

RAPPORT SCIENTIFIQUE DU PROJET « senSons » : Vers le Sens des Sons.

Sølvi Ystad

CNRS- LMA, 31 Ch. J. Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les axes et actions relatifs au projet ANR-05-JCJC-0033-01 "senSons" dont le but était d'établir un lien entre le comportement physique des sources sonores, la perception des sons engendrés et le sens évoqué par ces sons. L'originalité de ce projet était d'associer au sein d'une structuration pluridisciplinaire, les domaines de la synthèse sonore, de l'analyse des signaux non-stationnaires, de la perception des sons complexes et des neurosciences cognitives. C'est en effet de l'interaction forte de ces quatre domaines qu'ont pu être tissés certains liens complexes entre la structure morphologique des sons et leur impact perceptif. Le projet a été organisé suivant deux axes fondamentaux :

- La structure des sons et leur perception, qui concerne la caractérisation tant acoustique que perceptive des sons.
- La sémiotique des sons qui s'attache à comprendre les mécanismes cérébraux responsables de l'attribution d'un sens et leurs corrélats acoustiques.

Chacun de ces axes a été abordé par le biais d'actions visant à décrypter les divers éléments intervenants dans l'accès au sens des sons. Ainsi, la structure et la perception des sons a-t-elle été étudiée aussi bien niveau « atomique », qu'aux niveaux des sons isolés et des structures complexes telles que rencontrées dans la musique. La sémiotique des sons a quant à elle été abordée dans le cadre de sons environnementaux mais aussi des sons « inouïs » issus d'une approche acousmatique.

Enfin, une part importante de ce travail a été dédiée aux applications industrielles. En effet, le « sens des sons » prend toute son importance dans la vie de tous les jours, se prêtant ainsi à une interaction forte avec le monde industriel.

2. PARTENAIRES

Initialement, l'équipe senSons regroupait sept personnes dont quatre permanents CNRS. Tous les membres de l'équipe étaient rattachés au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (LMA) à l'exception d'un chercheur postdoctoral qui dépendait de l'Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée (INCM). Huit autres chercheurs participaient au projet comme collaborateurs. Parmi ces collaborateurs, deux d'entre eux étaient rattachés à l'INCM ; deux autres au LMA et un au Laboratoire d'Analyse, Topologie et Probabilités de Marseille (LATP). Deux institutions étrangères collaboraient au projet : l'Acoustics Research Institute (ARI), Vienne, Autriche et l'Université d'Aalborg, Esbjerg, Danemark. Par la suite, le projet a suscité un grand intérêt et plusieurs nouveaux collaborateurs relevant d'institutions Françaises et étrangères s'y sont associés. Tel est le cas du Centre de Réalité Virtuelle de Marseille-Luminy, de l'Université McGill, Montréal, Canada, de l'Université de Newcastle, Australie, ainsi que des entreprises Peugeot-Citroën (PCA) et Orange France-Télécom. Ces collaborations ont permis une ouverture vers de nouveaux domaines de recherche qui s'inscrivent naturellement dans la

problématique senSons, à savoir la synthèse sonore 3D et la Réalité Virtuelle sonore.

3. MATERIELS ET METHODES

Le projet senSons était avant tout un projet pluridisciplinaire dont le but était d'associer des domaines a priori différents afin d'aborder globalement la complexité du sens des sons. Cependant, par soucis de clarté de la présentation, nous allons dissocier dans la méthodologie utilisée, quatre domaines scientifiques bien repérés sur lesquels s'appuyait fortement le projet :

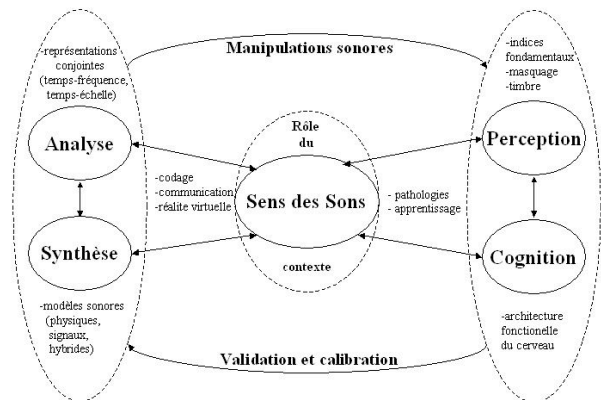
- *L'analyse des sons*, qui fournit les outils et méthodes susceptibles de représenter un signal sonore à partir de concepts mathématiques (notamment de complétude et de conservation de l'information). Elle prend tout son intérêt dans le domaine des sons en lui associant des concepts sensoriels (sonie, timbre, sensations, ...)

- *La synthèse des sons*, qui permet la génération et la manipulation de sons calibrés en s'appuyant sur des modèles physiques, de signaux ou hybrides. Elle permet d'étudier l'effet perceptif des paramètres et de s'affranchir des contraintes physiques tout en donnant lieu à des sons réalistes.

- *La perception des sons*, qui s'intéresse aux bases mécaniques et physiologiques propres à notre système auditif ainsi qu'aux attributs subjectifs sur lesquels s'appuie notre perception des sons. Ce domaine procure un ensemble classifié de méthodes basées sur le comportement et/ou le jugement de sujets (psycho-physique).

- *Les neurosciences cognitives*, qui s'intéressent aux mécanismes mis en jeu au niveau cérébral lors de l'écoute des sons et permettent d'élargir le champ d'étude par la prise en compte du contexte et des spécificités des sujets (degré de connaissance, spécificités culturelles, ...). Ce domaine procure en outre des méthodes de mesures objectives basées sur l'imagerie cérébrale.

Dans le cadre du projet senSons, ces domaines interagissaient fortement au sein d'un système bouclé qui est représenté dans la figure ci-dessous.



4. RESULTATS

L'organisation du projet a été conçue à partir d'un ensemble d'actions visant à associer les compétences des différents partenaires et à procurer les méthodes et les connaissances nécessaires à l'établissement du concept de « sens des sons ». Nous résumons ci-dessous les principaux résultats acquis pour chacune des actions en les regroupant suivant les deux axes fondamentaux du projet.

4.1 Structure sonore et perception

Cet axe du projet vise à caractériser les éléments, tant acoustiques que perceptifs, qui interviennent dans la perception des sons. Cet axe a été abordé suivant 3 niveaux distincts de complexité des sons.

Niveau « atomique »

Analyse temps-fréquence : masques de Gabor

Les décompositions temps-fréquence de signaux permettent une représentation de ces derniers en terme « d'atomes » localisés dans le plan temps-fréquence. Ce type de représentation permet d'aborder la notion de morphologie sonore à partir de l'organisation sous-jacente de ces « atomes » de son. Une étude mathématique liée aux propriétés des masques de Gabor, qui permettent la caractérisation des différences structurelles entre deux sons, a été menée en partenariat avec le LATP [25,43]. Cette étude pose les jalons d'une approche morphologique du timbre tout en procurant des outils mathématiques nouveaux pour la caractérisation des sons. La combinaison de ces résultats et des données obtenues lors des tests perceptifs de masquage est en cours et devrait permettre de développer un « filtre temps-fréquence » de masquage.

Collaborations : Bruno Torrèsani et Anaik Olivero (LATP-Marseille), R. Kronland-Martinet (LMA – Marseille)

Financement additionnel : Bourse de doctorat ministère

Masquage temps-fréquence.

Il s'agissait ici de mieux comprendre comment des structures sonores élémentaires sont perçues et interagissent entre elles. Cet aspect de l'audition est fondamental pour le développement d'outils d'analyse permettant une représentation des sons qui soit cohérente avec notre perception. Pour cela, le masquage sonore dans le plan temps-fréquence a été étudié, en utilisant des stimuli très localisés à la fois en temps et en fréquence ("atomes" temps-fréquence). Masques et cibles possédaient les mêmes caractéristiques spectro-temporelles, à savoir une bande passante d'un ERB et une durée effective de 9,6 ms. Six expériences psychoacoustiques ont été conduites au LMA dans le cas d'un unique masque [3,32,53]. Afin d'obtenir une caractérisation globale du masquage dans le plan temps-fréquence, une série d'expériences a été menée en parallèle au ARI pour d'étudier les propriétés d'additivité du masquage [4,31]. Dans le cadre d'un masque unique, il a été montré que les caractéristiques de masquage sont comparables à celles mesurées avec des signaux sinusoïdaux de durée équivalente. Par contre, dans le cadre de masques multiples, les résultats montrent que le masquage temporel est proportionnel au nombre de masques, et que pour le masquage fréquentiel les masques de fréquences élevées contribuent plus à l'additivité que les masques de fréquences basses (relativement à la fréquence de la cible). Ces résultats indiquent en outre que la compression de la membrane basilaire est forte même pour des stimuli très brefs.

Collaborations: Bernhard Laback et Peter Balazs (ARI – Vienne), Sophie Savel, Sabine Meunier, Thibaud Necciari, Richard Kronland-Martinet et Solvi Ystad (LMA, Marseille).

Financements additionnels: bourse doctorat ministère, PAI « Amadeus »

Niveau « sons isolés »

A ce niveau d'étude, il s'agissait d'associer la morphologie spécifique des sons et leur ressenti. Cette association est primordiale dans le cadre du « design sonore » pour construire des sons qui évoquent une sensation ou une représentation mentale spécifique, ou dans le cadre de la réalité virtuelle sonore pour simuler et transformer des sons en cohérence avec une scène visuelle. Deux catégories de sons ont été utilisées dans ce cadre: des sons environnementaux et, de façon beaucoup plus originale, des sons acousmatiques (i.e. des sons pour lesquels les sources sont difficilement identifiables).

Sons environnementaux

Catégorisation perceptive des sons d'impacts.

Dans cette étude, nous nous sommes attachés à déterminer les relations entre la structure acoustique des sons et leur catégorisation perceptive. Des sons d'impact issus de différents matériaux frappés (Bois, Métal, Verre) ont été enregistrés, analysés et calibrés en sonie et hauteur tonale par resynthèse. Un continuum sonore a été construit entre les différentes catégories physiques des sons grâce à un processus de « morphing sonore » basé sur l'interpolation des paramètres de synthèse. Ces sons ont été présentés à des sujets qui devaient les classer dans une des trois catégories de matériaux. L'analyse des sons typiques de Bois, Métal et Verre a permis de conclure sur la pertinence de l'amortissement et de descripteurs relatifs à l'inharmonicité et la rugosité pour la catégorisation perceptive des matériaux frappés. Par ailleurs, des modèles prédictifs (un modèle par catégorie de matériau) fondés sur une méthode statistique de régression logistique binaire ont été calibrés et validés avec ces sons typiques. Ainsi, un algorithme global de classification prédictive de sons de matériaux frappés, basée sur un nombre réduit de descripteurs, a été mis au point sur la base des prédictions données par chaque modèle statistique [5,13, 14, 36, 50].

Collaborations : Mitsuko Aramaki et Mireille Besson (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet et Solvi Ystad (LMA, Marseille).
Financement additionnel : Human Frontier Science Program (HSFP #RGP0053)

<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/Categorization/sounds.html>

Qualité sonore

Les sons d'impact ont également été utilisés dans le cadre d'une étude visant à lier la qualité sonore et les caractéristiques physiques des bois de lutherie.

Pour cela, une méthodologie originale a été proposée, associant des processus d'analyse-synthèse à des tests de classification perceptive. Les sons produits en impactant 59 lames de bois issues d'espèces différentes mais toutes de même géométrie, ont été enregistrés et classifiés par un luthier de renom. Ces mêmes sons ont ensuite été ajustés numériquement à la même hauteur perceptive puis classifiés à nouveau par le luthier. L'analyse statistique des deux classifications du luthier ont clairement montré l'influence de la hauteur tonale sur le jugement de l'expert et ont permis de mettre en évidence deux descripteurs de timbre liés à la classification : la dépendance fréquentielle de l'amortissement et l'étendue spectrale du signal généré. Ces descripteurs ont pu également être reliés à des caractéristiques physiques et anatomiques des espèces de bois, laissant entrevoir de nouvelles perspectives dans le choix de bois nouveaux pour l'utilisation musicale [19, 44].

Collaborations : Mitsuko Aramaki (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet et Solvi Ystad (LMA - Marseille), Loïc Brancheriau et Henri Baillères (CIRAD, Montpellier)
http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/JASA_Xylophone/sounds.html

Sons industriels

Les sons d'impacts engendrés par la fermeture de portières automobiles ont fait l'objet d'une collaboration industrielle avec Peugeot-Citroën. Il s'agissait ici de mieux comprendre les relations entre le ressenti et la structure de ces sons particuliers. La caractérisation acoustique du bruit a été étudiée par l'intermédiaire d'un modèle d'analyse-synthèse qui a permis d'observer les effets des paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives [35,40,47,49,55]. Les résultats de cette étude ont permis la mise en œuvre d'un outil de caractérisation mais aussi de spécification des bruits de portières.

Collaboration : Richard Kronland-Martinet et Solvi Ystad (LMA Marseille), Marie-Céline Bezat et Vincent Roussarie (PSA, Paris)
Financement additionnel : Convention d'étude PSA Peugeot Citroën/ CNRS-LMA

Synthèse de timbres

Les résultats obtenus lors des tests perceptifs ont permis de construire un modèle de synthèse temps- réel des sons impulsifs basé à la fois sur des aspects physiques et perceptifs des sons. Ce modèle se décompose en trois parties simulant respectivement l'excitation, le matériau (représenté par l'amortissement des modes de vibration) et la forme de l'objet (représentée par la répartition spectrale de l'énergie). Une nouvelle stratégie de « mapping » (adaptation entre paramètres du modèle et paramètres de contrôle) associant trois niveaux de contrôle a été développée. Le niveau le plus élevé permet de contrôler les sons à partir d'une description verbale du son (taille, forme ou matériau de la source). Le niveau intermédiaire donne accès à l'ensemble des paramètres qui caractérisent le signal perçu (amortissement, inharmonicité, rugosité...), tandis que le niveau basique contient les paramètres qui interviennent directement dans le modèle de synthèse (fréquences, amplitudes...) [5,14,23,28,36,39].

Collaborations Mitsuko Aramaki et Mireille Besson (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet, Charles Gondre, Thierry Voinier et Solvi Ystad (LMA - Marseille)
<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/Categorization/sounds.html>

Prise en compte de l'aspect spatial

Un aspect important lié à l'écoute des sons concerne la distribution de leur énergie dans l'espace : la spatialisation. Dans le but d'intégrer à la plateforme de synthèse des processus de spatialisation, un modèle original de synthèse spatialisée a été développé en collaboration avec Orange France Télécom. Un algorithme qui combine au niveau primaire la synthèse additive dans le domaine spectral et l'encodage de l'espace (positionnement et étendue perçue des sources) a été conçu. Cet algorithme donne actuellement lieu à une étude approfondie des modalités de contrôle en vue de la construction d'un système général de synthèse spatialisée dédié aux sons de l'environnement [11,12,24,27,29,34,37].

Collaborations : Charles Verron, Gregory Pallone (France Télécom - Lannion), Mitsuko Aramaki (INCM - Marseille), Richard Kronland-Martinet (LMA - Marseille)
Financement additionnel : Convention d'étude France Télécom/LMA
<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/spatsynthIEEE/>

Sons « acousmatiques »

Dynamique évoquée par les sons.

Une étude concernant l'évocation de mouvement induite par des sons a été réalisée à l'aide de sons isolés n'évoquant pas a priori

de sources sonores connues. Pour cela, des sons monophoniques issus de banques de sons de compositeurs de musique électroacoustique ont été présentés à des sujets auxquels était demandée une tâche de catégorisation libre caractérisée par un regroupement des sons évoquant le même type de mouvement. L'analyse des résultats a permis de déterminer cinq catégories majeures de mouvements : s'approche, s'élève, tombe, passe et tourne. Un grand nombre de descripteurs ont ensuite été mesurés sur les sons de façon à analyser les relations éventuelles entre ces derniers et leur catégorisation perceptive. [16,30,41]

Collaborations : Mitsuko Aramaki (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet, Solvi Ystad et Adrien Merer (LMA - Marseille)
Financement additionnel : Bourse de doctorat ministère

Caractérisations sémantique des sons

Les sons acousmatiques ont également été utilisés pour établir des normes d'associations sémantiques entre sons et mots en demandant à des sujets d'associer librement des mots à chacun des sons proposés. Les analyses acoustiques révèlent un lien possible entre la structure acoustique et description sémantique des sons. Ainsi, les variations de fréquence seraient liées à une impression de mouvement. Les sons à hauteur variable sont souvent caractérisés par des mots tels que rebond, monté, roulement, rotation. La densité spectrale est un autre paramètre acoustique qui semble avoir une forte influence sur l'appréciation des sons. Ainsi, un son caractérisé par une densité spectrale large bande et un comportement stationnaire est généralement associé à des situations désagréables, évoquant des mots tels que frisson, froid, douleur... [10,15,46,48,51]

Collaborations : Daniele Schön et Mireille Besson (INCM – Marseille), Solvi Ystad et Richard Kronland-Martinet (LMA - Marseille)
<http://www.sensons.cnrs-mrs.fr/Schaeffer/Schaeffer.html>

Niveau « structures sonores complexes »

Musique et interprétation

Au niveau des structures sonores complexes, nous nous sommes attaché à repérer les interactions entre les différents événements nécessaires à la cohérence du message sonore. Pour cela, nous avons pris comme support le message musical et avons étudié le rôle du timbre dans l'interprétation. Ce travail faisait l'objet de la thèse de Mathieu Barthet [56]. Une étude de dissemblance réalisée sur des sons de synthèse de clarinette, obtenus à partir d'un modèle physique, a permis d'évaluer l'influence du contrôle instrumental (pression d'alimentation et pince) sur les timbres produits par l'instrument. Des enregistrements d'extraits musicaux joués un grand nombre de fois par un même clarinettiste professionnel sur un instrument naturel selon différentes intentions musicales ("scolaire" et "expressive") ont ensuite été analysés.

Les mécanismes de transmission de l'expression musicale ont ainsi pu être étudiés au travers de changements de timbre, de rythme et de dynamique. Certaines variations de timbre (variations de qualité sonore au sein des notes et entre les différentes notes) sont reproduites de manière systématique par l'interprète lorsque son intention musicale est la même. Une expérience perceptive a révélé que la nature des évolutions temporelles de la brillance des notes influe sur les préférences musicales des auditeurs. Dans le but de définir des règles d'interprétation, des variations de timbre issus d'une interprétation expressive ont été ajoutées à des interprétations inexpressives (issus d'échantillonneurs). Le jugement de qualité effectué par des musiciens a montré une préférence pour les morceaux auxquels des variations de timbre avaient été ajoutées. L'ensemble de ces travaux a permis de montrer que les variations morphologiques temporelles de timbre (par ex.

variations temporelles de brillance) constituent l'un des vecteurs de l'expression musicale. [6,7,17, 22,33,42,45,52]
http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/Interpretation_acoustical/
http://www.lma.cnrs-mrs.fr/~kronland/Interpretation_perceptual/
Collaborations : Mathieu Barthelet Sølvi Ystad, Richard Kronland-Martinet et Philippe Guillemain (LMA, Marseille), Philippe Depalle (McGill University, Canada).

Financement additionnel : Bourse de doctorat ministère

Le « chant » des moteurs automobiles

En collaboration avec notre partenaire industriel PCA, une étude sur les bruits de moteurs, visant à utiliser la synthèse dans le cadre du design sonore est actuellement en cours et fait l'objet de la thèse de Jean-François Sciabica. Cette étude a déjà permis d'identifier des paramètres de bruits moteurs pertinents du point de vue perceptif qui vont permettre un contrôle intuitif des bruits par la synthèse. [26] De façon similaire à l'interprétation musicale, l'évolution temporelle du timbre des bruits moteurs semble primordiale pour l'appréciation de la qualité du véhicule.

Collaboration : Richard Kronland-Martinet et Sølvi Ystad (LMA Marseille), Marie-Céline Bezat, Vincent Roussarie et Jean-François Sciabica (PSA, Paris)

Financement additionnel : Convention d'étude PSA Peugeot Citroën/ CNRS-LMA

4.2 Sémiotique des sons

La deuxième action du projet *senSons* concernait la sémiotique sonore, qui a pour but de mieux comprendre le lien entre sons et « interprétation humaine ». Ce problème a été abordé au travers de méthodes comportementales et d'imagerie cérébrale (mesures électrophysiologiques) suivant deux protocoles expérimentaux; la catégorisation et l'amorçage.

Bases neuronales de la catégorisation sonore

Dans le cadre de la catégorisation, des sons synthétisés de bois, métal et verre ont été présentés aux sujets qui devaient les catégoriser dans une des trois catégories de matériaux. Des sons représentatifs de chaque catégorie ainsi que des sons ambigus ont été présentés. Les processus neuronaux impliqués dans la tâche de catégorisation ont été examinés grâce à des mesures de l'activité cérébrale (méthode des Potentiels Evoqués, PEs). L'analyse des résultats montre que les processus cérébraux mis en jeu lors du traitement de sons typiques de la catégorie Métal diffèrent de façon significative de ceux mesurés avec des sons typiques des deux autres catégories, dès 150 ms et jusqu'à 700 ms après la présentation du son. L'association de données comportementales, électrophysiologiques et acoustiques nous a permis de mieux comprendre la catégorisation de matériaux et d'entrouvrir la voie à une approche nouvelle : la « neuro-acoustique » [5,13,50,54].

Collaborations : Mitsuko Aramaki et Mireille Besson (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet et Sølvi Ystad (LMA, Marseille)

Le contexte et la sémiotique des sons.

Dans le but d'étudier l'influence du contexte sur la perception des sons, ces mêmes stimuli ont été utilisés dans le cadre d'un protocole d'amorçage. Il s'agit ici de présenter des paires de stimuli, et demander aux sujets si les sons de la paire appartiennent à la même catégorie ou non. Ce protocole permet d'étudier les effets d'amorçage obtenus avec des sons non-linguistiques et de les comparer avec les effets obtenus avec des sons linguistiques. Les résultats montrent des similitudes avec ceux obtenus sur le même groupe de participants avec des stimuli linguistiques. Les données électrophysiologiques ont révélé une négativité fronto-centrale autour de 450 ms après le début de la cible plus ample pour les cibles ambiguës que pour

les cibles reliées, et une positivité (composante P300) dans les régions pariétales pour les cibles non reliées. Ainsi, l'ensemble de ces résultats refléterait la mise en jeu de processus cérébraux d'amorçage conceptuel communs aux deux types de stimuli et iraient dans le sens d'une véritable sémiotique des sons." [9].

Collaborations : Mitsuko Aramaki, Mireille Besson et Céline Marie (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet et Sølvi Ystad (LMA - Marseille)

Financement additionnel : Bourse de doctorat ministère

S'affranchir au mieux des effets culturels et d'apprentissage.

Les effets mesurés dans l'expérience précédente sont-ils liés à notre connaissance du monde sonore ou sont-ils intrinsèquement contenus dans la structure acoustique des sons ? Pour tenter de répondre à cette question, une expérience utilisant le protocole d'amorçage avec des stimuli « acousmatiques » a été réalisée. Des mots fréquemment évoqués lors de l'écoute de ces sons ont été présentés à des sujets, suivis du son sémantiquement associé ou non (comme défini par les normes d'association). Le processus a ensuite été inversé en présentant le son en premier suivi d'un mot sémantiquement relié ou non. L'électroencéphalogramme a été enregistré durant l'expérience afin de mesurer les Potentiels Evoqués par les sons. L'analyse des résultats montre que les sujets sont sensibles à la relation conceptuelle entre deux stimuli (mots-sons) et qu'ils sont capables de catégoriser les stimuli associés avec une bonne précision. Les PEs par la cible révèlent des effets similaires entre 250 et 600 ms, malgré une différenciation légère quant à la distribution topographique sur le scalp selon que la cible soit un Mot ou un Son.

Collaborations : Daniele Schön et Mireille Besson (INCM – Marseille), Richard Kronland-Martinet et Sølvi Ystad (LMA - Marseille)
<http://www.sensons.cnrs-mrs.fr/Schaeffer/Schaeffer.html>

5. BILAN

Le bilan du projet *senSons* est extrêmement positif. Outre les facilités financières qui ont permis la réalisation d'une cabine audiométrique permettant la réalisation de tests perceptifs en écoute binaurale et transaurale, le projet *senSons* a permis des avancées scientifiques notables basées sur une approche pluridisciplinaire des problèmes posés. Un nombre important de publications a ainsi été réalisé : 18 publications dans des journaux à comité de lecture, 25 communications dans des congrès internationaux et l'édition de 2 livres.

Plusieurs groupes de travail ont été créés autour des différentes thématiques et deux colloques associant tous les participants au projet ont été organisés au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique en mai 2006 et janvier 2008. Pour faciliter l'échange d'informations entre les participants, un site Internet présentant les activités liées au projet a été conçu (<http://www.sensons.cnrs-mrs.fr>) ainsi qu'une liste courriel (sensons@lma.cnrs-mrs.fr). Trois conférences internationales intitulées « Computer Music Modelling and Retrieval » - CMMR 2007, – “Sense of Sounds”, CMMR 2008 – “Genesis of Meaning in Sound and Music” et CMMR 2009 – “Auditory Display” ont également été organisées par *senSons*, sous tutelle du LMA (Ystad, Kronland-Martinet) et de notre partenaire danois (K. Jensen). Les 3 conférences ont eu lieu à Copenhague au Danemark. Les 2 premières conférences ont donné lieu à deux livres publiés par Springer Verlag, paru en juin 2008 [1] et juin 2009 [2].

Depuis le début du projet, huit étudiants de Master 2 ont effectué leurs stages sur des thématiques étroitement liées au projet. Cinq étudiants en thèse (bourses CIFRE et MENRT) ont rejoint le projet, deux thèses ont été soutenues en décembre

2007 [55] et décembre 2008 [56]. Le projet *senSons* a permis l'embauche d'une post doctorante (Mitsuko Aramaki) pendant 7 mois qui a ensuite été recrutée comme chercheur au CNRS par la section 45. Son affectation à l'INCM (Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée) a permis d'assurer le lien entre l'acoustique et les neurosciences cognitives facilitant la mise en œuvre de protocoles expérimentaux basés sur les méthodologies des neurosciences cognitives. L'ampleur du projet *senSons* nous a amené à en demander la prolongation de six mois pour nous permettre de pérenniser les résultats acquis grâce à l'embauche d'un ingénieur (Charles Gondre) pour la mise en place d'outils informatiques, notamment de modules de traitement de signal audio et le développement d'interfaces temps-réels. Cette prolongation nous a également permis d'accueillir un chercheur de l'université Newcastle en Australie pour une durée de 3 mois, permettant de formaliser des outils traitement de signal temps fréquence pour la synthèse sonore 3D.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif du projet *senSons* était d'établir des relations entre la structure acoustique des sons et la perception qui en résulte. Si ce projet relevait avant tout de la recherche fondamentale, il a aussi permis d'aborder des applications liées aux sciences et technologies de l'information et de la communication et en particulier:

- *la réalité virtuelle sonore* qui nécessite la synthèse de sons cohérents avec une scène visuelle (cf les études sur le bruit d'impact sur une structure de matériau donné),

- *la qualité sonore* fondamentale pour une bonne représentation mentale de l'environnement (cf les études sur la notion de qualité des objets et le ressenti généré par le bruit produit par des portières automobiles),

- *le « design » sonore* nécessitant une meilleure compréhension de la sémiotique des sons et le retour sensoriel à une information sonore qui s'avère être souvent crucial (cf les études sur la caractérisation des événements sonores et sur l'interprétation musicale),

- *le codage de signaux audio* qui pourrait être considérablement optimisé grâce à la prise en compte des processus primaires et centraux liés à l'écoute (cf l'étude sur le masquage temps-fréquence).

Le projet a été abordé conformément à nos prédictions suivant deux axes fondamentaux : la structure des sons et leur perception ; la sémiotique des sons.

Le premier axe a donné lieu à des études considérant les sons à différents niveaux de complexité : « atomique », sons isolés et structures complexes. Au niveau « atomique » le phénomène de masquage a été caractérisé dans le repère temps-fréquence par des expériences psychoacoustiques, ce qui a donné lieu à des résultats fondamentaux novateurs. La combinaison de ces résultats avec la théorie de multiplicateurs de Gabor est actuellement en cours en vue du développement d'un « filtre temps-fréquence de masquage ». Au niveau sons isolés, l'association entre la morphologie spécifique des sons et leur ressenti a été abordée. Deux catégories de sons ont été utilisées dans ce cadre: des sons environnementaux et des sons acousmatiques. Ces études ont permis d'identifier des paramètres acoustiques responsables de la reconnaissance de sources sonores, et en particulier des matériaux (amortissement, rugosité), de l'évocation de mouvements (intensité, variations fréquentielles), et du jugement de qualité à partir de différents corpus sonores (matériaux frappés, bruits de portières automobiles, différentes essences de bois). L'identification de morphologies responsables d'évocations est primordiale dans le

cadre de la réalité virtuelle, à la fois pour synthétiser des sons cohérents avec une scène visuelle mais aussi dans le but de construire des sons à partir d'une description verbale. Les résultats de ces études nous ont permis de construire des outils de synthèse pour la réalité virtuelle. Une plateforme de synthèse temps-réel de sons d'impacts a été développée sous l'environnement Max/MSP et permet actuellement de construire des sons à partir de descriptions verbales liées aux types de matériaux, formes et tailles des objets sonores. L'excitation (frotté, frappé, gratté,...) est également prise en compte mais sa finalisation donne lieu à des études encore en cours. Les résultats obtenus dans le cadre des sons acousmatiques et de la synthèse sonore 3D devraient nous permettre de rajouter, prochainement des spécifications liées aux évocations d'émotions, de mouvements et à la prise en compte de « l'espace perçu ».

Au niveau des structures sonores complexes, nous nous sommes attachés à repérer les interactions entre les différents événements nécessaires à la cohérence du message sonore. Pour cela, nous avons pris comme support le message musical et avons étudié le rôle du timbre dans l'interprétation. Cette étude nous a permis de montrer que certaines variations de timbre sont reproduites de manière systématique par l'interprète et que ces variations sont pertinents dans le ressenti musical. Un lien entre ces variations et les paramètres de contrôle de l'instrument a également été mis en évidence, reliant la physique de l'instrument à sa perception intime. Ces résultats devraient prochainement permettre de définir des règles d'interprétation basées sur le son, ce qui est important dans le cadre du design sonore musical.

La deuxième action concernant la sémiotique sonore, qui a pour but de mieux comprendre le lien entre sons et « interprétation humaine », a été abordée avec des méthodes comportementales et d'imagerie cérébrale (mesures électrophysiologiques). Ici encore, deux catégories de sons ont été étudiées : des sons environnementaux et des sons acousmatiques. Les mesures électrophysiologiques ont, dans le cadre d'un protocole expérimental de catégorisation, montré une différenciation précoce du traitement des sons évoquant du métal par rapport aux sons évoquant du bois ou du verre. Cette étude, pionnière dans ce domaine, nous a permis de développer les bases d'un concept nouveau : la « neuro-acoustique ». Dans le cadre de protocoles expérimentaux d'amorçage (présentation de paires de sons ou de mots, associés ou non), les résultats ont montré des similarités dans les processus cérébraux mis en jeu entre sons linguistiques et non-linguistiques. Ces résultats sont également observés pour des sons acousmatiques associés à des mots. Ceci nous conforte donc dans notre hypothèse fondamentale de départ qui reposait sur l'existence d'une véritable sémiotique des sons, et par cela d'un « sens des sons ». Des méthodes comportementales ont également permis, dans le cadre des bruits de portières automobiles, de lier les propriétés analytiques, les propriétés naturelles et les évocations. Cette étude a mis en évidence des paramètres acoustiques responsables d'évocations, et permet de contrôler la qualité sonore par la synthèse et in fine par action sur les structures et les matériaux. Le protocole développé dans cette dernière étude est très général et devrait permettre à l'avenir d'aborder la notion de sens des sons de façon beaucoup plus formelle et contrôlée qu'il ne l'a été jusqu'à présent. La prise en compte du contexte a également été abordée dans le cadre de bruits de portières automobile. Les résultats montrent que l'image du véhicule modifie l'évaluation de la qualité (meilleure évaluation pour des voitures haut de gamme vice-versa). Cet effet est assez faible en situation de laboratoire, mais devient fort en situation réelle.

7. LISTE DE PUBLICATIONS LIES AU PROJET

Editions de livres

- [1] « Sense of Sounds », Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS), #4969, Eds. R. Kronland-Martinet, S. Ystad and K. Jensen, Springer Verlag Berlin Heidelberg, juin 2008.
- [2] « Genesis of Meaning in Sound and Music » Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS) #5493, 286 pages, S. Ystad, R. Kronland-Martinet and K. Jensen Editors, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

Articles soumis

- [3] Necciaro T., Savel S., Meunier S., Kronland-Martinet R., Ystad S., Laback B., Balazs P. « Auditory Masking for Gaussian-Windowed Stimuli » article soumis à JASA (2009)
- [4] Laback B., Balazs P., Necciaro T., Savel S., Meunier S., Kronland-Martinet R., Ystad S. « Additivity of Masking for Short Tone Pulses » article soumis à JASA (2009)
- [5] Aramaki M., Besson M., Kronland-Martinet R., Ystad S. « Controlling the Perceived Material in an Impact Sound Synthesizer : towards a Neuro-Acoustic Approach » . soumis à IEEE transactions on Audio, Speech and Language Processing (2009)

Articles acceptés dans des revues à comité de lecture

- [6] Barthelet M., Depalle Ph., Kronland-Martinet R., Ystad S. « Analysis of the acoustical correlates of timbre in clarinet performance » article accepté dans Journal of Music Perception (2009)
- [7] Barthelet M., Depalle Ph., Kronland-Martinet R., Ystad S. « Timbre as a vector of musical expression in clarinet performance » article accepté dans Journal of Music Perception (2009)
- [8] Barthelet M., Guillemain Ph., Kronland-Martinet R., Ystad S. « From Clarinet Control to Timbre Perception » article accepté dans Acta Acustica (2009)
- [9] Aramaki M., Marie C., Kronland-Martinet R., Ystad S., Besson M. « Sound Categorization and Conceptual Priming for Non Linguistic and Linguistic Sounds » accepté dans Journal of Cognitive Neurosciences (2009).
- [10] Schön D., Kronland-Martinet R., Ystad S., Besson M. " The evocative power of sounds: Conceptual priming between words and nonverbal sounds" accepté dans the Journal of Cognitive Neuroscience (2009).
- [11] Marelli D., Verron C., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Pallone G. « Time Frequency Synthesis of Noisy Sounds with Narrow Spectral Components. Accepté dans IEEE transactions on Audio, Speech and Language Processing (2008)
- [12] Verron C., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Pallone G. « A 3D Immersive Synthesizer for Environmental

Sounds » accepté dans IEEE transactions on Audio, Speech and Language Processing. (2008)

Articles publiés dans des revues à comité de lecture

- [13] M. Aramaki, M. Besson, R. Kronland-Martinet and S. Ystad, Timbre Perception of Sounds from Impacted Materials, « Genesis of Meaning in Sound and Music », Ystad S., Kronland-Martinet R., Jensen K. Editors, LNCS #5493, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, pp. 1-17
- [14] Aramaki M., Brancheriau L., Kronland-Martinet R., Ystad S. "Perception of impacted materials: sound retrieval and synthesis control perspectives " « Genesis of Meaning in Sound and Music », Ystad S., Kronland-Martinet R., Jensen K. Editors, LNCS #5493, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, pp. 134-146.
- [15] S. Ystad, R. Kronland-Martinet, D. Schön & M. Besson, "Vers une approche acoustique et cognitive de la sémiotique des objets sonores", « Les Unités Sémiotiques Temporelles (UST), Nouvel outil d'analyse musicale, Théories et Applications », Collection Musique/Sciences, éditions Delatour 2008, pp. 73-83.
- [16] Merer A., Ystad S., Kronland-Martinet R., Aramaki M. « Semiotics of Sounds Evoking Motions : Categorization and Acoustic Features » Sense of Sounds, Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS) #4969, R. Kronland-Martinet, S. Ystad and K. Jensen Editors, Springer Verlag Berlin Heidelberg , pp 139-158, 2008.
- [17] Barthelet M., Kronland-Martinet R., Ystad S. « Improving Musical Expressiveness by Time-Varying Brightness Shaping » Sense of Sounds, Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS) #4969, R. Kronland-Martinet, S. Ystad and K. Jensen Editors, Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp 313-336, 2008.
- [18] Kronland-Martinet R., Voinier T. " Real-Time Perceptual Simulation of Moving Sources: Application to the Leslie Cabinet and 3D Sound Immersion" EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, special issue on Intelligent Audio, Speech and Music Processing Applications, Volume 2008, article ID 849696, 10 pages, doi : 10.1155/2008/849696, juillet 2008.
- [19] Aramaki M., Baillères H., Brancheriau L., Kronland-Martinet R., Ystad S. "Sound quality assessment of wood for xylophone bars » Journal of the Acoustical Society of America 121(4), pp 2407-2420, April 2007.
- [20] S. Ystad, C. Magne, S. Farner, G. Pallone, M. Aramaki, M. Besson, R. Kronland-Martinet, " Electrophysiological Study of Algorithmically Processed Metric/Rhythmic Variations in Language and Music" EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, numéro spécial "Perceptual Models for Speech, Audio, and Music Processing", vol.2007, Article ID 30194, 13 pages, 2007. Doi:10.1155/2007/30194.
- [21] Magne C., Astésano C., Aramaki M., Ystad S., Kronland-Martinet R., Besson M., "Influence of Syllabic Lengthening on Semantic Processing in Spoken French: Behavioural and Electrophysiological Evidence" Cerebral

Cortex, doi :10.1093/cercor/bhl174, Oxford University Press, janvier 2007.

[22] Farnier S., Kronland-Martinet R., Voinier T., Ystad S. "Timbre Variations as an Attribute of the Naturalness in the Clarinet Play" Lecture Notes in Computer Sciences (LNCS), N°3902, Springer Verlag, pp: 45-53, 2006.

[23] Aramaki M., Kronland-Martinet R., Voinier T., Ystad S. "A Percussive Sound Synthesizer Based on Physical and Perceptual Attributes" Computer Music Journal, Vol. 30(2), pp: 34-43, MIT Press, 2006.

Communications internationales

[24] Verron C., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Pallone G. «Controlling a Spatialized Environmental Sound Synthesizer» WASPAA IEEE conference, Octobre 2009, Mohonk (USA).

[25] Olivero, A., Daudet, L., Kronland-Martinet, R. and Torrèsani, B. Analyse et Catégorisation de sons par multiplicateurs temps-fréquence, GRETSI Symposium on Signal and Image Processing, 8-11 septembre 2009, Dijon, France.

[26] Sciabica J.F, Bezat M.C., Roussarie V., Kronland-Martinet R., Ystad S. «Towards the Timbre Modeling of Interior Car Sound» 15th International Conference on Auditory Display, 18-21 Mai 2009, Copenhagen, Danemark.

[27] Verron C., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Pallone G. «Analysis/synthesis and spatialization of noisy environmental sounds». 15th International Conference on Auditory Display, pp. 36-40, 18-21 Mai 2009, Copenhagen, Danemark.

[28] Aramaki M., Gondre, C., Kronland-Martinet, R. and Ystad, S., Thinking the Sounds: An Intuitive Control of and Impact Sound Synthesizer, 15th International Conference on Auditory Display, 18-21 Mai 2009, Copenhagen, Danemark.

[29] Verron C., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Pallone G. «Spatialized additive synthesis of environmental sounds» 125th Audio Engineering Society convention, 2-5 Octobre 2008, San Francisco, USA.

[30] A.Merer, M. Aramaki, R. Kronland-Martinet and S. Ystad «Toward synthesis tools using 'evocation' as control parameters» Acoustics 08, 29 juin-4 juillet 2008, Paris, France.

[31] B. Laback, P. Balazs, G. Toupin, T. Necciari, S. Savel, S. Meunier, S. Ystad and R. Kronland-Martinet «Additivity of auditory masking using Gaussian-shaped tones» Acoustics 08, 29 juin-4 juillet 2008, Paris, France.

[32] T. Necciari, S. Savel, S. Meunier, S. Ystad, R. Kronland-Martinet, B. Laback and P. Balazs «Auditory masking using Gaussian-windowed stimuli» Acoustics 08, 29 juin-4 juillet 2008, Paris, France.

[33] M. Barthet, P. Guillemain, R. Kronland-Martinet and S. Ystad «Exploration of timbre variations in music

performance» Acoustics 08, 29 juin-4 juillet 2008, Paris, France.

[34] C. Verron, M. Aramaki, R. Kronland-Martinet and G. Pallone «Spatialized additive synthesis» Acoustics 08, 29 juin-4 juillet 2008, Paris, France.

[35] M.C. Bezat, V. Roussarie, R. Kronland-Martinet and S. Ystad «Relations between acoustic parameters and perceptual properties: an approach by regressions tree applied to car door closure sounds» Acoustics 08, 29 juin-4 juillet 2008, Paris, France.

[36] Aramaki M., Brancheriau L., Kronland-Martinet R., Ystad S. "Perception of impacted materials: sound retrieval and synthesis control perspectives "Proceedings of the 5th International Symposium on Computer Music Modeling and Retrieval (CMMR 2008), pp. 1-8, 19-22 May 2008, Copenhagen, Danemark

[37] Verron C., Aramaki M., Kronland-Martinet R., Pallone G. "A spatialized additive synthesizer" International Conference on Music Communication Science 5-7 December 2007, Sydney, Australia.

[38] Calvet D., Diennet J., Kronland-Martinet R., Vallée C. "The cosmophone: playing with particules, the cosmos and sounds" Intern. Conf. on Arts and Sciences "Mutamorphosis" , 8-10 Nov. 2007, Prague, Czech Republic.

[39] Aramaki M., Kronland-Martinet R., Voinier Th., Ystad S. "Timbre control of real-time percussive synthesizer" conf. invitee, ICA 2007, Madrid.

[40] Bézat M.C., Roussarie V., Voinier Th., Kronland-Martinet R., Ystad S. "Car door closure sounds: Characterization of perceptual properties through analysis-synthesis approach" ICA 2007, Madrid.

[41] Merer A., Ystad S., Kronland-Martinet R., Aramaki M., Besson M., Velay J.L. "Perceptual categorization of moving sounds for synthesis applications" ICMC 2007, Copenhagen.

[42] Barthet M., Depalle Ph., Kronland-Martinet R., Ystad S. "The effect of timbre in clarinet interpretation", ICMC 2007, Copenhagen, Danemark, 27-31 août 2007.

[43] Depalle Ph., Kronland-Martinet R., Torrèsani B. "Time-Frequency multipliers for sound synthesis" SPIE Optics and Photonics, Wavelet XII, vol 6701, pp. 670118-1 à 670118-15, 26-30 August 2007, San Diego, USA.

[44] Aramaki M., Baillères H., Brancheriau L., Kronland-Martinet R., Ystad S. "Relationship between sound classification of xylophone-like bars and wood species properties" 13th International Congress of Sound and Vibration, 2-6 July 2006, Vienna, Autriche.

[45] Barthet M., Kronland-Martinet R., Ystad S. "Consistency of timbre patterns in expressive music performance " Proc. Of the 9th Int. Conf. On Digital Audio Effects (DAFx-06), September 18-20 2006, Montréal, Canada.

- [46] Schön, D., Ystad, S., Besson, M. and Kronland-Martinet, R. "An acoustical and cognitive approach to the semiotics of sound objects", Bologne, Italy August 2006
- [47] Bézat M.C., Roussarie V., Kronland-Martinet R., Ystad S., McAdams S. "Perceptual analyses of action-related impact sounds" EURONOISE 2006, 30 May- 1 June 2006, Tampere, Finland.
- [48] Ystad, S. Kronland-Martinet, R., Schön D. and Besson, M., "Vers une approche acoustique et cognitive de la sémiotique des objets sonores", Journées USTs, 7-9 Décembre 2005.

Communications France

- [49] M-C. Bezat, V. Roussarie, R. Kronland-Martinet, S. Ystad & S. McAdams, « Qualification perceptive des bruits d'impact. Application au bruit de fermeture de porte », Journées fondatrices du groupe Perception Sonore de la SFA, 18-19 janvier 2007.
- [50] M. Aramaki, M. Besson, R. Kronland-Martinet & S. Ystad, « Catégorisation sonore des matériaux frappés : Approches perceptive et cognitive », Journées fondatrices du groupe Perception Sonore de la SFA, 18-19 janvier 2007.
- [51] S. Ystad, R. Kronland-Martinet, D. Schön & M. Besson, « Vers une approche acoustique et cognitive de la sémiotique des objets sonores », Journées fondatrices du groupe Perception Sonore de la SFA, 18-19 janvier 2007.
- [52] M. Barthet, S. Ystad & R. Kronland-Martinet, « Evaluation perceptive d'une interprétation musicale en fonction de trois paramètres d'expression : le Rythme, l'Intensité et le Timbre », Journées fondatrices du groupe Perception Sonore de la SFA, 18-19 janvier 2007.
- [53] T. Necciari, « Masquage sonore temps-fréquence. Application à l'analyse-synthèse des sons », Journées fondatrices du groupe Perception Sonore de la SFA, 18-19 janvier 2007.
- [54] Mitsuko Aramaki et Mireille Besson. « Approche électrophysiologique de la sémiotique des sons », *Troisièmes Rencontres Interartistiques de l'Observatoire Musical Français*, Mars 2006.

Thèses soutenues

- [55] Marie-Céline Bezat, Perception des bruits d'impact : Application au bruit de fermeture de porte automobile, Université de Provence, Aix-Marseille I, 19 décembre 2007.
- [56] Mathieu Barthet, De l'interprète à l'auditeur : une analyse acoustique et perceptive du timbre musical, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II, 18 décembre 2008