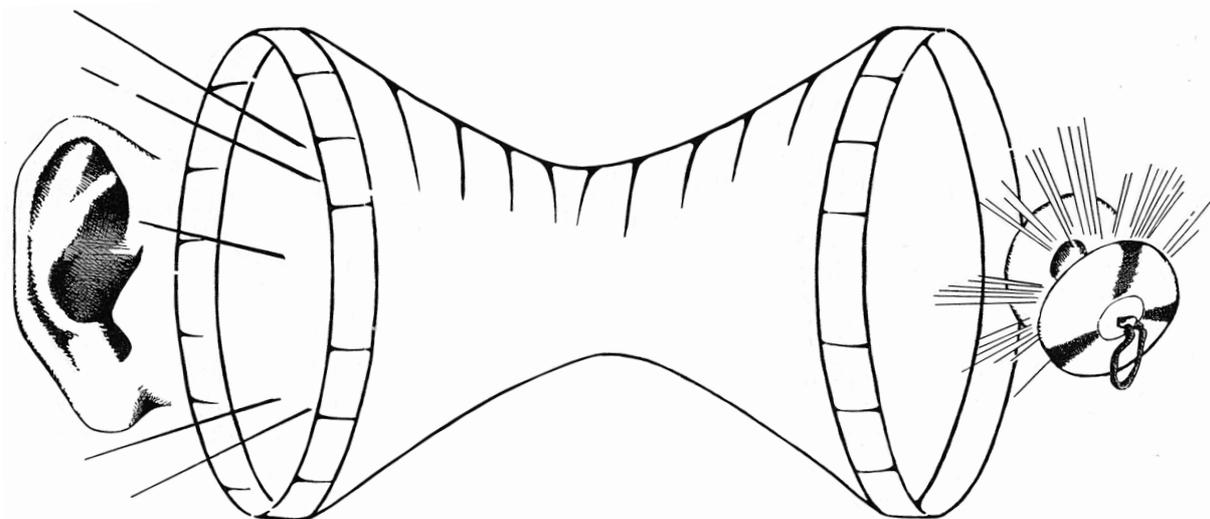


# PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DE PRESSION DANS L'AIR CONTENU DANS UN TUYAU

PROPAGATION DANS LE CO<sub>2</sub> — RÉFLEXIONS - CÉLÉRITÉS

MONTAGES DE DÉMONSTRATION

APPAREIL MV 4000 00001



## MODE D'EMPLOI ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



Centre technique et pédagogique  
de l'Enseignement de la Communauté française

*«Je vous conseille, si vous voulez être sérieusement physicien pour vous-même, d'ouvrir quelque mémoire de ce genre sur une grande table, et de réaliser, de vos propres mains, les expériences qui y sont décrites. Une après l'autre. Oui, ces vieilles expériences dont on dit: "Cela est bien connu", justement sans les avoir faites. Travail ingrat,...»*

ALAIN

*«Propos sur l'éducation»*

*Les «chemins concrets vers l'abstraction».*

Jean-Michel ZAKBARTCHOUR  
Professeur (de français)  
au Lycée J.-J. Rousseau à CREIL  
Claude HAGÈGE  
Professeur au Collège de France

*«La main à la pâte»*

Georges CHARPAK  
Prix Nobel de physique 1992  
Promoteur d'une méthode nouvelle  
d'enseignement des sciences

*«Nulli in verba»*

Devise de la «Royal Society»

*«Une grenouille, au fond d'un puits, disait que le ciel n'est pas plus grand que la margelle. Il faut voir le tout aussi bien que la partie...»*

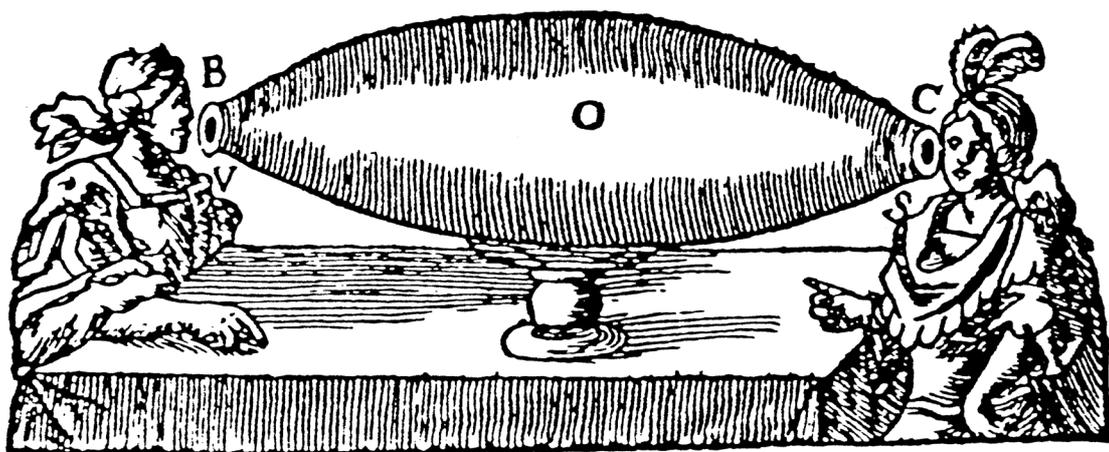
Mao-Zedong (Mao Tsé-tung)  
cité par Alain PEYREFITTE  
*«Quand la Chine s'éveillera...»*

*«L'imagination, l'originalité, c'est apprendre à se heurter au réel et y adapter sa vision, ses idées. La meilleure formation c'est l'apprentissage de la démarche scientifique, l'alternance féconde entre l'observation du réel et sa théorisation. C'est aussi prendre des risques, rompre les habitudes. C'est avoir le courage d'inventer.»*

Claude ALLÈGRE  
*«La défaite de Platon»*

*«Je le vérifie tous les jours. Notre enseignement est beaucoup trop un enseignement des résultats. Il n'entretient trop souvent qu'une faculté pédante et une mémoire docile. Cent jeunes gens à qui je parle sont bien plus savants en géométrie que ne l'était Euclide, mais peu d'entre eux sont capables de faire réflexion qu'Euclide est un grand géomètre et eux, rien. Plus que les résultats des sciences, il faudrait enseigner leur histoire, révéler aux esprits ce qu'est une intelligence dans son action et son mouvement, communiquer le sens profond de la science, faire comprendre qu'un savant n'est pas un homme qui sait mais un homme qui cherche, accablé et exalté tout ensemble par l'idée de ce qu'il ne sait pas. Ainsi ferait-on des hommes indépendants.»*

Jean GUÉHENNO  
Inspecteur général  
de l'enseignement secondaire (de France)  
*«Journal des années noires»*



**PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DE PRESSION  
DANS L'AIR CONTENU DANS UN TUYAU**

**PROPAGATION DANS LE  $\text{CO}_2$  — RÉFLEXIONS - CÉLÉRITÉS  
MONTAGES DE DÉMONSTRATION**

*«(Il faut) s'imprégner personnellement  
de résultats et d'exercices, comme un  
chien qui, lorsqu'il mange une oie,  
emmagine de la graisse de chien et  
non de la graisse d'oie.»*

Henri POINCARÉ

## AVANT-PROPOS

Le montage présenté dans les pages qui vont suivre permet d'étudier la propagation d'une perturbation de pression isolée dans un milieu élastique gazeux, de déterminer sa célérité, d'étudier ses réflexions aux endroits où le milieu cesse d'être homogène et présente donc une interface, en faisant la distinction entre réflexions sans et avec changement d'un signe.

Des expériences équivalentes, où le milieu élastique était, soit l'air libre, soit l'air contenu dans un tuyau, ont été faites aux XVIII<sup>e</sup>, XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, en profitant en général de concours exceptionnels de circonstances. Elles ont, le plus souvent, mis en jeu un matériel délicat, actuellement passé de mode, dont la remise en usage, surtout en milieu scolaire, ne soulèverait probablement pas l'enthousiasme. On trouvera, aux pages 26 à 37, divers renseignements relatifs à des expériences qui ont été, aux siècles passés, réalisées en France.

Les mesures correspondantes et, ensuite, celles qui ont été faites en utilisant des ultra-sons, ont permis au XIX<sup>e</sup> siècle puis au XX<sup>e</sup> siècle, de confirmer, entre autres choses, la théorie cinétique des gaz. Aussi d'analyser plus finement le mécanisme des échanges d'énergie entre les différents états liés aux divers degrés de liberté des molécules (des gaz).

Plus modestement, notre montage a seulement pour but de mettre en évidence certaines caractéristiques fondamentales des phénomènes concernés.

Lorsque l'on aborde, dans un cours de physique de l'enseignement secondaire, le chapitre dit «Propagation d'un mouvement vibratoire», il est traditionnel de s'intéresser, d'abord, à la propagation d'un «signal» isolé, dans un milieu élastique à une dimension. Il faut étudier, de cette «perturbation»:

- le mode de propagation;
- la célérité;
- l'inévitable réflexion aux bornes d'un milieu inévitablement borné.

Les expériences de démonstration, réalisables en classe, qui permettent d'illustrer cette étude, sont peu nombreuses; faute de mieux, il faut en général se rabattre sur la seule mise en évidence, uniquement qualitative, du comportement d'une perturbation mécanique transversale créée sur une «corde» en caoutchouc dont l'une des extrémités est fixée. Sauf si l'on dispose d'un matériel sophistiqué et de beaucoup de place et de temps, il est alors en général hors de question:

- d'établir l'uniformité du mouvement<sup>1</sup>;
- de mesurer sa célérité.

Si, en plus, l'extrémité de la corde est libre, il vaut mieux, sauf si l'on est suréquipé, renoncer à toute démonstration sérieuse, entre autres à celle d'une réflexion sans changement du signe de l'élongation. Également à toute démonstration relative à l'onde qui se propage dans la seconde partie du milieu élastique si la corde est, par exemple, prolongée par une corde plus fine.

Dans la suite du cours, on voit le même problème (celui des réflexions) refaire surface lors de l'étude, classique elle aussi, des «ondes» dites stationnaires. L'exposé traditionnel, relatif à ce phénomène, implique la croyance en l'existence de réflexions, avec ou sans changement d'un signe, qui peuvent avoir lieu aux extrémités d'un milieu élastique borné, ainsi que, pour bien faire, leur mise en évidence expérimentale. Du fait de la difficulté de cette mise en évidence, du fait aussi du temps dramatiquement plus que compté dont dispose le professeur, il est tentant, à propos de l'existence de ces réflexions, de se contenter d'une simple affirmation, appuyée simplement par l'expérience de la corde à extrémité fixée.

---

<sup>1</sup> Il existe de rares montages mécaniques relativement adaptés à ces démonstrations, qui ne se trouvent que très rarement dans le matériel des écoles.

Apparaît alors le risque de déduire l'existence d'une réflexion, et ses caractéristiques, de l'existence d'ondes stationnaires, ce dernier phénomène étant, en général, facile à mettre en évidence. On risque fort ainsi, si l'on n'y prend garde, de tomber dans la pétition de principe.

Ce sont les raisons exposées ci-dessus qui nous poussent à penser que le montage proposé ici présente un intérêt. Il permet, sans faire perdre du temps et en ne mettant en jeu qu'un matériel facile à monter, de montrer, entre autres choses:

- que le mouvement d'une perturbation de pression dans l'air contenu dans un tuyau est uniforme (si le tuyau n'est pas trop long);
- quelle est la valeur de sa célérité (par une mesure **directe**);
- que le signe de la perturbation de pression réfléchi change suivant que l'extrémité du tuyau est ouverte ou fermée.

On peut retrouver ici, aux incertitudes expérimentales près, la valeur de la «vitesse du son», valeur bien connue et «inscrite dans les livres», résultat aussi de certaines «grandes expériences», citées dans la mémoire de l'histoire des sciences.

Ceci doit, si les choses sont bien faites, conforter la confiance que portent les élèves aux montages expérimentaux réalisés en classe et contribuer aussi, à notre sens, à en fixer le souvenir dans les mémoires.

Si on le désire, il est possible, toujours à peu de frais, d'ajouter des détails utiles à qui veut faire l'étude des instruments de musique à vent: tuyaux courbés, tuyaux percés, etc. Il est possible aussi d'emplir le tuyau avec un gaz autre que l'air (non prévu dans le matériel proposé).

Le montage est, par ailleurs, tout à fait adapté à des manipulations pour élèves de sixième année ou pour étudiants de l'enseignement supérieur non universitaire voire universitaire.

On reprochera, au montage, un certain manque de précision, lié aux techniques de mesure utilisées<sup>1</sup>. Il nous semble que les qualités pédagogiques qu'il présente l'emportent largement, au niveau où l'on enseigne, sur ce défaut avoué.

Il n'est d'ailleurs pas exclu d'exploiter cet inconvénient à titre de contre-exemple et de l'employer finalement à de nouvelles fins pédagogiques.

Signalons, pour finir, l'existence d'un montage<sup>2</sup> analogue à celui dont il est question ici, qui permet de montrer qu'une perturbation de tension électrique, créée à l'une des extrémités d'un câble bifilaire, se propage et se réfléchit à l'autre extrémité du câble suivant des lois analogues à celles qui sont évoquées dans le présent texte.

Il nous semble que consacrer une demi-heure à montrer, au début du chapitre «Propagation...», l'existence des deux phénomènes repris ci-avant, leur caractère fondamental et leur analogie un peu inattendue, devrait permettre aux élèves d'établir, entre certains points du «programme», une coordination qui leur fait souvent défaut. Elle ne peut en outre que les préparer à l'étude des ondes stationnaires dans les tuyaux et à l'accueil favorable d'éventuelles démonstrations relatives aux ondes stationnaires électromagnétiques<sup>3</sup>.

A. FRÈRE  
1998

---

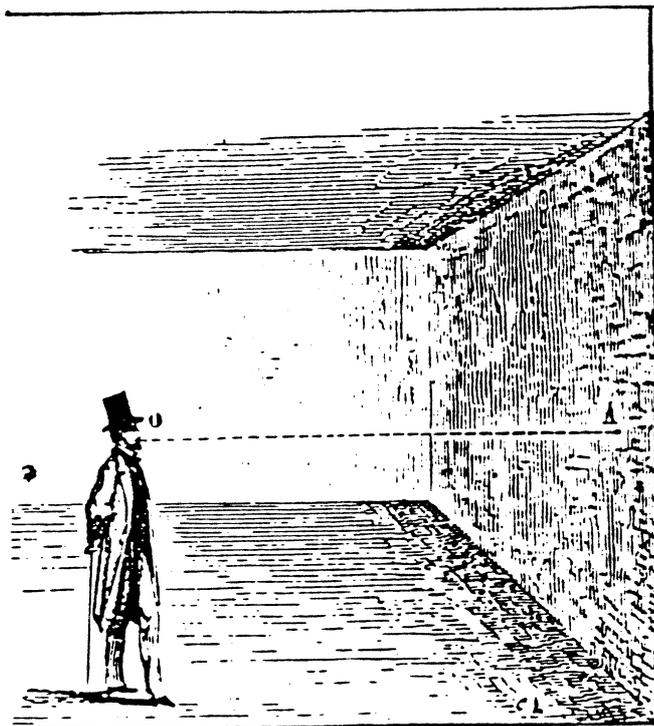
<sup>1</sup> Il s'agit de l'utilisation, comme chronomètre, de la base de temps de l'oscilloscope. On peut limiter les dégâts en la faisant réétalonner. Cette opération peut se faire au Centre technique (mettre l'appareil «en réparation», en précisant dans quel dessein).

<sup>2</sup> Au Centre technique et pédagogique, n° 5000 00001. Il faudrait ajouter une étude de la propagation d'une perturbation transversale le long d'un fil tendu. Ce problème, sans être insoluble, est beaucoup plus difficile et crée beaucoup de complications peu compatibles avec le caractère scolaire des montages souhaités.

<sup>3</sup> Montage dit des «fils de Lecher».

# SOMMAIRE

<b>1. Description sommaire du montage de base et principe de son exploitation .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Description détaillée du montage de base</b>	
<b>Mise en œuvre et résultats expérimentaux .....</b>	<b>7</b>
2.1. Conception générale du montage .....	7
2.2. Matériel nécessaire au montage .....	8
2.2.1. Matériel qui compose l'ensemble MV 4000 00001 proposé par le Centre technique .....	8
2.2.2. Matériel complémentaire .....	9
2.3. Montage.....	9
2.4. Mise en œuvre .....	12
2.4.1. Réglage de l'expérience de familiarisation avec le montage de base .....	12
2.4.2. Réalisation et exploitation d'un ensemble de mesures.....	16
2.4.2.1. Principe .....	16
2.4.2.2. Grandeurs à déterminer .....	16
2.4.2.3. Résultats .....	17
2.4.2.4. Exploitation des résultats .....	17
2.4.3. Conclusions.....	19
2.4.3.1. Nature du mouvement de propagation .....	19
2.4.3.2. Célérité .....	19
2.4.3.3. Tuyau ouvert - tuyau fermé Nature de la perturbation réfléchie.....	19
<b>3. Compléments.....</b>	<b>20</b>
3.1. Matériel qui compose l'ensemble MV 4001 00001 proposé par le Centre technique .....	20
3.2. Matériel complémentaire.....	21
3.3. Démonstrations et mesures possibles .....	21
3.4. Démonstrations complémentaires .....	23
3.4.1. Propagation dans le dioxyde de carbone .....	23
3.4.2. Mesure de la célérité d'un signal sinusoïdal .....	25
<b>4. Documents: historique sommaire.....</b>	<b>26</b>
<b>5. Extension de la méthode à la mesure de la célérité d'un train d'ondes ultrasonores     dans l'air contenu dans un tuyau .....</b>	<b>38</b>



# PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DE PRESSION DANS L'AIR CONTENU DANS UN TUYAU

## PROPAGATION DANS LE CO<sub>2</sub> — RÉFLEXIONS - CÉLÉRITÉS

### MONTAGES DE DÉMONSTRATION

#### 1. DESCRIPTION SOMMAIRE DU MONTAGE DE BASE ET PRINCIPES DE SON EXPLOITATION

Le montage de base comprend un tuyau plein d'air, de longueur ajustable, par quanta de 0,500 mètre, entre 1,000 et 3,500 mètres. Un diffuseur (haut-parleur) convenablement choisi est disposé, dans l'axe de ce tuyau, tout près de l'une de ses extrémités. Alimenté par un générateur d'«ondes carrées», il crée, dans l'air présent à cette extrémité, une suite alternative de compressions et de dilatations, «perturbations de pression». Chacune de ces perturbations se propage dans l'air du tuyau, atteint la seconde extrémité de celui-ci et s'y réfléchit, intégralement ou partiellement.

À 0,400 mètre de la première extrémité du tuyau, sur le flanc de celui-ci, se trouve un microphone qui va être successivement influencé par la perturbation «incidente» puis par la perturbation réfléchie qui lui correspond.

Les deux signaux ainsi produits, convenablement amplifiés, sont envoyés sur l'axe «vertical» d'un oscilloscope en balayage, ce balayage étant synchronisé avec l'émission des perturbations de pression par le diffuseur.

On trouvera aux pages 14 et 15, des exemples annotés des oscillogrammes qu'il est ainsi possible d'obtenir.

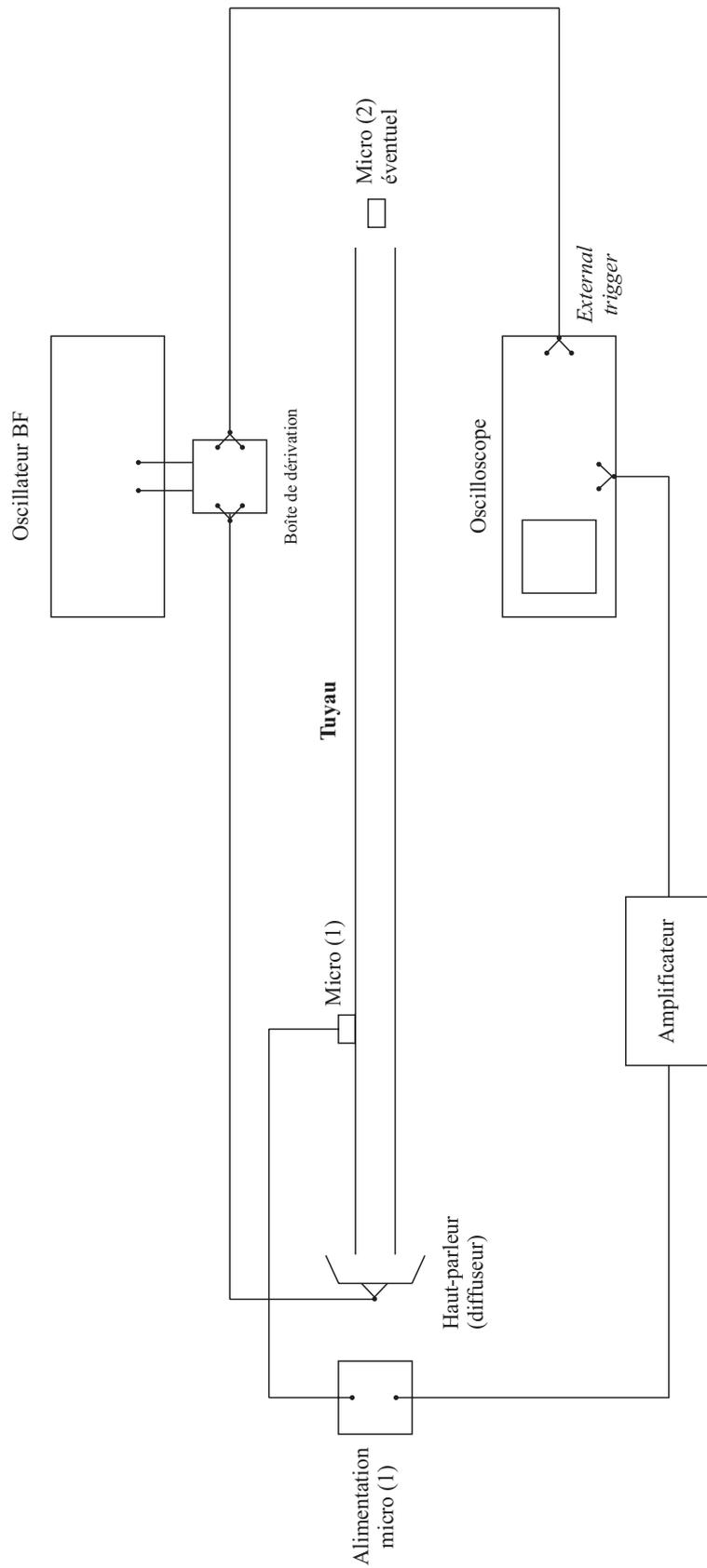
Les longueurs parcourues par les perturbations étant connues et la durée du trajet aller-retour d'une perturbation pouvant être déterminée en exploitant la base de temps de l'oscilloscope, il devient alors possible:

- d'établir l'uniformité du mouvement d'une perturbation de pression dans l'air contenu dans le tuyau;
- d'en mesurer la célérité.

De plus, un examen attentif des oscillogrammes (voir pages 14 et 15) montre qu'il est possible de les utiliser pour faire la distinction entre réflexion sur une extrémité ouverte et réflexion sur une extrémité fermée. Cette observation est fondamentale pour l'étude des «ondes» dites «stationnaires» (analogie avec les réflexions avec et sans changement du signe de l'élongation, à l'extrémité d'une corde).

Divers compléments au montage de base permettent:

- de déceler le devenir de la perturbation lorsque, à l'extrémité (ouverte) du tuyau, elle se «divise» en une partie réfléchie et une partie qui continue à progresser dans l'air extérieur au tuyau;
- d'examiner l'influence des parties coudées du tuyau;
- d'examiner l'influence de trous percés dans le flanc du tuyau;
- d'examiner la progression de la perturbation dans un gaz autre que l'air (non prévu dans le matériel proposé).



**Figure 1**  
Schéma du montage

## 2. DESCRIPTION DÉTAILLÉE DU MONTAGE DE BASE MISE EN ŒUVRE ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

### 2.1. CONCEPTION GÉNÉRALE DU MONTAGE (voir figure 1, page 6)

Le signal dont on étudie la propagation est une perturbation de pression créée dans le gaz (en général l'air) contenu dans un tuyau. Celui-ci, après une partie longue de 1,400 mètre, munie de deux supports, est constitué de plusieurs tronçons emboîtables de 0,500 ou de 1,000 mètre. Chaque tronçon (sauf un) est monté sur un support. Il y a assez de tronçons pour constituer un tuyau de (3,500 + 0,400) mètres, prévu pour être posé sur une longue table.

La perturbation, en principe isolée, est produite à l'une des extrémités du tuyau (celle où se trouve le tronçon de 1,400 mètre) par la membrane du cône d'un petit diffuseur placé dans l'axe du tuyau, membrane à qui l'on donne, grâce à une «impulsion» de tension électrique, un bref mouvement parallèle à l'axe du tuyau. Au cours de ce mouvement, la membrane du diffuseur se comporte, approximativement, comme un piston.

Le passage de la perturbation ainsi créée, qui se propage, peut être décelé:

- montage 1 (dit «montage de base»): soit par un microphone transducteur [micro (1)] glissé, dans le flanc du tuyau, dans un trou percé à 0,400 mètre de la membrane du diffuseur et aménagé en conséquence.  
Ce microphone signale le passage de la perturbation (incidente) qui vient du diffuseur puis le passage (à son retour) de la perturbation qui a été réfléchi à la seconde extrémité (ouverte ou fermée) du tuyau.  
C'est ce montage, seul, qui est décrit dans les pages (8 à 12) qui vont suivre.
- montage 2: soit par le microphone (1) cité ci-dessus et par un microphone (2), placé à la seconde extrémité du tuyau.  
Ce microphone (2) signale le passage de la perturbation à la seconde extrémité du tuyau. Ses indications complètent celles qui sont fournies par le microphone (1)  
Ce montage, et son exploitation, sont décrits dans les pages 20 à 23.

Les impulsions de tension créées par le (ou les) microphone(s) transducteur(s) sont amplifiées, puis envoyées sur un seul canal (montage 1) ou sur les deux canaux (montage 2) d'un oscilloscope à double trace.

Le caractère répétitif du phénomène, exigé par l'oscilloscope, est assuré en alimentant le diffuseur par une tension en «ondes carrées», de fréquence assez basse pour que ne se mélangent pas les signaux dus aux perturbations réfléchies et les signaux incidents suivants, émanant de la source.

Le diffuseur crée ainsi, alternativement, dans l'air du tuyau, une compression puis, après un temps de repos, une dépression (une pression acoustique «positive» puis une pression acoustique «négative») que le microphone traduit et que l'oscilloscope enregistre sous la forme d'impulsions de tension de sens opposés.

Il est commode, parfois indispensable, et de toute façon simplificateur pour la compréhension des choses et la réalisation des réglages, de synchroniser:

- l'impulsion de tension envoyée au diffuseur;
- le déclenchement du balayage de l'oscilloscope.

On y arrive aisément, en utilisant le dispositif inclus dans l'oscilloscope, qui permet de déclencher le balayage par l'action d'un signal extérieur (*external trigger*).

Pour faciliter le montage, on dispose d'une «boîte de dérivation», qui permet de distribuer le signal émis du générateur BF entre le diffuseur et l'*external trigger*.

Les durées relatives aux trajets cités plus haut:

- micro (1) - micro (1) (montage 1)
- micro (1) - micro (2) (montage 2)

sont mesurées grâce à la base de temps de l'oscilloscope.

Les espaces parcourus par les perturbations s'obtiennent en additionnant les longueurs — (0,500 ± 0,001) mètre ou (1,000 ± 0,001) mètre — des tronçons de tuyau.

On peut alors, en réalisant les mesures pour diverses longueurs de tuyau,

- établir l'uniformité du mouvement de la perturbation;
- déterminer sa célérité.

On peut aussi, en observant (sur l'écran de l'oscilloscope) l'identité ou l'opposition des signes des impulsions de tension créées par les microphones transducteurs, distinguer les perturbations de compression des perturbations de dépression. Cela permet d'observer les diverses modifications que subit une compression (par exemple) lorsqu'elle se réfléchit sur une extrémité (ouverte ou fermée) du tuyau.

## 2.2. MATÉRIEL NÉCESSAIRE AU MONTAGE<sup>1</sup>

Il s'agit du matériel qui correspond au «Montage 1» cité à la page 7 (un seul microphone, placé à 0,400 mètre du début du tuyau).

Le matériel qui correspond au «Montage 2» sera décrit au § 3, page 20.

### 2.2.1. MATÉRIEL QUI COMPOSE L'ENSEMBLE MV 4000 00001 PROPOSÉ PAR LE CENTRE TECHNIQUE ET PÉDAGOGIQUE

- Un tronçon rectiligne de tube<sup>2</sup> en matière plastique, de 1,400 mètre de longueur, avec supports spéciaux et dispositif de placement latéral d'un microphone. Ce dernier dispositif (en matière plastique rouge) est situé à 0,400 mètre de l'une des extrémités du tuyau.
- Deux tronçons rectilignes de tube, adaptables au précédent, de 1,000 mètre, avec supports.
- Un tronçon rectiligne de tube, adaptable aux précédents, de 0,500 mètre, avec support.
- Un tronçon rectiligne de tube, adaptable aux précédents, de 0,500 mètre, sans support.
- Un capuchon en matière plastique, dont le diamètre intérieur est égal au diamètre extérieur des tubes.

---

<sup>1</sup> Il s'agit du matériel relatif au montage de base, proposé par le Centre technique et pédagogique sous le n° MV 4000 00001. Il faut y ajouter du matériel classiquement présent dans les écoles.

<sup>2</sup> Nous avons utilisé comme des synonymes les mots tube et tuyau. Le langage courant parle de «tuyaux» à gaz et d'installation électrique «sous tube».

En associant judicieusement les pièces citées ci-dessus, il est possible de bâtir, sur une longue table, un tube dont la longueur **utile** variera, par quanta de 0,500 mètre, entre 1,000 et 3,500 mètres et même au-delà.

- Un diffuseur (haut-parleur) de petite dimension, monté sur un support spécial.  
Ce support peut accepter, glissé à frottement doux, le plus long des deux supports du tube de 1,400 mètre, tube qui porte la fixation prévue pour le microphone (1).  
Il supporte également le dispositif d'alimentation (boîtier gris) de ce dernier et enfiché dans la planche support, le transformateur-redresseur d'alimentation de l'ensemble (à détacher et à enficher dans une prise secteur 230 V ~).
- Un microphone (micro 1), de petites dimensions et son fil de raccordement (fiche cinch mâle rouge à raccorder à la prise cinch châssis rouge portée par le boîtier gris cité ci-avant, à l'endroit marqué «entrée signal micro (1)».
- Une «boîte de dérivation» munie d'un fil de raccordement rouge et noir portant deux fiches bananes mâles. Elle est destinée à «distribuer» le signal sortant du générateur BF (voir § 2.2.2.).
- Un morceau de fil «côte à côte» rouge et noir, de 3,5 mètres de longueur, muni de deux fiches bananes mâles à chacune de ses extrémités.
- Un morceau de câble coaxial, de 4 mètres de longueur, muni d'une fiche cinch mâle noire<sup>1</sup> et de deux fiches bananes mâles.
- Un morceau de câble coaxial, de 1,5 mètre de longueur, muni d'une fiche BNC et de deux fiches bananes mâles.
- Un morceau de câble coaxial, de 1,5 mètre de longueur, muni de deux fiches bananes mâles à chacune de ses extrémités.<sup>2</sup>

#### 2.2.2. MATÉRIEL COMPLÉMENTAIRE (À PRÉLEVER DANS LE MATÉRIEL DE L'ÉCOLE)

- Un générateur BF, capable de fournir un signal «ondes carrées», dont la fréquence puisse descendre jusqu'à des valeurs de l'ordre de 10 Hz, moins si possible.  
En l'occurrence, le générateur ET 2000 24216 du Centre technique et pédagogique, convient bien.
- Un oscilloscope, de préférence à double trace, avec *trigger* extérieur (les oscilloscopes relativement récents le possèdent).
- Un amplificateur. L'amplificateur MV 3900 00003 du Centre technique et pédagogique convient bien.

#### 2.3. MONTAGE

Les appareils **doivent** être disposés, sur une longue table, en trois groupes:

- le tube, que nous avons volontairement limité à 3,500 mètres, de manière qu'il puisse être disposé sur une table classique de professeur (en supposant un dépassement de 0,5 mètre environ);
- l'ensemble haut-parleur, micro (1), alimentation du micro (1). Cet ensemble doit être disposé près de l'extrémité du tube de 1,4 mètre qui est voisine du porte-micro;
- l'ensemble générateur BF, oscilloscope, boîte de dérivation, amplificateur. Il est **essentiel** pour l'observation, la manœuvre et les mesures, que ces quatre appareils soient groupés au voisinage de l'extrémité du tube opposée à celle qui est en face du haut-parleur.

---

<sup>1</sup> Par suite de contraintes technico-commerciales, *blanche* sur certains câbles fournis

<sup>2</sup> Ce câble est destiné à assurer la liaison entre la boîte de dérivation et l'entrée «*External trigger*» de l'oscilloscope. Si cette entrée est munie d'une prise châssis BNC (ce qui est souvent le cas), ajouter au câble cité ci-dessus un adaptateur BNC-bananes.

Il conviendra d'éviter ou de supprimer les bruits parasites qui risquent d'être captés par le (ou les) micro(s) et de déformer ainsi l'oscillogramme (bruits de machines, bavardages, chocs...). Comme il est important de se faire la main sur un premier montage, ce avant de se lancer dans une série de mesures, nous allons décrire, dans ce but, le montage qui correspond à une longueur utile de tube de 3,500 mètres.

Le montage à réaliser correspond au schéma de la page 6 (figure 1).

2.3.1. Prévoir, à l'un des bouts de la table, les emplacements réservés à l'oscilloscope, au générateur BF et à l'amplificateur. Éviter de placer le générateur BF sur l'oscilloscope (risque de déformation de l'oscillogramme).

Penser aux trois (ou cinq - voir § 3, page 20) raccordements nécessaires au réseau 230 V.

2.3.2. Poser, à l'autre bout de la table, le haut-parleur et son support.

2.3.3. Faire pénétrer, à frottement doux et **avec prudence** (il y a un risque de rupture de la membrane du haut-parleur), le plus long des deux supports du tube de 1,400 mètre entre les «pattes» avant du support du haut-parleur. Si l'appareil n'a pas été déréglé, l'extrémité du tuyau se place, lorsque le support a été poussé à fond, à quelques millimètres de la face avant du haut-parleur.

La bague (rouge) porte-micro se trouve ainsi à 0,4 mètre, environ, de cette face avant.

2.3.4. Vérifier que le trou percé dans la bague porte-micro (rouge) se trouve exactement en face du trou percé dans le flanc du tuyau. Corriger sa position si nécessaire (avoir soin pour cela de dévisser la vis de blocage située sur le flanc de la bague).

Insérer le micro, placé dans son support en matière plastique rouge, dans l'orifice ainsi créé. Le pousser bien à fond. La face avant du micro (1) se place ainsi exactement dans un plan tangent à la surface intérieure du tuyau (figure 2).

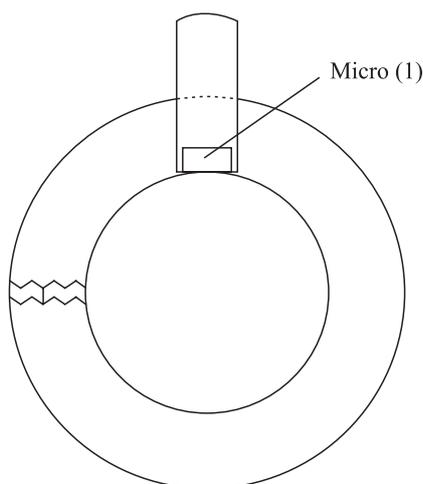


Figure 2

Aucune protubérance, pouvant provoquer une réflexion parasite, n'est ainsi créée à l'intérieur du tuyau, du fait du microphone.

2.3.5. Pourvoir à l'alimentation du micro (1). Pour cela, enficher dans une prise secteur 230 V ~ le transformateur-redresseur placé sur la planche support du haut-parleur, après l'avoir dégagé de cette planche.

**Remarque:** avant tout branchement, vérifier que les pointes des deux flèches jaunes situées sur le boîtier du transformateur sont bien placées:

- celle de gauche sur +
- celle de droite sur 12 V.

Tout autre réglage mettrait le montage en danger.

Faire un essai de contact en manœuvrant l'interrupteur placé sur le couvercle du boîtier gris. La lampe témoin rouge doit s'allumer.

Replacer l'interrupteur en position «OFF».

2.3.6. Planter la fiche cinch mâle rouge du câble coaxial du micro dans la fiche cinch femelle châssis rouge placée sur le boîtier d'alimentation du micro, marquée «entrée signal micro (1)».

2.3.7. Achever le montage du tube de 3,500 mètres utiles (en réalité 3,900 mètres) en ajoutant, au tube de 1,400 mètre:

- 2 tronçons de 1,000 mètre;
- 1 tronçon de 0,500 mètre.

Les supports en bois des tronçons de tube doivent se placer du côté opposé au haut-parleur.

Le dernier tronçon (0,500 mètre) peut, si l'on ne dispose pas d'une table suffisamment longue, être laissé en porte-à-faux (utiliser pour cela le tronçon de 0,500 mètre **sans support**, fourni avec l'appareil).

2.3.8. En utilisant le morceau (4 m) de câble coaxial muni d'une fiche cinch mâle noire (blanche) et de deux fiches bananes, relier la fiche cinch femelle châssis noire marquée «sortie signal micro (1)», placée sur le boîtier d'alimentation du micro, à l'entrée de l'amplificateur (respecter la «Terre»).

2.3.9. En utilisant le morceau (1,5 m) de câble coaxial muni d'une fiche BNC, relier la sortie de l'amplificateur au canal Y de l'oscilloscope.

2.3.10. Brancher la «boîte de dérivation» aux bornes de sortie du générateur BF (respecter la «Terre»).

2.3.11. En utilisant le morceau (3,5 m) de câble «côte à côte» rouge et noir, relier les bornes du haut-parleur aux bornes de sortie de la boîte de dérivation.

2.3.12. En utilisant le morceau (1,5 m) de câble coaxial muni de fiches bananes, relier les bornes de sortie de la boîte de dérivation à l'entrée «*External trigger*» de l'oscilloscope. Respecter la «Terre».

**Remarque:** si l'entrée «*External trigger*» de l'oscilloscope porte une fiche châssis BNC, utiliser un adaptateur BNC-bananes.

2.3.13. Disposer, à côté de l'extrémité libre du tuyau, le bouchon en matière plastique qui permettra d'en faire un tuyau «fermé».

2.3.14. Prérégler le générateur BF:

- mode: «ondes carrées»;
- fréquence: environ 10 Hz;
- intensité: au plus bas, de manière à ne pas mettre en danger la membrane du haut-parleur.

2.3.15. Prérégler l'amplificateur:

- réglage fin: au milieu;
- réglage pas à pas:  $\times 10$ .

2.3.16. Prérégler l'oscilloscope.

Si le tube a 3,000 ou 3,500 mètres de longueur utile, il est probable que l'on obtiendra un oscillogramme acceptable pour un réglage  $5.10^{-3}$  s/div de la base de temps. Ne pas oublier de placer le «trigger» sur la position «external».

2.3.17. Mettre l'interrupteur de l'alimentation du micro en position «ON» (la lampe témoin doit s'allumer».

2.3.18. Mettre le montage (oscilloscope, générateur BF, amplificateur) sous tension.

## 2.4. MISE EN ŒUVRE

### 2.4.1. RÉGLAGE DE L'EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE DE FAMILIARISATION AVEC LE MONTAGE DE BASE - PREMIÈRE MESURE DE CÉLÉRITÉ

Les préréglages indiqués plus haut étant effectués, l'appareil devrait se signaler à l'attention des manipulateurs par:

- le bruit caractéristique émis par le haut-parleur alimenté en ondes carrées. Par le réglage du générateur BF, ajuster son intensité de manière qu'il soit nettement perceptible mais pas gênant;
- l'apparition sur l'écran de l'oscilloscope d'une figure analogue à la figure (3) suivante (cas du tuyau ouvert):

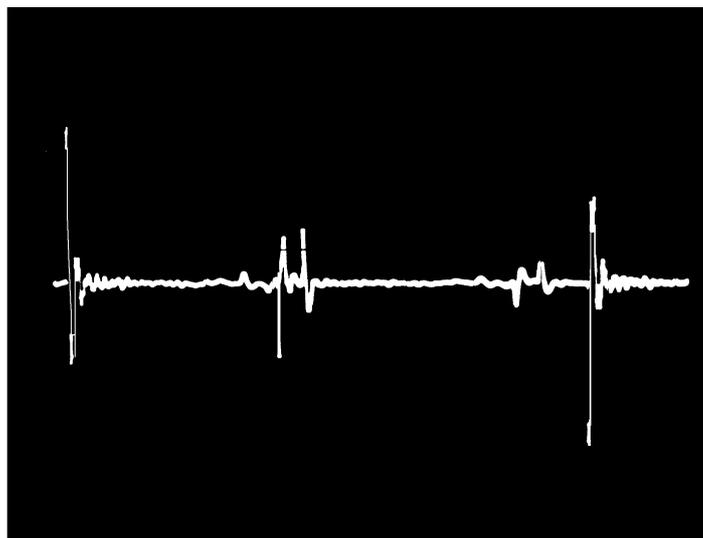


Figure 3

On trouvera, aux pages 14 et 15, des fac-similés annotés de ce diagramme et de celui qui correspond au cas d'un tuyau fermé.

Il est probable, cependant, que le premier oscillogramme obtenu apparaîtra comme un fouillis inextricable de pics enchevêtrés.

Il faudra alors parfaire les réglages, en manipulant:

- le réglage de fréquence du générateur BF. Il permettra, en diminuant la fréquence du signal carré, d'éviter qu'un déclenchement trop hâtif d'une deuxième perturbation, avant le retour au micro de la première (réfléchie), ne mélange deux signaux incidents et leurs correspondants réfléchis;
- le réglage de la base de temps de l'oscilloscope, qui permettra d'étaler l'oscillogramme sur l'écran et d'améliorer la précision d'une éventuelle mesure.
- Ne pas oublier, dans l'éventualité d'une mesure, de faire passer en position «calibrage» le réglage fin de cette base de temps;
- le réglage de l'amplificateur, qui permettra de donner aux pics de l'oscillogramme une amplitude compatible avec un déchiffrement aisé, tout en les maintenant dans les limites de l'écran. Rappelons qu'il est souhaitable d'utiliser dans ce but et l'amplificateur relié au micro et les amplificateurs intégrés dans les circuits de l'oscilloscope, en évitant, comme d'habitude, les réglages «en fin de course».

Insistons encore sur la nécessité qu'il y a d'éviter au maximum les bruits parasites qui, enregistrés par le micro, risquent de perturber les oscillogrammes.

Lorsque l'on a obtenu un oscillogramme correct et à peu près stable, il devient possible:

- ◆ d'observer les changements apportés à l'oscillogramme par le fait de boucher ou de déboucher l'extrémité libre du tuyau: le pic qui correspond au passage devant le micro de la perturbation réfléchie passe, lors de cette manœuvre, d'un côté à l'autre de l'axe horizontal de l'oscillogramme.

On trouvera, aux pages 14 et 15 deux oscillogrammes annotés, qui correspondent aux deux phases de la manœuvre précitée.

Cette manœuvre permet:

- d'identifier le pic dont il est question ci-dessus avec certitude, par la seule manœuvre du bouchon d'obturation du tuyau;
  - de déceler la transformation de perturbations de compression en perturbations de dilatation (ou l'inverse) c'est-à-dire de concevoir des réflexions avec changement d'un signe.
- ◆ d'effectuer une première mesure de la célérité du mouvement de la perturbation dans l'air du tuyau.

On peut en effet mesurer:

- l'espace parcouru par la perturbation dans son trajet micro (1) - extrémité (2) du tuyau et retour. Il est évidemment égal à deux fois la distance micro (1) - extrémité (2). Dans l'exemple choisi:

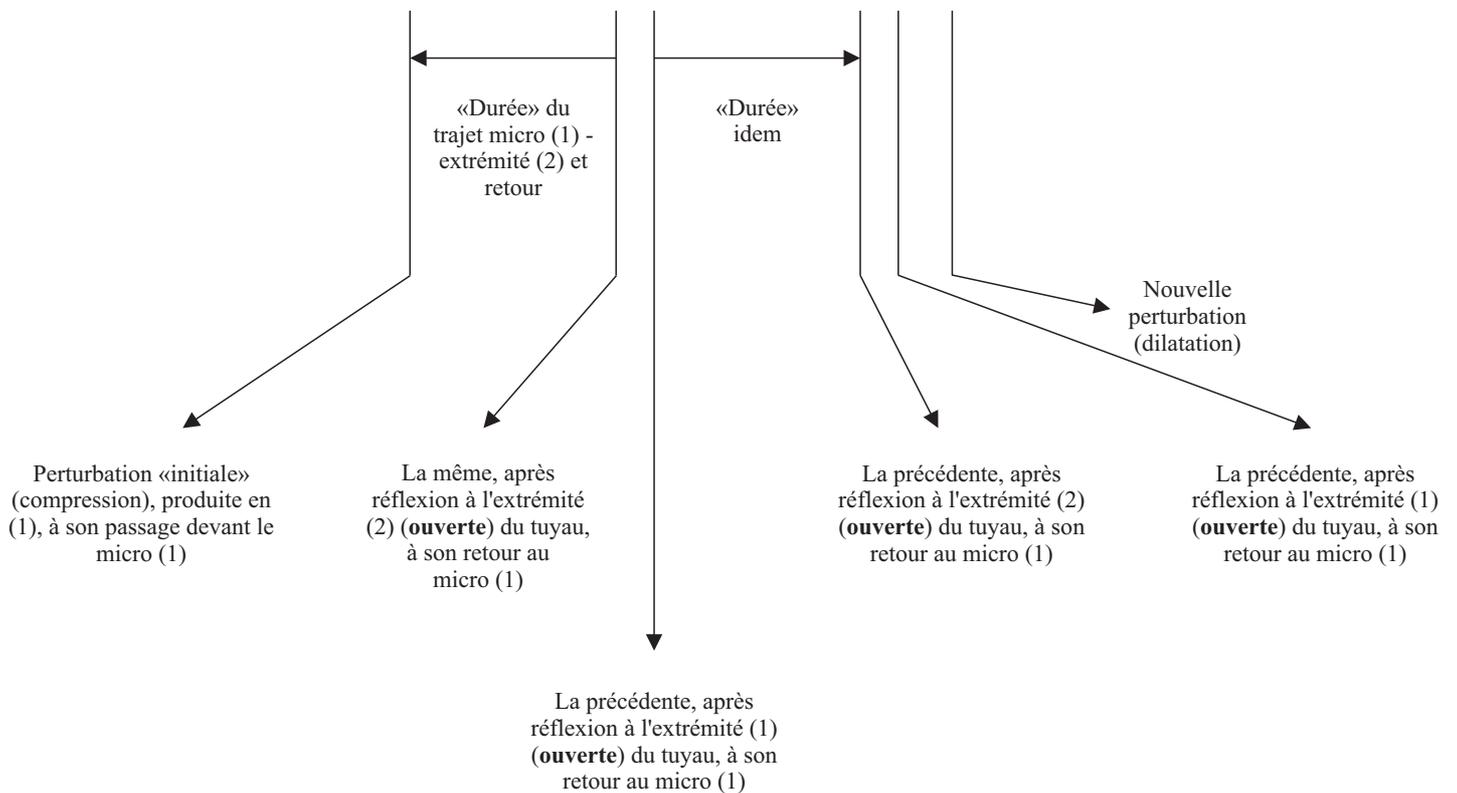
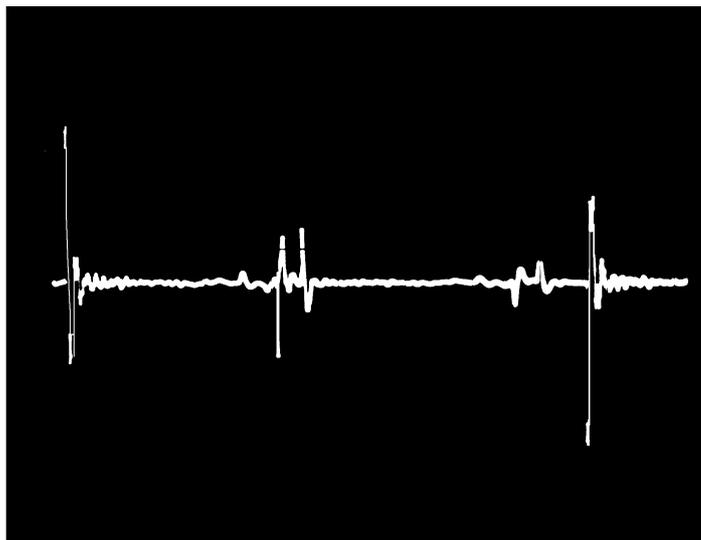
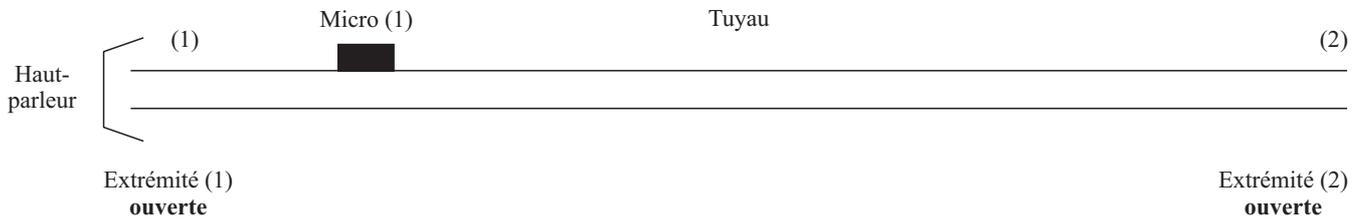
$$3,5 \times 2 = 7 \text{ mètres}$$

- la durée du même trajet. On peut l'estimer avec une précision acceptable en utilisant la base de temps de l'oscilloscope.<sup>1</sup>

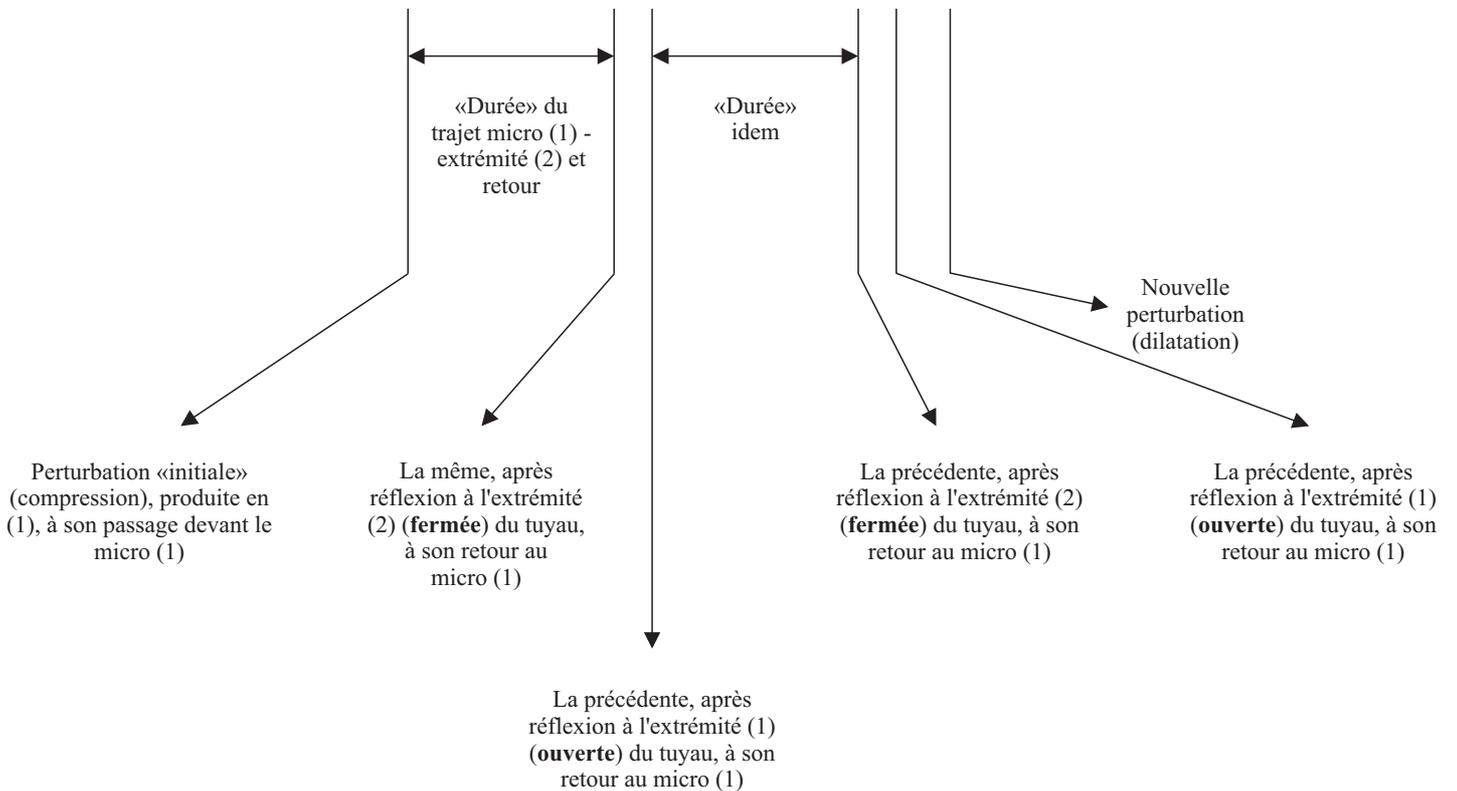
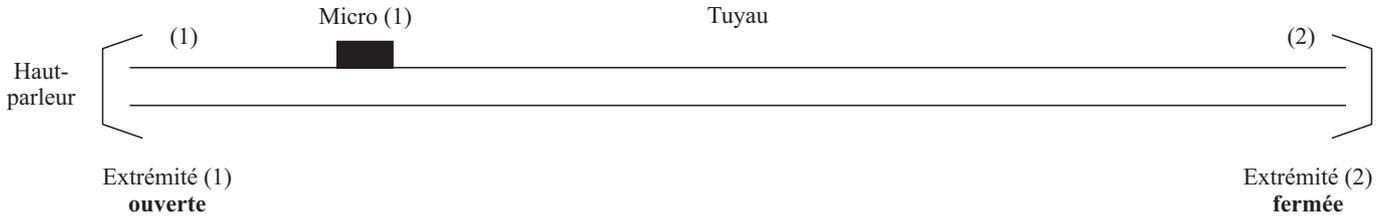
---

<sup>1</sup> On peut améliorer la qualité des mesures en la faisant réétalonner, en particulier dans la zone 5 à 1 s/div. Cette opération peut être faite au Centre technique et pédagogique: mettre l'appareil «en réparation», en précisant dans quel dessein.

# PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DE PRESSION DANS L'AIR CONTENU DANS UN TUYAU RÉFLEXIONS



# PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DE PRESSION DANS L'AIR CONTENU DANS UN TUYAU RÉFLEXIONS



Dans l'exemple choisi (voir l'oscillogramme de la page 12 - Fac-similé: rapport d'homothétie 0,67).  
Distance pic incident - pic réfléchi: 4,15 divisions.  
Réglage de la base de temps:  $5 \cdot 10^{-3}$  s/div.  
Durée du trajet:  $4,15 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 20,75 \cdot 10^{-3}$  s.

On en tire:

$$\text{Célérité du mouvement de la perturbation} = \frac{7}{20,75 \cdot 10^{-3}} = 337 \text{ m/s}$$

$$v = (337 \pm 4) \text{ m/s}$$

la température du montage étant 15°C.

On trouve ainsi une valeur proche de la valeur admise pour la célérité du «son» (à l'air libre) à la température en question, soit  $(339,9 \pm 0,1)$  m/s.

On trouvera, dans les pages qui vont suivre, l'exposé d'une technique expérimentale qui donne des résultats plus fiables, plus riches en enseignements et qui sont pédagogiquement plus exploitables.

## 2.4.2. RÉALISATION ET EXPLOITATION D'UN ENSEMBLE DE MESURES

### 2.4.2.1. Principe

Le matériel qui correspond à l'ensemble MV 4000 00001 permet de réaliser sept mesures analogues à la précédente, en faisant varier la longueur du tuyau, de 0,500 mètre à la fois, à partir du premier tronçon **utile** de 1,000 mètre, jusqu'à la longueur maximale de 3,500 mètres.

Nous nous proposons:

- de montrer que le mouvement de la perturbation dans l'air contenu dans le tuyau est uniforme;
- de déterminer sa célérité à partir d'un ensemble de mesures, donc avec une précision en principe meilleure que dans l'expérience précédente, unique.

### Remarque

Lors de la mise au point du prototype de ce matériel, nous disposions:

- d'un local suffisamment vaste que pour abriter un tuyau de 8 mètres de longueur;
- d'un générateur BF dont la fréquence pouvait être abaissée à des valeurs qui permettaient à la perturbation de parcourir 16 mètres avant que le générateur ne lance la perturbation suivante.

Malgré le clignotement inévitable de l'oscillogramme, il nous a été possible ainsi de réaliser quinze mesures. C'est ce résultat que nous présentons ici. Il est aisé d'adapter la méthode au cas des sept mesures permises par le matériel proposé.

### 2.4.2.2. Grandeurs à déterminer

- Les longueurs de tuyau mises en jeu.
- Les durées de parcours en utilisant la base de temps de l'oscilloscope.
- La température de l'air du tuyau.

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux et graphiques qui vont suivre.

### 2.4.2.3. Résultats

Le tableau ci-dessous contient, outre les résultats des mesures nécessaires à la réalisation des objectifs cités en 2.4.2.1., le relevé d'indications qui devraient faciliter les réglages à réaliser lors de la reproduction des expériences (fréquence du générateur BF, réglages de la base de temps).

N° de la mesure	Longueur utile du tuyau (m)	Nombre de divisions du graticule	Valeur d'une division ( $\cdot 10^{-3}$ s)	Fréquence (Hz)	Longueur du trajet e (m)	Durée du trajet t ( $\cdot 10^{-3}$ s)
0					0	0
1	1,000	5,85	1	18	2	5,85
2	1,500	8,75	1	17	3	8,75
3	2,000	5,85	2	16	4	11,70
4	2,500	7,30	2	16	5	14,60
5	3,000	8,80	2	16	6	17,60
6	3,500	4,15	5	16	7	20,75
7	4,000	4,70	5	16	8	23,50
8	4,500	5,30	5	16	9	26,50
9	5,000	5,90	5	12	10	29,50
10	5,500	6,50	5	12	11	32,50
11	6,000	7,10	5	12	12	35,50
12	6,500	7,65	5	12	13	38,25
13	7,000	8,30	5	11	14	41,50
14	7,500	8,85	5	11	15	44,25
15	8,000	9,45	5	9	16	47,25

Température de l'air du local: 15°C.

### 2.4.2.4. Exploitation des résultats

Les objectifs annoncés en 2.4.2.1. peuvent être atteints par l'étude de la fonction  $e = f(t)$ .

#### 1. Graphe de cette fonction

Le graphe qui correspond au tableau de la page 17 se trouve à la page 18.

C'est, d'après un premier examen, une droite qui passe par l'origine des axes.

#### 2. Examen de ce graphe

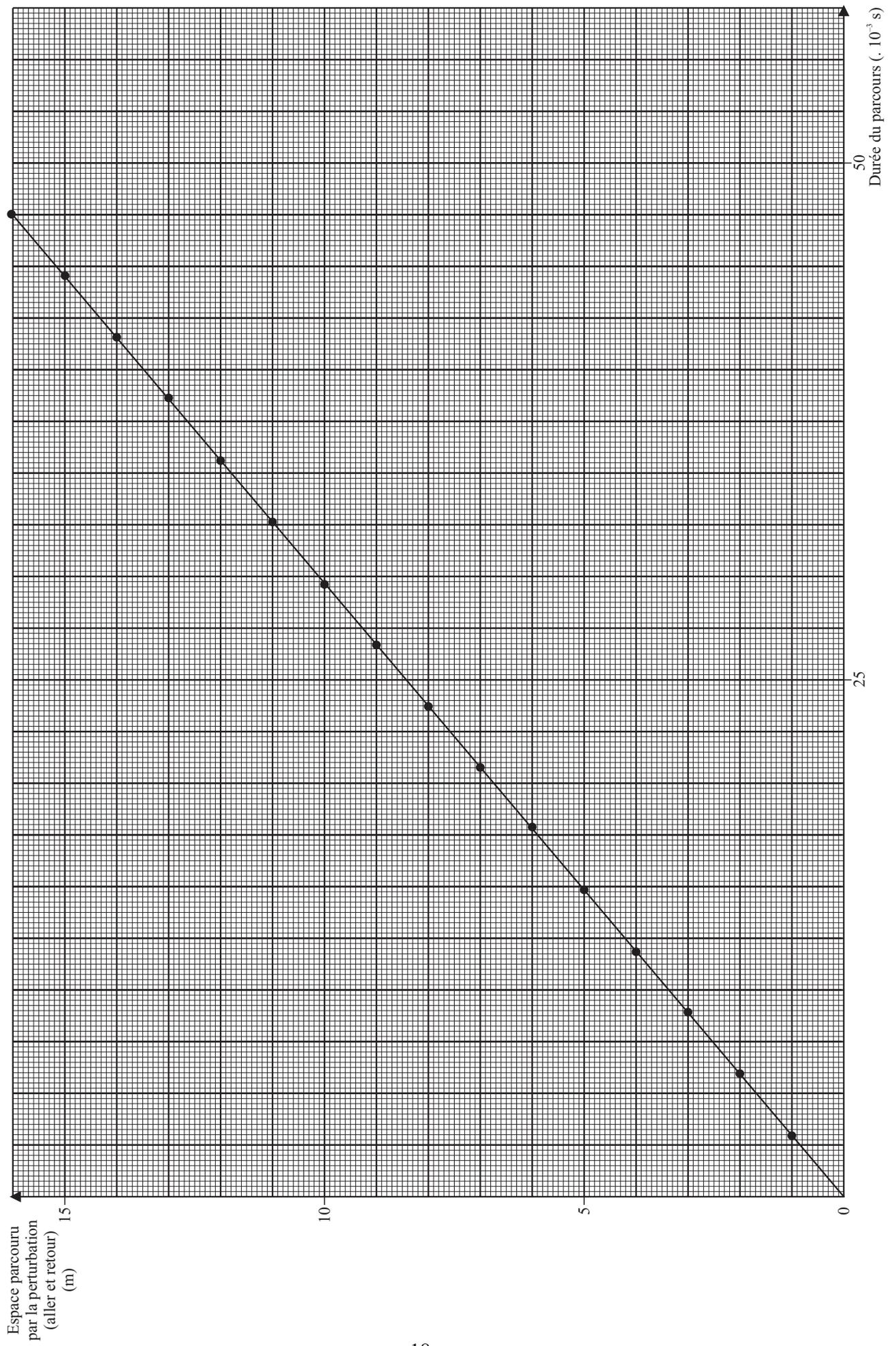
Coefficient de corrélation: 0,999983.

Cette valeur permet d'affirmer la linéarité quasi parfaite de la fonction  $e = f(t)$ .

On peut donc en conclure, avec les réserves d'usage, que le mouvement de la perturbation de pression dans l'air de notre tuyau est uniforme<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Ceci n'est plus tout à fait vrai pour les tuyaux de «grande» longueur (plusieurs kilomètres). Signalons à ce sujet les expériences faites, en profitant de la pose de tuyaux d'égouts, au XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup>. Voir § 4, page 26.



L'équation du mouvement en question est donc de la forme  $e = kt$  ou  $e = vt$ , où  $v$  est la célérité du mouvement.

La détermination de la pente de la droite qui passe au mieux entre les points du graphe  $e = f(t)$  fournit une valeur de cette célérité basée sur l'ensemble des mesures effectuées.

Coordonnées du centroïde des points qui correspondent aux mesures 0 à 15

$$e_{\text{centroïde}} = 8,437 \text{ m} \quad t_{\text{centroïde}} = 24,9 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$(24,9 \cdot 10^{-3}; 8,437)$$

Pente de la droite qui passe par l'origine des axes (point «sûr») et par le centroïde déterminé ci-dessus:

$$v = \frac{8,437}{24,9 \cdot 10^{-3}} = 338,8 \text{ m/s}$$

La célérité du mouvement de la perturbation de pression dans l'air à 15°C contenu dans le tuyau, ainsi mesurée, vaut donc:

$$v = 339 \text{ m/s}$$

Rappelons:

- que la valeur communément admise de la célérité du son **dans l'air libre** à 15°C est:  
(339,9 ± 0,1) m/s
- que la célérité du son dans l'air d'un tuyau est légèrement inférieure à la valeur «dans l'air libre». Elle diminue avec le diamètre du tuyau, pouvant, par exemple, descendre à 221 m/s dans un tube capillaire de 5 mm de diamètre.

**Remarque:** on constatera aisément qu'une variation de l'amplitude du signal émis par le haut-parleur n'a pas d'influence sur la position du pic réfléchi.

### 2.4.3. CONCLUSIONS

2.4.3.1. Le mouvement d'une perturbation de pression dans l'air contenu dans un tuyau est uniforme.

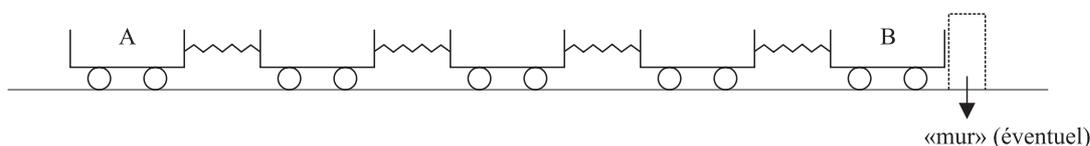
2.4.3.2. Sa célérité, dans l'air à 15°C contenu dans un tuyau de 22 mm de diamètre intérieur, vaut:

$$339 \text{ m/s.}$$

2.4.3.3. Rappelons l'observation, fort importante, de l'évolution du signe d'une perturbation lors d'une réflexion, suivant que le tuyau est:

- fermé: compression reste compression;
- ouvert: compression devient dilatation<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Rappelons à ce sujet, à titre éventuel de moyen mnémotechnique, le comportement parallèle d'une compression ou d'une dilatation issue de A dans le système de ressorts du montage wagons-ressorts représenté ci-dessous, suivant que le wagon B est libre ou calé.



### 3. COMPLÉMENTS

En ajoutant au montage décrit plus haut quelques accessoires<sup>1</sup>, en général peu onéreux, il est possible de retirer des démonstrations qu'il permet alors nombre d'informations qui nous paraissent de grande valeur pédagogique.

La liste qui va suivre n'est sûrement pas exhaustive. La compléter est laissé à l'appréciation et à l'instinct pédagogique de chacun.

#### 3.1. MATÉRIEL PROPOSÉ SOUS L'INDICE MV 4001 00001 DU CATALOGUE

3.1.1. Un tube<sup>2</sup> de longueur «inconnue», adaptable au tube de 1,400 m.

3.1.2. Un ensemble formé d'un tronçon rectiligne de tube et de deux «coudes» à 90°. Ces éléments sont adaptables aux tubes qui constituent l'essentiel de l'appareil. Mis bout à bout, les deux coudes et le tronçon rectiligne forment un tuyau en U de 0,500 mètre de longueur.

3.1.3. Un second ensemble identique au précédent.

3.1.4. Un tube percé de trous latéraux, chaque trou pouvant être obturé par une bague coulissante<sup>3</sup>.

3.1.5. Un second micro [micro (2)], monté sur un bouchon en matière plastique rouge, adaptable à l'extrémité des tubes qui composent l'appareil.

Un câble «coaxial» de 1,25 mètre de longueur relie ce micro à une fiche cinch mâle rouge.

3.1.6. Un tronçon de tube, percé de deux ouvertures latérales, conçu pour recevoir le micro cité en 3.1.5. et adaptable à l'extrémité des tubes qui composent l'appareil.

Il permet de placer un micro au voisinage de l'extrémité d'un tube qui reste ainsi ouvert.

3.1.7. Une alimentation pour le micro cité en 3.1.5. Cette alimentation comporte un transformateur-redresseur analogue à celui dont il est question en 2.3.5., page 11.

3.1.8. Un câble «coaxial» de 1,5 mètre de longueur, muni d'une fiche cinch mâle noire (blanche) et de fiches bananes.

---

<sup>1</sup> L'ensemble de ceux-ci peut être fourni par le Centre technique et pédagogique. Il figure dans le catalogue sous le n° MV 4001 00001.

<sup>2</sup> Le tube fourni a une longueur de trois mètres. Il peut être aisément raccourci au moyen d'une scie à denture fine.

<sup>3</sup> Ce tube peut être fourni séparément. Il figure au catalogue du Centre technique et pédagogique sous le n° MV 4002 00001.

**3.1.9.** Un câble «coaxial» de 1,5 mètre de longueur, muni d'une fiche BNC et de fiches bananes.

**3.1.10.** Un tube en matière plastique, de 2 mètres de longueur, bouché à une extrémité, destiné à être glissé dans le tube ou dans une partie du tube utilisé au § 2.3. pour y participer à la production et à l'étude d'ondes stationnaires.

### **3.2. MATÉRIEL COMPLÉMENTAIRE (à prélever dans le matériel de l'école)**

- Un amplificateur pour le micro (2).

L'amplificateur MV 3900 00003 du Centre technique et pédagogique convient bien.

### **3.3. DÉMONSTRATIONS ET MESURES POSSIBLES**

#### **3.3.1. MESURE DE LA LONGUEUR D'UN TUYAU DONT UNE EXTRÉMITÉ EST «INACCESSIBLE»**

- Adapter le tube cité en 3.1.1. (éventuellement raccourci) à l'extrémité du tube de 1,400 mètre (1,000 mètre utile).
- Mesurer la distance qui sépare, sur l'oscillogramme, la trace du passage de la perturbation incidente et celle du passage de la perturbation réfléchie. Cette distance correspond au trajet micro (1) - extrémité du tube et retour.
- Déterminer la durée de ce trajet en utilisant la graduation de la base de temps de l'oscilloscope.
- Calculer la longueur de ce trajet, à partir de la valeur de la célérité de la perturbation, trouvée en 2.4.2.4.
- Ne pas oublier de diviser la valeur trouvée par 2, et de retrancher 1 mètre du résultat.
- Vérifier en mesurant le tube 3.1.1.

#### **3.3.2. INFLUENCE DE LA PARTIE COUDÉE DU TUYAU**

- À l'aide des éléments cités en 3.1.2. et 3.1.3., constituer un tube présentant des parties rectilignes et des coudes à 90°. Imiter éventuellement la disposition des tuyaux d'un instrument de musique à vent.
- Observer sur l'oscillogramme la diminution de grandeur de la trace de la perturbation réfléchie, au fur et à mesure que l'on ajoute des coudes.
- Faire éventuellement des mesures de célérité, en se souvenant que la longueur totale d'une partie rectiligne jointe à deux coudes égale 0,500 mètre.

### 3.3.3. INFLUENCE D'UN TROU PERCÉ DANS LA PAROI D'UN TUYAU

- Adapter le tube cité en 3.1.4. au tube de 1,400 mètre.
  - Boucher tous les trous à l'aide des bagues portées par le tube.
  - Faire apparaître l'oscillogramme habituel.
  - Observer en débouchant puis rebouchant successivement les trous à partir de celui qui est situé du côté du micro (1), que le pic «réfléchi» de l'oscillogramme «recule» et s'éloigne du pic «incident».
- Un tuyau percé d'un trou se comporte donc comme un tuyau ouvert et limité à l'endroit du trou. Cette remarque peut aider à la compréhension du fonctionnement de certains instruments de musique.

### 3.3.4. PASSAGE DE LA PERTURBATION DEVANT UN MICRO PLACÉ À L'EXTRÉMITÉ LIBRE DU TUBE [MICRO (2)]

- Adapter le micro cité en 3.1.5. à l'extrémité libre du tuyau (voir schéma page 6).
- Raccorder son câble à l'alimentation citée en 3.1.7. [entrée signal micro (2), fiche cinch châssis rouge]. Enficher le transformateur-redresseur dans une prise secteur 230 V.
- À l'aide du câble cité en 3.1.8., raccorder la sortie de l'alimentation citée ci-dessus à l'entrée de l'amplificateur cité en 3.2.
- À l'aide du câble cité en 3.1.9., raccorder la sortie de l'amplificateur au second canal de l'oscilloscope.
- En plaçant l'oscilloscope en position «Dual», on peut observer simultanément les signaux issus du passage de la perturbation, d'abord devant le micro (1), puis devant le micro (2), puis à nouveau devant le micro (1).

Le signal «micro (2)» se place au milieu du segment déterminé par les deux signaux «micro (1)» (figure 4).



Figure 4

### 3.3.5. PASSAGE DE LA PERTURBATION DEVANT UN MICRO PLACÉ AU-DELÀ DE L'EXTRÉMITÉ LIBRE OUVERTE DU TUBE [MICRO (2)]

- Modifier le montage précédent en intercalant, entre l'extrémité libre du tube et le support du micro (2), la pièce citée en 3.1.6.
- En utilisant l'oscilloscope comme en 3.3.4., observer (figure 5) que les signaux issus du passage de la perturbation:
  - devant le micro (1) (premier passage) et le micro (2) sont de même signe;
  - devant le micro (1) (premier passage) et le micro (1) (deuxième passage) sont de signes opposés. Ceci est normal, le tube étant ouvert.

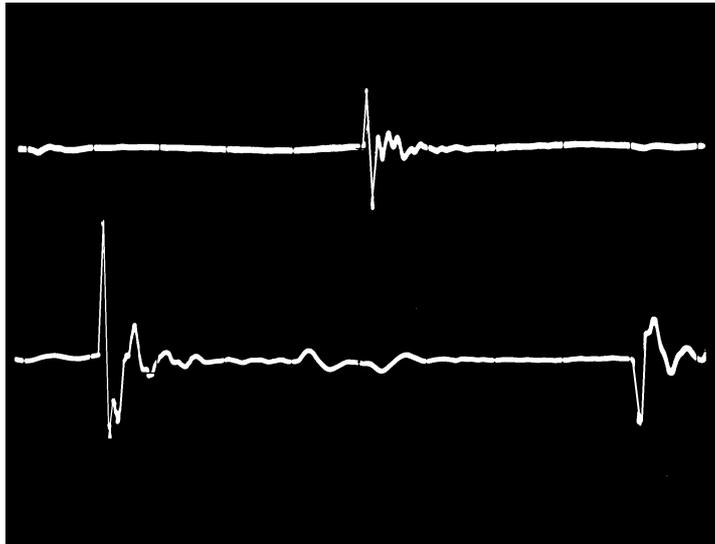


Figure 5

### 3.3.8. EXAMEN DÉTAILLÉ DES OSCILLOGRAMMES

On peut aussi s'attacher à expliquer et à vérifier en détail la façon dont se disposent les différents pics intermédiaires de l'oscillogramme.

Il suffit de se rappeler:

- que le tube est ouvert à l'extrémité qui se trouve devant le haut-parleur;
- qu'une perturbation peut faire plusieurs allers et retours entre les deux extrémités du tube.

## 3.4. DÉMONSTRATIONS COMPLÉMENTAIRES

### 3.4.1. PROPAGATION D'UNE PERTURBATION DE PRESSION DANS LE DIOXYDE DE CARBONE CONTENU DANS UN TUYAU – CÉLÉRITÉ

On trouve, dans le commerce de détail (accessoires pour bicyclettes), des mini-bonbonnes contenant, chacune, environ 12 grammes de  $\text{CO}_2$ . Elles sont fermées par un opercule qu'il convient de percer pour libérer (brutalement) le gaz.

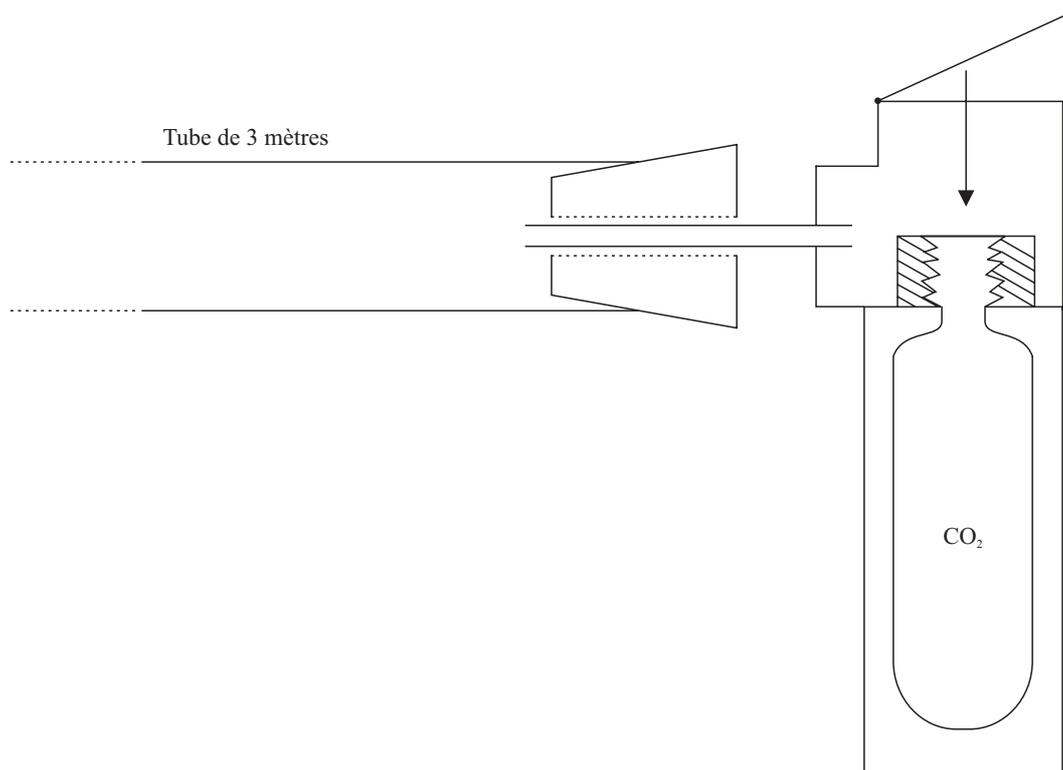
Il est possible d'utiliser une de ces bonbonnes pour emplir de  $\text{CO}_2$ , commodément mais provisoirement, le tuyau de 3 mètres du montage expérimental décrit plus haut.

Le tuyau (3,400 mètres en tout) ayant un volume intérieur de 1,5 dm<sup>3</sup> environ, une bonbonne suffit largement (pertes comprises) pour en faire le plein.

Pour effectuer l'opération de perçage et surtout pour pouvoir disposer du gaz qui s'échappe (rapidement!), on trouve, parmi les accessoires pour bicyclettes en question, un dispositif (dénommé «pompe») qui permet:

- d'une pression du doigt de percer l'opercule;
- d'un relâchement du même doigt de libérer le gaz.

Celui-ci s'échappe par un orifice latéral de la «pompe», prévu pour s'adapter aux «pipettes» des chambres à air des pneus des bicyclettes. On insère dans l'orifice en question un morceau de tube métallique de 6 millimètres de diamètre et de 5 centimètres de long, et on place dans l'extrémité libre du tube en matière plastique (de 3 mètres de long) un bouchon en caoutchouc percé d'un trou.



On glisse alors la tubulure de la «pompe» dans le trou du bouchon et il devient possible, en manœuvrant calmement la «pompe», d'emplir de CO<sub>2</sub>, en quelques secondes, le tube de 3 mètres du montage. L'air que contient ce tube est chassé du côté du diffuseur.

Si on a laissé le montage en fonctionnement pendant cette opération, on voit très clairement, les remous dus au remplissage étant calmés, que le pic réfléchi s'est déplacé vers la droite sur l'écran de l'oscilloscope.

Ceci démontre, le temps de parcours ayant augmenté, que la célérité de la perturbation de pression dans le CO<sub>2</sub> est inférieure à sa célérité dans l'air.

Une mesure rapide nous a fourni:

$$v_{\text{CO}_2} = 260 \text{ m/s}$$

la température du gaz (refroidi lors de sa détente) étant d'environ 5°C.

Pour gouverner, les tables fournissent, pour la célérité du son dans le CO<sub>2</sub> à 5°C la valeur 261 m/s.

Si l'on désire effectuer un ensemble de mesures, comme en 2.4.2., il faut, alors, commencer par un tube de 3 mètres, que l'on raccourcit par quanta de 0,5 mètre, en ayant soin:

- de procéder rapidement;
- de boucher le tube après chaque raccourcissement.

### 3.4.2. MESURE DE LA CÉLÉRITÉ D'UN SIGNAL SINUSOÏDAL

- Reprendre le montage décrit en 2.3.:
  - un seul micro [micro (1)];
  - tube ouvert aux deux extrémités;
  - un seul canal (Y) de l'oscilloscope.
- Placer le générateur BF en position «signal sinusoïdal» et ajuster l'intensité de celui-ci.
- Régler la fréquence de ce signal, **par exemple**, à 1000 Hz.
- Enfiler dans le tube du montage 2.3. le tube fermé cité en 3.1.10., bouchon en avant.
- En faisant glisser ce dernier tube dans le premier, on observe, sur l'écran de l'oscilloscope, la trace de signaux présentant des minimums (figure 6) et des maximums (figure 7) alternés. Ils correspondent à des déplacements linéairement croissants de l'extrémité du tube intérieur.

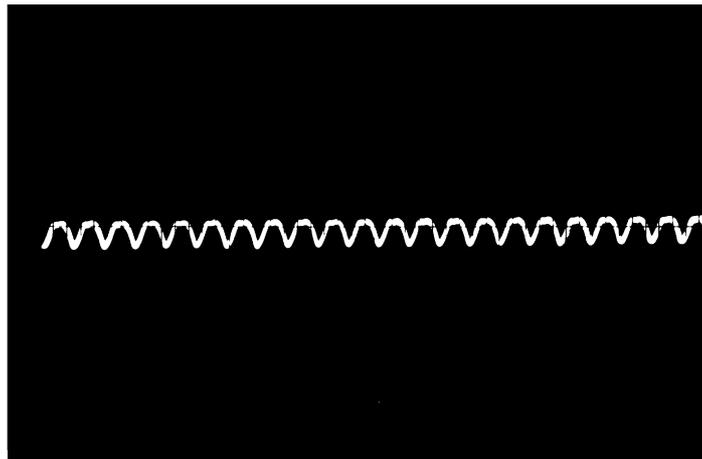


Figure 6

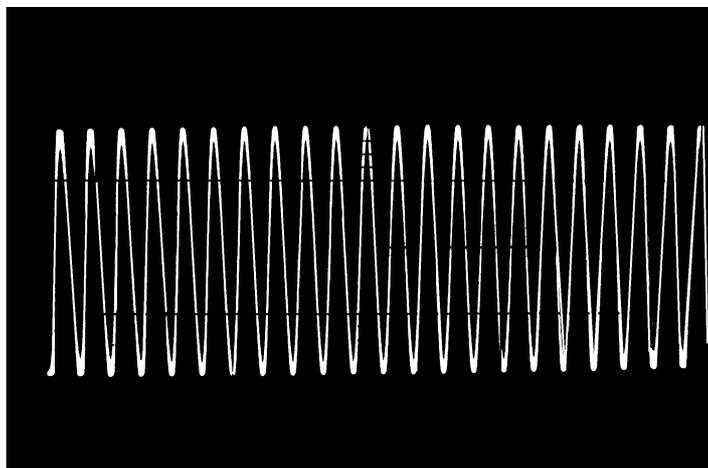


Figure 7

La plus petite distance dont il faut déplacer ce tube intérieur 3.1.10. pour rétablir une situation quelconque donnée (par exemple un minimum de l'oscillogramme) est égale à  $\frac{\lambda}{2}$ , puisque cette opération allonge de  $2 \frac{\lambda}{2} = \lambda$  le chemin parcouru par la perturbation après son passage devant le micro (1), avant et après sa réflexion, tous les éléments du montage restant par ailleurs inchangés.

À partir de cette valeur, mesurée, de  $\lambda$ , on peut, la fréquence du signal sinusoïdal étant connue, calculer la célérité de sa propagation.

Exemple:

- fréquence du signal sinusoïdal: 1001 Hz;
- distance entre les positions extrêmes du tube intérieur qui correspondent aux minimums d'une suite de neuf: 1,365 mètre (mesurée entre deux traits tracés, au crayon, sur le tube intérieur). Cette distance correspond à  $8 \frac{\lambda}{2}$ .

On peut donc écrire:

$$1,365 = 8 \frac{\lambda}{2}$$

$$\lambda = 0,34125 \text{ m}$$

En appliquant la formule:

$$\lambda \cdot \nu = v$$

on trouve:

$$v = 0,34125 \cdot 1001 = 341,6 \text{ m/s}$$

$$v = (342 \pm 2) \text{ m/s}$$

La température de l'air du local était 20°C.

#### 4. DOCUMENTS

On trouvera, dans les pages qui vont suivre, quelques documents ou fragments de documents où sont relatées quelques expériences analogues à celles qui nous occupent.

Nous nous sommes limités à quelques documents d'origine française. On considérera leur liste, non exhaustive, comme un embryon de bibliographie sur le sujet et comme un rappel des circonstances, parfois pittoresques, dans lesquelles ces expériences se sont déroulées.

780 *XIV. Entretien*

## XIV. ENTRETIEN.

*Sur différentes propriétés des Sons.*

ARISTE. LA Lumière & le Son ; Eudoxe, ont, si je ne me trompe, quelque ressemblance, soit par rapport au corps sonore & au corps lumineux, soit par rapport aux milieux qui font passer jusqu'à nos sens les impressions de la lumière & du son.

Car enfin, le corps lumineux modifie la lumière en diverses couleurs, & le corps sonore modifie le son en différents tons, l'un & l'autre par des vibrations plus ou moins promptes.

EUDOXE. Les vibrations de la matière éthérée nous donnent la lumière (a), & les vibrations de l'air, le son (b) : mais, Aristote, quelle différence de vitesse entre le son & la lumière ! Le son qui fait environ 180 toises en 1 seconde, fera 36 à 38 lieues, tandis que la lumière en fera 30 millions, & la lumière ira,

(a) Tom. III. Entr. 5. p. 88.

(b) Tom. III. Entr. 2. pag. 25.

*Sur différ. propriétés des Sons.* 18<sup>e</sup> environ, 800 mille fois plus vite que le son.

ARISTE. Mais, Eudoxe, croyez-vous que le son se transmette avec la même vitesse dans les climats différents ? Le voisinage de la mer l'en retarde-t-il pas, n'en accélère-t-il pas la propagation ? Le degré de vitesse du son est-il le même dans les intervalles plus grands ou plus petits ?

EUDOXE. D'abord en 1739, & dans le Languedoc & près de Paris, M. de Thury trouva par les mêmes expériences la même vitesse dans le son, c'est-à-dire une vitesse de 173 toises environ par seconde, vitesse assez conforme à celle qu'on avoit observée près de Quito (a).

2. Dans les plaines, le long de la mer, dans un terrain inégal & rempli de montagnes, dans des espaces plus petits ou plus grands, le son s'est transmis en des temps proportionnels aux différentes distances.

3. Le son, plus ou moins fort, s'est porté avec la même vitesse, sans que la

(a) De 174 tois. 9 onzièmes ou 175. Observaciones Hechas de Orden de S. M. pag. 140. M. de la Condamine trouva la vitesse du son à Cayenne de 183 toises à peu près par seconde. Voyage de la Rivière des Amazones. p. 206.

*sur differ. propriét. des Sons. 189*

Mais vous rappelez-vous, Ariste, les observations que l'on fit sur les sons en 1738 à Montlehery, à l'Observatoire, à Lay, à Montmartre?

ARISTE. Je sçai que l'on fit alors des observations curieuses, mais dont le détail n'est plus assez présent à mon esprit.

EUDOXE. Eh bien, un précis fait alors de ce qui se passa, va nous le rappeler.

1. Deux observateurs furent placés à Montlehery, deux à l'Observatoire, deux à Lay, deux à Montmartre, endroits situés dans la même ligne à peu près, avec des canons, des pendules, & des montres à secondes, pour marquer le moment où l'on verroit la lumière du canon, & le temps écoulé entre la lumière & le bruit.

A 9 heures du soir 25', on devoit tirer à l'Observatoire une boîte chargée d'une livre de poudre pour donner le signal. L'on devoit tirer à Montmartre, deux coups de canon, l'un à 9 heur. 30'

de voir un Philosophe, chez qui la Sagesse étoit venue, dit-on, se loger en descendant du Ciel, & qui réduisoit la Philosophie à la Morale, dans un jeune homme sous des cheveux blancs.

190 *XIV. Entretien*

l'autre à 9 heures 50'; à Montlehery; deux coups, le premier à 10 heures, le deuxième à 10 heur. 20' (a).

2. Dans la première observation le 13 Mars, le vent étant Nord & assez grand; les deux coups de canon tirés à Montmartre furent entendus à l'Observatoire 16" après que l'on eut apperçu la lumière; à Montlehery le premier, 1' 22" 1 deuxième après la lumière; le second; 1' 22".

On vit très distinctement à l'Observatoire & à Montmartre le feu du canon tiré à Montlehery ce jour-là, mais on n'entendit pas le bruit à cause du vent contraire. La pluie même n'empêcha pas que le feu du canon ne parût d'une vivacité extraordinaire, parce que la nuit étoit sombre.

3. Dans l'observation suivante, depuis Montlehery jusqu'à Lay, l'intervalle du temps entre la lumière & le son fut de 40"; depuis Lay, qui est un peu écarté, jusqu'à l'Observatoire, de 20"; & depuis l'Observatoire jusqu'à Montmartre, de 16" 1 deuxième; & par conséquent depuis Montlehery jusqu'à Montmartre, de 1' 24", ôtant un deuxième

(a) Mém. de l'Acad. 1738. pag. 130.

*Jur differ. propriét. des Sons.* 191  
à cause que ces quatre endroits ne sont pas exactement dans la même ligne.

On entendit réciproquement le bruit de l'Observatoire & de Montlehery, les mêmes causes qui pouvoient accélérer ou retarder le son, agissant en sens contraire dans les deux directions différentes; le milieu entre les deux observations devoit donner la mesure exacte de la vitesse du son, laquelle s'est trouvée de 1' 8" dans l'espace de 11756 toises, c'est-à-dire de 173 toises par secondes.

On réitéra les observations pendant plusieurs jours jusqu'au 25 Mars.

Un jour, le feu du canon tiré à Montmartre à 9 heu. 30' & à 9 heu. 50' fut apperçu de l'Observatoire, à Lay, à Montlehery; mais, à cause du vent contraire, le bruit ne fut entendu, ni à Montlehery, ni à Lay, ni même à l'Observatoire, dont la distance n'est que de 2931 toises; & les coups de canon tirés à Montlehery furent entendus de Lay, de l'Observatoire & de Montmartre même, le vent étant favorable.

Enfin, suivant les observations réitérées pendant plusieurs jours, depuis le 13 Mars jusqu'au 25 inclusivement, par MM. de Thury, Maraldy & la Caille (a):

(a) Mém. de l'Acad. 1738. p. 141.

192 *XIV. Entretien*

1. La vitesse du son, dans un temps calme, est de 173 toises par seconde; & elle se trouve, à peu près, de la même quantité lorsque le vent est dans une direction perpendiculaire à la ligne qui joint l'endroit d'où part le son & l'endroit où l'on l'entend. Le son perpendiculaire à la ligne sonore ne retarde pas le son sensiblement, parce que l'air déplacé se trouve remplacé au même temps par un air dont les vibrations transmettent le son.

2. Le son, plus ou moins fort, se répand avec la même vitesse, puisque le bruit d'une boîte tirée à Montmartre, & dont la charge étoit d'une demi-livre de poudre seulement, fut entendue à Montlehery après l'impression de la lumière, dans le même temps que les coups de canon tirés successivement à Montmartre, & dont la charge étoit de six livres à peu près. Le son est-il plus fort? Les particules d'air plus comprimées ont, à proportion, plus d'espace à parcourir pour se rétablir & se remettre dans leur état ordinaire.

3. La vitesse du son est la même dans un temps pluvieux & dans un temps serein; la même le jour & la nuit. Si l'air se trouve plus comprimé le jour ou la nuit,

#### 4.2. UNE RELATION, PAR DOMINIQUE FRANÇOIS ARAGO, DES EXPÉRIENCES DES 21 ET 22 JUIN 1822

«Les physiciens ont déjà fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la vitesse avec laquelle le son se propage dans l'atmosphère; mais leurs résultats présentent des discordances considérables et fort supérieures aux incertitudes dont ce genre d'observations paraît susceptible. Ces discordances, il n'est guère permis d'en douter, ont dépendu, le plus ordinairement du moins, de l'influence du vent. Il n'existe qu'un moyen certain de se mettre tout à fait à l'abri de cette cause d'erreur: il consiste à produire deux sons pareils au même instant dans deux stations, et à observer, dans chacune d'elles, le temps que le son de la station opposée emploie à y arriver: le vent produisant alors des effets contraires sur les deux vitesses, la moyenne des résultats doit être aussi exacte que si l'atmosphère avait été parfaitement tranquille.

«Nos premières épreuves eurent lieu le 21 juin 1822. Dès le matin, MM. de Humboldt, Gay-Lussac et Bouvard étaient partis pour Montlhéry. M. de Laplace, fils, lieutenant-colonel dans l'artillerie de la garde, qui avait porté la complaisance, afin que toutes les expériences fussent rigoureusement comparables, jusqu'à surveiller lui-même la confection des gargousses de deux et de trois livres de poudre dont on devait se servir, voulut bien se joindre à cette partie de la commission; le canon fut installé à Montlhéry par les soins de M. le capitaine Pernetty. Dans le même temps, nous nous rendions, MM. de Prony, Mathieu et moi, sur le point du territoire de Villejuif qui, la veille, nous avait paru une station convenable. M. le capitaine Boscary vint nous y rejoindre dans la soirée avec une pièce de six. Les expériences commencèrent à 11 heures. Le temps était serein et presque complètement calme: le peu de vent qu'il faisait soufflait de Villejuif à Montlhéry ou, plus exactement, du nord-nord-ouest au sud-sud-est.

«À Villejuif nous entendîmes parfaitement, MM. de Prony, Mathieu et moi, tous les coups de Montlhéry; aussi n'apprîmes-nous pas sans étonnement, le lendemain, que le bruit du canon de notre station s'était à peine transmis jusqu'à l'autre. Quoi qu'il en soit de la cause de ce singulier phénomène, sept coups différents furent entendus à Montlhéry.

«Durant toutes les expériences du 21, le canon de Villejuif était resté incliné à l'horizon sous un angle assez grand. Imaginant qu'on pouvait attribuer en partie à cette circonstance l'affaiblissement singulier que le son avait éprouvé en se transmettant de cette station à Montlhéry, nous plaçâmes la pièce, le lendemain 22, dans une situation parfaitement horizontale. Ce jour, comme le 21, nous entendîmes à merveille la totalité des coups qui furent tirés à Montlhéry; tandis qu'à cette dernière station, un seul coup sur les douze de Villejuif fut entendu par MM. Gay-Lussac et Bouvard, et encore très faiblement.

«Pendant notre séjour à Villejuif, le 21 juin, nous nous servîmes d'un excellent théodolite de Gambey pour rattacher cette station d'abord à Montlhéry et au moulin de Fontenay, qui étaient deux des sommets d'un des triangles de l'ancienne méridienne vérifiée, et ensuite au Panthéon, à l'Observatoire, à la pyramide de Montmartre et aux Invalides. De retour à l'Observatoire, nous déterminâmes de même les angles compris entre ces différents points, à l'aide d'un cercle azimutal qui est attaché à la partie inférieure de l'axe du grand cercle répétiteur de Reichenbach. J'ai puisé dans ces mesures divers moyens de calculer la distance du canon de Villejuif au canon de Montlhéry, que j'ai trouvée de 9549,6 toises<sup>1</sup>; En la divisant par 54,6, nombre moyen de secondes que le son employait pour franchir la distance des deux stations, on trouve que 174,9 toises<sup>2</sup> étaient, durant l'expérience du 21, l'espace parcouru par le son dans une seconde sexagésimale.»

---

<sup>1</sup> 18612,5m.

<sup>2</sup> 340,9m.

# COMPTE RENDU

## DES SÉANCES

### DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

---

SÉANCE DU LUNDI 3 FÉVRIER 1868.

PRÉSIDENTE DE M. DELAUNAY.

---

#### MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS

DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADÉMIE.

**M. LE MINISTRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE** transmet une ampliation du Décret impérial qui approuve l'élection de *M. Dumas* à la place de Secrétaire perpétuel pour les Sciences Physiques, devenue vacante par suite du décès de *M. Flourens*.

Il est donné lecture de ce Décret.

Sur l'invitation de M. le Président, **M. DUMAS** prend place au bureau de l'Académie.

PHYSIQUE. — *Sur la vitesse de propagation des ondes dans les milieux gazeux ;*  
par **M. V. REGNAULT** (1).

« Les expériences dont je présente aujourd'hui les résultats à l'Académie sont terminées depuis plusieurs années. Le Mémoire qui les résume est déjà imprimé dans le tome XXXVII de ses Mémoires, dont il forme la première partie ; mais comme ce volume ne paraîtra que dans un avenir plus ou moins éloigné, je prie l'Académie de m'autoriser à en publier les conclusions dans le *Compte rendu* de cette séance.

---

(1) L'Académie a décidé que cette communication, bien que dépassant les limites réglementaires, serait reproduite en entier au *Compte rendu*.

» I. D'après la théorie, une onde plane doit se propager indéfiniment dans un tuyau cylindrique rectiligne, en conservant la même intensité. Mes expériences démontrent, au contraire, que l'intensité de l'onde diminue successivement, et d'autant plus vite que le tuyau a une plus faible section.

» Pour démontrer nettement ce fait, j'ai produit des ondes, d'intensité égale, avec un même pistolet chargé de 1 gramme de poudre, à l'orifice de conduites de sections très-différentes, et j'ai cherché à reconnaître la longueur du parcours au bout de laquelle le coup ne s'entend plus à l'oreille. J'ai cherché de plus à déterminer le parcours, beaucoup plus long, au bout duquel l'onde silencieuse cesse de marquer sur mes membranes les plus sensibles. J'ai trouvé ainsi :

» 1° Dans une conduite à gaz d'Ivry, dont la section intérieure est de 0<sup>m</sup>,108, on entend encore le coup à la seconde extrémité, distante de 566<sup>m</sup>,7 de l'origine, mais le son est très-affaibli. Si l'on ferme la seconde extrémité hermétiquement, avec une plaque de tôle, et qu'on place l'oreille à l'orifice du départ, il faut prêter la plus grande attention pour entendre le retour du coup. Ainsi, dans une conduite cylindrique rectiligne du diamètre de 0<sup>m</sup>,108, un parcours de 1150 mètres suffit pour éteindre complètement le son produit par un coup de pistolet, avec une charge de 1 gramme de poudre.

» 2° Dans une conduite, du diamètre de 0<sup>m</sup>,30, de la route militaire, le coup de pistolet s'entend très-distinctement à l'autre extrémité, éloignée de 1905 mètres. Si l'on ferme cette extrémité avec une plaque de tôle, et qu'on applique l'oreille à l'orifice du départ, on entend encore l'onde réfléchie, mais la perception est à peine sensible. L'onde a alors parcouru, dans la conduite, un chemin de 3810 mètres.

» 3° Dans la grande conduite, du diamètre de 1<sup>m</sup>,10, de l'égout Saint-Michel, l'onde produite par le coup de pistolet donne un son intense quand elle arrive à l'autre extrémité B, après avoir parcouru un chemin de 1590 mètres. Après une première réflexion en B, elle revient à l'extrémité de départ A. Son parcours total est alors de 3180 mètres; on reconnaît que le son s'est affaibli, mais il conserve assez d'intensité pour qu'on l'entende au dehors, sans avoir besoin de retirer la membrane qui ferme l'orifice A. Après une seconde réflexion en B et un second retour en A, l'onde a parcouru 6360 mètres; on entend encore le coup très-distinctement. Enfin, ce n'est qu'après une nouvelle réflexion en B, qu'on n'entend le troisième retour en A, que si un silence absolu règne dans la galerie. Le parcours total est alors de 9540 mètres.

» Ainsi, un coup de pistolet, produit par 1 gramme de poudre, donne un son qui n'est plus perçu par l'oreille quand il a parcouru :

1150 mètres dans un tuyau dont le diamètre est de 0<sup>m</sup>,108,

3810 mètres dans un tuyau dont le diamètre est de 0<sup>m</sup>,300,

9540 mètres dans un tuyau dont le diamètre est de 1<sup>m</sup>,100.

» Les longueurs sont ici sensiblement proportionnelles aux diamètres. Il est probable, néanmoins, que ces parcours seraient plus longs si l'onde ne subissait pas des réflexions successives qui l'affaiblissent continuellement.

» Lorsque l'onde n'a plus assez d'intensité, ou *qu'elle s'est assez modifiée*, pour ne plus produire sur notre oreille la sensation du son, elle est encore capable, même après un parcours très-prolongé, de marquer son arrivée sur nos membranes.

» Ainsi, lorsque l'onde est produite par une charge de 1 gramme de poudre, elle imprime sa dernière marque sur une membrane quand elle a parcouru les chemins suivants :

4056 mètres dans la conduite de 0<sup>m</sup>,108,  
11430 mètres dans la conduite de 0<sup>m</sup>,300,  
19851 mètres dans la conduite de 1<sup>m</sup>,100.

» Mais, sur une conduite du diamètre de 1<sup>m</sup>,10 qui forme le grand siphon de Villemonble, nous avons noté des parcours beaucoup plus longs; il est vrai que la charge de poudre était portée à 2<sup>gr</sup>,40.

PHYSIQUE. — *Sur la propagation du son dans un tuyau cylindrique.* Note de MM. VIOLLE et VAUTIER, présentée par M. Mascart.

« Au mois de septembre dernier, la municipalité de Grenoble ayant bien voulu mettre à notre disposition la conduite souterraine destinée à amener dans la ville les eaux de Rochefort, nous avons profité de cette occasion pour reprendre l'étude de la propagation du son dans un tuyau cylindrique, en considérant particulièrement les points omis ou laissés en litige par Regnault dans son beau travail sur ce sujet.

» La portion de la conduite que nous avons utilisée se compose de deux tuyaux parallèles de 0<sup>m</sup>,70 de diamètre, présentant en ligne droite une longueur L de 6<sup>km</sup>,375 environ. Ces deux tuyaux pouvaient être employés isolément, ouverts ou fermés; on pouvait aussi les réunir à leurs extrémités par un coude demi-circulaire de même diamètre intérieur que les tuyaux et de 0<sup>m</sup>,70 de rayon.

» M. Mascart avait eu la bonté de nous prêter les appareils qui avaient servi autrefois à Regnault. Nous les avons utilisés sans y changer autre chose que les membranes, que nous avons prises beaucoup plus minces et plus sensibles. Nous avons aussi employé avantageusement les tambours manométriques de M. Marey. Enfin l'oreille nous a permis diverses constatations.

» L'onde sonore a été produite au moyen de pistolets ou d'instruments de musique. Nous nous bornerons aujourd'hui à indiquer les principaux résultats obtenus avec le pistolet.

» Quand on tire un coup de pistolet à l'une des extrémités de la conduite, un observateur placé à cette extrémité entend un son qui se prolonge en paraissant s'éloigner et en présentant une série de roulements marqués. Au bout de 18<sup>s</sup>,6 le son parvient au coude, où il présente les mêmes caractères, atténués : c'est, pour l'oreille, à l'intensité près, comme un train qui, arrivant brusquement par l'une des branches, s'engouffrerait dans l'autre. Après 37<sup>s</sup>,3, le son a parcouru 12<sup>km</sup>,750 : il est encore très nettement perceptible à l'oreille, qui entend un bruit sourd et en apparence unique, semblable à celui d'une détonation lointaine en plein air; en même temps qu'on perçoit le son, on sent un fort coup de vent. Plus loin, cette poussée d'air est la seule chose que l'on perçoive : elle est encore parfaitement sensible après 50<sup>km</sup>. L'énergie de la poussée est supérieure à celle de la plupart des sons musicaux que l'oreille perçoit sans peine, et cependant on n'entend plus absolument rien.

» Si l'on substitue à l'oreille un tambour à levier de M. Marey et qu'on inscrive les mouvements du levier en même temps que ceux d'un diapason chronométrique ( $ut_3 = 256^{rd}$ ), on obtient pour chacune des distances 0, 2L, 4L, 6L la courbe des pressions de l'air.

**SUR LA PROPAGATION DU SON A L'INTÉRIEUR D'UN TUYAU  
CYLINDRIQUE;**

PAR MM. J. VIOLLE ET TH. VAUTIER.

INTRODUCTION.

Nous n'entreprendrons pas de tracer l'histoire des nombreux travaux exécutés pour déterminer la vitesse de propagation du son dans l'air. Ces travaux ont été analysés et critiqués ici même par Bravais et Martins <sup>(1)</sup>, puis par M. Le Roux <sup>(2)</sup>, et l'on trouvera dans un Mémoire dû à M. Mecklenburg <sup>(3)</sup> l'indication de toutes les recherches effectuées à ce sujet <sup>(4)</sup>.

Nous essayerons seulement de marquer l'état de la question au moment où nous avons entrepris nos recherches.

Les déterminations les plus exactes donnent, pour la vitesse du son dans l'air sec à zéro, des nombres compris entre 332<sup>m</sup>, 3 [Moll et van Beck <sup>(5)</sup>] et 330<sup>m</sup>, 6 [Regnault <sup>(6)</sup>]. L'écart est énorme, eu égard à la perfection des procédés actuels de mesure et à l'habileté des opérateurs. C'est que la question est très complexe, et plus d'un problème reste à résoudre.

1<sup>o</sup> Est-il indifférent de provoquer l'onde au moyen d'une arme à feu, d'un instrument de musique ou d'un piston frappeur? La vitesse réelle de propagation est-elle la même, quelle que soit la forme de l'onde initiale?

Les détonations donnant des sons intenses et brefs ont été presque exclusivement employées, malgré l'inconvénient qui résulte de la vitesse de translation communiquée aux gaz produits.

<sup>(1)</sup> BRAVAIS ET MARTINS, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3<sup>e</sup> série, t. XIII, p. 5; 1845.

<sup>(2)</sup> LE ROUX, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 4<sup>e</sup> série, t. XII, p. 345; 1867.

<sup>(3)</sup> BENNO MECKLENBURG, *Ueber die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles*. Berlin; 1877.

<sup>(4)</sup> Voir aussi VIOLLE, *Cours de Physique: Acoustique*. Paris; 1888.

<sup>(5)</sup> C'est à cette valeur, comme l'ont montré Bravais et Martins, que doit être réduit le nombre 332<sup>m</sup>, 8 publié par les auteurs.

<sup>(6)</sup> REGNAULT, *Relation des expériences entreprises pour déterminer les données des machines à feu*, t. III (t. XXVII des *Mémoires de l'Académie des Sciences*), p. 549; 1870.

Une occasion favorable s'offrit à nous pendant les vacances de 1885.

#### APPAREILS EMPLOYÉS ET MÉTHODE SUIVIE.

La municipalité de Grenoble ayant résolu d'amener dans la ville l'eau des sources de Rochefort, le Directeur du service de la voirie et des eaux, M. Thiervoz, venait de faire exécuter les travaux nécessaires, comprenant, entre autres, une double conduite souterraine enfouie à 2<sup>m</sup> sous la contre-allée orientale du cours Saint-André. Ce cours s'étend en ligne droite sur plus de 8<sup>km</sup> de longueur, depuis le Pont-de-Claix, au sud, jusqu'à Grenoble, au nord. Nous fûmes gracieusement autorisés à utiliser toute la portion des deux conduites parallèles comprise entre la sortie du Pont-de-Claix et la barrière de l'Aigle, à Grenoble. Chaque conduite, de 0<sup>m</sup>,700 de diamètre intérieur, se compose d'abord d'un tube en béton de ciment ayant environ 2650<sup>m</sup> de longueur (1), puis d'une série de tuyaux en fonte, s'emboitant l'un au bout de l'autre, sur un parcours de 3690<sup>m</sup> environ. Les deux conduites marchent d'abord pendant 4620<sup>m</sup> à une distance l'une de l'autre de 1<sup>m</sup>,380 d'axe en axe; puis elles s'écartent légèrement (2), sur une longueur de 30<sup>m</sup>, pour se mettre à la distance de 2<sup>m</sup>,340, qu'elles conservent jusqu'à l'Aigle. Nous avions donc à notre disposition deux tuyaux très sensiblement rectilignes et parallèles de 0<sup>m</sup>,700 de diamètre intérieur, et de 6342<sup>m</sup>,603 de longueur (3). On pouvait employer séparément l'un ou l'autre des deux tuyaux, ou bien les réunir au Pont-de-Claix par un coude demi-circulaire de 2<sup>m</sup>,167 de longueur suivant l'axe (4) : on avait alors un immense tube en U, long de 12687<sup>m</sup>,373, dont les deux extrémités se trouvaient sous la main de l'opérateur placé à l'Aigle, arrangement singulièrement avantageux à la facilité et à la précision des expériences. D'ailleurs, la station du Pont-de-Claix était réunie à celle de l'Aigle par un fil que l'Administration des télégraphes consentit à nous prêter; et à chacune des stations, la Ville de Grenoble avait eu l'obligeance de nous faire construire une baraque d'expériences.

Il s'agissait de tirer le meilleur parti possible de ce bel instrument dans le temps très limité pendant lequel nous pouvions en disposer.

Pour abréger les tâtonnements préliminaires, et pour avoir le temps d'expérimenter par d'autres méthodes, nous résolûmes de suivre d'abord exactement le procédé opératoire de Regnault. M. Mascart voulut bien mettre à notre disposition les appareils du grand physicien, qui sont conservés religieusement au Collège de France.

PHYSIQUE. — *Sur la propagation du son dans un tuyau cylindrique.*

Note de MM. J. VIOLLE et TH. VAUTIER, présentée par M. Mascart.

« Nous avons récemment fait des expériences sur la propagation du son dans la conduite que la Ville de Paris vient de construire entre Clichy et Achères pour l'abduction des eaux d'égout et qui avait été très obligeamment mise à notre disposition par M. Bechmann. La portion que nous avons utilisée forme un tuyau cylindrique de 3<sup>m</sup> de diamètre et près de 3<sup>km</sup> de longueur, s'étendant en ligne droite, d'Argenteuil à Cormeilles. Ce tuyau était fermé à chaque bout par une cloison percée des ouvertures nécessaires pour recevoir les appareils et pour pénétrer à l'intérieur de la conduite.

» Les expériences ont été conduites suivant différentes méthodes et ont fourni de nombreux tracés et clichés dont le dépouillement demandera un certain temps; mais nous pouvons, dès maintenant, résumer les faits que nous avons constatés à l'aide seule de l'oreille, relativement à la propagation des sons émis par des instruments de musique (<sup>1</sup>), de l'*ut*, au *ré*. M. Parès, chef de musique de la Garde républicaine, et ses artistes, M. Couesnon, le facteur d'instruments bien connu, et plusieurs membres de l'Harmonie d'Argenteuil, nous ont prêté leur concours pour la production des sons.

» Un premier fait remarquable, qui contraste singulièrement avec l'un des résultats de nos expériences de Grenoble (<sup>2</sup>), est la conservation des qualités acoustiques du son à de grandes distances, en un mot la portée du son. Tandis qu'à Grenoble, dans la conduite de 0<sup>m</sup>,70 de diamètre, un son musical intense, celui, par exemple, d'une grande flûte d'orgue de 16 pieds, cessait d'être perceptible à l'oreille peu au delà de 6<sup>km</sup>, mais se manifestait encore sous la forme de poussée après un parcours de 25<sup>km</sup> avec une réflexion; à Argenteuil, dans la conduite de 3<sup>m</sup> de diamètre, le même son, presque immédiatement insensible comme poussée, s'entend encore nettement au bout d'un trajet de plus de 23<sup>km</sup> compliqué de sept réflexions. L'importance de ce fait ressortira mieux encore par les rapprochements que nous aurons l'occasion d'en faire avec d'autres phénomènes non moins nets.

---

(<sup>1</sup>) Instruments à vent (flûtes de grand orgue, sarrusophones, hélicon, contrebasse, basse, piston, trompettes chromatiques, grandes et petites flûtes d'orchestre, sifflets), violoncelle, cloche, gongs.

(<sup>2</sup>) J. VIOLLE et TH. VAUTIER, *Comptes rendus*, 1886-1890; *Annales de Chimie et de Physique*; 1890.

## 5. EXTENSION DE LA MÉTHODE À LA MESURE DE LA CÉLÉRITÉ D'UN TRAIN D'ONDES ULTRASONORES DANS L'AIR CONTENU DANS UN TUYAU

Il s'agit des trains d'ondes émis par le générateur ET 1200 23226 du Centre technique et pédagogique lorsqu'il est placé en position «rafales».

Rappelons qu'il émet, par l'intermédiaire du transducteur émetteur MV 4200 00002 des ultrasons de fréquence (fixe) de 40 000 Hz.

Ces ultrasons peuvent être détectés par les transducteurs récepteurs MV 4300 00002.

### 5.1. PRINCIPE DE LA MESURE

- ◆ On envoie les ultrasons, émis par le transducteur émetteur, dans un tuyau de 3 mètres de long, démontable en tronçons de 0,500 mètre<sup>1</sup>.
- ◆ On enregistre le passage d'un des trains d'ondes émis devant un premier transducteur récepteur, placé sur le flanc du tuyau, puis devant un second transducteur, placé à l'extrémité du tuyau, en envoyant, après amplification, les signaux créés par les deux transducteurs sur les deux canaux d'un oscilloscope en balayage (figure 8).

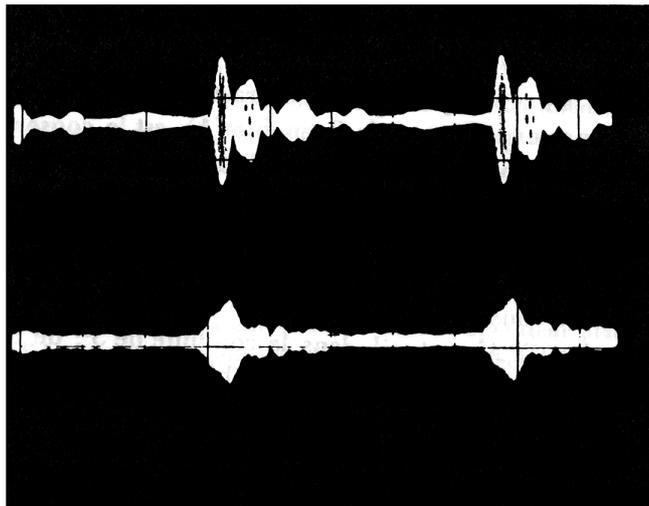


Figure 8

- ◆ On mesure la distance entre les deux transducteurs.
- ◆ On détermine la durée du passage du début du train d'ondes du premier au second transducteur.
- ◆ On peut ainsi, à partir de mesures directes, calculer la célérité du mouvement du train d'ondes ultrasonores (40 000 Hz).

---

<sup>1</sup> Le montage pourrait, en cas d'intérêt, être fourni par le Centre technique et pédagogique.

## 5.2. RÉALISATION

On répète la mesure décrite ci-avant en faisant varier la longueur utile du tuyau (par exemple de 1,5 mètre à 3 mètres). La longueur dite utile du tuyau est la distance entre les deux transducteurs récepteurs.

## 5.3. RÉSULTATS

Longueur utile du tuyau (m)	Durée du trajet (. $10^{-3}$ s)
0	0
1,5	4,6
2	6,2
2,5	7,6
3	9,0

On en tire le graphique ci-joint (page 40), dont voici les caractéristiques:

- coefficient de corrélation: 0,9997;
- coefficient angulaire: 331,5 m/s.

La célérité correspondante du train d'ondes dans le tuyau vaut donc 331,5 m/s.

Rappelons, à toutes fins utiles:

- que la célérité des trains d'ondes acoustiques est, dans l'air contenu dans un tuyau, inférieure à leur célérité à l'air libre;
- que la célérité des ultrasons dans les gaz à molécules polyatomiques présente des variations avec la fréquence.  
À titre d'exemple, indiquons que, entre 40 000 et 200 000 Hz, la célérité dans le  $\text{CO}_2$  passe de 259 à 266 m/s.

