



INSTITUT
NATIONAL
des SCIENCES
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2008 – 001



Nom des étudiants

Hugo LARCHER

Charlie KOUPPER

Hervé LY-SUNNARAM

Thomas LEFEURE

Si Xian Alvin LOO

Typhaine MAREE

Enseignant(s)-responsable(s) du projet

David HONORE



Système de positionnement par ondes ultra-sonores



À TAILLE
HUMAINE
À L'ECHELLE
DU MONDE

Référence du projet : STPI/P6-3/2008 – 001

Intitulé du projet : Système de positionnement par ondes ultra-sonores.

Type de projet : Expérimental

Objectifs du projet :

L'objectif de ce projet était de réaliser un système permettant de localiser un objet dans le laboratoire en utilisant des ondes ultrasonores grâce à des émetteurs et des récepteurs. Pour cela nous avons dû choisir un repère nous permettant de localiser l'objet dans l'espace mais aussi établir des méthodes afin de pouvoir effectuer une localisation. Nous nous sommes inspirés du GPS (Global Positioning System) qui est un système analogue de positionnement.

N° cahier de laboratoire associé : A30228

Table des matières

1 Aspect Mathématique	9
1.1 Le choix du repère	9
1.1.1 La base tétraédrique	9
1.1.2 La base cartésienne	10
1.1.3 Une base quelconque	11
1.1.4 Notre choix	11
1.2 La procédure Maple	12
2 Construction du repère cartésien	12
2.1 Les Matériaux Utilisés	12
2.2 Principe	12
2.3 Orientation des émetteurs	13
2.4 Les trois axes	13
2.5 Communication avec le système de commandes	15
2.6 Récepteur	15
2.7 Vérification	16
3 Dispositifs Ultrasons	16
4 Méthode d'acquisition	17
4.1 Les différentes méthodes	17
4.2 Description du dispositif retenu	18
4.3 Protocole de mesure	18
4.4 Traitement du signal	20
5 Electronique et synchronisation	21
6 Traitement des mesures	23
6.1 Régression sur nos mesures	23
6.2 Imprécisions - Intervalle de confiance	25
7 Résultats	26
8 Conclusions	28
9 Perspectives pour la poursuite de ce projet	28
A Programme Maple	30

B	Résolution manuelle des systèmes d'équations	32
B.1	Equations dans le tétraèdre régulier	32
B.2	Equations dans le repère cartésien	32
C	Fiche technique émetteur/récepteur US	34

Introduction

Au cours de notre projet de physique, nous avons étudié le positionnement local par ondes ultrasonores. Le but de ce projet était de réaliser un système permettant de localiser un objet dans le laboratoire en utilisant des émetteurs et des récepteurs à ultrasons.

Ce système de localisation repose sur le même principe que le GPS (Global Positioning System), mais à une échelle beaucoup plus restreinte et est donc plus simple.

Nous avons pu lors de ce projet réutiliser nos connaissances acquises lors des deux UV de travaux pratiques de physique (P6-1 et P6-2), sur les émetteurs et les récepteurs à ultrasons et même les approfondir. Comme pour tout projet, nous avons dû nous organiser et surtout nous répartir le travail afin d'être les plus efficaces possible.



Dans un premier temps, nous expliquerons, donc, en détail notre organisation interne.

Nous mettrons ensuite l'accent sur la réalisation de notre projet, les difficultés que nous avons rencontrées et les résultats que nous avons réussi à obtenir.

Enfin nous concluons ce dossier par un bilan sur les résultats que nous avons obtenus, sur ce que ce projet nous a appris individuellement et sur les améliorations pouvant être apportées dans le futur à notre projet.

Méthodologie - Organisation du travail

Dès les premières séances de ce projet, nous nous sommes rendus compte que nous ne pourrions pas travailler efficacement à six sur la même expérience ou sur le même matériel. Nous avons donc essayé de nous répartir le travail le plus possible en découpant notre projet en plusieurs tâches indépendantes que chacun en a effectué selon ses préférences, ses compétences et la quantité de travail qu'elles demandaient.

Comme tous les groupes, nous devions tenir à jour un cahier de laboratoire. Nous avons décidé d'y écrire tout ce que nous faisons lors de chaque séance afin de ne rien oublier par la suite et de pouvoir rédiger plus facilement notre dossier. Nous avons commencé à nous organiser à partir de ce cahier. Ainsi une personne a été chargée de rédiger chaque semaine ces compte-rendus et de les faire vérifier par les autres pour éviter les erreurs, en leur envoyant par courrier électronique. Alvin a choisi de les recopier dans le cahier ensuite car, étant non francophone, la recopie de ces comptes rendus l'aidait à mieux comprendre notre projet.

Ensuite, nous avons étudié notre sujet et découpé en sous problèmes assez facilement. Nous avons une partie mathématique afin de choisir un repère dans l'espace et de calculer des incertitudes de nos mesures, une partie de construction de ce repère en découplant. Il y avait aussi une partie évidente sur la détermination d'une distance entre un émetteur et un récepteur avec le problème de l'amplification du signal et aussi une partie sur la recherche d'un moyen pour réussir à obtenir notre mesure en trois dimensions en une seule fois(problème de l'automatisation de la mesure).

Une fois les différentes sous parties de notre sujet établies, nous nous sommes répartis le travail en essayant d'équilibrer la charge de chacun entre travail personnel entre chaque séance et travail à fournir lors de celle-ci.

Nous sommes donc arrivés à la répartition suivante dans notre travail, chaque rôle n'étant bien sûr pas cloisonné et chacun s'informant sur l'avancée globale du projet :

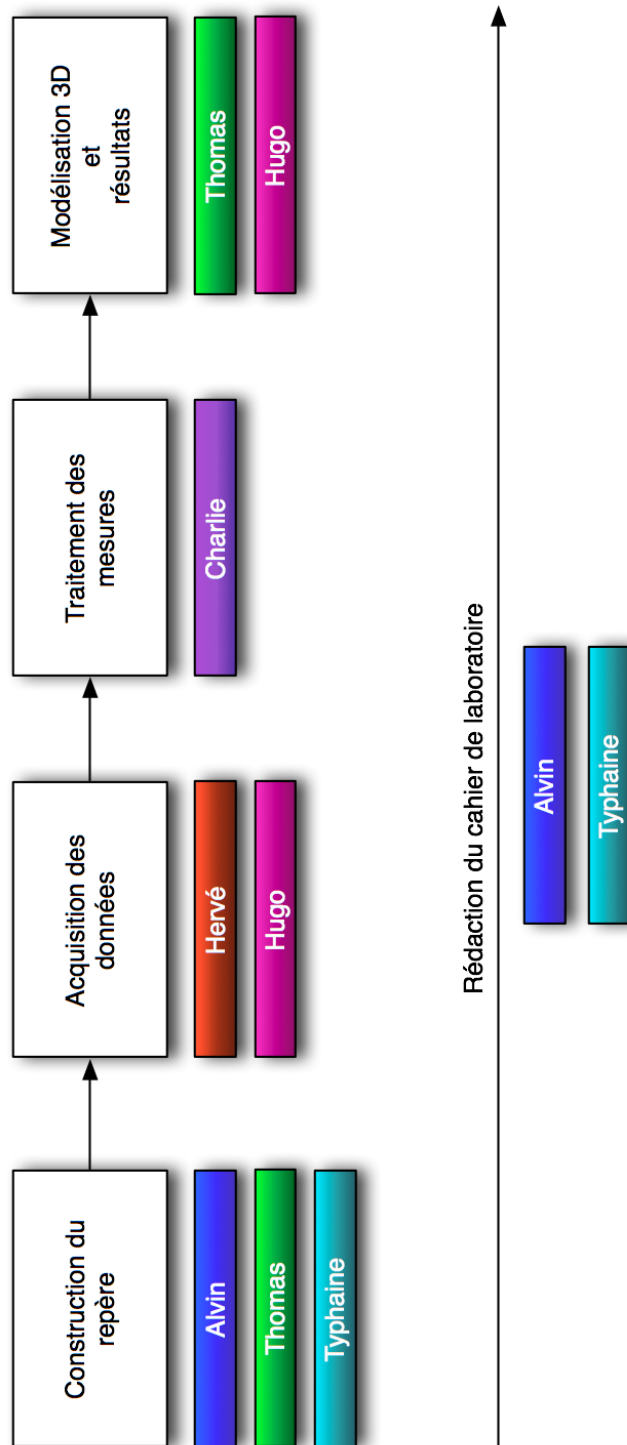


FIG. 1 – Organisation du travail

Travail réalisé et résultats

1 Aspect Mathématique

Le principe est très simple à partir de mesures de distances, il s'agit de localiser un point dans l'espace. Pour le localiser, nous utiliserons les coordonnées cartésiennes. De manière théorique, le fait de connaître la distance d'un point à un autre nous permet simplement dans l'espace de définir une sphère. Le point pouvant se situer sur n'importe quel point de la sphère.

Si on ajoute une nouvelle distance à un autre point, nous avons anticipé deux possibilités. Soit l'intersection des deux sphères forme un cercle, soit elle définit un point. Les chances de former un point étant minimale et comme un point est aussi un cercle de rayon infinitésimal, nous nous sommes basés uniquement sur le cercle.

Le fait d'ajouter un troisième point nous donne une nouvelle sphère, dont l'intersection avec les précédentes nous fournit deux points. Il s'agit en fait de la racine d'un polynôme de degré 2. Cette racine correspondant aux coordonnées d'un point est théoriquement réelle. Nous avons donc deux racines distinctes ou une racine double.

Enfin, l'ajout d'un quatrième point permet d'obtenir une meilleure précision et permet de définir un volume où le point se trouve.

Pour toute cette partie, on suppose qu'on a mesuré r_1, r_2, r_3 et r_4 expérimentalement et que la position du point est notée x, y, z dans le repère cartésien. a correspond à la distance de l'émetteur à l'origine du repère.

1.1 Le choix du repère

Tout d'abord, avant de commencer à mettre en place une structure, il a fallu choisir quel repère était le meilleur. Trois possibilités se sont alors affrontées. Nous avons par la suite pesé les avantages de chacune des solutions en prenant en compte ses inconvénients pour obtenir le meilleur compromis.

1.1.1 La base tétraédrique

Description La base tétraédrique se base sur quatre triangles équilatéraux. On place donc chaque émetteur aux sommets des triangles équilatéraux.

Chaque sommet se trouve donc à égale distance des trois autres sommets.

Avantages L'avantage le plus intéressant est le fait que les distances sont minimales à l'intérieur du tétraèdre. En effet, chaque distance à un point est minimale par rapport aux sommets de la base. Ceci peut être intéressant dans le cadre d'un signal très faible, illisible dès que la distance augmente un peu. De plus, l'angle solide dont le récepteur doit capter est le plus faible possible dans la mesure où il doit capter un cône formant un angle de 30° . L'angle solide est lui aussi très intéressant : on a un angle qui fait $\arccos(\frac{23}{27}) \approx 0,551286$. Nous ne pouvons pas avoir mieux.

Inconvénients Le principal inconvénient réside dans le fait que cette base est relativement difficile à mettre en place, en effet, il faut former des angles d'exactly 60° ce qui est assez malaisé. De plus, les équations sont assez compliquées, et le fait de faire de nombreux calculs augmente notre erreur.

Equations

$$x = \frac{a^2 + r_3^2 - r_2^2}{2a}$$

$$y = \frac{\sqrt{3}}{6} \frac{a^2 + r_3^2 - 2r_1^2 + r_2^2}{a}$$

$$z = \frac{1}{2\sqrt{5}} \left(\frac{19}{6}a^2 - \frac{3}{2}(a^2 + r_3^2 - r_2^2 - r_1^2 + 2r_4^2) - \frac{\sqrt{3}}{2}(a^2 + r_3^2 - 2r_1^2 + r_2^2) \right)$$

1.1.2 La base cartésienne

Description La base cartésienne consiste à placer un récepteur sur chaque axe. Ainsi, on positionne pour cette base un émetteur sur l'axe O_x , sur l'axe O_y , sur l'axe O_z et à l'origine du repère.

Avantages Elle est très simple à mettre en place, puisqu'il faut que chaque récepteur forme un angle droit. On peut aussi visualiser concrètement le domaine d'observation, un mètre cube. Les équations sont les plus simples possibles, ce qui limite notre erreur. De plus, comme nos récepteurs sont assez directifs, on a un champ de 90° qui est raisonnable. Du côté de l'angle solide, nous avons le résultat bien connu de $\frac{\Pi}{2}$, ce qui est plutôt correct.

Inconvénients Les distances à mesurer sont plus importantes que dans le repère tétraédrique, la précision est donc moins importante et les risques d'erreur sont légèrement plus grands.

Equations

$$x = \frac{a^2 - r_2^2 + r_1^2}{2a} \quad (1)$$

$$y = \frac{a^2 - r_3^2 + r_1^2}{2a} \quad (2)$$

$$z = \frac{a^2 - r_4^2 + r_1^2}{2a} \quad (3)$$

1.1.3 Une base quelconque

Description On peut aussi se demander pourquoi ne pas tout simplement placer n'importe où les récepteurs puis après effectuer un changement de repère.

Avantages La base peut être n'importe où, on peut donc même se permettre d'utiliser un seul récepteur mobile qui effectue les quatre mesures. Cette base est la moins rigide et permet de choisir à chaque fois sa base pour localiser le point.

Inconvénients Les équations sont très compliquées. En effet, pour faire un changement de repère, il suffit d'utiliser une matrice de passage pour revenir en coordonnées cartésiennes. Mais le gros problème est de déterminer les équations à résoudre pour localiser le problème. En effet, il est très difficile de passer des distances que l'on mesure aux coordonnées dans le repère. En effet, pour schématiser, on pouvait utiliser le théorème de Pythagore dans une base orthonormale, alors que dans ce cas, c'est la formule d'Al Kashi qu'il faut utiliser. Or, dans cette formule, nous avons des cosinus qui interviennent, ce qui rend les équations très difficiles à résoudre. On passe d'un système linéaire à un système comportant en plus des cosinus et produits. Nous n'avons pas pu déterminer d'équations pour définir le système.

1.1.4 Notre choix

En fin de compte, nous avons décidé d'utiliser la base orthonormale pour plusieurs raisons. Tout d'abord d'un point de vue technique car nous avons trouvé un moyen simple et très fiable de former cette base et de placer les

récepteurs à une distance très précise. De plus, la distance pour prendre les mesures est considérablement augmentée grâce à l'amplification, donc la distance minimale n'est plus un critère majeur.

1.2 La procédure Maple

Notre but initial était de créer une procédure prenant en paramètres les valeurs récupérées expérimentalement, c'est à dire le décalage en temps entre l'émission d'un train d'onde et sa réception par le capteur. Il fallait aussi y appliquer immédiatement les résultats de la régression linéaire¹.

Ensuite, nous avons utilisé la librairie Geom3D pour définir les différents points. Nous avons de plus créé des polygones à partir des quatre points calculés et nous les avons affichés dans un espace 3D. Ceci définit un volume dont nous avons défini le centre de gravité et le volume. Cette figure définit où se trouve le point.

Au final, il suffit de rentrer les quatre distances dans l'ordre pour que le programme renvoie en sortie toutes les données. Nous utilisons les parties réelles car il est possible que les solutions de certaines équations soient complexes à cause des erreurs de mesures.

2 Construction du repère cartésien

2.1 Les Matériaux Utilisés

- 3 bancs optiques gradués
- 4 émetteurs et récepteurs ultrasonores
- 5 supports optiques
- 1 grand bloc de polystyrène
- 2 plats en bois de même épaisseur que celui des supports optiques servant de cales
- 1 pupitre (de musique)
- Scotch

2.2 Principe

L'idée est de placer les 4 émetteurs afin qu'ils forment un repère ortho-normé dans un volume d'un mètre cube et qu'ils puissent émettre les signaux

¹Cf. section 6

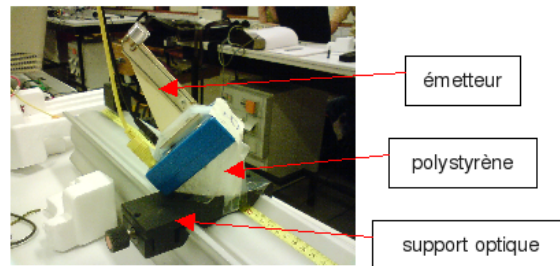


FIG. 3 – Fixation d'un émetteur

partout à l'intérieur de ce cube. Un récepteur doit pouvoir être situé sur une position de manière immobile dans ce cube pour qu'on puisse déterminer ses coordonnées. Ces émetteurs et récepteurs sont alors connectés directement aux oscilloscopes.

2.3 Orientation des émetteurs

Comme les émetteurs émettent les signaux selon un angle restreint, il faut orienter ceux-ci vers le centre du cube afin de limiter les zones non couvertes.

À l'aide d'une scie et d'une équerre, un grand bloc de polystyrène est coupé pour avoir une inclinaison de 45 degrés. Puis, il est divisé en 4 et chacun est relié avec un émetteur en utilisant le Scotch. Cet ensemble est fixé sur un support optique (3 émetteurs) et ou sur un plat en bois (1 émetteur) et il fait un angle de 45 degrés avec le coté de ceux-ci. Le support optique sert à attacher l'émetteur sur les bancs optiques.

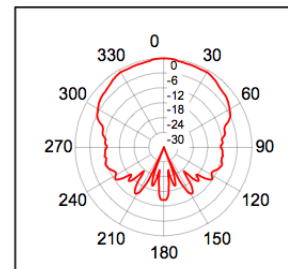


FIG. 2 – Angle d'émission des émetteurs

2.4 Les trois axes

Trois bancs optiques gradués sont reliés par des supports optiques et des vis. Comme les axes ne sont pas au même niveau par rapport à l'horizontale à cause des supports optiques les reliant, l'extrémité des axes x et y est attachée avec ces mêmes supports optiques afin de compenser ce décalage. Quant à l'axe z, il repose sur un socle en bois.

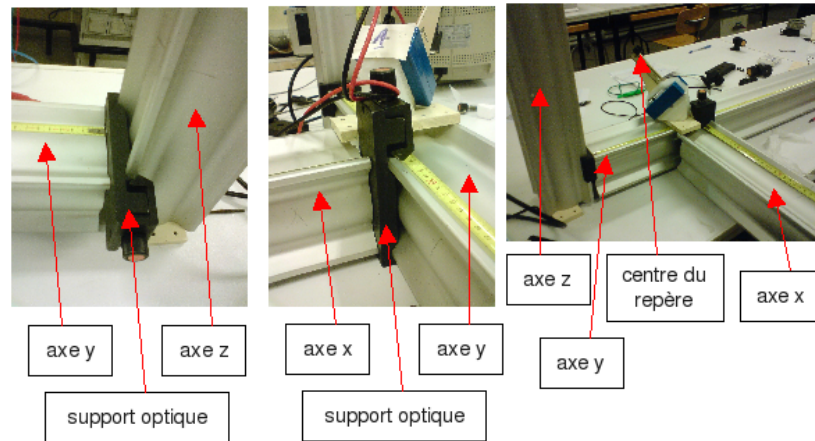


FIG. 4 – Disposition des axes

L'émetteur avec le socle en bois est placé sur le centre du repère, tandis que les trois autres sont chacun fixés sur les bancs optiques. On remarque qu'à cause du positionnement des émetteurs, l'origine du repère n'est pas sur le zéro des bancs optiques gradués. Les positions des bancs doivent être décalées. Puisque les signaux sont émis à partir de la tête de ces émetteurs, on doit assurer que la distance entre les têtes soit un mètre et qu'elles forment des axes orthonormés.

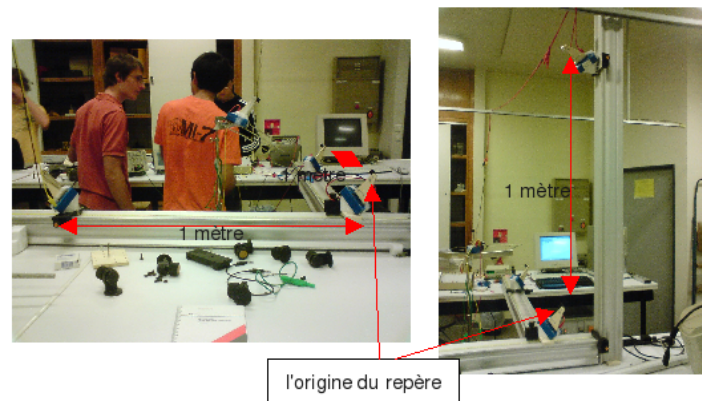


FIG. 5 – Repère cartésien de travail

2.5 Communication avec le système de commandes

Pour relier ces émetteurs avec les oscilloscopes, nous avons dû utiliser le matériel du laboratoire et connecter bout à bout des fils utilisés en TP².

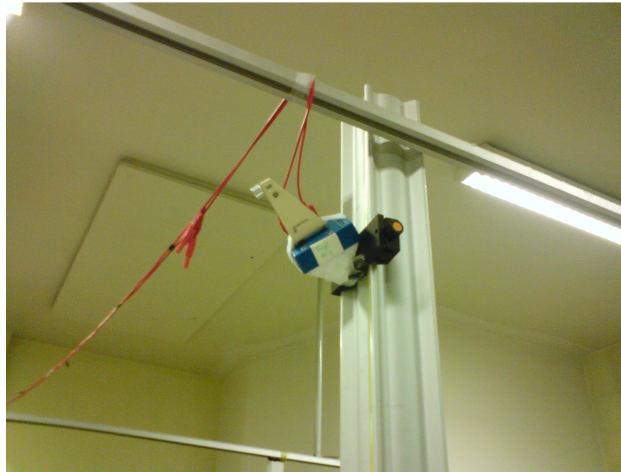


FIG. 6 – Câblage

2.6 Récepteur

Nous avons collés le récepteur modélisant l'objet sur un pupitre de musique pour qu'il puisse être facilement déplacé et pivoter à 360 degrés. Sa liberté de mouvement assure qu'il peut capter les signaux de tous les émetteurs. Par contre, son changement d'orientation modifie sa position de plusieurs centimètres ce qui a augmenté l'incertitude de nos mesures.

Pour être plus précis, nous avons une incertitude très importante verticalement dans la mesure où nous remontons le récepteur de dix centimètres pour prendre la mesure de l'émetteur situé sur l'axe Oz. Cette incertitude est beaucoup plus faible horizontalement car le pupitre pivote exactement sur son axe de rotation. C'est la raison pour laquelle le tétraèdre, fourni par Maple représentant le volume où se situe l'objet, est étiré sur l'axe Oz et que la coordonnée verticale du centre de gravité a une valeur légèrement supérieure à celle mesurée (de l'ordre de 3 cm).

²Lesquels sont d'ailleurs non-blindés et forment de parfaites antennes ...

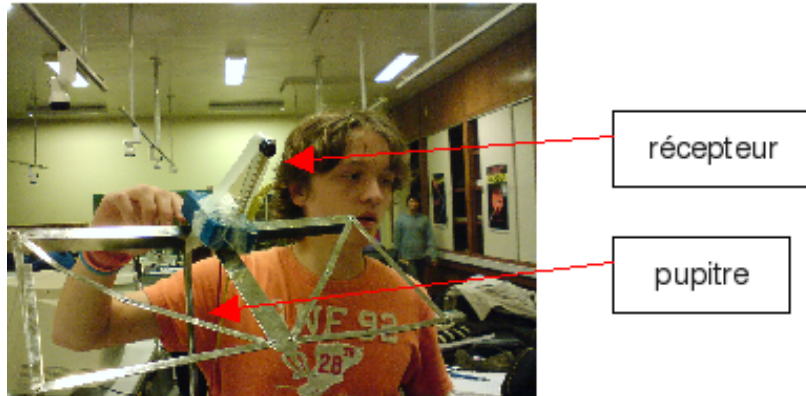


FIG. 7 – Pupitre permettant d’orienter le récepteur

2.7 Vérification

1. 90° entre les axes avec une équerre. Le serrage des supports optiques assure la perpendicularité des axes.
2. L’angle par rapport à l’horizontale, ou par rapport à la verticale (pour l’axe z), est vérifié avec un niveau à laser.
3. Distance entre les têtes des émetteurs, vérifié à la règle.

3 Dispositifs Ultrasons

Nous avons utilisé dans ce projet des récepteurs et émetteurs à ultrasons. Les ultrasons possèdent une fréquence acoustique supérieure aux fréquences audibles par l’oreille humaine, c’est-à-dire supérieure à 20kHz.

Les émetteurs et récepteurs ultrasons mis à notre disposition avaient une fréquence de résonance à 40kHz. Ainsi, le générateur basse-fréquence a été réglé de telle sorte que sa fréquence avoisine la fréquence de résonance des émetteurs. En effet, plus on s’approche de cette fréquence et plus l’amplitude du signal émis est élevée. De même en ce qui concerne le récepteur, l’amplitude reçue sera d’autant plus optimale que la fréquence du signal reçu est proche de la fréquence de résonance du récepteur.

Il est à noter que ces dispositifs ultrasonores possèdent un angle d’émission et de réception, de l’ordre de 120° d’après la fiche technique. Il s’est avéré après expérience que cet angle est limité à 45° . Cette restriction a été très

contraignante lors de la construction de notre système de positionnement et provoque des approximations supplémentaires. En effet, lors des acquisitions de temps de parcours à l'oscilloscope, nous avons dû faire pivoter le récepteur sur sa base afin qu'il soit aligné avec l'émetteur. Si nous n'effectuions pas cette opération, le signal reçu devenait inexploitable.

Nous avons essayé de palier à ce problème en soudant 3 têtes réceptrices pour capter les signaux dans toutes les directions sans déplacer l'objet. Cependant, les têtes réceptrices renvoyaient un signal déphasé dû à l'impédance et donc inexploitable. De plus d'après la fiche technique, la sensibilité des récepteurs diminue avec la résistance (laquelle augmente lorsqu'on les ajoute en série).

4 Méthode d'acquisition

4.1 Les différentes méthodes

Dans le premier temps de mise en place de notre système, nous avons essayé d'acquérir et de traiter le signal reçu par le récepteur sur ordinateur via Synchronie. Nous avons passé de nombreuses semaines à tenter de régler correctement les paramètres d'acquisition et les capteurs. Toutes nos mesures se sont révélées aberrantes. Le signal que nous traitions était quasi inexploitable, parsemé de bruits divers. Nous présageons que le signal était fortement pollué par la capture d'ondes ambiantes de fréquence inférieure.

De plus nous nous sommes aperçus que la fréquence d'échantillonnage des cartes d'acquisition Eurosmart était largement insuffisante pour obtenir la précision requise.

Nous avons donc fini par décider de renoncer à une acquisition ordinateur malgré tout le confort de traitement qu'elle nous offrait. En se tournant vers une plus classique méthode de traitement à l'oscilloscope, nous étions sceptiques vis à vis de ses capacités en terme d'analyse de temps, de "mesure fixe", c-a-d de confort et de précision dans nos mesures. Toutefois, il s'est avéré qu'au contraire nous arrivions à obtenir des signaux exploitables.

Nos mesures à l'oscilloscope, réalisées entre le 14 mai et le 13 juin, nous ont apporté des résultats tout à fait satisfaisants.

4.2 Description du dispositif retenu

Le dispositif d'acquisition forme un cube de $1m$ de coté où 4 émetteurs sont disposés sur 4 coins. Les coins les plus éloignés sont reliés avec des rallonges filaires aux oscilloscopes.

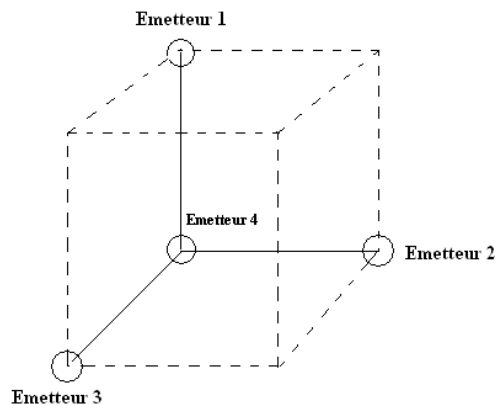


FIG. 8 – Cube délimitant le volume de l'expérience

Il est à signaler que, faute de matériel adéquat, ces rallonges sont constituées de quelques fils qui ont été branchés les uns sur les autres. Du fait de leur non-isolation, il a été constaté que les fils généraient des champs électromagnétiques responsables de bruit assez importants lors des acquisitions par oscilloscope. De plus, n'ayant pas d'interrupteur « simple », nous avons du utiliser deux fils que l'on mettait en contact pour faire circuler le courant dans le dispositif durant toutes les séances sauf la dernière où nous avons pu obtenir un interrupteur bouton.

4.3 Protocole de mesure

L'acquisition se déroule en 3 temps : nous branchons l'émetteur choisi à l'oscilloscope et au GBF. L'oscilloscope possède deux entrées : une servant à observer le signal en provenance du récepteur et l'autre servant à déclencher l'acquisition pour déterminer l'intervalle de temps entre l'émission du signal et la réception. Il est réglé pour que l'acquisition se fasse sur un intervalle de temps $5ms$.

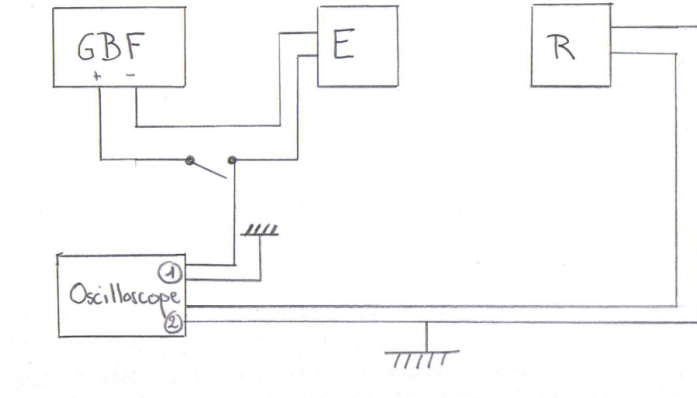


FIG. 9 – Montage général de la manipulation - **R** : récepteur ; **E** : émetteur ; **Entrée 1 Oscilloscope** : entrée déclencheuse ; **Entrée 2 Oscilloscope** : activité du récepteur

Grâce à notre interrupteur, nous déclenchons une bouffée d'onde en fermant le circuit. A un certain seuil, cette bouffée démarre l'acquisition qui enregistre l'activité du récepteur. Ce déclenchement doit souvent s'effectuer plusieurs fois pour être sûr d'avoir obtenu le temps recherché. En effet, le signal reçu n'est souvent pas très distinct aux vues de l'interrupteur utilisé.

Finalement, une fois l'acquisition faite, il faut déterminer le moment, c'est à dire l'endroit sur la bouffée, qui correspond au seuil de déclenchement. Cette dernière étape provoque une approximation sur le temps recherché car il est souvent très difficile de déterminer l'instant exact qui correspondrait au déclenchement.

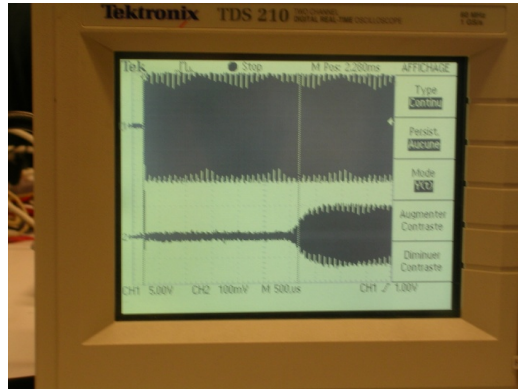


FIG. 10 – Exemple de lecture sur oscilloscope

La différence de temps entre le début de l'acquisition et le temps représentant l'arrivée de la bouffée nous donne le temps mis par la bouffée d'onde pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Ces opérations sont effectuées une fois sur chaque émetteur. Entre chaque acquisition, il faut s'assurer que l'émetteur et le récepteur soient bien alignés pour obtenir un signal reçu optimal.

Une fois toutes les acquisitions faites, nous n'avons plus qu'à entrer ces données dans le programme fait sur Maple pour obtenir un tétraèdre où se situe potentiellement le récepteur.

4.4 Traitement du signal

Dès la première séance, nous avons décidé qu'un montage amplificateur serait nécessaire après avoir observé la décroissance d'amplitude du signal reçu en fonction de la distance.

Nous avons donc utilisé un montage amplificateur non inverseur, schématisé ci-dessous.

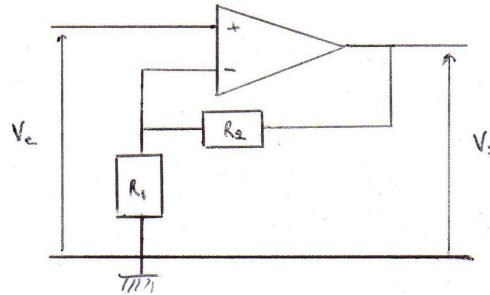


FIG. 11 – Montage amplificateur non inverseur

La tension en sortie est :

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_e \quad (4)$$

5 Electronique et synchronisation

Une fois le protocole minimal mis en place nous avons cherché à le simplifier afin de rendre le processus de localisation plus automatisé et donc plus rapide. Comme expliqué précédemment nous ne pouvions pas émettre simultanément un signal sur chacun des émetteurs : ceux-ci étant tous à une fréquence de 40kHz, ils ne seraient pas discernables. Ce constat nous a donc amené à réfléchir à un montage électronique capable d'envoyer des bouffées à la fréquence désirée successivement sur chacun des émetteurs.

Nos premières recherches nous ont orienté sur l'utilisation de lignes à retard. Ces petits composants électroniques utilisés dans la vidéo SECAM permettent de retarder l'arrivée d'un signal d'un délai défini³. Nous avons donc pensé en connecter en série afin d'émettre un unique signal arrivant sur chaque récepteur avec un décalage. Malheureusement les lignes à retard sont d'une part rares à trouver et d'autre part soumises à un phénomène de dispersion. Il aurait donc fallu utiliser des dispositifs de conversion analogique/numérique faisant appel à des compétences que nous n'avons pas.

³De quelques nanosecondes à quelques millisecondes

PIN CONFIGURATION

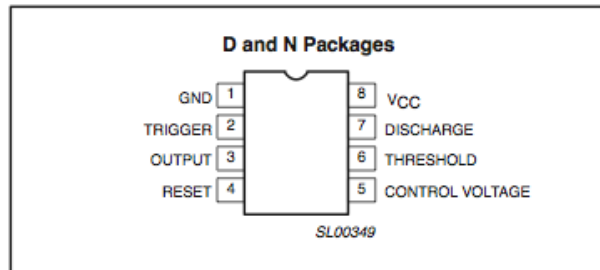


FIG. 12 – Disposition des broches du NE555

La solution fut donc d'utiliser un composant électronique simple : le NE555. Ce composant à bas prix possède deux modes de fonctionnement : astable et monostable. En fonctionnement astable celui-ci se comporte comme un générateur de créneau de fréquence réglable tandis qu'en fonctionnement monostable il se comporte de façon analogue à un interrupteur temporisé. La fiche technique du composant nous a aussi confirmé que celui pouvait fournir de hautes fréquences jusqu'à 500kHz.

Le principe est donc le suivant : une première impulsion est fournie par l'opérateur à l'aide d'un bouton poussoir ce qui active le premier NE555 délivrant une tension de 5V dans un second NE555 en astable générant une bouffée de 40kHz vers le premier émetteur. Une fois le temps défini atteint le NE555 ouvre le circuit : le NE555 en astable s'arrête tant qu'un troisième NE555 se déclenche sur le front descendant. Ce montage serait alors chaîné afin d'alimenter les 4 récepteurs successivement.

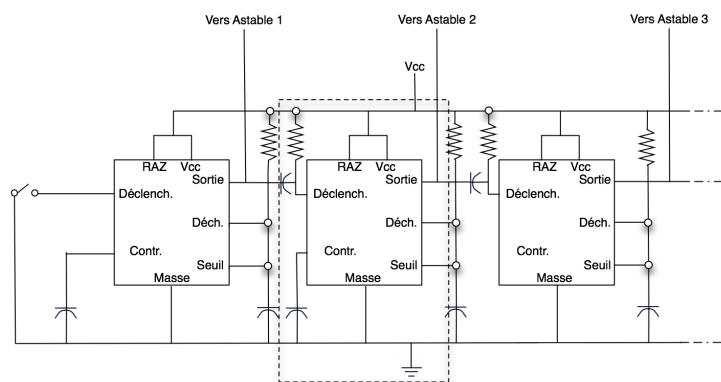


FIG. 13 – Montage des NE555 en série

On obtient donc l'allumage successif des 4 émetteurs envoyant chacun

une bouffée de durée déterminée. Nous n'avons malheureusement pas pu finaliser le montage, le laboratoire de physique ne disposant pas du nombre de NE555 nécessaire. Nous avons par contre pu réaliser le montage d'allumage séquentiel avec 2 NE555, lequel fonctionne parfaitement conformément au schéma 14.

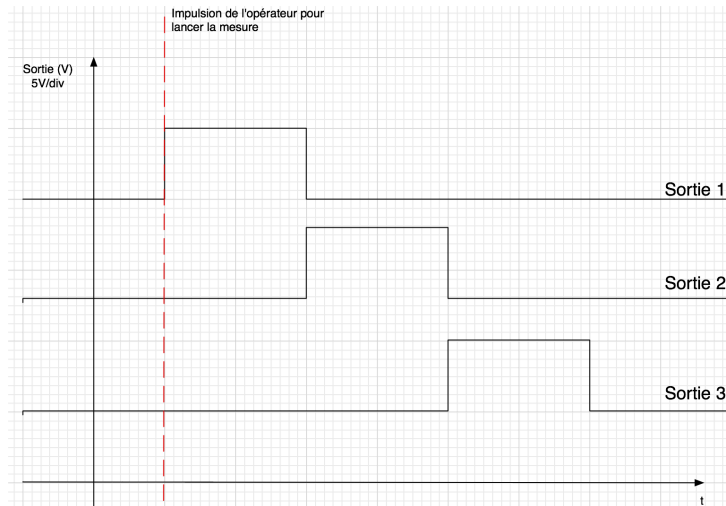


FIG. 14 – Réponse temporelle du montage à un Dirac créé par l'opérateur

6 Traitement des mesures

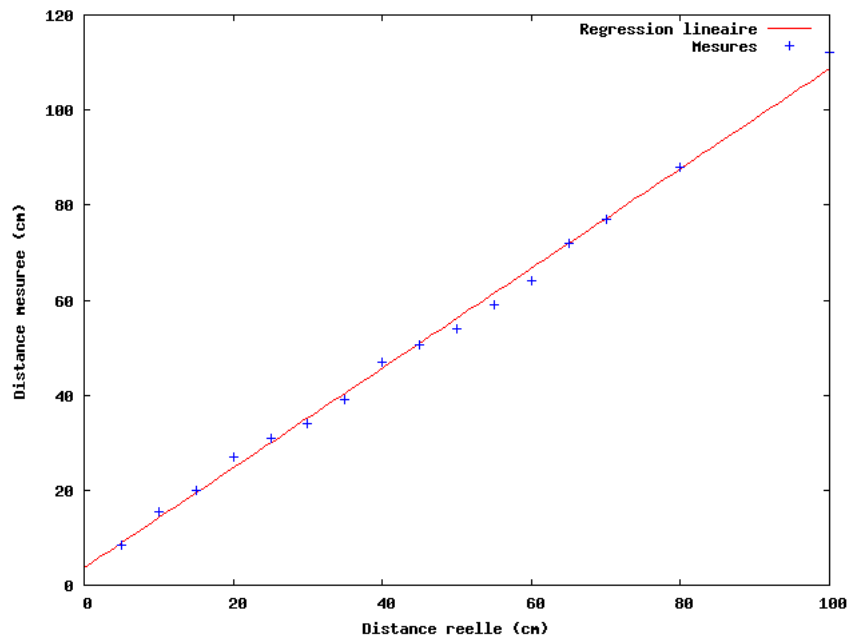
6.1 Régression sur nos mesures

Afin de peaufiner la mesure brute de distance que nous obtenions après calcul $d = vt$, nous avons réalisé des calculs d'erreur en mesurant des distances étalons connues (en $1D$).

Nous avons ainsi pu réaliser une régression linéaire sur les données obtenues (Distance mesurée x_{exp} , Distance Réelle x).

Distance Réelle x (cm)	Distance mesurée x_{exp} (cm)
5	8,5
10	15,5
15	20,8
20	27
25	31
30	34
35	39
40	47
45	50,5
50	54
55	59
60	64
65	72
70	77
80	88
100	112

TAB. 1 – Mesures mettant en évidence notre écart de calcul

FIG. 15 – Régression linéaire obtenue $x_{exp} = f(x)$

On obtient ainsi une droite :

$$x_{exp} = 1,05x + 3,671 \text{ en cm} \quad (5)$$

Le coefficient de corrélation $r^2 = 0,996291$, montre la validité de cette régression. Nous l'utiliserons dès lors pour affiner nos calculs de la position de l'objet en 3D. Le terme $+3,671$ dans l'équation est expliqué par la méconnaissance de la position exacte de la membrane d'émission ($\simeq 0,5\text{cm}$ pour chaque dipôle), par la rotation nécessaire du récepteur pour une meilleure réception, et enfin par l'imprécision de la mesure de temps.

6.2 Imprécisions - Intervalle de confiance

Erreur obtenue sur le calcul d'une distance émetteur-récepteur (donc en 1D).

$$\Delta d = t|\Delta v| + v|\Delta t| \quad (6)$$

La vitesse du son dans l'air, suit globalement la loi $v_\theta = 331,5 + 0,6\theta$. On a donc $\Delta v = 0,6|\Delta\theta|$, ce qui ne varie que très peu. D'où l'incertitude $|\Delta d|$ sur la distance :

$$\Delta d = 0,6t|\Delta\theta| + v|\Delta t| \quad (7)$$

avec

$$\begin{cases} \Delta v = \pm 1\text{m.s}^{-1} \text{ selon les caractéristiques de l'air ambiant} \\ \Delta t = \pm 0,2\text{ms} \text{ précision estimée de la mesure à l'oscilloscope} \end{cases}$$

Exemple numérique : pour une distance de $0,5\text{m}$, on a $\Delta d = \pm 7,0\text{cm}$. Ainsi, chaque mesure génère une imprécision considérable. Elle est majoritairement due à la lecture du temps à l'oscilloscope (responsable dans cet exemple d'un écart de $6,8\text{cm}$).

7 Résultats

Nous vous présentons ici deux résultats obtenus après mise en application de notre méthode explicitée précédemment. Ces deux résultats ont été choisis parce qu'ils étaient les plus clairs possibles.

Les mesures de r_1, r_2, r_3, r_4 nous donnent, à l'aide des équations vues précédemment, les coordonnées (x, y, z) du barycentre d'un tétraèdre représentant le volume dans lequel se situe l'objet. Le barycentre représente bien entendu la position ayant la plus forte probabilité de présence réelle de l'objet.

Mesure 1

x	y	z	Volume du tétraèdre
0.75m	0.66m	0.46m	$0,49 \cdot 10^{-3} m^3 = 490 cm^3$

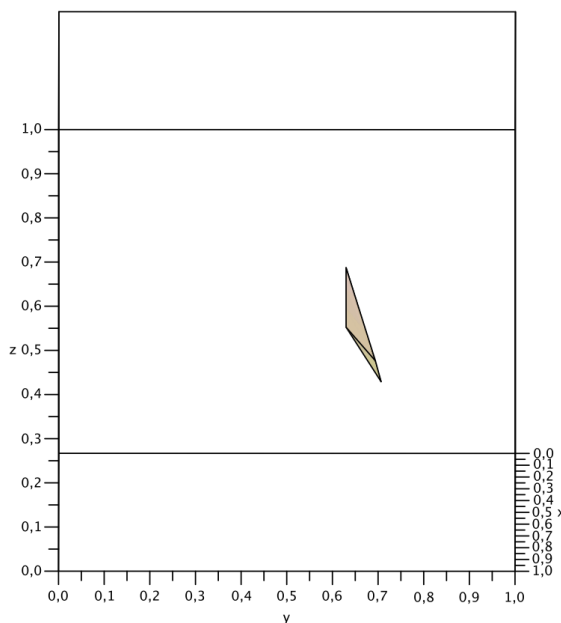


FIG. 16 – Mesure 1

On obtient ainsi un volume relativement important ($\sqrt{490} \approx 22cm$ de

côté), mais ne représentant que 0,49% du volume total dans lequel pouvait se situer l'objet.

Cette localisation est toutefois très acceptable au vue des nombreuses imprécisions de la mesure. Rappelons que chaque mesure de distance r_i est associée à un intervalle de confiance $\Delta d = \pm 7cm$.

Mesure 2

x	y	z	Volume du tétraèdre
0.64m	0.38m	0.62m	$1,6 \cdot 10^{-3} m^3 = 1600 cm^3$

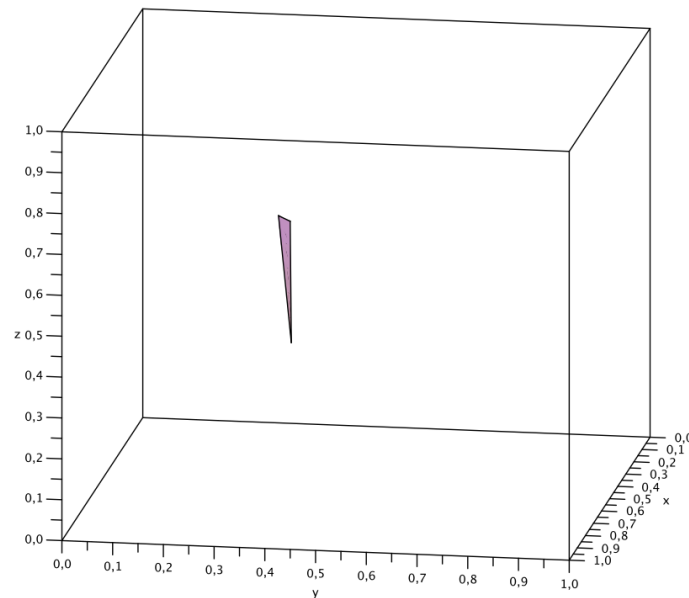


FIG. 17 – Mesure 2

Conclusion et perspectives

8 Conclusions

Au cours de ce projet, nous avons réussi à atteindre notre objectif principal, c'est-à-dire concevoir un système de positionnement en 3D reposant sur le même principe que le GPS. Nous avons du, néanmoins, restreindre l'échelle de ce système à un repère cartésien de $1m^3$ à cause de la puissance d'émissions de nos émetteurs à ultra-son. En effet, nos principales difficultés, pendant la réalisation de notre système, furent matérielles, que ce soit à cause de la puissance de nos émetteurs ou de la carte d'acquisition de l'ordinateur ne supportant pas la fréquence des émetteurs et récepteurs à ultra-sons, par exemple. Nous avons aussi réalisé une procédure Maple afin de représenter l'incertitude de nos mesures, dans le but de compléter notre projet en permettant de visualiser le positionnement de l'objet dans notre repère. Ce fut un projet très enrichissant tant au niveau des connaissances scientifiques que de l'apprentissage de la gestion d'un projet dans sa globalité. Nous avons été clairement autonomes sur ce projet du début à la fin. Ce fut à nous à la fois de trouver comment résoudre le problème qui nous était posé, et de le réaliser tout en gérant notre temps et la répartition du travail dans le groupe. Evidemment en cas de difficultés nous avons un professeur responsable, afin de nous aider mais aussi de nous encadrer pour s'assurer de la bonne gestion du projet. Notre sujet étant basé sur l'utilisation d'ondes ultra-sonores, nous avons pu réutiliser et même approfondir les connaissances acquises en P6-1 et P6-2, tout en découvrant une application concrète de celles-ci. Nous avons aussi fait appel à notre esprit créatif dans l'ensemble du projet, par exemple, lors de la construction du dispositif expérimental.

9 Perspectives pour la poursuite de ce projet

Bien que nous ayons obtenu, un système fonctionnant à la fin de ce projet, celui-ci pourrait être amélioré en vue d'obtenir des résultats plus précis et à une échelle plus grande s'approchant réellement de celle du laboratoire. Afin de réduire le bruit dans le circuit électronique, nous avons pensé utiliser des câbles coaxiaux peu sensibles au rayonnement électromagnétique. Il est aussi possible d'envisager l'utilisation d'émetteurs plus puissants et moins directionnels afin de pouvoir localiser notre objet dans un repère plus grand. Cela permettrait de laisser le récepteur (objet à positionner) fixe et donc d'éliminer une source d'imprécisions.

Une autre amélioration consisterait à implémenter notre dispositif d'émission successive tout en réussissant à acquérir automatiquement les données sur ordinateur ce qui permettrait un tracé instantané des résultats.

Annexes

A Programme Maple

Listing 1 – Programme Maple

```
1 restart ;
2 with(geometry);
3 with(plottools);
4 with(plots);
5
6 localisation := proc (vson, t1, t2, t3, t4)
7 local r1, r2, r3, r4, x, y, z, x1, y1, z1, x2, y2, z2,
   x3, y3, z3, x4, y4, z4, X1, X2, X3, X4, tetra, G,
   erreur, a, b, c, r, dist, volume;
8
9 r1 := (0.1e-2*vson*t1+(-1)*3.671*0.1e-1)/1.05;
10 r2 := (0.1e-2*vson*t2+(-1)*3.671*0.1e-1)/1.05;
11 r3 := (0.1e-2*vson*t3+(-1)*3.671*0.1e-1)/1.05;
12 r4 := (0.1e-2*vson*t4+(-1)*3.671*0.1e-1)/1.05;
13 x1 := 1/2+(1/2)*r1^2-(1/2)*r2^2;
14 y1 := 1/2+(1/2)*r1^2-(1/2)*r3^2;
15 z1 := (1/2)*sqrt(abs(-2+2*r2^2-2*r1^4+2*r1^2*r2^2-r2
   ^4+2*r3^2+2*r1^2*r3^2-r3^4));
16 c := -2*r4^2*r2^2+2*r4^4+r2^4+r3^4-2*r3^2*r4^2+4-4*r4
   ^2;
17 b := -4*r3^2-8+8*r4^2-4*r2^2;
18 a := 12;
19 r := (1/2)*(-b+sqrt(b^2-4*a*c))/a;
20 y2 := -(1/2)*r3^2+(1/2)*r4^2+r;
21 x2 := -(1/2)*r2^2+(1/2)*r4^2+r;
22 z2 := r;
23 x3 := (1/2)*sqrt(-2*r1^4+2*r1^2*r3^2-2+2*r3^2-r3^4+2*r1
   ^2*r4^2+2*r4^2-r4^4);
24 y3 := 1/2+(1/2)*r1^2-(1/2)*r3^2;
25 z3 := 1/2+(1/2)*r1^2-(1/2)*r3^2;
26 x4 := 1/2+(1/2)*r1^2-(1/2)*r2^2;
27 y4 := (1/2)*sqrt(-2+2*r2^2-2*r1^4+2*r1^2*r2^2-r2^4+2*r1
   ^2*r4^2+2*r4^2-r4^4);
28 z4 := (1/2)*r1^2+1/2-(1/2)*r4^2;
```

```

29 tetra := [point(X1, Re(x1), Re(y1), Re(z1)), point(X2,
    Re(x2), Re(y2), Re(z2)), point(X3, Re(x3), Re(y3),
    Re(z3)), point(X4, Re(x4), Re(y4), Re(z4))];
30 point(G, (1/4)*Re(x1)+(1/4)*Re(x2)+(1/4)*Re(x3)+(1/4)*
    Re(x4), (1/4)*Re(y1)+(1/4)*Re(y2)+(1/4)*Re(y3)+(1/4)*
    *Re(y4), (1/4)*Re(z1)+(1/4)*Re(z2)+(1/4)*Re(z3)
    +(1/4)*Re(z4));
31 dist := sqrt(((3/4)*Re(x1)-(1/4)*Re(x2)-(1/4)*Re(x3)
    -(1/4)*Re(x4))^2+((3/4)*Re(y1)-(1/4)*Re(y2)-(1/4)*Re
    (y3)-(1/4)*Re(y4))^2+((3/4)*Re(z1)-(1/4)*Re(z2)
    -(1/4)*Re(z3)-(1/4)*Re(z4))^2);
32 volume := evalf((4/3)*Pi*dist^3);
33
34
35 printf("Volume : %a\n", volume);
36 printf("x=%a y=%a z=%a", (1/4)*Re(x1)+(1/4)*Re(x2)
    +(1/4)*Re(x3)+(1/4)*Re(x4), (1/4)*Re(y1)+(1/4)*Re(y2)
    +(1/4)*Re(y3)+(1/4)*Re(y4), (1/4)*Re(z1)+(1/4)*Re(
    z2)+(1/4)*Re(z3)+(1/4)*Re(z4));
37 polygonplot3d({[[Re(x1), Re(y1), Re(z1)], [Re(x2), Re(
    y2), Re(z2)], [Re(x3), Re(y3), Re(z3)]]], [[Re(x2),
    Re(y2), Re(z2)], [Re(x3), Re(y3), Re(z3)], [Re(x4),
    Re(y4), Re(z4)]]], [[Re(x4), Re(y4), Re(z4)], [Re(x1)
    , Re(y1), Re(z1)], [Re(x2), Re(y2), Re(z2)]]], [[Re(
    x3), Re(y3), Re(z3)], [Re(x4), Re(y4), Re(z4)], [Re(
    x1), Re(y1), Re(z1)]]}], axes = boxed, view = [0 ..
    1, 0 .. 1, 0 .. 1], labels = [x, y, z]);
38
39
40 end proc;
41
42 localisation(344.7, 2.8, 2.8, 3, 3.4);

```

B Résolution manuelle des systèmes d'équations

B.1 Equations dans le tétraèdre régulier

En prenant un tétraèdre régulier, avec l'un des points sur l'origine, un autre sur l'axe des abscisses (Ox) et en construisant les autres à partir de triangles équilatéraux on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} (x - \frac{a}{2})^2 + (y - \frac{\sqrt{3}a}{2})^2 + z^2 - r_1^2 = 0 \\ (x - a)^2 + y^2 + z^2 - r_2^2 = 0 \\ (x - a)^2 + (y - \frac{a}{2})^2 + (z - \frac{\sqrt{5}a}{3})^2 - r_4^2 = 0 \end{cases}$$

On retrouve :

$$\begin{cases} x = \frac{a^2 + r_3^2 - r_2^2}{2\sqrt{5}} \\ y = \frac{\sqrt{3}(a^2 + r_3^2 - 2r_1^2 + r_2^2)}{6a} \\ z = \frac{1}{2\sqrt{5}}(\frac{19}{6}a^2 - \frac{3}{2}(a^2 + r_3^2 - r_2^2 - r_1^2 + 2r_4^2) - \frac{\sqrt{3}}{2}(a^2 + r_3^2 - 2r_1^2 + r_2^2)) \end{cases}$$

B.2 Equations dans le repère cartésien

(O) désigne le centre du repère

(X) désigne le point situé sur l'axe Ox

(Y) désigne le point situé sur l'axe Oy

(Z) désigne le point situé sur l'axe Oz

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 - r_1^2 &= 0(O) \\ (x - a)^2 + y^2 + z^2 - r_2^2 &= 0(X) \\ x^2 + (y - a)^2 + z^2 - r_3^2 &= 0(Y) \\ x^2 + y^2 + (z - a)^2 - r_4^2 &= 0(Z) \end{aligned}$$

On a alors :

$$\begin{aligned} -2ax + a^2 - r_2^2 + r_1^2 &= 0 \\ -2ay + a^2 - r_3^2 + r_1^2 &= 0 \\ -2az + a^2 - r_4^2 + r_1^2 &= 0 \end{aligned}$$

d'où :

$$x = \frac{a^2 - r_2^2 + r_1^2}{2a}$$

$$y = \frac{a^2 - r_3^2 + r_1^2}{2a}$$

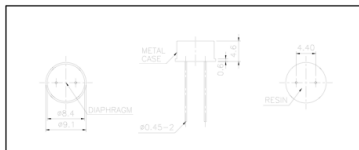
$$z = \frac{a^2 - r_4^2 + r_1^2}{2a}$$

C Fiche technique émetteur/récepteur US

Air Ultrasonic Ceramic Transducers 400ET/R080



Dimensions: dimensions are in mm



Specification

400ET080	Transmitter
400ER080	Receiver
Center Frequency	40.0±3.0Khz
Bandwidth (-6dB)	400ET080: 1.5Khz 400ER080: 2.0Khz
Transmitting Sound Pressure Level	100dB min.
at 40.0Khz; 0dB re 0.0002μbar per 10Vrms at 30cm	
Receiving Sensitivity	-80dB min.
at 40.0Khz 0dB = 1 volt/μbar	
Capacitance at 1Khz	±20% 1700 pF
Max. Driving Voltage (cont.)	15Vrms
Total Beam Angle	-6dB 125° typical
Operation Temperature	-30 to 80°C
Storage Temperature	-40 to 85°C

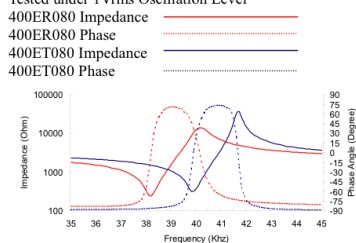
All specification taken typical at 25°C
Closer frequency tolerance can be supplied upon request.

Model available:

1	400ET/R080	Plated Metal Housing
---	------------	----------------------

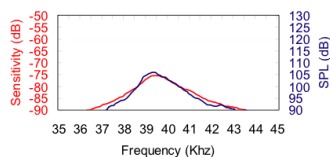
Impedance/Phase Angle vs. Frequency

Tested under 1Vrms Oscillation Level



Sensitivity/Sound Pressure Level

Tested under 10Vrms @30cm



Beam Angle: Tested at 40.0Khz frequency

