

Déterminer la vitesse du son

Fiche à destination des enseignants

Durée prévue : 1h30

Notions et contenus du programme de seconde :

Émission et propagation d'un signal sonore. Vitesse de propagation d'un signal sonore.

Capacités visées :

- Mesurer la vitesse d'un signal sonore.
- Utiliser un dispositif comportant un microcontrôleur pour produire un signal sonore.

Remarque : dans l'activité proposée, le microcontrôleur permet de produire et de recevoir un signal sonore.

Capacités requises et exploitées :

- Exploiter la relation entre vitesse, durée et distance de propagation.

Matériel nécessaire (à titre indicatif) :

- ✓ Un buzzer (par exemple un module buzzer compatible Arduino®).
- ✓ Un microphone (par exemple Microphone Electret avec amplification) si possible monté sur un support mobile, branché sur l'alimentation 5V ou 3,3V (minimise le bruit) du microcontrôleur.
- ✓ Un bouton poussoir, par exemple : 
- ✓ Un ou plusieurs tuyaux (type gaine électrique) de longueur connue (attention, les longueurs annoncées doivent être vérifiées).
- ✓ Quelques fils.
- ✓ Un microcontrôleur (les mesures décrites ci-dessous ont été réalisées avec une carte Arduino® UNO).
- ✓ Une plaque d'essai (*breadboard*).

Commentaires, adaptations possibles

Cette activité vise à réaliser une détermination de la vitesse du son en s'inspirant de mesures historiques : il s'agit de mesurer la durée de propagation pour une distance connue.

Plusieurs déterminations historiques consistaient à déclencher la mesure de durée par l'émission d'un signal lumineux (considéré comme se propageant instantanément par rapport au son).

Le dispositif automatise ici le démarrage du « chronomètre » par mesure de la date à laquelle on émet un son bref (par appui sur un bouton poussoir). L'arrêt du chronomètre est déclenché par la réception du signal sonore par un microphone situé à l'extrémité d'un tuyau sonore de longueur connue. Il est fortement conseillé d'effectuer des tests pour adapter le seuil de déclenchement au matériel utilisé (il a été fixé à 400 dans l'exemple précédent, du fait d'une mesure en « silence » de l'ordre de 300). Pour faire cette adaptation, il est conseillé préalablement de visualiser le signal délivré par le microphone par exemple à l'aide du traceur série, d'une part lorsque le dispositif est dans le bruit ambiant, d'autre part lorsqu'il reçoit le son émis par le buzzer.

La durée mesurée peut être lue sur le *Moniteur série* du logiciel open-source *Arduino IDE* : ceci oblige à laisser le moniteur branché à l'ordinateur.

La mesure peut être complétée par une mesure complémentaire utilisant un émetteur et un récepteur ultrasonores et une carte d'acquisition (déclenchement sur l'émission, affichage du signal émis et du signal reçu et mesure de la durée de propagation).

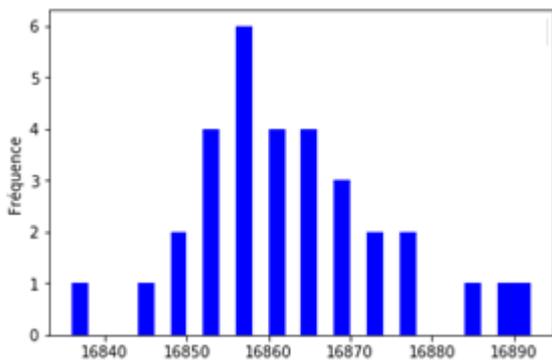
Les microcontrôleurs courants permettent d'afficher des durées en microseconde (avec le plus souvent une résolution de 4µs). Il est conseillé d'estimer la durée entre émission et réception lorsque le buzzer et le microphone sont physiquement en contact. Cette durée prend en compte l'inévitable distance séparant les deux membranes et éventuellement les durées liées au traitement électronique des signaux. Avec le matériel présenté ci-dessous, cette

durée vaut 0,47ms (avec une faible dispersion, une cinquantaine de mesures donnant de façon approximativement équiprobable 468 μ s et 472 μ s).

Pour plus de précision, il est conseillé d’effectuer des mesures avec deux tubes de longueurs différentes. Il est possible de trouver dans le commerce des gaines électriques de 5 m par exemple qui sont enroulées (voir photos ci-dessous) : il est commode de sortir seulement les deux extrémités du tube. Dans le cas présenté, le tube mesure en fait 5,15 m. Le câblage étant relativement simple, en fonction de la familiarité des élèves avec le matériel, il est envisageable de le faire réaliser par les élèves. On peut aussi utiliser deux plaquettes (une pour le buzzer et le bouton poussoir, l’autre pour le microphone) pour plus de commodité.

Par contre, il est conseillé de fournir le code, en l’adaptant au microcontrôleur utilisé, en demandant éventuellement de le commenter. Ce code est l’occasion d’utiliser à nouveau une boucle *while* qui pourra être utilisée dans d’autres contextes (avec Python).

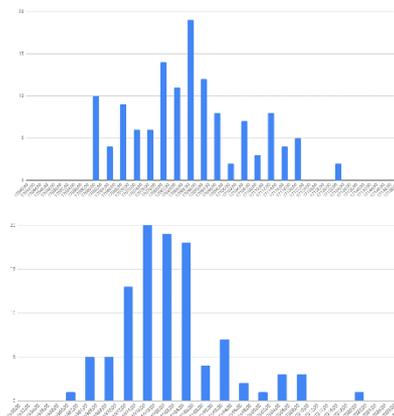
En classe de seconde, la discussion sur les incertitudes, en particulier sur celle de la célérité obtenue, ne pourra pas être menée complètement. Par contre, la répétition de mesures, bien plus aisée qu’avec une carte d’acquisition et une détermination graphique, permet d’évaluer la dispersion d’une série de mesures indépendantes et de mener une approche statistique pour estimer l’incertitude-type sur les durées mesurées. Par exemple on peut afficher la dispersion de 32 mesures (en μ s) pour une longueur de tuyau de 5,15 m (figure ci-dessous et code Python utilisé).



```
import matplotlib.pyplot as plt
t1=[16836,16848,16860,16856,16864,16868,16860,16868,16852,16860,16876,16856,16864,16888,16892,16860,16852,16872,16872,16852,16868,16848,16876,16844,16856,16856,16856,16852,16856,16864,16864,16884]
plt.hist([t1],range=(min(t1),max(t1)),bins=int((max(t1)-min(t1))/2),color=['b'])
plt.ylabel('Fréquence')
plt.legend(['durée pour 5,00 m'])
```

Ci-dessous d’autres exemples de mesures (calculs et histogrammes réalisés avec GoogleSheets® :

- Avec un tuyau de longueur $d_1 = 5,15$ m :
 Nombre de mesures : 130
 Valeur moyenne : $t_1 = 17,09$ ms
 Incertitude-type : 0,018 ms
- Avec un tuyau de de longueur $d_2 = 2,00$ m :
 Nombre de mesures : 102
 Valeur moyenne : $t_2 = 6,98$ ms
 Incertitude-type : 0,011 ms



Ces deux dernières mesures permettent de calculer la célérité en éliminant l’éventuel décalage systématique : $v = \frac{d_1 - d_2}{t_1 - t_2}$; on trouve avec les valeurs ci-dessus 312 m.s⁻¹.

Il est difficile de comparer à une valeur de référence du fait de la propagation guidée. L’enjeu, pour les élèves, n’est donc pas de faire une telle comparaison mais de savoir si la vitesse du son dans un tuyau étroit peut être approximativement la même qu’en propagation libre. En dehors du mode fondamental, la célérité des ondes guidées est toujours inférieure à la célérité des ondes se propageant « à l’air libre »... à condition que d’autres modes puissent se propager, ce qui est difficile ici (le son émis a une fréquence de 2000 Hz, soit une longueur d’onde d’environ 17 cm alors que le diamètre du tuyau est bien plus petit, 13 mm). Pour plus d’informations sur la propagation guidée des ondes sonores dans des tuyaux cylindrique, on pourra consulter l’article de BUP de R. Moreau (1992) *Propagation guidée des ondes acoustiques dans l’air*, vol. 86, N°742.

Au niveau de la classe de seconde, l'objectif est seulement, au-delà de la méthode expérimentale mise en œuvre, d'illustrer que la célérité peut être inférieure à celle prévue en champ libre, sans expliquer pourquoi. Les consignes de la fiche élève sont données à titre indicatif, tout comme les documents proposés.

Exemple de branchement (conforme au code fourni) :

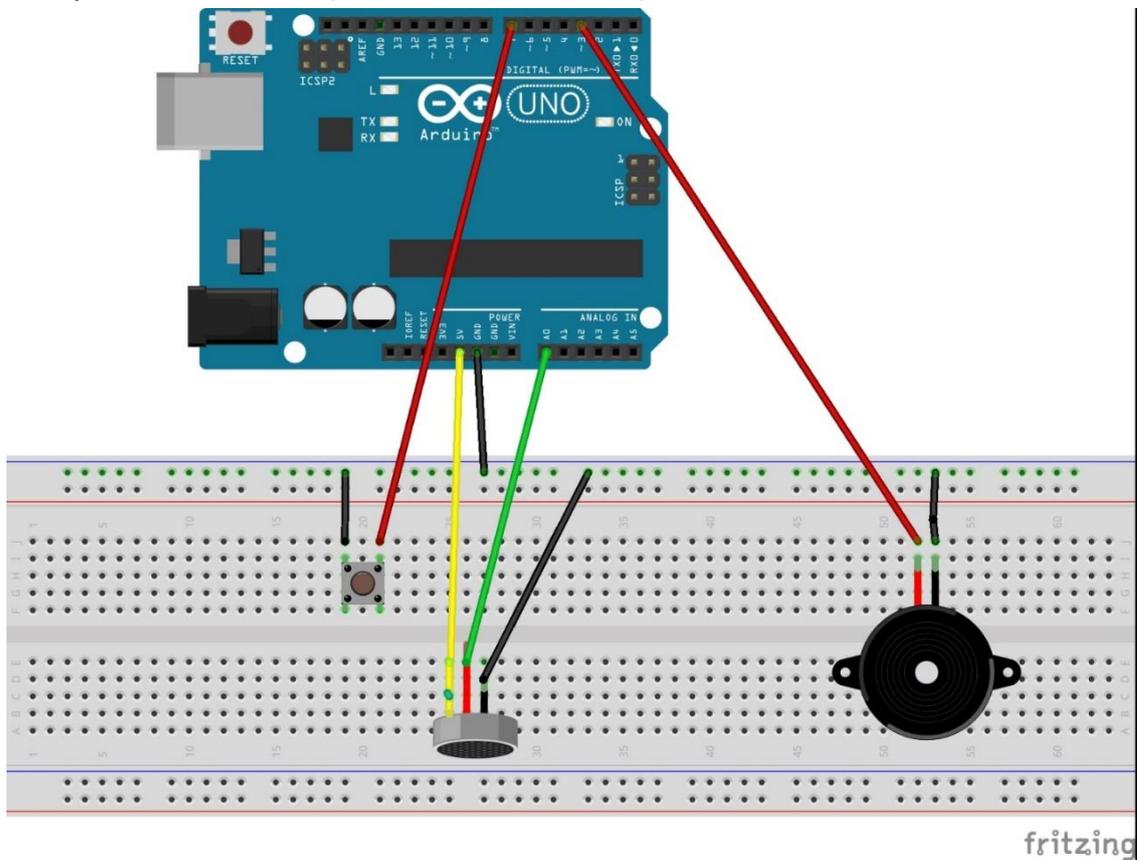


Photo d'un exemple de montage réalisé :



Programme Arduino (avec commentaires)



```

void setup() {
    pinMode(3,OUTPUT);
    Serial.begin(9600) ;
    declenche=0;
    test=0;
    tempsinitial=0;
    pinMode(7,INPUT_PULLUP); // le bouton poussoir
}

void loop() {
    declenche=digitalRead(7);
    if ((declenche==LOW) && (test==0))
    { tempsinitial=micros();
      test=1;
      tone(8,2000,30); /
    }
    while (test==1) {
        Tension = analogRead(A0) ;
        if (Tension<40)
        { /*Serial.print("Tension =");
          Serial.println(Tension); //peut être affic
        }
        else
        {
            t=micros();
            mesure=t-tempsinitial;
            Serial.println("STOP");
            Serial.println(mesure);
            delay(500);
            test=0;        }
    }
}
    
```

```

int Tension ;
boolean declenche;
boolean test;
unsigned long tempsinitial;
unsigned long t;
int mesure;
void setup() {
    pinMode(3,OUTPUT);
    Serial.begin(115200); // peut être réglé à 9600, l'essentiel étant que le moniteur série
    soit sur la même valeur
    declenche=0;
    test=0;
    tempsinitial=0;
    pinMode(7,INPUT_PULLUP); // permet d'utiliser le bouton poussoir (interrupteur fermé=0
    et interrupteur ouvert=1)
}
void loop() {
    declenche=digitalRead(7);
    if ((declenche==LOW) && (test==0))
    { tempsinitial=micros();
      test=1;
      tone(3,2000,30); // émission d'un signal carré de fréquence 2000 Hz et de durée 30 ms
    }
    while (test==1) {
        Tension = analogRead(A0) ;
        if (Tension<400)
        { /*Serial.print("Tension =");
          Serial.println(Tension); */ //peut être affiché pour contrôle
        }
    }
    else
    {
        t=micros();
        mesure=t-tempsinitial;
        Serial.println("STOP"); // peut-être affiché pour séparer deux mesures et indiquer que le
        micro a délivré un signal suffisant
        Serial.println(mesure);
        delay(500);
        test=0;    } } }
    
```

Le code pour tester visuellement la valeur de la tension délivrée (afin de déterminer la tension de seuil) :

```

int Tension ;
boolean declenche;
unsigned long tempsinitial;
unsigned long t;
void setup() {
    pinMode(3,OUTPUT);
    Serial.begin(9600) ;
    declenche=1;
    pinMode(7,INPUT_PULLUP); // bouton poussoir
}
void loop() {
    Tension = analogRead(A0) ;
    declenche=(digitalRead(7)-1);
    Serial.println(Tension);
    if (declenche==HIGH)
        tone(3,2000,20); //on joue la note
    declenche=0;
}
    
```

La vitesse du son change-t-elle lorsque le son est guidé ?

Fiche à destination des élèves

Dans cette activité, vous allez réaliser une détermination expérimentale de la vitesse du son lorsqu'il se propage dans un tuyau.

Vous disposez pour ceci des documents ci-dessous, du matériel disponible et du programme permettant de donner les instructions au microcontrôleur.

Matériel nécessaire

- ✓ Un thermomètre
- ✓ Un buzzer
- ✓ Un microphone
- ✓ Un bouton poussoir
- ✓ Un ou plusieurs tuyaux (type gaine électrique) de longueurs connues
- ✓ Quelques fils
- ✓ Un microcontrôleur
- ✓ Une plaque d'essai (*breadboard*)

Les questions qui suivent les documents permettent d'aider la réalisation de la tâche.

Document ① : Une expérience historique

Une des expériences historiques permettant de déterminer la vitesse du son dans l'air a été réalisée par François Arago, Louis Joseph Gay-Lussac et Gaspard de Prony en 1822 près de Paris sur ordre du Bureau des Longitudes. Présenté ci-dessous, l'extrait du traité élémentaire de physique (1836) de Monsieur l'abbé Pinault relate cette expérience.

Les deux stations que l'on avait choisies étaient Villejuif et Montlhéry. À Villejuif, le capitaine Boscary fit déposer, sur un point élevé, une pièce de six, avec des gargousses de deux et trois livres de poudre¹. À Montlhéry, le capitaine Pernetty fit déposer une pièce de même calibre, avec des gargousses de même poids. Les expériences furent faites de nuit et commencèrent à onze heures du soir, le 21 et le 22 juin 1822. De Villejuif on apercevait très distinctement le feu de l'explosion de Montlhéry et vice versa : le ciel était serein et à peu près calme. La température de l'atmosphère était de 15,9 degrés Celsius. Les coups de canon des deux stations opposées étaient réciproques, de sorte que les résultats ne fussent pas influencés par le vent. Chacun des observateurs notait sur son chronomètre le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du son. On peut prendre 54,6 secondes pour le temps moyen que le son mettait à passer d'une station à l'autre. Les deux canons étaient à une distance de 9 549,6 toises².

¹ La pièce de six est une pièce de canon et les gargousses sont des enveloppes de tissu ou de papier contenant de la poudre à canon.

² La toise est une ancienne unité de longueur : une toise équivaut à 1,949 m.

Document ② : Vitesse du son dans l'air

La vitesse v_{son} (en m/s) du son dans l'air dépend de la température θ (en °C) de l'air suivant la relation :

Document ③ : Branchements du microphone et du buzzer

Buzzer

Arduino	VMA319
Entrée digitale (2 à 12)	S
GND	-
	+ (non utilisée)

Microphone

Arduino	Microphone Electret avec ampli MAX4466
GND	GND
5V	VCC
Sortie analogique (A0 à A5)	OUT

Programme Arduino

```

int Tension ;
boolean declenche;
boolean test;
unsigned long tempsinitial;
unsigned long t;
int mesure;
void setup() {
    pinMode(3,OUTPUT);
    Serial.begin(9600) ; // peut être réglé à 9600, l'essentiel étant que le moniteur série soit sur la même valeur
    declenche=0;
    test=0;
    tempsinitial=0;
    pinMode(7,INPUT_PULLUP); // permet d'utiliser le bouton poussoir (interrupteur fermé = 0 et interrupteur ouvert=1)
}
void loop() {
    declenche=digitalRead(7);
    if ((declenche==LOW) && (test==0))
        { tempsinitial=micros();
          test=1;
          tone(8,2000,30); // émission d'un signal carré de fréquence 2000 Hz et de durée 30 ms
        }
    while (test==1) {
        Tension = analogRead(A0) ;
        if (Tension<400)
            { /*Serial.print("Tension =");Serial.println(Tension);//peut être affiché pour contrôle */
              }
        else
            {
                t=micros();
                mesure=t-tempsinitial;
                Serial.println("STOP"); // peut-être affiché pour séparer deux mesures et indiquer que le micro a délivré un signal
                suffisant
                Serial.println(mesure);
                delay(500);
                test=0; } } }
    
```

Questions

- 1) Un microcontrôleur peut générer un son bref et déclencher une mesure de durée à partir de l'émission de ce son. Proposer un dispositif (on fera un schéma) utilisant le matériel disponible (en particulier un tuyau de distance connue pour canaliser la propagation du son) permettant de déterminer la vitesse du son.
- 2) Quelle doit-être la condition pour arrêter la mesure de la durée de propagation ?



Appeler le professeur pour lui présenter vos propositions, puis poursuivez si elles sont validées.

- 3) Réaliser le montage, téléverser le programme, l'adapter éventuellement et le commenter ; effectuer une première mesure.
- 4) Reproduire un grand nombre de mesures (environ 30), discuter la dispersion de la série de mesures, puis calculer la moyenne.
- 5) En déduire une première estimation de la vitesse du son et comparer à la valeur attendue. Proposer une explication possible.
- 6) Comment pourrait-on améliorer la détermination expérimentale ?