



Audio Engineering Society

Convention Paper

Présenté à la 140th Convention
4-7 juin 2016 Paris, France

Méthodes d'enregistrement en Audio Orienté Objet

Jean-Christophe Messonnier¹, Jean-Marc Lyzwa¹, Delphine Devallez² and Catherine de Boishéraud¹

¹ CNSMDP 209 Avenue Jean Jaurès 75019 Paris
jcmessonnier@cnsmdp.fr

² Arkamys 31 Rue Pouchet, 75017 Paris

ABSTRACT

Le nouveau standard ADM permet de définir un fichier audio comme étant orienté objet. Au milieu de beaucoup d'autres fonctionnalités, l'azimut et l'élévation peuvent être spécifiés pour chaque «objet» audio. Il est alors possible de construire une scène sonore indépendamment du système de reproduction.

Cela signifie que cet enregistrement orienté objet pourra être restitué sur un système 5.1, un système binaural, ou tout autre système d'écoute. Dans le cas d'un système d'écoute binaural, cela donne aussi l'opportunité d'interagir avec le contenu, car un suiveur de position de la tête (headtracker) peut être utilisé pour changer l'information binaurale en fonction de l'orientation de l'auditeur. Ce document décrit comment réaliser un tel enregistrement orienté objet.

1. INTRODUCTION

1.1. Audio Definition Model

Le nouvel «Audio Definition Model» (ADM), un standard associant des métadonnées à un fichier audio BWF (Broadcast Wave File), permet de définir un fichier audio comme étant *channel-based audio*, *scene-based audio*, ou *object-based audio* (orienté objet). Ces métadonnées donnent l'opportunité de développer un format s'adaptant à n'importe quel système de reproduction et de donner une sensation optimale d'immersion dans n'importe quel lieu d'écoute. A partir de là, il est possible de décrire une scène sonore indépendamment du système de reproduction.

Bien sûr, un système d'écoute stéréophonique à deux canaux ne peut pas donner la même impression d'espace qu'un système 22.2.

Pourtant, il est très intéressant d'avoir un enregistrement pouvant être lu sur chacun des systèmes. Le spectre audio serait le même, mais la scène audio changerait en fonction des limites de ces systèmes.

Plusieurs compagnies (Dolby, DTS, Fraunhofer), ont travaillées sur des moteurs de rendu pouvant adapter le même contenu audio sur différents systèmes de reproduction.

Un enregistrement sous ce format peut être rendu en 22.2 ; 7.1 ; 5.1, etc. Sur un système standard à deux canaux, des panoramiques d'intensité ou même des filtres transauraux peuvent être utilisés.

Bien sûr, cet enregistrement ADM peut être aussi rendu en binaural, ce qui permet d'utiliser un headtracker pour suivre les mouvements de tête de l'auditeur. Ce rendu binaural permet aussi de sélectionner dans une base de

données le jeu de HRTF correspondant le mieux à l'auditeur.

De plus, comme la vidéo 3D interactive devient un format de plus en plus établi, cela semble logique que l'audio pour ces vidéos soit aussi interactif et à partir de là utilise aussi l'ADM.

Les systèmes de reproduction utilisés pour le monitoring pour l'enregistrement et le mixages peuvent être des systèmes sur enceintes ou utiliser des moteurs de rendu binauraux : beaucoup de schémas de travail sont possibles. Mais il y a certaines conditions à remplir à fin d'optimiser la perception de la scène sonore sur l'ensemble des systèmes.

Nous devons d'abord donner quelques définitions.

1.1.1. Scene-based audio : l'audio orienté scène

L'audio orientée scène vient des techniques ambisoniques. Ces techniques sont développées afin de donner une représentation objective de la scène sonore (tous les sons, directs et réverbérés, provenant à un point d'écoute particulier). Cela ne peut être réalisé qu'à un ordre ambisonique élevé. Sinon, des approximations sont nécessaires.

Pourtant, quelque soit l'ordre, une scène audio ambisonique est indépendante du système d'écoute (loudspeaker agnostic format).

Lorsque l'on écoute une scène ambisonique au casque, cela implique forcément un codage binaural

Les microphones permettant une captation ambisonique seront discutés en 4.3.

1.1.2. Object-based audio : l'audio orienté objet

Parmi de nombreuses fonctionnalités associés au objets audio, on peut définir leur azimut et leur élévation.

Ces objets peuvent donc être rendus à la position la plus proche possible par le système de reproduction. Par définition, un objet audio isolé est aussi un format « loudspeaker agnostic ».

Un ensemble d'objets audio peuvent donc être associés pour définir une scène audio, même si celle-ci n'est pas la représentation objective d'une scène comme les scènes ambisonique.

Il est possible d'exporter un contenu ambisonique sous forme d'objets (voir détails en 4.3).

Avec ADM, les objets peuvent changer de position dans le temps. Si un objet ne change pas de position dans le temps et que sa position correspond à celle d'un canal standard, il peut être défini comme un canal dans un système orienté multicanal.

1.1.3. Channel-based audio : l'audio orienté multicanal

Un canal est une des voies d'un système multicanal (par exemple le canal «gauche» d'un système stéréophonique à deux canaux)

L'usage courant de la stéréophonie à deux canaux n'est pas orienté scène parce que la position des sources sonores n'est pas la même si l'on écoute le signal sur enceintes ou au casque :

- sur enceintes, le canal gauche est perçu à -30°
- au casque, le canal gauche est perçu à -90°

Même si l'on écoute communément un enregistrement stéréophonique au casque, la disposition de la scène sonore ne correspond pas à celle que l'on écoute sur enceintes et donc, ce n'est pas un système orienté « scène ». Si l'on veut avoir la même disposition de la scène sonore au casque et sur enceintes, il est nécessaire d'écouter cette scène au casque avec un rendu binaural, chaque direction étant traitée par une HRTF correspondante. Cette pratique correspond à l'approche ambisonique.

Comme le rendu binaural va appliquer une HRTF -30° au canal «gauche», et pour la clarté de la discussion, les canaux seront considérés comme des objets à position fixe, avec leurs valeurs associées d'azimut et d'élévation.

Un flux audio étiqueté «gauche» aura une valeur d'azimut de -30° , un flux audio étiqueté «droite» aura une valeur d'azimut de 30° , un flux audio étiqueté «centre» aura une valeur d'azimut de 0° d'azimut, « arrière gauche » -110° , « arrière droite » $+110^\circ$ et ainsi de suite.

Avec cette restriction, les canaux pourront faire partie d'un groupe de flux audios associant aussi des objets, formant une « scène audio ». C'est ce que nous appellerons l'audio orienté objet (object-based audio OBA), par la suite.

Si l'on désire que chacune des restitutions de la scène sonore soit le plus proche possible de l'originale, il y a des conditions à remplir.

2. COMPATIBILITE

2.1. Object Based Audio (OBA) : Audio orienté objet

Un mixage orienté objet devra être rendu :

- sur un système Wave-Field Synthesis
- sur un système à deux canaux classique, avec ou sans traitement transaural
- sur n'importe quel système multicanal

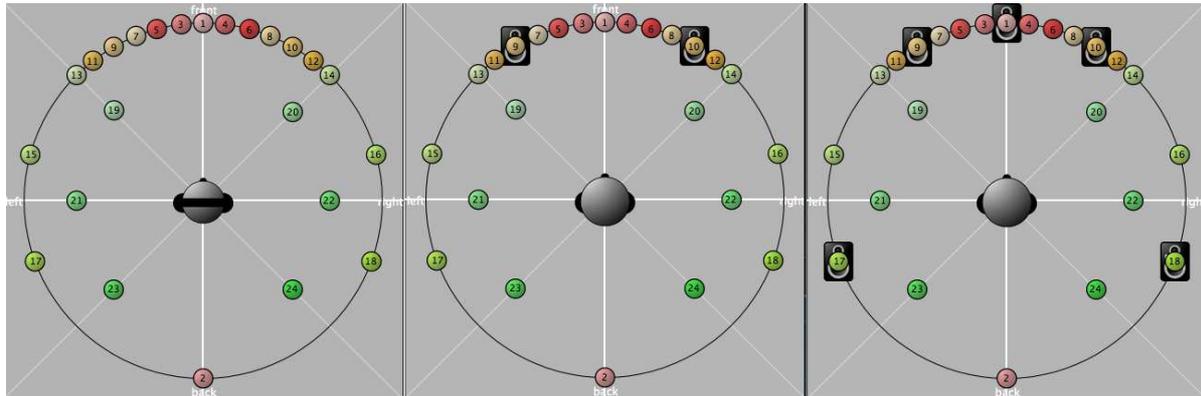


Figure 1 – trois interfaces de système de rendu de mixage orienté objet pour une même scène sonore : binaural interactif ; système à deux canaux en transaural ; système 5.1 en transaural. [5] [6]

- sur un moteur de rendu binaural, avec ou sans interactivité (headtracker), avec ou sans individualisation

L'azimut et l'élévation de chaque objet devront être rendu aussi proche que possible sur le système de reproduction que la valeur indiquée par l'information ADM. Certains systèmes auront moins de possibilités, certains auront des zones d'écoutes idéales (sweet-spot) plus ou moins réduites mais le point important est d'avoir un mixage optimisé pour plusieurs systèmes d'écoute différents.

Mais si chacun des objets est à sa place, cela n'implique pas automatiquement que chaque son soit à sa place dans la scène car un même son peut être porté par plusieurs objets.

Nous devons donc considérer quelles relations entre objets fonctionnent correctement et quelles relations entre objets posent problème.

2.1.1. Sources fantômes entre les objets

Si un son est exclusivement sur un objet et sur aucun autre, la position de chacun des objets (et donc de chacun des sons) est optimisée par le moteur de rendu, et il n'y a donc pas de problème. Si la scène est composée d'un ensemble d'objets décorrelés, cette scène est indépendante du système de reproduction (loudspeaker agnostic scene). Dans ce cas si tous les objets sont entendus à leur place, alors tous les sons sont entendus à leur place.

Si les sons alimentant les objets sont composés de réverbération (naturelle ou artificielle), provenant du même processus mais décorrelés, il n'y a pas non plus de problème. Dans ce cas, la réverbération sera entendue entre les objets sur lesquels elle est répartie.

Les problèmes viennent des sources fantômes. Il y a plusieurs théories à propos des sources fantômes. Blauert [1], par exemple, considère que la perception d'une source fantôme intervient parce que le signal présent à chacune des oreilles reconstruit la HRTF correspondante à la direction de la source fantôme.

Ceci vaut uniquement pour les sources fantômes perçues par ΔI , et pour une disposition des enceintes correspondant au standard à deux canaux (positionnées à $\pm 30^\circ$). Avec des enceintes virtuelles, ce qui est une manière de considérer les techniques binaurales associées au mixage orienté objet, cela donne, pour un potentiomètre panoramique placé au centre : $HRTF 30^\circ + HRTF -30^\circ \sim HRTF 0^\circ$.

Cependant, cette théorie ne fonctionne pas pour n'importe quelle position d'enceinte : $HRTF 30^\circ + HRTF 150^\circ$ est différent de $HRTF 90^\circ$, par exemple.

De plus, cette théorie de Blauert ne fonctionne pas avec une localisation en ΔT et l'on peut percevoir une source fantôme à un endroit donné pour un grand nombre de combinaisons de ΔI et ΔT . Ceci mène à une autre théorie, développée par Plenge et Theile [2].

Cette théorie assume que la perception travaille à deux niveaux différents : un premier niveau déterminant la position des sources réelles (les enceintes), puis, en fonction de l'information véhiculée par les signaux, un deuxième niveau déterminant la position de la source fantôme entre les enceintes. Ce processus peut être difficile et donc imprécis.

Ceci explique pourquoi un système 22.2 fonctionne mieux qu'un système 5.1, la localisation des sources réelles étant plus fiable que la localisation des sources

fantômes. Un autre aspect est que les sources réelles gardent leur position si l'on s'éloigne du centre idéal (sweet-spot), alors que les sources fantômes changent de position dans ce cas.

Plus les enceintes sont proches, plus la source fantôme est précise. La même règle s'applique aux objets, lorsqu'ils correspondent à la position des enceintes : plus ils sont proches, plus la perception d'une source fantôme entre ces deux objets est précise.

Cela signifie également que la perception d'une source fantôme stable entre deux objets peut être conditionnée par le fait que ces objets soit situés sur les enceintes.

Si la source fantôme est gérée uniquement par un ΔT plus petit que 1ms sans ΔI , la source fantôme ne sera précise que si les objets sont situés sur les enceintes. Si les objets sont placés entre les enceintes, avec un panoramique, il en résultera un flou dans la perception de la source fantôme car la complexité de l'information est trop importante. Si le ΔT est supérieur à 1ms, la source fantôme sera située sur l'objet sur lequel le son arrive en premier, à cause de l'effet de précedence.

La perception doit gérer deux niveaux d'interpolation : cela marche dans certaines situations mais pas dans toutes. C'est pour cela que certains groupes d'objets conduisent à des scènes indépendantes des systèmes d'écoute et d'autres non. Une bonne manière de le vérifier consiste à utiliser un panoramique pour placer les objets entre les enceintes. Si la source fantôme entre les objets reste stable, la partie de scène sonore correspondant au groupe d'objet est indépendante du système de restitution.

Le travail avec des objets virtuels est encore plus difficile à gérer pour la perception :

- Parce l'auditeur n'entend pas forcément ses proches HRTFs
- Parce que l'on perd la précision amenée par les mouvements de la tête, utilisant les changement d'information.

- Deux réponses possibles à ces problèmes :

- L'individualisation des HRTFs.
- L'utilisation d'un headtracker pour changer l'information en fonction des mouvements de la tête.

Ceci implique un moteur de rendu convertissant le mixage orienté objet en information binaurale, disponible dans une situation domestique. Ceci n'est pas hors de portée. De nombreux laboratoires de recherche, dont celui du Conservatoire de Paris, ont développé des moteurs de rendu binauraux incluant un headtracker.

3. LE PROJET BILI

3.1. Le projet

Bili est l'acronyme de Binaural Listening. Le groupe Bili est constitué de neuf institutions ou sociétés partenaires, incluant celles présentant cet article. Le sujet principal de Bili concerne l'individualisation des HRTFs, mais le projet inclue aussi l'étude de l'interactivité, conduisant à l'usage d'un headtracker associé aux techniques binaurales.

Une des tâches du groupe Bili est de déterminer des méthodes d'enregistrement et de post production pour le binaural.

La question de la compatibilité entre les enregistrements binauraux et les enregistrements stéréophoniques ou multicanaux ont conduits aux méthodes d'audio orienté objet.

Pour déterminer quels systèmes d'enregistrement convenaient pour le binaural, le groupe Bili a organisé plusieurs comparaisons de système, incluant une expérience de comparaison conduite par Nicol et al. [3] pour Orange, un autre partenaire du groupe Bili.

3.2. L'expérience

Le groupe Bili a organisé une comparaison entre de nombreux systèmes de prise de son pouvant être utilisés pour le binaural. Ces systèmes peuvent être classés en quatre groupes :

- Les têtes artificielles
- Les systèmes ambisoniques
- Les microphones d'appoints associés aux réverbérations artificielles
- Les antennes de microphones

Tous ces systèmes étaient testés sur des voix et des instruments, fixes ou en mouvement.

Les têtes artificielles ne sont pas dans le champ d'investigation de cet article car elles ne permettent pas d'avoir une bonne compatibilité avec les haut-parleurs. Pour autant, on peut choisir de labéliser dans l'ADM un enregistrement de tête artificielle comme étant « binaural », associé à un enregistrement stéréo ou 5.1 labélisé « channel ». L'auditeur choisira alors d'écouter l'un des deux enregistrements, suivant son système d'écoute. On peut même choisir de mixer une tête artificielle et des objets mais cela empêche d'utiliser l'individualisation ou le headtracking. De manière générale, la tête artificielle à des grandes qualités mais c'est une approche différente du mixage objet.

Tous les autres systèmes viennent de techniques initialement développées pour l'écoute sur enceintes. La conclusion est que tous ces systèmes sont de qualité

équivalente à la tête artificielle pour le binaural, même sans considérer ce que pourrait apporter l'individualisation ou le headtracking. Tous les systèmes présentés en section 4 ont été expérimentés

3.3. Techniques binaurales et mixage orienté objet

Il y a beaucoup de techniques binaurales. Parmi elles, il y a le mixage orienté objet. Le mixage orienté objet permet l'individualisation des HRTFs, le headtracking et la compatibilité avec les systèmes sur enceintes. La section suivante présente les différents systèmes d'enregistrement pouvant être utilisés pour l'audio orienté objet.

4. SYSTEMES D'ENREGISTREMENT POUR L'AUDIO ORIENTE OBJET

4.1. Audio orienté objet et choix de microphones

À l'exception du système ambisonique d'ordre élevé, les autres systèmes d'enregistrement pour le mixage orienté objet fonctionnent avec des microphones de nombreuses marques. Le critère important est la directivité et l'ingénieur du son peut choisir les microphones qu'il préfère.

En général, le fait de travailler en mixage orienté objet implique des changements dans sa méthode de travail. Mais une continuité avec ces méthodes est aussi possible.

Les systèmes présentés dans cette section recouvrent une gamme très large de techniques d'enregistrement. C'est à l'ingénieur du son de choisir la méthode qui correspond le mieux à sa technique.

4.2. Nombre d'objets en audio orienté objet

Le nombre d'objets en mixage orienté objet est à priori libre. Il y a plusieurs points à prendre en compte :

- Un objet peut être transformé en source fantôme par le moteur de rendu.
- Une source fantôme ne peut pas être transformée en objet par le moteur de rendu.
- Le débit est proportionnel au nombre d'objets
- Jusqu'à maintenant, en multicanal, seule la diffusion de signaux 5.1 est possible en broadcast.

On peut archiver un master en mixage objet 24 pistes et diffuser une réduction en 5.1. De nombreux schémas de

travail sont possibles, dans la mesure où rien n'est encore fixé pour l'instant.

4.3. Systèmes Ambisoniques

Même si les systèmes sont des systèmes orientés scène plutôt que orientés objet, l'idée est la même, comme il a été développé dans les sections précédentes.

L'expérience Bili testait deux types de systèmes

- L'Eigenmike, de MH acoustics. Une sphère rigide à 32 capsules capable de travailler à l'ordre 4.
- Un système ambisonique de 1^{er} ordre.

Comme les autres systèmes de la section, ces systèmes ont donné de très bons résultats avec un codage binaural [3] et les systèmes ambisoniques sont connus pour être indépendants des systèmes de reproduction, ce qui garantit une forte compatibilité avec les systèmes sur enceintes.

Il y a plusieurs possibilités pour travailler en ADM avec des systèmes ambisoniques :

- ADM est conçu pour fournir toute l'information nécessaire au traitement des signaux ambisoniques.
- Les signaux ambisoniques peuvent être transformés en objets et transmis ensuite par l'ADM.

Etant un système ambisonique d'ordre 4, l'Eigenmike est bien sûr un système très performant. Mais même au premier ordre, il est possible d'exporter un enregistrement ambisonique en 22 objets correspondant au standard 22.2/

Oldfield et al. donnent une description complète d'un schéma de travail utilisant les techniques ambisoniques pour une production en mode objet [4].

Il est malgré tout nécessaire que soit développé des outils rendant la production en mode objet plus facile. Ceci pourrait être un enjeu de développement dans les années à venir pour les constructeurs.

4.4. Microphones d'appoints, microphones d'ambiances et réverbérations artificielles

Un ensemble de microphones d'appoints et de réverbérations artificielles à l'avantage d'être indépendant du système de reproduction, parce que tous les signaux sont décorrélés. Des microphones enregistrant séparément la réverbération de la salle (microphones d'ambiances), peuvent être rajoutés à cette liste.

Ceci est une méthode très simple pour enregistrer en mode orienté objet et elle recouvre de nombreux champs d'application en musique, cinéma, etc.

La différence entre l'audio orienté objet et la pratique commune consiste dans l'assignation au bus de mélange. Plutôt que de mixer ces sons dans un bus stéréo master, il faut les assigner sur des bus correspondant à la direction de chaque objet. Cette méthode est libre, dans la mesure où elle est encore nouvelle et il peut être nécessaire d'utiliser des outils dont ce n'était pas la fonction initiale.

On peut utiliser par exemple :

- Un bus master multicanal
- Des bus monos, tels que ceux utilisés pour le multipiste.
- Une combinaison de ces deux méthodes.

De meilleures solutions sont à l'étude, comme dans Pyramix 10 par exemple.

Les limites d'un tel système apparaissent lorsque l'on enregistre un ensemble avec beaucoup de sources, comme un orchestre symphonique, ou lorsque l'on doit reproduire le mouvement des sources, même si l'ADM permet de changer la position des objets en fonction du temps.

La réponse à ce type de problème consiste à utiliser des antennes de microphones.

4.5. Les antennes de microphones.

Les antennes consistent en un ensemble de microphones dont la disposition spatiale est définie afin de contrôler l'information entre les signaux. La distance et l'angle entre microphones d'une directivité donnée déterminent des ΔI et des ΔT entre les signaux. Mais l'information peut être plus complexe si l'on considère la directivité des sources et leur distance relative par rapport au système, la directivité réelle des microphones, etc.

Les signaux de chaque microphone correspondra à un objet. A partir de là, l'azimut des objets correspondant sera déterminant pour la précision de la localisation des sons entre les objets. Comme il a été développé au 2.1.1, la précision est meilleure si les objets sont plus proches.

C'est un point de discussion de déterminer si une antenne donne un résultat indépendant du système de restitution (2.1.1). Si ce n'est pas le cas, la compatibilité peut être assurée à partir du moment où chaque microphone correspond à une enceinte. Utiliser des antennes dont les angles correspondent à ceux du 5.1 ont cet avantage. La compatibilité va être assurée avec les systèmes possédant un nombre plus élevé de canaux car les canaux L ; C ; R ; Ls et Rs sont communs à tous ces systèmes. Certaines antennes continuent de donner de bons résultats si le centre est perçue comme une

source fantôme. C'est le cas du bien connu Decca-tree, qui s'utilise en stéréophonie à deux canaux aussi bien qu'en 5.1. Utilisé en stéréophonie à deux canaux, le centre est une source fantôme. Utilisé en 5.1, le centre est une vraie source. A partir de là, utiliser des antennes en mixage orienté objet est une bonne option. Les antennes décrites dans cette section ont montrées un bon fonctionnement en binaural [3], qui est une des manières les plus exigeantes de rendre les mixages orientés objet (2.1.1). On doit noter aussi, qu'en deux canaux, un traitement transaural peut être aussi d'une grande utilité pour rendre un tel enregistrement orienté objet [5] [6].

Il est possible d'utiliser une antenne pour les sons directs et des microphones d'ambiance pour le champ réverbéré ou d'utiliser une plus grosse antenne pour l'ensemble. Quelque soit la solution choisie, il est important de contrôler la localisation des sons directs pour avoir une représentation régulière de la scène sonore. Ceci implique un contrôle des angles de prise de son de l'antenne.

4.5.1. Multichannel Microphone Array Design

Multichannel Microphone Array Design (MMAD) a été développé par Michael Williams [7] afin d'optimiser les antennes de microphones

L'idée principale est de contrôler chaque segment de l'antenne. L'angle de prise de son de chacun des segments doit être cohérent avec ceux des autres segments. Si un des angles de prise de son est trop petit ou trop grand, la représentation ne sera pas régulière.

Une autre idée est de prendre en compte la contribution des sons directs sur chacun des segments. Chaque son étant présent sur tous les segments, la localisation peut être floue si son intensité et son retard entre les segments n'est pas contrôlé. Une option est d'utiliser des microphones espacés afin que le son direct soit prédominant sur un segment et arrive sur les autres segments après l'effet de précédence.

Nous avons expérimenté deux antennes MMAD à 5 canaux, une avec des cardioïdes, l'autre avec des infracardioïdes et deux antennes MMAD à 8 canaux, une avec des cardioïdes, l'autre avec des infracardioïdes. On peut aussi utiliser les triplets avant avec des microphones d'ambiance, ou des antennes avec un nombre différent de microphones (figure 2b).

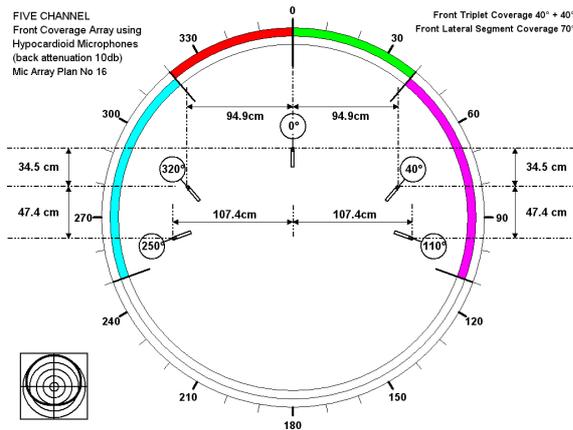


Figure 2a - 5 CHANNEL HYPOCARDIOID ARRAY [7] ©m.williams

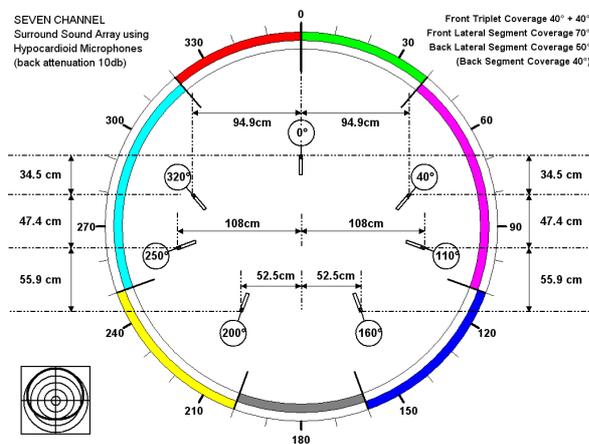


Figure 2b - 7 CHANNEL HYPOCARDIOID ROOT ARRAY [7] ©m.williams

4.5.2. The JML tree

Jean-Marc Lyzwa a adapté ce système, qui est un compromis entre un Decca tree et une antenne MMAD, le Decca tree n'étant pas initialement destiné au 5.1. L'avantage d'utiliser des microphones omnidirectionnels est d'avoir une bonne courbe de réponse dans les graves.

Comme pour les antennes MMAD, on peut utiliser le triplet avant en association avec des microphones d'ambiance.

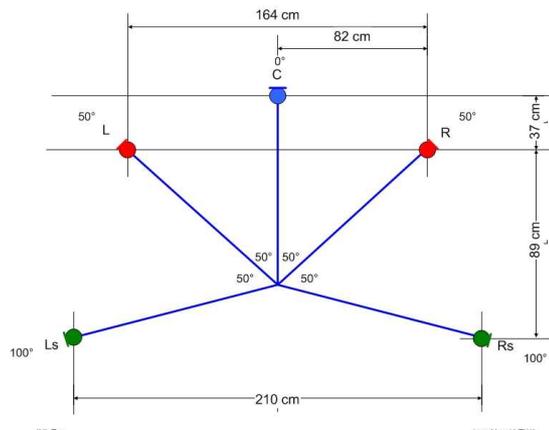


Figure 3 - THE JML TREE

Conclusion : construire un système de prise de son en audio orienté objet

A partir de là, il y a beaucoup de systèmes possibles pour le mixage orienté objet. Des microphones d'appoint, d'ambiance, des réverbérations artificielles, des systèmes ambisoniques, des antennes : tous ces éléments peuvent être combinés pour constituer un système d'enregistrement en audio orienté objet. Pas de doute que chaque ingénieur du son puisse adapter sa technique.

5. REMERCIEMENTS

Tous nos remerciements à Etienne Hendrickx qui a été d'une aide précieuse pour la rédaction de cet article. Merci à Mike Williams (figure 2), Alexis Baskind et Jean-Marc Lyzwa (figures 1 et 3) pour avoir permis la reproduction des figures. Ce travail a été en partie financé par le projet français FUI Bili ("Binaural Listening", www.bili-project.org, FUI-AAP14).

6. REFERENCES

[1] Blauert J, Spatial hearing, London, The MIT Press
 [2] Plenge G. Theile G. Überlegungen zur leistungsfähigkeit verschiedener stereofoner verfahren. Institut für rundfunktechnik München, 1986
 [3] Rozen Nicol et al. Etude comparative du rendu de différentes techniques de prise de son spatialisée après binauralisation. CFA, Le Mans 2016

- [4] Oldfield et al. An object-based audio system for interactive. 137th AES Convention. Paper n° 9148
- [5] Alexis Baskind et al., Binaural and transaural spatialization techniques in multichannel 5.1 production, 27. Tonmeistertagung, Köln, Nov 2012
- [6] Alexis Baskind et al., Surround and 3D-Audio Production on Two-Channel and 2D-Multichannel Loudspeaker Setups, 3rd International Conference on Spatial Audio (ICSA), Sep 2015, Graz, Austria
- [7] Michael Williams. Microphone Arrays for stereo and Multichannel sound recording Vol II., Editrice II Rostro