est une situation privilégiée pour observer sous un jour nouveau la dépendance (ou l'indépendance) du timbre par rapport à la cause physique.

Timbre et psychoacoustique.

Le point de vue classique associait au timbre la description spectrale du signal sonore. Si cette représentation avait eu une validité générale (pour les sons autres que les sons stationnaires), elle aurait présenté un certain attrait : elle renvoyait à une représentation purement structurelle, atemporelle, prolongeant en quelque sorte la verticalité de l'harmonie, assumant le passage d'une perception analytique de la verticalité à une perception qualitative synthétique.

Or indépendamment de toute incursion plus fine dans l'analyse du signal, une limite à cette vision apparaît dans l'évidence de l'importance des facteurs temporels. Les sons instrumentaux sont physiquement et perceptuellement évolutifs.
Il n'y aurait pas d'anomalie à considérer que toute note émise par un instrument est soumise à une loi de mise en régime et d'extinction, et que c'est pendant une certaine phase de cette émission que le timbre de l'instrument s'"exprime", le timbre étant alors conçu comme un attribut atemporel, "vertical", bien que susceptible d'évoluer au cours du développement d'un son instrumental ou orchestral donné.

Cependant le rôle des facteurs temporels est complexe.
Il y a tout d'abord une discrimination que l'oreille est en mesure d'effectuer entre des aspects temporels qui résultent d'un contrôle volontaire possible au cours de l'émission du son, et des variations perçues comme représentatives d'une certaine unité, d'une certaine cohérence

intrinsèque à l'évenement, une loi globale, une forme, certes éventuellement modulable, mais non controlable en dessous d'un certain degré. La loi d'extinction du son du piano est bien perçue temporellement, cette perception peut être consciente, mais elle a une pertinence très forte, une évidence qui tend à l'intégrer globalement au phénomène "son de piano", en fait, au timbre du piano ! La preuve en est que ce son inversé (dont le spectre, en l'occurrence est rigoureusement identique à celui de son endroit), est non seulement méconnaissable, mais possède ce que l'on est bien obligé de considérer comme une qualité timbrique propre et différente. Certaines durées prennent la valeur d'une permanence qui se développe dans le temps. Le timbre peut donc inclure une dimension temporelle explicitement perçue sans pour autant être dissociée de l'entité.
Cette forme temporelle généralement évoquée à l'aide des attributs globaux tels que l'attaque, le maintien et l'amortissement ne peut être dissociée systématiquement de ce qui est appréhendé comme une "qualité" du son qui fait appel à la fois à une perception des aspects structurels et des aspects temporels.

Mais ce qui rend caduques ces visions classiques est la complexité de la relation entre les paramètres physiques et les attributs perceptuels. Les perceptions temporelles et les perceptions structurelles ne sont pas isomorphes aux facteurs physiques respectivement temporels et structurels - par exemple :
- la singularité de la relation qui s'établit entre le temps observé au niveau du signal (le temps physique), et sa perception dans le timbre ou pour le timbre. Schaeffer, ayant observé les oscillogrammes de deux mi à vide de violon, d'attaques identiques à l'oreille, joués par le même instrumentiste, constatait qu'ils ne présentaient aucune parenté évidente quant à la forme temporelle de la partie censée correspondre à l'attaque (Schaeffer 1966).
- la manière dont la pertinence de la structure spectrale se dérobe dans certaines situations où une très forte distorsion du spectre ne perturbe pas la reconnaissance de l'instrument.

De nombreux travaux depuis les débuts de la synthèse numérique, ont porté en fait sur la caractérisation au travers des paramètres de l'analyse acoustique, de ce qui permettait de restituer de la manière la plus véridique possible, donc de reconnaitre, les sons instrumentaux connus.
On peut d'ailleurs noter qu'avant la coupure du "cordon ombilical" instrument-timbre, la pensée et la création tendent à l'extrême à abstraire ce lien nécessaire, niant les causes pour rechercher le pur effet, tandis qu'au moment où elle est définitive la tendance s'inverse et c'est vers l'instrument et son identité propre qu'on se retourne en premier lieu.
De fait, l'analyse du signal sonore met en évidence une certaine complexité des structures temporelles et des structures spectrales ainsi qu'une interdépendance des deux catégories de structures : si dans certains cas on peut facilement isoler une allure temporelle qui s'applique globalement à tout le signal et qui, restituée par synthèse de cette manière, permet une identification sans ambiguité du timbre (comme pour les percussions où la forme exponentielle est déterminante), dans d'autres cas cette allure temporelle est spécifique à chaque composante spectrale : c'est le cas pour le son de cloche, pour le son de trompette (Risset 1966), ainsi que pour de nombreux autres.
Quant au spectre, sa caractérisation peut se faire par la position absolue et l'amplitude des composantes, mais également par la relation entre ces positions. L'harmonicité est l'exemple trivial. L'enveloppe spectrale apparait comme une caractéristique complètement dissociable et de la position des composantes et de leurs relations. Enfin, des évolutions temporelles sont observables sur la position des composantes, sur leurs relations ainsi que sur l'enveloppe. Dans les cas les plus complexes, tout cela peut évoluer simultanément selon des lois différenciées.

Timbre instrumental et psychoacoustique.

L'exploration du timbre instrumental par analyse/synthèse (cf. Risset Wessel 1982) fait ressortir cette complexité et surtout le fait que la caractérisation du timbre instrumental tient plus souvent à des relations entre les paramètres qu'à des valeurs absolues de ces derniers, comme le montre de manière décisive le cas de la trompette où ce qui est caractéristique de la qualité "cuivrée" du son tient essentiellement dans le fait que le spectre s'enrichisse en fréquences aigues lorsque l'intensité augmente (Risset 1966).

Mais le plus troublant est le fait que les différents facteurs, en fonction du son et du contexte n'interviennent pas toujours de la même façon : l'un d'eux sera dans un cas prédominant, ailleurs il s'effacera complètement au profit d'un autre, ou d'une relation, voire même d'une relation au contexte.
La suppression d'une partie importante du début du son de piano peut ne pas perturber la perception de l'attaque ni du timbre global. Par contre, pour le vibraphone une telle coupure, même proche de l'instant initial, dénature son timbre (Schaeffer 1966).
Pour les instruments à vents, il apparait que l'enveloppe spectrale est déterminante si sa forme est unique pour toutes les notes jouées sur l'instrument, dans les autres cas l'enveloppe temporelle est au moins aussi importante. Par ailleurs, si la forme temporelle est une attaque rapide suivie d'une décroissance exponentielle, elle l'emporte sur tous les autres aspects, pour indiquer un timbre percussif (Strong & Clark 1967).
Pour les voyelles, dans le cas des sons vocaux, la structure de formants est déterminante au point que la répartition des composantes sous ces formants est presque sans influence pour leur reconnaissance.
Par contre, la qualité vivante du son de piano peut être rattachée (Young, 1952, cité par Risset & Wessel 1982) à une forme très subtile d'inharmonicité : Le 15ème partiel ayant par exemple une fréquence égale à 16 fois celle du "fondamental".

Ceci indique que chaque instrument, chaque timbre instrumental, a ses traits caractéristiques propres, mais surtout montre que le mécanisme de perception ne se contente pas de traiter les données brutes comme une simple chaîne de transmission.
Un mécanisme manifestement plus élaboré est en cause.
Chaque expérience perceptive tient compte de prédispositions innées et d'expériences antérieures qui font que dans un contexte donné, lorsque des stimuli parviennent à l'oreille, l'auditeur est en situation de faire des hypothèses sur ce qui peut survenir. Tout se passe alors comme si, parmi tous les facteurs présents, l'oreille se saisissait de celui ou de ceux qui vont à partir d'un certain seuil confirmer ou infirmer l'hypothèse faite, et, dès ce processus achevé, rejeter tous les facteurs qui n'auront pas de pertinence pour cette vérification. Tout ceci, naturellement en dehors de toute intervention consciente du sujet.
Lindsay et Norman (Lindsay & Norman 1977) évoquent un tel mécanisme dans le cas de la vision, et le qualifient de "traitement-dirigé-par-concepts" qu'ils opposent au "traitement-dirigé-par-données", lequel d'ailleurs coexiste avec le premier.
Ce modèle offre une explication simple du rôle conditionnel des différents facteurs, et se justifie pour le système perceptuel par l'économie de traitement et de quantité d'information à mémoriser qu'il réalise.

Cependant, considérant les choses sous cet angle, il reste à élucider la nature des représentations mentales qui servent d'hypothèses.

McAdams (McAdams 1985) évoque un mécanisme d'"inférence de la cause" : les données reçues sont des indices considérés commes les effets d'une cause, qui est l'objectif visé par la perception. Dans le cas des sons vocaux par exemple, c'est une inférence de l'endroit de l'articulation dans la cavité bucale qui permettrait au système perceptuel de reconnaitre une même consonne dans divers phonèmes alors que les conditions du voisement consécutif à la consonne diffèrent.
Une représentation mentale de la cause productrice, de ses constituants, de ses états, de ses comportements, serait la substance même de ce "concept" dirigeant le traitement. En tout cas, McAdams suppose qu'il existe une forte liaison entre une représentation du mode de production et l'identité perceptuelle.

Dans l'exploration du timbre instrumental par analyse/synthèse, on relève finalement un certain nombre de faits qui s'éclaircissent au jour de ce genre d'hypothèse. Pour n'en citer que quelques uns :

- d'après Bénade (Bénade 1976), la loi caractéristique du son cuivré a une explication dans le processus physique en cause dans la trompette et les différents cuivres,
- alors que la matière du marteau du piano est assez dure pour que l'énergie de la percussion soit communiquée très rapidement à la corde et que dans la résonance, ce soit celle-ci qui s'exprime essentiellement, celle de la mailloche qui percute le vibraphone fait que le phénomène de percussion a une histoire (courte mais perceptible) qui révèle la nature de cet objet percutant et mêle sa contribution à celle de l'objet percuté (cf l'exemple déja cité, emprunté à Schaeffer),
- la pertinence de l'enveloppe temporelle (attaque raide et décroissance exponentielle) pour tous les sons percussifs correspond à une situation naturelle fréquente : l'existence d'un objet stable susceptible de vibrer, mis en vibration par un acte quasi instantané et ensuite laissé libre de ses évolutions,
- l'importance des formants dans la reconnaissance des voyelles, indépendamment du signal sous formants indique que le système perceptuel comprend manifestement la structure du système de production et en particulier la relative indépendance d'un système excitateur (les cordes vocales) et d'un système résonnant (les cavités bucales et nasales),
- la qualité particulière et le rôle du vibrato dans le son de violon (cf. Risset & Wessel 1982) peuvent aussi être interprètés de manière "causale" : ce vibrato fait "balayer" l'enveloppe spectrale par les composantes et révèle alors avec plus d'information, sa forme et sa permanence. Ces indices permettent à l'oreille de conclure à l'existence d'une structure résonnante stable et d'en déceler certaines propriétés,
- plus généralement le fait que "*l'oreille semble être bien équipée pour discriminer les propriétés temporelles du son des propriétés structurelles*" (d'après Huggins 1952, cité par Risset & Wessel 1982) indique que l'identification de ces trois facteurs : objet stable vibrant ou résonnant, acte ou évenement d'excitation et moyen d'excitation, qui constituent la plupart des sources sonores réelles est une "préoccupation" persistante de la perception.

Ainsi, outre la complexité des mécanismes de perception, la caractérisation de ce qui, dans le signal physique permet l'identification d'un instrument met en évidence ce fonctionnement "causal".

Cependant, se placer dans cette situation expérimentale où l'un des pôles est une cause connue n'est pas le plus propice à l'explicitation d'autres facteurs. La compréhension du timbre peut ici rester tributaire des catégories causales parce que l'on donne a priori à la perception ces catégories.

En fait, la reconnaissance de l'instrument ne se confond pas avec l'identification du timbre. Nous l'avons souligné au début de l'exposé, si chaque instrument se distingue par son timbre, la notion de timbre est plus générale : on a évoqué le timbre d'un son isolé, remarqué en citant Schaeffer que l'on pouvait parler du timbre de l'ensemble des sons d'un instrument, mais aussi du timbre particulier de chaque son de cet instrument, nous avons parlé également du timbre d'un son produit par une combinaison d'instruments, du timbre émergeant de l'écriture dans une structure sonore complexe, enfin, dans le cadre des sons produits par synthèse, nous pouvons poser la question du timbre d'un son "inouï", c'est-à-dire d'un son qui n'a pas encore été entendu et qui ne peut renvoyer à aucune cause naturelle connue.

Espace perceptuel, espace de timbre.

La synthèse, du fait même de la neutralité de ses modèles et de l'élémentarité de ses processus par rapport aux processus producteurs naturels permet de placer la perception en dehors des catégories instrumentales et de construire, en particulier par des procédés d'"interpolation" et d'"extrapolation" un continuum dans lequel les sons instrumentaux occupent des points particuliers.
Le son devient alors un élément d'un espace multidimentionnel qui se substitue à l'ensemble des catégories discrètes proposé par les instruments mécanico-acoustiques.
Des dimensions de cet espace peuvent être déduites des processus élémentaires et des variables des modèles de synthèse, par exemple dans le cas de la synthèse additive qui correspond, indépendamment du critère d'efficacité et d'économie des données, au paradigme le plus général.
Mais on peut aussi mettre en vis-à-vis de cet espace de production un espace perceptuel multidimentionnel, dont les dimensions sont des attributs du son. Le timbre, en tant qu'attribut perceptuel peut alors être considéré en fonction d'un tel espace.
Grey et Wessel (Grey 1977, Wessel 1979) ont expérimenté une telle notion d'espace multidimentionnel pour le timbre.
Mais avant de l'évoquer, nous voudrions nous arrêter quelques instants sur les termes "qualitatif" et "quantitatif". On associe en effet au timbre la notion de "qualité" en l'opposant à des attributs "quantitatifs" comme par exemple la hauteur, la durée, l'intensité. On peut, dans une certaine mesure expliciter ces deux termes.

On considère comme quantitatif un caractère représenté par une seule variable réelle à laquelle peut être affectée une relation d'ordre. Cette variable peut toutefois être discrétisée, mise en échelle. C'est le cas de la hauteur.
Le qualitatif s'applique à des caractères en général multidimentionnels qui, de ce fait, bien qu'une relation d'ordre puisse être établie sur chacune des dimensions, ne peut globalement qu'être soumis à une relation d'ordre partielle déduite des relations d'ordre de chaque dimension.
Mais il y a aussi une autre notion derrière celle de qualité : la catégorisation.
La catégorisation se distingue de la discrétisation : une variable continue peut être dicrétisée, c'est-à-dire que l'axe continu qui la représente est remplacé par une série de valeurs distinctes. Les valeurs intermédiaires sont éliminées, interdites à l'usage, comme dans le cas de la hauteur dans la musique tonale, mais perceptibles. La catégorisation est liée à un processus perceptuel non conscient qui associe à une même entité des éléments qui peuvent être objectivement différents. Une variable uni ou multidimensionnelle catégorisée, au cours de son évolution, fait "tomber" la perception dans des attracteurs distincts entre lesquels il n'y a pas d'intermédiaires.

La question se pose pour le timbre, en tant qu'attribut multidimensionnel, de savoir si sa perception est catégorielle, et cette question n'est pas neutre par rapport à celle du lien causal. En effet, le propre des dispositifs réels est bien qu'ils sont catégorisés. Il est par exemple difficile de construire un dispositif intermédiaire entre l'excitation d'une structure vibrante par percussion et l'excitation par entretien continu. Si une catégorisation apparait au niveau perceptuel, elle peut être la conséquence de celle des processus producteurs.

Revenons alors à l'espace multidimensionnel des timbres : la méthode mise en oeuvre par Grey et Wessel part de sons instrumentaux reproduits à l'aide des modèles de la synthèse additive, ce qui permet d'une part de les caractériser d'un point de vue neutre par rapport aux processus de production correspondants, d'autre part de les insérer dans un continuum, ou plus précisément de construire un continuum autour des points singuliers qu'ils représentent.
La détermination des dimensions de cet espace subjectif se base sur un critère de dissemblance qui ne nécessite aucune précision quant à sa nature, entre les sons de départ présentés par paires. Cette dissemblance est affectée par des auditeurs, au cours de tests, d'une distance. Une analyse factorielle permet ensuite de déterminer dans quel espace, c'est-à-dire selon combien de dimensions et avec quels facteurs sur chacun des axes, les différents sons peuvent être rangés de façon à ce que les distances estimées soient toutes représentables.
L'analyse fait ressortir trois dimensions principales : la première correspond à la brillance ou distribution spectrale de l'énergie, les deux autres à divers facteurs temporels comme la présence d'énergie à fréquence élevée et basse amplitude dans les attaques, la synchronicité des harmoniques élevées dans les transitoires, les fluctuations spectrales au cours du développement du son.
Il n'est pas utile d'entrer ici dans le détail des résultats de cette analyse, nous renvoyons aux articles cités.

Ce qui nous importe pour l'instant est de souligner qu'il s'agit d'une première tentative de représentation du timbre dégagée de la référence aux causes et qu'elle présente un certain intéret opératoire : tout d'abord en montrant que des sons autres que les sons originaux, produits donc par synthèse, trouvaient de manière prévisible leur place dans la carte des timbres préalablement constituée, comme les nouveaux éléments atomiques découverts grace à la classification de Mendeléev. Ensuite qu'il était possible d'utiliser ces dimensions du timbre comme support d'investigation permettant de prédire et maîtriser une relation perceptuelle donnée. Les expériences démonstratives de "transposition d'intervalles de timbre" réalisées par Wessel mettent ceci en évidence (Wessel 1979).
Cependant il ressort également qu'un espace de timbre parfaitement continu semble être impossible, la perception du timbre dans cet espace reste partiellement catégorielle.

L'intéret fondamental de l'approche, toutefois, réside bien dans le recours à cette notion d'espace perceptuel multidimensionnel, même si elle ne caractérise pas complètement la topologie de cet espace pour tous les phénomènes sonores possibles.

A partir de cette notion d'espace perceptuel, le concept de timbre tend à se relativiser pour laisser la place à une représentation plus générale où le phénomène sonore se caractérise par un certain nombre d'attributs dont il s'agit de déterminer la nature, le comportement et les fonctions. La distinction entre les attributs simples de hauteur, intensité et durée, d'une part et l'attribut de timbre d'autre part, elle même se relativise.

En fait Schoenberg prétendait déja : "*Je ne puis admettre sans réserve la différence que l'on a coutume d'établir entre timbre et hauteur sonore. C'est en effet par son timbre - dont une dimension est la hauteur - que le son se signale* " (Schoenberg 1911, 1983)
Wessel présente à la limite le concept de timbre comme inutile, lui substituant celui de paramètre perceptuel et préconise "*d'oublier le timbre pour composer avec les paramètres*" (Wessel 1985).

L'oreille est capable d'extraire des attributs du phénomène sonore, des variables indépendantes ou correllées, continues ou discrétisées, ou encore catégorisées, de percevoir des variations des relations de ces attibuts selon un certain nombre de modalités complexes.
Ces dimensions, ces variables ont un comportement qui va déterminer ce qui importe pour la perception et l'intelligence musicales : l'émergence de formes.
McAdams insiste sur la différence entre structure et forme (McAdams 1985) : une forme renvoie à ce qui est appréhendé, perçu par l'auditeur, c'est une immanence de la perception. Une structure peut exister sans être perçue comme telle (c'est-à-dire en fait une structure descriptible dans un mode de représentation occulte pour la perception).

La notion de forme est plus générale que celle d'objet (perceptuel). En effet, elle peut s'appliquer à des entités élémentaires, des sons isolés peuvent avoir une forme dans ce sens perceptuel, mais des éléments mis en relation soit simultanée, soit séquentielle, ou même les deux, et, qui plus est, placés dans un contexte peuvent avoir une forme au titre de ces relations ainsi que, à divers degrés, à celui de leur appartenance à un contexte.
A la question unique du timbre, se substitue alors une série de questions opératoires :

-comprendre comment l'oreille organise le sonore,
-comprendre dans quelles conditions le sonore est porteur de forme,
-comprendre comment produire le sonore pour qu'il remplisse ces conditions.

Conditions d'émergence des formes.

McAdams (McAdams 1985) en réponse à la deuxième question met en avant un certain nombre de critères pour la structuration du matériau sonore en formes élaborées et "musicales" à partir des données de la perception. Nous les résumons ici très succintement :
L'écoute musicale "focalise" sur des "entités", des catégories se présentant comme des groupes cohérents. La caractérisation de ces entités inclut :
- des "qualités": la qualité renvoie à un caractère distinctif uni ou multidimensionnel, mais ayant valeur intrinsèque (par exemple la brillance),
- des relations : les relations d'intervalles dans la musique tonale par exemple,
- des fonctionalités : exemple la fonction de l'accord majeur toujours dans le système tonal.

Les catégories doivent être ordonnées pour que les relations entre ces catégories soient fonctionnelles.
Les relations fonctionnelles peuvent être mises en échelle selon leur force et leur type.
Les catégories ont des qualités mais on peut aussi parler des qualités des relations entre catégories, la relation devient un élément de composition, il y a une possibilité de contrôler les propriétés qui procèdent des relations comme par exemple pour faire émerger un timbre de l'organisation d'un groupement.
Enfin, McAdams souligne l'importance de la notion d'invariance sous certaines catégories de transformations, c'est-à-dire la possibilité d'établir une relation d'identitée perceptuelle entre

deux entités différentes par ailleurs, comme l'identité de timbre sur toute l'étendue du registre d'un instrument, ou l'identité de relation d'intervalle au travers d'une transposition.

Structuration du flux sonore : fusion/ségrégation. Causalité et "fait causal".

Quant à la première question : "comment l'oreille organise le sonore ? ", des travaux tels que ceux de Bregman, Pinker, McAdams (Bregman & Pinker 1978, Bregman 1985, McAdams & Bregman 1979, McAdams 1982, ...), sur les phénomènes de fusion et de ségrégation auditives ajoutent à la psychoacoustique des éléments d'une importance sans conteste :

Une des premières fonctions structurantes du système perceptuel apparait dans sa capacité d'organiser le signal sonore en flux auditifs distincts. Cette faculté est évidente dans la fonction utilitaire de l'audition qui permet de distinguer plusieurs sources se manifestant simultanément. Mais cette fonction subsiste dans l'écoute musicale, au delà de ce rôle utilitaire. Bregman et McAdams ont étudié à partir de sons synthétisés, donc en l'absence de causes réelles, les critères acoustiques permettant d'obtenir une fusion, c'est-à-dire un regroupement de composantes pour constituer une même entité perceptuelle, ou au contraire pour obtenir une ségrégation, c'est-à-dire la séparation du flux entrant en plusieurs entités distinctes.

Rappelons une des expérimentations de Bregman & McAdams (Bregman & McAdams1979) qui met en évidence un phénomène de fission (ou ségrégation) mélodique à partir d'une série d'évenements purement séquentielle :
Cette série alterne des sons hauts et des sons bas à une certaine vitesse, les hauteurs consécutives des sons hauts et bas varient au cours de la séquence. Le phénomène de ségrégation, lorsqu'il se produit, se manifeste par le fait que la perception conclut à deux lignes mélodiques indépendantes alors que tous les évenements sont objectivement séquentiels. Les conditions dans lesquelles cette séparation se produit font intervenir les deux dimensions, temporelle et fréquentielle de manière dépendante : schématiquement, lorsque les évenements consécutifs sont suffisamment distants temporellement, la séparation ne se produit pas, quelle que soit leur distance fréquentielle. Lorsque la distance fréquentielle entre les sons hauts et les sons bas est trop faible, cette séparation ne s'opère pas non plus, quelle que soit la vitesse d'enchaînement. La séparation se produit en fonction d'une sorte de distance combinant l'écart temporel et l'écart fréquentiel. Si la distance ainsi considérée entre les évenements respectivement pairs et impairs par exemple, est plus courte qu'entre les évenements consécutifs (ce qui est possible si l'écart entre les sons hauts et les sons bas est suffisant), ces évenements seront liés entre eux, constituant deux lignes mélodiques et estompant la relation temporelle précise entre ces deux lignes.
Wessel (Wessel 1979) a généralisé cette expérience en substituant aux signaux purement sinusoïdaux des signaux de spectre complexe mais caractérisés par leur brillance, la hauteur d'un son sinusoïdal étant un cas particulier de la brillance. Le résultat obtenu est le même.

On ne peut parler véritablement ici d'un mécanisme d'inférence de la cause, dans la mesure où les sons produits ne sont en rien naturels et ne peuvent évoquer aucun objet définissable. Il est alors intéressant d'introduire une notion plus générale que la causalité et de parler de "fait causal".

Ce qui est causal ici est non pas le phénomène sonore élémentaire, mais son comportement.
On peut en effet expliquer la conclusion à laquelle parvient l'oreille dans ce cas en lui prêtant la faculté de juger, en dépit de l'aspect manifestement artificiel du son, de l'impossibilité d'une distance spectro-temporelle plus grande qu'un certain seuil pour deux évenements provenant de la même source. L'oreille reste attachée à l'identification de sources et "préfère" conclure à l'existence de deux sources plus plausibles même si celles-ci conservent un aspect artificiel inexpliquable.
Cette "distance spectro-temporelle" se rattache à un caractère des sources réelles. La hauteur ou la brillance d'un son émis par une source naturelle sont déterminées par des facteurs mécaniques (raideur, structure du matériau vibrant ou résonnant) et ces facteurs ne peuvent évoluer très rapidement compte tenu des "lois de la matière".

On pourra remarquer que cette expérience ne concerne pas à proprement parler le timbre puisqu'il s'agit de discrimination de formes mélodiques.
Mais les expériences de McAdams, sur des bases semblables s'attachent précisément au phénomène de fusion ou ségrégation du flux sonore produisant des "images auditives" relatives à cet aspect qualitatif du son que l'on a appelé timbre jusque là.
Les phénomènes sonores soumis au test dans ces expériences (McAdams 1982) ne sont plus des évenements séquentiels, mais simultanés. Plus précisément, le flux sonore est constitué ici d'un certain nombre de composantes spectrales contrôlables individuellement selon leur amplitude et leur fréquence. Le contrôle peut concerner l'évolution individuelle ou coordonnée des composantes, les enveloppes spectrales etc...

Dans les expériences de fusion, McAdams met à l'épreuve trois types de critères :

- l'harmonicité du contenu fréquentiel,
- la coordination des modulations des composantes spectrales,
- la relative familiarité des enveloppes spectrales.

Il montre alors que l'harmonicité est un critère de fusion très fort. Pour un son, la question est "être ou ne pas être harmonique". De nombreux sons inharmoniques provoquent une sensation de hauteurs multiples, ce qui est une forme de ségrégation. Toutes choses étant égales par ailleurs, un son harmonique "fusionne" mieux qu'un son inharmonique.
Or, rappelle McAdams, beaucoup de sources sonores auquelles nous avons à faire sont harmoniques, à commencer par la source vocale.
A nouveau, on peut dire ici que l'harmonicité est un fait causal, c'est à dire une propriété de sources naturelles. Retrouver cette propriété même si d'autres ne sont pas présentes, dans un son non naturel est un facteur structurant.

Pour la coordination des modulations et la familiarité des enveloppes spectrales, il en va de même. Cette coordination, qui intervient elle aussi comme facteur de fusion est un fait causal en ce sens que dans les sources réelles c'est en général un facteur mécanique qui la produit et qui agit globalement sur tous les modes vibratoires en préservant leur rapport de fréquence. Pour la familiarité de l'enveloppe spectrale, la référence au rôle de la position et de la forme des formants renvoie, comme nous l'avons déja évoqué, à la compréhension par le système auditif, de la structure productive en particulier pour le cas de la voix.
McAdams souligne, il ne faut pas l'ommettre, le fait que ces différents critères sont correllés et se confortent ou se contredisent les uns les autres à des degrés divers.
Les expériences duales sur la ségrégation permettent des conclusions de même nature.
L'asynchronie des phases transitoires de chaque composante produit une ségrégation. Le fait causal responsable est la globalité de l'action de l'excitation sur l'ensemble des modes d'une

structure vibrante qui, s'ils n'obéissent pas nécessairement tous à la même loi, apparaîtront avec une synchronie liée à l'occurrence de l'excitation. L'absence de synchronie détruit la référence possible à un fait causal qui correspond à un processus de "mise en énergie".
On pourrait poursuivre ainsi pour les autres facteurs mis en évidence par ces expérimentations. Ce n'est pas notre propos ici d'en redonner une description détaillée. Nous souhaitons avant tout pointer cette notion de "fait causal" que nous avons distinguée de la causalité stricte.

Bregman et Pinker (Bregman & Pinker 1978) évoquent deux principes se référant à la Gestalttheorie : celui de "continuité" (*continuation*) et de "destin commun" (*common fate*). La "bonne forme", la "cohérence temporelle" etc... sont ce que nous appelons donc des "faits causaux". Ce qui est causal dans la notion de destin commun n'est pas tant le destin lui-même que le fait qu'il soit commun. Et la perception a cette faculté de discerner ce qui peut être un "destin", de découvrir ce qu'il est sans a priori, de le considérer comme une donnée nouvelle, ... de ce qui subit ce destin.

Timbre et causalité.

Revenons alors une dernière fois, à la lumière de ces remarques, au timbre.
Risset, en se référant aux travaux sur la fusion et la ségrégation indique : "*La notion de timbre implique la fusion, elle correspond à la qualité sonore d'un ensemble de composantes intégrées en une entité auditive et assignées à une même source sonore réelle ou virtuelle*", (Risset 1986).
Nous nous arrêterons à cette formule qui va dans le sens de nos propos, cependant nous voudrions attirer l'attention sur une difficulté qu'elle ne lève pas.

Considérons un phénomène aussi simple que le son produit par une bille qui rebondit sur une surface dure. La suite itérative accélérée des courtes percussions signe le phénomène et produit ce que l'on est en droit d'appeler une entité auditive, tant le phénomène est perceptuellement cohérent. Cette entité est assignée à une source sonore que l'on est en mesure de très bien décrire. Pouvons nous dire pour autant que nous avons là un timbre ? Non. On prendra en considération le timbre de chaque percussion individuelle, mais pas le tout comme un timbre.
Cet exemple montre que la notion de source est nécessaire - " *la notion de timbre **implique** la fusion ...*" - mais n'est pas suffisante.

Par ailleurs, source et causalité ne peuvent être confondues, la source inclut la cause, mais peut être plus large. Un son instrumental bien identifié renvoie à une source. Or, dans un son instrumental, il y a deux contributions que la perception sait séparer : ce qui indique un objet stable (l'instrument), et ce qui indique une action, une intention (celle de l'instrumentiste) appliquée à cet objet. La notion de causalité contient celle de stabilité, de prévisibilité. L'action de l'instrumentiste répond en partie à des contraintes prévisibles, celles qui sont liées à la morphologie des organes effecteurs et à des schèmes moteurs stables, mais elle est toujours susceptible, dans le cadre de ces contraintes de contenir une part d'imprévisible, d'arbitraire.

Pour définir la causalité, il faut évacuer de la source ce qui procède de l'intention pour ne garder que ce qui correspond à des propriétés stables et prévisibles. Ces propriétés sont alors principalement celles d'un objet physique lorsque le phénomène sonore résulte d'une action humaine sur un corps sonore. Remarquons au passage qu'un phénomène sonore n'impliquant aucune intervention humaine peut être porteur de signification pour le sujet qui l'observe, mais

en aucun cas porteur d'une signification voulue par un autre sujet. Un acte minimal est requis, ne serait-ce que pour désigner à l'écoute ce phénomène (mais la création artistique est-elle communication ? Molino et Nattiez mettent cet aspect en question (Nattiez, 1987).
Pour ce qui nous concerne, nous pensons que le terme et les modalités de la communication sont à mieux définir eux-mêmes, mais qu'en tout cas, si l'activité artistique n'a pas fonction communicationnelle, entre autre, c'est que quelque chose nous a radicalement échappé dans ce qui justifie les quêtes humaines les plus impérieuses).

Mais pour en revenir à la causalité et sa définition, il s'agit dans l'usage que nous avons fait ici de ce terme, des objets où phénomènes du monde réel dans ce qu'ils sont totalement indépendamment de toute intervention humaine.

Enfin, pour sortir de ce chassé-croisé entre le timbre, la source et la causalité, on pourrait être tenté de rattacher le timbre non plus à la source, mais à cette permanence qu'est la causalité, vue cette fois sous cet angle très général. L'exemple de la bille nous l'interdit tout autant. En effet, la bille rebondissant est bien une causalité, libre après un instant initial infime, de toute intervention, mais nous avons vu qu'elle ne correspondait pas à un timbre.
Alors que nous acceptons certains aspects temporels dans le timbre, nous en évacuons d'autres qui sont pourtant liés aux propriétés exclusives de la source ou de la cause physique. L'assignation des composantes à une cause (réelle ou virtuelle) est bien en jeu, mais il s'agit de causes particulières, dont la particularité ne s'explique que par une particularité du système perceptuel lui-même.

Le système perceptuel, indépendamment de cette fonction d'identification et en tant que système qui doit répondre à des situations variées tout en restant efficace, est aussi un système de représentation, construit avec sa "technologie" propre (biologique). Il possède ses lois intrinsèques, opère ses propres simplifications. L'exemple que nous venons d'évoquer montre une telle simplification : la séparation par une frontière fixe entre des phénomènes perçus comme itératifs et des phénomènes perçus comme vibratoires. Cette frontière ne coïncide pas toujours, vu du côté de la source, à celle qui sépare l'objet de ce qui le sollicite. Le timbre concerne le vibratoire. Ainsi, donc, même au niveau le plus élémentaire, la notion de timbre est alors à la fois liée à des propriétés du monde objectif et à des nécessités intrinsèques au système perceptuel qui ne s'expliquent pas en fonction du premier.

Mais, pour ce qui concerne la structuration du sonore, nous avons vu aussi que la notion de timbre n'était peut-être pas la plus générale et la plus utile. L'inférence de la cause, l'identification d'un "fait causal" et tout ce que la perception et la construction mentale peuvent élaborer à partir des attributs "porteurs de forme" constituent des points d'appui peut-être plus opératoires.

La représentation.

De la causalité physique stricte au fait causal, il y a cette première "désubstantiation" qui démontre la possibilité de séparer les propriétés, les formes des objets de nature, de leur matière et d'identifier, comparer, différencier deux objets par leurs propriétés plutôt que par leur substance : un élément du passage du concret à l'abstrait, du monde des faits à celui des représentations.

La seconde fonction fondamentale des sens, si la première est de renseigner le sujet sur les objets et les évenements du monde extérieur, est de permettre la communication entre les sujets. Cette fonction, lorsqu'elle met en oeuvre plus que les organes naturels d'émission et de perception, c'est-à-dire lorsqu'elle est médiatisée, ne peut l'être qu'avec des objets qui sont des substituts, c'est-à-dire qui sont à la fois des objets réels et qui doivent être pris pour quelque chose qu'ils ne sont pas. L'identité de certains aspects, de certaines propriétés en dépit de la différence sous certains autres aspects est une condition nécessaire de la représentation. La représentation est une condition nécessaire de la communication, la création musicale est un mode de communication.
Du fait causal aux formes abstraites, à l'"idée pure", il y a un certain nombre de niveaux à franchir. De la correspondance des apparences perceptives, des fonctions et des relations jusqu'à celle qui s'établit par convention et apprentissage, il y a toutes les fonctions du signe dans son sens le plus général.
Dans toute sa complexité, la structure musicale est faite d'indices de symboles, de signes et, explique Nattiez (Nattiez 1987) "*il y a un trait commun à toutes ces catégories : les phénomènes musicaux sont de nature sémiologique parce qu'ils renvoient à quelque chose d'autre dans le monde extérieur ou dans la pensée de ceux qui les utilisent*", et il ajoute, citant Molino : "*Le point de départ de toutes les définitions du signe est, chez les scolastiques comme pour les théoriciens contemporains, dans une donnée intuitive difficile à préciser de façon rigoureuse : c'est la notion de représentation ou d'évocation, résumée par la formule* aliquid stat pro aliquo..."

Le processus de représentation, ou plus précisément ce qui est représenté, symbolisé dans l'oeuvre musicale, est complexe et multiforme, polysémique. Ce qui est signifié peut aller du plus concret au plus abstrait par un jeu de récurrence illimité.
Cependant la musique a un ancrage absolu dans la substance qu'est la vibration sonore. Tous les niveaux de représentation s'appuient sur une base constituée par l'expérience sensori-motrice du monde objectif et il est difficile d'imaginer que l'oreille, quelle que soit la nature du substitut, puisse se passer de considérer que la vibration sonore est l'effet d'un objet matériel qui vibre sous l'action d'un évenement qui lui est extérieur ou sous l'action d'une intervention humaine.

III. Déplacer le propos : les conditions de la création.

La mutation technologique apporte des éléments de réponse aux attentes du début du siècle quant à une science et un art du timbre et plus généralement de la totalité sonore et de ses attributs multiples. Des frontières se dissolvent : on peut, avec l'ordinateur, comme l'a souvent rappelé Risset, "non plus seulement composer avec les sons, mais composer les sons", effectuer les deux dans un même modèle, composer les attributs pour faire émerger, se dissoudre ou se transmuter des formes ...

Mais, avons nous signalé dès le début du deuxième chapitre, cette mutation ne touche pas que la science et la connaissance du phénomène sonore, elle transforme le "mode opératoire", la relation ergonomique du créateur à l'outil ; ce dernier s'emploie d'ailleurs au singulier.
C'est le "niveau poiétique" qui est foncièrement "remis en cause". Et si une continuité est imaginable et réalisable entre les anciennes catégories sonores et le nouvel espace, les catégories de la facture traditionnelle du son - il faut entendre par là tout ce qui intervient depuis la lutherie jusqu'à l'exécution en passant par l'apprentissage instrumental et la composition - s'évanouissent.
La cause physique disparait, la registration en tant que niveau intermédiaire stable n'a plus de raison d'être, la notion d'instrument n'a plus de sens : l'ordinateur n'est pas plus un nouvel instrument qu'un orchestre, un compositeur un instrumentiste ou un chef d'orchestre "artificiels". Il est envisageable par contre comme un outil pour la création musicale.
Il est remarquable que tous les discours suscités par ces nouvelles conditions n'aient en fin de compte jamais dépassé le cadre des trois questions que nous avons rappelées plus haut :

-comprendre comment l'oreille organise le sonore,
-comprendre dans quelles conditions le sonore est porteur de forme,
-comprendre comment produire le sonore pour qu'il remplisse ces conditions.

Il est clair que les deux premières questions, pour fondamentales et nécessaires qu'elles soient, ne sont pas suffisantes. La troisième ne comble pas l'insuffisance.
En effet, même si l'ordinateur est un outil "qui peut se dire universel", il ne dispense pas et justement bien au contraire de poser la question des conditions dans lesquelles l'activité de création peut se développer.
Toutes les analyses évoquent avec une précision poussée les subtiles constructions, les finesses de coordination, d'agencement, de compréhension des phénomènes, mais toujours occultent, comme pour entretenir un mystère, les actes, les reflexions, les essais, les dialogues, les luttes avec le matériau, l'heuristique, en un mot le processus de création lui-même.
Or une transformation aussi radicale que celle qui bouleverse toutes les catégories du mode opératoire n'autorise pas à éluder cette question.

Nous considérons que cette question même est préalable et probablement plus importante, dans un premier temps du moins, que l'investigation complète de l'univers sonore devenu possible.
Savoir comment obtenir tel effet précis ne suffit pas à la création. Cela suppose que l'effet en question soit déja conçu. Or le processus de création est aussi celui de la génèse des idées. Un outil de création doit permettre cette génèse.

L'outil informatique projeté par Wessel (Wessel 1983), dont une réalisation partielle consiste en ce dispositif qu'il a mis au point à l'IRCAM, permettant le contrôle du timbre en temps-réel à partir d'un espace bidimensionnel représenté sur un terminal graphique (Wessel 1979), a beaucoup attiré notre attention, car il est un aboutissement de ce que nous appellerons le "paradigme de la psychoacoustique" et nous permet d'en expliquer l'insuffisance, les limites.
Cet outil suppose une connaissance, sinon totale (ce qui est illusoire), du moins approfondie, de l'espace perceptuel et du fonctionnement de ses dimensions, de telle sorte que soit proposé au créateur une série de "commandes" lui permettant de manipuler directement ces dimensions soit par prescription et en temps-différé, soit gestuellement et en temps-réel.

Peu importe ici, à la limite le temps-réel ou la faisabilité actuelle d'un tel outil. Nous prétendons que cet outil est non seulement insuffisant, mais qu'il n'est pas vraiment utile au processus de création. Il ne prend en considération qu'un cas très particulier de l'heuristique : celui où la découverte résulte de la mise en relation selon des configurations inédites, des paramètres perceptuels. Ou alors, il suppose l'idée préconçue et ne se présente que comme un moyen unilatéral d'expression de cette idée.
Cette première critique est cependant insuffisante pour démontrer en quoi cet outil n'est pas un outil de création. Nous y reviendrons plus loin. Auparavant nous devons préciser ici comment nous caractérisons le processus de création.

Une telle caractérisation est naturellement très ambitieuse car s'il y a complexité et diversité, c'est bien ici. Mais notre propos n'est pas tant d'achever une telle analyse avant d'en tirer des conséquences opératoires que de poser quelques bases qui devraient permettre un développement simultané et réellement coordonné d'une recherche fondamentale avec un recherche créative.

Nous invoquons, au stade actuel de notre reflexion quatre "principes" :

Le premier principe considère que l'activité de création est avant tout une relation, un dialogue entre ce que l'on peut appeler d'un côté la pensée (du créateur) et de l'autre, dans un sens très général, un matériau, qui permet à cette pensée de se constituer, de s'extérioriser et d'être communiquée.
Nous entendons par matériau quelque chose qui se présente comme un ensemble de contraintes qui préexistent à une certaine phase de la relation. Ces contraintes peuvent cependant avoir été choisies ou construites par le créateur, mais il peut aussi les ignorer ou en avoir une connaissance incomplète à un moment donné de son expérience.

La notion de matériau n'a pas ici le sens habituel, tel qu'on le rencontre par exemple dans le dipôle "matériau/organisation". Nous appellons "matériau" aussi bien des systèmes matériels que des systèmes idéels. Alors qu'aujourd'hui précisément, on peut constituer sous la forme de programmes ou de systèmes, comme dans le domaine de l'intelligence artificielle, des modèles du raisonnement ou plus généralement de certaines activités mentales, il n'est pas déraisonnable de considérer certains systèmes de la pensée sous un angle objectif bien qu'ils soient internes au sujet. Le recours à des "modèles compositionnels" et la dialectique qui s'établit entre des modèles idéels et leur matérialisation vont dans le sens de cette "objectivation" .

L'appartenance du système à la pensée n'invalide en rien l'idée d'un dialogue. L'activité mentale n'est-elle pas sous certains aspects un dialogue permanent du sujet avec lui-même ?
Cette notion de "matériau" est également très générale en ce sens que les contraintes en question peuvent être les contraintes d'un corps sonore matériel, d'un processus de production sonore, aussi bien que celles d'un système de règles compositionnelles.
Entre deux tels extrêmes, on le conçoit, s'établissent de nombreuses catégories. Mais ce qui est commun à toutes ces catégories est cette notion de contrainte.

Dire qu'il s'agit d'une relation revient à reconnaitre sans réserve que deux situations duales peuvent se présenter : s'il faut appeler "idée" ce qui sera par la suite communicable, sensible et compréhensible par un destinataire, on peut dire que l'idée peut se trouver dans la pensée avant toute extériorisation, toute expérimentation, mais qu'elle peut aussi se trouver

dans l'objet, dans une configuration du matériau avant de se trouver dans la pensée.
Il y a une relation "systémique" entre le système que constitue le créateur et celui que représente le matériau, et bien que l'on doive accorder la suprématie à la pensée, la réunion des deux systèmes constitue un nouveau système qui est à la fois plus et moins que la somme de ses parties.
L'objet ou le matériau peut proposer une configuration qui n'aurait pas émergé d'elle-même du seul système de la pensée. Cette configuration peut alors servir de révélateur d'une idée qui n'était que potentiellement présente, mais elle peut aussi être adoptée, apprise, intégrée avec ses arbitraires et devenir support d'un code, de variations, d'un langage.
Le matériau n'est pas simplement un moyen d'extériorisation, mais un partenaire renfermant son potentiel de création de situations inédites. Il ne traduit pas, il révèle en se révèlant lui-même.

Le deuxième "principe" distingue des catégories de ce dialogue et en particulier deux modes exclusifs mais complémentaires : d'un côté ce que nous appellerons le "mode compositionnel" et de l'autre le "mode instrumental".
Il s'agit là de noms-codes dont le choix n'est peut-être pas très heureux. Ils sont inspirés des deux situations traditionnelles qu'ils évoquent, mais avec cependant l'idée d'une généralisation.

Le mode compositionnel correspond avant tout à une activité dégagée des contingences matérielles et en particulier temporelles propres à l'objet final, c'est-à-dire au phénomène sonore. Il se développe "en temps-différé", pour emprunter ce terme devenu banal.
Le mode instrumental est son dual dans la mesure où, par essence, il se développe dans le temps du phénomène final, en "temps réel" donc et en prise directe (gestuelle entre autres) avec les processus producteurs.
Il va sans dire que les processus et les moyens en oeuvre dans les deux cas sont de nature complètement différente. Dans le premier, en l'absence des phénomènes sonores et des processus de production, il faut disposer pour les "manipuler", de représentations. Ces représentations sont nécessairement atemporelles, c'est-à-dire par exemple graphiques. La partition traditionnelle est un exemple particulier d'une telle fonction de représentation de support bidimensionnel et atemporel, représentation qui mêle souvent description perceptuelle, description opératoire et description (ou au moins désignation) du processus producteur.
Dans le second, la présence du processus producteur est impérative, ainsi qu'un certain nombre de possibilités d'actions physiques (gestuelles) sur ce processus et de perception de ses comportements.

Les deux modes sont nécessaires et complémentaires dans la mesure où les limites de l'un justifient l'existence de l'autre.
Il est vrai que le temps-réel est un piège si l'on en attend la possibilité d'"*accorder le son à la main conformément à des exigences intérieures* (...)" et il est certain "*que le tatonnement mène rarement au but*" (Risset 1986). Une activité distanciée par rapport au phénomène sonore et par rapport au temps permet un conception anticipatrice et globalisante. Mais il ne s'agit pas de cela dans ce que nous appelons le mode instrumental. Il s'agit d'une part d'une situation où la relation entre le sujet et l'outil est exploitée, dans le sens émetteur comme dans le sens récepteur, au maximum des capacités informationnelles des canaux humains, d'autre part d'une relation privilégiée où il ne s'écoule aucun délai entre l'interrogation et la réponse. L'aspect parfois vivace et volatil de l'inspiration peut y trouver un répondant immédiat. L'improvisation est un terme qui a très mauvaise presse dans certaines forteresses de la musique contemporaine.

Nous n'emploierons donc pas ce terme, mais il faut reconnaitre la validité de ce mode impliqué dans le temps. Si certaines formes, pour émerger, nécessitent une gestation qui n'est possible que dans une méditation distanciée et une construction délibérée, d'autres ne peuvent être découvertes que dans les conditions de cette implication dans la réalité du temps. Les processus mentaux ont aussi leurs exigences temporelles. Ceci n'exclut en rien une distanciation à leur égard, dans un deuxième temps, pour peu que l'outil utilisé, comme c'est le cas précisément avec l'ordinateur, ait la capacité d'une part de mémoriser objectivement l'expérience, d'autre part d'en permettre d'autres représentations, en particulier atemporelles.

Le mode compositionnel et le mode instrumental correspondent à des catégories extrèmes, mais il n'y a pas de rapport de préseance entre les deux a priori : s'ils sont difficilement simultanés, il y a plus une logique d'alternance entre les deux, qui peut se déplacer d'un pôle à l'autre, qu'une chronologie unique d'un mode à l'autre.

Loin de nous donc, l'idée de privilégier l'un ou l'autre mode, mais dans la mesure où nous les considérons comme nécessaires l'un et l'autre et l'un à l'autre, nous oeuvrons dans le sens d'une réhabilitation du mode instrumental.

Le troisième principe est en quelque sorte une extension du dipôle "permanence/variation" qui a une portée très générale et que l'on peut rapprocher d'autres couples rencontrés ici et là dans dans les diverses analyses : "invariance/transformation", "référence/invention", etc...
La permanence et la variation interviennent à l'intérieur du discours musical : la permanence d'une formule mélodique au travers d'une transposition, la permanence d'un "intervalle de timbre" également au travers d'une "transposition" dans l'espace des timbres, notion généralisée par McAdams lorsqu'il évoque le principe de "*permanence d'entitées musicales sous certaines catégories de transformations*".
On rencontre cette idée dans la définition schaefferienne du timbre instrumental : "une variation musicale s'appliquant à une permanence causale".
L'évolution de tout domaine esthétique est soumise également à cette loi, où la nouveauté a besoin pour se manifester, d'un ancrage dans le connu, dans les valeurs précédemment en cours ou dans des références identifiables.
On identifie également cette articulation dans la recherche des attributs acoustiques des sons instrumentaux dans le domaine de la synthèse.
On pourrait multiplier les exemples à l'infini.

Mais ce principe est en cause également dans celui de la représentation au sens le plus général, où d'un objet ou un univers de référence on passe à un objet ou un univers représentés à la fois en assurant une permanence, une identité, et une variation, une différence.
La création artistique, en tant que construction de représentations établit cette articulation entre un monde de référence, qu'il soit le monde physique ou celui de la pensée, et un monde virtuel qui peut devenir constitutif de la pensée.
L'artifice est une nécessité, mais l'"authenticité" ou la plausibilité en est une autre nécessaire à la première.
Dufourt affirme (Dufourt 1977) : "*L'essence de la pensée musicale, c'est le subterfuge. Pis encore : tous les liens de cause à effet, toutes les anticipations subissent des distorsions, toutes les finalités s'altèrent, toutes les interventions s'oblitèrent*".

Mais pour distordre, il faut avoir des causes et des anticipations à distordre, pour oblitérer, il faut avoir des finalités et des interventions à oblitérer.
La référence est une nécessité que l'artifice nie, renforce ou contredit.
Le fonctionnement structurant du système perceptuel montre bien qu'au niveau le plus élémentaire et le plus inconscient, des causes ou des "faits causaux" sont recherchés en tant que permanence auxquelles des distorsions, des variations, des mutations pourront s'appliquer.

Du phénomène sonore élémentaire à la structure musicale complexe, il est clair que ce jeu de permanence/variation prend des formes extrèmement diversifiées, dont nous ne saurions dresser l'inventaire ici, à l'intérieur des objets ou du discours, mais aussi dans leurs relations extrinsèques au contexte culturel et au monde réel.
Au niveau le plus élaboré, une forme évoque, représente, même s'il est difficile et peut-être inutile de dire quoi. Les formes sont des nécessités de la musique mais ne lui suffisent pas en elle-mêmes. Les formes ont "une âme" qui ne se réduit pas à leurs caractéristiques abstraites et intrinsèques. La forme "pure" est une limite, un exercice technique nécessaire à une certaine phase de crise de la création. Et la forme pure "sans signification" , plus largement un "art non signifiant" n'échappe pas à cette signification ultime qui est de prétendre ne rien signifier.
Au niveau le plus élémentaire, celui de la substance nécessaire qu'est la vibration sonore, si l'oreille montre une "permissivité" étonnante en s'intéressant à des phénomènes proprement inouïs, il est difficile d'imaginer qu'elle puisse se passer d'une authenticité essentielle et minimale. Quelle que soit la puissance des outils, le degré d'abstraction qu'ils permettent d'atteindre, il est difficile de concevoir que l'édifice musical puisse s'élever très haut sans s'appuyer sur des fondations consistantes. Ces fondations sont celles du sonore : le son restera pour l'oreille l'effet d'une cause, le produit d'un objet matériel qui vibre, qu'elle soit ou non abusée par un artifice, que ce soit un objet réel ou virtuel.

Nous complèterons enfin par un quatrième principe.
Nous venons d'insister sur le fait que l'objet final de la musique, l'oeuvre, était une représentation, que ses divers éléments renvoyaient de diverses manières à quelque chose soit dans le monde extérieur, soit dans la pensée du créateur. En fait, il n'y a pas toujours une frontière nette entre l'activité créatrice et le matériau, d'un côté et l'objet créé de l'autre; pour une part, la fonction de représentation s'étend à la relation créatrice elle-même et au matériau.
Cette relation peut-être médiatisée par une chaîne de codes abstraits et conventionnels, mais elle peut aussi avoir en elle même, indépendamment de la nature du dialogue (instrumental ou compositionnel) un caractère "symbolique" (au sens d'une correspondance "motivée" entre ce qui représente et ce qui est représenté, que Saussure (Saussure 1915, 1974) oppose à la correspondance arbitraire ou conventionnelle).
Prenons un exemple, et pour montrer la portée générale de cette idée, dans un domaine de création autre que musical. Dans l'art récent de l'image animée, l'"Animation", une technique particulière consiste à manipuler devant la caméra utilisée en "vue-par-vue", des objets, par exemple des marionnettes, qui possèdent des propriétés analogues aux êtres qu'elles sont censées représenter : la morphologie, la nature des articulations, les contraintes mécaniques qu'elles imposent qu'elles imposent. Ces objets ont la fonction du "matériau" tel que nous l'avons défini, et entre l'animateur et ce matériau, il s'établit une relation particulière où le premier opère une sorte de transfert. Ses actions sur la marionnette sont des transpositions, des représentations motrices de mouvements corporels dont il a pour lui-même des modèles

intériorisés. De ces actions et des contraintes du matériau, il restera une trace, par le fait de la prise de vue, qui constituera l'objet esthétique final.
Entre la marionnette et l'instrument, en tant qu'objets manipulables, il y a une certaine similitude et entre l'instrumentiste et l'instrument, il s'établit une relation riche, gestuellement et corporellement "motivée". Même s'il est difficile de dire ce que "symbolise" cette relation, il est clair qu'elle n'est pas entièrement conventionnelle, arbitraire, abstraite, et que sa nature est un stimulant particulier du processus heuristique.

Un aspect dual de cette extension de la fonction symbolique de l'objet à l'outil pour le produire, réside dans le fait que l'objet esthétique n'est jamais complètement coupé de ce qui a permis sa création. Il contient des indices de sa génèse et il semble que ce soit même une condition du plaisir esthétique : l'objet à la fois joue sa fonction représentative propre et indique qu'il s'agit d'une représentation, d'un jeu dont il révèle ou dissimule malicieusement les règles. On peut rapprocher cela des propos de Wallon citant Janet (Wallon 1942) : "*Les illusions du jeu chez l'enfant ont pour contrepartie exacte le sentiment et le désir continu de la fiction. (...) S'il présente un bout de papier comme un mets succulent, l'écart même des deux objets est un stimulant de son plaisir*". Ce plaisir particulier est commun à l'activité ludique et à l'activité de création artistique.

S'il en est ainsi, il faut alors considérer que le caractère authentique ou artificiel, symbolique ou arbitraire, homéomorphique ou anisomorphique vaut aussi pour la relation qui s'établit entre le créateur et l'outil.

Outil de création.

De cet ensemble de considérations, nous tirons non plus seulement des éléments pour comprendre et organiser le sonore, mais pour définir et construire l'outil de création.

La remarque de McAdams sur la nécessité des catégories dans les attributs perceptuels pour que ceux-ci soient porteurs de forme se transpose du niveau perceptuel (esthésique) au niveau de la production (poiétique). Les relations du créateur à l'outil de création doivent être définies et catégorisées pour que le processus de création puisse se développer.
Par ailleurs, un lien entre les catégories traditionnelles et les nouvelles catégories doit être possible, les secondes devant inclure et généraliser les premières.

La première condition que doit remplir cet outil est de permettre à la relation du créateur au matériau de s'exercer, ce qui suppose l'existence du matériau et de modes de dialogue.
L'ordinateur ne se présente pas comme un matériau défini. Son "universalité" peut s'exprimer en disant que c'est un univers sans contraintes, où tout est possible. Il convient toutefois de nuancer cette notion. Elle n'est que relative. Ce qui est universel c'est l'idée de l'ordinateur, la machine de Turing, qui n'a jamais existé que sur le papier. Les machines réelles sont toutes soumises à l'évolution des performances de la technologie et en particulier au facteur éminement déterminant qu'est le temps des traitements, indépendamment de leur nature (séquentielle, parallèle, en réseaux, etc...). L'ordinateur réel présente ses propres contraintes.

Cependant, si ces contraintes sont celles avec lesquelles l'informaticien doit en permanence composer, et bien qu'elles les conditionnent, elles sont d'un autre ordre que celles qui concernent le processus de création. Par rapport à ce dernier l'ordinateur n'apparait que comme un espace vide, une page blanche qui ne contiendra que ce que l'on y écrira. Cette situation est peut-être la première caractéristique des nouvelles conditions de création : quelle que soit la nature du matériau, du processus sonore aux modèles compositionnels, le créateur doit entièrement et préalablement les connaître, les définir, les caractériser pour les "implanter" dans la machine. En ce sens, l'ordinateur a un statut qui n'a pas d'équivalent par le passé. C'est un moyen de représentation - il peut remplir cette fonction jusqu'à un degré qui n'a pas de précédent - mais il n'est que cela. Ce n'était pas le cas avec l'instrument, au moins au niveau de la cause productrice du phénomène sonore qui était réelle.

La seconde condition est que l'outil de création soutienne les deux modes de relations, instrumental et compositionnel, ainsi qu'une articulation entre les deux.
Chacun des modes suppose des catégories spécifiques de matériaux et des conditions de dialogue appropriées.
Le mode instrumental ou "temps réel" mettra en oeuvre des processus (ou modèles) de production sonore, c'est-à-dire des systèmes capables de produire de vibrations sonores en réponse immédiate à des actions qui impliquent nécessairement le geste (le geste instrumental). Ces actions gestuelles doivent pouvoir être saisies par le dispositif, selon toute leur finesse, variété et pertinence.
Le mode compositionnel ou "temps différé" mettra en oeuvre d'autres catégories de modèles qui ne pourront traiter, en leur absence, que des représentations structurelles et atemporelles des processus, des actions ou des phénomènes sonores, que ces représentations soient des représentations à destination du créateur ou des représentations internes à la machine. Ces modèles pourront rester "idéels" ou se matérialiser en programmes ou systèmes matériels.
Ces deux modes sont "catégoriels" c'est-à-dire qu'il est difficile d'envisager un passage continu de l'un à l'autre. Aussi, dans un premier temps, l'articulation entre les deux peut être réalisée en considérant que les produits du premier deviennent les objets du second. Ce sont ces objets que les modèles en cause dans le second devront traiter.

Enfin, la nécessité de références connues a une implication sur la détermination des modèles, qu'il s'agisse des modèles pour la production du son ou pour leur articulation.
Mais nous voudrions en venir ici au point de départ ultime et singulier de notre approche : nous avons prétendu plus haut que tout l'édifice musical reposait sur des fondations d'une unique nature : la vibration sonore. "*La musique* (...) *n'existe que par son incarnation dans le temps et dans le son*" (Risset, 1986). Même si l'oreille ne demande qu'à se laisser abuser, dérouter, elle réclame, nous l'avons souligné plusieurs fois une "authenticité". Cette authenticité, même si elle n'est que représentée, est une nécessité. Nous en déduisons la nécessité, même s'il ne faut la considérer que comme un point d'ancrage parmi d'autres, d'introduire pour le matériau élémentaire autant que pour la relation élémentaire, des modèles causaux.

Pour la production sonore, le modèle causal est une représentation donc, non pas d'un signal sonore présentant tous les aspects d'un phénomène produit par une cause réelle plausible, mais une représentation authentique de la cause elle-même. Ce qui est à représenter n'est pas l'effet, mais la cause. L'ordinateur permet une telle démarche. La catégorie des modèles de synthèse qu'il est convenu d'appeler aujourd'hui les "modèles physiques" et qui sont des simulations numériques à partir des équations mécaniques des corps vibrants répond à ce mode de représentation.

Mais nous allons plus loin. En effet, il ne s'agit pas, en vertu de notre "quatrième principe" de permettre cette authenticité pour le modèle de production uniquement, mais aussi pour la relation que le créateur entretient avec lui.
Le recours au modèle physique se prolonge, dans notre approche par une restitution des conditions d'une relation instrumentale entre l'utilisateur et la machine au niveau de la production du son. Cette relation instrumentale se définit très précisément par le fait qu'elle est sensori-motrice et multisensorielle. Sensori-motrice parce que, dans cette relation particulière, l'action (gestuelle) et les réponses de l'objet sont simultanées. Multisensorielle parce que le canal auditif n'est pas le seul en cause. En effet, toute relation avec un instrument réel, ou plus généralement avec un corps sonore quelconque, fait intervenir trois modalités sensorielles qui, au premier niveau expérimental sont intercorrellées : la perception auditive, bien évidemment, mais aussi la perception visuelle (un corps sonore ou un instrument ont des formes et des mouvements visibles et informatifs) mais plus encore la perception tactilo-kinesthésique. Les organes gestuels sont des canaux bilatéraux. Ils permettent de manière indissociable, l'action et un mode de perception directement associé, qui lui aussi informe sur la nature de l'objet. Le rôle du tactile est une évidence dans le jeu instrumental, non seulement en ce qu'il intervient dans la conduite et le contrôle du geste effecteur, mais parce qu'il est une des modalités de connaissance de l'objet et qu'entre ses comportements sensibles par l'ouïe et par le toucher, il y a une cohérence qui tient à la nature intrinsèque de cet objet. L'authenticité de la relation et celle de l'objet sont donc tout-à-fait liées à cette conjonction.

Plus loin encore : le processus producteur de son peut être élémentaire ou complexe, mais s'il est complexe, il doit pouvoir être conçu et construit comme une combinaison de processus élémentaires sans qu'il y ait une différence de nature des uns à l'autre. Les objets élémentaires sont alors des "objets instrumentaux" au sens où ils doivent permettre en eux-mêmes une relation instrumentale comme nous venons de la définir, mais ils doivent également pouvoir être combinés à d'autres objets selon le même mode. La relation entre deux composants simples dans un objet composite est alors de même nature que la liaison entre un composant quelconque et l'expérimentateur. Cette liaison, qui est typiquement une liaison mécanique, est à double sens. Les communications entres composants, comme la communication avec l'opérateur humain, sont des couples d'entrées/sorties associant deux variables duales (par exemple forces et déplacements).
La référence causale et la relation instrumentale impliquent comme seule forme possible du processus de production une forme en réseau avec des intercommunications à double sens entre les noeuds, et non plus seulement une forme en arborescence avec des communications orientées. Vus sous cet angle, les systèmes tels que MUSIC V ne peuvent intégrer le modèle causal, mais il en est ainsi pour de nombreux autres procédés actuels dès lors que leur forme répond de l'arborescence et non du réseau.

Les modèles causaux n'excluent pas cependant leur dépassement ou le recours à de tous autres modèles, et la forme en réseau ne prédétermine rien quant à la fonction des noeuds. Ces noeuds peuvent aussi bien correspondre à des modèles fonctionnels quelconques. Par ailleurs, les formes arborescentes et à liaisons orientées peuvent être considérées comme des cas particuliers de réseaux. Le réseau, qui est plus général, n'interdit pas d'autres formes et d'autres modèles que les modèles causaux. Considérant simplement que ces derniers doivent être possibles, la forme réseau est alors une nécessité.

Pour finir, nous décrirons maintenant les catégories complètes du niveau poiétique.

Les catégories du niveau poiétique.

Nous avons donc déja introduit deux catégories en évoquant la relation instrumentale et l'activité compositionnelle.
On pourrait y rajouter sans qu'il soit nécessaire de la justifier par de nombreuses explications la situation d'"interpretation".
En effet, dans le contexte traditionnel, toute oeuvre fait l'objet, à la fin du processus, d'une ultime intervention créatrice, celle du ou des interprètes, qui se saisissent d'un matériau particulier : la combinaison partition-instrument(s), pour donner une "exécution". Cette exécution n'est pas une traduction, la partition ne détermine pas tout et l'interprète s'implique dans une relation qui est bien une relation de création dans la mesure où il apporte sa propre contribution. Le système interprète-partition-instrument est plus que la somme de ses parties. Pratiquement, la situation d'interpretation fait intervenir des moyens proches de celle que nous avons appelée situation ou expérience instrumentale. C'est le rapport entre ce qui est prédéterminé dans l'ensemble des modèles en oeuvre et ce qui reste libre qui change.

Mais il y a une catégorie nouvelle, qui n'a pas d'équivalent par le passé du moins pour ce qui concerne strictement le musicien : on pourrait la rapprocher de la lutherie, mais celle-ci incombe maintenant au créateur. Il doit en effet au premier contact avec l'outil, commencer par construire le matériau producteur du son. Nous appellerons instrument ce dernier, pour renouer contact avec les catégories traditionnelles, mais en soulignant que le sens est plus général et surtout qu'il y a une différence fondamentale avec le concept initial. L'instrument est ici une représentation. C'est un artifice, un processus numérique particulier, avec lequel, grace aux trois catégories de transducteurs (acoustiques gestuels et visuels) s'établit une relation sensori-motrice, multisensorielle et en temps réel avec le musicien.
C'est à ce titre qu'il nous importe de dire que l'ordinateur n'est pas un instrument. C'est, dans cette première fonction, un moyen de représentation du monde instrumental. Disant cela, nous pensons en finir avec l'ambiguité du statut de l'ordinateur : au niveau de la production du son, il est instrument sans l'être, parce qu'il le représente. Cette distinction peut paraître gratuite et spéculative, cependant elle donne d'un coup un éclairage nouveau, une catégorisation plus cohérente des actes, même si dans la pratique, ces catégories se prètent à diverses transgressions.
Cette représentation généralise cependant toutes les représentations de type analogique (la catégorie des représentations que Paulus (Paulus 1969) rattache à la lignée du "portrait"), en ce sens que les conduites que l'on peut avoir vis-à-vis de ce substitut sont complètes, réellement analogues sur le plan actif et sur le plan perceptif aux conduites appliquables à l'objet de référence, alors que le portrait reste figé dans son expression, quels que soient les comportements de la personne qui le contemple.

La première catégorie d'activités du créateur est donc de représenter l'"instrument". Il doit pour cela disposer à nouveau d'un matériau, soit, en fait, d'un langage général de description du monde instrumental. La conception et la mise en oeuvre d'un tel langage lié aux processus de synthèse fait précisément l'objet d'un de nos axes de recherche, et l'on peut dire que, par rapport à cette fonction de représentation, si elle introduit une catégorie nouvelle pour le créateur, elle définit également une catégorie particulière des activités du chercheur qui s'arrête là ou commence celle du créateur.
La conception de ce langage doit se fonder sur une modélisation de l'univers instrumental. De

même que nous avons déplacé le propos du niveau psychoacoustique au niveau de la production, nous devons alors tenter un autre déplacement : de l'analyse acoustique à ce que l'on pourrait appeler une "analyse causale" c'est-à-dire la caractérisation de ce qui est pertinent pour la perception non plus en termes de paramètres acoustiques mais d'éléments constitutifs du processus causal susceptible de produire telle ou telle perception.

Les autres fonctions de l'outil de création se déduisent de ces catégories et de leur articulation. Sans entrer dans le détail, signalons simplement qu'elles doivent inclure des moyens de mémorisation, de représentation de traitement et de composition des différentes catégories d'objets, de processus et de phénomènes en jeu.

On dira que la différence entre ce "paradigme" et les démarches plus traditionnelles de l'informatique musicale ne tient qu'à un fil.
Wessel pourra objecter que son idéal d'outil peut parfaitement recouvrir ces perspectives et qu'il suffit, par exemple, pour motiver l'heuristique, de placer en amont des paramètres perceptuels bien identifiés et bien contrôlés, des modèles de structuration divers et pourquoi pas des modèles causaux.

Nous pensons que cela n'est pas réalisable avec une efficacité égale à celle ou le modèle causal est envisagé comme processus de production élémentaire. C'est ici que les contraintes propres à l'ordinateur interviennent : Il y a une perte d'efficacité dans le fait de mettre bout-à-bout deux chaînes, l'une répondant à un processus d'organisation des paramètres, l'autre établissant la conversion entre ces paramètres et les paramètres de contrôle de modèles de production fonctionnels. Dans le cas où le modèle de production est un modèle physique, il est clair qu'à ce titre et en tant que modèle de production stricte il est plus coûteux et moins général qu'un modèle fonctionnel, mais le fait qu'il tende à déterminer et intégrer les idiosyncrasies utiles compense le coût de calcul supplémentaire. Cela suppose évidemment au préalable une identification et une caractérisation de ces "idiosyncrasies utiles". Par ailleurs, le modèle de production n'est pas envisagé ici seulement comme modèle de production sonore, mais comme modèle pour restituer une situation instrumentale intégrale. Cette tâche est plus large, donc nécessairement plus coûteuse que la simple tâche de production, et en tout cas irréalisable avec les modèles fonctionnels.

Le pari qui caractérise cette démarche est dans le fait de considérer que la manière de découvrir est au moins aussi importante que ce que l'on découvre, et que la généralité d'un système n'a pas de réel intéret si elle n'est que potentielle.

Conclusion.

Nous avons délibérément déplacé le propos. C'est que nous considérons que la première nécessité n'est pas tant de savoir quel est le sonore possible, mais quelles sont les actes possibles, qu'il ne sert à rien de savoir que tout l'univers sonore est accessible si l'on n'a pas de chemin pour le parcourir et pour l'investir de sens, que la richesse musicale, à

l'intérieur du cadre de ce qui est perceptible, tient plus à celle des relations et des processus heuristiques que permet l'outil qu'à une sorte de richesse intrinsèque de l'objet sonore final. Nous dirons enfin, en réponse à Varèse, que l'obéissance à la pensée passe nécessairement par l'obéissance à la main.

Ainsi, ce débat sur le timbre nous parait-il capital, mais nous considérons qu'une tâche est de comprendre le fonctionnement de l'oreille, les lois de la structuration intrinsèque du sonore, une autre est de créer l'outil qui permette la création. Une chose est de développer des systèmes permettant aux langages musicaux les plus ouverts et les plus généraux de se définir, une autre chose est de prendre en charge le processus créatif selon tous ses aspects.
Pour le premier niveau nécessaire, celui de la production du matériau sonore élémentaire, nous pensons que l'outil doit offrir en premier lieu des moyens pour manipuler et maîtriser des représentations des causes plutôt que des moyens pour combiner les effets. La différence théorique est fondamentale et les conséquences techniques sont considérables : la conception globale de l'outil en découle intégralement.

Il s'agit ici, on l'aura compris, non pas d'investigations instantanément opératoires, mais d'un programme de recherche. Nous sommes engagés dans un tel programme et nous y avons effectué une petite avancée (cf. Cadoz, Luciani, Florens 1981 et 1984) que nous poursuivons aujourd'hui avec une perspective proche d'articulation avec une pratique créative mettant à l'épreuve ces concepts.

Bibliographie.

BENADE (A.H.), 1976 - Fundamentals of musical acoustics. Oxford University Press.
BOULEZ (P.), 1985 - Séminaire sur le Timbre, IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.
BREGMAN (A.) & PINKER (S.), 1978 - Auditory sreaming and the building of timbre. Canad. J. Psychol., 1978, 32(1) 19-31.
BREGMAN (A.), 1985 - Séminaire sur le Timbre, IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.
CADOZ (C.), LUCIANI (A.) & FLORENS (J.L.), 1981 - Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux et transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental. Revue d'Acoustique, 1981, 59, 279-292.
CADOZ (C.), LUCIANI (A.) & FLORENS (J.L.), 1984 - Responsive Input Devices and Sound Synthesis by Simulation of Instrumental Mechanisms : The Cordis System. Computer Music Journal, 1984, 8, N°3, 60-73.
DUFOURT (H.), 1977 - L'artifice d'écriture dans la musique occidentale. Revue Critique, vol. 287,465-477, Paris 1977.
DUFOURT (H.), 1985 - Séminaire sur le Timbre, IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.
GREY (J.M.), 1977 - Multidimensionnal perceptual scaling of musical timbres. Journal of the Acoustical Society of America, 1977, 61, 1270-1277.
HUGGINS (W.H.), 1952 - A phase principle for complex frequency analysis and its implication in auditory theory. Journal of the Acoustical Society of America, 1952, 24, 582-589.
LINDSAY (P.H.) & NORMAN (D.A.), 1977 - Human Information Processing an Introduction to Psychology, 2d. Ed., Academic Press, New York.

MATHEWS (M.V.), 1969 - The technology of computer music. M.I.T. Press.
McADAMS (S.) 1 BREGMAN (A.), 1979 - Hearing musical streams. Computer Music Journal, 1979, 3, N°4, 26-42.
McADAMS (S.), 1982 - Spectral fusion and the creation of auditory images. In "Music, Mind and Brain : The Neuropsychology of Music". Manfred Clynes, ed., Plenum Press : New York.
McADAMS (S.), 1985 - Séminaire sur le Timbre, IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.
NATTIEZ (J.J.), 1987 - Musicologie générale et sémiologie. Christian Bourgois éd. Paris.
PAULUS (J.), 1969 - La fonction symbolique et le langage. Ed. Ch. Dessart, Bruxelles.
PIENCIKOWSKI (R.), 1985 - Séminaire sur le Timbre, IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.
RISSET (J.C.), 1966 - Computer study of trumpet tones. Bell Labs, Muray Hill, New Jersey.
RISSET (J.C.) & WESSEL (D.), 1982 - Exploration of timbre by analysis and synthesis. In "The Psychologie of Music", Edit. D. Deutsch. Academic Press. Inc.
RISSET (J.C.), 1985 - Séminaire sur le Timbre", IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.
RISSET (J.C.), 1986 - Timbre et synthèse des sons. Analyse Musicale, 2e tr. 1986, 9-19.
SAUSSURE (F. de) - Cours de Linguistique Générale. Nlle édit. de 1974 par Ch. Bailly et A. Sechehaye. Payot, Paris 1974.
SCHOENBERG (A.), 1911 - Harmonielehre. Universal Edition, Leipzig-Vienne. 1983 trad. française - Traité d'harmonie. J.C. Lattès. Paris.
STRAWN (J.), 1982 - Research on timbre and musical contexts at CCRMA. Presented at the International Computer Music Conference (ICMC) Venice, Italy 1982.
STRONG (W.) & CLARK (M.), 1967 - Perturbations of synthetic orchestral wind instrument tones. Journal of the Acoustical Society of America, 1967, 41, 277-285.
YOUNG (R.W.), 1952 - Modes, nodes and antinodes. J. Acoust. Soc. Amer., 1952, 24, 267-273.
WALLON (H.), 1938 - De l'acte à la pensée. Paris, Flammarion.
WESSEL (D.), 1979 - Timbre space as a musical control structure. Computer Music Journal, 1979, 3, N°2.
WESSEL (D.), 1983 - Séminaire sur "le Concept de Recherche en Musique", IRCAM, 1983.
WESSEL (D.), 1985 - Séminaire sur le Timbre, IRCAM, 13 au 17 Avril 1985.