

PHYSIQUE

QUESTIONS
OUVERTES

1^{re} année
CPGE
scientifiques

Lionel Uhl



ellipses

PHYSIQUE

QUESTIONS
OUVERTES

1^{re} année
CPGE
scientifiques

PHYSIQUE

QUESTIONS
OUVERTES

1^{re} année
CPGE
scientifiques

Lionel Uhl

*Professeur en classes préparatoires
au lycée Thiers à Marseille*



ISBN 9782340-053731
© Ellipses Édition Marketing S.A., 2019
32, rue Bargue 75740 Paris cedex 15



Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5.2° et 3°a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.editions-ellipses.fr

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage rassemble plus de 90 sujets conduisant à une question de physique qu'un esprit curieux pourrait se poser lors de ses lectures. Les thèmes abordés couvrent la majorité du programme de première année (*Sup*) des Classes Préparatoires aux Grandes Écoles et sont répartis en 6 chapitres : les ondes, l'électrocinétique, l'optique, la mécanique, la thermodynamique et l'hydrostatique. Au début de chaque chapitre un sommaire précise les titres et les questions relatifs au sujet proposé. Si un élève de PCSI peut traiter l'intégralité des questions, les élèves des autres filières (MPSI, PTSI ou BCPST) rencontreront quelques rares questions hors programme (marquées par une croix ✕) ou alors abordables seulement à partir de la seconde année (noté *Spé*). Enfin le nombre d'étoiles (★) à côté du titre indique le niveau de difficulté de la question.

Énoncé de la question

Données :

- Pour répondre à la question posée, des données sont parfois fournies. Elles peuvent être utiles à la résolution du problème ou simplement culturelles.
- Certaines constantes fondamentales nécessaires à l'étude sont parfois rappelées, d'autres encore apparaissent mais ne serviront pas et enfin certaines grandeurs sont volontairement omises car elles doivent être connues. En effet si l'étudiant cherche avec rigueur la solution, il est capable de faire le tri parmi l'ensemble des informations données : c'est l'analyse d'un problème qui conduit à chercher une donnée et non l'inverse. Orienter sa réflexion en regard des données fournies par l'énoncé est une erreur de logique voire d'honnêteté scientifique !
- Certaines grandeurs sont laissées à l'appréciation de l'étudiant comme par exemple la masse moyenne d'un homme ou sa vitesse de course ...

À savoir avant de commencer...

Pour guider et aider l'élève dans sa démarche, des rappels de cours sont proposés en lien avec la question.

La partie du cours proposée en rappel est détaillée et permet d'accompagner l'étudiant vers une idée propice à la résolution du problème. Lorsque plusieurs questions utilisent la même notion de cours, cette dernière n'est alors présentée que lors de la première étude mais n'est pas rappelée pour les suivantes.

Indications

La résolution du problème passe par des questions intermédiaires qu'il est indispensable de se poser pour appréhender un problème plus large. Il est également possible de décomposer le sujet en plusieurs sous-problèmes, lorsque des indications sont proposées, elles guident l'étudiant vers une telle démarche.

Réponse

Pour aborder sereinement une résolution de problème ouvert, l'étudiant doit cerner le domaine d'étude et définir proprement le système. Un schéma est rarement superflu. Il faut identifier les variables du problème et les grandeurs inconnues, qu'il s'agira d'évaluer par un modèle ou d'estimer avec un peu de bon sens. Le modèle repose généralement sur des hypothèses simplificatrices qu'il est bon de commenter. Contrairement à un oral de concours qui repose sur une discussion, un livre oriente davantage la résolution et borne un peu les choix du candidat, les réponses proposées dans cet ouvrage correspondent à une possibilité et l'étudiant est libre d'envisager d'autres solutions en proposant des modèles plus simples ou au contraire plus compliqués, les ordres de grandeurs devant rester les mêmes. . .

Il n'existe pas de recettes ou de solutions miracles, c'est ce qui fait le charme de cette matière. L'étudiant doit pouvoir s'adapter aux différentes situations comme un futur chercheur ou ingénieur.



Je souhaite que ce livre éveille la curiosité de futurs scientifiques qui je l'espère prendront plaisir à décortiquer ces problèmes. Enfin je remercie Gaëlle Ringot et Florent Tessier pour leurs relectures et conseils avisés.

SOMMAIRE

Chapitres

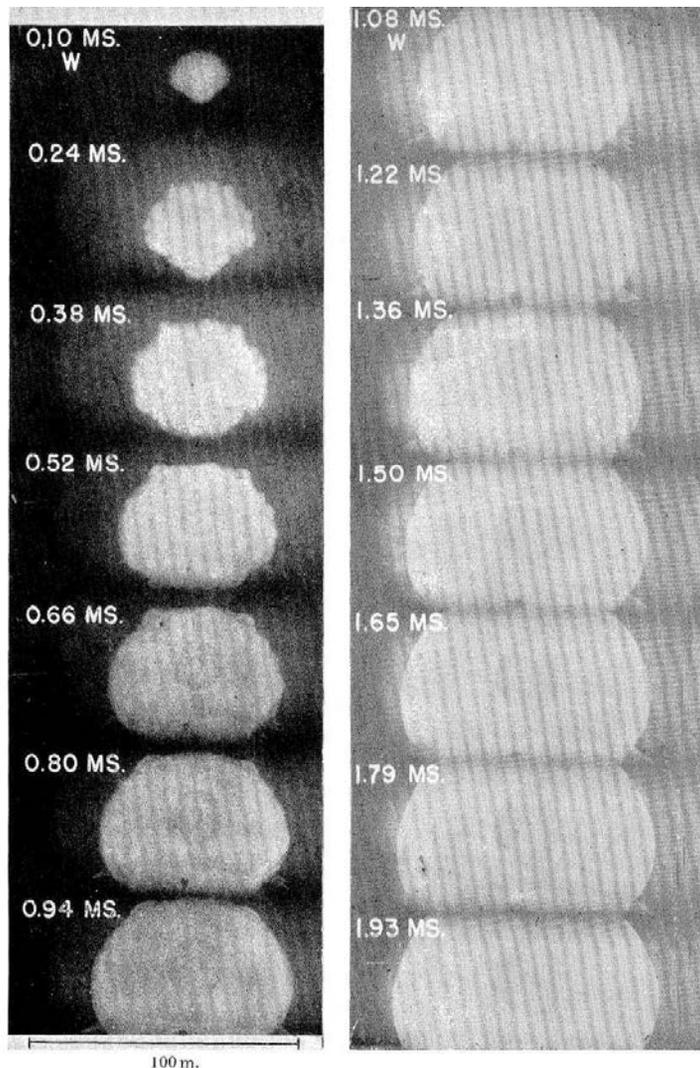
1	Ondes	7
2	Électrocinétique	25
3	Optique géométrique	73
4	Mécanique	121
5	Thermodynamique	189
6	Hydrostatique	241

Liste des questions ouvertes

		PCSI	MP/PTSI	BCPST
Trinity ☆	9	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>
L'armée a-t-elle dit la vérité quant à l'énergie de la bombe ?				
Tremblement de Terre ☆☆	11	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>
Localiser approximativement l'épicentre du séisme.				
Monstres et Compagnie ☆	14	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>
Discuter le scénario de ce film.				
Mur du son ☆☆	15	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>
Estimer la vitesse de cette balle de revolver.				
Mur de la caténaire ☆	17	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>
Pour établir le record de vitesse la tension des caténares est augmentée, expliquer.				
Célérité de la lumière et chocolat ☆	19	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	✗
Estimer la célérité de la lumière.				
Flûte ☆	21	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	✗
Où faut-il percer les trous ?				
Expériences de FIZEAU ☆☆	23	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>	<i>Sup</i>
Comparer les vitesses de la lumière selon les deux expériences.				

Trinity

Au milieu de 1945, les Américains sont enfin prêts à faire exploser leur première bombe atomique. L'opération, baptisée du nom de code "Trinity", a lieu dans le désert du Nouveau-Mexique le 16 juillet 1945. Ce test se déroula comme prévu, et on connaît malheureusement la suite (Hiroshima: 6 août 1945, Nagasaki: 9 août 1945). Quelques années après la fin de la guerre, les militaires décidèrent de déclassifier et publier les photos du test mais secret-défense oblige, ils choisirent de ne rien révéler de la puissance de la bombe.



GEOFFREY TAYLOR publia alors un article démontrant que les photos suffirent pour l'estimer. Sa démonstration s'appuya principalement sur l'analyse dimensionnelle ! L'image fournie dans les données montre une série de photos de l'explosion de Trinity, et l'on y voit très nettement la boule de feu consécutive à l'explosion. GEOFFREY TAYLOR, expert en explosions, savait que le rayon R dépend essentiellement du temps t (indiqué en millisecondes sur les photos) écoulé depuis l'explosion, de la quantité d'énergie E libérée par la bombe, et de la masse volumique ρ de l'air environnant. GEOFFREY TAYLOR proposa la formule suivante :

$$E = R^\alpha \cdot \rho^\beta \cdot t^\gamma$$

Quelques années plus tard, l'armée avoua que l'énergie de leur bombe était équivalente à environ 40 000 tonnes de TNT.

L'armée a-t-elle dit la vérité quant à l'énergie de la bombe ?

Données :

- 1 kg de TNT libère environ 2,5 MJ.
- Constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.
- Accélération de pesanteur au niveau du sol : $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
- Masse molaire de l'air : $\mathcal{M} = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Réponse

GEOFFREY TAYLOR proposa la formule : $E = R^\alpha \cdot \rho^\beta \cdot t^\gamma$. Une analyse dimensionnelle des différents termes donne alors :

- $[E] \equiv \text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ (par exemple en se rappelant que $\frac{1}{2}mv^2$ est une énergie) ;
- $[R] \equiv \text{m}$;
- $[t] \equiv \text{s}$;
- $[\rho] \equiv \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

$$[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}] \equiv [\text{m}]^\alpha [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]^\beta [\text{s}]^\gamma \Rightarrow \begin{cases} \alpha - 3\beta = 2 \\ \beta = 1 \\ \gamma = -2 \end{cases}$$

Après résolution, à un préfacteur près qui ne change pas les ordres de grandeur :

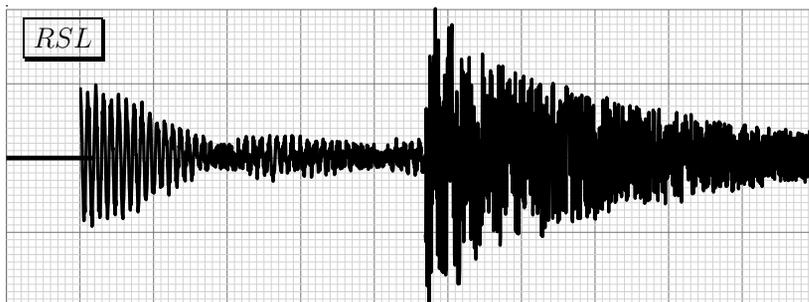
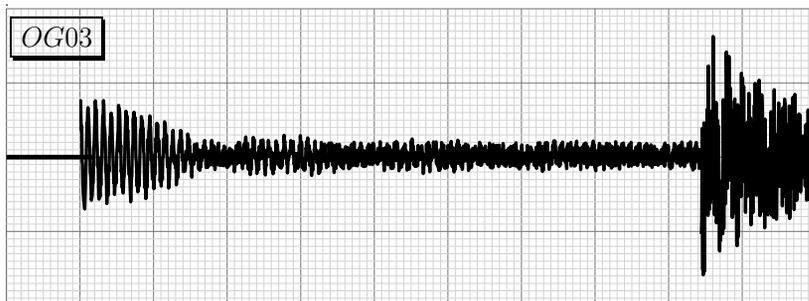
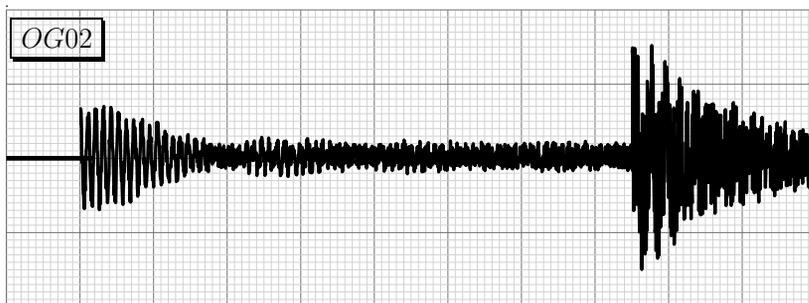
$$E = \frac{R^5 \rho}{t^2}$$

En prenant $R = 50 \text{ m}$ pour 2 ms et $\rho = \frac{PM}{RT} \approx 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ on trouve $E \approx 94 \text{ TJ}$.

Comme 1 kg de TNT libère environ 2,5 MJ, il faudrait environ 38 kilotonnes de TNT (proche de la valeur annoncée). L'armée a donc dit la vérité...

Tremblement de Terre

Le document présente des extraits de sismogrammes relevés dans trois stations d'enregistrement proches d'un séisme. Dans tous les enregistrements le papier millimétré défile à une vitesse de 1 cm/s.



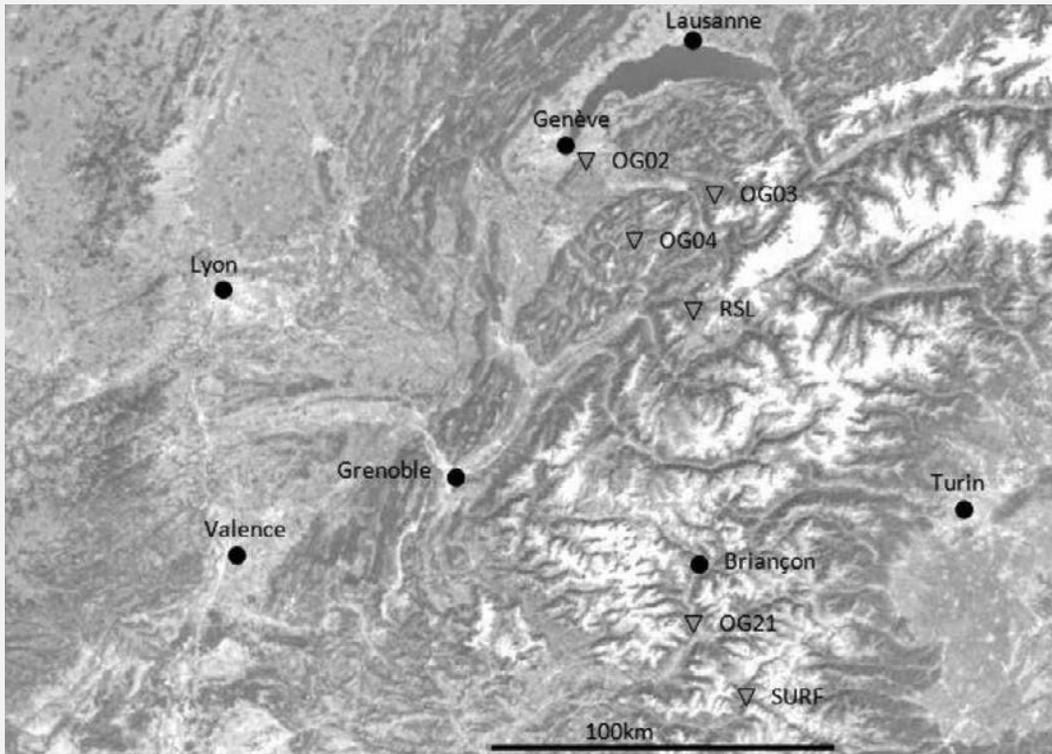
Localiser approximativement l'épicentre du séisme.

Données :

Lors d'un séisme, des ondes traversent la Terre. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Parmi les ondes sismiques, on distingue :

- Les ondes P ou ondes primaires qui sont des ondes de compression ou ondes longitudinales ; d'après des études scientifiques portant sur de précédents séismes, leur célérité vaut $v_P = 13,2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ dans la région où le séisme étudié s'est produit.
- Les ondes S ou ondes secondaires, appelées également ondes de cisaillement ou ondes transversales ; leur célérité vaut en moyenne $v_S = 6,3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ dans la même zone.

La carte ci-dessous localise les stations d'enregistrement qui possèdent un sismographe.



Lors d'un séisme, l'épicentre est la projection à la surface de la Terre de l'hypocentre (ou foyer), le point où prend naissance le séisme. Pour simplifier, on confond ces deux points en considérant le foyer peu profond.

Indications

- Identifier le type d'ondes sur le sismogramme.
- Traduire la condition de propagation des deux ondes jusqu'à une station d'enregistrement.

Réponse

Lors d'un séisme les ondes sont toutes émises simultanément à la date t_0 depuis un point appelé l'épicentre. Le sismographe détecte donc en premier les ondes ayant la plus grande célérité soit les ondes P . Les ondes S qui se propagent moins vite arrivent un peu après. On note respectivement t_P et t_S les instants d'arrivée des ondes P et S .

Si d est la distance qui sépare une station d'enregistrement de l'épicentre, alors les deux types d'ondes permettent d'écrire le système linéaire ci-dessous :

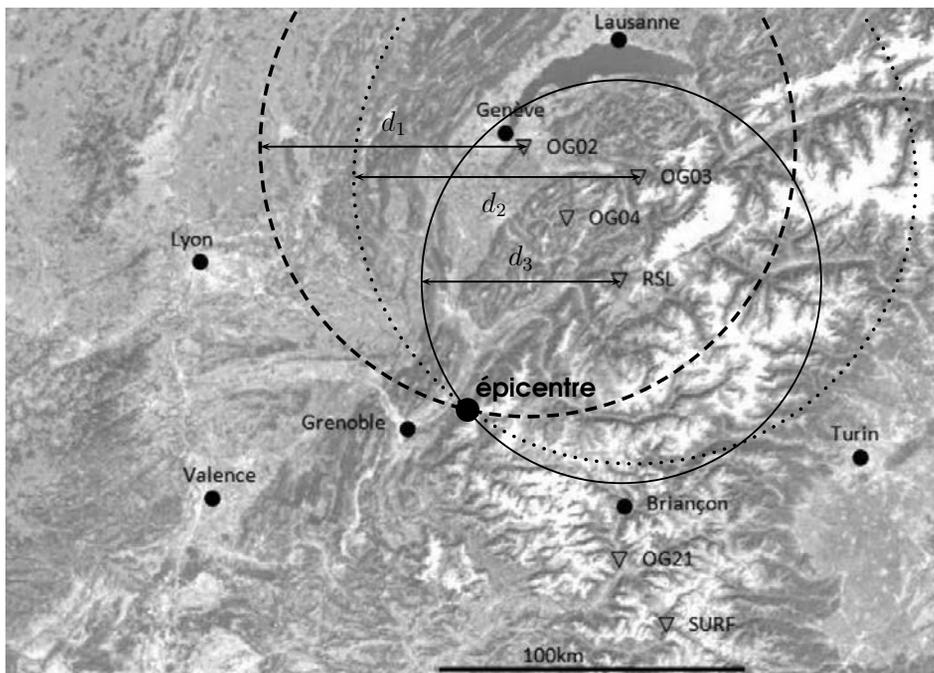
$$\begin{cases} d = v_P(t_P - t_0) \\ d = v_S(t_S - t_0) \end{cases}$$

Une résolution de ce système fournit la distance à l'épicentre : $d = \frac{v_S v_P}{v_P - v_S} (t_S - t_P)$

La durée $\Delta t = t_S - t_P$ séparant l'arrivée des 2 ondes se lit facilement sur les sismogrammes. On en déduit :

Station d'enregistrement	OG02	OG03	RSL
Δt	7,5 s	8,4 s	4,7 s
Distance de l'épicentre	$d_1 = 0,90 \cdot 10^2$ km	$d_2 = 1,0 \cdot 10^2$ km	$d_3 = 0,57 \cdot 10^2$ km

Une triangulation indique l'épicentre à une vingtaine de kilomètres à l'est de Grenoble.



Monstres et Compagnie

Monstres et Cie est un film d'animation Pixar mettant en scène deux adorables monstres Bob et Sully, deux habitants de la cité « Monstropolis ». L'énergie utilisée par la société de monstres provient de l'onde des cris des enfants. Dans l'histoire, ils se servent de portes spatio-temporelles qu'ils traversent pour arriver dans les chambres des enfants et les effrayer, l'énergie de leur cri est alors captée et stockée dans des bouteilles.

Discuter le scénario de ce film.

Données :

La sensation auditive n'est pas proportionnelle à l'intensité acoustique. En effet si l'intensité acoustique double, l'auditeur n'entend pas un son deux fois plus fort. Il est alors préférable de définir une grandeur liée à la sensation auditive de l'oreille ; elle est appelée niveau d'intensité acoustique, notée L (Level en anglais) et mesurée en décibels (symbole dB) avec un sonomètre. Cette grandeur est définie par la relation suivante :

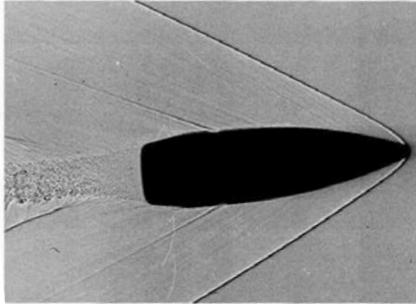
$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{avec } I_0 = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ (seuil d'audibilité à 4 kHz)}$$

Réponse

Évidemment les monstres et les portes spatio-temporelles n'ont pas encore été découverts, la question est de savoir si l'énergie des cris est une source viable. Pour estimer un ordre de grandeur, on suppose que le cri d'un enfant est de 120 dB (perçu au niveau du capteur) et que le capteur sonore présente une surface de 1 m^2 , disposée près de l'enfant qui crie pendant 10 secondes en moyenne. L'intensité sonore est alors $I = I_0 10^{L/10} = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, soit pour un capteur de 1 m^2 une puissance $\mathcal{P} = 1 \text{ W}$ ou pendant $\Delta t = 10 \text{ s}$ une énergie $E = \mathcal{P}\Delta t = 10 \text{ J}$ qui permet d'éclairer une ampoule économique de 10 W pendant 1 s. Pour avoir 1 h d'éclairage il faut donc effrayer 3600 enfants, or le coût énergétique des portes spatio-temporelles doit être bien supérieur...

Il s'agit d'un film de science-fiction.

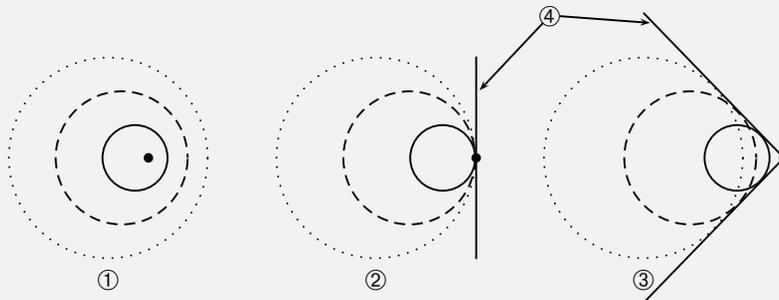
Mur du son



Estimer la vitesse de cette balle de revolver.

Données :

- Le son est une vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide.



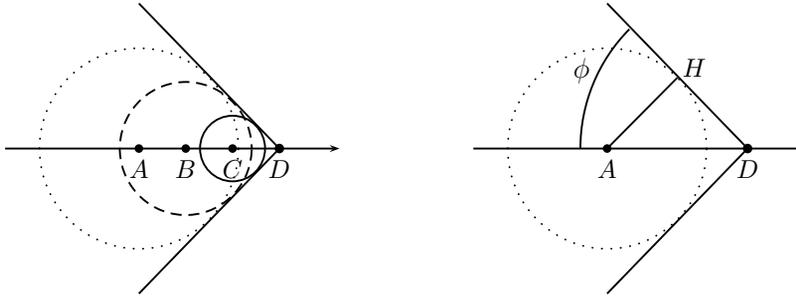
Lorsqu'un avion vole en vitesse subsonique (vitesse inférieure à la célérité du son dans l'air ①), il crée des ondes non dispersives dites de pression qui se propagent à la célérité du son. Lorsqu'il accroît sa vitesse et qu'il atteint la célérité du son ②, les ondes de pression s'accroissent devant le nez de l'avion. Lorsqu'il dépasse la célérité du son (on dit qu'il passe le mur du son ③), il se produit alors des ondes de compression et de dilatation qui provoquent ce fameux « bang » ④ perceptible à plusieurs dizaines de kilomètres à la ronde. Pour une vitesse supérieure à la

célérité du son, les ondes se propagent derrière l'avion dans un cône appelé cône de MACH. Dans ce cas l'avion laisse derrière lui toutes les sphères de perturbation tangentes au cône de MACH.

- Célérité du son dans l'air à 20 °C : $c = 344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Masse volumique de l'air à 20 °C : $\rho = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Masse molaire de l'air : $\mathcal{M} = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Réponse

La présentation proposée sur l'avion reste bien sûr valable pour la balle de revolver.



La sphère de perturbation en pointillé a été produite par la balle à l'instant t_0 en A ; celle en trait discontinu a été créée en B et la surface représentée en trait plein a été engendrée quand la balle était en C. La balle est en D à l'instant t lorsque la surface d'onde émise en A se trouve sur la sphère en pointillé.

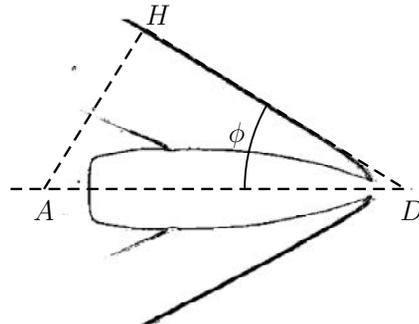
Pendant la durée $t - t_0$ la balle a parcouru la distance AD à la vitesse v alors que l'onde émise en A a parcouru la distance AH en se propageant à la célérité c . Par conséquent :

$$t - t_0 = \frac{AD}{v} = \frac{AH}{c} \Rightarrow \boxed{v = \frac{AD}{AH}c = \frac{c}{\sin \phi}}$$

Comme la droite (HD) (projection du cône de MACH) est tangente au cercle en pointillé (projection de la sphère) en H , le triangle AHD est rectangle de H .

Une mesure des longueurs sur une image en détection de contours donne un rapport $AD/AH = 2$ ou un angle $\phi = 30^\circ$ (mesuré au rapporteur), ce qui permet d'estimer la vitesse de la balle au double de la célérité du son soit :

$$\boxed{v \approx 690 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$$



Mur de la caténaire

Les caténaires SNCF sont des câbles tendus au-dessus des voies ferrées servant à alimenter les rames en courant électrique. Le pantographe, dispositif situé sur la locomotive, balaye la caténaire pour capter l'énergie électrique. Il soulève la caténaire afin de créer un meilleur contact électrique. Mais ce contact mécanique engendre des ondes qui se propagent dans la caténaire. L'amplitude de ces ondes mécaniques peut atteindre plus de 30 cm.

Le 3 avril 2007, la rame TGV V150 établit le record de vitesse sur rail à 574,8 km/h sur la ligne à grande vitesse est-européenne.



Pour établir le record de vitesse la tension des caténaires est augmentée, expliquer.

Données :

- La caténaire est un câble en cuivre (densité 8,9 et masse molaire $63,5 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) de rayon 7,0 mm.
- Lors d'une utilisation commerciale usuelle la vitesse moyenne du TGV est environ 320 km/h et la tension des caténaires est proche de 26 kN.
- La célérité c des ondes générées dans la caténaire dépend de la tension T des câbles et de leur masse linéique μ selon une loi de puissance $c = T^\alpha \mu^\beta$.

Indications

- Calculer la célérité des ondes mécaniques de la caténaire.
- Comparer avec les vitesses du TGV pour conclure.

Réponse

Si le TGV roule trop vite, il peut rattraper l'onde qu'il a lui-même générée. Si le pantographe se trouve sous un ventre de l'onde mécanique alors le contact avec la caténaire se rompt. Par conséquent l'alimentation électrique de la motrice n'est plus assurée et des chocs peuvent se produire lorsque la caténaire "tombe" à nouveau sur le pantographe. Ces chocs peuvent également entraîner des avaries matérielles. Aussi, pour éviter ces problèmes, la vitesse du TGV doit rester inférieure à celle de l'onde mécanique se propageant le long de la caténaire.

Pour déterminer la célérité de l'onde une analyse dimensionnelle donne :

- La tension s'exprime en N soit $[T] \equiv \text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (penser à $m\vec{a} = \vec{F}$).
- La masse linéique $[\mu] \equiv \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$.
- La célérité $[c] \equiv \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

$$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \equiv [\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]^\alpha \cdot [\mu \equiv \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}]^\beta \Rightarrow \begin{cases} \alpha + \beta = 0 \\ \alpha - \beta = 1 \\ -2\alpha = -1 \end{cases} \Rightarrow \boxed{\begin{matrix} \alpha = \frac{1}{2} \\ \beta = -\frac{1}{2} \end{matrix}}$$

La célérité de l'onde s'écrit alors : $\boxed{c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}}$

La masse linéique du câble de cuivre (assimilé à un cylindre) est :

$$\mu = \rho\pi r^2 = 1,37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$$

avec $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et $r = 7,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Pour une tension usuelle de $T = 26 \text{ kN}$ (en utilisation commerciale), la célérité de l'onde est $c_0 = 138 \text{ m/s}$ ou 496 km/h . L'onde est plus rapide que le train lors d'une utilisation normale ; en revanche pour une vitesse de $574,8 \text{ km/h}$ il faut augmenter la tension des câbles afin d'accroître la célérité de l'onde.

Si on choisit une vitesse de l'onde majorée à $c = 600 \text{ km/h}$ (pour avoir une petite marge d'erreur) alors la tension des câbles doit être :

$$\boxed{T = \mu c^2 \approx 38 \text{ kN}}$$

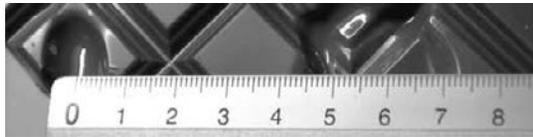
Cela représente une augmentation de presque 50 %.

Rq Le TGV n'est pas capable de franchir le "mur de la caténaire", en revanche d'autres émetteurs sont capables de franchir leur "mur d'ondes". Par exemple les avions franchissent le mur du son, les canards dépassent le mur des ondes de gravité en laissant un sillage derrière eux, les électrons dépassent la vitesse de la lumière $v = c/n$ dans un milieu d'indice n (effet Cerenkov),...

Célérité de la lumière et chocolat

Comme son nom l'indique, le four à micro-ondes utilise des micro-ondes pour échauffer les aliments. À l'instar de la lumière, les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques, caractérisées par une longueur d'onde et une fréquence. Dans un four à micro-ondes, la fréquence est choisie de telle sorte que les molécules d'eau s'échauffent en présence des ondes. Comme tous les aliments contiennent de l'eau en plus ou moins grande quantité, ils s'échauffent...

Une plaque de chocolat est déposée dans un four à micro-ondes en surélevant le plateau tournant pour éviter sa rotation. Le résultat est donné par la photographie ci-dessous.



Estimer la célérité de la lumière.

Données :

- Caractéristiques du four à micro-ondes de capacité 28 L :
 - Input 230 V, 50 Hz, Single Phase 1350 W.
 - Output 900 W, 2450 MHz.
- Chocolat noir. Cacao 55% minimum. Ingrédients : pâte de cacao, sucre, beurre de cacao, émulsifiant : lécithine de soja.

À savoir avant de commencer...

Donner la relation entre la longueur d'onde, la fréquence et la célérité de l'onde.

Toute onde périodique peut être caractérisée par une double périodicité :

- La périodicité temporelle $T = 1/f$ (intervalle régulier de répétition de la perturbation à la fréquence f).
- La périodicité spatiale, représentée par la longueur d'onde λ qui caractérise une onde monochromatique (ou onde harmonique c'est-à-dire une onde qui peut être décrite par une fonction sinusoïdale). Dans un milieu homogène, elle définit la

période spatiale donc la distance séparant par exemple deux maxima consécutifs de l'amplitude.

Rq La fréquence d'une onde reste inchangée lorsque l'onde passe d'un milieu à un autre dans lequel la vitesse est différente, néanmoins sa longueur d'onde peut varier.

Pour une onde qui se propage à la célérité c , sa période temporelle T et sa longueur d'onde λ vérifient la relation :

$$c = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$$

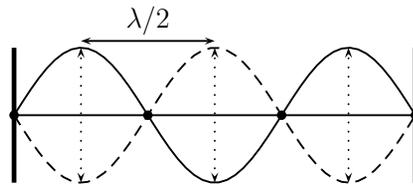
Réponse

Pour des raisons de sécurité, il ne faut pas que l'onde électromagnétique puisse se propager à l'extérieur du four car l'objectif est de cuire seulement les aliments à l'intérieur du four. Toutes les parois du four sont donc en métal, afin d'agir comme des miroirs pour l'onde, une grille métallique est également disposée sur la fenêtre de la porte du four. Comme les ondes sont réfléchies par les parois, il se forme dans le four des ondes stationnaires. Aux ventres de vibration, l'amplitude du champ électrique (qui interagit avec l'eau) de l'onde, et par conséquent l'échauffement du chocolat, est maximum. En revanche, aux nœuds de vibration, l'amplitude de l'onde est nulle et il n'y a pas d'effet sur la tablette.

Rq L'échauffement des aliments est donc inhomogène c'est pourquoi ils sont déposés sur un plateau tournant dont le rôle est de faire en sorte que chaque partie de l'aliment passe régulièrement par un ventre ou un nœud de vibration. Dans l'expérience proposée, le plateau a donc été retiré pour visualiser l'inhomogénéité de l'amplitude de l'onde.

Le four constitue un milieu de propagation fermé, il joue le rôle d'un résonateur ; l'onde progressive issue de l'excitation se réfléchit sur les parois fixes, et sous certaines conditions, l'onde vibre de manière importante en formant un ou plusieurs fuseaux.

Dans le cas du chocolat, les lieux où il a fondu donnent une estimation de $\frac{\lambda}{2} \approx 6$ cm. Selon les indications du constructeur la fréquence des ondes est $f = 2450$ MHz.



On en déduit la célérité de la lumière :

$$c = \lambda f \approx 2,9 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Cette valeur est très proche de la définition de la vitesse de la lumière dans le vide.

La quena est une flûte droite à encoche utilisée dans la région des Andes depuis deux à trois mille ans. Elle est traditionnellement fabriquée en roseau, en perçant 6 trous en plus des extrémités.



On souhaite jouer les notes suivantes :

do ₄	ré ₄	mi ₄	fa ₄	sol ₄	la ₄	si ₄
523,3 Hz	587,3 Hz	659,3 Hz	698,5 Hz	784,0 Hz	880,0 Hz	987,8 Hz

Où faut-il percer les trous ?

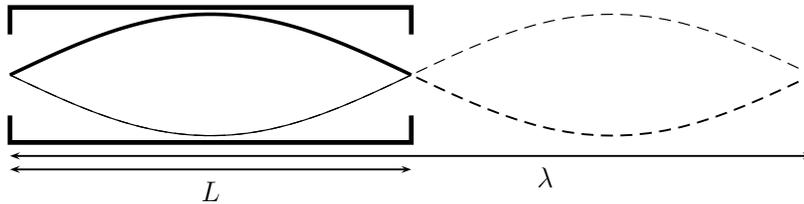
Données :

- Célérité du son dans l'air à 20 °C : $c = 344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Masse volumique de l'air à 20 °C : $\rho = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Masse molaire de l'air : $\mathcal{M} = 29 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Réponse

Un instrument à vent peut être considéré comme un tuyau sonore de longueur L . Il se comporte donc pour certaines fréquences comme un résonateur siège d'un système d'ondes stationnaires. Ces fréquences sont les modes propres de l'instrument et correspondent aux notes qu'il est capable de générer. Du côté ouvert (en sortie) l'instrument donne sur l'air extérieur ce qui annule la surpression (pression acoustique), par conséquent elle y présente un nœud de vibration. Le sifflet, permet d'entretenir une excitation par tourbillon stationnaire, garantissant ainsi sa constance et une quasi-régularité. La flûte est un instrument

considéré comme ouvert à ses deux extrémités. La surpression présente donc un nœud aux deux extrémités (elle y est nulle) ; la plus grande longueur d'onde possible est celle pour laquelle il n'existe qu'un seul ventre entre ces nœuds. Ce mode de vibration correspond à la note la plus grave générée par l'instrument, il est représenté ci-dessous :



Rq Une flûte est une cavité demi-onde. En revanche la clarinette est une cavité quart-d'onde car fermée à son extrémité supérieure, l'excitation de l'air est assurée par la vibration de la anche (petite lamelle en roseau de canne).

La note la plus grave est celle qui possède la fréquence la plus faible, ici le do₄ de fréquence $f_1 = 523,3$ Hz, par conséquent,

$$\lambda_1 = 2L \Rightarrow \boxed{L = \frac{\lambda_1}{2}}$$

Comme

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ avec la célérité du son } c = 344 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Numériquement :

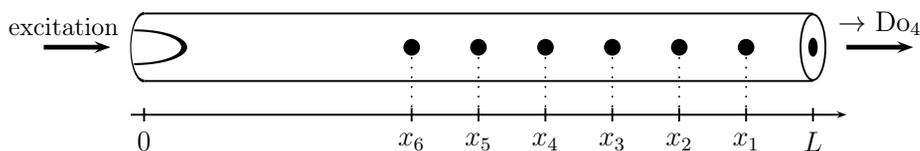
$$\underline{L = 32,9 \text{ cm}}$$

Il s'agit de la longueur d'une flûte qui joue un do₄ en bouchant tous les trous (sauf la sortie bien sûr).

En ouvrant successivement les trous on raccourcit la distance entre les deux ventres, la longueur d'onde du son émis diminue et la fréquence augmente, la note jouée est alors plus aiguë.

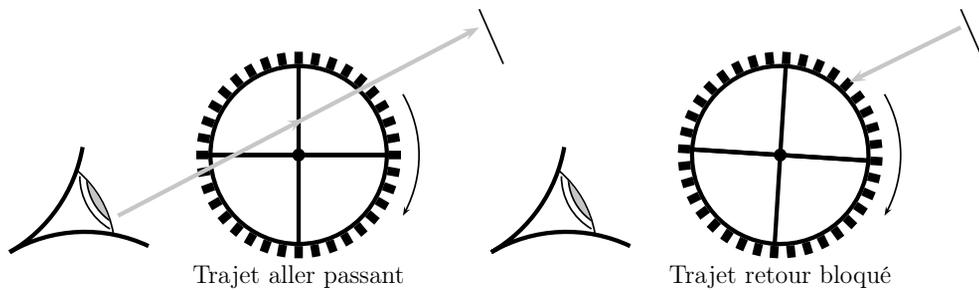
Un calcul analogue donne les positions $x_i = \frac{c}{2f_i}$ des autres trous et permet de compléter le tableau.

note	do ₄	ré ₄	mi ₄	fa ₄	sol ₄	la ₄	si ₄
fréquence (Hz)	523,3	587,3	659,3	698,5	784,0	880,0	987,8
distance (cm)	$L = 32,9$	$x_1 = 29,3$	$x_2 = 26,1$	$x_3 = 24,6$	$x_4 = 21,9$	$x_5 = 19,5$	$x_6 = 17,4$

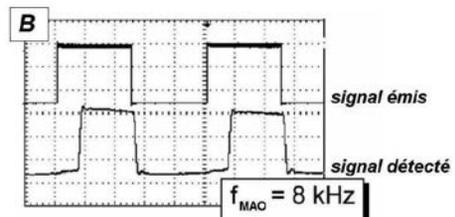
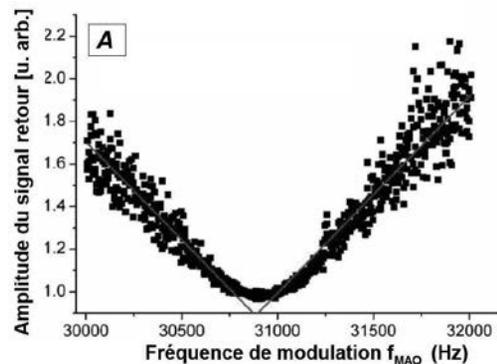


Expériences de Fizeau

HIPPOLYTE FIZEAU, physicien français (1819-1896) réalisa en 1849 la première mesure terrestre de la vitesse de la lumière grâce à un dispositif ingénieux installé dans sa propre maison à Suresnes. Il installa une lunette permettant, par un jeu de miroirs, d'envoyer un rayon lumineux à $d = 8\,633$ mètres à Montmartre où se trouvait une autre lunette dont le foyer avait été remplacé par un miroir. Le rayon lumineux issu de la première lunette était coupé par une roue dentée de $N = 720$ dents de vitesse angulaire constante ω . Pour une vitesse de rotation faible de la roue, FIZEAU observa un clignotement. En augmentant progressivement la vitesse de rotation du disque, la cadence des clignotement augmenta également. Enfin lorsque la vitesse angulaire atteignit 12,6 tours par seconde, FIZEAU n'observa plus de lumière.



Une version moderne de l'expérience de FIZEAU a été réalisée à Marseille en 2010 à l'aide d'un laser vert entre la basilique Notre Dame et la faculté St-Charles éloignées de 2423 mètres (O. Morizot *et al.* 2011 *Eur. J. Phys.* 32 161). Pour l'obturation rapide de la lumière, un *modulateur acousto-optique* (MAO) remplace la roue dentée. Si le MAO est allumé, la lumière laser est transmise sinon elle est coupée. Le signal laser est ainsi modulé (allumé-éteint) à la fréquence f_{MAO} . Un exemple de signaux émis et détecté après un aller-retour est indiqué sur la figure B. La figure A représente l'amplitude du signal retour en fonction de la fréquence de modulation du MAO.



Comparer les vitesses de la lumière selon les deux expériences.

Données :

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Indice de réfraction absolu de l'air : $n = 1,0003$.

Réponse

Dans l'expérience historique de FIZEAU, la durée d'un aller-retour de la lumière correspond à la durée de déplacement d'une échancrure (laissant passer la lumière) vers la dent adjacente (bloquant la lumière). Pendant ce temps la roue (possédant $N = 720$ dents) a tourné d'un demi de $720^{\text{ème}}$ de tour pour une vitesse angulaire ω de 12,6 tours par seconde soit une durée :

$$\Delta t = \frac{1}{2N\omega} = 55,1 \mu\text{s}$$

La distance d'un aller-retour est $2d = 17\,266 \text{ m}$. Selon FIZEAU, la vitesse de la lumière est donc :

$$v = \frac{2d}{\Delta t} \approx 313\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$$

Rq Cette valeur présente moins de 5% d'erreur relative ce qui pour l'époque est un résultat très convenable. FOUCAULT descendra l'incertitude à moins de 1% quelques années plus tard avec un système de miroir tournant. En fait le principal problème de FIZEAU provient du manque de précision sur la vitesse angulaire de la roue.

Dans la version marseillaise de 2010, le principe est le même que pour l'expérience de FIZEAU, la distance aller-retour est dans ce cas $2d = 4\,846 \text{ m}$. La modulation (allumé-éteint) est analogue à l'engrenage de FIZEAU, la durée de l'aller-retour est donc :

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{MAO}}$$

D'après la figure A, $f_{MAO} = 30\,900 \text{ Hz}$ correspond à la fréquence pour laquelle le signal retour est le plus faible donc pour cette valeur de fréquence :

$$v = 4df_{MAO} \approx 299\,500 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$$

Il s'agit de la vitesse de la lumière dans l'air marseillais et non dans le vide. En corrigeant avec $n = 1,0003$ il vient une valeur très proche de la définition :

$$c = 299\,600 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$$

PHYSIQUE

1^{re} année
CPGE
scientifiques

QUESTIONS OUVERTES

Cet ouvrage rassemble plus de **90 fiches portant sur une question de physique** qu'un esprit curieux pourrait se poser lors de ses réflexions.

Par exemple :

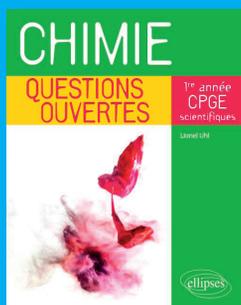
- ▶ Où faut-il percer les trous d'une flûte ?
- ▶ Quelle est la durée d'un éclair ?
- ▶ D'où cette photo a-t-elle été prise ?
- ▶ Quelle est l'altitude d'ISS ?
- ▶ Quelle est l'autonomie d'une voiture à air comprimé ?
- ▶ Quelle est la hauteur de la plus haute montagne sur Mars ?...

Les thèmes abordés couvrent la majorité du programme de première année des CPGE et sont répartis en **6 chapitres**.

Au début de chaque chapitre un sommaire précise les titres et les questions relatifs au sujet proposé. Pour répondre à la question posée, des données sont parfois fournies. Elles peuvent être utiles à la résolution du problème ou simplement culturelles. Un étudiant avisé doit être capable de faire le tri ou de fournir de lui-même des ordres de grandeur pertinents.

Pour guider et aider l'élève dans sa démarche, des **rappels de cours** ou des **indications** sont éventuellement proposés en lien avec la question.

Enfin une **solution** est proposée, il s'agit d'une possibilité de réponse et l'étudiant est libre d'envisager d'autres solutions en proposant des modèles plus simples ou au contraire plus compliqués, les ordres de grandeurs devant rester les mêmes.



www.editions-ellipses.fr

