

Le ludion comme détecteur de surpression

par Jean-Louis CORBEL
Lycée Dupuy de Lôme - 56100 Lorient

Dans le cadre de l'unité P2 «Fluides et locomotion», la réalisation d'un ludion et de trois expériences décrites peuvent être effectuées au cours d'une séance de quatre-vingt-dix minutes.

Les élèves apportent le matériel de récupération :

- une bouteille en plastique souple pour boisson gazeuse de 1,5 L avec bouchon à vis (version A),
- une bouteille en plastique de produit à vaisselle de 1,5 L ou 0,75 L avec bouchon à vis et obturateur coulissant (version B),
- une seringue de 5 mL avec son aiguille (pour la version A),
- une recharge d'encre pour stylo sectionnée à sa base pour enlever la petite bille ; c'est le flotteur (le sectionnement n'est pas indispensable),
- du fil de cuivre dénudé ou non - environ 15 cm - servant de lest à la base du flotteur, et une pince coupante,
- un morceau de tissu absorbant type serpillière et un peu de ficelle.

1. RÉALISATION DU LUDION

La recharge de stylo est lestée près de l'extrémité ouverte avec trois ou quatre tours de fil de cuivre. On teste la flottabilité du ludion ainsi réalisé en le lâchant dans un verre d'eau. A l'aide de la pince on coupe un peu du fil jusqu'à trouver la limite où le ludion flotte en émergeant à peine.

2. PRINCIPE

Le ludion est introduit dans la bouteille presque remplie d'eau et munie de son bouchon qui donne un bouchage hermétique. En pressant la bouteille avec la main le ludion sombre ; en relâchant la pression le ludion remonte instantanément.

Pour la figure 1, l'application du principe fondamental de l'hydrostatique aux points A et D appartenant à l'eau donne : $p_D - p_A = (H - h) \rho g$ avec ρ : masse volumique de l'eau.

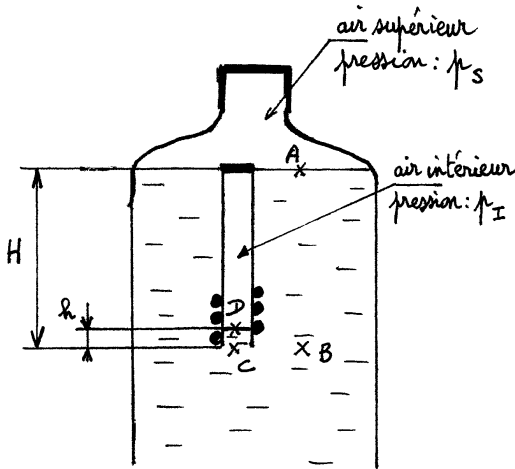


Figure 1 : Le flotteur est en équilibre.

Ces points A et D appartiennent aussi à l'atmosphère située au-dessus, soit :

- $p_A = p_S$: pression de l'air supérieur,
- et $p_D = p_I$: pression de l'air intérieur.

Il en résulte que : $p_I = p_S + (H - h) \rho g$

Les points B et C situés dans le même plan horizontal sont à la même pression : $p_B = p_C$.

Dans le cas de la figure 2 l'air supérieur est à une pression $p'_S > p_S$; d'après le théorème de Pascal cette augmentation de pression va être transmise à tout point de l'eau considérée incompressible et notamment à B.

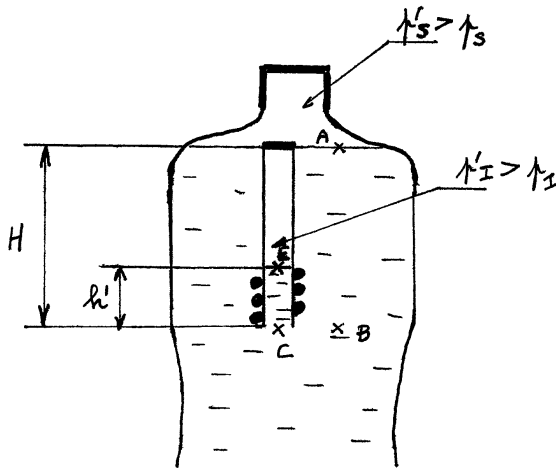


Figure 2 : Le flotteur n'est pas en équilibre et va plonger.

L'égalité $p_B = p_C$ impose que le niveau de l'eau s'élève dans le flotteur $h' > h$ et la nouvelle pression de l'air intérieur devient $p'_I = p'_S + (H - h') \rho g$.

L'équilibre ou le non-équilibre du flotteur peut être étudié de plusieurs façon selon le système envisagé.

2.1. Première méthode - Système = flotteur lesté, sans fluide intérieur, de poids $\vec{P}$ constant

Il est soumis à des forces pressantes :

- sur la paroi latérale cylindrique ; la résultante des forces internes et externes est nulle,
- sur la paroi supérieure qui est un disque de surface S , la résultante est dirigée vers le haut et vaut : $(p_I - p_S) S$ soit : $(H - h) \rho g S$.

Pour la figure 1 : $P = (H - h) \rho g S$ et équilibre.

Pour la figure 2 : $P > (H - h') \rho g S$ car $h' > h$, et non-équilibre.

2.2. Deuxième méthode - Système = flotteur lesté avec les fluides intérieurs, air et eau de hauteur h puis h'

Pour les figures 1 et 2 la résultante des forces pressantes est la poussée d'Archimède $\vec{F}$ en considérant que le système est complètement immergé dans l'eau ; F est égale au poids du volume d'eau déplacé et conserve la même valeur. Par contre le poids du système augmente du fait de la rentrée d'eau $h' > h$; d'où le déséquilibre.

2.3. Comment augmenter p_S et produire la plongée du flotteur ?

L'air supérieur considéré comme gaz parfait a une pression p_S telle que :

$$p_S = R \frac{nT}{V}.$$

L'augmentation de p_S peut être obtenue en agissant séparément sur chacun des trois paramètres : V , n , T .

2.4. Paramètre V

Quand on presse la bouteille presque remplie d'eau et non bouchée, l'eau déborde ; il y a donc réduction du volume intérieur. La bouteille étant bien bouchée, la réduction de volume se fait au détriment de l'air supérieur et p_S augmente (l'eau est réputée incompressible).

2.5. Paramètre n

En augmentant la quantité d'air supérieur il y a accroissement de p_S . Cela peut être obtenu de deux façons :

- *version A* : on perce le bouchon avec une aiguille et on adapte la seringue munie de son aiguille ; un point de colle de part et d'autre assure l'étanchéité. En pressant la seringue on injecte de l'air et le flotteur plonge ; en tirant on aspire de l'air et le flotteur remonte ;
- *version B* : on insuffle de l'air avec la bouche, le flotteur plonge. Une poussée sur l'obturateur avec les dents maintient la surpression.

2.6. Paramètre T

On entoure la partie supérieure de la bouteille d'un chiffon absorbant maintenu par une ficelle. On le trempe avec de l'eau chaude (placer la bouteille dans une cuvette). Au bout de quinze à trente secondes le flotteur plonge. On enlève le chiffon et par aspersion d'eau froide le flotteur remonte.

L'expérience peut être réalisée avantageusement avec un sèche-cheveux réglé au chauffage maximum, que l'on applique contre la partie supérieure de la bouteille. La réussite est assurée avec la bouteille pour boisson dont la paroi est d'épaisseur assez faible : 0,3 mm, et pour un flotteur lesté à une valeur proche de la limite, sinon l'accroissement lent de la pression provoque l'enfoncement progressif du flotteur qui est retenu à la surface par la tension superficielle de l'eau. Le «décrochage» du flotteur se produit pour une durée de chauffage allant de quinze secondes à une minute. Avec la bouteille pour produit à vaisselle l'expérience échoue car la paroi est trop épaisse de 0,6 mm à 1 mm près du col ce qui fait écran à la chaleur.

Pour cette expérience montrant l'influence du paramètre T il convient de procéder avec un volume d'air supérieur assez important par exemple 100 mL, pour constituer un volant thermique suffisant.

Les élèves ont été vivement intéressés à réaliser la série d'expériences toutes réussies. Il peut se produire que le flotteur ne remonte pas ; à cela on peut avancer trois raisons :

- un défaut d'étanchéité au niveau de la capsule qui ferme la partie supérieure ; cas exceptionnel, le flotteur est à remplacer,
- une augmentation des forces d'adhérence : eau - paroi interne du flotteur, pouvant produire une petite remontée d'eau,
- une sortie accidentelle d'un peu d'air du flotteur à la suite d'un remous provoqué par une variation trop brusque de l'augmentation de pression - au cours d'un choc de la bouteille par exemple - raison la plus probable et la plus fréquente.

Dans les deux derniers cas il faut récupérer le flotteur, puis le purger avant une nouvelle utilisation.