

Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Paris
Formation Supérieure aux Métiers du Son



Mémoire de fin d'études présenté par Louis Galliot.
Session : juin 2005

Je tiens à remercier en premier lieu Mike Williams qui, lors d'une conférence à Paris en 2000 et sans le savoir, m'a offert ce sujet de mémoire puis qui m'a ensuite apporté tout au long de mes études au conservatoire bon nombre de questionnements aussi utiles qu'intéressants.

Je remercie aussi Jean-Marc Lizwa et Pascal Besnard pour leur patience, leurs remarques et conseils avisés lorsque je leur ai présenté ce programme, ainsi que Laurent Millot pour son aide apporté à l'organisation de ce travail.

La partie pratique a été une coréalisation avec Hannelore Guittet qui a été encore une fois plus que parfaite, puisqu'elle a su réunir pour réaliser ces tests de localisation hautement instructif beaucoup de collègue FSMS. Je remercie alors tous ces camarades qui ont eu la patience de m'écouter parfois longtemps sans donner signe de fatigue.

Enfin, je remercie Marion Juhé pour son soutien sans faille ainsi que pour son visuel du programme MMA Constructor.

Table des matières

Introduction	3
1. Système MMA et couverture de prise de son	4
1.1. Présentation	4
1.1.1. Composition	4
1.1.2. Diffusion.....	5
1.1.3. Paramètres	5
1.2. Le couple de microphones.....	8
1.2.1. Couverture de prise de son	8
1.2.2. Rotation de la couverture de prise de son	9
1.2.3. Ajustement de ces couples et différents systèmes.....	11
2. Calcul des couvertures de prise de son	14
2.1. Calcul des différences d'intensité, différences de temps	14
2.1.1. Calcul des différences d'intensité	14
2.1.2. Calcul des différences de temps	16
2.2. Traitement des différences de temps / différences d'intensité	17
2.2.1. Masquage intensité	17
2.2.2. Masquage temporel	19
2.3. Courbes psychoacoustiques de localisation	21
2.3.1. Principe.....	21
2.3.2. Références	22
2.3.3. Incidences.....	25
3. Résultats pratiques	28
3.1 Mesures d'intensité	28
3.1.1. Résultats	28
3.1.2. Correction A	30
3.1.3. Correction B	30
3.2. Test de localisation.....	33
3.2.1. Présentation	33
3.2.2. Recul de l'auditeur.....	35
3.2.3. Autres phénomènes	37
3.3. Données utiles et annexes du programme	40
3.3.1 Paramètres de MMA Constructor	40
3.3.2. Systèmes connus (et reconnus)	41
Conclusion	43
Bibliographie	44

Introduction

Dans le monde de la prise de son multicanal, il existe peu de système offrant à la fois une haute qualité du rendu sonores et une large liberté d'action. On ne trouve en fait que le système MMA : Multichannel Microphone Array. Ce double avantage présente toutefois un léger inconvénient : il peut être long et difficile à régler, surtout lors d'enregistrement d'œuvres demandant une gestion délicate de l'espace, comme par exemple le requiem de Berlioz. C'est ici qu'intervient MMA Constructor. MMA Constructor est un programme informatique d'aide à la conception de système MMA. Il permet de prédire et de visualiser les couvertures de prises de son du système et ainsi de construire à l'avance son système d'enregistrement à sa guise et à son aise. MMA Constructor ne pourra néanmoins être efficace que s'il prédit avec exactitude la gestion de l'espace. Le preneur de son ne se satisfera absolument pas d'un programme faux. Tout l'enjeu est donc dans la fiabilité des résultats. Cette dernière est tout d'abord dû à la justesse des calculs, mais est surtout liée aux modèles utilisés. MMA Constructor se doit donc de prendre en compte les différentes théories, nous verrons lesquels, et de les intégrer au mieux dans l'ensemble de la modélisation. Enfin, un programme n'est rien s'il n'est pas capable d'évoluer avec la recherche et ce avec rapidité et flexibilité. Nous verrons donc tout d'abord ce qu'est un système MMA, puis comment MMA Constructor prédit les couvertures de prise de son. Enfin, parce que la théorie n'est rien sans la pratique, nous confronterons MMA Constructor à la réalité.

1. Système MMA et couverture de prise de son

1.1. Présentation

1.1.1. Composition

Le système MMA, Multichannel Microphone Array, se compose de 5 microphones qui n'ont pas d'autres exigences que d'être diffusés sur 5 enceintes, sans matricage aucun. Ainsi, chaque microphone est diffusé par une et une seule enceinte. Tout ceci fait du système MMA un système au rendu sonore cohérent et surtout extrêmement ouvert en terme d'utilisation, où l'on peut en faire tout et peut être même n'importe quoi. Néanmoins, une méthode de construction basée sur les couvertures de prises de son peut être envisagée [1]. Il s'agit de ne plus considérer 5 microphones indépendants, mais 5 couples de microphones juxtaposés, ou couples primaires, formés par les microphones C-R, R-SR, SR-SL, SL-L et L-C. Chaque couple primaire possède une couverture de prise de son, et donc les 5 couples primaires, soit le système MMA, possèdent 5 couvertures de prise de son. Un objectif est alors de lier ces 5 couvertures afin de couvrir l'ensemble de l'espace de prise de son. Ceci n'est qu'une possibilité parmi d'autres et le système MMA reste tout à fait ouvert à d'autres objectifs, d'autres utilisations et d'autres prises de son. Parallèlement aux couples primaires, il existe aussi 5 autres couples contenus dans le système, appelés couples secondaires et formés par les microphones L-R, C-SR, R-SL, SR-L et SL-C. Un enjeu, par rapport aux couvertures de prise de son, sera de savoir quand et où ces couples secondaires agissent.

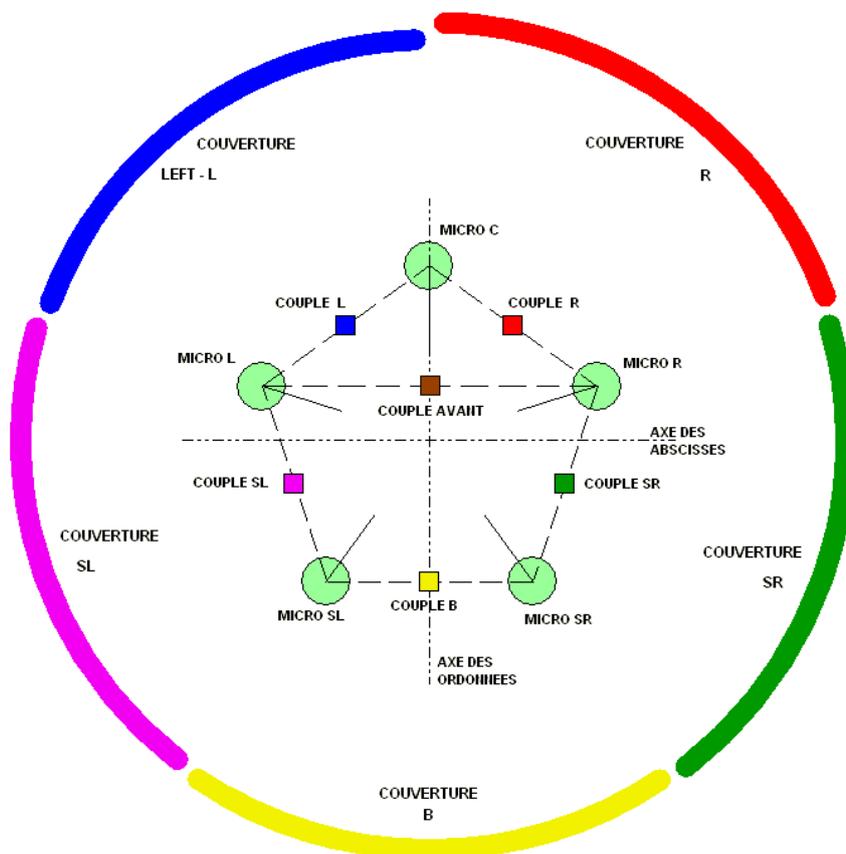


Figure 1 - Le système MMA, ses 5 couvertures de prise de son et son repère

1.1.2. Diffusion

Le Système MMA, en tant que système de prise de son multicanal, a de forte chance d'être diffusé sur un système multicanal. Grâce aux applications vidéo du son multicanal, nous avons la norme ITU-R BS 775-1 (Figure 2, [15]) qui définit 5 enceintes placés en cercle et réparties à 0°, 30°, 110°, -110° et enfin 30°. Ce système à l'avantage de conserver le système stéréophonique (-30°, 30°), tout en y ajoutant un canal central. Néanmoins on peut déplorer la place des enceintes arrières qui du fait de leur fort éloignement (140° d'ouverture) ne favorisent pas le segment arrière.

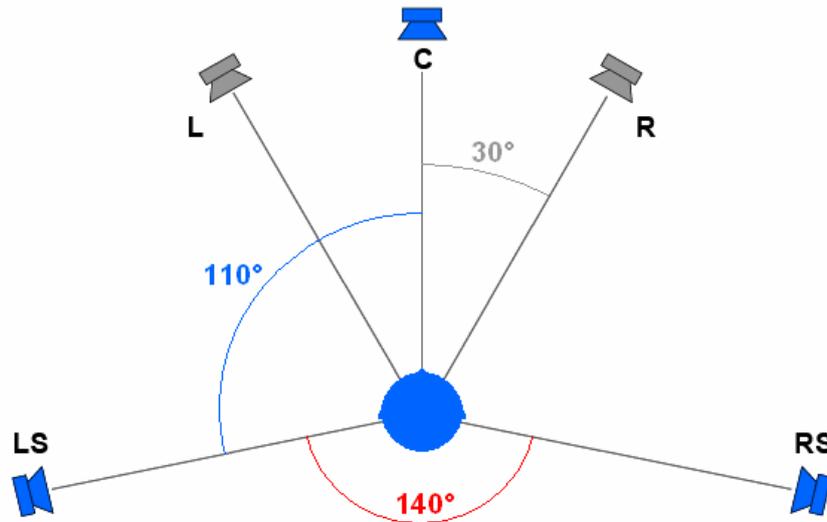


Figure 2 - norme ITU-R BS 775-1

1.1.3. Paramètres

J'ai choisi de laisser libre l'utilisateur quant à la manipulation du système par le biais des microphones ou des couples. Ainsi, par les deux approches, j'espère ne pas décourager les futurs utilisateurs...En tout état de cause, je ne conserve pour les calculs que les positions des microphones et absolument pas ceux des différents couples. La manipulation par l'un ou par l'autre aspect n'a donc pas de conséquences sur les résultats. L'utilisateur peut alors modifier bon nombre de paramètres qui, je l'espère, couvrent la totalité des manipulations possibles du système.

1.1.3.1. Du côté des microphones

- Position modification de la place du microphone dans le plan horizontal de l'espace de prise de son (mètres)
- Elévation modification de la place du microphone suivant l'axe vertical dans l'espace de prise de son (mètres)
- Angle modification de la direction du microphone dans le plan horizontal seulement (degrés °)

- Inclinaison modification de la direction du microphone dans le plan vertical de l'espace de prise de son (degrés °)
- Directivité modification de la courbe d'atténuation du microphone en fonction de l'angle d'incidence du signal sonore (entre 0 : omnidirectionnel et 10 : bidirectionnel)
- Gain offset électronique d'intensité (EIO) appliqué au microphone (dB)
- Retard offset électronique temporel (ETO) appliqué au microphone (ms)

1.1.3.2. Du coté des couples

- Distance modification de l'écartement entre les capsules des deux microphones (mètres). Ce paramètre agit sur la position des microphones.
- Angle modification de la différence de direction des deux microphones dans le plan horizontal seulement (degrés °). Ce paramètre agit sur l'angle des microphones.
- OPIM Offset physique de l'intensité des microphones. Il s'agit de la rotation dans le même sens et autour leur capsule des deux microphones du couple. Ce paramètre conserve alors la distance et l'angle du couple et permet de modifier la couverture de prise de son (degrés °).
- Block ce paramètre spécial permet de bloquer la modification d'un couple lors de la modification d'un autre couple, et ainsi de conserver un réglage effectué antérieurement.

Par ailleurs, on peut remarquer que l'on ne peut pas agir sur l'aspect vertical des microphones (élévation et inclinaison) par le biais des couples. La modification des offsets électroniques ne s'effectue, elle aussi, que par le biais des microphones, afin de conserver une certaine clarté des ces deux paramètres pouvant rapidement devenir flous lorsqu'ils sont utilisés sur des couples (confusion entre offset négatif / positif et microphone gauche / droit).

1.1.3.3. Du coté du système

On trouve aussi 3 paramètres agissant sur le système lui-même :

- Micro centre fixe le micro centre ne peut s'échapper de l'axe des ordonnées, et son angle reste à zéro. Ainsi, il peut encore être élevé, incliné, recevoir des offsets électroniques, mais ne peut pas être mu à droite ou à gauche du système (lors d'une vue de dessus telle que dans la Figure 1)
- Couple arrière symétrique Il s'agit d'une symétrie partielle, suivant l'axe des ordonnées du système, appliquée au couple arrière.
- Symétrique le système est symétrique par rapport à l'axe des ordonnées. Il s'agit alors d'une symétrie gauche / droite et toute action sur un côté du système se répercutera sur l'autre côté du système. Ce paramètre englobe les deux paramètres précédents : micro centre fixe et couple arrière symétrique.

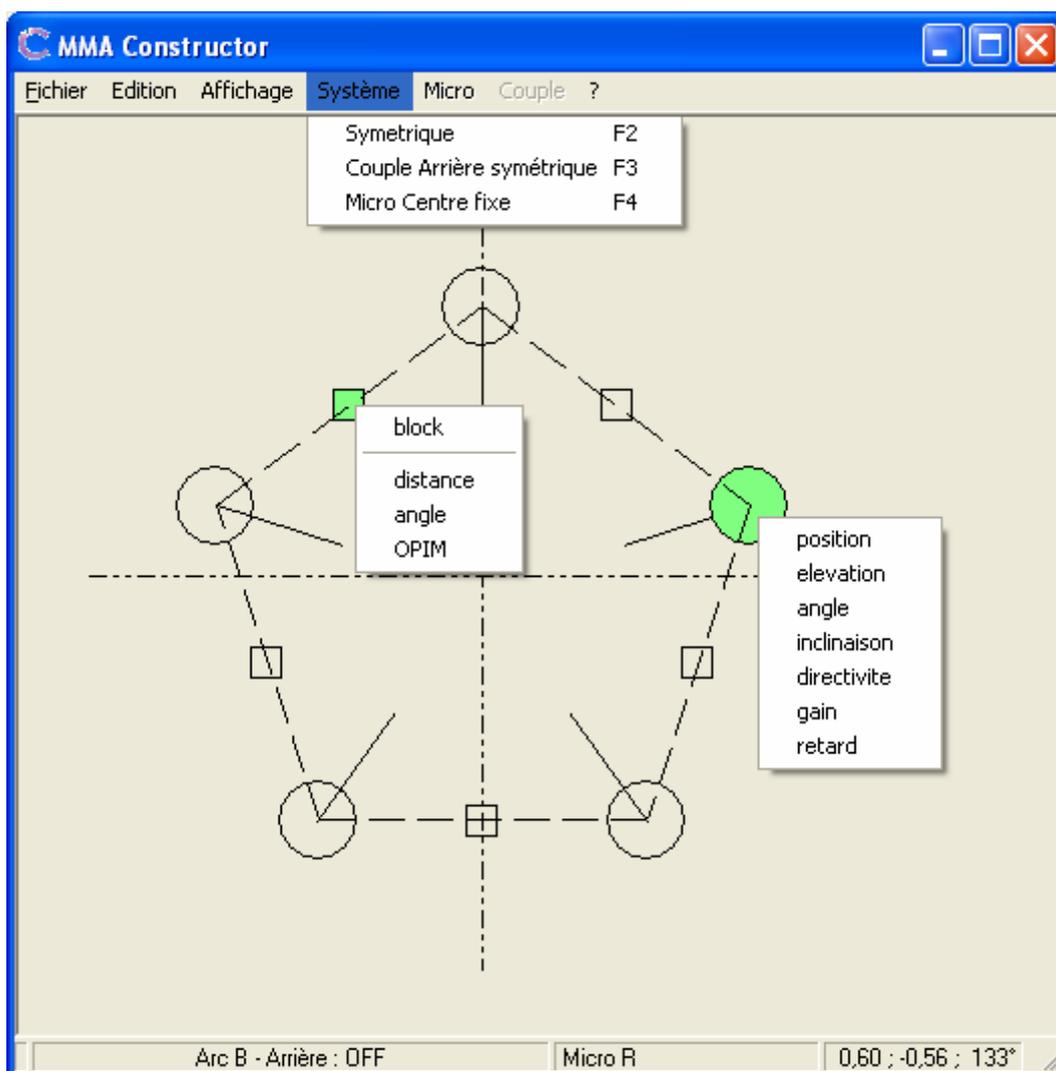


Figure 3 - les différents paramètres

Le système MMA est donc un système très ouvert, laissant à l'utilisateur une infinité de possibilités. Aussi, et pour éviter une perte de temps lors de la mise en place de ce système, on peut baser la configuration de ce système sur les différentes couvertures de prise de son des couples primaires.

1.2. Le couple de microphones

1.2.1. Couverture de prise de son

Un couple de microphone est composé de deux microphones séparés par une distance et formant un angle. Ce couple de microphones capte le champ acoustique de l'espace de prise de son et le retransmet à l'auditeur par le biais du système de diffusion. On peut caractériser ce phénomène de transmission sonore par plusieurs paramètres, et notamment celui de la localisation. Ainsi, une source sonore dans l'espace de prise de son sera entendue par l'auditeur dans l'espace de diffusion à un endroit plus ou moins précis et plus ou moins large. Ce point est appelé image virtuelle de la source sonore.

Lors d'une captation par un couple de microphones et d'une diffusion par deux enceintes, comme par exemple en stéréo, cette image virtuelle peut se situer dans plusieurs zones que nous allons voir. Tout d'abord, cette image virtuelle peut être localisée comme venant d'une enceinte. Le son est "collé" à l'enceinte, et la source sonore réelle ne fait pas partie de la couverture de prise de son du couple (Figure 4 et Figure 5 : zone blanche). Par ailleurs, l'image virtuelle peut être entendue entre les deux enceintes. La source sonore réelle fait alors partie de la couverture de prise de son (Figure 4 : toute la zone rouge, Figure 5 : zone rouge du haut et du bas). Enfin, l'image virtuelle est entendue de part et d'autres des enceintes. Le phénomène est alors plus complexe, faisant entrer en jeu des phénomènes d'opposition de phase entre les deux microphones. Tout de même, la source sonore fait partie de la couverture de prise de son (Figure 5 : languettes rouges à gauche et en bas à droite).

On peut donc dire que la couverture de prise de son est le lieu de l'espace de prise de son qui sera entendu entre les deux enceintes dans l'espace de diffusion. Le calcul de cette couverture de prise de son dépend d'un bon nombre de paramètres, mais nous verrons cela plus précisément dans le paragraphe 2-Calcul des couvertures de prise de son.

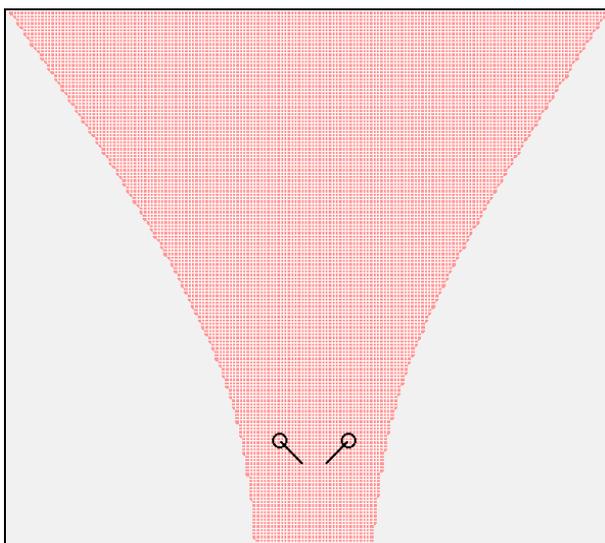


Figure 4 - couverture de prise de son, couple de 40 cm, 100°, cardio, 1 mètre d'élévation

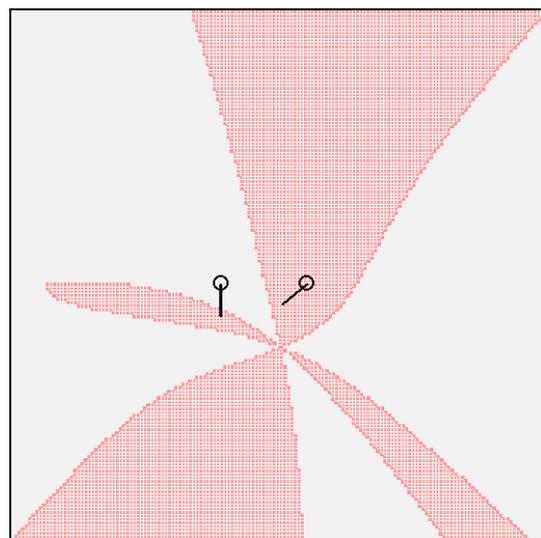


Figure 5 - couverture de prise de son, couple de 50 cm, 50°, OPIM=25°, hypercardio, élévation 1 m

1.2.2. Rotation de la couverture de prise de son

Comme nous montrent les figures ci-dessus, la couverture de prise de son n'est pas toujours symétrique ni dans l'axe du couple. Ainsi, on peut la faire "pivoter" à l'aide d'offset. Il en existe alors deux sortes : ceux électroniques appliqués en post-production, et ceux manuels appliqués lors du positionnement des microphones.

1.2.2.1. Offset électronique

On trouve ici aussi plusieurs type d'offsets. Ceux utilisés dans MMA Constructor sont le retard et le gain (positif ou négatif). Comme nous le verrons dans le paragraphe 2, ces offsets modifient les différences de temps et d'intensité captées par les microphones, et donc déplacent ces points dans les courbes psychoacoustiques de localisation. Ainsi, un point entendu sans offset dans la couverture de prise de son peut être "sorti" de cette dernière par l'utilisation d'offset, et inversement. L'effet produit est alors le déplacement de la couverture de prise de son.

Ces deux offsets ne sont pas pour autant similaires. En effet, un retard appliqué à un signal n'affectera pas le contenu énergétique de ce signal, alors qu'un gain ou une atténuation aura au contraire une incidence directe sur l'énergie du signal perçu. L'offset électronique d'intensité est donc à utiliser avec précaution et dans une moindre mesure (3 dB maximum ?). L'offset électronique temporel n'est pas non plus sans conséquences. N'agissant pas sur l'énergie du signal, il peut néanmoins décorrélérer (ou corrélérer) les signaux diffusés entre les deux enceintes, peut ainsi créer des "effets de phase" et par la même modifier le contenu spectral du signal perçu (principe des filtres en peigne). Toutefois, l'offset électronique temporel s'approche aisément d'un recul physique du microphone (10 cm pour 0,3 ms) et peu par la même paraître plus "naturel".

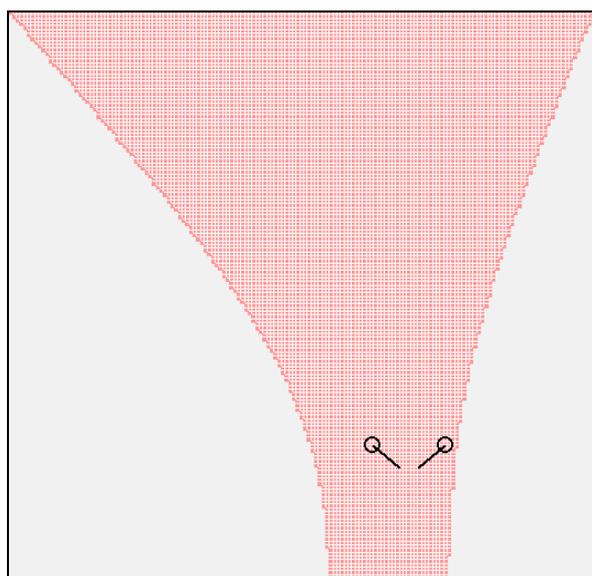


Figure 6 - 40 cm, 100°, cardio, élévation 1 m,
offset électronique d'intensité -5 dB

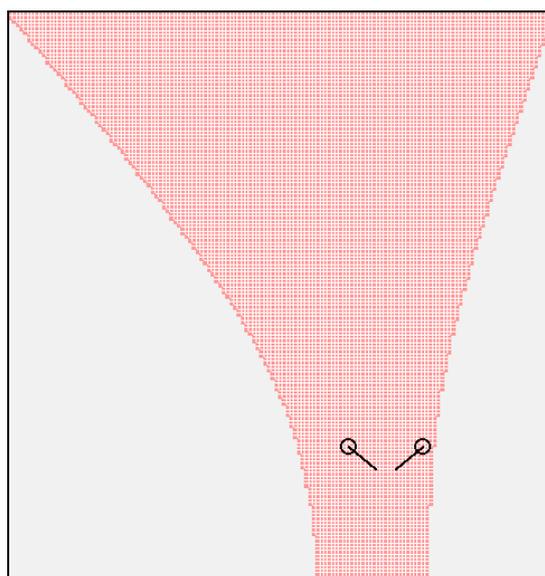


Figure 7 - 40 cm, 100°, cardio, élévation 1 m,
Offset électronique temporel 0,5 ms

1.2.2.2. Offsets Physiques

Comme nous venons de le voir, retarder un microphone est presque similaire à le déplacer dans son axe. Ce déplacement est alors considéré comme un offset physique temporel du microphone (OPTM, Figure 8 : C, Figure 10). Un autre offset physique consiste à faire pivoter les deux microphones d'un couple autour de leur capsule, dans le même sens, et d'un même angle. Cet offset conserve alors la distance mais aussi l'angle entre les deux microphones. Il joue non plus sur le retard d'un des deux microphones, mais sur l'angle d'incidence et donc sur la directivité des microphones. Il s'agit pour cela de l'offset physique d'intensité des microphones (OPIM, Figure 8 : B, Figure 9).

Pour autant, ces deux offsets n'en sont presque qu'un : tout dépend du point de vue. En effet, le déplacement d'un microphone dans son axe ne modifie pas l'angle du couple. En faisant pivoter le couple autour du microphone immobile jusqu'à remettre le premier microphone à sa position d'origine (ce qui ne change pas les caractéristiques du couple, puisque tout le couple bouge lors de cette rotation), on retrouve le couple d'origine avec cette fois-ci non pas un OPTM, mais un OPIM.

C'est pour cela que je n'utilise que l'OPIM dans MMA Constructor, plus facile à concevoir et à utiliser que le OPTM.

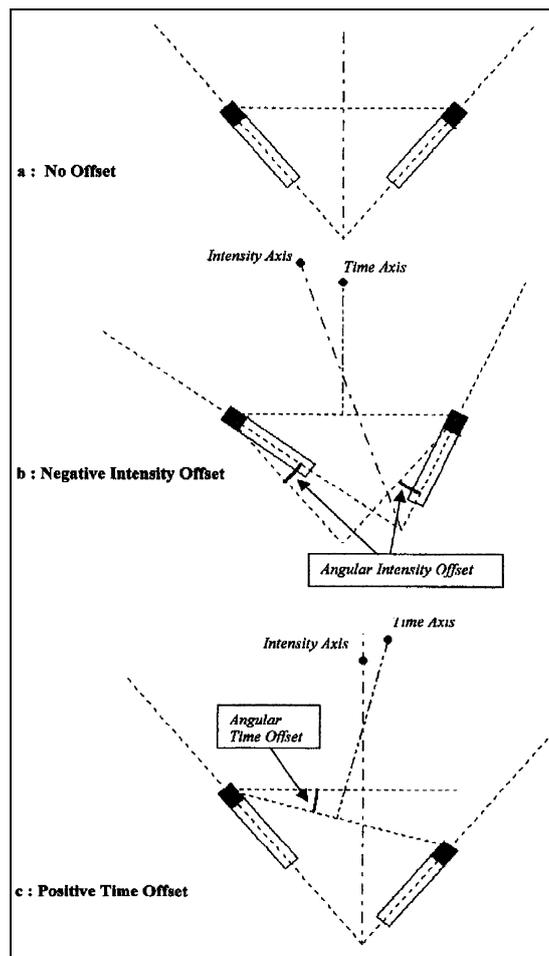


Figure 8 - Offset Physique de temps et d'intensité [1]

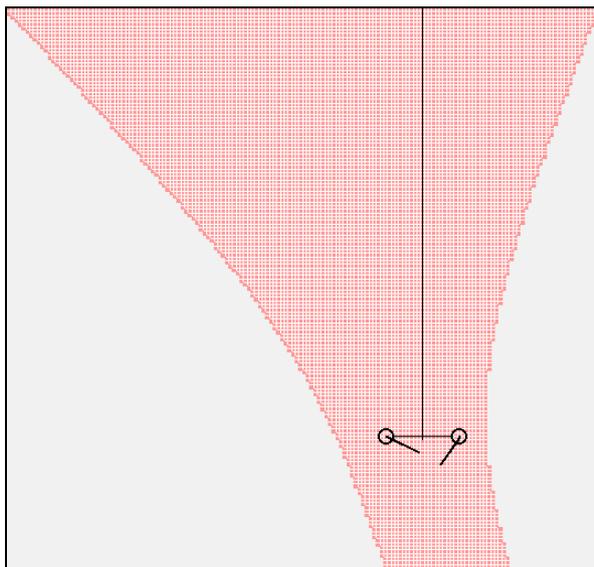


Figure 9 - OPIM = -15°

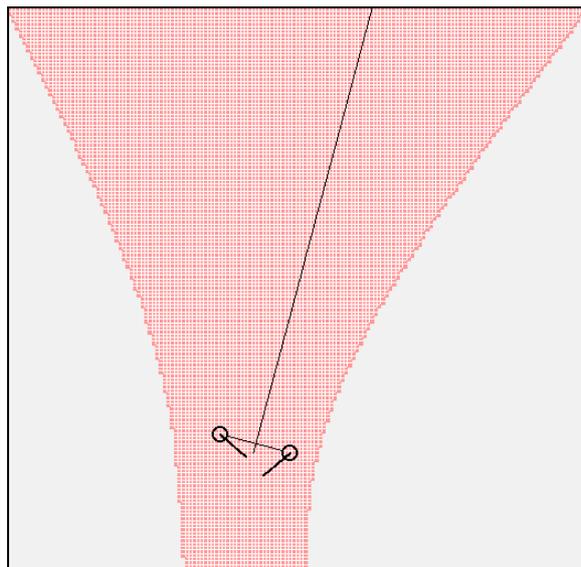


Figure 10 - OPTM = 10 cm

Les offsets physiques et électroniques permettent donc de faire pivoter les couvertures de prises de son. Ainsi, on peut ajuster les différentes couvertures de prise de son des différents couples d'un système MMA afin d'obtenir un "critical linking" de ces couvertures.

1.2.3. Ajustement de ces couples et différents systèmes

1.2.3.1. Le « critical linking »

Chaque couple de microphones possède donc une couverture de prise de son, plus ou moins complexe, qui doit prendre place parmi les autres couvertures de prise de son. Toute la difficulté est alors d'ajuster ces couvertures afin de n'avoir ni chevauchement, ni trou de l'espace de prise de son. En effet, ces derniers peuvent créer des artifices dans la localisation, comme par exemple des dédoublements ou des troubles lors de chevauchement ainsi que des tassements intempestifs sur les enceintes en cas de trou de couverture de prise de son. Heureusement, si on ne considère que la partie de l'espace de prise de son loin du système, le « critical linking » est faisable, puisque les couvertures ont alors des limites à peu près linéaires et dans l'axe du centre du système (par exemple Figure 4). Mais si on s'approche du système, ou dans le cas de systèmes plus complexes, ces limites ne sont plus linéaires et ne peuvent donc pas s'ajuster (Figure 5). Il faut alors trouver un compromis judicieux entre chevauchement et trou. Cet ajustement n'est toutefois pas une obligation lors par exemple de la création d'un système frontal.

1.2.3.2. Système 360°

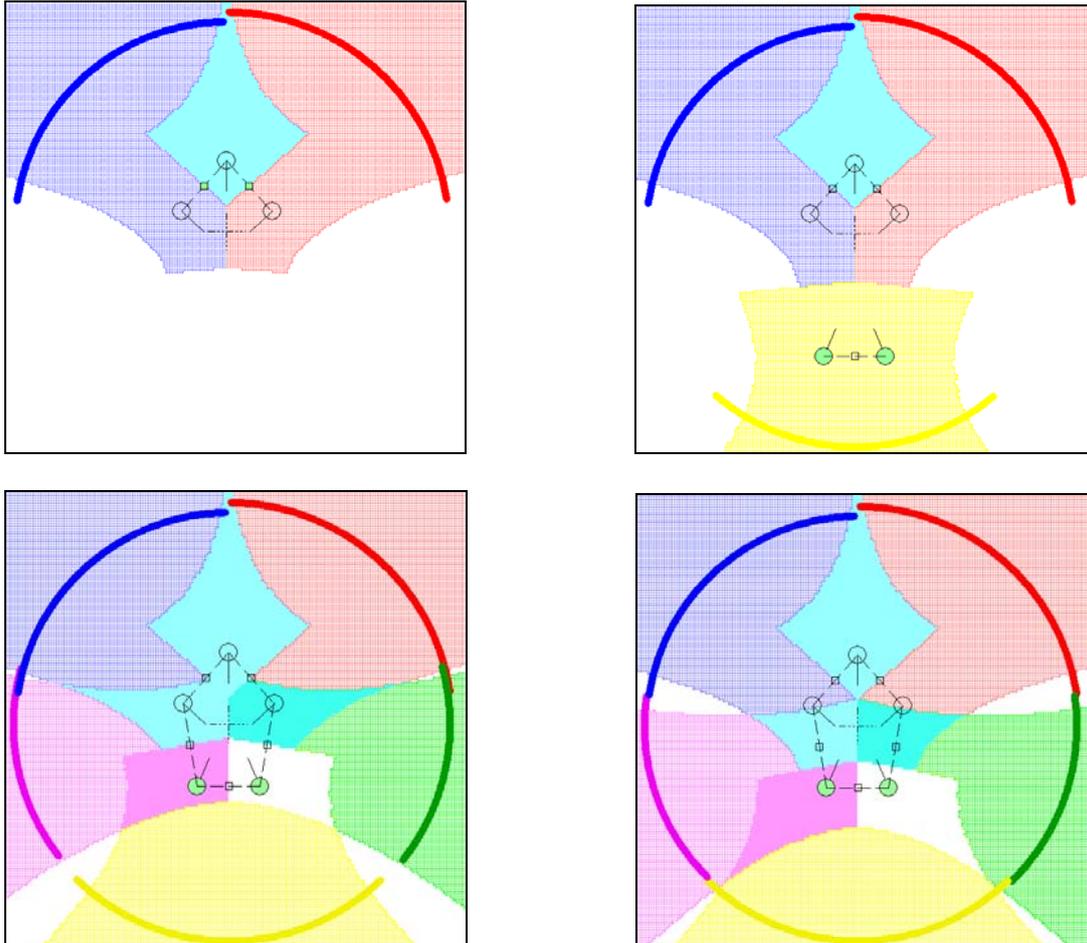


Figure 11 - création d'un système 360°

1- triplet avant

2- couple arrière

3-ajustement de la distance avant / arrière

4-retard sur le couple arrière de 0.2 ms

Il s'agit d'un système captant la totalité de l'espace de prise de son. Une méthode de conception consiste à :

- Triplet avant On ajuste tout d'abord les couvertures de prise de son des deux couples avant, afin d'avoir une liberté maximale pour régler la zone frontale du système, contenant généralement des éléments sonores importants
- Couple arrière On choisit ensuite l'ouverture de la couverture arrière, toujours suivant l'objectif de la prise de son.
- Ajustement latéral Vient enfin le moment de l'ajustement des couvertures latérales. Tout d'abord, on règle la distance triplet avant – couple arrière pour obtenir la dimension souhaitée de la couverture de prise de son. Puis, à l'aide d'offset, on fait pivoter cette dernière jusqu'à l'intégrer entre les autres couvertures de prise de son.

Ceci n'est qu'une méthode et MMA Constructor ne l'impose absolument pas lors de la conception de système.

1.2.3.3. Système frontal

Plus simple que le système 360°, il consiste en une prise de son de la partie frontale du système, sans s'occuper de la partie arrière. Il est donc beaucoup plus facile à mettre en œuvre, puisqu'il ne requière pas un « critical linking » entre toutes les couvertures de prise de son.

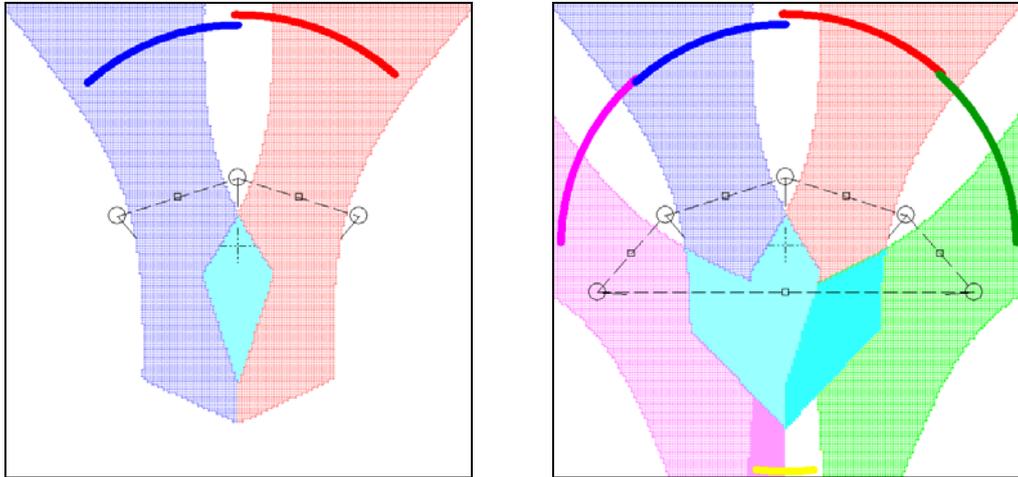


Figure 12 - système frontal

1 – triplet avant

2 – couples latéraux

On ne s'occupe pas du couple arrière

Conclusion

Après avoir défini les différents éléments d'un système de prise de son de type MMA, nous pouvons nous pencher sur la manière de calculer et d'obtenir ces couvertures de prise de son.

2. Calcul des couvertures de prise de son

Pour un point géographique dans l'espace de prise de son, appelé point de calcul, est calculé un niveau capté par chaque microphone (I) ainsi qu'un temps d'arrivée (T). Nous avons donc pour chaque microphone une Intensité et un Temps (I , T) , ce qui nous donne pour chaque couple de microphones une différence d'intensité et une différence de temps (ΔI , ΔT). Ces ΔI , ΔT sont d'abord traités afin de ne garder que les différences notables, ce qui permet de 'nettoyer' les résultats obtenus. Ils sont ensuite interprétés grâce à des courbes psychoacoustiques de localisation, ce qui permet de déduire si le point de calcul originel appartient, ou non, à telle ou telle couverture de prise de son, et donc si ce point de calcul est entendu, ou non, entre tel ou tel couple d'enceinte.

2.1. Calcul des différences d'intensité, différences de temps

2.1.1. Calcul des différences d'intensité

L'atténuation du niveau sonore est calculée selon deux éléments distincts. D'un côté suivant la distance entre le point de calcul et le microphone et de l'autre côté suivant la directivité du microphone et l'angle d'incidence du point de calcul.

2.1.1.1. Atténuation géométrique

Pour une source ponctuelle à rayonnement sphérique, en champ libre, l'atténuation est de 6dB par doublement de distance . Ce modèle correspondrait au rayonnement d'un musicien plutôt proche, avec peu d'effet de salle, et surtout avec un instrument petit. Le fait est que ce modèle se rencontre rarement. Ainsi, un autre modèle doit pouvoir être choisi par l'utilisateur. Comme modèle simple, il existe celui de l'atténuation de 3 dB par doublement de distance, correspondant plus à une source lointaine dans une acoustique [2] . J'ai donc décidé de laisser l'utilisateur libre de choisir son modèle d'atténuation et j'ai aussi permis un compromis en donnant la possibilité d'être à la fois en champ proche (6dB par doublement de distance, Figure 13) en deçà d'une certaine distance et en champ lointain (3dB par doublement de distance, Figure 14) au-delà de cette même distance. J'ai enfin ajouté un algorithme de lissage de cette courbe d'atténuation en fonction de la distance afin de passer de l'une à l'autre partie de façon continue.

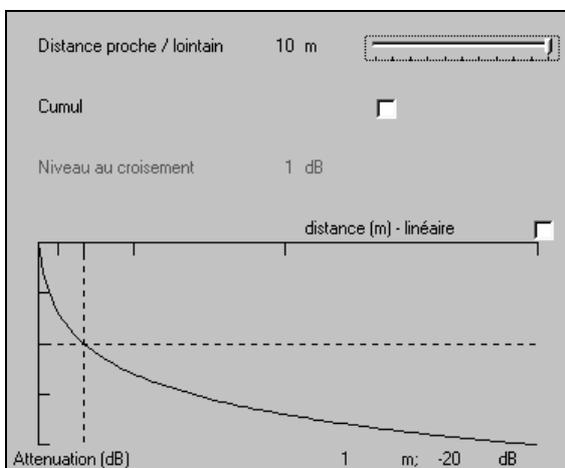


Figure 13 - préférences : champ proche

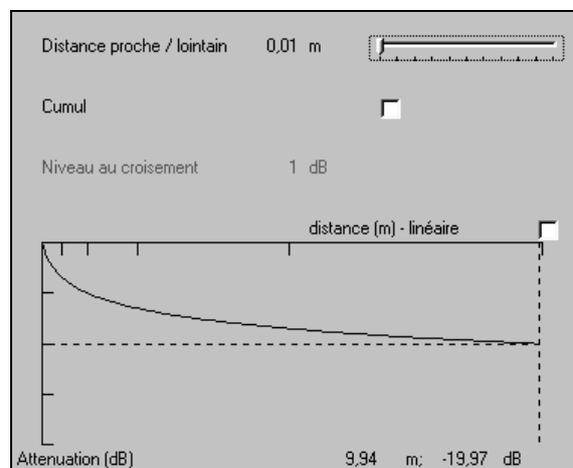


Figure 14 - préférences : champ lointain

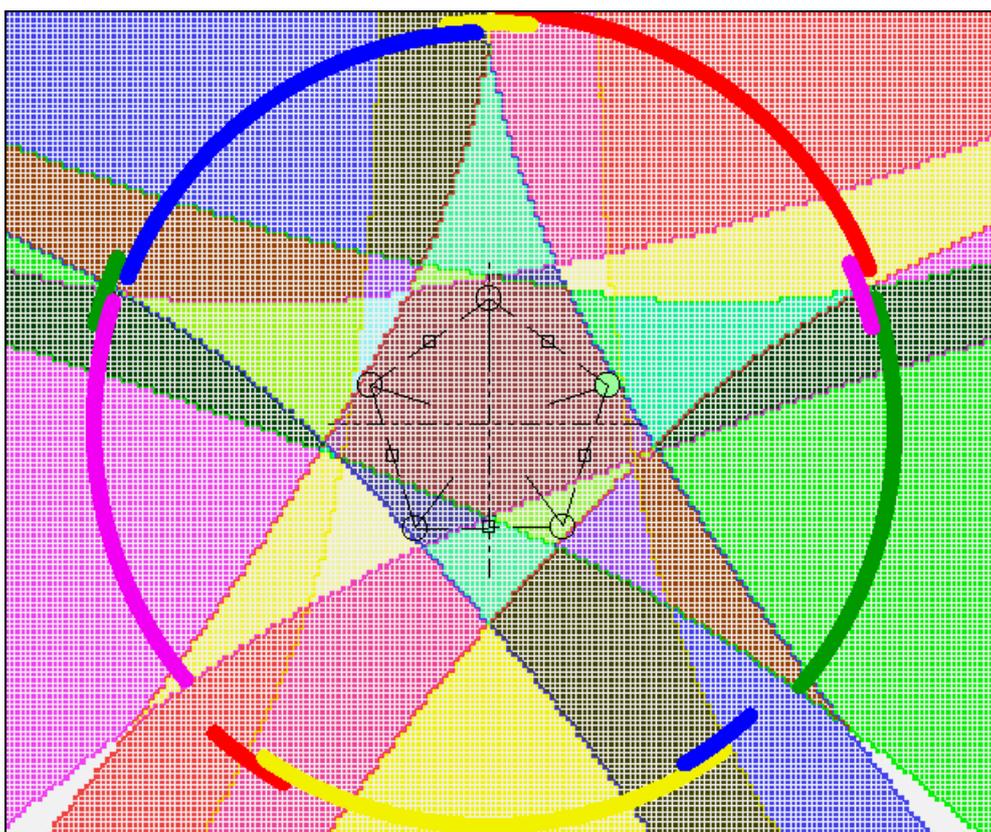


Figure 15 - atténuation champ proche, système cardio régulier, 46 cm

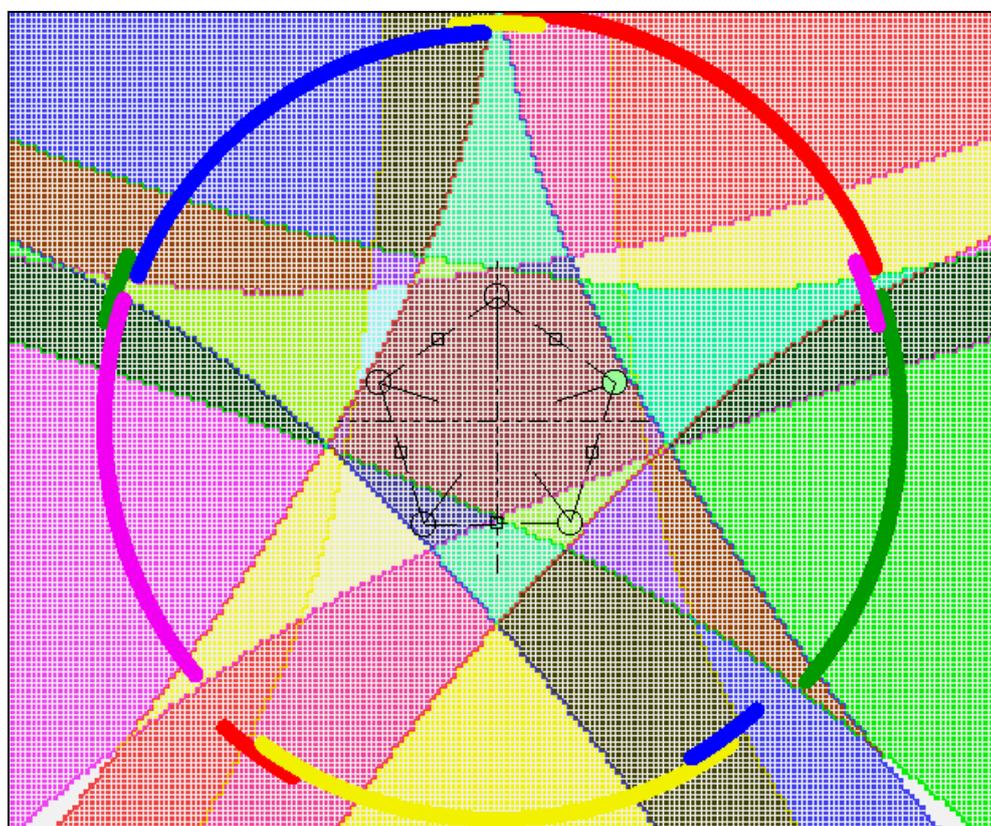


Figure 16 - atténuation champ lointain, système cardio régulier, 46 cm

Les différences entre la Figure 15 et la Figure 16 sont très minimes. Ainsi, l'algorithme de calcul de l'atténuation en fonction de la distance est finalement peu important à priori. Cependant, cet algorithme pourra reprendre de l'importance au vu du paragraphe 2.2.1 - Masquage intensité.

2.1.1.2. Directivité

La directivité d'un microphone est chose complexe. Elle dépend de l'angle d'incidence de la source et aussi de la fréquence du signal perçu. N'ayant pas une approche fréquentielle dans mon programme, je me tiens à l'atténuation en fonction de l'incidence. J'ai utilisé pour cela le modèle de la directivité omnidirectionnelle ($I=1$) jumelé à celui de la directivité bidirectionnel ($I = \cos \Theta$, ou Θ est l'angle d'incidence). L'utilisateur a alors un choix de directivité pour chaque microphone du type $I = A + B \cos \Theta$, ou $A + B = 1$. Concrètement, l'utilisateur règle un paramètre équivalent à B variant de 0 (omnidirectionnel) à 10 (bidirectionnel).

Une amélioration serait de pouvoir 'dessiner' sa courbe de directivité ou de choisir une courbe calquée sur celle de microphone existant. Mais ces derniers ont une directivité qui varie en fonction de la fréquence. Une amélioration encore ultérieure serait de séparer ces courbes de directivité par bande de fréquence utile à la localisation et de permettre ainsi à l'utilisateur un choix plus réaliste de directivité.

2.1.2. Calcul des différences de temps

Le temps d'arrivée d'un son est linéaire par rapport à la distance qui sépare le point d'émission (la source, point de calcul) au point de réception (les microphones). Aussi, un simple produit suffit à connaître ce temps. Une différence entre les temps d'arrivée pour chaque micro nous permet ensuite de connaître les différences de temps d'arrivée du son pour chaque couple de microphones.

On a donc : $T_i = D_i / c$ avec

- T_i temps d'arrivée sur un microphone i .
- D_i distance point de calcul – microphone i .
- c célérité du son : grandeur ajustable par l'utilisateur.

2.2. Traitement des différences de temps / différences d'intensité

En tenant compte des différences de temps et différences d'intensité telles qu'elles sont calculées dans le paragraphe précédent, on obtient bien souvent des résultats confus où l'on retrouve toutes les couvertures de prises de son un peu partout. Aussi, d'une part pour clarifier les résultats, mais surtout pour s'ajuster au mieux au modèle perceptif, j'ai inclus dans mon programme des calculs de prépondérance. Ces derniers peuvent être liés à l'intensité (masquage en intensité) ou au temps (masquage temporel, ou loi du premier front d'onde)

2.2.1. Masquage intensité

2.2.1.1. Principe

Pour un point, il est calculé l'intensité obtenue sur chaque microphone. Le principe du masquage en intensité est de ne tenir compte que des microphones dont l'intensité obtenue est supérieure à l'intensité maximum obtenue moins une certaine valeur appelée 'niveau de masquage'. Pour autant, l'utilisateur n'est pas forcé d'utiliser le masquage en intensité et, s'il l'utilise, peut régler lui-même le niveau de masquage.

2.2.1.2. Références

Wieslaw Woszczyk [3] nous fait état d'une valeur de 15 dB pour des signaux corrélés en phase mais ses signaux tests ont été des bruits ainsi que des signaux basse fréquence. De plus, il ne parle pas spécifiquement de masquage de localisation, même si son test pouvait s'en rapprocher, le signal masqué étant diffusé sur une autre enceinte que le signal masquant.

Par ailleurs, l'étude de Ryousuke Itoh [4] semble plus être portée sur le masquage de la localisation en quadriphonie. On retrouve alors à peu près la même valeur, puisque Ryousuke Itoh annonce un niveau de masquage entre 10 et 20 dB. D'un autre côté, il fait le lien avec l'aspect temporel, puisque le niveau de masquage dépendrait aussi du délai entre signal masqué et signal masquant. Pour autant, ce délai, qu'il soit positif ou négatif, n'interviendrait plus pour un niveau de masquage de 20 dB.

2.2.1.3. Effets

L'utilisation du masquage en intensité se voit surtout dans les systèmes avec des directivités élevées (cardio...) et permet alors une simplification des résultats en accord avec les théories existantes. Le système utilisé dans ces exemples est un système cardio régulier d'espacement 46 cm entre les capsules.

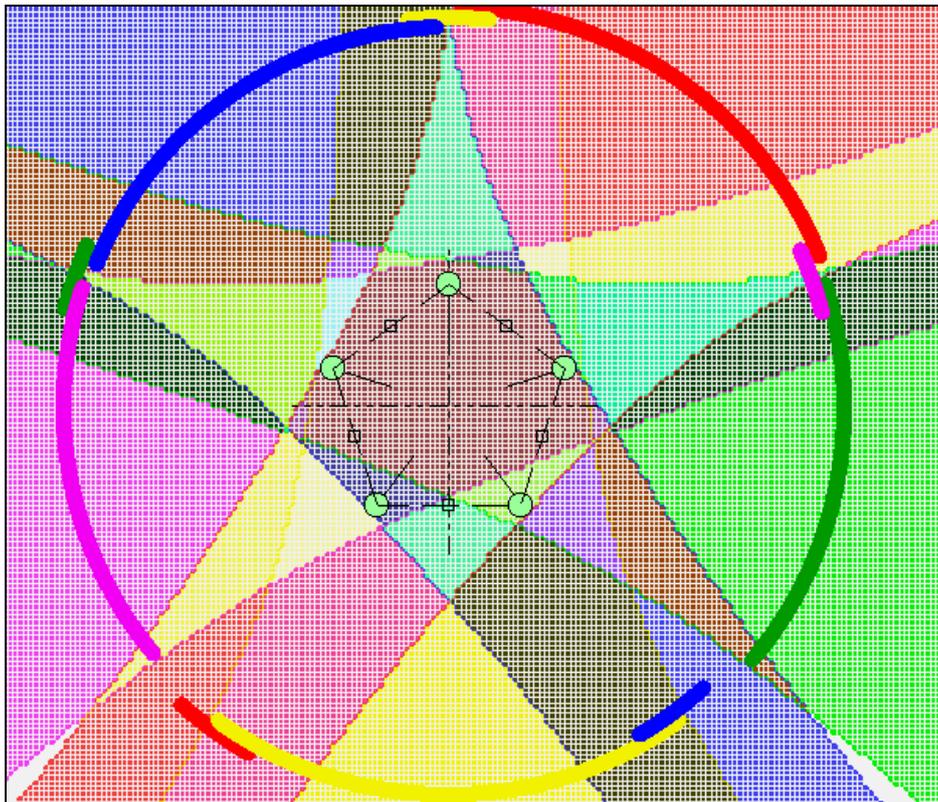


Figure 17 - pas de masquage en intensité

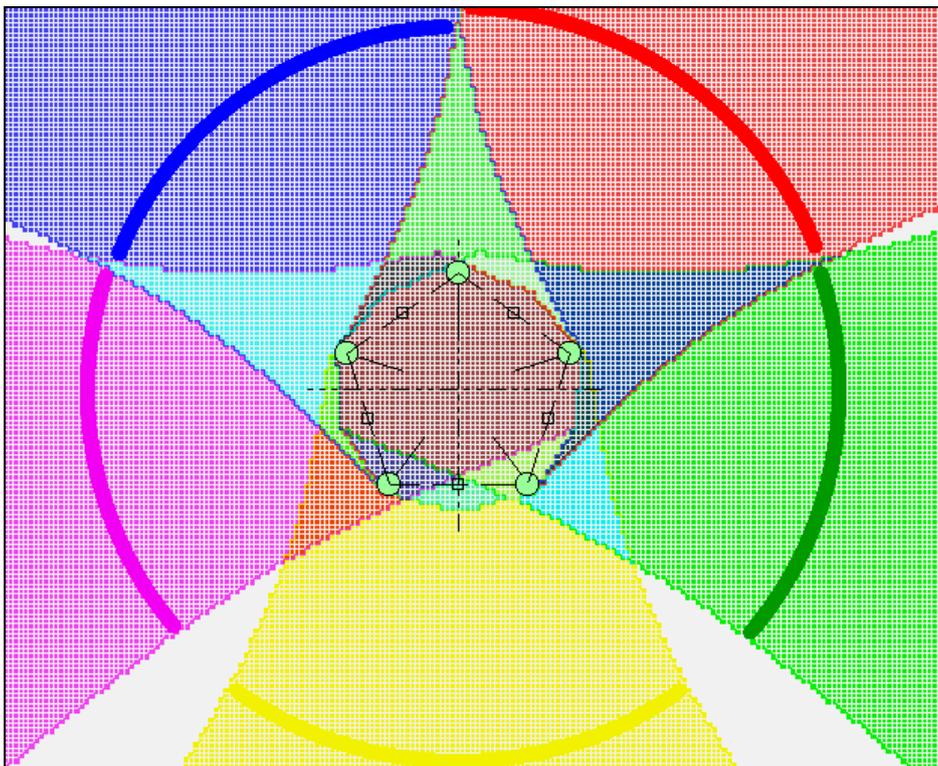


Figure 18 - masquage en intensité avec un niveau de masquage de 20 dB

On voit donc que les différentes couvertures de prises de son sont 'nettoyées' à l'arrière des différents couples

2.2.2. *Masquage temporel*

2.2.2.1. Principe

J'ai programmé deux niveaux de masquage temporel : l'un absolu, l'autre relatif.

Le masquage temporel absolu ne correspondrait pas à priori à un modèle perceptif, mais permet juste une simplification efficace des résultats obtenus. En effet, pour un point de calcul, on repère tout d'abord sur quel micro le son arrive en premier, puis on ne garde que les données de ce micro et des deux microphones adjacents (celui à sa droite et celui à sa gauche). Ainsi, on 'éteint' les deux microphones situés de l'autre côté du système, ce qui empêche le point de calcul d'appartenir aux couvertures de prises de son des couples opposés. Quant au masquage temporel relatif, il ne garde les microphones que si leur temps d'arrivée est inférieur au temps d'arrivée le plus court plus un temps ajustable par l'utilisateur appelé 'temps de masquage'.

2.2.2.2. Références

Si le masquage temporel absolu ne correspond à aucun modèle existant, le masquage relatif ressemble fortement à un effet de précedence, ou loi du premier front d'onde. Ainsi, Hans Wallach [5] nous propose une valeur de 1 ms pour l'effet de précedence. Néanmoins, si cette valeur fonctionne lors de ses tests utilisant des sons purs, ses résultats restent mitigés avec des sons musicaux.

2.2.2.3. Effets

Les effets du masquage temporel se voient surtout avec des systèmes aux grandes proportions, c'est à dire faisant intervenir beaucoup de différences de temps entre les microphones. Le système utilisé pour ces exemples est un système cardio régulier, 46 cm entre les capsules.

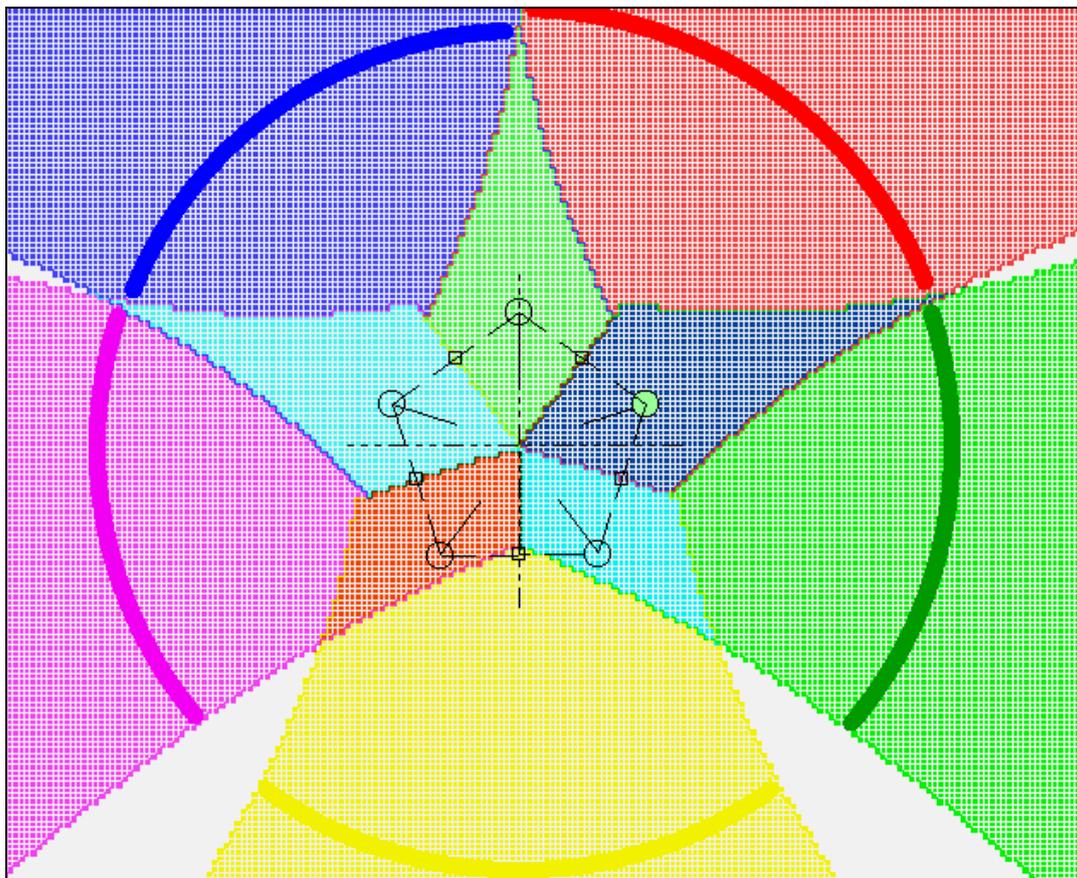


Figure 19 - masquage temporel absolu

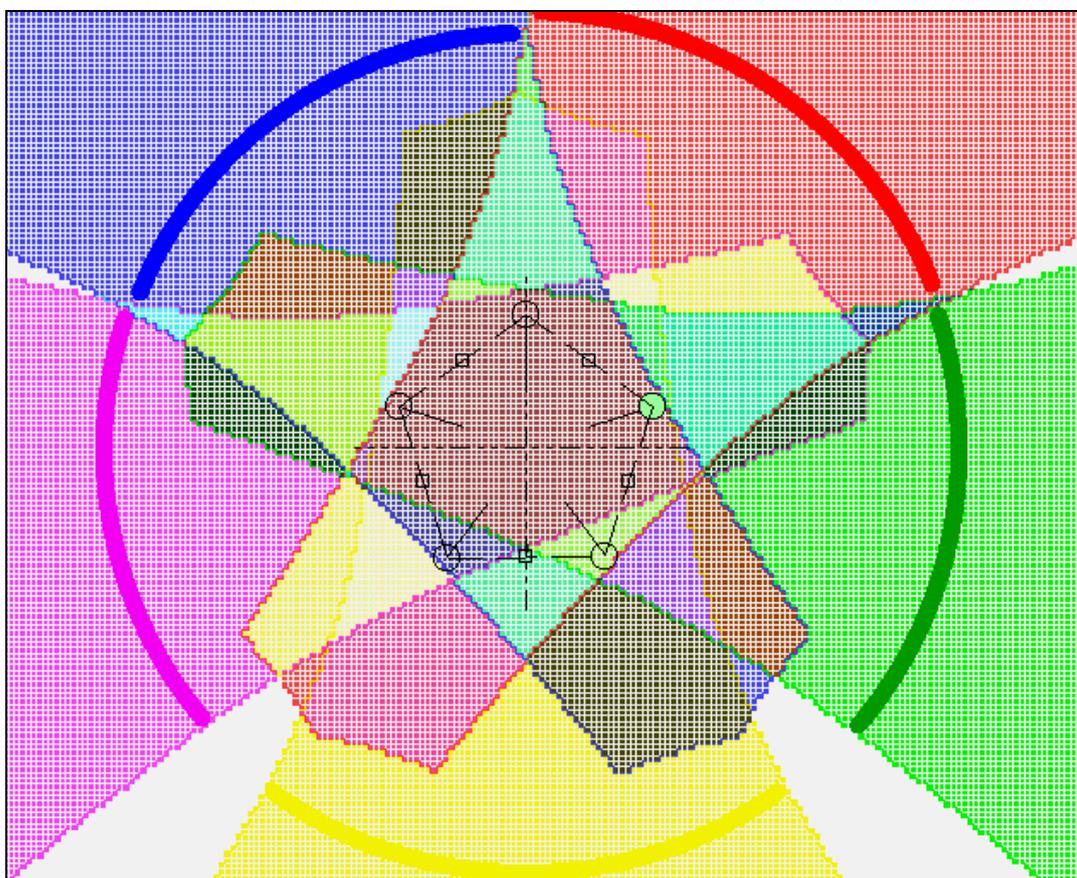


Figure 20 - masquage temporel relatif : 1,5 ms

2.3. Courbes psychoacoustiques de localisation

Ces courbes sont le lien entre le calcul et la perception. Elles permettent de déterminer si oui ou non le point de calcul est dans la couverture de prise de son du couple de microphones étudié. Néanmoins, il s'agit en fait de la modélisation la moins sûre du programme, du fait d'une complexité du phénomène et d'une rareté des études sur le sujet. Toutefois, la variation de ces courbes entraîne des résultats spécifiques et différents qu'il peut être intéressant de souligner.

2.3.1. Principe

2.3.1.1. Nécessité des courbes

Pour un point de calcul et pour un couple de microphones donné, on a obtenu une différence d'intensité (ΔI) ainsi qu'une différence de temps (ΔT). Ces deux différences sont reproduites tel quel par les enceintes puisque chaque microphone est associé à une enceinte spécifique. Néanmoins, ces différences de temps et d'intensité n'arrive pas de la même manière aux oreilles de l'auditeur du fait du système de reproduction sonore employé. Ainsi, l'auditeur n'est absolument plus en situation d'écoute 'naturelle' et les différentes études de ce cas ne fonctionnent plus. Pour définir les couvertures de prises de son des différents couples de microphones ont été créées les courbes psychoacoustiques de localisation : ces courbes nous donnent un lien entre le système de diffusion (et ce qui précède : microphones...) et le système de perception (nos oreilles).

2.3.1.2. Paramètres

La localisation d'un son dépend donc des caractéristiques ΔI et ΔT calculées pour un couple, mais aussi du couple d'enceintes par lequel ce son est diffusé. C'est pourquoi il n'y a pas une courbe psychoacoustique de localisation, mais autant de courbes que de couple d'enceinte. Je n'étudie pas dans mon programme tous les couples de diffusion, mais seulement ceux primaire (L, R, SL, SR, B) et celui formé par le micro avant gauche et le micro avant droit, couple que j'appelle 'avant'. Ce couple avant correspond à une diffusion stéréophonique et a donc eu la chance de bénéficier d'études. Il existe donc pour ce couple une courbe psychoacoustique de localisation... Mais pas pour les 5 autres couples de diffusion.

2.3.1.3. Construction des courbes

Plus concrètement, ces courbes sont tracées dans un repère $\Delta I / \Delta T$ et ont la forme grossière d'une 'patatoïde'. Ainsi, un point de coordonnées $\Delta I / \Delta T$ se trouvant à l'intérieur de la patatoïde sera entendu entre les deux enceintes du couple considéré et fera donc parti de la couverture de prise de son de ce couple. Et inversement.

J'ai constitué ces courbes à partir de 12 points dont 4 sur les axes (intensité pur, temps pur) et donc 3 par zone ($\Delta I > 0$ et $\Delta T > 0$, $\Delta I > 0$ et $\Delta T < 0$, etc.). Tous ces points sont modifiables par l'utilisateur afin de se rapprocher au mieux des modèles existants et surtout ceux à venir...

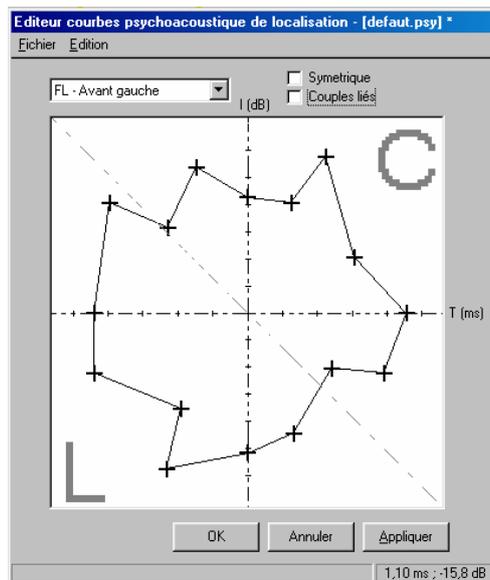


Figure 21 - courbe psychoacoustique de localisation

2.3.2. Références

Il existe assez peu d'études sur le sujet, et encore moins en multicanal. Néanmoins, on peut tout d'abord relever celles appliquées à la stéréo et en intensité pure et temps pur. Puis une étude à été menée, toujours en stéréo, mêlant intensité et temps. Enfin, nous verrons les études spécifiquement multicanal.

2.3.2.1. Stéréo, intensité pure, temps pur

Ces études nous donnent la position d'une source sonore en fonction de la différence d'intensité ou de la différence de temps entre les deux canaux de diffusion. Ainsi, nous trouvons les études de D.M. Leakey (Figure 22 et Figure 23 : A, [10]), H. Mertens (Figure 22 et Figure 23 : B, [11]), F.H. Brittain (Figure 22 : C, [12]), G. Simonson (Figure 22 et Figure 23 : D, [13]) ou encore Sengpiel (Figure 23 : E, [14]).

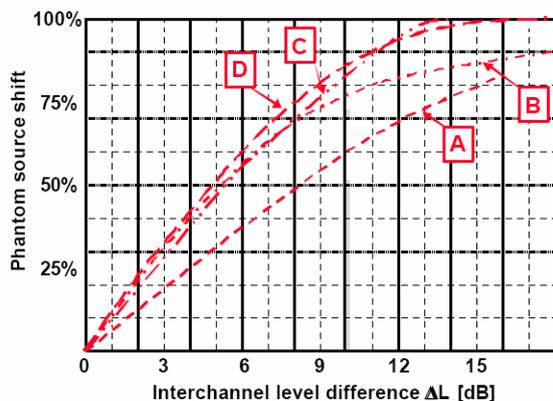


Figure 22 - stéréo, intensité pure

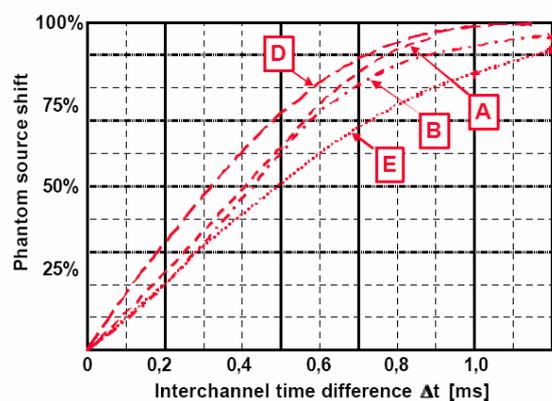


Figure 23 - stéréo, temps pur

Ces courbes peuvent nous donner les limites supérieures (intensité) et latérales (temps) des courbes psychoacoustiques de localisation, mais devront se borner au couple stéréo (Figure 27). Par ailleurs, elles ne nous renseignent aucunement sur l'allure des courbes psychoacoustiques de localisation entre les axes ΔI et ΔT .

2.3.2.2. Stéréo, intensité et temps mêlés

Il existe une seule étude mêlant les différences de temps et d'intensité, réalisée par Simonsen [13] . Elle reste néanmoins applicable qu'au couple stéréo classique et n'interviendrait donc pas dans un cadre multicanal. On peut néanmoins s'en inspirer, en tenant compte, si elles existent, de données multicanal comme des limites en intensité de ces courbes.

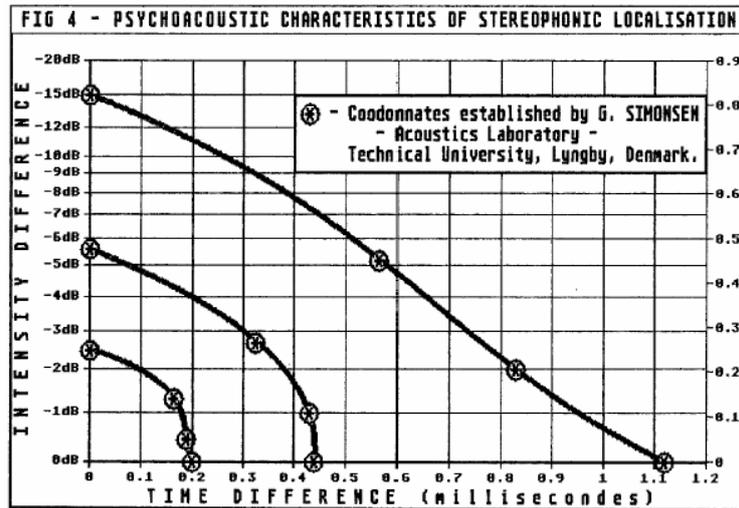


Figure 24 - courbes psychoacoustiques de localisation en stéréo établies par G. Simonsen

2.3.2.3. Multicanal

S'il n'existe pas beaucoup d'études alliant intensité et temps en stéréo, il n'en existe pas beaucoup non plus en multicanal, voir pas du tout. Néanmoins, une étude a été faite en intensité pure sur la localisation latérale par G. Theile ([9] , repris dans [6]). Tout d'abord réalisée en 1976, Il ne s'agit pas d'une restitution sonore selon la norme ITU-R BS 775-1 mais ce travail reste pour autant intéressant. On y trouve notamment un test de localisation pratiqué sur un couple d'enceinte situé à 50° et 110° par rapport à l'auditeur (Figure 25). De cette figure, on peut en déduire des intensités maximums pour le segment latéral : 12 dB pour 110° et 9 dB pour 30°.

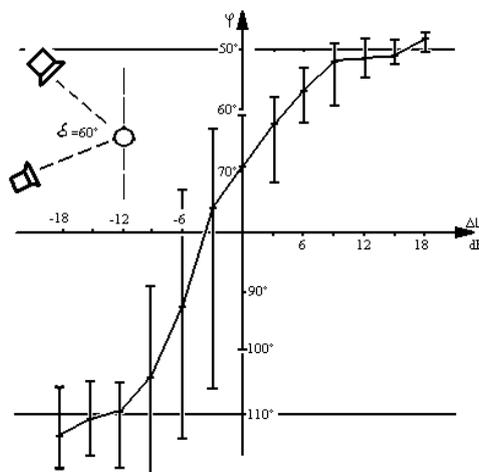


Figure 25 - localisation latéral, intensité pure

Par la suite, G. Theile a réinterprété ces résultats pour obtenir la Figure 26. Cette dernière nous donne de nouveau maximum d'intensité, tel que 8 dB à 0°, -7 dB à 30° avant, 10 dB 30° coté et enfin -12 dB pour 110°. Tous comme les résultats obtenus en stéréo, ces données ne nous permettent pas de définir les courbes psychoacoustiques de localisation en dehors des axes ΔI et ΔT .

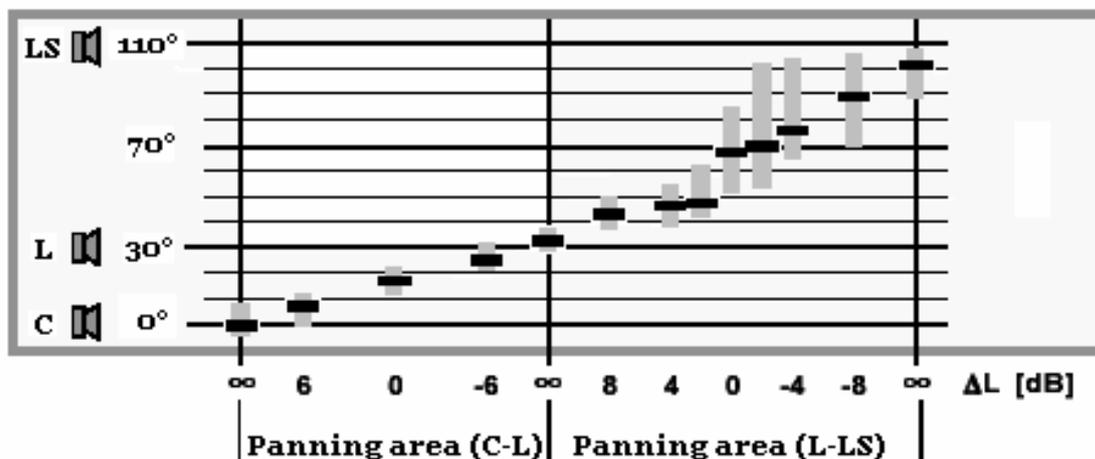


Figure 26 - localisation latérale, intensité pure

2.3.2.4. Résumé des points connus

Auteur	couple	angle	différence de temps (ms)	différence d'intensité (dB)
D.M. Leakey	Stéréo	-30°/+30°	0	18
H. Mertens	Stéréo	-30°/+30°	0	18
F.H. Brittain	Stéréo	-30°/+30°	0	12
D.M. Leakey	Stéréo	-30°/+30°	0,9	0
H. Mertens	Stéréo	-30°/+30°	1,1	0
Sengpiel	Stéréo	-30°/+30°	1,2	0
G. Simonsen	Stéréo	-30°/+30°	0	15
G. Simonsen	Stéréo	-30°/+30°	0,57	5,2
G. Simonsen	Stéréo	-30°/+30°	0,82	2
G. Simonsen	Stéréo	-30°/+30°	1,11	0
G. Theile (1996)	avant	0°	0	8
G. Theile (1996)	avant	30°	0	-7
G. Theile (1976)	coté	30°	0	9
G. Theile (1996)	coté	30°	0	10
G. Theile (1976)	coté	110°	0	-12
G. Theile (1996)	coté	110°	0	-12

Figure 27 - points connus de courbes psychoacoustiques de localisation

2.3.3. Incidences

2.3.3.1. Zones et courbes notables

On peut repérer 2 groupes de 2 zones chacune sur ces courbes. Les 2 premières zones (A1 : $\Delta I > 0$ et $\Delta T > 0$, A2 : $\Delta I < 0$ et $\Delta T < 0$) sont des zones où le temps et l'intensité s'accordent. Par ailleurs, dans les deux autres zones (B1 : $\Delta I > 0$ et $\Delta T < 0$, B2 : $\Delta I < 0$ et $\Delta T > 0$) le temps et l'intensité se contredisent. De plus, il s'agit de description grossière de ces zones, plus complexe que cela à mon avis : il pourrait s'agir d'une courbe (courbe A) représentant une écoute 'naturelle' sur laquelle le temps et l'intensité s'accordent. De part et d'autre de cette courbe, ces deux paramètres se contredisent de plus en plus, jusqu'à un maximum sur une courbe plus ou moins perpendiculaire à la première (courbe B).

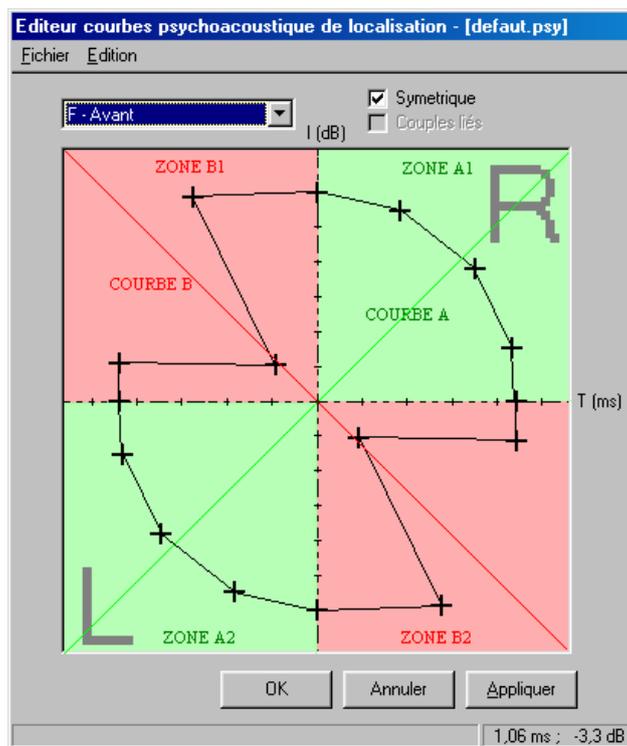


Figure 28 - zones et axes notables

2.3.3.2. Interprétation

Aussi, si l'interprétation est simple lorsqu'un point est à l'intérieur de la 'patatoïde', elle l'est moins lorsque ce point y est à l'extérieur. A première vue, le son, s'il n'est pas localisé entre les enceintes, il est entendu 'collé' à une enceinte. Cela semble correct pour des points dont les caractéristiques se rapprochent de la courbe A. D'un autre côté, il se peut que le point ne soit plus localisé du tout, ses caractéristiques $\Delta I / \Delta T$ se rapprochant de la courbe B. Ainsi, une zone de l'espace de prise de son ne faisant pas partie d'une couverture de prise de son ne veut pas forcément dire que cette zone est entendu 'collée' à une enceinte : cette zone peut être aussi un flou de localisation.

2.3.3.3. Zone Floue

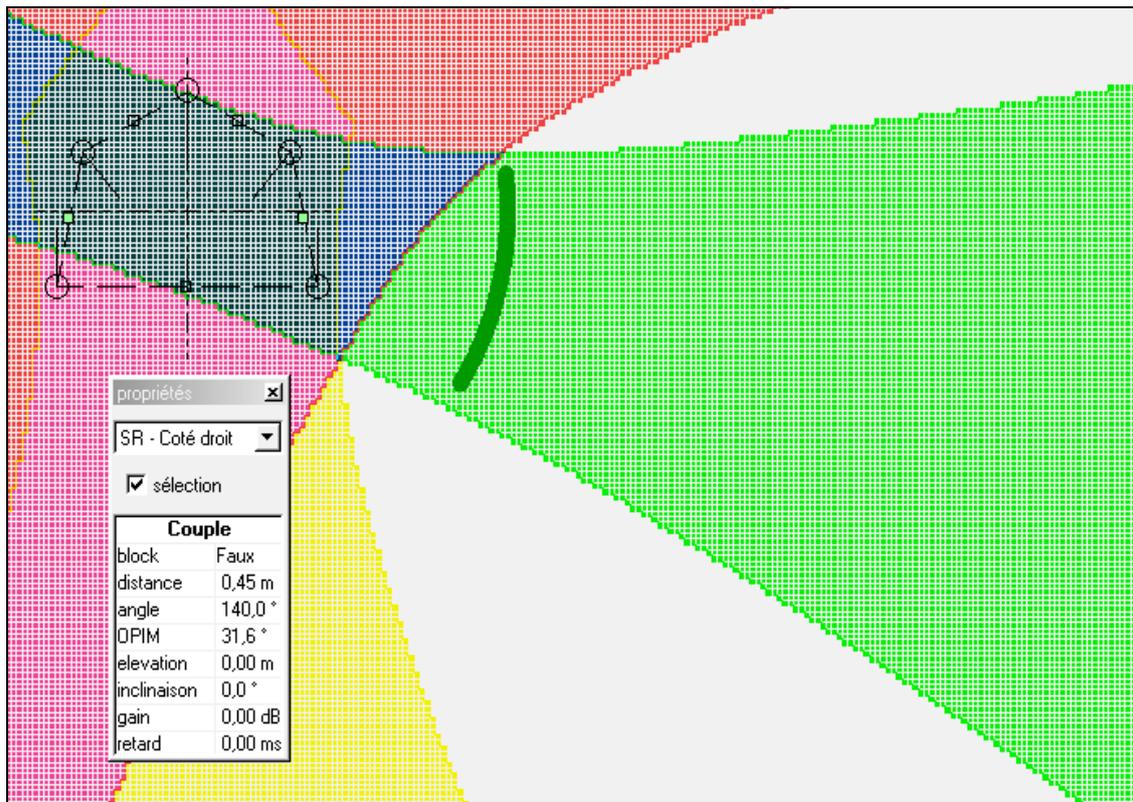


Figure 29 - zones B incluses dans les courbes psychoacoustiques de localisation

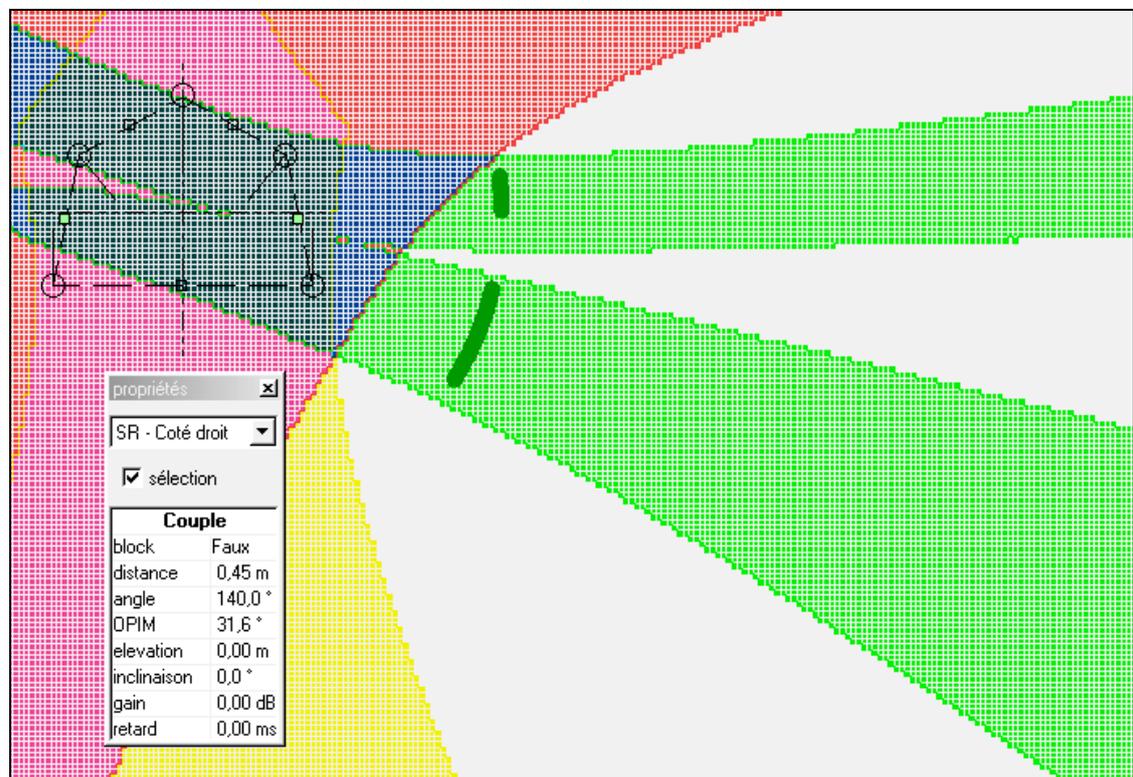


Figure 30 - zones B exclues des courbes psychoacoustiques de localisation

Dans la Figure 29, seules deux zones sont blanches, c'est à dire ne faisant pas parties de couvertures de prises de son. Ces deux zones seront vraisemblablement entendues collées aux enceintes : avant droite pour la zone blanche du haut, arrière droite pour l'autre.

Dans la Figure 30 apparaît une troisième zone blanche, au milieu de la couverture de prise de son du couple côté droit (en vert). Cette zone ne sera pas entendue 'collée' à une enceinte, mais sera floue, c'est à dire non localisée, du fait de la contradiction entre les éléments temporels et ceux liés à l'intensité.

On peut alors faire un lien entre masquage et courbes psychoacoustiques de localisation. En effet, lorsqu'un point est localisé sur une enceinte, on peut dire que cette dernière masque l'autre enceinte diffusant le même signal à un ΔI et ΔT près. Ainsi, un point situé à l'extérieur d'une courbe psychoacoustique de localisation signifie qu'une enceinte est masquée par l'autre enceinte, à condition que le point de calcul soit situé dans une zone où le temps et l'intensité s'accordent pour le couple considéré. De plus, on s'aperçoit que les différentes données de masquage correspondent à peu de chose près au maximum de ΔT et ΔI des courbes psychoacoustiques. Une étude plus approfondie de ces dernières permettraient sûrement de faire un lien plus précis entre les deux phénomènes et peut être même de les réunir.

Conclusion

Nous venons de voir comment sont calculés les couvertures de prises de son dans le programme MMA Constructor. Même si ces calculs ne s'appuient pas toujours sur des données testées et approuvées, le programme permet de les y intégrer lorsque (et si) des études auront éclairé les quelques zones d'ombre restantes. Pour le moment, il s'agit d'interpréter avec précaution et clairvoyance les résultats obtenus qui ne sont que trop théoriques. Par ailleurs, afin de vérifier par la pratique certains aspects de mon programme, j'ai pu mener quelques expériences.

3. Résultats pratiques

La conception de ce programme ne pouvait aller sans la moindre vérification pratique des théories avancées. J'ai donc coorganisé avec Hannelore Guittet une séance d'enregistrement afin de réaliser tout d'abord des mesures puis des tests d'écoutes sur les signaux enregistrés. Une majeure partie de la séance fut tournée vers le mémoire d'Hannelore Guittet [16] qui testait alors plusieurs systèmes d'enregistrement multicanal. Je ne garde quant à moi que la partie utilisant un système MMA. Il s'agissait d'un système cardio régulier, tous les 72° et de 26 cm d'espacement entre les capsules. Une prise de son de maracas a été effectuée tous les 15° sur un cercle de rayon 2,5 mètre autour du système.

3.1 Mesures d'intensité

3.1.1. Résultats

3.1.1.1. ΔI mesurés et calculés

Mon premier test a été de mesurer l'intensité captée par les microphones et ainsi de vérifier le calcul de ΔI effectué par le programme. J'ai pour cela mesuré, sur chaque micro et à chaque angle, le niveau des impulsions de maracas. Le signal mesuré est alors suffisamment court (5 millisecondes) pour s'affranchir au maximum de la réverbération de la salle et au moins un peu des premières réflexions. 3 mesures par angle seront je l'espère suffisant pour obtenir des résultats réalistes. Pour chaque angle, j'ai ensuite réajusté les niveaux trouvés afin de mettre le micro le plus fort à 0 dB. J'ai donc obtenu des différences d'intensités entre les micros et le microphone le plus fort (Figure 31). Par ailleurs, j'ai relevé les niveaux calculés par mon programme au même angles, à la même distance et avec le même système. J'ai aussi ramené les niveaux à zéro et j'obtiens donc les différences d'intensité calculées à chaque angle et pour tous les micros (Figure 32). Attention, n'ayant pas de référence absolue de niveau pour les mesures, il s'agit bien de différences d'intensité.

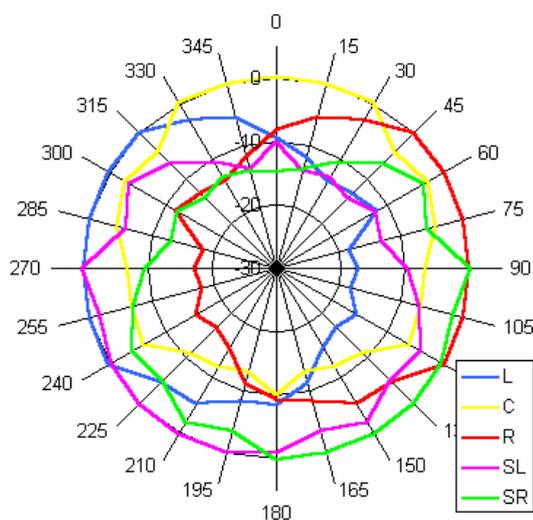


Figure 31 - ΔI mesurés

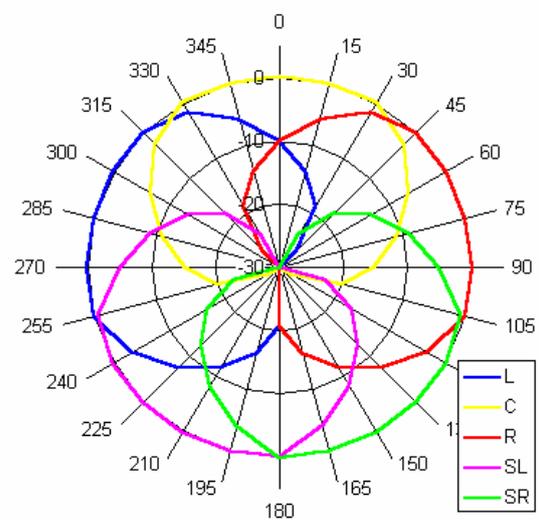


Figure 32 - ΔI calculés

3.1.1.2. Différences entre mesure et calcul

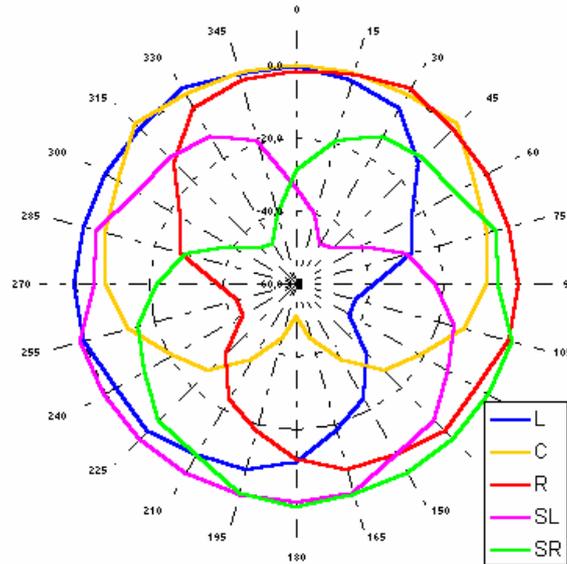


Figure 33 - Différence entre mesure et calcul

La différence entre ΔI mesuré et ΔI calculé est relativement similaire entre les microphones. De plus, il ne semble pas y avoir d'influence de l'architecture du lieu puisque la Figure 33 se répète tous les 72° . Cette différence peut alors venir de l'atténuation en fonction de la distance ou de la directivité des microphones. Compte tenu des différences observées, jusqu'à 40 dB entre calcul et mesure, l'atténuation en fonction de la distance ne semble pas expliquer le phénomène. En effet, cette dernière apporte des ΔI minimales entre les microphones, jusqu'à 3 dB par exemple pour deux microphones distants de 1 mètre et à 2,5 mètres de la source. C'est donc le calcul de la directivité qui pose problème. Reponsons le tout d'abord sous un autre angle.

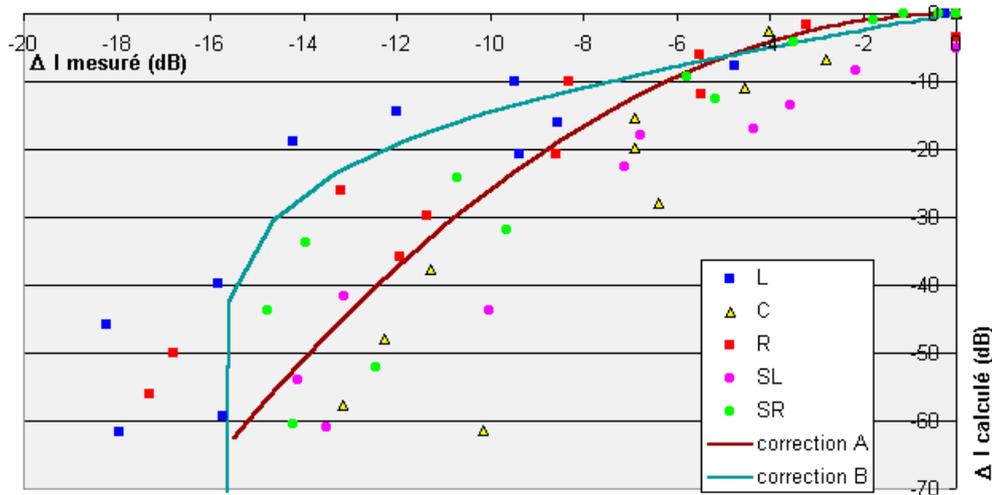


Figure 34 - Différence d'intensité calculée en fonction de la différence d'intensité mesurée

La Figure 34 nous montre chaque point de calcul (chaque angle, chaque micro) en fonction de son homologue mesuré (même angle, même microphone). On voit que tous ces points suivent une même courbe. On peut donc apporter une correction systématique de la directivité mesurée afin de retrouver au plus près les différences d'intensités mesurées.

3.1.2. Correction A

Il s'agit simplement d'un recalibrage des valeurs calculées par le biais d'une courbe moyenne. Après de multiples essais, j'ai opté pour une courbe d'équation $Y = -0,26 \times X^2$. Autrement dit :

$$\Delta I \text{ corrigé} = \sqrt{\frac{\Delta I \text{ calculé}}{-0,26}}$$

Concrètement, cette correction ne correspond à aucun modèle physique précis, mais semble tout de même à peu près fonctionner, puisque l'écart entre mesure et correction est compris entre -5 et $+5$ dB.

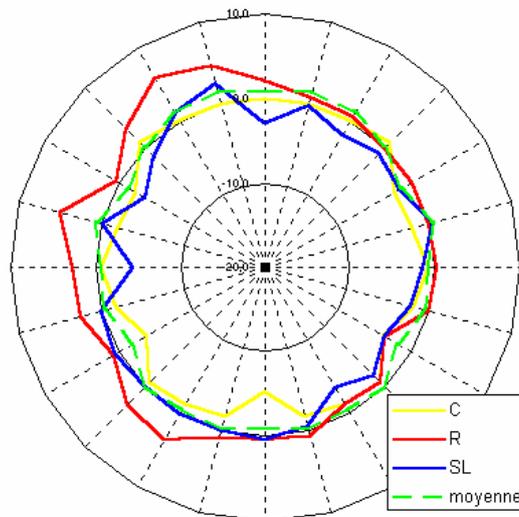


Figure 35 - différence entre mesure et correction A

3.1.3. Correction B

3.1.3.1. Directivité des microphones

Une autre approche consiste à étudier la directivité mesurée des différents microphones. Pour cela, repartons de la

Figure 31. En faisant pivoter les courbes obtenues pour les différents microphone afin de les remettre toutes dans le même axe, puis en faisant une moyenne de ces courbes, on obtient presque la courbe de directivité des microphones du système. Presque parce qu'il s'agit de différence d'intensité. C'est à dire que, pour un micro donné, de -36° à 36° par rapport à l'axe du microphone, le niveau du microphone est de 0 dB, puisque c'est à ce moment là le microphone le plus fort, donc la référence. Néanmoins, on a une atténuation théorique pour un microphone cardioïde d'environ 1 dB à 36° . On peut donc considérer cette courbe comme la courbe de directivité des microphones du système (Figure 36). Plutôt que de corriger "bêtement" le calcul, on peut alors légèrement sous évaluer la directivité théorique des microphones et faire passer le facteur B de la courbe de directivité (cf. paragraphe 2.1.1.2) de 5 (cardioïde) à 4,2 (cardioïde légèrement hypocarديوïde). On retrouve ainsi la courbe de directivité mesurée (on remarquera l'écart minime à 30° entre les deux courbes),

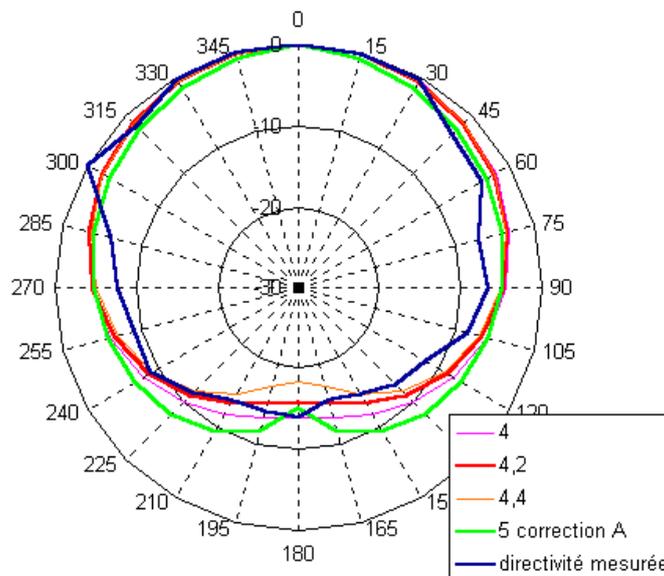


Figure 36 - directivité mesurée et théorique (facteur B)

3.1.3.2. Différence entre mesure et correction B

Ainsi, on peut recalculer les différences d'intensités théoriques et les comparer à celles mesurées (Figure 37).

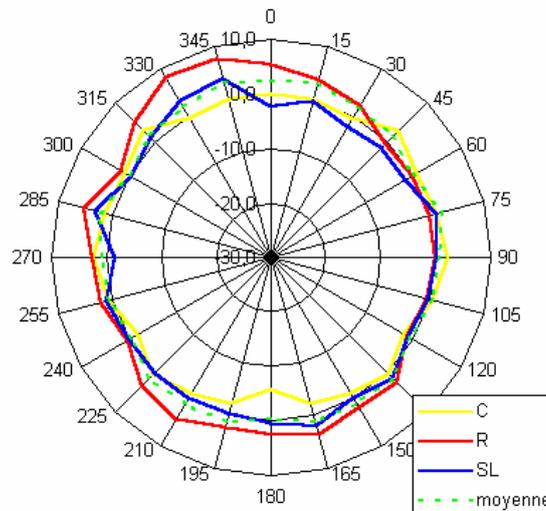


Figure 37 - différences entre mesure et correction B

La différence semble plus régulière qu'avec la correction A et l'explication plus concrète. Pourquoi faut-il sous évaluer la directivité des microphones pour retrouver les mesures d'intensité ? Les courbes de directivité des microphones utilisés (Schoeps : MK5) existent pourtant et ne correspondent pas à une directivité légèrement hypocarديوïde. En sous évaluant la directivité, on "entend" alors un peu plus de signal venant de l'arrière. Plus précisément, l'atténuation à 180° d'une directivité B=4 est de -14dB. L'angle d'incidence responsable d'une atténuation de 14dB avec une directivité cardio (B=5) est alors de 130°, c'est à dire, par rapport au 'dos' du micro, 50°. Cet angle peut alors correspondre à l'angle d'incidence d'une réflexion venant du sol.

3.1.3.3. Réflexions du sol

La Figure 38 nous montre une situation extrême lors de la prise de son : la maracas fait face à un micro du système (micro 1) et est dans le dos d'un des microphones opposé du système (micro 2). En ne tenant compte que du son direct, le signal sonore perçu par le micro 2 est très faible, de l'ordre de -40 dB du fait de l'inclinaison de 10° des microphones. Par contre, la réflexion venant du sol n'a pas le même angle d'incidence que le son direct et, pour une élévation de $1,2$ m et une distance à la source de $2,7$ m, cette réflexion sera atténuée par la directivité du microphone de seulement 14 dB. Temporellement, cette réflexion arrive trop tôt pour ne pas être mesurée avec le son direct, mais trop tard pour influencer la localisation en tenant compte d'un effet de précedence à partir de 1 ms.

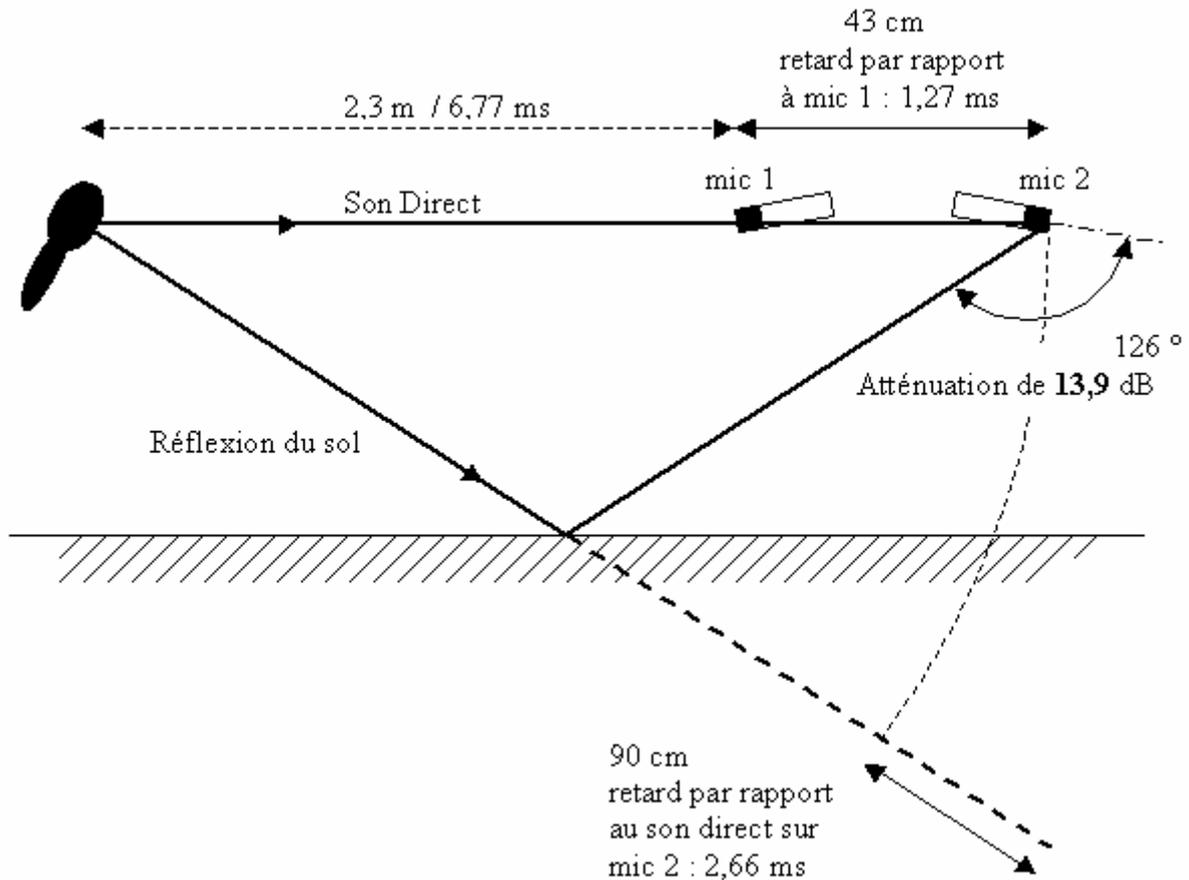


Figure 38 - atténuation et retard de la réflexion venant du sol

Conclusion

Les différences d'intensités pourraient être dues aux réflexions venant du sol. Le fait de ne pas les modéliser est malgré tout acceptable car elles ne jouent pas un rôle primordial dans la localisation et donc dans le calcul des couvertures de prises de son. Néanmoins, pour en tenir compte, la seule manière pour l'instant est d'abaisser la directivité des microphones du système.

3.2. Test de localisation

3.2.1. Présentation

3.2.1.1. Résultats

Comme dit précédemment, une maracas a été enregistrée toute les 15° sur un cercle de 2,5 m autour du système. Les tests de localisation ont été ensuite effectués sur un système de diffusion à la norme ITU-R BS 775-1, d'environ 2,5 mètres de rayon. Il a été pris ensuite la moitié seulement des ces points, au vu de la symétrie droite/gauche du système, afin de diminuer la durée du test. Les tests ont été effectués par Hannelore Guittet [16] , et à partir de ses données, en redédoublant les points, j'ai obtenu la figure ci dessous.

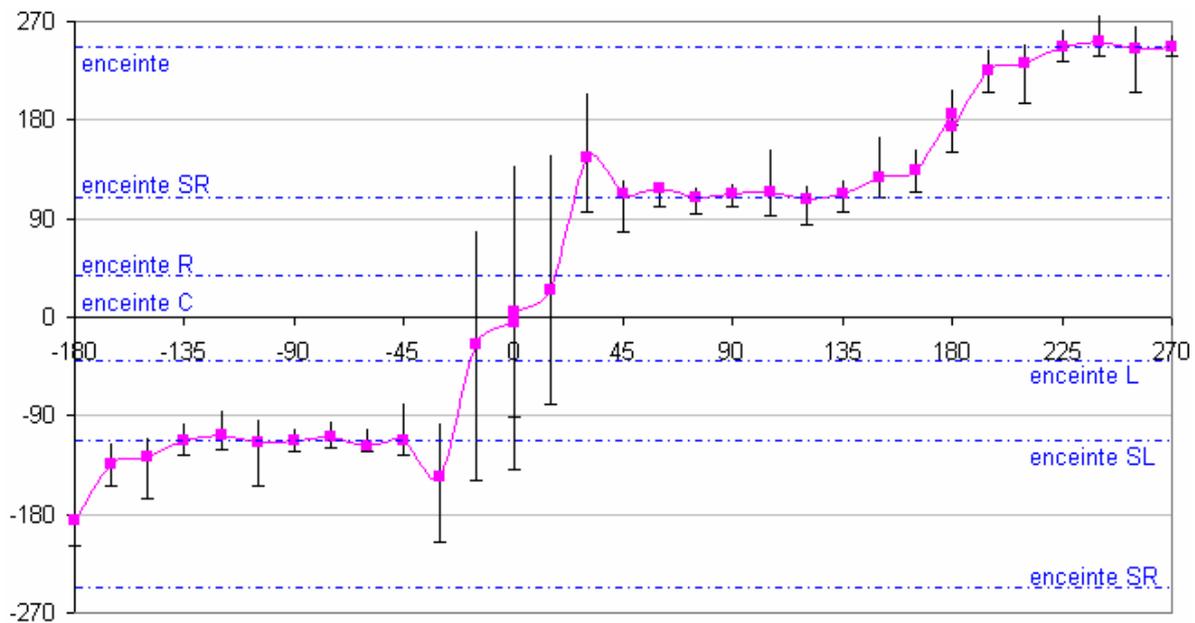


Figure 39 - test de localisation, angle perçu en fonction de l'angle réelle

3.2.1.2. Lecture des résultats

On peut alors recenser 3 zones et 1 singularité:

- couvertures avant entre -15° et $+15^\circ$ d'angle réel, le source est perçue allant de -30° (enceinte L) à 30° (enceinte R). La dispersion des résultats est énorme, dû à de nombreuses inversion avant / arrière. De chaque côté, les segments latéraux ne contiennent pas de points de mesures, il faut donc se méfier de la courbe en sachant que sa continuité n'est peut-être qu'artificielle, c'est à dire qu'il pourrait n'y avoir aucun angle réel entendu sur les segments latéraux.
- 30° Il s'agit d'une inversion avant / arrière généralisée, ce qui fait que l'on peut suspecter la présence d'une couverture de prise de son arrière à 30° et à -30° , tout comme de -15° à 15° . Néanmoins, comme aucun auditeur ne donne l'angle 30° devant, on ne devrait donc pas y rencontrer de couvertures de prise de son avant.

- **enceintes arrières** On remarque ensuite deux plats entre -135° et -45° d'une part et 45° et 135° d'autre part (symétrie). Tous ces angles réels sont donc perçus à -110° et 110° , c'est à dire provenant des enceintes arrières. Par ailleurs, la disparité des résultats est faible, montrant l'accord entre tous les auditeurs. De plus, cette disparité penche plutôt vers les segments latéraux, les angles réels compris entre $45^\circ/135^\circ$ et $-145^\circ/-45^\circ$ étant en effet situés sur les côtés du système.
- **couverture arrière** Pour des angles allant de 135° à 225° , c'est à dire $\pm 45^\circ$ autour de 180° , la source sonore est perçue sur le segment arrière, entre -110° et 110° . On peut remarquer une légère compression de la couverture de prise de son arrière par le tassement des points $135^\circ/150^\circ/165^\circ$ du côté de l'enceinte : la portion de courbe entre 135° et 225° n'est pas linéaire, mais aplatie aux extrémités.

3.2.1.3. Mise en relation avec MMA Constructor

On peut alors utiliser MMA Constructor pour 'prédire' les différentes couvertures de prise de son du système (Figure 40). Il peut alors être intéressant de confronter la prédiction à la mesure (Figure 41)...

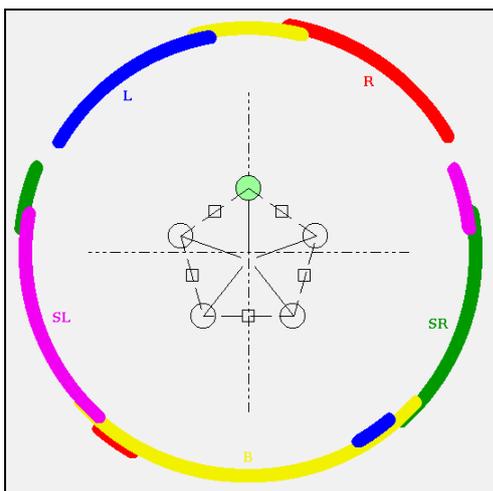


Figure 40 - couvertures de prise de son calculées

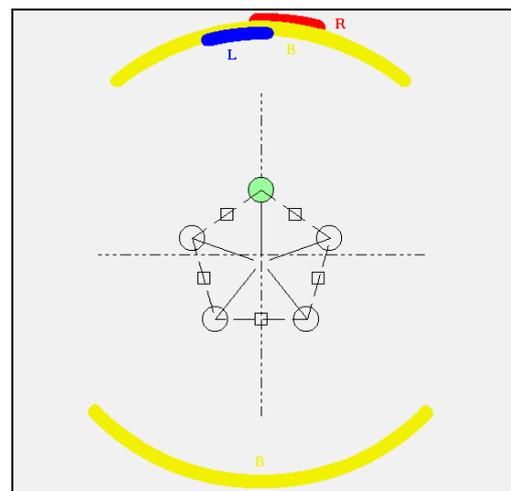


Figure 41 - couvertures de prise de son mesurées

On voit tout de suite que, mise à part la couverture arrière, les deux figures n'ont pas grand chose en commun. Par ailleurs, j'ai volontairement dessiné la couverture arrière repliée sur l'avant (Figure 41) du fait des nombreuses inversions avant / arrière que l'on trouve dans cette zone. La vision de cette dernière figure nous montre tout de même une suprématie de la couverture arrière sur toutes les autres couvertures. Un déséquilibre de la sorte peut alors être produit par :

- **la salle** Il y a à priori un déséquilibre possible dans la salle du fait de la présence de rideaux derrière et de gradin devant. Mais comme nous l'avons vu dans le paragraphe 3.1., la différence engendrée est minimale et ne dépasse pas les 2dB d'atténuation ou de gain sur les micros.
- **l'instrumentiste** Hannelore aurait elle mentie en annonçant les angles lors de l'enregistrement de ces tests ?
- **le système de prise de son** Malgré un système régulier tous les 72° , on peut tout de même trouvé quelques écart de positionnement des microphones allant jusqu'à 2 cm et 5° , ce qui n'explique pas notre problème.

- le système de reproduction il s'agit de la console, de l'enregistreur, des câbles etc. Néanmoins, l'aspect des résultats ne permet guère une inversion dans les branchements qui n'aurait pas produit une courbe aussi cohérente (Figure 39).
- le système de diffusion Là non plus, il n'y a que trop peu de dérèglement pour engendrer une telle situation.
- l'auditeur L'auditeur devient donc la dernière cause possible du déséquilibre avant / arrière des résultats. Il peut alors soit s'agir d'une caractéristique psychoacoustique de l'audition humaine, qui fait que l'on localise surtout derrière, mais la littérature (et la vie quotidienne) n'en fait pas mention. Cela peut être dû à la position de l'auditeur dans le système de diffusion. En effet, un recul peut créer un certain déséquilibre qu'il serait souhaitable d'étudier. Par ailleurs, à partir du moment où un déséquilibre est produit, les caractéristiques de mon programme comme l'effet de précedence peuvent accentuer ce déséquilibre.

3.2.2. Recul de l'auditeur

3.2.2.1. Incidence sur les paramètres du systèmes

Le système de diffusion est sur un cercle de 2,5 mètres de rayon et centré sur l'auditeur. En changeant de position, l'auditeur se rapproche et s'éloigne des enceintes. Or ce mouvement n'est absolument pas anodin : il crée artificiellement des offsets temporel et de niveaux. Ainsi, en se reculant, le signal sonore issu des enceintes arrières arrivera plus tôt et plus fort alors que celui des enceintes avant sera retardé et atténué (Figure 42). Même si la différence d'intensité est moindre, de l'ordre du décibel pour 40 cm, les retards et avances des signaux est beaucoup plus important : puisque 10 cm sont parcourus par le son en 0,29 millisecondes (Figure 43), on entre très vite dans des considérations psychoacoustiques du phénomène. Le recul de l'auditeur est donc très important dans la perception de la localisation.

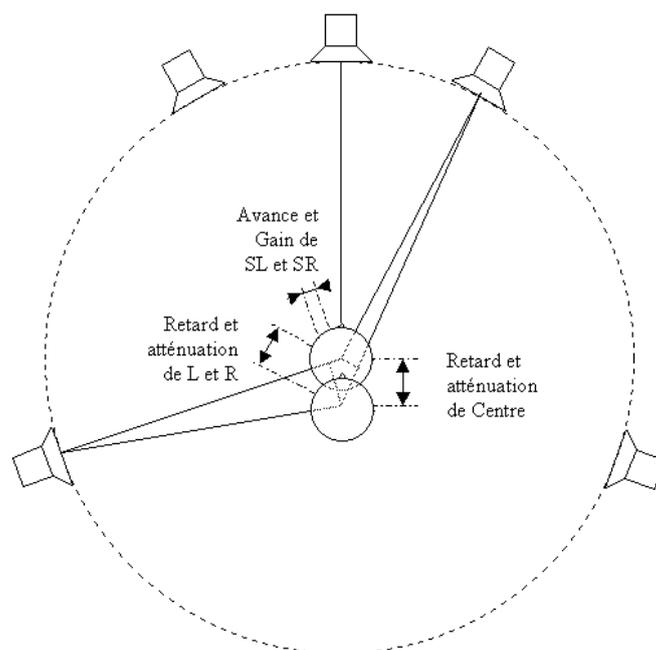


Figure 42 - recul de l'auditeur

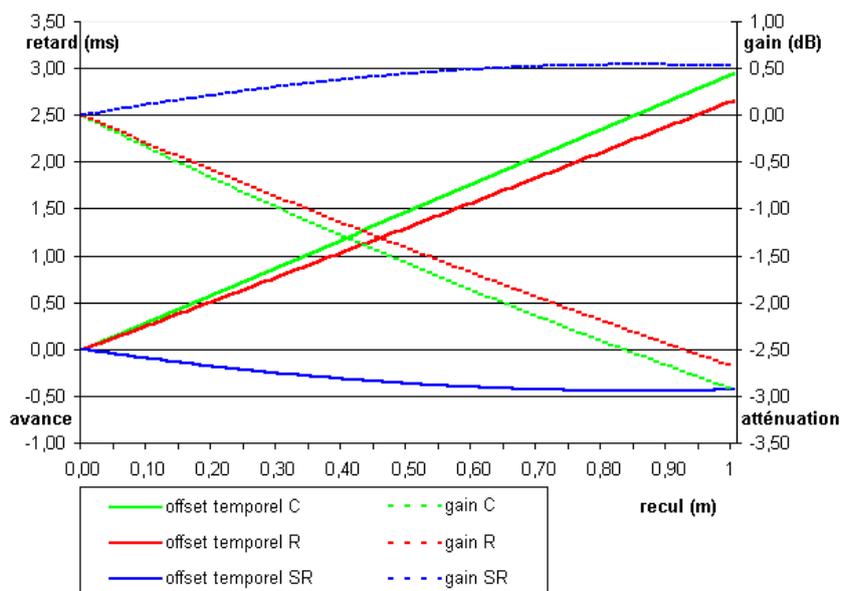


Figure 43 - retard et gain des haut parleurs en fonction du recul

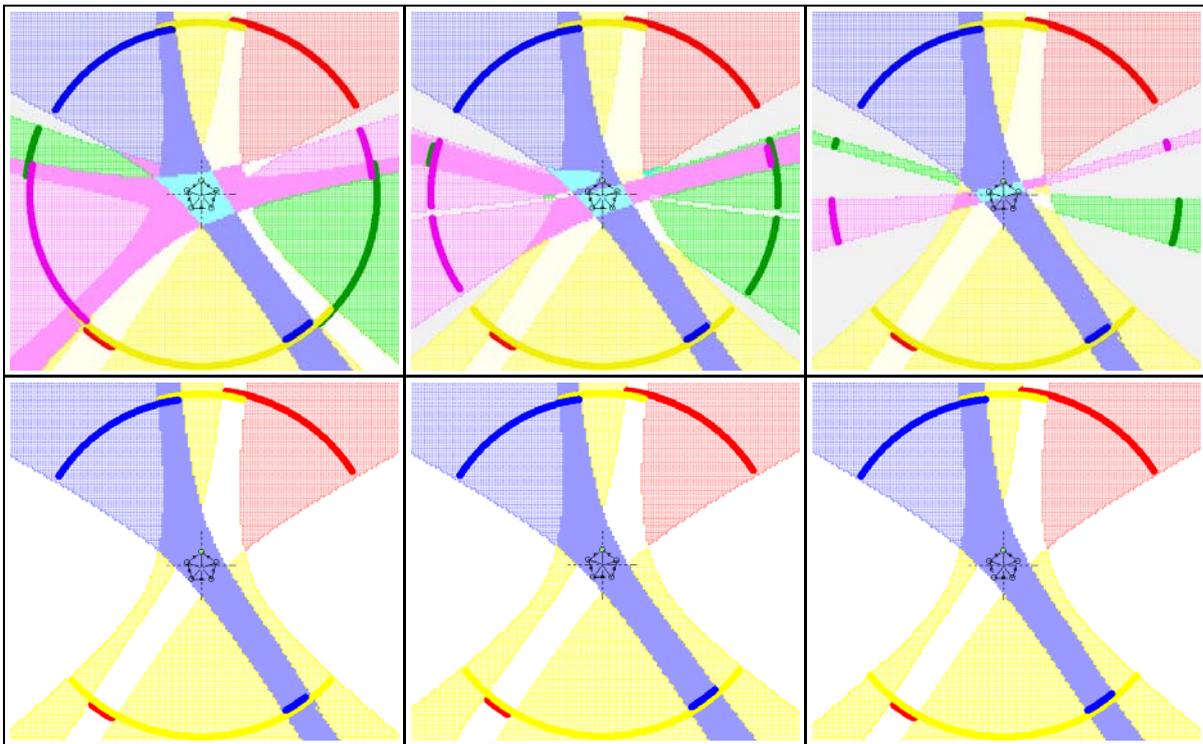
3.2.2.2. Couvertures de prise de son en fonction du recul

Appliquer un offset sur le haut parleur est néanmoins équivalent à l'appliquer sur les micros. Ainsi, on devrait pouvoir retrouver les couvertures de prise de son mesurées de la Figure 41 en employant les offsets décrits par la Figure 43 sur le système.

On obtient alors :

recul	retard* (ms)	atténuation* (dB)	couverture C-R	couverture R-SR	couverture SL-SR
0 cm	C : 0 L-R : 0	C : 0 L-R : 0	10° / 60°	80° / 138°	-14° / 14° -130° / 130°
10 cm	C : 0,39 L-R : 0,35	C : 0,5 L-R : 0,4	8° / 60°	72° / 124°	-14° / 14° -132° / 132°
20 cm	C : 0,77 L-R : 0,69	C : 0,9 L-R : 0,8	8° / 56°	92° / 106°	-14° / 14° -132° / 132°
30 cm	C : 1,14 L-R : 1,03	C : 1,3 L-R : 1,2	8° / 58°	-	-14° / 14° -132° / 132°
40 cm	C : 1,49 L-R : 1,35	C : 1,7 L-R : 1,5	8° / 58°	-	-14° / 14° -132° / 132°
50 cm	C : 1,84 L-R : 1,67	C : 2,0 L-R : 1,9	8° / 58°	-	-14° / 14° -132° / 132°

* l'avance et le gain des micros SL et SR sont ramenés à zéro.



**Figure 44 - évolution des couvertures de prise de son en fonction du recul de l'auditeur
de gauche à droite et de bas en haut : 0 cm de recul, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm**

Au delà de 30 cm de recul de l'auditeur par rapport au système de diffusion (pour un rayon de 2,5m), il n'y a plus de changement des couvertures de prise de son. En effet, la différence de temps entre triplet avant et couple arrière a déjà fait "disparaître" les segments latéraux, et les accroissements des offsets entre le micro centre d'une part et les micro L et R d'autre part restent trop similaire pour déstabiliser les couvertures L et R. Ainsi, le trou sur le côté du système est creusé. Cette zone sans couverture de prise de son sera alors entendue 'collé' à une enceinte. De plus, comme les enceintes avant sont retardées, cette zone sera entendue 'collé' aux enceintes arrières. Le recul est donc suffisant pour expliquer la localisation intempestive sur les enceintes arrières. Néanmoins, les couvertures de prise de son mesurées (Figure 41) ne sont pour autant pas obtenues par un simple recul de l'auditeur.

3.2.3. Autres phénomènes

Ce recul n'explique tout de même pas tout. Ainsi, les couvertures avant sont encore trop larges et celle arrière est encore trop étroite à l'avant. On peut alors modifier quelques valeurs théoriques, comme le temps de masquage, ou rectifier des données du système, comme la directivité des microphones au vu du paragraphe 3.1.

3.2.3.1. Effet de précedence

En augmentant la différence de temps entre triplet avant et couple arrière, on favorise le masquage temporel. On devrait alors, avec un certain recul, masquer complètement les couvertures avant par celle arrière ou tout du moins brouiller la localisation frontal par un repliement de l'avant sur l'arrière. On peut étudier l'effet de précedence cumulé au recul. Sans toucher à la couverture arrière, on remarque un éloignement des couvertures avant.

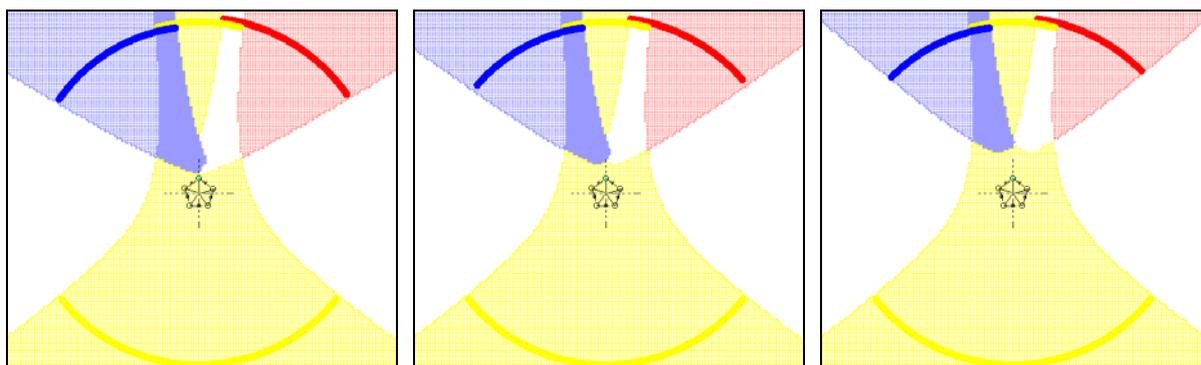


Figure 45 - recul de 40 cm, effet de précedence de 1,2 ms - 1,1 ms - 1 ms
couvertures R : 8°/58° - 8°/50° - 8°/28°

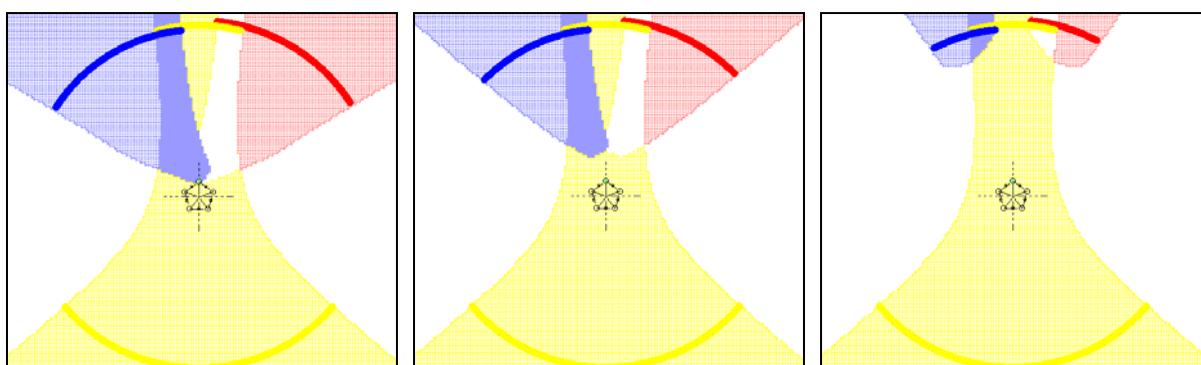


Figure 46- recul de 50 cm, effet de précedence de 1,6 ms - 1,3 ms - 1 ms
couvertures R : 8°/58° - 8°/46° - 8°/28°

Dans le cas extrême, pour un recul de 50 cm et une valeur de l'effet de précedence de 1 ms, on retrouve les couvertures de prise de son gauche et droite de la Figure 41. Par contre, l'effet de précedence n'explique pas la singularité de la mesure à 30°.

3.2.3.2. Directivité

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1., l'existence de réflexions venant du sol modifie l'intensité captée par chaque microphone et ainsi sa courbe de directivité. Pour autant, ces réflexions ne modifient pas la localisation du fait de leur retard, sauf si sont appliqués des offsets temporels suffisamment grands pour combler le retard. Or ici, les offsets appliqués aux microphones avant sont de l'ordre de 1,8 ms alors que le retard des réflexions venant de l'avant du système et capté par les microphones arrières est d'environ 2,8 ms. Par conséquent, on peut dans ce cas considérer les réflexions venant du sol comme utile à la localisation. La directivité équivalente à une directivité cardioïde et prenant en compte les réflexions arrières est pour un facteur de directivité $B=4,2$ (cf. paragraphe 3.1.3.1). On peut néanmoins refaire varier la directivité des microphones afin de vérifier l'hypothèse des réflexions du sol comme signal permettant la localisation. En abaissant le facteur B , on augmente donc le signal perçu à l'arrière des micros, dont le signal direct qui est alors considéré comme la réflexion du sol, puisque cette dernière n'est pas prise en compte dans mon programme. La Figure 48 nous montre l'évolution de la couverture de prise de son en fonction de la directivité des microphones (Figure 47).

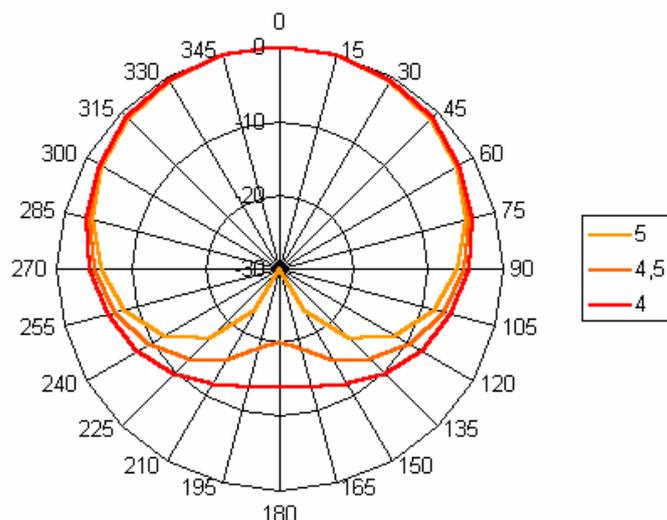


Figure 47 - directivité théorique - cardio (5) à légèrement hypocarديوide (4)

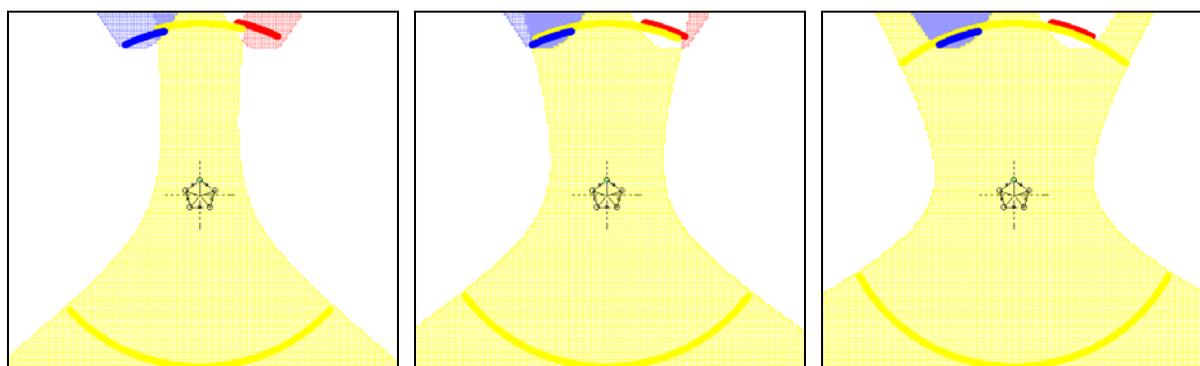


Figure 48 - couvertures de prise de son arrière en fonction de la directivité des microphones :

B=5 -14°/14° et -132°/132° - B=4,5 -25°/25° et -126°/126° - B=4 -40°/40° et -119°/119°

Le problème qui intervient alors est l'accroissement du segment arrière, qui d'après les mesures ne doit pas excéder $-135^{\circ}/135^{\circ}$. On a donc une différence de 15° de part et d'autre, ce qui pourrait venir de la modélisation de la directivité. En effet, la modification à apporter se situe essentiellement à l'arrière de la courbe de directivité. Ainsi, la zone de l'espace de prise de son située en face des microphones arrière est couverte de la même façon, (Figure 48, B=5), et la couverture arrière située à l'arrière reste entre -135° et 135° .

Conclusion

Ces tests, issus du mémoire d'Hannelore Guittet, sont donc très instructifs. On y voit donc que la position de l'auditeur est très important, surtout dans les systèmes utilisant en majeure partie de la différence de temps en localisation, comme c'est le cas avec ce système de prise de son (cardio régulier d'espacement 26 cm entre les capsules). Par ailleurs, l'effet de précedence, alors invisible pour un système de cette taille et sans offset, prend une importance considérable dès l'ajout de retard sur les microphones. Enfin, les considérations sur la directivité du paragraphe 3.1. semble trouver toutes leur places dans ces tests de localisation.

3.3. Données utiles et annexes du programme

Pour conclure mon travail, je vous présenterais en fin de compte les réglages des différents paramètres de MMA Constructor adoptés après toutes ces réflexions. Puis, pour finir, nous ferons un aperçu des différents systèmes multicanaux existants.

3.3.1 Paramètres de MMA Constructor

- masquage temporel 1 ms
- masquage en intensité 15 dB
- atténuation en fonction de la distance bien que ce paramètre ait peu d'incidence, j'ai réglé la distance critique champ proche / champ lointain sur 1,5 m.
- courbes psychoacoustiques de localisation j'ai fait un compromis entre les courbes stéréo de Simonsen modulées par les données multicanal en intensité de G. Theile.

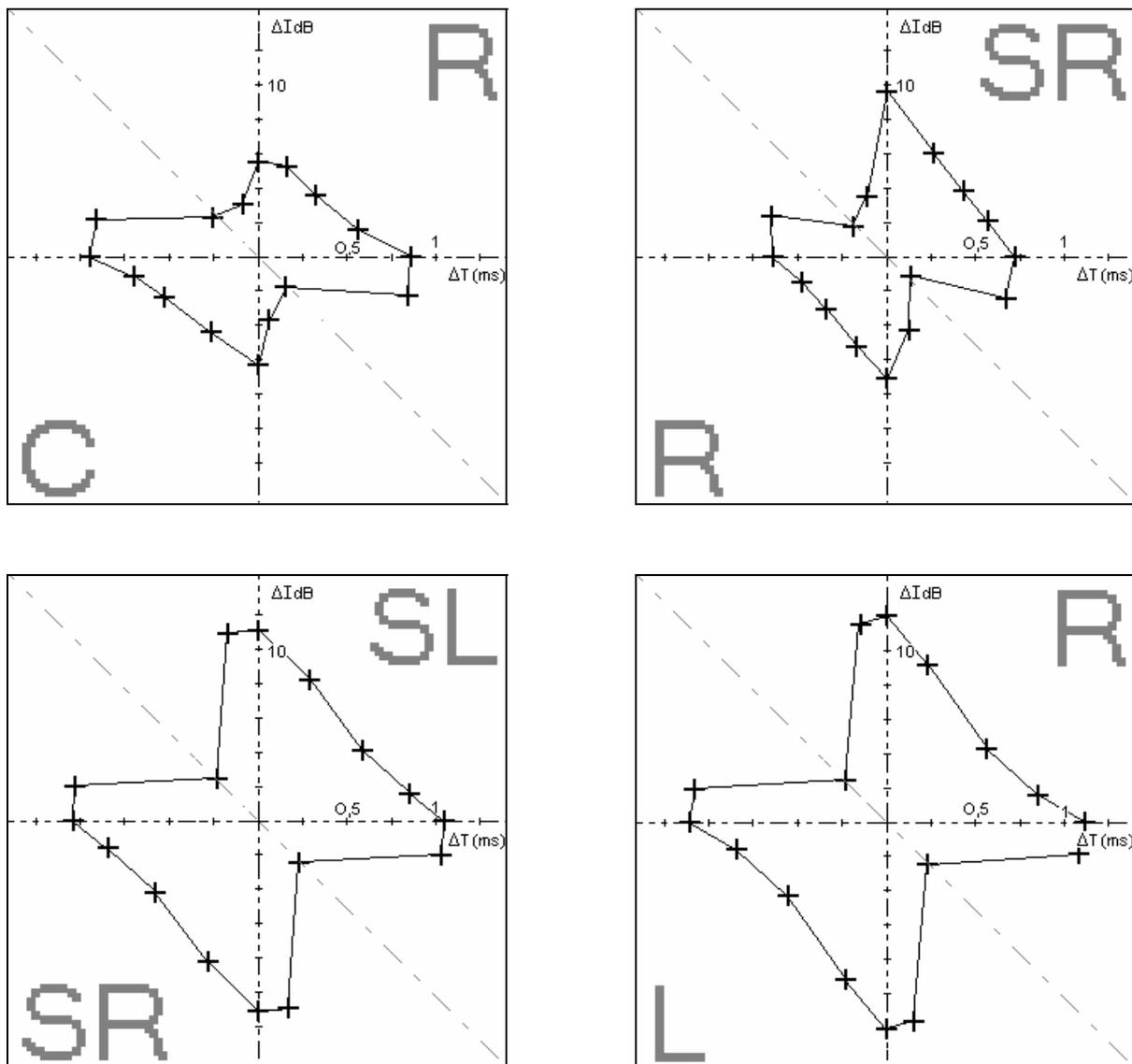


Figure 49 - Courbes psychoacoustiques de localisation selon G. Theile et G. Simonsen

3.3.2. Systèmes connus (et reconnus)

3.3.2.1 Stéréo

	Hugonnet	Sengpiel	Williams	Wittek	MMA Constructor
ab omnis, 50 cm	130°	180°	100°	74°	96°
AB omnis, 100 cm		62°		36°	44°
XY cardios, 90°					116°
ORTF cardios, 17cm, 110°	90°	96°	100°	102°	88°

Figure 50 - couverture de prise de son de systèmes stéréo traditionnels [14] [17] [18] [19] [20]

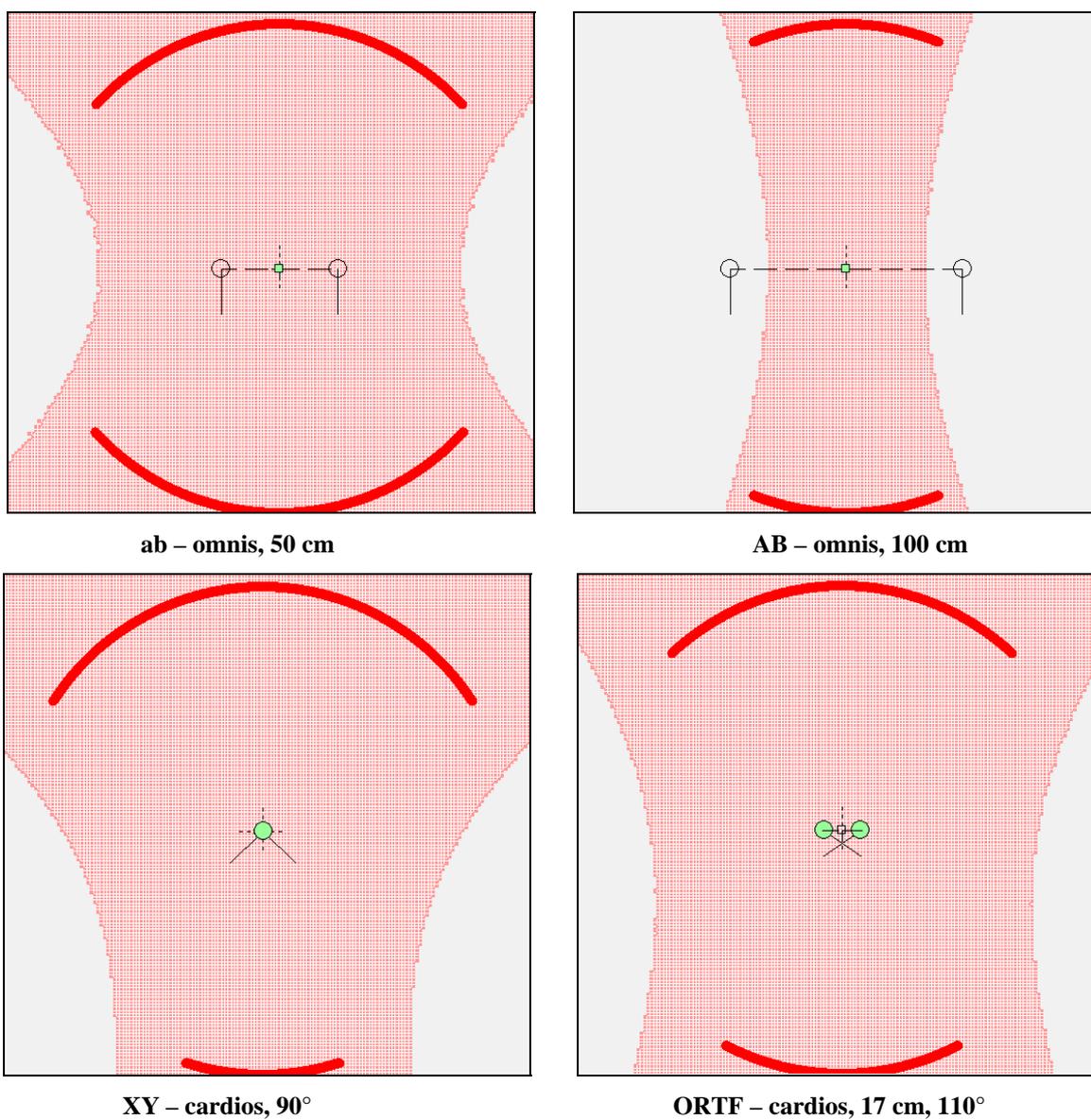
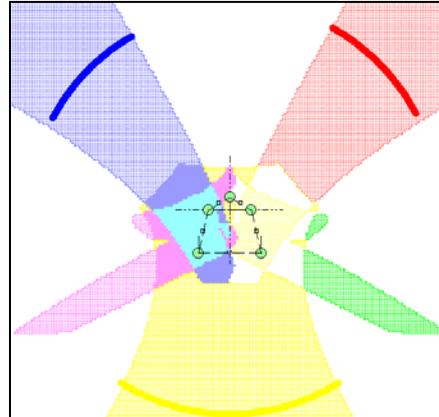
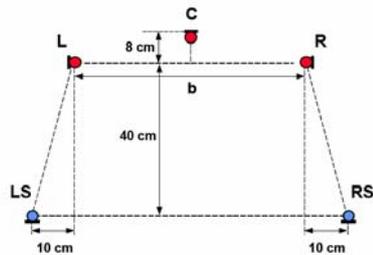


Figure 51 - systèmes stéréo traditionnels, élévation 1 mètre, inclinaison 10°

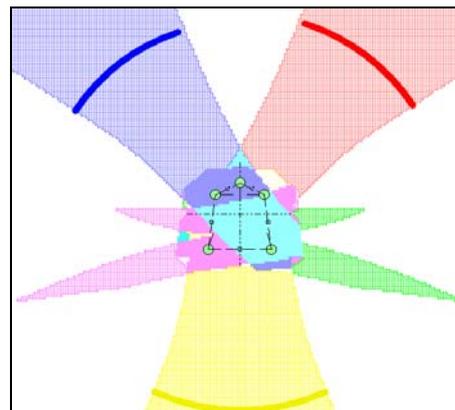
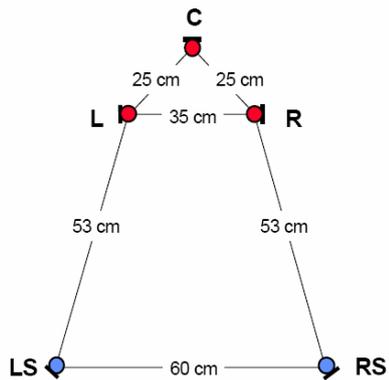
3.3.2.2. Multicanal

Voici quelques systèmes de prise de son parmi les plus connus. On peut remarquer une forte similitude entre ces 3 systèmes, qui est une absence de couvertures de prise de son latérale ainsi qu'un trou au centre, du faite d'un grand écartement entre les couvertures avant.

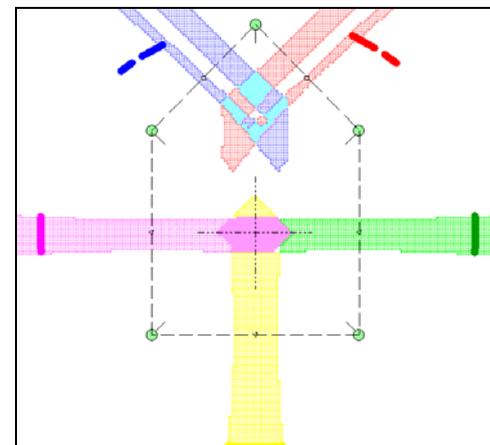
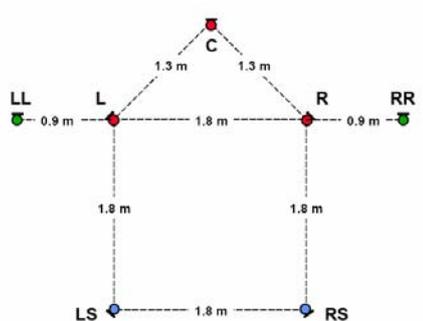
- Surround OCT



- INA 5



- Fukada tree



Conclusion

Le système MMA se compose de 5 microphones pouvant être considérés comme 5 couples juxtaposés, chacun possédant (ou non) une couverture de prise de son. Cette dernière se définit tout d'abord par les différences de temps et d'intensité calculées entre chaque micro de chaque couple. Si le calcul des différences de temps ne pose pas de soucis, celui de l'atténuation en fonction de la directivité en pose du fait de la présence de premières réflexions, notamment celle venant du sol, pouvant entrer en compte dans la localisation en cas d'utilisation d'offsets temporels.

Le principe de masquage en intensité (15 dB) et de masquage temporel (premier front d'onde, 1 ms) permet ensuite de ne garder que les microphones utiles à la localisation pour la zone étudiée. Par ailleurs, ces masquages peuvent s'apparenter à des courbes psychoacoustiques de localisation des couples secondaires du système.

Enfin, ces différences de temps et d'intensité sont interprétées grâce à des courbes psychoacoustiques de localisation afin de déterminer si la zone étudiée appartient à telle ou telle couverture de prise de son. Ces courbes, différentes suivant les couples, n'ont pas bénéficié d'un grand nombre d'études, aussi sont elles encore méconnues en multicanal. Néanmoins, une approche en intensité existe et, en l'adaptant à celle valable en stéréophonie, on obtient d'assez bon résultats au vu des tests effectués.

Pour palier à ce manque de théorie, les différents paramètres de mon programme (masquage, courbes psychoacoustiques...) sont modifiables par l'utilisateur, ceci en premier lieu pour le laisser libre de choisir les modèles existants qu'il préfère, mais surtout pour pouvoir y intégrer ceux à venir. J'ai alors créé un site internet, www.mmaconstructor.free.fr, sur lequel on peut y trouver MMA Constructor, mais aussi tous les documents s'y rattachant, comme par exemple des systèmes de prise de son ou des courbes psychoacoustiques apportés par moi-même et par d'autre qui je l'espère seront nombreux.

Bibliographie

- [1] Williams M., Le Dû G., "Microphone Array Analysis for Multichannel Sound Recording", preprint A-5; convention 107; September 1999
- [2] Chaudiere, Herbert T., "Evaluating Open Plan Acoustics" , Preprint 1013; Convention 51; May 1975, page 6
- [3] Woszczyk, Wieslaw R., "Quality Assessment of Multichannel Sound Recordings", Paper 12-017; Conference: The AES 12th International Conference: The Perception of Reproduced sound; June 1993, page 3 et 17
- [4] Itoh, Ryouusuke; Takahashi, Susumu; Nishimaki, Masao; Hirano, Kouichi, "Characteristics of the Sansui QS Vario-Matrix based on a Psychoacoustic Study of the Localization of Sound Sources in Four-Channel Stereo (Parts I and II)", Preprint 904; Convention 43; September 1972, page 4
- [5] Wallach, Hans; Newman, Edwin B.; Rosenzweig, Mark R., "The Precedence Effect in Sound Localization (Tutorial Reprint)", Volume 21 Number 10 pp. 817-826; December 1973
- [6] Zieglmeier, W.; Theile, G.: "Imaging of lateral sources using the 3/2-stereo format (German)", 19. Tonmeistertagung, 1996, Proceedings , pp. 159 – 169
- [7] Theile, Gunther, "Natural 5.1 Music Recording Based on Psychoacoustic Principals", Paper 1904; Conference: 19th International Conference; June 2001
- [8] Wittek, Helmut; Theile, Gunther, "The Recording Angle, Based on Localisation Curves", Preprint 5568; Convention 112; May 2002
- [9] Theile, G.; Plenge, G., "Localization of Lateral Phantom-Sources", Preprint B-5; Convention 53; March 1976
- [10] Leakey, D. M., 1960: "Further thoughts on stereophonic sound systems". Wireless World, 154-160
- [11] Mertens, H., 1965: "Directional hearing in stereophony theory and experimental verification." Europ. Broadcasting Union Rev. Part A, 92, 1-14
- [12] Brittain, F. H., Leakey, D. M., 1956: "Two-channel stereophonic sound systems." Wireless World 206-210
- [13] Simonson, G., 1984: Master's Thesis. Lyngby, Denmark
- [14] Sengpiel, E., 2002: Informations on website: www.sengpielaudio.com
- [15] ITU-R BS. 775-1 : "Multichannel Stereophonic Sound System With and Without Accompanying Picture", Geneva, 1992-1994.
- [16] Guittet H., "Etude comparative de trois systèmes de prise de son en multicanal", mémoire de fin d'étude du C.N.S.M., Paris, 2005.
- [17] Hugonnet, C., Walder, P., 1998: "Stereophonic Sound Recording". John Wiley & Sons, Chichester, 1998, ISBN 0-471-97487-0
- [18] Williams, M., 1987: "Unified theory of microphone systems for stereophonic sound recording". AES-Preprint No. 2466
- [19] Wittek, H., 2002: "Image Assistant", JAVA-Applet and documentation on website: www.hauptmikrofon.de
- [20] Wittek, H., Theile, G., 2000: "Investigations into directional imaging using L-C-R stereo microphones", 21. Tonmeistertagung 2000 (German), Proceedings ISBN 3-598-20362-4, p.432-454