

Etude des transmissions par ultrasons

SOMMAIRE	Page
1. Introduction	1
2. Etude des ondes ultrasonores	3
2.1 Historique et généralités	3
2.2 Emetteurs et récepteurs US	3
2.3 Fonctionnement d'un émetteur US	4
2.4 Lois liées à la propagation des ondes acoustiques	5
3. La liaison US	8
3.1 Principe	8
3.2 Schéma de la liaison US et photo	8
3.3 Quelques détails matériels	10
3.4 Tests réalisés	11
4. Conclusion	12
Références	12

1. Introduction

En tant que radioamateurs, un de nos objectifs est d'expérimenter les possibilités de transmission d'informations d'un endroit à un autre, quelle que soit la forme technologique que peut prendre cette transmission. En effet, elle peut être faite par les moyens suivants (liste non exhaustive) :

- ondes électromagnétiques radio : des EBF (3 à 30 Hz) aux EHF (30 à 300 GHz),
- signaux laser,
- champ magnétique seul (pour les transmissions souterraines),
- champ électrique seul (pour des transmissions localisées, le champ électrique étant fortement atténué par la matière contrairement au champ magnétique),
- Internet (avec ou sans relais DSTAR ou autre),
- via des relais, via des satellites, ou via la Lune, etc.

Dans cet article, je propose donc un « nouveau » moyen de communications qui est celui des ultrasons. En fait il n'a rien de nouveau puisqu'il est couramment utilisé pour des applications telles que les télécommandes de portail.

Ceci étant, même si ce type de transmission ne permettra assurément pas de faire du DX, rien (hormis votre chien qui va peut-être trouver ces tests désagréables) ne nous empêche de tester ce type de transmission et de donner des clés pour d'autres expérimentations.

On rappelle que les ultrasons sont des ondes acoustiques dont le spectre est compris entre 20 KHz et 10 MHz et qui ne sont pas audibles par l'oreille humaine.

Par comparaison, le spectre acoustique utile pour une discussion est compris entre 200 et 3000 Hz environ.

Il est proposé une expérimentation très simple, les fonctions électroniques traditionnelles étant ici réalisées numériquement par logiciel.

Avant de décrire l'expérimentation au §3, une description relative à la génération de ces ondes et aux quelques lois liées à la propagation des ondes acoustiques sera proposée au §2. Elle donnera une base de départ pour d'autres éventuelles expérimentations.

Les appareils utilisés par l'auteur dans cet article sont les suivants : un voltmètre HF, un générateur HF pour le 21 KHz et un fréquencemètre.

Notations

Dans la suite du texte :

- « ultrason » peut être remplacé par « US » pour simplifier,
- le produit simple est noté « * » ou « . » ou « x »,
- les puissances de 10 sont notées Ex ou 10^x (par exemple 10^{-7} ou E-7),
- la puissance d'une variable est notée ^ ou avec l'exposant (x^2 ou x^2 , par exemple),
- la racine carrée est notée \sqrt{x} plutôt que $x^{0,5}$ ou $x^{0.5}$
- « Pa » se réfère à l'unité de pression « Pascal » égale à 10^{-5} bar.

2. Etude des ondes ultrasonores

2.1 Historique et généralités

Les ondes ultrasonores ont été mises en évidence à la fin du 19^{ème} siècle par Francis Galton.

En 1915, Paul Langevin crée le premier générateur d'ultrasons (« US ») grâce à un triplet de céramiques piézoélectriques maintenues entre 2 pièces métalliques. Celles-ci ont la propriété de se déformer mécaniquement lorsqu'elles sont soumises à un courant électrique sinusoïdal dont la fréquence correspond à la fréquence de résonance mécanique des céramiques. Le déplacement sinusoïdal mécanique est de l'ordre de quelques microns à 20 microns crête-crête. Ce déplacement peut être ensuite amplifié par des dispositifs mécaniques (« booster » ou « sonotrode »).

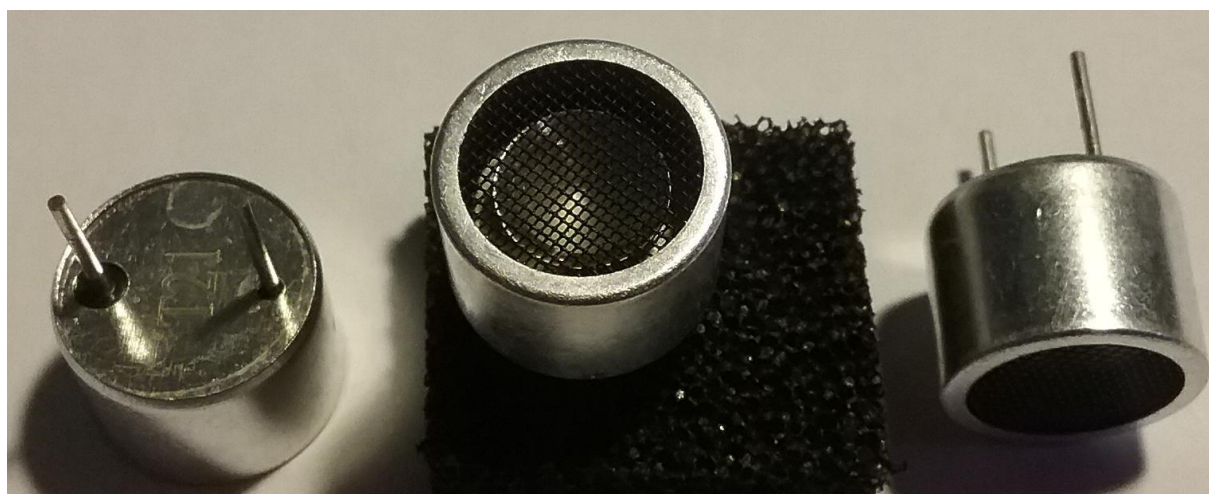
Une application qui en sera faite rapidement est la détection (discrète) des navires: on envoie une salve d'ultrasons (peu absorbés par l'eau) qui, si réfléchis par un navire, seront détectés par un récepteur dédié (SONAR).

2.2 Emetteurs et récepteurs US

Ces appareils sont appelés « transducteurs » piézoélectriques, car ils convertissent une énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement.

En émission, le but est d'avoir le meilleur rendement possible et un haut niveau sonore tandis qu'en réception on cherche à augmenter le niveau du signal reçu et le rapport signal sur bruit.

Ci-dessous, on trouvera la photo de quelques transducteurs. A noter qu'extérieurement les transducteurs d'émission (repérés par un « T » gravé) sont très semblables à ceux de réception (repérés par un « R » gravé).



Un schéma de principe de ces transducteurs est donné ci-dessous :



Dans la structure commune « ouverte » (ci-dessus), la couche de céramiques piézoélectriques est solidaire (via la lamelle métallique) d'une sorte de petit cornet acoustique qui permet d'adapter la haute impédance acoustique (voir plus loin) des céramiques à la basse impédance de l'air ambiant, avec un rapport de presque 100.000 entre les 2 impédances. Il s'agit d'un problème similaire à celui de l'adaptation de composants en électronique. Un autre exemple : hors de l'eau il est très difficile de se faire entendre de quelqu'un qui est dans l'eau car les impédances de l'air et de l'eau sont très différentes (la plus grande partie des ondes acoustiques sera réfléchiée par la surface de l'eau).

A noter que ces ruptures d'impédance donnent lieu à des ondes réfléchiées avec des coefficients semblables à ceux que l'on a en électromagnétisme.

Pour ce qui est du fonctionnement général des transducteurs :

- en réception, la pression acoustique reçue à travers l'air ambiant, via le cornet acoustique, est transformée en contrainte mécanique dans les céramiques qui génèrent des charges électriques sur la sortie électrique, sortie qui est vue comme un condensateur,
- en émission, la tension électrique sur l'entrée du transducteur (vue comme un condensateur) génère une déformation mécanique des céramiques qui est transformée en pression acoustique appliquée à l'air ambiant, via le cornet acoustique.

Ce cornet acoustique va permettre, non seulement d'adapter les impédances acoustiques des 2 milieux (céramique/air) mais aussi de focaliser les US générés dans un certain angle solide (un peu comme pour des antennes). Ainsi, il est défini un angle de directivité dans les caractéristiques des transducteurs.

A noter que la céramique piézoélectrique se comporte comme un quartz. Elle est donc équivalente à un circuit RLC série, et à R seulement à la résonance. A ce titre, les caractéristiques (pression acoustique générée en émetteur et sensibilité en récepteur) se dégradent rapidement en dehors de la fréquence de résonance. On doit donc utiliser ces transducteurs à leur fréquence nominale.

2.3 Fonctionnement d'un émetteur US

Le fonctionnement d'un transducteur US en émission est décrit ci-après. On ne décrira pas le fonctionnement en réception car il est symétrique de celui en émission. Par la suite, pour simplifier, on ignore les déphasages.

Le transducteur est alimenté par une tension alternative U à la fréquence f_0 nominale de fonctionnement (souvent 40 KHz), soit $U(V) = U_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$. Cette tension, est appliquée sur les lamelles métalliques aux bornes des céramiques, l'ensemble formant un condensateur puisque les céramiques sont diélectriques. Il va alors se former un champ électrique E à travers les diélectriques : $E(V/m) = E_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$.

Du fait des propriétés piézo-électriques des céramiques, sous l'effet du champ électrique, celles-ci vont produire une déformation mécanique ε (m) = $\varepsilon_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0)$, dont l'amplitude dépendra également du module de Young des céramiques (module relatif à leur compressibilité). On va ignorer le cornet acoustique et supposer que la lamelle métallique supérieure est en contact avec l'air.

L'air en contact avec cette lamelle va être mis en compression/dilatation du fait de la déformation mécanique périodique des céramiques.

Ces variations de pression (en Pa) autour de la pression atmosphérique forment ce que l'on appelle la pression acoustique p . On la notera sous la forme :

$$p \text{ (Pa)} = p_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0),$$

Ces variations de pression vont engendrer des variations de vitesse des particules d'air V (m/s) = $V_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_0)$, avec $V_0 = p_0 / Z_{ac}$, Z_{ac} étant l'impédance acoustique. V est appelé « vitesse acoustique ».

Un mot sur l'impédance acoustique Z_{ac} (en kg/(m².s)). Elle correspond à la résistance du milieu (céramique ou air) au passage de l'onde acoustique. On rappelle que, de façon générale, une impédance est un rapport « cause/effet », comme « $Z = U/I$ » par exemple. Z_{ac} est définie par la formule : $Z_{ac} = p/V$, avec p (en Pa) la pression acoustique et V (en m/s) la vitesse (dite « acoustique ») de la particule associée au milieu. Comme la pression, Z_{ac} est une grandeur intensive (qui ne dépend ni de la masse ni de la taille).

On peut aussi définir Z_{ac} comme $Z_{ac} = \rho \cdot c$ avec ρ la masse volumique du milieu (kg/m³) et c la célérité (vitesse de propagation des ondes sonores dans le milieu). La célérité est d'environ 330 m/s dans l'air.

Ces variations de pression seront propagées de proche en proche à la vitesse (ou célérité) du son. L'oreille humaine est sensible à ces variations de pression lorsque ce ne sont pas des US. A noter que le seuil de la douleur est de 20 Pa (en valeur efficace) et que la pression de référence est de 20 μ Pa, valeur qui correspond au seuil de perception d'un son.

Pour plus de détails, on consultera les documents en référence [1], [2] et [3] et, bien sûr, Wikipédia sur des mots clés comme « Impédance acoustique », « Célérité », « Vitesse du son », etc.

2.4 Lois liées à la propagation des ondes acoustiques

Les ondes acoustiques US obéissent à un certain nombre de lois.

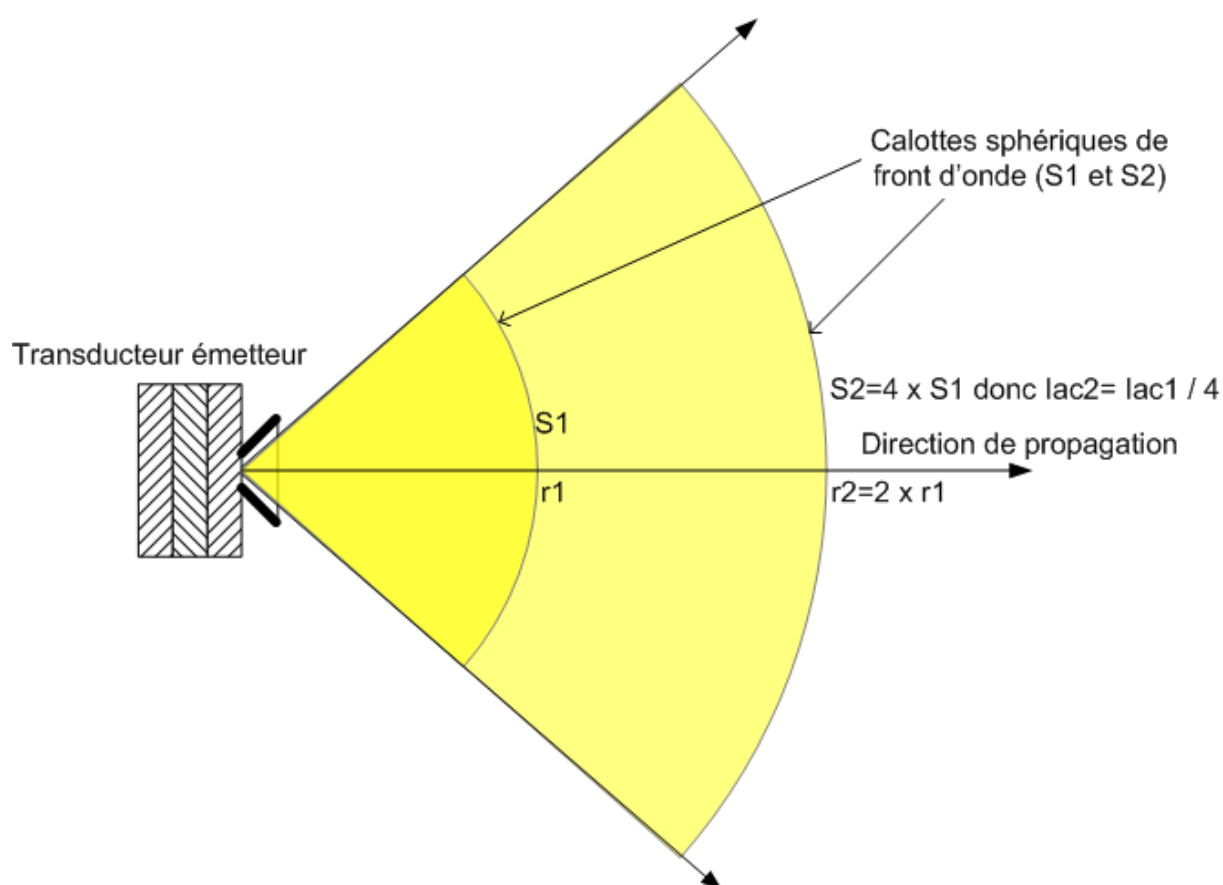
Définissons :

- la puissance acoustique P_{ac} , avec $P_{ac} = p \cdot S \cdot V$, avec p la pression acoustique (en Pa), S la surface du front d'onde (en m²) et V la vitesse acoustique (en m/s). A noter que $p \cdot S$ est une force (en N),
- l'intensité acoustique I_{ac} , avec $I_{ac} = p \cdot V$, C'est donc la puissance acoustique par unité de surface. Comme $V = p / Z_{ac}$, il s'ensuit que $I_{ac} = p^2 / Z_{ac}$. A noter qu'en conséquence $P_{ac} = p^2 \times S / Z_{ac}$. Comme la puissance acoustique est (idéalement) linéaire avec la puissance électrique P_{elec}

alimentant l'émetteur avec $P_{elec} = U^2 / Z_{entrée}$, il s'ensuit que p et U sont proportionnels et évoluent de la même façon.

Pour ce qui est de la propagation des ondes acoustiques à partir du transducteur, il faut considérer que celui-ci est une source ponctuelle et que les ondes vont se propager à la même vitesse dans toutes les directions à l'intérieur de l'angle solide de diffusion. Les fronts d'onde seront alors des calottes sphériques.

On suppose qu'il n'y a pas d'absorption de l'énergie acoustique par l'atmosphère, donc que la puissance acoustique globale, reçue au niveau d'un front d'onde, reste constante quelle que soit la distance à la source. Dans ce cas, la décroissance de l'intensité acoustique va être en r^{-2} , avec r la distance à la source. Par exemple, pour un doublement de la distance à la source ($r_2 = 2 \times r_1$), l'intensité ac va être diminuée d'un facteur 4 car la surface de la calotte sphérique va être multipliée par 4 ($S_2 = 4 \times S_1$), comme indiqué sur le schéma ci-dessous.



Si l'on exprime l'intensité acoustique en dB, on constate qu'un doublement de la distance va provoquer une atténuation de 6 dB de l'intensité acoustique (division par 4) et qu'une distance 10 fois plus grande va donc provoquer une atténuation de 20 dB (division par 100).

Nota : comme $lac = p^2 / Z_{ac}$, l'atténuation de la pression acoustique est égale à la racine carrée de l'atténuation de l'intensité acoustique. Elle est donc proportionnelle à r . Par exemple, pour un doublement de la distance r , la pression acoustique va être divisée par 2.

Tout ceci serait assez simple s'il n'y avait pas un phénomène d'absorption de l'onde par l'atmosphère. Cette atténuation est à peu près proportionnelle à la distance à la source et au carré de la fréquence utilisée, donc les US de très hautes fréquences ne pourront être utilisées qu'à de très courtes distances. Par exemple à 10 m, l'atténuation de l'intensité acoustique à 20 KHz est négligeable mais elle est de 7 dB environ à 80 KHz (cf. référence [2]).

Un bilan de liaison est difficile à faire pour nos liaisons OM. En effet, dans les caractéristiques, on dispose :

- de la pression acoustique à 30 cm si le transducteur est alimenté avec une tension alternative de 10 V efficace. C'est une valeur en dB référencée par rapport à un 0 dB à 20 μ Pa,
- de la sensibilité du transducteur. C'est une valeur en dB référencée par rapport à un 0 dB à 10 V/Pa. La valeur brute de sensibilité est donc en V/Pa. Cette valeur ne suffit pas car on n'a pas de rapport signal sur bruit auquel on pourrait comparer le rapport signal sur bruit minimum pour le mode de transmission utilisé. Cette valeur est plutôt adaptée à un récepteur à seuil de tension (en « tout ou rien »).

Prenons donc un exemple en supposant que le récepteur à seuil de tension doit détecter une tension minimum de 1 mV eff pour fermer un circuit. On suppose que le transducteur d'émission est alimenté avec une tension de 5 V eff.

On suppose que la pression acoustique générée à 30 cm est de 120 dB (avec 10V eff.). On peut estimer que la puissance électrique étant proportionnelle au carré de la tension, la puissance fournie à 5 V eff. sera de 1/4 celle fournie à 10 V eff (soit -6 dB). En supposant que le transducteur est linéaire, la pression acoustique (« p ») sera alors de $120-6=114$ dB, soit en Pascal : $p=20E-6 \times 10^{(114/20)}=10$ Pa (à 0,3 m de la source).

A une distance r de la source, compte-tenu de l'atténuation, la pression acoustique sera égale à : $p(r)=10 \times (0,3/r)$ Pa (en négligeant l'absorption)

On suppose que la sensibilité S est de -63 dB, soit en V/Pa : $S=10 \times 10^{(-63/20)}=7,08 E-3$ V/Pa.

La tension U(r) reçue à la distance r sera donc égale à : $U(r)= p(r) \times S$

On déclenchera le seuil de tension si la tension reçue à la distance r est supérieure à 1 mV, ou autrement dit si $U(r)>0,001$ V, soit $10 \times (0.3/r) \times 7,08 E-3 >0,001$

La distance r maximum de réception sera telle que $U(r)=0,001$ V, soit $10 \times (0.3/r) \times 7,08 E-3 = 0,001$

On en déduit que $r = 10 \times 0.3 \times 7,08 E-3 / 0,001 = 21,1$ m

3. La liaison US

3.1 Principe

Il est proposé d'émettre des US depuis la carte son d'un PC (« modulateur »), dans un mode numérique OM, vers la carte son d'un autre PC utilisé en récepteur (« démodulateur »).

Les cartes son standard ont une fréquence d'échantillonnage de 48 KHz. On peut donc utiliser un spectre de 0 à $48/2=24$ KHz (fréquence de Nyquist). La fréquence standard des transducteurs US est de 40 KHz, ce qui est incompatible avec la bande passante des cartes son standard.

Nota : il existe des cartes son à 96 KHz (voire plus), mais elles sont chères.

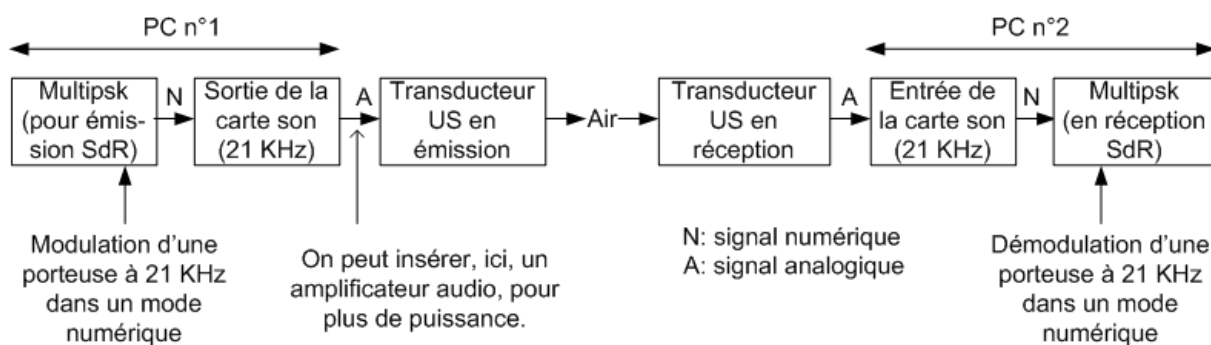
Cependant on peut trouver sur le marché chinois des transducteurs US de fréquence 21 KHz, compatibles avec des cartes son ordinaires. Tapez, par exemple, « 16mm sonde à ultrasons capteur émetteur-récepteur 21 kHz » sur votre moteur de recherche préféré.

Pour moduler et démoduler la transmission à 21 KHz, on utilisera la partie SdR de Multipsk.

3.2 Schéma de la liaison US et photo

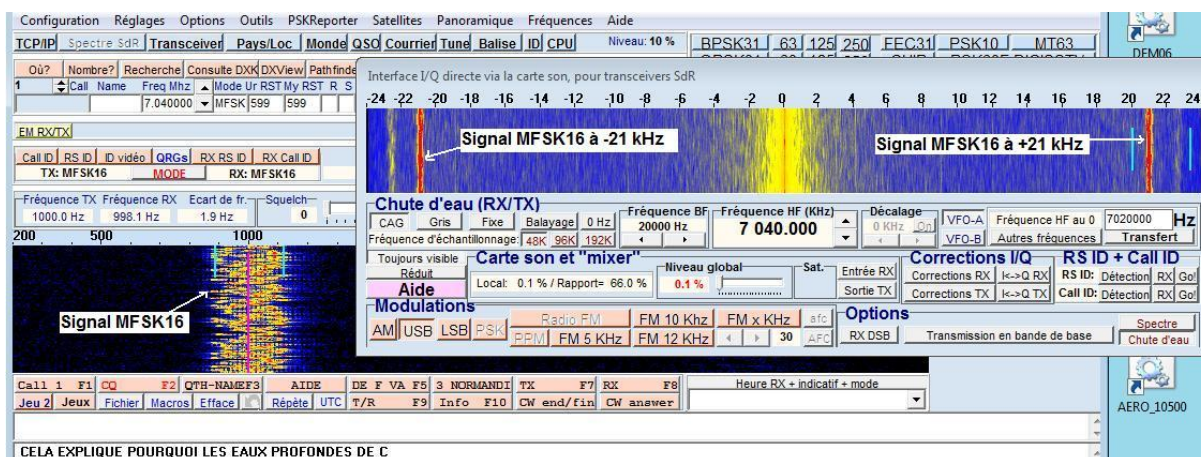
Le schéma de principe de cette liaison US est donné ci-dessous.

Lors des essais, on testera la liaison avec et sans amplificateur audio.



Nota: Multipsk est utilisé dans sa fonction d'interface SdR, mais on n'utilise évidemment ici qu'une seule sortie (I ou Q).

De même, il n'y a qu'une seule entrée sur la carte son. On verra donc 2 signaux sur le spectre SdR, l'un à -21 KHz et l'autre à +21 KHz, comme montré ci-dessous pour un signal transmis en mode MFSK16.



En effet un signal réel correspond à 2 fréquences opposées, comme expliqué ci-dessous.

L'amplitude d'un signal réel peut être mise sous la forme $A = \cos(\omega_1 t)$, avec ω_1 la pulsation, égale à $2\pi f_1$. On peut donc écrire :
 $A = (\cos(\omega_1 t) + i \sin(\omega_1 t)) + (\cos(\omega_1 t) - i \sin(\omega_1 t)) / 2$, soit
 $A = (\exp(i \omega_1 t) + \exp(-i \omega_1 t)) / 2$,
 ce qui correspond à deux vecteurs tournant l'un à la pulsation ω_1 et l'autre à la pulsation $-\omega_1$, en sens opposé. Leurs modules se représentent donc par le spectre :

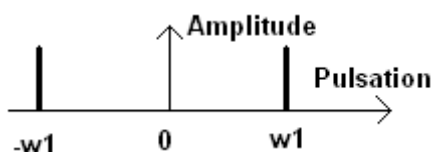
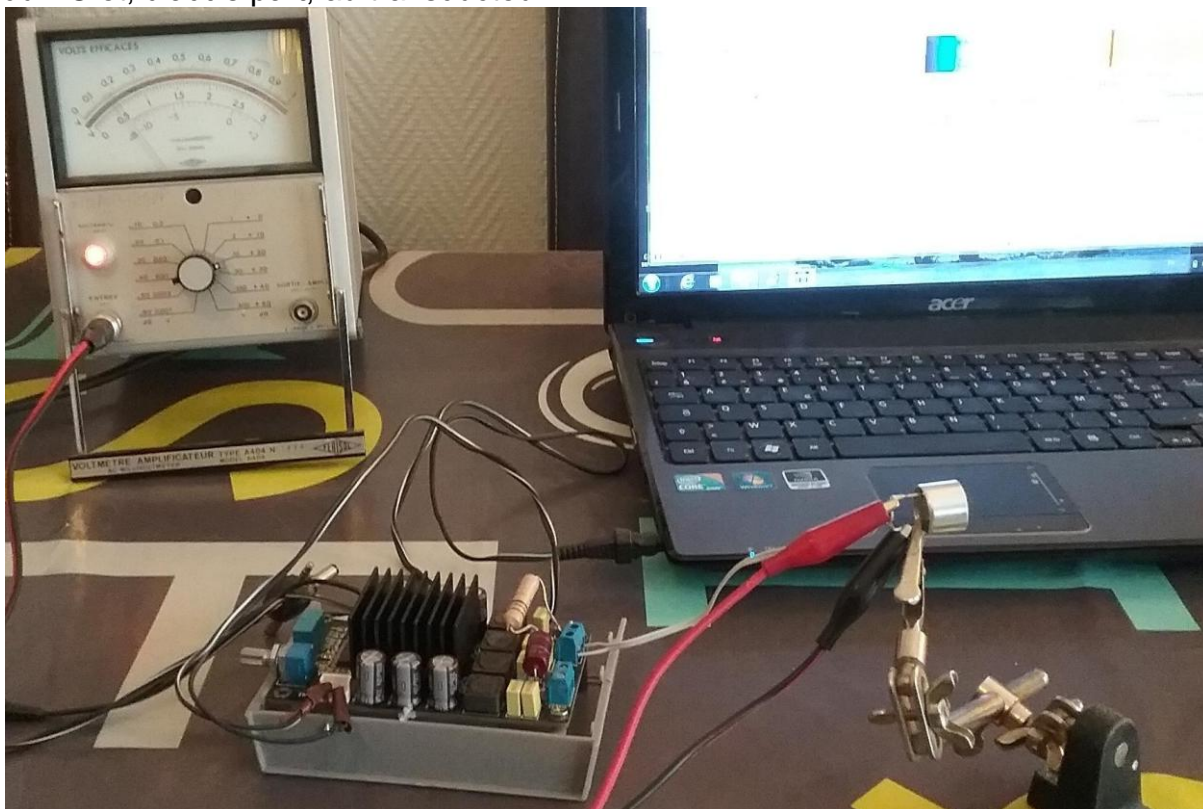


Photo de la partie émission (avec amplificateur)

En haut à gauche, on voit le voltmètre HF mesurant la tension aux bornes du transducteur et en bas à gauche, l'amplificateur relié, d'une part, à la sortie carte son du PC et, d'autre part, au transducteur.



3.3 Quelques détails matériels

Cartes son

J'ai mesuré la tension alternative à 21 KHz délivrée par les cartes son installées sur quelques PC. En moyenne, la tension efficace est d'environ 0,5 V. Cependant, sur un PC (du genre tablette hybride Windows 10), j'ai trouvé 0,02 V ce qui est faible mais sur un autre PC j'ai trouvé 1,1 V.

A noter que j'ai également testé un ampli audio alimenté par la sortie carte son. Au maximum, il délivre 9,8 V.

Transducteur (de type ouvert)

Les caractéristiques fournisseur sont les suivantes :

- le niveau de pression acoustique à 10 V est de 115 dB,
- la sensibilité est de -68 dB,
- la capacité « à 1 KHz et < 1V » est de 2400 pF

Nota : avec un générateur et un voltmètre HF, j'ai fait quelques mesures pour déterminer l'impédance d'entrée (électrique) du transducteur d'émission à 21 KHz. D'un transducteur à l'autre, la valeur varie énormément.

On peut estimer cette impédance à 1600 ohms +/- 800 environ. Donc même à 10 V eff., la puissance consommée reste faible : $10 \times 10 / 1600 = 0,06 \text{ W}$.

3.4 Tests réalisés

Le principe est de transmettre un texte dans un mode numérique via le transducteur US émetteur et de le recevoir sur l'autre PC via le transducteur US récepteur.

Multipsk est configuré en interface SDR (bouton « Directe via la carte son » sur le premier écran). Sur le spectre SdR, on se fixe, en USB, à 20 KHz et sur le spectre BF à 1 KHz (on va donc émettre et recevoir à 21 KHz).

On met du gain (+20 dB) sur l'amplificateur du microphone du PC en réception, pour recevoir un niveau minimum de signal.

Sans amplificateur

On alimente l'émetteur US avec la carte son qui délivre une tension maximum de 0,85 V eff. pour ce PC. La distance maximum atteinte en PSK10 (mode très sensible), sans erreur, est de 1,27 m.

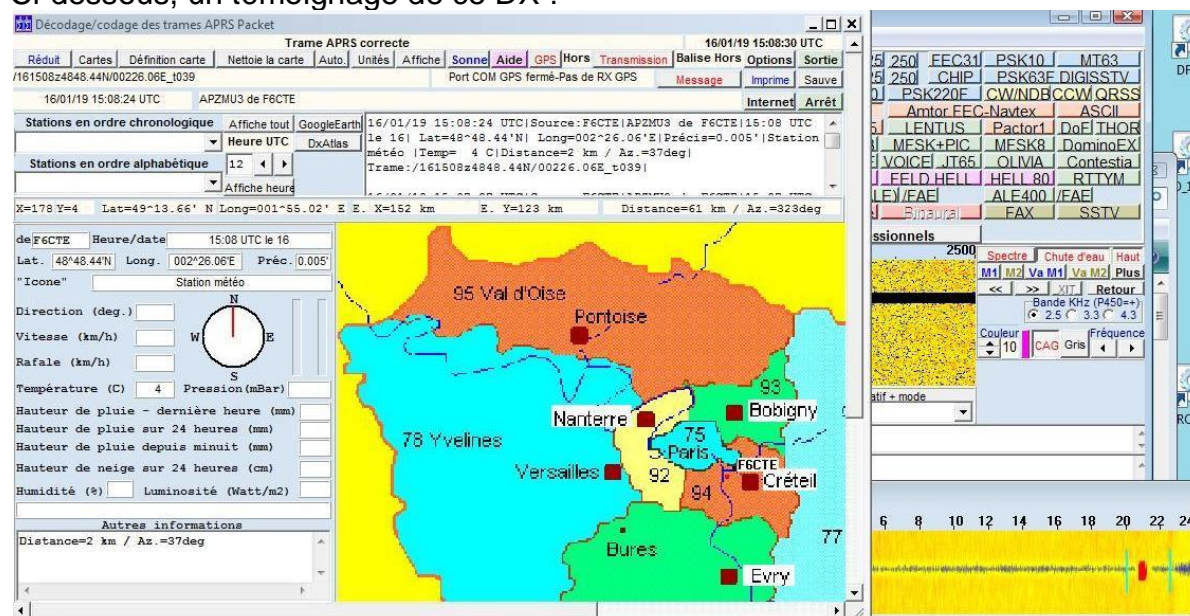
On peut en déduire que la distance maximum en PSK10 serait à 10 V eff. de $1,27 \times 10 / 0,85 = \underline{14,9 \text{ m}}$.

Avec amplificateur

On alimente l'émetteur US avec la sortie d'un amplificateur audio lui-même alimenté par la carte son (voir la photo précédente). On sépare les transducteurs RX/TX de 4,1 m et on regarde quelle est la tension minimum pour assurer la transmission. On trouve 2,8 V eff. en PSK10 et 6 V eff. en BPSK31. On peut en déduire que la distance maximum serait :

- en PSK10 à 10 V eff. de $4,1 \times 10 / 2,8 = \underline{14,6 \text{ m}}$, ce qui confirme le résultat précédent,
- en BPSK31 à 10 V eff. de $4,1 \times 10 / 6 = 6,8 \text{ m}$.

J'ai fait un dernier test en APRS 300 bauds (l'APRS 1200 bauds ne semblant pas pouvoir être transmis vu la trop grande bande passante). En mettant l'amplificateur à son niveau maximum (9,8 V eff.), j'ai obtenu une distance maximum de 1,45 m (☺). Ci-dessous, un témoignage de ce DX !



Notez la trame APRS (gros et court trait rouge) à droite du spectre SdR.

4. Conclusion

A priori, ce type de transmission n'a d'intérêt qu'à l'intérieur d'un local ou à l'extérieur pour de courtes distances. Les transmissions ne doivent pas avoir une trop grande largeur de bande (disons 1 KHz maximum). Par contre, vu la faible consommation des transducteurs, rien n'interdit d'en alimenter plusieurs, chacun focalisé dans une certaine direction.

Hormis la curiosité, l'intérêt de ce genre de transmissions, pour les OMs, est limité.

Références

[1] http://anso.pagesperso-orange.fr/corps_le_son_physique.htm

Ce document ne semble plus disponible sur le Web.

[2] https://www.ee.columbia.edu/~kinget/EE6350_S14/DM6350_web/files/murata.pdf

[3] Thèse « Conception et modélisation d'un capteur acoustique » de Mr Slimani Abdoun (accessible sur le Net)