UTILISATION DE LA DÉTENTE
POUR LA PRODUCTION DES COURANTS D'AIR DE GRANDE VITESSE

PAR M. P. LANGEVIN.

La détente directe dans l'atmosphère de l'air comprimé tel qu'il est fourni par le réseau parisien de distribution (pression de 6,5 atm environ) permet, conformément à la théorie classique, d'obtenir des veines gazeuses atteignant la vitesse de 500 m par seconde si l'air comprimé est pris à la température ambiante et pouvant aller notablement au delà de cette vitesse grâce à un réchauffement préalable (700 m environ pour un réchauffement de 300°). Ce sont précisément les vitesses couramment utilisées dans les tirs d'artillerie, et j'ai pensé qu'on pouvait profiter de cette circonstance pour effectuer au point fixe des mesures intéressantes pour la balistique. Des expériences ont été poursuivies dans ce sens avec la collaboration de MM. Vaillant et Saphores; l'aspect physique des résultats obtenus fera l'objet d'une communication ultérieure, mais je crois utile de signaler, à propos de la communication de M. Delsol, que ces expériences ont fourni l'occasion de vérifier, à l'ordre de précision des mesures, les prévisions de la théorie, prévisions sur lesquelles la thermodynamique et la théorie cinétique des gaz sont d'ailleurs entièrement d'accord.

Les difficultés auxquelles la théorie semble donner lieu tiennent à ce que la notion de pression à l'intérieur d'un milieu matériel en mouvement n'est pas toujours définie avec une précision suffisante. Cette notion s'introduit quand on cherche à évaluer la quantité de mouvement qui traverse par unité de temps un élément de surface passant par un point donné et d'orientation donnée. Il ne peut y avoir d'autre définition précise de la pression sur un élément de surface par rapport auquel la matière qu'il traverse est en mouvement que ce flux de quantité de mouvement par unité de surface et par unité de temps. Il résulte de la conservation de la quantité de mouvement que ce flux change simplement de signe quand on change le sens dans lequel il est évalué : les pressions sont nécessairement égales et opposées sur les deux faces d'un même élément de surface et ne sont d'ailleurs pas, en général, normales à cet élément.

Il est important de savoir comment varie en direction et en grandeur la pression ainsi définie quand on fait varier, en un même point du milieu, l'orientation de l'élément de surface et son mouvement par rapport au milieu. Quand le milieu est immobile au point considéré par rapport aux observateurs auxquels l'élément de surface est supposé lié, la pression varie avec l'orientation de la manière bien connue en élasticité et représentée par le *tenseur* symétrique :

$$\begin{matrix} N_x & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & N_y & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & N_z \end{matrix}$$

où les éléments de chaque ligne représentent les composantes de la pression sur un élément de surface perpendiculaire à l'un des axes de coordonnées, La connaissance des six composantes de ce tenseur, trois *normales* (N_x, N_y, N_z) et trois *tangentielles* (T_x, T_y, T_z) suffit à déterminer entièrement, par les formules connues de la théorie de l'élasticité, la pression sur un élément de surface d'orientation quelconque. Pour un choix convenable des directions d'axes, les composantes tangentielles s'annulent et les composantes normales deviennent les trois pressions principales p_x, p_y, p_z. La distribution complète des pressions dans un milieu matériel *immobile* est ainsi déterminée, dans le cas général, par ce *tenseur* auquel on doit réserver plus particulièrement le nom de *pression*. *La pression dans un milieu matériel est le tenseur qui représente la distribution des efforts en un point sur les divers éléments de surface qui passent par ce point et qui suivent le milieu dans son mouvement d'ensemble au point considéré.*

Dans le cas particulier des fluides isotropes, comme celui d'un gaz qui n'est le siège d'aucun phénomène de viscosité ou de conduction thermique, les trois pressions principales deviennent égales à la pression proprement dite p et les composantes tangentielles du tenseur s'annulent quelle que soit l'orientation des axes. Il y a dégénérescence du tenseur de pression qu'un seul nombre suffit alors à représenter ; tous les éléments passant par un même point subissent la même pression normale à chacun d'eux.

Si le milieu est supposé en mouvement par rapport aux observateurs avec une vitesse de composantes v_x, v_y, v_z au point considéré, et si la densité du milieu est ρ en ce point, il est facile de voir, toujours par application du principe de conservation de la quantité de mouvement, que la distribution des pressions sur des éléments de surface liés aux observateurs et d'orientation quelconque est donnée par le tenseur également symétrique :

$$\begin{matrix} N_x + \rho v^2{}_x & T_{xy} + \rho v_x v_y & T_{xz} + \rho v_x v_z \\ T_{yx} + \rho v_x v_y & N_y + \rho v_y^2 & T_{yz} + \rho v_y v_z \\ T_{zx} + \rho v_x v_z & T_{zy} + \rho v_y v_z & N_z + \rho v_v^2 \end{matrix}$$

obtenu en ajoutant au *tenseur de pression* relatif à des observateurs liés au milieu, un tenseur complémentaire convenable.

Dans le cas d'un milieu isotrope et d'une vitesse v parallèle à l'axe des x, ce tenseur prend la forme particulièrement simple :

$$\begin{matrix} p + \rho v^2 & o & o \\ o & p & o \\ o & o & p \end{matrix}$$

Sur un élément dont la normale fait l'angle α avec la direction de la vitesse, la pression a pour composante normale $p + \rho v^2 \cos^2 \alpha$ et pour composante tangentielle $\rho v^2 \sin \alpha \cos \alpha$.

En vertu du principe de relativité auquel obéit la mécanique rationnelle (conservation de ses équations pour les transformations du groupe de Galilée) l'application de ses lois fondamentales donne les mêmes résultats quel que soit le mouvement de translation par rapport au milieu des observateurs par lesquels on le suppose examiné. Si, en effet, on applique à un élément de volume lié aux observateurs le principe de conservation de la quantité de mouvement, on retrouve toujours, en tenant compte de la conservation de la masse traduit par l'équation de continuité bien connue, les équations habituelles du mouvement d'un fluide isotrope :

$$\rho \frac{dv_x}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \qquad \rho \frac{dv_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y}, \qquad \rho \frac{dv_z}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z},$$

p étant la pression *mesurée par des observateurs liés au milieu.*

L'application du principe de conservation de l'énergie conduit de même, quels que soient les observateurs qui l'utilisent, et à condition de tenir compte de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, à la loi ordinaire de détente adiabatique si l'on suppose que le fluide n'est le siège d'aucune conduction thermique, ce qui est adéquat à l'introduction d'une pression uniforme p.

La seule hypothèse qui intervienne dans la théorie classique de l'écoulement des fluides compressibles est en effet l'existence d'une pression isotrope en chaque point pour des observateurs liés au fluide en ce point, ce qui revient à considérer comme négligeables les effets de viscosité et de conduction thermique ; la théorie cinétique légitime cette hypothèse, dans les cas où la turbulence du mouvement est faible (faible intensité des tourbillons) en montrant que la distribution des vitesses de Maxwell dans chaque élément de volume par rapport au centre de masse de l'élément se rétablit en un temps extrêmement court (supérieur à 10^{-8} seconde dans les conditions habituelles) lorsqu'elle a été troublée. Il est donc légitime, *en première approximation*, d'admettre en chaque point du gaz l'existence d'une pression isotrope (pour des observateurs liés au gaz) et d'une température bien définie reliée à la pression par la loi ordinaire de détente adiabatique. Les formules habituelles permettant de traiter les problèmes de détente sont fondées sur cette seule hypothèse.

Les expériences dont il est ici question ont permis de vérifier l'exactitude de ces formules de la manière suivante :

Le débit aux vitesses indiquées, d'une veine de 10 cm de diamètre seulement est beaucoup trop considérable pour qu'on puisse songer à l'entretenir de manière continue ; j'ai utilisé l'évacuation d'un réservoir d'environ 6 m^3 à travers une tuyère dont la section contractée était un cercle de 8 cm de diamètre. La théorie montre que la veine détendue conserve une température constante pendant toute l'évacuation avec une vitesse constamment décroissante, et permet de calculer suivant quelle loi la pression à l'intérieur du réservoir doit varier en fonction du temps.

Un enregistrement des variations de la pression a donné des résultats en parfait accord avec la théorie pendant tout le temps (une dizaine de secondes) que durait l'évacuation régulière du réservoir, c'est-à-dire tant que la section contractée de la veine avait le diamètre imposé par la tuyère et utilisé dans le calcul.

D'autres vérifications de la théorie, relatives à la loi suivant laquelle varient en fonction de la vitesse les efforts exercés par la veine sur un obstacle fixe qui s'y trouve placé, ont également pu être obtenues et seront indiquée ultérieurement.