E.N.S.A.M. PARIS

Laboratoire de Mécanique Vibratoire et d'Acoustique

Projet N°46

DESIGN SONORE DES OBJETS

Elèves ingénieurs : Directeur de projet :

DESMALES François TEBEC Jean-Louis

POUVREAU Etienne

NOTICE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEE: 2002

GROUPE: ENG

NUMERO DU PFE: 46

CENTRE DE RATTACHEMENT PFE: ENSAM PARIS

AUTEURS: DESMALES, François; POUVREAU, Etienne

TITRE: Design sonore des objets

ENCADREMENT DU PFE: TEBEC, Jean-Louis

PARTENAIRE DU PFE: Ircam, Institut de recherche et de coordination acoustique/musique

NOMBRE DE PAGES : 52 NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : 7

RESUME: Le design sonore reste aujourd'hui l'apanage de musiciens ou de designers. Il manque au monde industriel un véritable outil lui permettant de maîtriser le son de ses créations. En s'appuyant sur le bruit d'une boîte de vitesse, ce projet vise à montrer que l'utilisation d'un logiciel d'informatique musicale et de tests psychoacoustiques, utilisés dans le cadre d'une démarche complète et structurée, palie ce manque.

MOTS-CLES: ACOUSTIQUE / DESIGN SONORE / IRCAM / LOGICIEL MODALYS / SYNTHESE SONORE / ANALYSE MODAL / PSYCHOACOUSTIQUE

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention correcte):

LIBRE CONFIDENTIEL pendantan(s)

DATE: Nom du signataire: Signature:

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

Remerciements:

Jean-Louis TEBEC et Bénédicte HAYNES, responsables du LMVA

René CAUSSE, responsable de l'équipe Acoustique Instrumentale, Ircam

Nicolas MISDARIIS, chargé de recherche au sein de l'équipe Design Sonore, Ircam

Muriel BARTHOD, doctorante au LMVA

Joël BENSOAM, doctorant de l'Université du Maine à l'Ircam

Patrick SUSINI, chargé de recherche au sein de l'équipe Psychoacoustique, Ircam

Introduction	
1. Présentation	2
1.1 Le bruit de graillonnement	2
1.1.1 La boîte de vitesses	
1.1.2 Les différentes sources sonore d'une boîte de vitesse	3
1.1.3 Le bruit de graillonnement	4
1.2 Le design sonore	5
1.2.1 Présentation	5
1.2.2 L'historique du design sonore	6
1.2.3 Quelques exemples connus	7
1.2.4 L'objet et son design sonore	7
1.2.5 Notre démarche de design sonore	8
1.3 L'Ircam : Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique	8
1.3.1 Chercher	9
1.3.2 Créer	9
1.3.3 Transmettre	9
1.3.4 Structure	9
1.4 Le logiciel Modalys	10
1.4.1 Principe du logiciel	11
1.4.2 Utilisation	11
1.4.3 Travail effectué l'an passé	13
1.5 Objectifs	
2. Déroulement de l'étude	
2.1 Amélioration du modèle	20
2.1.1 La fonction d'excitation	
2.1.2 Modification de la connexion <i>strike</i>	23
2.1.3 Amortissement des modes propres	25
2.1.4 Les nouveaux modèles	25
2.2 Le test d'écoute	26
2.2.1 Objectifs du test	26
2.2.2 Présentation du test	28
2.2.3 Principe de l'analyse de Cluster	
2.3 Les résultats	37
2.3.1 Description de la population	37
2.3.2 Analyse des résultats du test	
2.3.3 Choix du modèle « élu »	
2.4 Perspectives et modifications à apporter	44
2.4.1 Utilisation du modèle « élu »	
2.4.2. Améliorations à apporter aux modèles	44
2.4.3. Amélioration du test psychoacoustique	45
Conclusion	46
Bibliographie	47

Introduction

Tous les sens perçoivent de multiples informations qui permettent au cerveau humain de se faire une représentation du monde extérieur. Il a la capacité d'extraire des stimulis une richesse d'informations perçus consciemment ou inconsciemment. Dans son analyse, il tient compte de ses cinq sens et de sa mémoire ce qui rend le phénomène complexe. Le son véhicule aussi des informations utiles pour le cerveau. Il permet de transmettre des informations sur l'origine du son et sur son emplacement.

Les objets génèrent des bruits et l'homme les perçoit et les interprète. Par expérience, les bruits peuvent être associés mentalement aux objets qui les émettent. Certains bruits sont caractéristiques comme le bruit de moteur d'une moto Harley Davidson. L'homme est capable de distinguer le moteur d'une voiture de Formule 1 à celui d'une 2CV. Mieux, il est capable de savoir si ce moteur fonctionne bien grâce... à son bruit.

Dans le marketing, l'image de la qualité est essentielle. Et la découverte du fait que même le son peut véhiculer des informations pousse les industriels à s'intéresser au design sonore de leurs produits.

Le Laboratoire de Mécanique Vibratoire et d'Acoustique (LMVA) de l'ENSAM travaille depuis plusieurs années sur un bruit de boîte de vitesses bien connu des constructeurs automobiles sous le nom de *bruit de graillonnement*. Il est en effet caractéristique par son timbre de *grenaille*. Perçu comme une casse mécanique, il est qualifié de gênant. L'image qu'il véhicule est fausse car le phénomène mécanique produisant ce son ne menace pas le fonctionnement de la boîte de vitesses. Plusieurs études sont menées au LMVA sur ce problème dont l'une s'intéresse particulièrement à son design sonore.

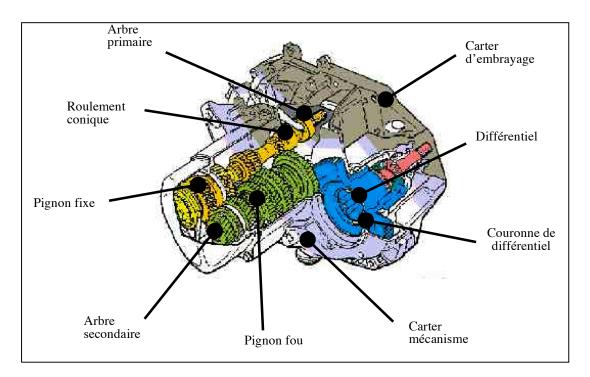
Ce projet est la suite d'une étude effectuée l'an dernier par des étudiants qui ont modélisé le mécanisme de ce bruit gênant en s'aidant d'un logiciel développé par l'IRCAM. Ainsi après une modélisation du mécanisme par ce logiciel, il est possible d'en écouter le son émis sans avoir à réaliser l'objet. L'amélioration de la modélisation et l'étude de sa validité sont les principaux objectifs du projet de cette année dont les résultats sont exposés dans ce rapport.

1. Présentation

1.1 Le bruit de graillonnement

Aujourd'hui les efforts des constructeurs automobiles se concentrent sur le confort acoustique à l'intérieur des habitacles. Beaucoup de voitures offrent le luxe d'un "silence" apaisant souvent synonyme de qualité. Les bruits du moteur, de l'air sur la carrosserie ou celui des roues sur le bitume sont devenus à peine audibles. Le conducteur aime se sentir dans un environnement calme, doux et rassurant. Il peut facilement écouter la musique sans être perturbé par le moteur. L'objectif des constructeurs reste justifié du point de vue du marketing. Les plus importants travaux consistent encore à réduire le niveau sonore ou à améliorer la qualité acoustique. En effet en abaissant le niveau sonore, certains bruits gênants sont apparus. La nuisance ne provenant pas forcement de l'intensité du signal mais plutôt du contenu. C'est-à-dire que le bruit dérange par son timbre. De plus certains bruits ont une image qui est mal perçue par le conducteur. Le bruit de graillonnement est l'un de ces bruits. Il transmet au conducteur des informations sur son origine par son identité sonore. L'homme le perçoit comme un bruit de casse mécanique ou de mauvais fonctionnement et craint une panne. Cette image négative de la qualité n'est due qu'à la "forme" du bruit car en réalité ce bruit de boîte de vitesses est totalement inoffensif et ne dégrade en rien le fonctionnement du véhicule.

1.1.1 La boîte de vitesses Voici le schéma d'une boîte de vitesses de type JC (Renault) :



Cette boîte de vitesses est composée de deux arbres disposés parallèlement portant des pignons à denture extérieure engrenant par paire, chacune constituant un engrenage en prise directe. Les deux arbres sont :

- l'arbre d'entrée, appelé arbre primaire,
- l'arbre de sortie vers le différentiel, appelé arbre secondaire.

L'arbre primaire se trouve dans le prolongement de l'axe du vilebrequin moteur et reçoit ainsi le mouvement de rotation du moteur par l'intermédiaire de l'embrayage. Il supporte un ensemble de pignons variant selon le nombre de rapport de transmission voulu lors de la conception de la boîte. Ces pignons tournent toujours en continu et ils engrènent avec ceux de l'arbre secondaire.

L'arbre secondaire est composé de pignons récepteurs, appelés communément « pignons fous », qui tournent librement sur cet arbre grâce à la présence d'huile et de jeu. Afin de transmettre la puissance aux roues, il faut rendre solidaire ces pignons fous avec l'arbre secondaire et cela s'effectue via un système de synchronisation.

1.1.2 Les différentes sources sonore d'une boîte de vitesse

La principale source de bruit dans un véhicule est le groupe moto-propulseur, composé du moteur et de la boîte de vitesses. De nombreuses études et solutions ont été réalisées vis-à-vis du moteur au niveau de ses émissions sonores. Mais la diminution du bruit du moteur met en évidence les bruits produits par la boîte de vitesses.

Les vibrations se transmettent au carter de boîte selon deux modes :

- par voie solidienne : les vibrations qui apparaissent au niveau des engrenages se transmettent aux arbres puis aux roulements et au carter ;
- par voie aérienne : à l'intérieur du carter, les vibrations des éléments mécaniques créent des différences de pression ; sous l'effet de ces sollicitations, la structure du carter se comporte presque comme la membrane d'un haut-parleur : le carter "rayonne".

Les sources du bruit dans une boîte de vitesses sont :

- les arbres à cause des défauts de coaxialité et de cylindricité,
- les roulements à cause des jeux, des défauts d'usure,
- les engrenages.

Les engrenages sont la cause majeure de bruit dans la boîte de vitesses en raison des contacts perpétuels existant entre les dents des pignons en prise ou fous. Leur géométrie a donc été optimisée dans le souci de réduire au maximum le bruit d'engrènement Cependant des défauts demeurent :

- défaut d'usinage : espacement entre dents irrégulier, pignons pas tout à fait circulaires,
- amplification des vibrations aux fréquences correspondant aux caractéristiques modales du système : modes de flexion ou de torsion des dentures, des arbres, ...,
- chocs à chaque engrènement d'une paire de dents,
- effet de succion : poches d'air ou d'huile formées lors du désengagement d'une dent en prise.

Deux bruits particulièrement gênants sont recensés au niveau des engrenages :

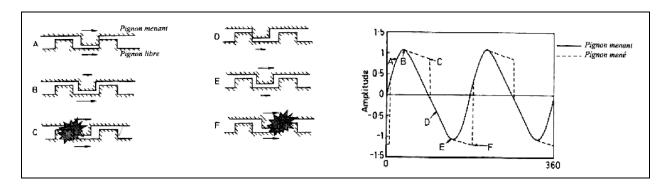
- le « sirènement » : ce bruit est de loin le plus important et le plus courant en fonctionnement ; il a fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de comprendre ses causes et de l'atténuer ; le sirènement est lié à la variation de l'effort au niveau des dents des engrenages en prise ;
- le « graillonnement » : provoqué par des chocs mécaniques sur les pignons fous et dû à l'acyclisme du moteur.

1.1.3 Le bruit de graillonnement

Le bruit de graillonnement est provoqué par les vibrations de torsion émises par l'ensemble des éléments de la boîte de vitesses non soumis à une charge et possédant un mouvement de va-et-vient dans la limite de leur jeu de fonctionnement. La transmission des chocs est principalement solidienne et l'ensemble de la pignonnerie ainsi que les roulements constituent la voie de passage privilégiée vers le carter. La source principale du phénomène est due au mauvais filtrage de l'acyclisme moteur au niveau du moyeu amortisseur de l'embrayage, mais le phénomène est généralement amplifié par les modes de résonance de la chaîne complète puisque le bruit apparaît en rapport engagé. On situe généralement ces fréquences critiques entre 40 et 80 Hz ce qui correspond à des régimes de rotation compris entre 1200 et 2400 tr/min pour une excitation d'harmonique de rang 2. Selon les conditions de fonctionnement du véhicule, trois cas sont envisagés :

- le « graillonnement sous faible » : il se manifeste en accélération ou décélération lente dans une plage de régime de 3000 à 4000 tr/min ;
- le « graillonnement sous forte » : il apparaît à le reprise du couple à bas régime ; il est d'autant plus important que le rapport de boîte est élevé ;
- le « trash » : il présente les caractéristiques du graillonnement modulé par le premier mode de torsion de la chaîne cinématique (quelques Hertz) et se déclenche lors de sollicitations de couple, au lever de pied, et en retenue dans une légère descente.

De manière générale, les sources de bruit proviennent essentiellement des impacts au niveau des roues d'engrenages non chargées bien que des chercheurs mettent en évidence une diminution sur la vibration carter lors de la dépose des anneaux de synchronisation. En 1981, ces chercheurs suggèrent que le bruit de graillonnement apparaît dès lors qu'il y a perte de contact entre les dentures.



Les figures ci-dessus permettent d'illustrer les phases successives du mouvement relatif entre les dentures d'un engrenage non chargé soumis à l'acyclisme. La courbe en trait plein montre l'évolution temporelle sur un tour moteur des vitesses linéaires au rayon primitif du pignon menant et représente généralement le mouvement du primaire de boîte. La vitesse instantanée du pignon fou, libre de tourner sur son axe, est superposée en pointillés. Durant la première phase du cycle, la dent du pignon menant entraîne continûment celle du pignon mené suivant l'acyclisme imposé en entrée de boîte. A partir de l'instant B, la décélération du pignon moteur devient plus importante que celle fixée par le couple de traînée sur la roue menée et les dents se séparent selon le critère défini ci-dessus. Le pignon fou se trouve alors en phase dite de "vol libre" puisqu'il traverse le jeu de denture selon un mouvement uniquement conditionné par son couple résistant.

Au point C, le pignon libre qui constitue sa course est freiné par le pignon menant qui poursuit sa décélération et un premier choc se produit. Le phénomène est présenté ici dans le cas d'un choc non élastique puisque l'intégralité de l'énergie du choc est absorbée dans le contact . Pendant la phase D, le pignon moteur continue à décélérer le pignon fou jusqu'au point E où la décélération redevient moins importante que le couple de traînée. Les dents se séparent de nouveau. A l'instant F se produit un autre impact et le cycle recommence.

1.2 Le design sonore

1.2.1 Présentation

"Les animaux comprennent-ils quand on leur parle?" Qui ne s'est jamais posé cette question? Des études ont prouvé que les animaux ne possédaient pas de langage mais que certains d'entre eux présentaient une faculté étonnante de compréhension. Par exemple le chien comprend un certain nombre d'ordres dictés par son maître. En fait, il perçoit l'ordre au ton, au timbre, à la mélodie et à l'intensité de la voix. Mais il ne comprend pas le contenu exact du message. Il peut ainsi faire la différence entre un ordre, un compliment, une réprimande... L'homme également perçoit une multitude d'informations dans le langage. En plus de comprendre le message à proprement parlé, il est capable de reconnaître l'auteur et de connaître son humeur. Les sentiments passent facilement dans la tonalité de la voix et les comédiens ont l'art de savoir les manipuler. Il existe une dimension autre que le sens propre de la phrase. Les mots ne seront pas perçus de la même manière s'ils sont émis par une personne en colère, triste ou anxieuse



Autrement dit un événement sonore est vecteur d'informations essentielles et reste à la base même du langage. Le rôle de la perception est majeur dans son interprétation. Il existe aussi une perception sonore liée aux objets. Elle permet d'identifier les objets ou de reconnaître leur état de fonctionnement. Et l'homme arrive à percevoir rien qu'au bruit d'une machine si celle-ci fonctionne correctement ou non. Il est même possible de connaître la cause du mauvais

fonctionnement. Le bruit d'un objet transmet aussi la qualité du produit. « A l'oreille » certains spécialistes reconnaissent les différentes qualités d'un moteur, comme un luthier avec des instruments ou les œnologues en goûtant le vin. La perception sonore des êtres humains est assez remarquable mais celle-ci est peu ou mal connue du grand public.

La notion de qualité d'un événement sonore est souvent assimilée à des mesures de paramètres physiques. Or l'appréciation qualitative du bruit d'un objet est autre chose ou quelque chose de plus qu'une caractéristique acoustique, de même que l'appréciation plastique d'un objet ne se réduit pas aux dimensions, à la matière ou encore à la couleur de ce dernier.

Les notions de qualité, d'esthétique, d'agrément, de fonctionnalité, etc. ne sont pas intrinsèques aux objets mais bel et bien relatives à l'homme quelles que soient les modalités sensorielles concernées.

C'est sur cette problématique du rapport entre l'individu, le son et l'objet que se fonde le design sonore. Il ne veut plus réduire le bruit mais cherche à exploiter les potentialités sonores de chaque objet, afin de lui donner une identité. Le son est une dimension de l'objet aussi importante que sa forme géométrique et il est présent dans notre univers quotidien. Le designer sonore est pluridisciplinaire (design, acoustique, psychoacoustique, synthèse, modélisation, etc.) et son objectif est d'améliorer la qualité sonore des objets en vue de façonner favorablement celle de nos environnements quotidiens futurs.

Discipline novatrice et de fait méconnue, le design sonore tend aujourd'hui à faire partie intégrante de la conception d'un objet.

1.2.2 L'historique du design sonore

C'est aujourd'hui un lieu commun que de relater le formidable enrichissement subit par notre univers sonore quotidien depuis le 19ème siècle, début de l'ère industrielle. Essor du bruit, anarchique, sous estimé, voire ignoré, qui franchissant la barre du tolérable devint dès les années 70 synonyme de pollution sonore et conduit à cette culture collective : bruit égale nuisance. Ainsi est née la lutte contre le bruit et la mise en place de normes de niveaux de bruit puis petit à petit la notion de qualité sonore. De manière classique, la qualité sonore est associée à l'absence de gêne sonore ; autrement dit, elle est assimilée à une réduction du niveau sonore. Le progrès des connaissances sur le fonctionnement du système auditif a permis entre autre d'affiner le calcul du niveau sonore perçu (sonie) et de définir d'autres critères psychoacoustiques relatifs à la qualité des



Machine à coudre Singer, reconnaissable uniquement à son bruit.

sons. La possibilité de traiter les sons de manière très puissante avec les techniques d'analyse/synthèse a largement participé à l'essor du design sonore.



Cette discipline est de plus en plus prise en compte lors du processus de création industrielle d'un produit destiné à l'homme (automobile, aéronautique, électroménager...). Et les pionniers du design sonore sont certainement les acteurs de l'industrie automobile qui ont du s'adapter aux exigences de plus en plus fortes des clients. En effet, le client est sensible aussi bien aux formes, aux couleurs et à l'odeur d'un véhicule qu'à son bruit. Ces différentes sensations influent sur la qualité globale d'un produit. Il peut s'avérer gênant de remarquer que sa voiture d'un modèle luxueux fasse le même bruit de portière qu'une 2CV ! Ou au contraire, d'acheter un vélo moteur parce qu'il fait le même bruit qu'une Harley Davidson.

1.2.3 Quelques exemples connus

Les briquets Dupont sont des briquets de luxe connus pour leur bruit de fonctionnement. D'ailleurs le bruit de claquement change selon la culture des utilisateurs. Quand le son évoquant le luxe sera mat en France, il sera clinquant au Japon. Il s'agit également du bruit de moteur très caractéristique des motos Harley Davidson, aujourd'hui breveté pour qu'il évoque directement la moto comme son carénage pourrait le faire. Ces exemples montrent bien l'optique du design sonore selon laquelle l'identité de l'objet est représentée par le son. Mais cette discipline ne se réduit pas



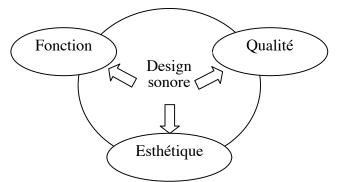
Briquet Dupont

uniquement aux objets mais peut s'étendre entre autre aux produits de l'agroalimentaire. En effet, l'industrie agroalimentaire étudie de près, et avec le plus grand sérieux, l'indice de croustillance des corn flakes et autres flocons immergés dans le lait. Le design sonore trouve aussi des applications dans le slogan d'une entreprise. Beaucoup d'entreprises se dotent d'une identité sonore pour se différencier, pour aider sa mémorisation ou pour créer un lien affectif avec le client. Ainsi certaines entreprises comme, par exemple, les opérateurs téléphoniques sont reconnaissables rien que par leur indicatif sonore.

1.2.4 L'objet et son design sonore

La relation entre l'objet, son bruit et la conception permet d'aborder différemment son design sonore. L'objet répond à un cahier des charges constitué d'une partie fonctionnelle, d'une partie qualité et d'une partie esthétique. Le design sonore peut intervenir dans ces trois parties.

Le bruit peut avoir une place fonctionnelle dans la création de l'objet, comme pour les



Dans un objet, le design sonore peut intervenir sur différents aspects.

klaxons ainsi le design sonore de l'objet sera étudié dès le début du projet.

Le bruit peut être un signe de qualité du produit, comme par exemple le bruit de graillonnement. Si la qualité est un vecteur essentiel dans l'image de l'industriel, alors l'intervention du design sonore s'effectuera dès la phase de conception. Le bruit peut aussi être un aspect esthétique comme le bruit d'un moteur.

Le design sonore peut s'intéresser soit à un son déjà existant et essayer de l'améliorer soit à la création d'une identité sonore.

1.2.5 Notre démarche de design sonore

Notre démarche s'inscrit dans un objectif d'intervention sur l'identité sonore. Si l'on oublie un instant que le designer sonore travaille avant tout au « plaisir de l'ouïe », on peut comprendre que dans l'optique industrielle, son travail de concepteur consistera à trouver des outils lui permettant de concevoir l'image sonore d'un objet. Ces outils de travail lui permettraient de maîtriser le bruit du futur objet. Autrement dit l'industriel aurait la possibilité de concevoir le son d'un objet ou d'un mécanisme sans avoir à le fabriquer (réduction de coût et de temps de travail).

Notre travail s'inscrit dans le design sonore du bruit de graillonnement présenté précédemment. La gêne engendrée par ce bruit est si important que les industriels cherchent, par tout les moyens à le combattre. Il existe plusieurs façons de combattre un bruit, soit en recherchant son origine et en essayant de le supprimer, soit en essayant de le réduire en intensité (mais cette méthode a toujours des limites), ou soit en comprenant sa gêne pour la réduire.

Seulement le design sonore est une discipline récente qui ne possède que peu d'outils. Il est intéressant de pouvoir connaître l'image sonore de la boîte de vitesse sans avoir à la réaliser. Nous travaillons avec l'Ircam pour développer un nouvel outil synthétisant des bruits de graillonnement. Conçu pour des compositeurs afin qu'ils puissent créer des instruments virtuels et des instruments imaginaires, Modalys possède de grandes capacités et commence à se développer pour des applications industrielles. L'idée d'un premier projet de fin d'étude était de réaliser un instrument comparable à une boîte de vitesses sous Modalys. Les résultats fort encourageant ont conduit à prolonger l'expérimentation et notre objectif est d'améliorer la modélisation sous Modalys. La modélisation d'une boîte de vitesses permet d'étudier par la suite l'influence des paramètres propres au mécanisme sur le timbre. Ainsi un travail sur le design du bruit est envisageable.

1.3 L'Ircam : Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique.

Fondée en 1969 par Pierre Boulez, l'Ircam est une institution musicale associée au Centre Pompidou et dirigée depuis cette année par Bernard Stiegler.

Chercher, créer et transmettre sont les pôles autour desquels se développe l'activité de l'Ircam qui réunit en un même lieu des scientifiques et des musiciens, afin de les inciter à explorer ensemble des voies artistiques innovatrices.

1.3.1 Chercher

L'Ircam mène des recherches fondamentales sur les apports de l'informatique, de la physique et de l'acoustique à la problématique musicale. Elles ont pour vocation principale la mise au point d'outils logiciels qui viennent enrichir l'invention du compositeur et suscitent des échanges internationaux avec les grandes institutions universitaires ou de recherche. Des partenariats se développent également avec le monde industriel (réseaux, téléphonie, automobile...).

1.3.2 Créer

L'Ircam invite dans ses studios de nombreux compositeurs. Chaque année, 20 à 25 œuvres sont réalisées, qui associent des interprètes classiques (instrumentistes et chanteurs) et des nouvelles techniques. Ces musiques sont ensuite présentées au public, à Paris et en tournées, dans le cadre de saisons musicales organisées conjointement avec l'Ensemble Inter Contemporain. Elles sont également reprises au plan international par de nombreuses formations. De plus, chaque mois de juin, l'Ircam organise son propre festival, Agora, qui associe la création musicale à d'autres disciplines artistiques (danse, théâtre ou cinéma).

1.3.3 Transmettre

L'Ircam propose plusieurs programmes pédagogiques, notamment une formation doctorale, un cursus annuel d'informatique musicale destiné aux compositeurs et de nombreux ateliers, conférences ou débats à l'adresse de larges publics. Parallèlement, la médiathèque très largement informatisée met à la disposition des chercheurs, étudiants et mélomanes un important fond musical. Enfin, l'Ircam diffuse ses activités sous forme de livres et revues, de disques compacts et de CD-Rom.

1.3.4 Structure

L'Ircam est organisée autour de 4 pôles d'activités :

- La recherche et le développement : axe permettant l'interaction entre les sciences et les technologies et l'expression musicale.
- La création musicale : ce département assure à l'Ircam son statut de lieu de création et d'échange entre les créateurs et la recherche scientifique.
- La création chorégraphique : département crée en 1999 et assurant la sensibilisation du public et la recherche en matière de chorégraphie.
- La pédagogie : département voué à la diffusion de la connaissance et qui propose de formations, des stages, des ateliers et des conférences.

A ces quatre domaines on peut ajouter le service de la Médiathèque ainsi que celui des relations extérieures. Le schéma ci-dessous représente la structure de l'Ircam et la structure interne du département Recherche et Développement.

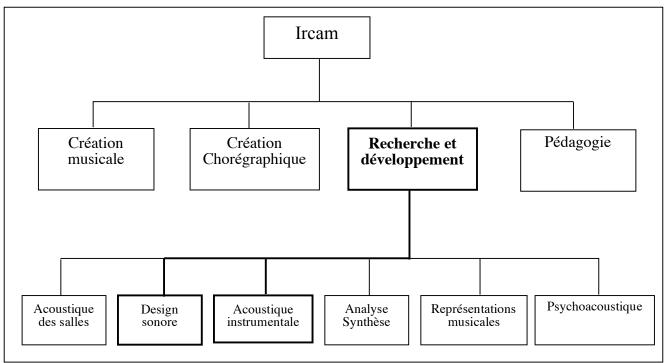


Schéma d'organisation des différents départements et équipes de recherche de l'Ircam.

Pour notre projet, comme pour celui de l'an passée, nous avons travaillé en collaboration avec l'équipe Acoustique Instrumentale (R. Caussé, J. Bensoam) et l'équipe Design Sonore (L. Dandrel, N. Misdariis). Pour la partie concernant les tests d'écoute, nous avons pu bénéficier de l'aide de plusieurs personnes de l'équipe de Psychoacoustique (S. Mc Adams, P. Susini, V. Rioux).

L'équipe Acoustique Instrumentale (dirigée par René Caussé) étudie le fonctionnement des instruments de musique en élaborant des modèles acoustiques qui prennent en compte leurs caractéristiques de production (excitation, résonance) et de rayonnement du son. Les projets s'organisent autour de la mesure de grandeurs caractéristiques de leur fonctionnement et de la modélisation physique. Les applications portent principalement sur la synthèse sonore dérivée des modèles physiques (à l'aide du logiciel Modalys, voir 1.4), l'aide à la facture traditionnelle et l'amélioration des systèmes de diffusion.

L'équipe Design Sonore, créée en 1999 (dirigée par Louis Dandrel) privilégie deux objectifs : mettre en place une coordination efficace entre les programmes de recherche et la production et affirmer la spécificité de l'Ircam dans le milieu du design sonore.

Des informations complémentaires (historique, actualité de l'Ircam, présentation des équipes de recherche) sont disponibles sur le site Internet de l'Ircam : www.ircam.fr

1.4 Le logiciel Modalys

Modalys est un logiciel de synthèse sonore par modélisation physique développé par l'équipe Acoustique Instrumentale. Les premières versions sont parues en 1988. Il y a quelques années une version pour Macintosh ainsi que des interfaces graphiques furent proposées. Ce

logiciel, comme les autres logiciels développés par l'Ircam sont disponibles uniquement pour les membres du Forum Ircam. Le principe, l'utilisation et le travail effectué l'an passé autour de Modalys sont décrits dans les paragraphes suivants.

1.4.1 Principe du logiciel

Alors que les principales méthodes de synthèse sonore cherchent à reproduire un son à partir de sons de référence en ajoutant ou par exemple en supprimant des éléments (synthèses soustractive, additive, granulaire...), la synthèse sonore par modèle physique s'intéresse au phénomène physique générant le son (choc d'une barre sur une plaque, jet d'air dans un tube...). Le principal avantage que présente ce type de synthèse sonore est qu'il permet d'établir une relation entre un objet réel et un modèle virtuel. L'utilisation d'une telle méthode dans le cadre du design sonore est alors équivalente à l'utilisation d'un logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur) : on réalise un modèle virtuel et on peut établir ses caractéristiques mécaniques de manière à satisfaire un cahier des charges. On peut ainsi connaître le son avant de construire l'objet.

D'un point de vue théorique, Modalys utilise le formalisme modale et s'appuie sur des travaux effectués en acoustique instrumentale et en mécanique vibratoire, il permet ainsi de créer des instruments virtuels composés d'objets simulant des structures vibrantes. Au départ destiné au monde musical, Modalys voit actuellement sont utilisation s'étendre au monde industriel par le biais du design sonore.

1.4.2 Utilisation

Modalys permet comme on l'a vu plus haut de réaliser des instruments virtuels. Prenons l'exemple d'une guitare. C'est un instrument dont les éléments principaux sont les cordes et la caisse de résonance, des excitateurs et un résonateur. Pour produire un son on pince la corde et on la relâche, c'est à dire qu'on vient apporter de l'énergie à l'excitateur qui interagit avec le résonateur par le biais des liaisons existantes entre ces deux éléments. La réalisation d'un modèle/instrument sous Modalys passe par ces étapes :

- Définition des objets : au moins un excitateur et au moins un résonateur
- Créations des accès : points de liaison entre les objets et d'apport d'énergie
- Mise en place des connexions : relations entre les objets
- Créations des contrôleurs : pour l'évolution du modèle dans le temps

Le logiciel permettra alors d'entendre la variation dans le temps de la vitesse d'un ou plusieurs points du modèle.

1.4.2.1 Les objets

Les objets utilisés avec Modalys représentent des structures vibrantes simples ou complexes. Le formalisme modale nécessite la connaissance des paramètres modaux de la structure (fréquences propres, déformées modales et amortissements modaux) afin de connaître le comportement dynamique des objets. Ces paramètres sont issus soit de calculs théoriques (objets simples : plaques, tubes, cordes...) soit de la pratique (objets complexes : archets, chevalets...). Les paramètres modaux, quelque soit la manière dont ils ont été déterminés, sont fonction des caractéristiques physiques des corps (dimensions; densité, tension, élasticité...). Dans Modalys la

modification de ces données est possible. On pourra ainsi aussi bien utiliser un tube en cristal de 2 mm de diamètre qu'une corde en titane de 3 m de long.

Modalys ne propose, au départ, qu'une gamme d'objets plutôt musicaux. Si l'on veut l'utiliser avec des objets complexes (cloches, roues...) dont on ne connaît pas facilement les paramètres modaux, il est possible de les incorporer aux objets de Modalys si ces paramètres ont été déterminés expérimentalement ou par une méthode numérique (éléments finis par exemple). Le nombre d'objets pouvant être réalisés apparaît alors quasi infini.

1.4.2.2 Les accès

Les accès permettent de définir des points d'accès sur les objets précédemment définis. Ces points d'accès serviront par la suite de points d'entrée pour imposer un mouvement ou une force à un objet, pour définir les zones d'interaction entre objets ou pour être des points d'écoute. Les accès possibles dépendent du type d'objet utilisé. En effet chaque objet présente une ou plusieurs directions de vibration privilégiées. Un accès Modalys se définira donc par la position d'un point mais aussi une direction. Par exemple, les accès sur une corde du type *mono-string* se feront en précisant, pour la position, un pourcentage de la longueur à laquelle se situera l'accès et une direction normale à la corde.

1.4.2.3 Les connexions

Elles représentent la manière dont les différents objets du modèle vont interagir entre eux. Ceci permet, par exemple, de simuler le contact entre une baguette et une membrane, ou le frottement d'un archet sur une corde. Il existe dans Modalys onze connexions et il semble que définir une nouvelle connexion soit un des points les plus délicats dans les développements futurs du logiciel.

1.4.2.4 Les contrôleurs

Ce sont les paramètres d'un accès ou d'une connexion. Ils peuvent être constants, fixés par une liste de valeurs à atteindre à des instants donnés (enveloppe temporelle), définis par un fichier extérieur (fichier son, fichier de données...) ou liés à des événements Midi (Musical Instrument Digital Interface, protocole de communication informatique largement répandu dans le domaine de l'informatique musicale). Ce sont les contrôleurs qui permettent aux modèles d'évoluer pendant le temps de la synthèse.

1.4.2.5 Bilan

Les choix offerts lors de ces 4 étapes permettent de mettre en évidence l'étendue des possibilités de Modalys. Ce logiciel pourrait s'appréhender comme un vaste jeu de construction ouvert sur le virtuel, il n'a de limites que celles de l'imagination de son utilisateur. Ainsi des instruments imaginaires ont pu être créés : gong changeant de taille au cour du jeu, archet traversant une plaque d'acier, océan soufflant sur une peau tambour (objet de type plaque excité par un fichier son externe contenant le bruit des vagues), corde se transformant en tube...

Mais il est intéressant de noté que Modalys utilise des objets en 2D voire en 1D alors que les objets que l'on souhaite utiliser sont bien souvent des objets vibrant dans les 3 directions de l'espace. Le passage d'un objet réel à 3 dimensions à un objet virtuel plan nécessite une réduction de l'information qu'il ne faudra pas négliger dans certain cas.

Enfin comme toute modélisation, il faut arrêter au départ un objectif à atteindre et une marge d'erreur acceptée afin de se fixer des limites dans la qualité de la modélisation.

1.4.3 Travail effectué l'an passé

Lors de l'année 2000-2001, deux élèves en projet de fin d'étude au LMVA ont décidé de s'intéresser au design sonore d'objets industriels. Pour cela Aurélie Boudier et Yoann Flavignard choisirent d'étudier le bruit de graillonnement et pour cela d'utiliser le logiciel Modalys. Comme nous l'avons vu précédemment le bruit de graillonnement met principalement en jeu l'arbre primaire d'un boîte de vitesse et une roue (au moins) montée sur l'arbre secondaire. Après avoir pris connaissance du fonctionnement de Modalys ils ont mis en place la démarche suivante :

- Modélisation de l'arbre et de la roue afin d'en obtenir les paramètres modaux et comparaison avec des mesures sur le banc d'essai.
- Injection des ces paramètres modaux dans Modalys
- Création d'un modèle avec Modalys
- Synthèse du son produit

1.4.3.1 Paramètres modaux de la roue

Mesures:

Pour déterminer les paramètres modaux ils ont procédé dans un premier temps à une série de mesures sur la roue.

Hypothèse : la roue, même en condition de graillonnement, est en vibration libre, il n'y a pas de conditions aux limites de la roue (en réalité il y a des épaulements et un film d'huile). Pour satisfaire cette hypothèse la roue fut suspendue par un fil de nylon lors des mesures.

Détermination des fréquences propres et des amortissements des modes propres : pour cela un accéléromètre a été placé sur le flanc de la roue, et le signal mesuré par un analyseur de spectre Brüel & Kjaer. Les pics observés sur le spectre correspondant aux modes propres ne présentant pas de nœud à l'endroit de l'accéléromètre. Dans le domaine audible (20 Hz à 20 kHz) trois modes propres de la roue ont été trouvés aux fréquences suivantes :

$$f_1 = 7982 \text{ Hz}$$
 $f_2 = 12077 \text{ Hz}$ $f_3 = 16608 \text{ Hz}$

L' amortissement d'un mode propre est lié à la largeur de la bande passante à -3 dB du pic de fréquence du mode. Elle peut être relevée, elle aussi, sur le spectre issu de l'accéléromètre. L'amortissement du mode, noté σ_k , est défini par :

$$Q_k = \frac{F_k}{\Delta F_k}$$

$$\xi_k = \frac{1}{2Q} \quad \text{d'où} : \sigma_k = \pi \cdot \Delta F_k$$

avec Q_k facteur de qualité, ω_k pulsation propre du mode en rad.s⁻¹ et ΔF_k la largeur de la bande passante à -3 dB.

Les résultats trouvés sont :

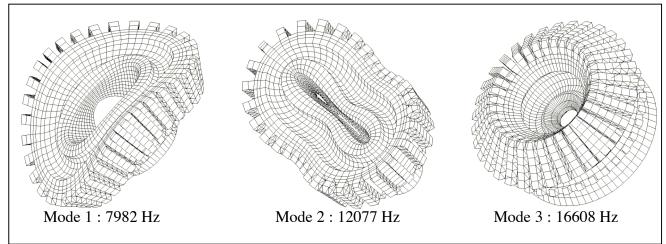
$$\sigma_1 = 3.5 \text{ s}^{-1}$$
 $\sigma_2 = 8.3 \text{ s}^{-1}$ $\sigma_3 = 10.1 \text{ s}^{-1}$

Détermination de la déformée : elle a été effectuée en utilisant deux accéléromètres (un fixe et un prenant différentes positions sur le flanc de la roue). En utilisant 16 positions pour l'accéléromètre mobile, seule une représentation qualitative des déformées a pu être obtenue. Afin d'avoir des résultats plus précis pour les déformées, ils décidèrent d'utiliser une méthode numérique pour la détermination des paramètres modaux : l'analyse modale par la méthode des éléments finis.

Modélisation numérique :

La méthode de calcul par éléments finis est une méthode numérique permettant de résoudre des problèmes physiques dans des domaines aussi variés que l'aérodynamique, la dynamique des structures ou la mécanique de fluides. Cette méthode est d'un grand recours lorsque les solutions analytiques sont inconnues ou lorsque les modèles ayant des solutions calculables analytiquement sont trop restrictifs. Comme toute méthode numérique, il faut dans un premier temps passer d'un objet réel continu à un modèle (objet virtuel) discrétisé. Avec la méthode par éléments finis cette étape est le maillage et elle consiste à considérer l'objet virtuel comme l'assemblage d'un nombre limité d'éléments simples et à la définir ainsi.

Divers logiciels permettent l'utilisation de cette méthode de calcul. Après des essais insatisfaisants sur Catia et Ansys, leur choix s'est porté sur Castem 2000, un logiciel du CEA. Disposant d'une interface moins conviviale que les logiciels testés précédemment, Castem a l'avantage de permettre un maillage personnalisé ce qui faisait défaut aux autres codes de calcul. Les résultats obtenus ont permis de confirmer, par rapport aux mesures, l'existence de trois modes propres de la roue dans le domaine audible. L'allure des déformées est donnée ci dessous.



Déformées modales de la roue, obtenues avec Castem

Pour pouvoir créer un objet sous Modalys représentant la roue en vibration libre il faut s'appuyer sur un objet déjà existant et y modifier les fréquences des modes, les amortissements modaux et les déformées modales. Compte tenu de l'allure des déformées de la roue l'objet *free-circ-plate* a été utilisé, il s'agit d'une membrane circulaire sans conditions aux limites. L'objet choisi ainsi que les autres objets de Modalys comme on l'a vu plus haut (voir 1.4.2.5), sont des objets définis en

2D. Les déformées modales issues de Castem sont en 3 dimensions. La restriction de 3D à 2D est une partie délicate car il faut étudier quelles vont être les dimensions pertinentes pour le modèle à réaliser. Dans notre cas il n'a été conservé que la dimension selon laquelle les déformations sont les plus importantes.

1.4.3.2 Paramètres modaux de l'arbre

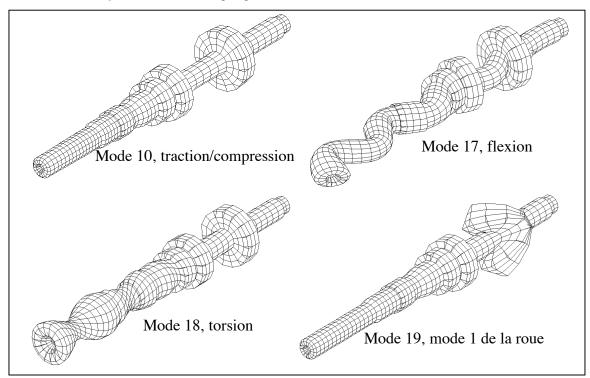
Pour l'arbre, une modélisation numérique, toujours avec Castem, a permis de déterminer les paramètres modaux. Seules les fréquences des modes propres ont été confrontées à des mesures.

20 modes ont été mis en évidence dans le domaine [1 Hz ; 30 kHz]. Trois types de modes ont été distingués :

- modes de traction / compression
- modes de torsion
- modes de flexion

Les figures permettent de voir ces trois types de modes ainsi que le premier mode de la roue de l'arbre primaire qui vient frapper la roue de l'arbre secondaire.

Déformées modales de quelques modes de l'arbre, obtenues avec Castem.

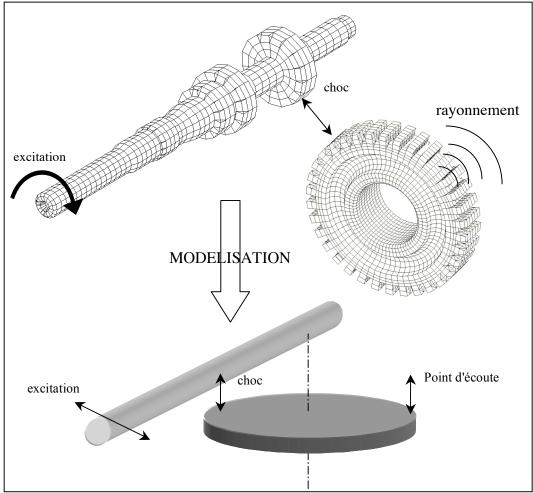


De même que pour la roue, un fichier de données compatibles avec Modalys a été créé. Cette fois-ci l'objet de base qui a servi à la réalisation de l'arbre est un objet du type *bi-string* (corde vibrant dans 2 directions) à cause de l'allure des déformées modales analogues entre l'arbre et la corde.

1.4.3.3 Création du modèle sous Modalys

Les objets:

Deux objets sont définis : un excitateur (l'arbre) et un résonateur (la roue). Pour chacun des objets introduits un objet de base était nécessaire (type corde pour l'arbre et type plaque pour la roue). Le choix de cet objet s'est fait par analogie entre les déformées observées des objets à simuler et les déformées connues des objets de base.



Passage de la réalité au modèle réalisé lors du projet 2001.

Les accès:

Sur l'arbre deux points d'accès ont été définis : un point pour appliquer l'excitation, un autre pour l'interaction arbre / roue. Sur la roue deux points ont aussi été définis : un point pour l'interaction, un autre pour l'écoute du son produit.

La connexion:

Une seule connexion a été définie entre le roue et l'arbre, il s'agissait d'une connexion frapper (*strike*). C'est-à-dire qu'un accès de l'arbre vient frapper un accès de la roue. La direction du choc correspond à la direction de l'accès frappé, l'objet frappant étant orienté pour que la direction de l'accès frappant soit confondue avec celle de l'accès frappé.

Le contrôleur :

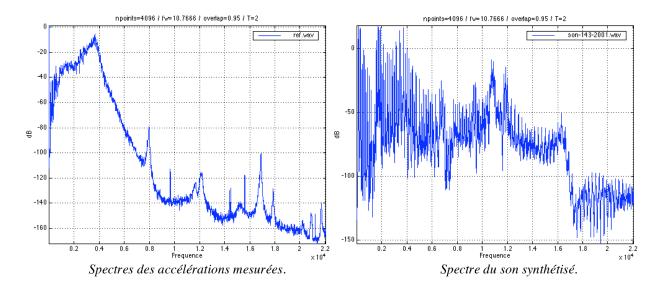
Un seul contrôleur à définir, il représentait le mouvement imposé à l'arbre à une de ses extrémités. Plusieurs essais furent réalisés soit à partir d'une fonction sinus, soit à partir d'un fichier son externe contenant un signal en dent de scie, la succession des valeurs prises par le contrôleur correspondant aux positions successives imposées au point d'accès sur l'arbre.

1.4.3.4 Synthèse du son produit

Pour produire un son Modalys utilise les équations de la dynamique des solides appliquées aux modèles définis. Le son synthétisé par le logiciel correspond à l'évolution de la vitesse du point d'écoute défini. On écoute la vitesse d'un point de la même manière que l'on peut écouter l'accélération avec un accéléromètre. D'autre part avec Modalys, la synthèse du son est rapide puisqu'il n'y a pas de traitement complexe des signaux. Une fois le modèle défini il suffit d'avoir arrêté un point d'écoute est une durée souhaitée pour le son. Les sons synthétisés pourront être sauvegardés pour être réécoutés et étudiés.

1.4.3.5 Résultats obtenus

Plusieurs essais furent effectués avec différents contrôleurs pour l'excitation de l'arbre. Les résultats les plus satisfaisant furent obtenus avec un contrôleur sinusoïdale. En comparant le spectre du son synthétisé avec celui de l'accélération du flanc de la roue, sur le banc d'essai et en condition de graillonnement (même fréquence de graillonnement 143 Hz) il a été constaté que les pics des modes propres de l'objet "roue" ne sont pas aux mêmes fréquences que celles mesurées. Ce décalage provenait sans doute des conditions aux limites existant dans la réalité. Pour "accorder" le son synthétisé avec le son mesuré un recalage fut nécessaire. Les figures ci-dessous montre les spectres du son mesuré et du son synthétisé après recalage.



1.5 Objectifs

L'analyse des travaux menés l'année dernière nous a permis de comprendre la problématique de l'étude et de définir des objectifs à atteindre. Ces objectifs ont été arrêtés en tenant compte de la direction générale du projet mais aussi des points qu'il semblait intéressant d'améliorer. Objectifs du projet 2001-2002 :

- Amélioration du modèle : type de connexion, choix du contrôleur, organisation des objets
- Choix d'un modèle suffisamment représentatif de la réalité grâce à un test de validation psychoacoustique
- Etude de l'influence de quelques paramètres physiques sur la gêne occasionnée, grâce à un test perceptif.

Compte tenu de ces objectifs et des moyens dont nous disposions (au LMVA et aussi à l'Ircam) nous avons défini notre démarche afin de satisfaire ces objectifs (voir page suivante).

Ce projet devra donc nous permettre d'utiliser nos connaissances en mécanique mais aussi d'approcher la psychoacoustique par le biais d'une validation perceptive.

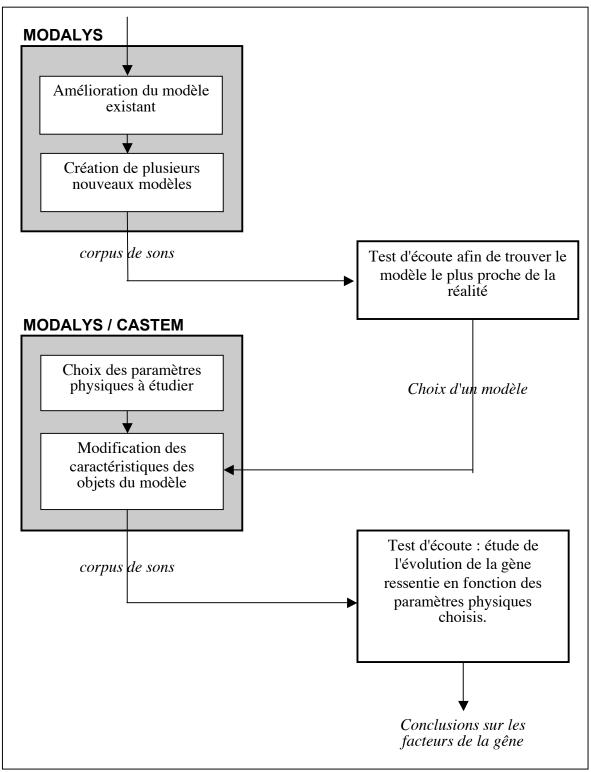


Schéma de la démarche choisie pour le projet

2. Déroulement de l'étude

2.1 Amélioration du modèle

En comparant le spectre de l'accélération mesurée sur le banc d'essais en condition de fonctionnement avec celui issu du son synthétisé au cours du projet de 2001, on constate plusieurs différences.

D'une part le spectre du son synthétisé comporte, dans tout le domaine audible, des pics régulièrement espacés de 143 Hz, ce qui correspond à la fréquence d'excitation du modèle. A ce phénomène nous avons trouvé deux explications :

- la fonction d'excitation est trop régulière, dans la réalité la fréquence des chocs est légèrement aléatoire.
- la connexion *strike* modélisée par Modalys simulerait un choc rigide ce qui entraîne l'apparition d'une infinité d'harmoniques de la fréquence d'excitation.

D'autre part on constate que l'amplitude relative entre les pics de fréquence est différente entre les deux spectres étudiés, mais aussi que la largeur de ces pics est différente. La largeur des pics de fréquence dans le son synthétisé peut-être modifiée en jouant sur l'amortissement des modes propres des objets utilisés (arbre et roue).

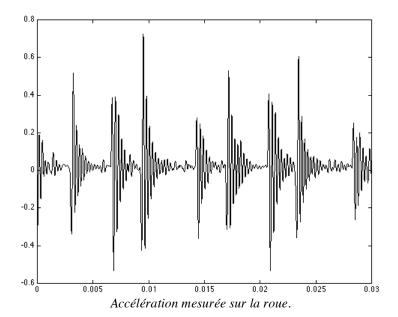
Nous avons donc décidé d'améliorer le modèle orientant notre travail sur ces axes.

2.1.1 La fonction d'excitation

Nous nous sommes rapidement rendus compte qu'il fallait différencier la fonction d'excitation appliquée à l'accès sur l'arbre de la fonction qui excite la roue, qui est une fonction de choc. En effet l'arbre, par sa modélisation, n'est pas transparent à la fonction d'excitation. Il nous a donc fallu choisir entre la modélisation de la fonction de choc et celle de la fonction d'excitation.

Nous avons décidé de nous intéresser à la fonction de choc car à partir de l'enregistrement de l'accélération mesurée sur le banc d'essais il nous était possible d'avoir rapidement une idée de l'allure de cette fonction.

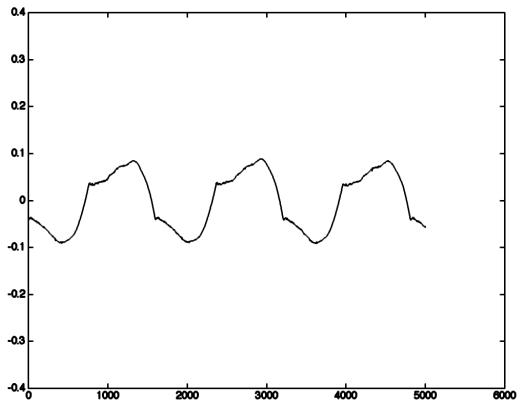
Le graphique ci-dessous représente la variation temporelle de l'accélération du flanc de la roue.



Sur ce tracé, on peut voir les chocs reçus par la roue et ainsi avoir une idée de leur fréquence d'apparition ainsi que de leur amplitude. On constate la présence de pics d'amplitudes différentes. Ceci correspond au phénomène de rebond d'une dent de l'arbre sur une dent de la roue. Généralement on observe un choc principal puis un seul rebond par pseudo-période (fréquence des chocs principaux non régulière).

En revanche la durée du contact d'une dent de l'arbre sur une dent de la roue ne peut pas être déterminée à partir de ce tracé.

Pour avoir une idée de la durée de contact roue/arbre nous avons placé deux capteurs de déplacement (un sur l'arbre, un sur la roue) et nous avons pu ainsi calculer le déplacement relatif d'une dent de l'arbre par rapport à une dent de la roue. Ce que l'on peut voir sur le tracé cidessous.

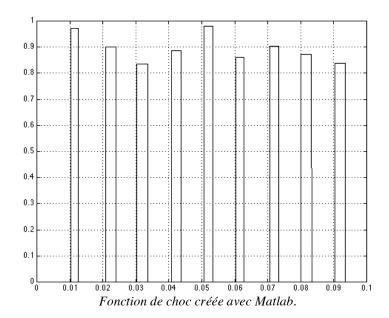


Déplacement relatif mesuré entre une dent de l'arbre et une dent de la roue (excitation à 30 Hz).

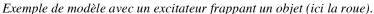
L'utilisation des deux tracés précédents nous a permis de déterminer la valeur moyenne et la variation autour de la fréquence moyenne, l'amplitude et la durée des contacts. Voici les résultats obtenus pour une excitation à 30 Hz.

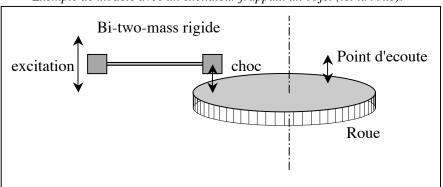
Grandeur	Unité	Valeur moyenne	Variation
Fréquence d'excitation	Hz	30	± 3
Largeur des pics	ms	23	± 0,1
Amplitude des pics	/	0,6	± 0,1

Dans l'environnement Matlab nous avons pu créer une fonction de choc contenant un signal en créneau possédant les caractéristiques recherchées. On peut voir sur le tracé ci-dessous une partie de la fonction créée.



Ces travaux sur la fonction d'excitation nous obligeaient à modifié le point d'accès du modèle auquel serait imposé le mouvement. Il fallait donc introduire la fonction de choc créée entre une dent de l'arbre et une dent de la roue, et non plus à un point de l'arbre. Pour cela nous avons crée un modèle simplifié ne faisant intervenir que la roue frappé par un objet existant avec deux masses et un ressort (*bi-two-mass*). La fonction créée est appliquée au niveau d'une des deux masses de cet objet, l'autre masse venant frapper la roue. Les paramètres de ce nouvel objet ont été choisis de manière à ce que la fonction de choc appliquée à un bout soit restituée de manière quasi identique à l'autre bout, c'est un objet infiniment rigide. Le schéma ci-dessous représente les modifications apportées au modèle.



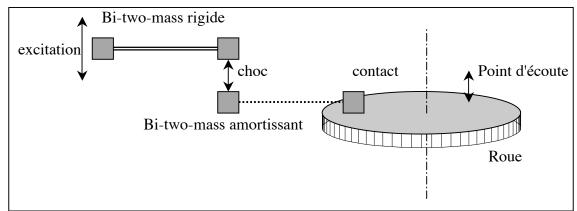


2.1.2 Modification de la connexion *strike*

Afin de passer d'un choc dur à un choc mou plusieurs solutions étaient envisageables.

La première consistait à programmer une connexion du type *strike* mais qui simulerait un choc mou, voire une fonction paramétrable allant du choc dur au choc mou. Ceci aurait sans doute demandé pas mal de temps pour maîtriser le langage de programmation et le phénomène de choc. Une seconde solution aurait été de ne pas utiliser la connexion *strike* mais la connexion *adhere* dans laquelle les accès des deux objets sont collés et un point de l'excitateur impose son déplacement à un point du résonateur. Cette solution a été testée mais ne fut pas suffisamment concluante, les nouveaux sons synthétisés n'étant pas assez modifiés.

La dernière solution passait par l'ajout d'un autre objet *bi-two-mass* entre la roue et l'excitateur qui jouerait le rôle d'un amortisseur équivalent à l'embout en caoutchouc que l'on peut rajouté sur un marteau d'impact pour modifier la nature du choc. Ce nouvel objet intégrerait alors les rigidités de contact des dents de l'arbre et celles de la roue. Les rigidités de contact relèvent de théories complexes (théorie de Hertz entre autre) difficiles à mettre en œuvre car non-linéaires. Malgré tout, c'est cette solution qui fut retenue car elle semblait la plus rapide à utiliser. Le schéma ci-dessous représente le modèle Modalys à ce niveau du projet.



Exemple de modèle intégrant un élément amortissant.

L'élément amortissant ajouté peut être assimilé à un filtre passe-bas atténuant certaines fréquences et favorisant d'autres. Afin de déterminer l'amortisseur qui nous permettrait de nous rapprocher de l'accélération mesurée nous avons déterminé les fonctions de transfert de 27 éléments *bi-two-mass* ayant des caractéristiques différentes. Les fonctions de transfert ont été déterminées en appliquant un bruit blanc au niveau d'une des masses et en relevant la réponse de l'amortisseur.

La mise en place d'un amortisseur entre l'excitateur et la roue permet aussi de s'attaquer au problème de la différence des amplitudes relatives de pics. Ainsi le choix de l'amortisseur devra aussi tenir compte de cette contrainte supplémentaire.

Cette étape est assez cruciale dans notre modèle puisque nous rajoutons un élément en quelque sorte non physique. En effet nous ne savons pas relier les paramètres du *bi-two-mass* à des paramètres physiques du mécanisme, on perd ainsi la possibilité de modélisation et d'anticipation sur les paramètres concernés (raideur de contact, rugosité, lubrification...). Ceci à pour conséquence de limiter le caractère physique de notre modélisation, nous atteignons en quelques sorte les limites actuelles de Modalys.

2.1.3 Amortissement des modes propres

L'amortissement d'un mécanisme mesure le temps mis par ce mécanisme pour retrouver un état d'équilibre après l'arrêt d'une excitation. A partir d'un spectre l'amortissement peut-être mesuré, il s'agit de la largeur de la bande passante à -3 dB du pic de fréquence considéré, $\Delta f_{k \, \hat{a}}$. L'amortissement du mode considéré est noté σf_k et est exprimé en s⁻¹. Ces deux grandeurs sont reliées par la formule $\sigma_k = \pi \cdot \Delta F_k$.

Ainsi en mesurant la largeur des bandes passantes à -3 dB des pics observés sur le spectre de l'accélération mesurée, on peut déterminer les amortissements des modes propres supposés de la roue et de l'arbre. Dans le fichier lu par Modalys pour créer les objets représentant l'arbre et la roue les amortissements des modes sont définis par la largeur (en Hz) de la bande passante à -3 dB et non par l'amortissement σf_k . Les valeurs obtenues pour $\Delta f_{k \, a \, -3 \, dB}$ avec la fréquence centrale f_k sont fournis en annexe.

2.1.4 Les nouveaux modèles

Les travaux de cette première partie nous ont permis de mettre en place différents assemblages de nos objets Modalys, comme un jeu de construction. Le contexte particulier dans lequel s'est déroulé cette phase de modélisation (limite sur la précision du modèle fixée *a posteriori*) nous a obligé à constitué différents modèles sans se fixer de limites. Pour élaborer tous ces modèles nous n'avions qu'une seule contrainte : la différence entre deux sons issus de deux modèles différents devant être perceptible. Nous avons donc réalisé les 17 modèles suivants :

- Modèles 11, 14, 16 et 17 : modèles faisant intervenir la roue avec une connexion *strike* et avec ou sans amortisseur.
- Modèles 4, 6, 8, 9, 10, 13 et 15 : modèles faisant intervenir l'arbre, une connexion *strike* et avec ou sans amortisseur.
- Modèles 1 à 3 : modèles faisant intervenir un excitateur frappant à la fois l'arbre et la roue. Pas d'amortisseur. Ecoute sur la roue, sur l'arbre ou sur les deux.
- Modèles 5, 7 et 12 : modèles faisant intervenir en parallèle et sans connexions entre eux la roue et l'arbre (équivalent à un mixage des modèles avec la roue et des modèles avec l'arbre).

Comme indiqué plus haut (voir 1.5) le choix entre les modèles se fera grâce à un test perceptif (voir 2.2).

2.2 Le test d'écoute

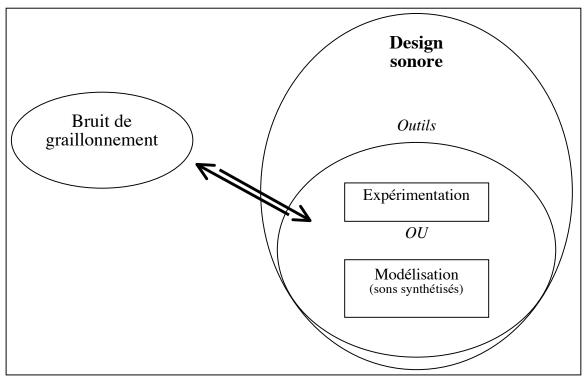
2.2.1 Objectifs du test

2.2.1.1 La place importante de la modélisation

Il est important d'avoir en tête nos objectifs car ils nous ont amené à effectuer une campagne de test. Dans l'objectif d'un travail sur le design sonore du bruit de graillonnement, nous nous sommes intéressés à une modélisation du mécanisme. Il semblerait que la tendance actuelle dans le design sonore soit d'aborder l'étude par une modélisation.

Dans cette optique d'étude, nous devions mettre en place une modélisation convenable du phénomène étudié. Les bruits synthétisés par Modalys doivent ressembler et se rapprocher du bruit réel.

Le travail de modélisation est une étape indispensable et importante dans l'étude du design sonore. En effet, la modélisation est le fondement de tous travaux sur le bruit lui-même. Elle représente le principal outil de l'étude. Sa validité doit être établie pour assurer la suite des résultats du design sonore. C'est lui qui assure le parallèle avec les bruits réels.



Le bruit de graillonnement peut être abordé en design sonore par une modélisation du phénomène.

2.2.1.2 La difficulté de validé un modèle

Ainsi nous devons absolument améliorer le modèle pour se rapprocher de la réalité. La modélisation doit générer des sons représentatifs du phénomène et se rapprochant des bruits réels. Mais la difficulté est de savoir à partir de quel moment on peut dire que deux sons sont proches.

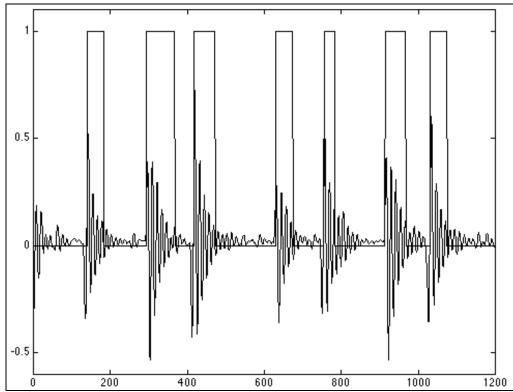
Sur quelles valeurs acoustiques nous appuyer ? Quels paramètres physiques permettent de classer deux sons proches ou quasi-identiques ? Dans l'étude de la qualité sonore la seule façon de « mesurer » la perception auditive est de réaliser un test d'écoute. La démarche classique est de demander l'avis à plusieurs personnes. La validité de notre modèle sera déterminée à partir d'un test psychoacoustique.

2.2.1.3 Les conditions

Le test doit élire, à partir d'un corpus de sons synthétisés, le son le plus proche du son réel dit de *référence*. La sélection d'un tel son permettra de retenir la modélisation la plus satisfaisante. La formation de ce corpus de sons a été établie en faisant varier des paramètres propres à la modélisation et en bloquant les paramètres physiques propres au mécanisme comme la masse, le volume, la raideur et les amortissements.

Le modèle de l'interaction arbre-roue est propre à notre modélisation ainsi que le type de contact. Dans le chapitre précédent, les différents assemblages ont été présentés. Ils formeront les différentes modélisations en confrontation. La fonction d'excitation est essentielle dans la modélisation. Et nous avons considéré que l'excitation du système était indépendante de notre modélisation et qu'elle dépendait uniquement du mécanisme. Il existe sûrement une corrélation entre les propriétés mécaniques et cinétiques et le type de fonction d'excitation, mais qu'elle ne devait pas intervenir dans la modélisation. Il fallait ainsi éviter son influence dans la comparaison entre le bruit de référence et les bruits synthétisés par Modalys.

Pour obtenir la fonction d'excitation la plus neutre, nous avons extrait les chocs du fichier de l'accélération de la roue. Le type excitation entre le bruit de référence et les sons synthétisés pas cette fonction était exactement identique puisque le bruit de référence est lui-même extrait de l'accélération. L'extraction s'est faite à l'aide de Matlab. La fonction d'excitation extraite est composée de deux valeurs et présente une forme de créneaux. La valeur non nul s'établissait uniquement lorsque l'accélération dépassait un seuil établi. Cette valeur était conservée pendant une courte période aléatoire.



Un extrait de la fonction d'excitation et de l'accélération mesurée sur l'arbre. Les créneaux de la fonction d'excitation sont construits à partir de la première courbe.

Les sons synthétisés représentant les différents modèles de modélisation sont mis en place, la question du test peut être abordée. En psychoacoustique, il existe plusieurs types de test suivant les informations recherchées. Les campagnes ainsi que les interprétations des résultats sont généralement assez longues.

2.2.2 Présentation du test

2.2.2.1 Le choix d'un catégorisation libre

Pour choisir le type de test le plus adapté à nos attentes, l'aide d'un spécialiste s'est trouvé indispensable. Nous avons fait appel à Patrick Susini (équipe Psychoacoustique-Ircam) qui, après avoir pris connaissance de notre étude, nous a conseillé d'utiliser la catégorisation libre. La principale information attendue est de reconnaître quel son se rapproche le plus du son de référence.

2.2.2.2 La catégorisation libre

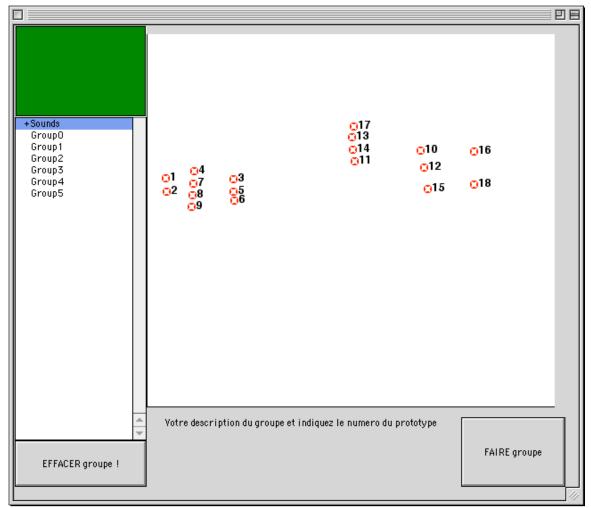
Le principe d'une catégorisation libre est de regrouper parmi un corpus établi (en l'occurrence ici des sons) des objets suivant un critère bien défini. Ensuite une analyse statistique des données permet d'interpréter les résultats. L'avantage d'une telle méthode est que les instructions sont faciles à comprendre.

2.2.2.3 Notre test

Le test était installé sur un ordinateur portable équipé d'un casque audio et se présentait sous une interface graphique déjà développée par l'Ircam (voir figure). Nous avons constitué un corpus de 18 sons tous différents dans leur timbre. Tous ont été égalisés à la même intensité

sonore perceptive (sonie). Il était demandé de regrouper les sons en un nombre non fixé de classes en prenant comme critère uniquement le timbre. Il était clairement spécifié que ni la hauteur et ni l'intensité du son ne devaient intervenir dans le jugement. (consigne en annexe)

Les candidats, après l'écoute de tous les sons devaient former leurs groupes. Et afin de garantir une certaine homogénéité des informations sur le déroulement du test, une fiche d'instruction énumérant les différentes tâches à accomplir était distribuée à chaque candidat. Un questionnaire à remplir permettait de recueillir des informations propres aux candidats. Ceci permettait de comprendre le type de population que nous avions interrogé.

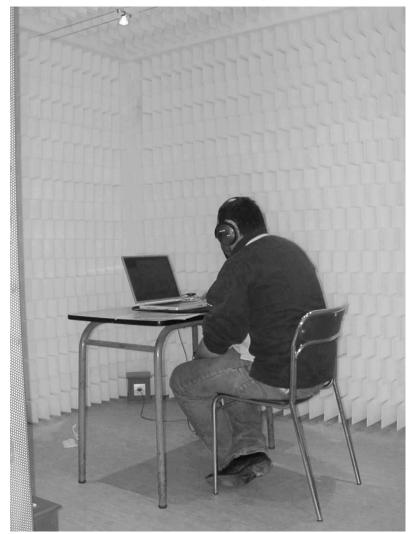


Interface graphique du test d'écoute d'un candidat ayant formé des groupes.

Le déroulement du test s'effectue en quatre parties :

- Le candidat se présente avec la feuille d'instruction devant l'ordinateur muni d'un casque d'écoute.
- Après avoir lu les instructions, il effectue le test.
- Une fois le test terminé et enregistré, il doit remplir le questionnaire.
- Une explication sur l'étude lui est fournie par un membre de l'équipe.

Les candidats ont été choisis parmi le personnel de l'Ircam, les étudiants de l'ENSAM et des gens extérieurs. La campagne de test a duré deux semaines et s'est tenue sur deux sites : dans un bureau calme de l'Ircam et dans la chambre semi-anéchoïque de l'ENSAM.



Un candidat passant le test d'écoute à l'ENSAM dans la chambre semi-anéchoïque.

2.2.3 Principe de l'analyse de Cluster

L'analyse de Cluster est un type d'analyse par groupement hiérarchique et il est important de noter tout d'abord qu'il n'existe pas une théorie unifiée pour ce type d'analyse et qu'il serait judicieux de comparer le résultat d'une analyse avec d'autres méthodes.

Lors de notre expérience de classification, nous avons demandé à des participants de partager un ensemble de sons en groupes distincts de sons similaires. Le jugement pour établir ces groupes ne devait tenir compte uniquement du timbre.

2.2.3.1 Les matrices

L'analyse de Cluster se fait à partir d'une matrice dite *globale*. Elle est obtenue à partir de matrices dites *individuelles*. Ces différentes matrices regroupent les informations du test.

La matrice individuelle est propre à chaque sujet. Elle est calculée en fonction des regroupements effectués par l'individu. Les sons sont regroupés dans des classes ce qui se traduit en terme numérique par un « 1 » pour les sons n'ayant pas été regroupés et un « 0 » pour tous les sons ayant été classés dans le même groupe. En effet le critère effectif de cette matrice est la dissimilarité. Etant donné que pendant notre test nous proposions de classer 18 sons, la matrice individuelle est une matrice symétrique 18x18 avec une diagonale de zéros.

A partir de toutes ces matrices individuelles, on peut construire la matrice globale de dissimilarité. Elle correspond à l'agrégation des matrices individuelles d'incidence. Dans chaque cellule de la matrice est notée la fréquence avec laquelle deux objets ont été placés dans des groupes différents. Elle est constituée de valeurs comprises entre 0 et 1, ainsi une paire de sons ayant une valeur proche de zéro sera interprétée comme étant deux sons ayant souvent été mis ensembles. Il est possible d'interpréter ces valeurs comme étant la distance entre les sons. C'est aussi une matrice 18x18 avec une diagonale de zéros.

Exemple:

Le test est composé de 6 sons de A à F. La consigne est de grouper les 6 sons dans des groupes. On fait passer trois candidats.

Les résultats des groupes et matrices individuelles sont les suivants :

Sujet 1

Groupe 1 : A B C	
Groupe 2 : D E F	

	A	В	С	D	Е	F
Α	0	0	0	1	1	1
В	0	0	0	1	1	1
С	0	0	0	1	1	1
D	1	1	1	0	0	0

Sujet 2

Groupe 1: A B

Groupe 2 : D E Groupe 3 : C F										
	Α	В	С	D	Е	F				
Α	0	0	1	1	1	1				
В	0	0	1	1	1	1				
С	1	1	0	1	1	0				
D	1	1	1	0	0	1				

Sujet 3

Groupe	1:	A B	F
Groupe	2:]	D	
Groupe	3:0	СЕ	
	D		1

	Α	В	C	D	E	F
Α	0	0	1	1	1	0
В	0	0	1	1	1	0
С	1	1	0	1	0	1
D	1	1	1	0	1	1

Е	1	1	1	0	0	0	Е	1	1	1	0	0	1	Е	1	1	0	1	0	1
F	1	1	1	0	0	0	F	1	1	0	1	1	0	F	0	0	1	1	1	0

Maintenant construisons la matrice globale.

	A	В	С	D	Е	F
Α	0,00	0,00	0,67	1,00	1,00	0,67
В	0,00	0,00	0,67	1,00	1,00	0,67
С	0,67	0,67	0,00	1,00	0,67	0,67
D	1,00	1,00	1,00	0,00	0,33	0,67
Е	1,00	1,00	0,67	0,33	0,00	0,67
F	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,00

2.2.3.2 La représentation hiérarchique

La matrice globale nous donne la distance entre deux sons. Un son est proche d'un autre si leur distance est proche de 0. Et à l'opposé, si deux sons sont éloignés (autrement dit s'ils n'ont jamais été dans le même groupe) alors leur distance sera égale à 1 par convention.

Afin de faciliter l'interprétation de cette matrice et d'en avoir une représentation visuelle, on a chercher à symboliser les proximités entre objets à l'intérieur d'un arbre hiérarchique. Les représentations sous forme de graphe tentent de définir les proximités entre objets sous forme de relation. Ces relations peuvent être des relations d'appartenance à des catégories, des relations de typicalité ou de familiarité entre objets.

L'intérêt d'une telle analyse est de faire émerger des classes naturelles, c'est-à-dire des classes qui peuvent avoir un sens perceptif telles que des catégories. L'émergence de classes naturelles nous permet de mettre en lumière des stratégies perceptives d'identification de sources sonores, de comprendre l'organisation perceptive d'un ensemble de sons. Indirectement grâce à ces analyses, nous essayons d'aborder le thème de la représentation mentale des sources sonores.

La représentation hiérarchique du fait de sa construction emboîtée, permet une lecture "lisible" des classes. Le niveau de formation de ces classes peut être mesuré. Cette représentation place les objets dans des classes qui ne se recouvrent pas. Un objet ne peut appartenir en même temps à deux classes situées au même niveau de la hiérarchie. Cette limite permet de faciliter l'analyse d'un tel graphe.

Il existe différentes façons d'obtenir des arbres indicés hiérarchiques à partir d'une matrice de dissimilarité. Mais nous ne vous présenterons ici qu'un seul type d'analyse qui est spécifique par son algorithme dit « agglomératif ».

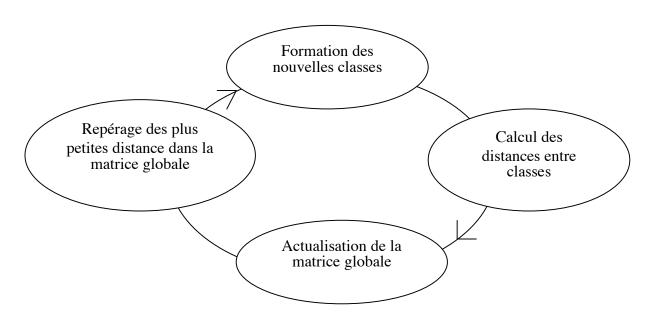
2.2.3.3 Construction d'un arbre

L'algorithme de construction de l'arbre :

La hiérarchisation suit un algorithme précis. La construction de l'arbre s'effectue au fur et à mesure de l'évolution dans la boucle de consigne. L'algorithme est fondé sur le principe que chaque son est placé dans une classe.

L'algorithme s'organise suivant quatre étapes:

- On repère dans la matrice globale les classes les plus semblables c'est-à-dire celles dont la distance est la plus petite.
- Elles vont former une nouvelle classe.
- On calcule les nouvelles distances entre chaque classe.
- On écrit la nouvelle matrice globale.



Calcul des nouvelles valeurs de dissimilarités :

Il existe différentes façons de recalculer la nouvelle distance suivant la méthode de groupement adoptée. Lorsque deux classes Ci et Cj sont regroupées, la dissimilarité entre la nouvelle classe formée Ci UCj et les autres classes restantes Ck est évaluée de façon récurrente. Elle s'écrit sous la forme :

$$D(Ci \cup Cj, Ck) = \alpha i D(Ci, Ck) + \alpha j D(Cj, Ck) + \beta D(Ci, Cj) + \gamma \left| D(Ci, Ck) - D(Cj, Ck) \right| + \delta i h(Ci) + \delta j h(Cj) + \varepsilon h(Ck)$$

D(Ci,Ck) représente la distance entre la classe Ci et Ck.

Les coefficients $\alpha i, \alpha j, \beta, \gamma$... sont des paramètres qui dépendent de la méthode de groupement. Le choix de ces paramètres spécifie le calcul des nouvelles dissimilarités.

Nous avons retenu dans notre analyse, une méthode de groupement par association moyenne. Elle est adapté pour des tests de dissimilarités possèdent des objets à « poids égaux » c'est à dire que les objets de chaque groupe sont équitablement représentés dans le corpus. Dans l'ensemble de départ nous considérons a priori qu'il n'existe pas de groupes d'objets de taille

différente avec une cohésion plus forte qui pourraient représenter des sous-ensembles perceptivement plus homogènes. Chaque son est à priori indépendant des autres et spécifique dans sa forme.

Les coefficients pour ce type de méthode sont :

$$\alpha i = \frac{ni}{ni + nj}$$
 ; et $\beta = \gamma = \delta i = \varepsilon = 0$;

ni représente le nombre d'objet dans la classe Ci.

Ainsi le calcul de la nouvelle dissimilarité devient :

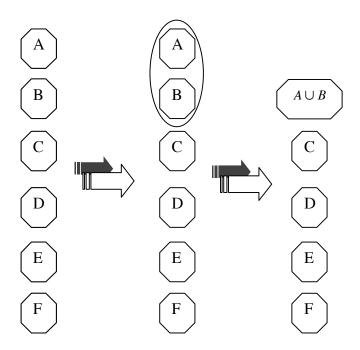
$$D(Ci \cup Cj, Ck) = \alpha i D(Ci, Ck) + \alpha j D(Cj, Ck)$$

Exemple de construction d'arbre :

Poursuivons l'exemple précédent et essayons de tracer le début de l'arbre. La matrice globale était, en ne conservant que la moitié supérieure (la matrice est symétrique) :

	A	В	C	D	E	F
A		0,00	0,67	1,00	1,00	0,67
В			0,67	1,00	1,00	0,67
C				1,00	0,67	0,67
D					0,33	0,67
Е						0,67
F						

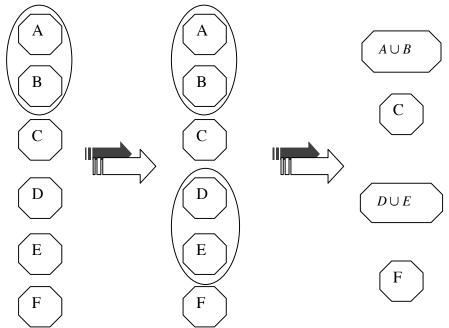
On repère les classes ayant les plus petites distances :entre A et B, distance D(A,B)=0.



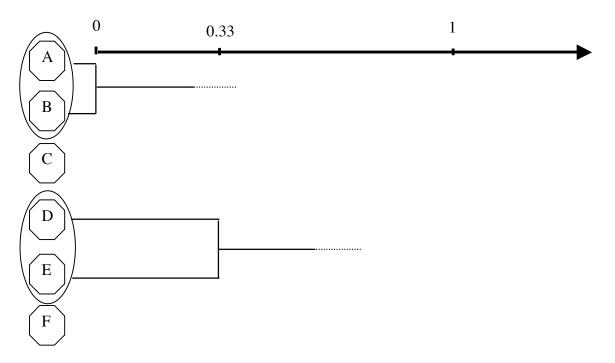
La nouvelle matrice de dissimilarité se calcul à partir de cette nouvelle classe formée AUB.

	AUB	С	D	Е	F
AUB		0,67	1	1	0,67
С			1	0,67	0,67
D				0,33	0,67
E					0,67
F					

On repère les nouvelles classes ayant les plus petites distances : entre D et E, distance D(D,E)=0.33.



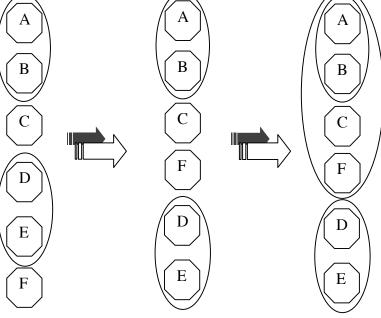
Ainsi de suite, mais pour différencier les unions A-B et D-E qui ne sont pas apparues au même moment, on représente l'arbre dans une échelle :



La nouvelle matrice de dissimilarité se calcule à partir de cette nouvelle classe formée.

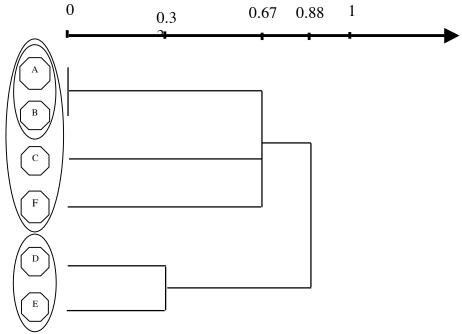
	AUB	C	DUE	F
AUB		0,67	1	0,67
С			0,84	0,67
DUE				0,67
F				

L'interprétation de cette matrice est un peu plus délicate que d'habitude car nous sommes en présence de plusieurs distances à 0,67. On remarque que F relie tous les sons entre eux mais seuls $A \cup B$ et C sont également à 0,67. En fait les distances de $D \cup E$ avec $A \cup B$ et C sont plus importantes. Il est logique que cette classe ne soit pas assemblée avec les autres. On remarque que toutefois $D \cup E$ et plus proche dans l'ordre avec F, C que $A \cup B$. Cette particularité va arranger la répartition spatiale.



Le dernier calcul de distance de dissimilarité est entre $D \cup E$ et $(A \cup B) \cup C \cup F$.

 $D(D \cup E \text{ et } (A \cup B) \cup C \cup F) = 0.88$



Maintenant que nous avons étudié le fonctionnement et le principe de l'analyse de Cluster, nous aurons plus de facilité à comprendre, à analyser et à interpréter les résultats de notre campagne de test.

2.3 Les résultats

2.3.1 Description de la population

Des membres du personnel de l'Ircam et de l'Ensam, ainsi que des étudiants se sont portés volontaires . Aucune sélection particulière n'a été effectuée. Les résultats semblaient se stabiliser autour d'une vingtaine de personnes. Nous avons jugé satisfaisant d'interroger une trentaine de sujets. Au final, le nombre des sujets s'élève à 27 (22% de femme, 78% d'homme).

Afin de mieux comprendre les caractéristiques de notre population, nous lui avons demandé de remplir un questionnaire. C'est ainsi que nous avons constaté que 74 % des personnes interrogées avaient des connaissances en mécanique, 26 % ne faisaient pas de musique. De plus, 88 % ont trouvé le test difficile, très fatigant et relativement long (durée moyenne de passage de 30 mn).

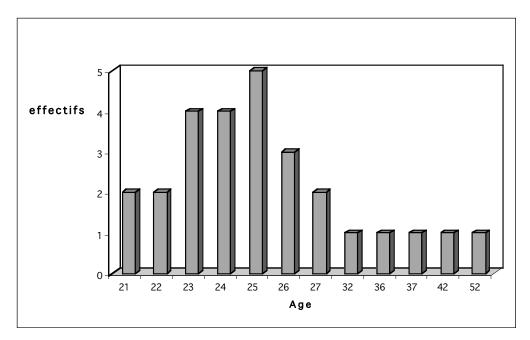
Il est toujours intéressant d'avoir des renseignements sur la population interrogée en particulier dans des domaines qui interviennent dans notre étude. La connaissance des bruits de graillonnement comme la connaissance en mécanique peut influencer la perception sonore. Nous avons voulu différencier les personnes ayant une connaissance en mécanique et les autres. Nous estimions qu'une connaissance en mécanique pouvait informer les sujets sur l'origine du son et faciliter sa compréhension et ainsi les influencer dans l'interprétation. Seulement, le qualificatif

de « connaissance en mécanique » reste un peu vague et ne permettait pas de connaître leurs capacités de reconnaissance.

La question sur la voiture était dans la même optique. Les personnes ayant une voiture ont pu déjà été confrontées au problème et ont pu reconnaître le bruit. Il est possible qu'ils aient déjà entendu le bruit et que sans le reconnaître, leur cerveau s'en souvienne et le perçoive alors différemment : c'est ce qu'on appelle la perception cognitive.

Le test était basé sur la classification des sons suivant leur timbre. Il n'est pas évident pour des personnes ne connaissant pas exactement le timbre ou ceux qui en ont une idée vague, de faire correctement les groupes. Il se peut qu'ils aient été influencés par la hauteur et le niveau sonore. La question « *êtes-vous musicien* » avait pour objectif de justement cerner les personnes ayant une connaissance du timbre d'un objet sonore.

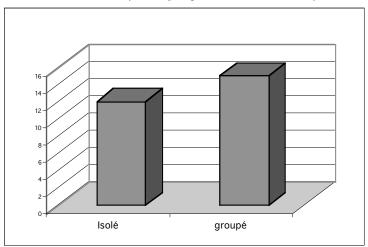
La perception sonore est naturellement influencée par le premier capteur humain : l'oreille. Et nous savons que l'évolution des performances de l'ouïe avec l'âge, ainsi que la sensibilité aux sons. Le graphique ci-dessous montre la répartition de la population en fonction de l'âge.



Répartition de la population du test en fonction de l'âge.

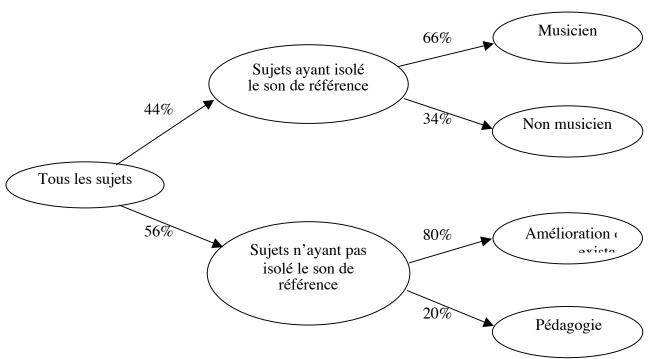
Les sujets sont répertoriés dans le listing « questionnaire » qui se trouve en annexe. Il y a toutes les caractéristiques les concernant.

Après un premier dépouillement des résultats, beaucoup de personnes ont identifié la référence comme étant un bruit différent des autres et non classable dans un groupe. La proportion de personnes l'ayant isolé est plus de un sur trois. Mais nous avons remarqué que l'incidence de ces personnes sur le résultat ne bouleverse pas les résultats (voir les résultats des tests en annexe).



Personnes ayant regroupé ou isolé le son de référence.

C'est ainsi que nous constatons que dans les personnes n'ayant pas isolé le son de référence, 80 % faisaient de la musique. Dans les personnes ayant isolé le son de référence, 34 % n'étaient pas musicien. Pouvons-nous en tirer une conclusion ? Le problème est que la question sur les musiciens n'est pas suffisante. Quel est leur niveau, combien de temps font-ils de la musique, ont-ils des connaissances sur le timbre musical... ? Un manque d'information nous oblige à rester prudent sur l'interprétation des résultats.



Notre questionnaire n'est pas assez précis pour pouvoir tirer des conclusions, une amélioration aurait été indispensable. Mais la formation de toutes ces classes de sujets nous a permis d'effectuer des arbres d'analyse pour chaque catégorie et d'étudier les influences

possibles. Certains des résultats sont contestables par leur manque d'effectif, mais il semblerait que la tendance globale n'en a pas été perturbée.

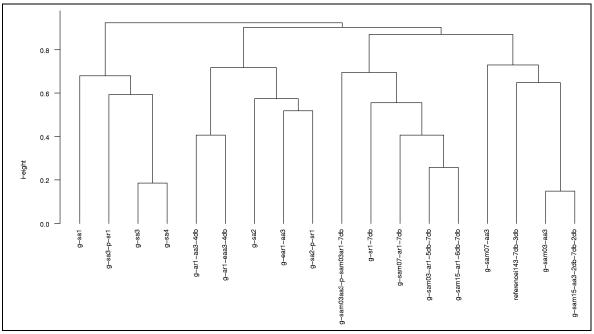
2.3.2 Analyse des résultats du test

Tous les arbres de toutes les catégories suivent la tendance révélée par l'arbre dit *principal* qui tient compte de tous les sujets.

Tout d'abord nous pouvons constater quatre catégories. Nous avons étudier ces groupes et ils correspondent assez bien aux différentes structures des modèles (arbre seul, roue seul, arbreroue, arbre interagissant avec la roue). Ce résultat converge avec l'idée que l'homme à un caractère naturel à reconnaître les objets.

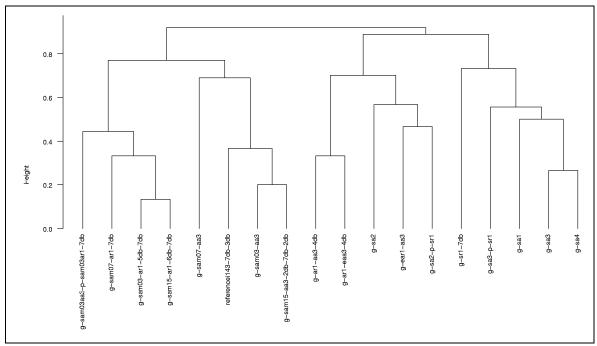
Ensuite le son de référence est apparenté toujours à la même paire qui est constituée des bruits 'g-sam03-aa3' et 'g-sam15-aa3' (respectivement, modèle 10 et 15).

Dans l'arbre principal, leur dissimilarité est estimée à 65%. Ce chiffre est explicable par le nombre important de sujets isolant le son de référence.



Arbre principal.

La question est de savoir si les personnes ayant groupé le son de référence avec un autre son, ont eu la même tendance. C'est pour cela que nous avons tracé l'arbre dit *optimisé*. Cet arbre n'est pas rigoureusement valable et l'on ne pourra pas tenir compte de ses résultats, mais il permet de constater que la dissimilarité a fortement baissé entre ces sons et est passée à 65 %. Toute cette catégorie a perçu la même ressemblance entre le son de référence et la paire nommée précédemment.



Arbre optimisé

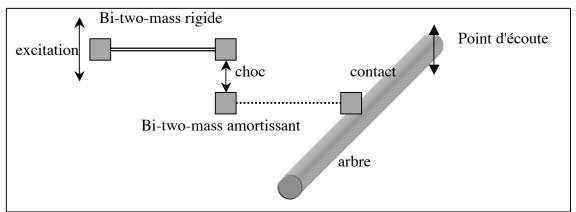
Pour les autres bruits, seul un bruit est instable. Il s'agit du g-sam07-aa3. Sinon la structure de tous les groupes reste exactement identique. Ce qui conforte la thèse d'un arbre stable et d'un nombre suffisant de sujets.

Les candidats nous ont confié qu'il était extrêmement difficile de former des groupes car ils ne savaient pas trop quel critère retenir (preuve qu'il est difficile de comprendre le timbre d'un bruit). Ils ont remarqué aussi que durant leur évolution dans le test, leur perception des sons a changé mais également leur critère de classification. Nous avons observé beaucoup de changement en fin de test.

2.3.3 Choix du modèle « élu »

Les bruits toujours assimilés au bruit de référence (voir arbres ci-dessus) sont des bruits provenant uniquement de l'interaction du *bi-two-mass* qui sert d'excitateur avec l'arbre en présence d'un amortisseur.

Nous n'avons donc pas un modèle élu mais deux modèles. Ces deux modèles sont très proches dans leur conception (même excitation, même arbre, seul l'amortisseur change) il n'est donc pas très étonnant qu'ils se retrouvent associés pour la majorités des personnes.



Représentation du modèle choisi à l'issu du test.

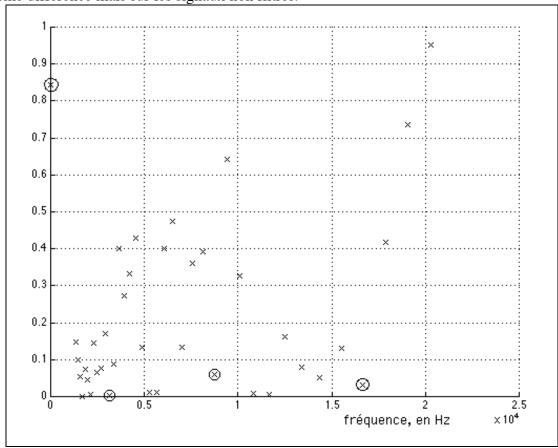
Ce résultat peut paraître surprenant quand on sait que le son de référence provient de l'accélération mesurée sur le flanc d'une roue libre de l'arbre secondaire. Mais plusieurs éléments nous permettent de comprendre un peu mieux le choix des auditeurs et de mettre en lumière certains éléments nouveaux

D'une part en étudiant le spectre de l'accélération (voir 1.4.3.5) nous pouvons constater qu'il y a des pics de fréquence correspondant à des modes de la roue et à des modes attribués à l'arbre primaire. L'existence de modes propres de l'arbre dans ce spectre est relativement surprenant car l'arbre et la roue sont en contact uniquement durant la phase de graillonnement. La durée de contact correspond au temps pendant lequel l'arbre entraîne la roue ou lorsque la roue entraîne l'arbre par le jeu des inerties, ce qui semble court. On peut aussi envisager une transmission solidienne des vibrations par l'intermédiaire des roulements sur lesquels sont montés les arbres, par le carter et par le contact ente les roues libres et l'arbre secondaire. Les mesures ayant été faites, pour des raisons pratiques, sans mouvement de rotation de l'arbre primaire, le phénomène de transmission solidienne est sans doute accentué. Ces éléments nous permettent de comprendre la présence de pics de fréquence des modes propres de l'arbre sur le spectre provenant des mesures.

D'autre part en calculant l'énergie spectrale contenue dans les sons synthétisés issus de modèles ne faisant intervenir que la roue ou que l'arbre on constate que l'arbre est plus présent que la roue. L'énergie spectrale associée à la roue est 3,6 fois plus faible que celle associée à l'arbre. Ceci s'explique par le plus grand nombre de modes propres pour l'arbre (20 modes) que pour la roue (3 modes uniquement). Ceci explique que le son de référence, bien que présentant des pics des modes propres de la roue, soit majoritairement associé aux modèles avec l'arbre et non ceux avec la roue.

Enfin un autre point peut venir étayer nos hypothèses. Nous avons comparer les spectres d'un modèle ne contenant que la roue et celui d'un modèle ne contenant que l'arbre, en tenant compte des bandes critiques de l'appareil auditif humain introduites par E. Zwicker. Nous constatons que les modes 1 de la roue et 3 de l'arbre (respectivement à 3680 et 3542 Hz) sont situés dans la même bande critique (bande 17 de 3150 à 3700 Hz). Il en est de même pour les modes 2 de la roue et 7 de l'arbre (7890 et 7703 Hz) situés dans la $22^{\text{ème}}$ bande critique (de 7700 à 9500 Hz). Quand au troisième mode la roue, qui est à 16855 Hz, il n'y a plus de bandes critiques

à cette fréquence du fait de notre faible sensibilité aux très hautes fréquences. Afin de poursuivre nos recherches dans cette voie nous avons recontacter P. Susini qui nous a présenté un modèle plus récent de modélisation de l'oreille interne humaine : les filtres ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth). Ce système modélise l'oreille interne comme un ensemble de filtres. Par analogie, chaque filtre peut correspondre à une bande critique. A l'aide de fonctions préexistantes dans Matlab nous avons calculer les caractéristiques d'une banque de 60 filtres ERB couvrant le domaine [100 - 22100 Hz]. Nous avons appliqué l'ensemble de ces filtres aux sons comparés précédemment afin de voir à la sortie de quels filtres les signaux associés à la roue et ceux associés à l'arbre sont les plus proches en terme d'énergie spectrale. Le graphique ci-dessous représente la valeur absolue de la différence d'énergie spectrale entre les signaux associés à la roue et ceux associés à l'arbre, en sortie de chacun des 60 filtres ERB. A la fréquence 0 est placé la même différence mais sur les signaux non filtrés.



Différence d'énergie spectrale en sortie des filtres ERB.

Sur le graphique les zones de coïncidence entre les signaux à la sortie des filtres ont été entourées, ainsi que la différence concernant les signaux non filtrés. On peut remarquer qu'à la sortie de certains filtres la différence est très faible, mais il s'agit de filtres agissant sur des domaines de fréquence où il n'y a que du bruit, ces valeurs ne sont donc pas significatives.

En conclusion, les résultats fournit par les auditeurs et le choix de deux modèles ne contenant pas la roue sont appuyés par :

• L'existence de pics de fréquences attribués aux modes propres de l'arbre sur le son de référence.

- La présence plus forte de l'arbre, par rapport à la roue, dans le domaine spectrale.
- La position des fréquences des modes propres de l'arbre et de la roue dans les mêmes bandes critiques ou les mêmes filtres ERB.

2.4 Perspectives et modifications à apporter

2.4.1 Utilisation du modèle « élu »

Maintenant que nous possédons un modèle suffisamment proche de la réalité nous pouvons envisager la troisième phase du projet.

En raison du manque de temps nous avons seulement tester l'influence du matériau de l'arbre primaire sur le son synthétisé. Nous avons choisi 3 matériaux (aluminium, acier et titane) aux caractéristiques mécaniques assez différentes et ceci sans tenir compte des conditions de faisabilité d'une boîte de vitesses avec de tels matériaux. La démarche employée est la suivante :

- Détermination des paramètres modaux à l'aide de Castem (réalisée par Y. Flavignard)
- Création des nouveaux objets sous Modalys, représentant les trois arbres
- Synthèse du son.

La synthèse du son nous a fourni trois sons dont les différences sont audibles.

On a pu constater lors de ces essais l'importance de l'amortissement des modes propres. La détermination de ces amortissement avec Castem n'est pas encore tout à fait au point. Il s'agit sans doute du principal point à éclaircir avant d'envisager la réalisation complète de cette troisième étape.

Néanmoins le fait d'avoir pu obtenir trois sons sensiblement différents est très intéressant pour l'avenir de cette étude. Modalys semble adapté à des utilisations dans le domaine industriel. A terme un logiciel qui intégrerait d'autre fonctionnalités (éléments finis, dynamique, rayonnement...) permettrait d'envisager une utilisation d'un tel outil dès la phase de conception des produits.

2.4.2. Améliorations à apporter aux modèles

Plusieurs points pourraient être améliorés dans les différents modèles réalisés. Les plus importants semblent être la connexion intermédiaire entre *strike* et *adhere*, le nombre limité d'objets et enfin la fonction d'excitation.

Nos questions sur la connexion rejoignent les préoccupations actuelles de Joël Bensoam (doctorant de l'Université du Maine) qui travaille sur l'amélioration de Modalys grâce aux méthodes numériques (objets 3D, contact non-linéaire, synthèse du bruit rayonné...). Ces avancées pourraient être d'un grand secours car elles permettraient, dans le cas de la connexion, d'obtenir le lien entre les paramètres physiques et les paramètres de Modalys.

Par ailleurs, dans nos différents modèles il n'y a au mieux que deux éléments présents dans la boîte de vitesses. Il pourrait sans doute être utile d'intégrer de nouveaux objets. Afin de

savoir quels objets ajouter il faudrait procéder à de nouvelles mesures pour déterminer dans les accélérations mesurées mais aussi dans le bruit rayonné les sources sonores principales. Ce sont ces sources qu'il faudrait ajouter au modèle.

Au niveau de la fonction d'excitation, un autre projet de fin d'étude s'est intéressé à l'occurrence des chocs. Pour améliorer un peu plus le modèle et aussi pour aborder le côté subjectif du bruit (troisième étape de l'étude), la connaissance de l'occurrence des chocs et des paramètres agissant dessus semble être intéressante. D'autre part l'utilisation d'un logiciel de dynamique pourrait aussi nous apporter une aide puisqu'il permettrait d'obtenir un modèle de l'excitation. On aurait ainsi, une fois encore, la relation entre le phénomène physique et l'excitation occasionnée.

Pour envisager ces futurs améliorations il sera sans doute utile de s'appuyer sur de nouvelles mesures à effectuer sur le banc d'essais voire même dans l'habitacle d'une voiture. Ainsi on pourrait disposer de plusieurs conditions de graillonnement, de mesures de la vitesse au lieu de l'accélération, de mesure du bruit rayonné, des accélérations sur le carter et l'arbre secondaire.

2.4.3. Amélioration du test psychoacoustique

Le corpus de son du test pourrait être complété par plusieurs bruits de référence provenant de plusieurs enregistrements sur banc d'essai. En effet, une étude sur la dispersion du bruit de référence permettrait de mieux situer les sons synthétisés du *groupe de référence* ainsi formé (et plus uniquement d'un seul bruit de référence).

Le questionnaire des sujets pourrait être plus précis sur certains points comme Connaissez vous le principe de fonctionnement d'une boîte de vitesses ? Connaissez vous la définition du timbre ? Ces questions supplémentaires permettraient de mieux cerner le type de population interrogée et surtout de créer des groupes d'individus dont l'analyse des résultats serait intéressante et pertinente.

Conclusion

Par la méthodologie mise en place, le projet mené cette année justifie pleinement l'utilisation du logiciel Modalys dans des applications industrielles. D'autre part les améliorations futurs qui seront apportées à ce logiciel, notamment par le travail de Joël Bensoam (intégration d'un code éléments finis entre autre), permettront de faire de Modalys un outil complet et approprié au design sonore des objets industriels.

D'autre part, cette étude nous a montré l'existence de contraintes nouvelles à intégrer dans les phases de conception. A l'heure actuelle en plus des contraintes de coût ou de rendement, il y a des contraintes sur la relation entre l'homme et ce produit, notamment dans le domaine de la gêne sonore. La sensibilisation à ces contraintes est un plus dans notre formation d'ingénieur car elle amène une nouvelle manière de penser la conception des objets.

En réalisant cette étude nous avons pu collaborer avec des spécialistes de différentes disciplines. De la mécanique vibratoire à la psychoacoustique, nous avons associés plusieurs domaines de l'acoustique grâce à une vision généraliste du problème.

Enfin, ce projet renforce la collaboration entre l'Ircam et le LMVA qui permet à chacun d'élargir ses champs d'investigation. Vu l'intérêt susciter par cette étude et les résultats obtenus, il semble intéressant de la prolonger.

Bibliographie

LEIPP E. - La machine à écouter - Paris, Masson, 1977

ZWICKER E., FASTL H. - Psychoacoustics, Facts and Models - Springler, 1999

ZWICKER E., FELDTKELLER R. – Psychoacoustique, l'oreille récepteur d'information – Paris, Masson 1981

CETIM – Les nouveaux outils de la qualité acoustique – CETIM 1996

BOUDIER A., FLAVIGNARD Y. – Design sonore des objets - Projet n°46 ENG 2000-2001

HOUIX O. - Représentation des proximités – Ircam 2002

www.ircam.fr site internet de l'Ircam.

E.N.S.A.M. PARIS

Laboratoire de Mécanique Vibratoire et d'Acoustique

Projet N°46

DESIGN SONORE DES OBJETS

- ANNEXES -

Elèves ingénieurs :

Directeur de projet :

DESMALES François POUVREAU Etienne

TEBEC Jean-Louis

Sommaire

Consignes du test d'écoute	1
Questionnaire rempli à l'issu du test	4
Arbres de Cluster	6

Consignes du test d'écoute

Questionnaire rempli à l'issu du test

juin 2002

Arbres de Cluster