

Les ondes comme vecteur d'énergie

OLYMPIADES DE PHYSIQUE – 32EME EDITION



Aux Lazaristes -Lyon

Mathis Blachon, Anaïs Luong, Chloé Capelli

Sommaire

Sommaire	1
Partie 1 : Mise en évidence de l'induction électromagnétique	2
Introduction et objectif	2
Hypothèse	3
Matériel et méthode	3
Résultats	3
Traitement des données	3
Discussion et interprétation	4
Conclusion	4
Partie 2 : Transmission d'énergie à distance avec émission omnidirectionnelle	4
Introduction et objectif	4
Hypothèse	4
Matériel et méthode	4
Résultats	5
Traitement des données	6
Discussion et interprétation	6
Conclusion	6
Amélioration du rendement, expériences sur les ondes mécaniques	6
Partie 3 : Optimisation de la transmission d'énergie par émission focalisée	7
Introduction et objectif	7
Hypothèse	8
Matériel et méthode	8
Traitement des données	9
Discussion et interprétation	9
Conclusion	10
Partie 4 : Optimisation de la transmission d'énergie par beamforming	10
Introduction et objectif	10
Hypothèses	10
Matériel et méthode	11
Mesures et observations	11
Traitement des données	13
Discussion et interprétation	13
Conclusion	13
Conclusion	14
Remerciements	15
Bibliographie	15
Listes des abréviations scientifiques utilisées	15

Objectif

L'objectif de ce projet est d'identifier et d'optimiser des dispositifs permettant de transporter efficacement l'énergie à l'aide d'ondes.

Avant d'entrer dans le cœur du projet, l'introduction de quelques notions, qui ont guidées notre démarche. Tout d'abord, une onde est un phénomène correspondant à la propagation d'une perturbation, entraînant un transfert d'énergie sans déplacement de matière. Elle se caractérise par son amplitude, sa phase et sa fréquence. Parmi les différentes catégories d'ondes, les ondes électromagnétiques se distinguent par leur capacité à se propager sans support matériel, avec une vitesse proche de celle de la lumière.

En 1865, Maxwell unifie électricité et magnétisme dans la théorie de l'électromagnétisme. Deux de ses équations montrent que la variation du champ magnétique $\vec{B}$ induit un champ électrique $\vec{E}$ et inversement.

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

L'induction est donc le phénomène physique, évoqué ci-dessus, par lequel une variation du flux magnétique à travers un circuit électrique induit une force électromotrice (FEM) dans ce circuit. Ce principe repose sur les lois fondamentales de l'électromagnétisme, notamment celle de Faraday, qui établit que la FEM induite est proportionnelle à la variation temporelle du flux magnétique. Il s'agit du phénomène mis en jeu dans les alternateurs, qui permettent de convertir l'énergie mécanique en électrique.

En 1888, Hertz confirme les équations de Maxwell en démontrant l'existence des ondes radio. Ces ondes, émises par des antennes, sont générées par un courant alternatif qui fait osciller les électrons d'une tige métallique, engendrant une variation de champ électrique, qui induit un champ magnétique, formant ainsi une onde électromagnétique se propageant dans l'espace. Une antenne réceptrice capte cette onde, provoquant une oscillation des électrons et reproduisant le courant alternatif d'origine, atténué par la distance.

En utilisant un dispositif producteur d'énergie en continu, il est possible d'envisager l'alimentation continue d'appareils portatifs dans la vie quotidienne. Le projet se concentre ainsi sur le phénomène d'induction électromagnétique afin de transmettre de l'énergie à un dispositif en mouvement dans l'espace. La démarche débute par la mise en évidence empirique de ce phénomène. Une antenne omnidirectionnelle sert ensuite à transmettre l'énergie à distance, une antenne réceptrice similaire assurant la captation partielle de cette énergie. Enfin, l'amélioration du rendement de cette transmission s'appuie sur des systèmes optimisant la directionnalité de l'onde.

Partie 1 : Mise en évidence de l'induction électromagnétique

Introduction et objectif

L'induction électromagnétique est le phénomène par lequel une variation de champ magnétique à travers un circuit induit un courant électrique dans celui-ci (loi de Faraday). Elle est à la base du fonctionnement des transformateurs. Un transformateur comprend deux bobines, dites bobine primaire et bobine secondaire, reliées par un noyau de fer doux qui canalise le flux magnétique dans un chemin défini, minimisant ainsi les fuites de flux. L'énergie est transférée de l'une à l'autre des bobines uniquement par le champ magnétique, sans contact direct entre les deux circuits.

La tension induite dans la bobine secondaire dépend du rapport entre le nombre de spires des enroulements primaire et secondaire. Elle peut être augmentée (transformateur élévateur) ou diminuée (transformateur abaisseur). Ce rapport de transformation est donné par la relation : $\frac{U_B}{U_A} = \frac{N_B}{N_A} = \frac{I_A}{I_B}$

L'oscillation des tensions alternatives est caractérisée par l'amplitude maximale $U_{\max}$ et la tension efficace U_{eff} , cette dernière étant la valeur d'une tension continue produisant la même dissipation thermique que la tension alternative.

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence le phénomène d'induction électromagnétique et les pertes associées.

Hypothèse

Si un courant est présent dans la bobine primaire, alors une tension sera mesurée dans la bobine secondaire et l'induction électromagnétique sera mise en évidence. En revanche, en l'absence de courant dans la bobine primaire, aucune tension ne sera induite dans la bobine secondaire et il n'aura pas de phénomène d'induction.

Matériel et méthode

Matériel

- Générateur à basses fréquences (GBF) METRIX MTX 3240, mode alternatif, 200 Hz, 5,0V
- Bobine A
 - $I_{\max} = 1 \text{ A}$
 - $R = 2,5 \Omega$
 - $N_A = 200$
- Bobine B
 - $I_{\max} = 0,3 \text{ A}$
 - $R = 39,5 \Omega$
 - $N_B = 1000$
- 2 voltmètres
- Noyau de fer doux
- Câblages et matériel électronique

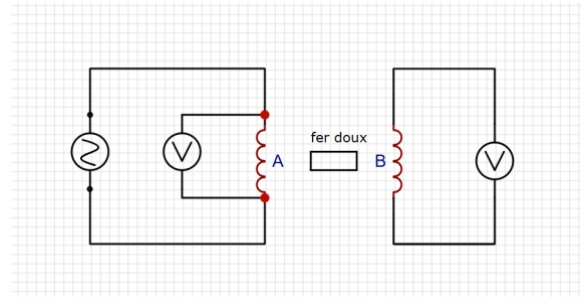


Schéma 1 : Schéma électrique du transformateur

Méthode

Un voltmètre est branché en dérivation à chaque bobine. La bobine A (bobine primaire) est branchée au GBF. La tension de la bobine B est notée lorsque la bobine A n'est pas alimentée par le GBF. La tension efficace en entrée et en sortie est mesurée lorsque la bobine A est alimentée par le GBF.

Résultats

	Bobine A	Bobine B
GBF (V)	5	
$U_{\max}$ (V)	0,716	2,838
U_{eff} (V)	0.506	2.007
Expérience témoin : U_{eff} (V)	0	0

Tableau 1 : Tensions expérimentales de la mise en évidence de l'induction électromagnétique

Traitement des données

Analyses prévues

Calculs des incertitudes de mesures liées aux multimètres, grâce à la formule donnée par la notice du multimètre :

$$u(\text{mesure}) = \text{mesure} \times 1\% + 5\text{pts}$$

$$U_{\max} \text{ Bobine A} = 0,716 \pm \left(\frac{1}{100} \times 0,716 + 0,006 \times 5 \right) = 0,716 \pm 0,037 \text{ V}$$

$$U_{\text{eff}} \text{ Bobine A} = 0,506 \pm \left(\frac{1}{100} \times 0,506 + 0,006 \times 5 \right) = 0,506 \pm 0,035 \text{ V}$$

$$U_{\max} \text{ Bobine B} = 2,838 \pm \left(\frac{1}{100} \times 2,838 + 0,008 \times 5 \right) = 2,838 \pm 0,068 \text{ V}$$

$$U_{\text{eff}} \text{ Bobine B} = 2,007 \pm \left(\frac{1}{100} \times 2,007 + 0,007 \times 5 \right) = 2,007 \pm 0,055 \text{ V}$$

Discussion et interprétation

Grâce à l'expérience, il a été observé qu'une tension est mesurable dans la bobine B lorsque la bobine A est alimentée, tandis qu'elle est absente lorsque la bobine A ne l'est pas, ce qui permet de mettre en évidence le phénomène d'induction électromagnétique. Cependant, les résultats expérimentaux présentent un écart par rapport aux valeurs théoriques. En effet, la tension mesurée dans la bobine A est nettement inférieure à celle mesurée dans la bobine B. Il est possible de conjecturer que les limites de l'expérience proviennent des pertes par effet Joule dans les fils et les composants électriques, des pertes magnétiques dans le noyau de fer doux (en raison de défauts ou d'impuretés), d'un mauvais alignement des bobines, d'incertitudes liées aux bobines et aux multimètres, ainsi que des champs électromagnétiques provenant d'autres appareils, qui pourraient influencer les mesures.

Conclusion

Les tensions mesurées aux bornes de la bobine primaire étaient de 0,716 V (tension maximale) et 0,506 V (tension efficace), tandis que celles de la bobine secondaire étaient de 2,838 V (tension maximale) et 2,007 V (tension efficace). L'expérience a permis de démontrer la transmission d'énergie à distance grâce au principe de l'induction électromagnétique. L'obtention d'une tension mesurable, bien que réduite, dans la bobine secondaire prouve la présence du phénomène d'induction : le champ magnétique variable généré par la bobine primaire induit une tension dans la bobine secondaire. Cela est également confirmé par l'absence de tension dans la bobine secondaire lorsqu'aucun courant n'est envoyé dans la bobine primaire. Pour améliorer l'efficacité de l'induction, il serait pertinent d'explorer l'effet de la fréquence du courant alternatif sur l'induction, ainsi que de tester des instruments de mesure plus précis afin de réduire les incertitudes liées aux mesures.

Partie 2 : Transmission d'énergie à distance avec émission omnidirectionnelle

Introduction et objectif

Lorsqu'une bobine est parcourue par un courant alternatif, elle génère un champ magnétique oscillant. Les bobines utilisées étant circulaires, le champ produit a une composante principale perpendiculaire au plan de la bobine, avec des lignes de champ formant des boucles fermées. Ce champ magnétique n'est donc pas concentré dans une seule direction, mais rayonne tout autour de la bobine. Ainsi, dans l'espace environnant, le champ produit est accessible depuis différentes directions, permettant à une bobine réceptrice, de capter l'énergie dans n'importe quelle position autour de la bobine émettrice. Dans cette optique, il est possible d'assimiler la transmission d'énergie avec des bobines à une transmission peu directive, voire omnidirectionnelle.

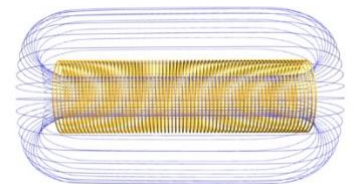


Schéma 2 : Schéma des lignes de champ autour de la bobine

L'objectif de cette partie est de calculer le rendement de la transmission d'énergie omnidirectionnelle en fonction de la distance.

Hypothèse

L'intensité d'une onde électromagnétique diminue en proportion du carré de la distance par rapport à la source, sous forme sphérique. Mathématiquement, cette relation s'écrit : $I = \frac{P}{4\pi r^2}$. Ainsi, lorsque la distance double, l'intensité diminue d'un facteur quatre. Par conséquent, plus la distance entre les deux bobines sera grande, plus l'intensité sera faible, et donc plus le rendement sera faible.

Matériel et méthode

Matériel

- Générateur à basses fréquences (GBF) METRIX MTX 3240, mode alternatif, 4927 Hz, 20,0V

- Bobine A
 - $I_{\max} = 5,0 \text{ A}$
 - $R = 0,6 \Omega$
 - $N_A = 250$
- Bobine B
 - $I_{\max} = 5,0 \text{ A}$
 - $R = 0,6 \Omega$
 - $N_B = 250$
- 4 multimètres (2 ampèremètres & 2 voltmètres)
- Résistance de 220Ω
- Capteur Arduino Nano 33 BLE Sense Rev2 & l'interface Phyphox sur téléphone
- Câblages et matériel électronique
- Règle millimétrée

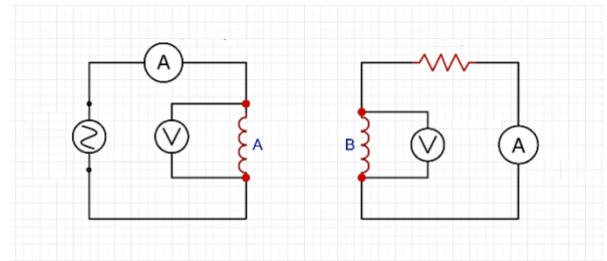


Schéma 3 : Schéma électrique de l'expérience

Méthode

La bobine A (bobine primaire) est branchée au GBF. Un voltmètre est branché en dérivation à chaque bobine. Deux ampèremètres sont ajoutés en série avec une résistance placée entre la bobine B et la borne de l'ampèremètre. La distance d entre les bobines est modifiée. La tension efficace et l'intensité en sortie sont mesurées.

Résultats

Par définition, $P = U \times I$

$$\text{Et, } \eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{fournie}}}$$

Distance d (cm)	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0
Tension du GBF (V)	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Fréquence (kHz)	4,927	4,927	4,927	4,927	4,927
U_A (V)	$5,23 \pm 0,20$	$5,23 \pm 0,20$	$5,23 \pm 0,20$	$5,23 \pm 0,20$	$5,23 \pm 0,20$
U_B (V)	$4,93\text{E-}1 \pm 0,02$	$2,32\text{E-}1 \pm 0,01$	$1,10\text{E-}1 \pm 0,05$	$6,0\text{E-}2 \pm 0,30$	$4,2\text{E-}2 \pm 0,20$
I_A (A)	$6,8\text{E-}2 \pm 0,04$	$6,8\text{E-}2 \pm 0,04$	$6,8\text{E-}2 \pm 0,04$	$6,8\text{E-}2 \pm 0,04$	$6,8\text{E-}2 \pm 0,04$
I_B (A)	$2,88\text{E-}3 \pm 0,004$	$1,33\text{E-}3 \pm 0,001$	$6,0\text{E-}4 \pm 0,003$	$3,4\text{E-}4 \pm 0,002$	$1,9\text{E-}4 \pm 0,001$
P_A (W)	$3,556\text{E-}1 \pm 0,2$	$3,556\text{E-}1 \pm 0,2$	$3,556\text{E-}1 \pm 0,2$	$3,556\text{E-}1 \pm 0,2$	$3,556\text{E-}1 \pm 0,2$
P_B (W)	$1,42\text{E-}3 \pm 2,0\text{E-}3$	$3,09\text{E-}4 \pm 2,0\text{E-}4$	$6,60\text{E-}5 \pm 3,0\text{E-}4$	$2,04\text{E-}5 \pm 1,6\text{E-}4$	$7,98\text{E-}6 \pm 4,5\text{E-}5$
Rendement (%)	$3,99\text{E-}1$	$8,7\text{E-}2$	$1,9\text{E-}2$	$6,0\text{E-}3$	$2,0\text{E-}3$

Tableau 2 : Mesures expérimentales de la transmission d'énergie à distance



Graphique 1 : Graphique de la norme du champ magnétique en fonction du temps. Application Phyphox

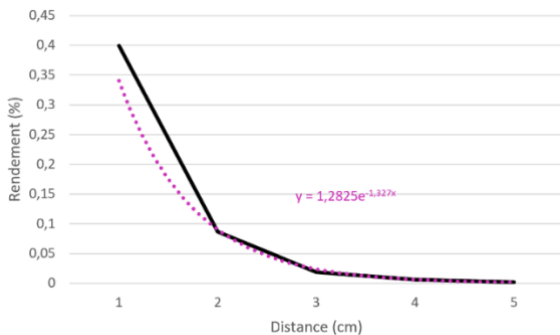
Traitement des données

Analyses prévues

Calculs des incertitudes de mesures liées aux multimètres, grâce à la formule donnée par la notice du multimètre :

$$u(P) = P \sqrt{\left(\frac{u(U)}{U}\right)^2 + \left(\frac{u(I)}{I}\right)^2} \text{ avec } u(\text{mesure tension}) = \text{mesure} \times 1\% + 5\text{pts et } u(\text{mesure intensité}) = \text{mesure} \times 1,5\% + 5\text{pts}$$

Graphiques ou courbes



Graphique 2 : Graphique du rendement de la transmission en fonction de la distance

Discussion et interprétation

À l'aide de la carte Arduino Nano, l'évolution du champ magnétique autour de la bobine B en fonction du temps a été enregistrée et analysée. Les variations de la valeur de ce champ sont directement liées à l'augmentation de la distance entre la bobine et la carte Arduino. Cependant, cette dernière ne permet pas de mesurer directement l'intensité et la tension électriques. Lorsque le capteur Arduino est placé à proximité ou à l'intérieur de la bobine, un champ magnétique intense et non uniforme est détecté, caractérisé par des variations significatives dans les composantes (xxx, yyy, zzz), en raison de la géométrie de la bobine et de son positionnement. La norme totale du champ magnétique, mesurée à 88,01 μT , diminue rapidement à mesure que le capteur s'éloigne de la bobine, conformément à la loi de décroissance des champs magnétiques. Ces résultats confirment que l'intensité et la direction du champ magnétique sont fortement influencées par la distance, validant le comportement théorique attendu pour une bobine électromagnétique.

L'expérience met en évidence que le rendement de transfert d'énergie entre les deux bobines diminue fortement avec l'augmentation de la distance. Lorsque les bobines sont proches (0 cm), le rendement reste très faible, à environ 0,4 %, et chute rapidement pour atteindre des valeurs quasi nulles dès 9 à 12 cm. Même à courte distance, le rendement demeure faible, ce qui peut être attribué à des pertes énergétiques dans le système, notamment des pertes par effet Joule dans les fils et des fuites de champ magnétique. Ces pertes sont probablement amplifiées par la géométrie et la nature des matériaux constituant les bobines.

Conclusion

D'après les calculs, le rendement dépend fortement de la distance entre les bobines. En effet, ce dernier diminue selon le modèle d'une exponentielle décroissante : $y = 1,2825e^{-1,327x}$. Cela est dû au fait que le champ magnétique généré par la bobine A décroît avec la distance, ce qui réduit l'induction électromagnétique dans la bobine B.

Ainsi, l'utilisation d'antennes omnidirectionnelles (bobines) présente plusieurs inconvénients, notamment un rendement très faible et de nombreuses pertes.

Amélioration du rendement, expériences sur les ondes mécaniques

Après avoir mis en évidence le phénomène d'induction dans la première partie, un rendement expérimental du transfert d'énergie a été mesuré en utilisant les ondes électromagnétiques dans la seconde partie. Suite à ce calcul, l'objectif a

été d'améliorer ce rendement, en explorant différentes méthodes pour augmenter la quantité d'énergie reçue par le récepteur.

Toutefois, un problème de matériel est survenu lors de la réalisation de nos expériences. En effet, pour émettre une onde électromagnétique, un courant alternatif doit être transmis dans une tige en métal, qui constitue une antenne, dont la longueur doit être d'environ la longueur d'onde utilisée. Avec les générateurs à notre disposition, la fréquence maximale pouvant être émise est de 2 MHz. La relation reliant la longueur d'onde à la fréquence pour des ondes électromagnétiques se déplaçant à la vitesse de la lumière, stipule que : $\lambda = \frac{c}{f}$. La longueur d'onde à utiliser est donc :

$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 10^6} = 150 \text{ m}$. Avec les moyens disponibles, il est donc impossible de créer une antenne de cette taille. Une augmentation de la fréquence nécessiterait des dispositifs également hors de notre portée.

La contrainte matérielle a conduit à l'utilisation des ondes mécaniques. En effet, celles-ci sont bien plus simples à manipuler à l'échelle expérimentale, et certaines d'entre elles sont invisibles et inaudibles, permettant de conserver un effet similaire à celui d'une onde électromagnétique du point de vue d'un observateur humain. Le choix s'est d'abord porté sur les ondes ultrasonores, répondant à tous les critères nécessaires, avec des générateurs, émetteurs et récepteurs déjà disponibles. Par la suite, les ondes sonores ont été privilégiées, les générateurs ultrasonores fournissant des ondes de trop faible intensité pour générer des interférences suffisantes.

L'objectif est de faire le lien entre la décroissance de l'intensité en fonction de la distance à l'émetteur pour ces deux types d'ondes dans l'espace, afin de les relier qualitativement, puis par une relation mathématique. Il s'agirait de plus de calculer un coefficient k , en fonction de la distance, permettant de relier le rendement d'une transmission par ondes ultrasonores à celui théorique mesuré dans des conditions équivalentes avec des ondes électromagnétiques.

Dans le cas d'ondes sphériques, il est établi pour les deux types d'onde que :

$$P(r) = \frac{P_{\text{totale}}}{4\pi r^2} \times e^{(-\alpha r)}$$

α est un coefficient d'atténuation spécifique pour chaque type d'onde donc :

Pour les ondes électromagnétiques :

$$P_r^{\text{EM}} = \frac{P_t^{\text{EM}}}{4\pi r^2} e^{-\alpha_{\text{EM}} r}$$

Pour les ondes sonores :

$$P_r^{\text{son}} = \frac{P_t^{\text{son}}}{4\pi r^2} e^{-\alpha_{\text{son}} r}$$

Les formules initiales étant ainsi valables pour les deux types d'ondes, elles décroissent de la même manière selon la distance : sous la forme d'une exponentielle décroissante. Toutefois, il n'a pas été possible de calculer les coefficients d'atténuation correspondants. Il pourrait être possible de déterminer expérimentalement ces deux coefficients, notamment en traçant les courbes de la puissance en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

L'utilisation des ondes mécaniques (sonores et ultrasonores) demeure donc cohérente dans le cadre de ces recherches, dont l'objectif est d'utiliser les ondes électromagnétiques pour transmettre de l'énergie.

Partie 3 : Optimisation de la transmission d'énergie par émission focalisée

Introduction et objectif

Les ultrasons sont des ondes mécaniques se propageant au travers des fluides (gaz, liquides) et des solides. Ils sont nommés ainsi car leur fréquence est supérieure à 20000 Hz, qui est le seuil des fréquences perçues par l'oreille humaine (20 à 20000 Hz). La fréquence des ultrasons est comprise entre 20 kHz et 10 MHz. La production d'ultrasons peut se faire de trois manières différentes, mais les générateurs piézoélectriques sont ceux utilisés pour notre projet. Ils sont constitués d'un triplet, c'est-à-dire d'une mosaïque de lamelles de quartz d'orientation et d'épaisseur rigoureusement identiques, collées entre deux disques d'acier. Ces deux disques sont reliés aux bornes d'une source de courant alternatif. Sous l'excitation du signal sinusoïdal appliqué par le courant alternatif, les lamelles de quartz se déforment en se contractant, et ce, à la même fréquence que le courant alternatif. Ces vibrations mécaniques sont alors transmises aux disques d'acier et au milieu dans lequel se trouve l'appareil. L'amplitude de déplacement des disques va de quelques micromètres à 20 μm de crête à crête. Le rendement électrique est de l'ordre de 95%.

La "réception" d'ultrasons consiste dans notre cas à convertir l'énergie mécanique de ces ondes en énergie électrique, à l'aide d'un récepteur à ultrasons.

L'objectif de cette partie est de tenter de minimiser les pertes d'énergie liées à une émissions omnidirectionnelle de l'onde mécanique, en s'intéressant à la transmission directionnelle.

Hypothèse

L'association d'un émetteur d'ondes ultrasonores à un réflecteur parabolique devrait optimiser significativement la directivité et l'efficacité de la propagation de l'onde mécanique dans une direction spécifique. Plus précisément, cette configuration permet de concentrer l'énergie acoustique en un faisceau collimaté, augmentant ainsi la portée et la précision de la transmission ultrasonore par rapport à un émetteur conventionnel sans réflecteur. Cette amélioration devrait se traduire par une réduction mesurable de la dispersion du signal et une augmentation quantifiable de l'intensité acoustique dans l'axe principal de propagation.

Matériel et méthode

Matériel

- Générateur Ultrasonore Sordalab, 40 kHz, mode continu
- Emetteur et récepteur à ultrasons Sordalab de forme tube (diamètre 2cm).
- 2 potences avec leurs pinces
- Réflecteur parabolique imprimé en 3D
 - Parois de 2mm et remplissage de 30%
 - 10 cm de diamètre, 2 cm de profondeur
- Câblages et matériel électronique
- Interface Capstone 550



Photo 1 : Parabole imprimé en 3D

Informations sur la parabole

Pour un générateur à ondes ultrasonores émettant à une fréquence de 40 kHz, la longueur d'onde λ peut être calculée à l'aide de la relation :

$$\lambda = \frac{343,000 \text{ (m/s)}}{40 \times 10^3, 000 \text{ (Hz)}} = 8,575E - 3 \text{ m} = 8,575 \text{ mm}$$

À partir de cette longueur d'onde, un réflecteur d'un diamètre $D = 10 \text{ cm} = 0,10 \text{ m}$, supérieur à 10 fois la longueur d'onde, est choisi, conformément aux recommandations pour maximiser le gain. Pour calculer la distance focale F , il faut fixer la profondeur de la parabole. Cette profondeur doit valoir environ 20 % du diamètre de la parabole, soit $d = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$.

$$F = \frac{D^2}{16d} \qquad F = \frac{(0,10)^2}{16 \times 0,02} = \frac{0,01}{0,32} = 3,125E - 2 \text{ m} = 31,25 \text{ mm}$$

Le point focal se situe donc à $31,25 \text{ mm} = 3,125 \text{ cm}$ du sommet de la parabole

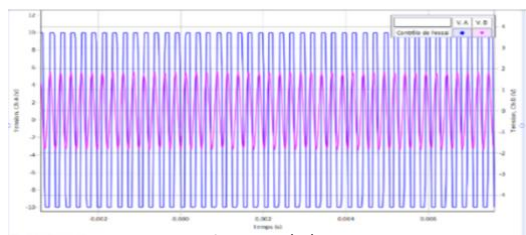
Méthode



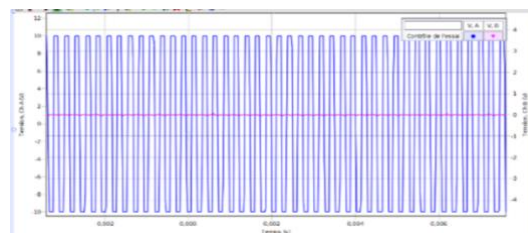
Photo 2 : Montage de l'expérience

L'émetteur et le récepteur ultrasonores sont placés sur une même potence à l'aide de pinces. La parabole est fixée sur une autre potence. L'interface Capstone est branchée au récepteur, en mode oscilloscope. Le récepteur est orienté de manière à aligner la parabole et celui-ci. La distance entre l'émetteur et le récepteur est ensuite modifiée et la courbe représentant la fonction, qui associe une tension reçue mesurée à une distance fixée, est tracée.

Mesures et observations



Avec parabole

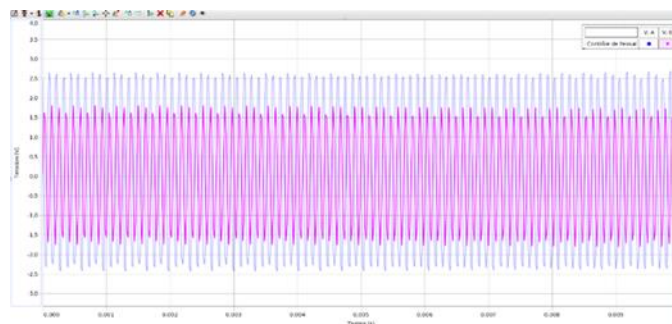


Sans parabole

Graphiques 3 et 4 : Graphique de la tension reçue en fonction du temps par l'oscilloscope Capstone

Distance (cm)	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0
Amplitude crête à crête (V)	0,818	0,622	0,492	0,249	0,013

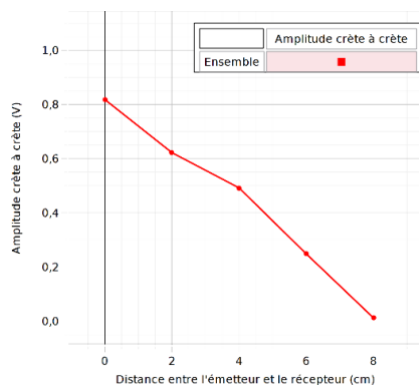
Tableau 3 : Mesures expérimentales de la tension reçue en fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur



Graphique 5 : Graphique de la tension reçue en fonction du temps par l'oscilloscope Capstone, distance de 0cm

Traitement des données

Graphique



Graphique 6 : Graphique de l'amplitude de tension reçue en fonction de la distance

Discussion et interprétation

Lorsque l'émetteur et le récepteur sont séparés d'une distance $d = 0$ cm, les pertes de tension sont déjà égales à $2,5 - 1,75 = 0,75$ V d'après les mesures réalisées grâce à l'oscilloscope. La qualité du matériel, la construction du matériel (pertes de vibration de la membrane, protections autour de l'émetteur) ou encore de transport de l'onde semble à l'origine de cette perte. La parabole permet néanmoins de réfléchir une plus grande partie des ondes que sans, comme l'illustre les captures d'écran de l'oscilloscope : la tension reçue est d'environ 2 V avec la parabole, et est nulle sans le dispositif.

Les amplitudes reçues dans les expériences avec et sans parabole, permettent d'affirmer que la parabole améliore la transmission des ondes. Cependant, des pertes subsistent, en partie à cause de la largeur de l'émetteur par rapport à celle du faisceau réfléchi par la parabole.

La distance entre l'émetteur et la parabole influe directement sur le rendement du dispositif, comme l'illustre les différentes mesures de tensions. En effet, alors que collés, la tension reçue est de 0,818 V, lorsque l'émetteur et le récepteur sont espacés de 6 cm, la tension reçue n'est plus que de 0,249 V. Toutefois, bien que l'amplitude crête à crête mesurée à une distance de 8 cm soit presque nulle (0,013 V), ces faibles résultats peuvent être attribués à plusieurs facteurs, tels que les pertes d'énergie dans l'air, l'imprécision des instruments de mesure, ainsi que la faible puissance de l'émetteur ultrasonore.

Conclusion

Lorsque la parabole est utilisée, le signal reçu reste significatif malgré les pertes dues à la propagation dans l'air. En effet, l'émetteur génère un faisceau d'ondes qui se propage initialement sous forme de cône, avec une divergence naturelle. La parabole capte ce faisceau conique et le redirige en un faisceau cylindrique, parfaitement orienté vers le récepteur. Grâce à sa forme géométrique, la parabole réfléchit et focalise les ondes de manière optimale, tout en réduisant les dispersions latérales. Ce phénomène de réflexion devient particulièrement évident lorsque la parabole est retirée : sans elle, le signal reçu devient négligeable. Ces résultats démontrent que sans un dispositif de focalisation, les ondes se propagent de manière dispersée dans plusieurs directions, et bien qu'une partie de l'énergie atteigne le récepteur, elle est largement dissipée dans l'espace, rendant le signal beaucoup moins intense. Notre parabole permet donc de minimiser les pertes d'énergie dans l'air, car sans elle, pratiquement aucun signal n'est reçu.

Partie 4 : Optimisation de la transmission d'énergie par beamforming

Introduction et objectif

Le filtrage spatial, ou formation de faisceaux, plus communément appelé beamforming, est une technique de traitement de signal, notamment utilisé dans le contrôle de la directivité des ondes sonores ou électromagnétiques. Le principe s'appuie sur l'utilisation d'un réseau d'émetteur et de récepteurs pour concentrer le signal d'émission dans une zone précise. Le beamforming nécessite de créer des interférences constructives dans la zone souhaitée, et des interférences destructives dans les zones alentours.

Pour des raisons pratiques, nous avons choisi une fréquence de travail en fonction de la distance entre les 2 émetteurs sonores utilisés ici 10 cm. Les émetteurs doivent être séparés d'une demi-longueur d'onde, soit $\lambda = 0,20 \text{ m}$. La fréquence nécessaire pour l'expérience est calculée selon la formule : $f = \frac{c}{\lambda}$

$$\frac{343}{0,2} = 1715 \text{ Hz}$$

L'objectif de cette partie est de concentrer une plus grande énergie vers le récepteur tout en minimisant la propagation d'onde dans des zones périphériques par l'utilisation d'interférences constructives et destructives.

Hypothèses

En utilisant plusieurs émetteurs sonores qui, combinés, forment des interférences constructives en direction du récepteur, et des interférences destructives dans les autres directions, le rendement pourrait être amélioré.

Matériel et méthode

Liste complète des équipements

- 2 émetteurs sonores
- GBF, 1715 Hz
- Fixation pour les émetteurs
- Récepteur à ondes ultrasonores
- Diode lumineuse
- 4 multimètres (2 ampèremètres & 2 voltmètres)
- Règle millimétrée
- Rapporteur avec graduation millimétrée
- Interface Capstone 550
- Câblage et matériel électronique

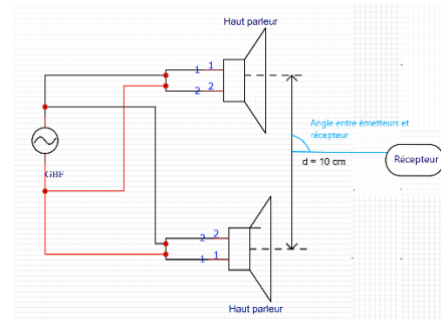


Schéma 4 : Schéma du montage de l'expérience

Étapes détaillées

Les émetteurs et le générateur sont placés sur une surface stable, orienté vers le récepteur. Les émetteurs sont mis en phase. Le récepteur, à l'aide d'une règle millimétrée, est placé à 20 cm des émetteurs, à la même hauteur. Une diode lumineuse est branchée au répéteur. Un ampèremètre et un voltmètre sont branchés à chacun des émetteurs. La diode s'allume. Les tensions et intensité délivrées par le générateur sont relevées. L'angle entre les émetteurs et le récepteur est modifié à l'aide du rapporteur et pour chaque angle, les tensions et intensités sont relevées. Le dispositif est replacé selon les conditions initiales et la distance est cette fois modifiée.

Mesures et observations

Angle (°)	Intensité acoustique au pic (V)	Tension émise (V)
0	0,33	0,4
20	0,22	
40	0,19	
45	0,18	
60	0,12	
80	0,1	
90	0,08	

Tableau 4 : Mesures expérimentales de la tension reçue en fonction de l'angle entre les émetteurs et le récepteur

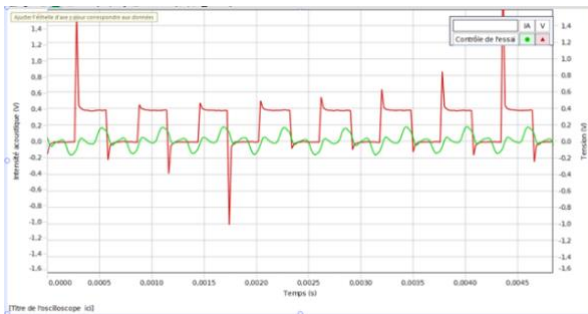


Angle de
 0°

L'intensité acoustique est élevée lorsque le récepteur est en face des enceintes.

Valeur de 0,33 V à son pic.

Le rendement est donc élevé pour cet angle



Angle de
 45°

L'intensité acoustique est moyenne lorsque le récepteur est décalé de 45° par rapport aux enceintes.

Valeur de 0,18 V à son pic.

Le rendement semble donc moyen.



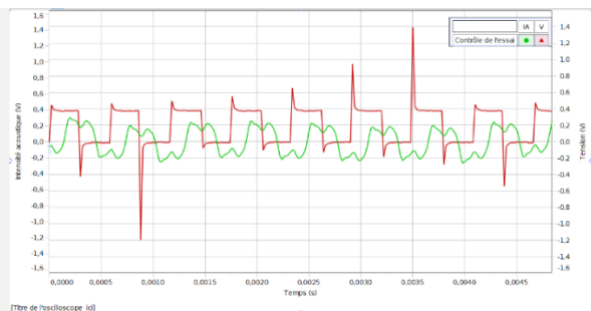
Angle de
 90°

L'intensité acoustique est faible voire inexistante lorsque le récepteur est décalé de 90° par rapport aux enceintes.

Valeur proche de 0,08 V à son pic.

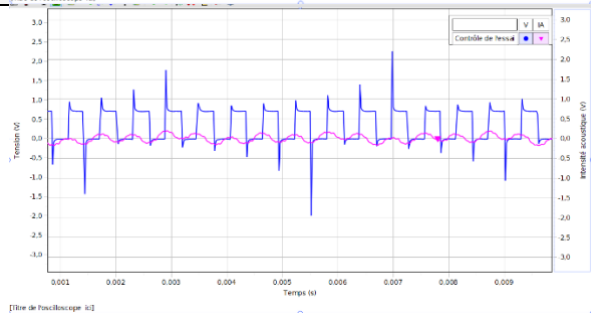
Le rendement est proche de 0.

Tableau 5 : Mesures expérimentales de l'intensité acoustique reçue avec des haut-parleurs séparés d'une demi-longueur d'onde



Angle de 0°

Intensité acoustique reçue de
0,21 V



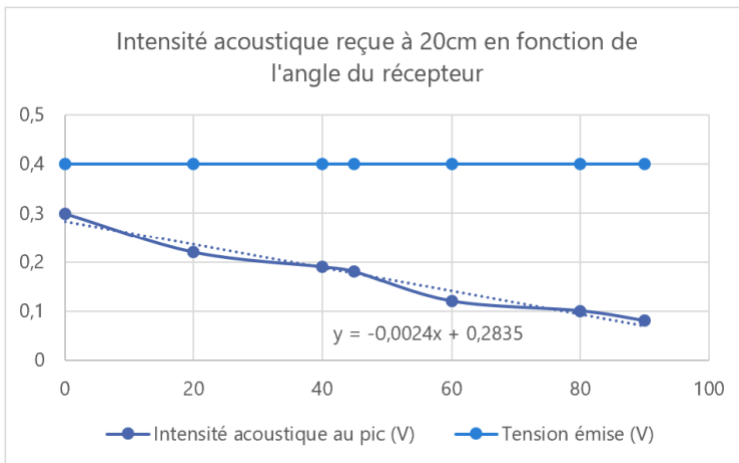
Angle de 90°

Intensité acoustique reçue proche
de 0 V

Tableau 6 : Mesures expérimentales de l'intensité acoustique reçue avec des haut-parleurs séparés d'une longueur d'onde

Traitement des données

Graphiques ou courbes



Graphique 7 : Graphique de l'intensité acoustique mesurée en fonction de l'angle entre les enceintes et le récepteur

Discussion et interprétation

L'intensité reçue est maximale pour un angle de 0° , c'est-à-dire lorsque les haut-parleurs et le récepteur sont en face, avec une valeur de $0,33 \text{ V}$. Au contraire, pour un angle de 90° , l'intensité reçue est seulement de $0,08 \text{ V}$. La diminution de l'intensité sonore reçue à mesure que l'angle augmente est modélisé selon l'équation :

$V = -0,0024 \times \theta(\text{en } ^\circ) + 0,2835$. Le lobe d'interférence constructives est donc orienté vers l'avant

Lorsque les enceintes sont séparées d'une longueur d'onde avec un angle de 0° , l'intensité maximale reçue est seulement de $0,21 \text{ V}$. Au contraire, pour une séparation d'une demi-longueur d'onde à angle égal, l'intensité maximale reçue est de $0,33 \text{ V}$.

Ainsi, une séparation des haut-parleurs correspondant à une demi-longueur d'onde constitue la configuration idéale pour générer des interférences constructives dans l'axe avant du montage, tout en produisant des interférences destructives sur les côtés. Cette disposition permet d'optimiser la directionnalité et l'efficacité du transfert d'énergie sonore.

Conclusion

L'expérience met en évidence les principes d'interférences sonores et leur application pour gérer la directivité de la transmission d'énergie par le biais d'ondes mécaniques sonores. L'intensité acoustique varie selon deux facteurs principaux : l'angle d'émission et la distance séparant les haut-parleurs.

En exploitant des interférences constructives vers l'avant et des interférences destructives sur les côtés, la transmission des ondes, et donc d'énergie est plus importante vers le récepteur, tandis qu'elle est minimisée dans les zones périphériques. Ainsi, cette transmission d'énergie améliore le rendement de la transmission d'énergie, par rapport à une émission omnidirectionnelle.

Conclusion

Dans une première expérience, le phénomène d'induction a été mis en évidence, puis exploité pour étudier l'influence de la distance sur l'importance du champ électrique. D'après les expériences de Faraday et d'Oersted, le passage d'un aimant dans une bobine alimentée en courant alternatif induit un champ magnétique. De plus, entre deux bobines reliées par un noyau de fer doux, un champ magnétique se crée. Dans une deuxième expérience, ce phénomène a été utilisé pour démontrer qu'un champ magnétique permet d'induire une tension dans une seconde bobine. Les résultats de l'expérience permettent de valider l'efficacité du principe d'induction, tout en démontrant ses limites. En effet, des pertes significatives dues en partie à la perte par effet Joule, à des fuites de champs magnétiques, et à l'imperfection du matériel utilisé sont à noter.

Dans un deuxième temps, en choisissant d'assimiler les bobines à des antennes omnidirectionnelles, la transmission peu directive d'énergie a été étudiée. Ce mode d'émission présente des rendements très faibles, même à courte distance. Nos mesures ont montré que l'énergie reçue décroît rapidement, confirmant l'idée que la transmission omnidirectionnelle disperse la puissance dans toutes les directions, rendant ainsi inefficace une transmission à longue portée.

Pour tenter de répondre à ce problème et donc d'améliorer le rendement, deux systèmes ont été mis en place. Ces systèmes utilisent des ondes sonores et ultrasonores, reliées aux ondes électromagnétiques par un modèle de décroissance similaire. En effet, les ondes sonores et ultrasonores étaient expérimentalement réalisables, contrairement aux ondes électromagnétiques.

Un réflecteur parabolique a ainsi été utilisé pour diriger les ondes ultrasonores dans une direction précise. Cette approche s'est révélée efficace pour augmenter la puissance reçue au niveau du récepteur, en limitant les pertes dans le milieu de transmission. Cependant, les mesures expérimentales montrent qu'il subsiste des pertes résiduelles importantes (qualité des émetteurs et des récepteurs, dissipation dans l'air, etc.). La concentration des ondes électromagnétiques à l'aide d'une antenne directionnelle améliorerait donc grandement le rendement d'une transmission d'énergie à distance.

Une approche complémentaire, mettant en jeu les interférences constructives et destructives, a également été étudiée. Plusieurs émetteurs ont été alignés et en mis en phase. Cette méthode a permis de concentrer davantage l'énergie émise dans une zone spécifique, augmentant de manière significative le rendement par rapport à une transmission omnidirectionnelle. L'expérience a montré que la formation de « lobes » d'interférences constructives permet d'augmenter la puissance reçue dans une direction souhaitée, tandis que les ondes s'annulent vers les « côtés » du dispositif. Cette méthode permettrait donc de réduire les interférences entre antennes, dans un réseau de télécommunications aujourd'hui surchargé, en plus d'augmenter le rendement de la transmission d'énergie à distance.

Ces travaux mettent donc en évidence plusieurs points essentiels. Tout d'abord, bien que la transmission d'énergie par onde soit réalisable, elle reste limitée par des facteurs cruciaux tels que la distance de transmission, les pertes inhérentes au matériel utilisé et à la dispersion dans le milieu. Ensuite, les méthodes directionnelles, comme l'utilisation de réflecteurs focaux ou d'interférences constructives, sont des solutions prometteuses pour optimiser le transfert d'énergie dans des systèmes à courte, voire à moyenne distance.

Les résultats obtenus tout au long de ces expériences ouvrent la voie à plusieurs perspectives intéressantes. Il s'agirait d'améliorer la qualité du matériel utilisé afin de réduire considérablement les pertes et ainsi augmenter l'efficacité des systèmes de transmission. De plus, bien que la transmission à grande distance reste pour nous hors de portée, nous espérons que notre projet a permis de mettre en lumière cette nouvelle méthode de transmission d'énergie à distance. En effet, des applications à grande échelle pourraient être envisagées, telles que l'alimentation de dispositifs portatifs. C'est déjà le cas avec plusieurs entreprises, comme Energous, qui propose de mettre en place un système bien plus avancé que le nôtre, permettant de minimiser les pertes. Des investissements conséquents en termes de recherche et développement dans ces entreprises multinationales pourraient permettre, à terme, une réduction de l'utilisation des batteries et des câbles d'alimentation dans des dispositifs portables alimentés en continu. Les progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle pourraient être combinés avec nos observations pour tenter de mettre en place des systèmes

intelligents permettant d'adapter en temps réel la direction et la fréquence du signal envoyé, en fonction des besoins précis de l'utilisateur.

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet et qui nous ont soutenus tout au long de son développement. Nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos professeurs de Physique et Chimie, Aude Leray, Carlos Alves Da Silva et Sylvain Fischer. C'est grâce à leurs conseils éclairés et à leur suivi attentif que ce projet a pu voir le jour et être mené à bien.

Nous exprimons également notre gratitude à Raymond Piccoli, directeur du Laboratoire de Recherche sur la Foudre, pour son précieux temps à nous aider pour trouver un sujet. Finalement, nous remercions le lycée qui nous a permis d'établir ce groupe scientifique !

Bibliographie

CEA, 31 mai 2018, Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication

MATLAB, 9 Novembre 2022, What Are Phased Arrays? Video YouTube

Iain Explains Signals, Systems, and Digital Comms, 29 Juin 2020, What is Beamforming?

Femto, Mars 2021, Induction électromagnétique

Joshua Pinchault, 30 avril 2018, L'émission et la réception des ondes radio - fonctionnement d'une antenne radio

Wikipédia, Antenne radioélectrique

Guillaume Darding, 7 janvier 2021, Technique : l'alternateur

ZONETRONIK, Charger des batteries sans fil de façon compacte et efficace

Antoine vs Physique, 10 octobre 2018, COMMENT FONCTIONNENT LES CHARGEURS SANS-FIL ?

Wikipédia, Câble coaxial

Académie de Bordeaux, De l'alternatif au continu

Listes des abréviations scientifiques utilisées

U : Tension (en volts, V)	η Le rendement (sans unité)	$\vec{J}$ Est vecteur densité de courant (en ampères par mètre carré ($A \cdot m^{-2}$))
I : Intensité du courant (en ampères, A)	λ désignant la longueur d'onde ($m \cdot s^{-1}$)	ϵ_0 Est la permittivité du vide ($8.854 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$)
R : Résistance électrique (en ohms, Ω)	v La vitesse de propagation de l'onde ($m \cdot s^{-1}$)	$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ Est la variation temporelle du champ électrique (en $V \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)
P : Puissance (en watts, W)	f La fréquence (en Hz)	$\vec{E}$ Est le vecteur champ électrique (en $V \cdot m^{-1}$)
N : Nombre de spires	μ_0 Est la perméabilité du vide ($4\pi \times 10^{-7} N \cdot A^{-2}$)	$\vec{B}$ Est le vecteur champ magnétique (en teslas, T)
P(r) la puissance reçue à la distance r de l'émetteur	α le coefficient d'atténuation (en m^{-1}) dépendant du milieu dans lequel évolue l'onde. Il existe des différences importantes dans la manière dont ce coefficient d'atténuation est déterminé pour chaque type d'onde. Le terme $e^{-\alpha r}$ prend donc en compte la perte d'énergie supplémentaire causée par l'absorption ou l'atténuation dans le milieu (par exemple, l'air dans notre cas, l'eau ou un matériau).	
Ptotale la puissance émise		