

Quelques expériences d'initiation à la physique de l'atmosphère

par R. PICCA,

Université de Toulouse III.

L'atmosphère, par la variété des phénomènes naturels qui s'y produisent, constitue un vaste champ d'expérience propice à l'éveil du sens de l'observation chez nos jeunes élèves. Nombreuses sont les occasions d'expliquer ce que l'on y voit à l'aide des lois de la physique et ceci, dans des domaines variés comme la thermodynamique, la mécanique des fluides, l'électricité ou l'optique.

Notre propos est de décrire quelques expériences simples, ne nécessitant qu'un matériel réduit, qui pourront être utilisées pour sensibiliser les élèves à la physique de l'atmosphère et, par ce biais, à la physique en général.

1. SURFUSION DE L'EAU.

Les gouttes d'eau dont sont constitués les nuages et qui ont des dimensions variant de quelques microns à quelques millimètres, peuvent rester en surfusion à des températures très inférieures à 0°C (jusqu'à -40°C).

En effet, le passage de l'état liquide à l'état solide (glace) nécessite la présence de noyaux appelés glaçogènes qui se trouvent naturellement dans l'atmosphère en nombre variable suivant leur température d'action (l'ordre de grandeur est de quelques unités par litre vers -20°C), c'est pourquoi la formation de cristaux de glace ou de grêlon n'apparaît-elle dans la plupart des nuages qu'à des températures bien inférieures à -10°C . Ainsi, seuls les nuages à haute altitude (supérieure à 6 km environ) sont-ils totalement glacés. On les distingue par leur aspect plus diffus que les nuages composés d'eau liquide dont les limites sont plus nettes.

On peut mettre facilement en évidence ce phénomène de surfusion de la manière suivante : on dépose une gouttelette d'eau bidistillée (ou à défaut de l'eau de fusion provenant du givre prélevé sur la paroi d'un congélateur) sur la soudure d'un thermocouple, par exemple cuivre-constantan. Un millivoltmètre permet de suivre les variations de température de la goutte. Celle-ci est introduite lentement dans l'atmosphère refroidie vers -20°C d'un

congélateur. On observe la décroissance graduelle de la température de la soudure sur laquelle se trouve la goutte ; puis brusquement, au moment de la congélation de cette dernière, il y a remontée de la température par suite de la libération de la chaleur latente de congélation (80 calories par gramme).

On note la température de congélation de la goutte qui se situe généralement entre -10°C et -15°C .

A l'occasion de cette expérience, outre les explications concernant les changements de phase, on pourra évoquer le rôle de la surfusion sur la formation de la pluie (voir B.U.P. n° 598, p. 238).

2. CAPTATION DE GOUTTELETTES DE BROUILLARD.

Les brouillards sont formés de gouttelettes d'eau de dimension et de concentration très variables. Pour fixer un ordre de grandeur, disons que leur spectre dimensionnel s'étend de quelques microns à quelques dizaines de microns et que leur nombre varie de quelques unités à une vingtaine par centimètre cube. Il existe de nombreux types de capteurs qui permettent de les dénombrer et de mesurer leur dimension. Certains utilisent des lames sur lesquelles on fait précipiter les gouttelettes contenues dans un volume connu de brouillard. Les lames ont été préalablement enduites d'une substance sur laquelle l'impact des gouttelettes laisse une trace décelable et mesurable.

Plusieurs produits sensibilisants ont été proposés tels que le collargol, l'encre, le noir de fumée... Plus simplement on peut, à l'aide d'un tampon de coton hydrophile, enduire une lame de microscope avec du savon liquide (nous avons utilisé SOLARYL). Le capteur peut être confectionné assez simplement suivant le schéma de la fig. 1.

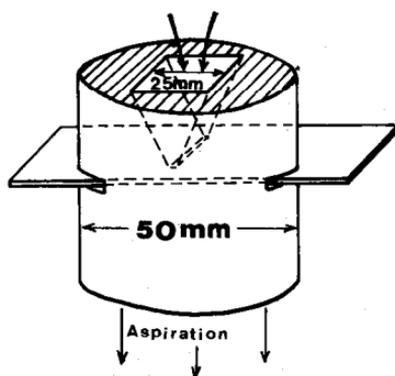


Fig. 1

Les cotes y sont données à titre indicatif, la fente de sortie de la tuyère doit être située à 1 ou 2 mm de la lame réceptrice. Afin d'éviter une trop grande accumulation de gouttes (qui risque de provoquer des coalescences sous la tuyère) on a intérêt à limiter la durée de la captation et à translater la lame pendant l'aspiration. A noter que l'efficacité de la précipitation n'est pas totale dans la mesure où les gouttes les plus petites risquent d'échapper à la captation en suivant les filets d'air. Quoiqu'il en soit, il est facile d'observer au microscope les traces circulaires laissées par les gouttes. Remarquons que, par suite de l'écrasement, le diamètre des traces est plus grand que celui des gouttes correspondantes. La correction à apporter dépend de la grosseur des gouttes et de la nature du sensibilisant utilisé. A défaut de brouillard et afin d'expérimenter plus aisément le procédé, on peut s'exercer à capter les gouttes d'eau produites par un pulvérisateur.

A l'occasion de cette expérience, on pourra faire calculer les masses d'eau se trouvant sous formes liquide et vapeur par unité de volume. On constatera que l'eau liquide ne représente qu'une très faible proportion par rapport à la vapeur. A 15°C et pour un brouillard contenant, par cm^3 , 10 gouttes de $10\ \mu\text{m}$ de diamètre, ceux-ci ne représentent que 0,06 % de la masse totale de l'eau.

On pourra également rappeler le rôle joué par les noyaux de condensation dans la formation des gouttes de brouillard (et de nuages) à partir de la vapeur d'eau (voir B.U.P. n° 598, pp. 229-239).

3. TOURBILLON.

Suivant leur importance et le lieu géographique, les phénomènes tourbillonnaires naturels prennent des noms différents : trombes, tornades, ouragans, cyclones ou encore typhons. Ils se caractérisent tous par des mouvements de rotation localisés autour d'un axe plus ou moins vertical accompagnés d'une ascension entraînant les poussières et débris arrachés au sol, ce qui visualise le tourbillon. Les vents au sol sont très violents, dépassant souvent $200\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et ont les effets destructeurs que l'on connaît.

Il est possible de réaliser un mini-tourbillon (ou vortex) dans une cuve cylindrique d'axe vertical ouverte à son sommet, région dans laquelle on provoque la rotation de l'air par un tourniquet entraîné par un moteur (fig. 2).

Les dimensions conseillées de la cuve sont d'un mètre environ de hauteur sur 50 cm de diamètre. L'idéal est d'utiliser un cylindre transparent en plexiglas pour mieux observer le phénomène mais on peut aussi construire la cuve en carton ou encore utiliser un bidon de 200 litres ouvert à sa partie supérieure dans

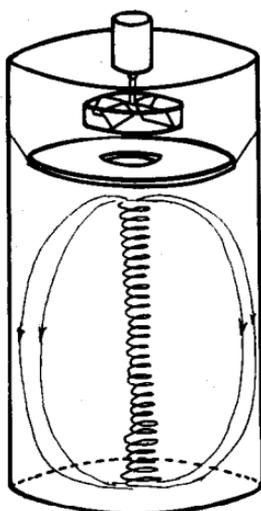


Fig. 2

lequel on ménage une fenêtre latérale de 15×15 cm que l'on ferme avec une feuille de rhodoïd pour permettre l'observation. Il est essentiel que les parois latérales et la base inférieure soient bien lisses afin de limiter au maximum les forces de frottement sur les parois.

Le tourniquet est formé de 4 palettes tournant dans une boîte cylindrique de diamètre 20 cm et de hauteur 5 cm ouverte à sa base. Il est entraîné par un moteur électrique de 1/15 CV dont la vitesse de rotation est d'environ $3\,500 \text{ t. min}^{-1}$. Un moteur de machine à coudre convient parfaitement.

Un disque plat transparent (en plexiglas) percé d'un trou de diamètre 5 cm est disposé à une dizaine de centimètres en dessous du tourniquet, ceci afin de faciliter la localisation centrale du tourbillon.

La visualisation peut être réalisée en introduisant de la fumée (produite par la combustion de papier d'Arménie par exemple). On éclaire l'intérieur de la cuve par le haut et on observe le tourbillon central (dont le diamètre est de l'ordre d'une dizaine de centimètres) sur le fond noir que l'on a pris soin de prévoir sur la paroi latérale de la cuve.

L'intérêt du dispositif est de montrer le mouvement de rotation ascensionnel de l'air suivant l'axe de la cuve, mouvement qui est compensé par des mouvements descendant le long de la paroi de la cuve. Si l'on dispose d'un manomètre sensible, on

peut vérifier que l'axe du tourbillon est une zone dépressionnaire (la dépression est de l'ordre d'une quinzaine de millimètres d'eau).

Par ailleurs, on peut montrer l'influence de la rugosité du sol sur le tourbillon en disposant sur le fond de la cuve un tapis de graviers. Si la rugosité est suffisante, elle peut empêcher la formation du tourbillon. Si ce dispositif expérimental rend assez bien compte des tornades qui se forment dans la nature, on notera que, dans les cyclones tropicaux, les phénomènes sont quelque peu différents : l'échelle n'est pas la même. Les tornades prennent naissance en quelques dizaines de secondes, les vents au sol sont très importants (les vitesses maximales peuvent atteindre 600 à 700 km/h), le phénomène est localisé (de l'ordre du km^2) alors que les cyclones mettent plusieurs heures à s'établir, les vitesses y sont moindres (150 à 200 km/h) mais intéressent des surfaces considérables (des centaines de km^2) et leur durée de vie peut être de plusieurs jours. Si la zone centrale (ou œil) est dépressionnaire aussi bien dans la tornade que dans le cyclone, l'air monte dans l'axe d'une tornade alors qu'il descend dans l'œil d'un cyclone.

On se reportera utilement à l'article « les Ouragans » paru dans « La Recherche » (N° 45, mai 1974) et à l'ouvrage de vulgarisation « Cataclysmes et dangers de la nature » (Hachette) de Henri DESSENS.

4. CONVECTION.

La convection, c'est-à-dire la montée spontanée de l'air, a le plus souvent une origine thermique. Si une aire au sol est surchauffée par rapport à la surface environnante, l'air plus chaud dans cette région va monter et aspirer l'air plus froid de la zone périphérique. Un écart de température au sol peut être produit par une différence de nature du sol dont dépend son pouvoir absorbant vis-à-vis du rayonnement solaire.

On peut réaliser une expérience très simple qui permet de mettre en évidence le phénomène. Elle consiste à élever la température de la zone centrale d'une tôle recouverte de papier filtre imbibée d'eau ammoniacuée. On visualise le mouvement convectif de l'air en pulvérisant sur la plaque de l'eau acidulée par HCl, les fumées blanches de chlorure d'ammonium mettent ainsi en évidence le mouvement convergent de l'air à la surface de la zone froide périphérique et le mouvement ascensionnel au-dessus de la partie chauffée. On peut projeter sur un écran placé perpendiculairement à la plaque l'ombre portée par les fumées de NH_4Cl .

A cette échelle, le phénomène est évidemment sensible aux mouvements d'air environnant ; on s'efforcera d'éviter toute

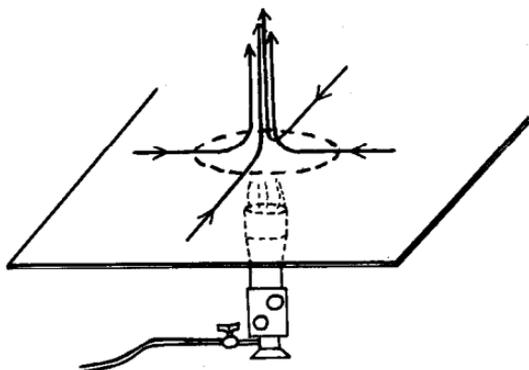


Fig. 3

cause perturbatrice extérieure en plaçant par exemple ce dispositif entre quatre panneaux de verre déposés verticalement autour de la tôle.

5. CHAMP ELECTRIQUE ATMOSPHERIQUE.

Le champ électrique au voisinage de la Terre est, en période de beau temps, dirigé vers la Terre, son intensité étant de l'ordre de $120 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ (cf. « Les phénomènes électriques dans l'atmosphère » B.U.P. n° 623 pp. 861-874). Sous les orages, il peut changer de sens et devenir plus de cent fois plus grand.

On peut mettre en évidence l'existence du champ électrique atmosphérique \vec{E} à l'aide du dispositif suivant : une plaque conductrice plane P, de surface S est alternativement exposée au champ \vec{E} (fig. 4 a) et masquée par l'interposition d'une plaque P' reliée au sol (fig. 4 b). La charge de P varie ainsi entre $Q = -S \epsilon_0 E$ (qui est de l'ordre de 10^{-10} C avec $S = 0,1 \text{ m}^2$) et zéro.

L'électronique de mesure utilise un circuit intégré (MC 1747 CL) à double amplificateur opérationnel. Le premier amplificateur est sensible à la variation de la charge de P au cours du mouvement rapide de P'. Le déplacement de celle-ci doit se faire dans un temps inférieur à la constante de temps $\tau = R_1 C$ du circuit qui est, dans le schéma proposé de 0,2 s. Le gain du deuxième ampli-

ificateur de tension étant élevé $\left(\frac{R_3}{R_2} = 1000 \right)$; les dérives d'offset

peuvent entraîner une saturation du signal de sortie. Il convient alors de fixer le point de fonctionnement au zéro en ajustant le potentiomètre $10 \text{ k}\Omega$ (10 tours).

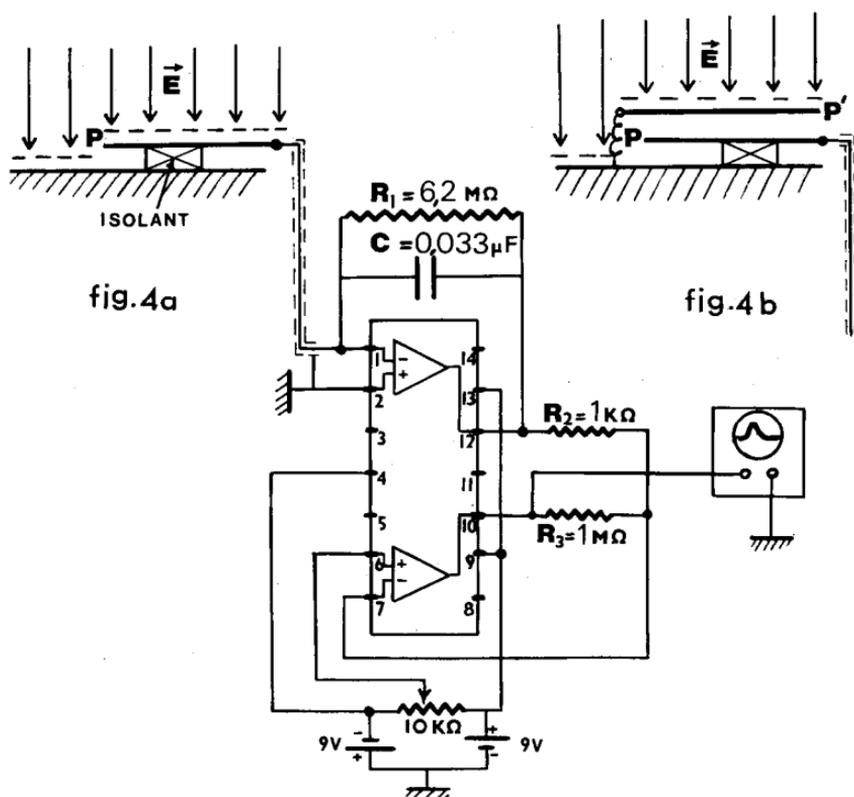


Fig. 4

L'impulsion de la tension mesurée à l'oscilloscope lorsqu'on masque ou que l'on découvre P est de l'ordre du volt pour un champ de beau temps et pour une surface $S = 0,1 \text{ m}^2$. Rappelons enfin que le champ au voisinage de P est facilement perturbé par la présence d'obstacles proches (y compris celle de l'expérimentateur).

6. L'ARC-EN-CIEL.

On se reportera à l'article de notre collègue PRÊTRE paru dans le n° 560 du B.U.P. (pp. 359-368) décrivant les expériences sur l'arc-en-ciel qui permettent en particulier de mesurer le rayon apparent de l'arc du premier ordre (d'environ 41°). L'observation de l'arc-en-ciel constitue une bonne occasion d'appliquer les lois de l'optique géométrique (réflexion, réfraction), de faire comprendre le rôle des surfaces caustiques, lieux de concentration de lumière, de définir les phénomènes de dispersion et de polarisation de la lumière.