

IDÉES DE PHYSIQUE

La fontaine de Héron

Pour transvaser un liquide, rien de tel qu'un siphon : gravité et pression atmosphérique font le travail à notre place !

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Au I^{er} siècle de notre ère, dans son traité *Pneumatica*, le savant grec Héron d'Alexandrie a décrit un étonnant dispositif composé de deux récipients clos et d'une coupelle (voir la figure 3). Le fond du récipient le plus bas est relié par un tuyau au fond de la coupelle (ou d'un bassin dans la version grand modèle). Un autre tuyau relie les parties supérieures des deux récipients, toujours pleines d'air. Enfin, un troisième tube s'ouvre au-dessus de l'eau de la coupelle et plonge jusqu'au fond du récipient du haut.

Lorsqu'on remplit d'eau la coupelle, de l'eau jaillit du tube qui émerge au-dessus, tandis que la coupelle se vide progressivement dans le récipient du bas. Au bout de quelque temps, la fontaine s'arrête.

Que s'est-il passé ? D'où vient ce jet d'eau alors qu'aucune pompe n'est présente ? La complexité du dispositif ne doit pas cacher qu'avec sa succession de vases communicants, la fontaine de Héron joue avec les mêmes principes que les siphons – où, dans leur plus simple expression, de l'eau s'élève dans un tuyau avant de descendre plus bas (voir la figure 2). Aussi, pour comprendre la fontaine de Héron, un bon physicien aura le réflexe de revenir à ces dispositifs hydrauliques plus élémentaires, connus et utilisés depuis des milliers d'années pour transporter et distribuer de l'eau.

Tentons de transvaser l'eau d'un récipient, par exemple un aquarium, au moyen d'un siphon (voir la figure 2). Cela se révèle nécessaire quand le récipient est trop lourd

à déplacer. Pour ce faire, plongeons dans le récipient une extrémité d'un tuyau déjà rempli d'eau et abaissons l'autre extrémité sous le niveau d'eau. L'eau du récipient est alors siphonnée : elle se vide en remontant dans le tuyau avant de redescendre. Qu'est-ce qui met en mouvement la colonne d'eau ?

Le plus simple des siphons : la paille

Pour le comprendre, considérons une situation encore plus simple : ce qui se passe lorsque nous buvons un liquide (de l'eau, par exemple...) avec une paille (voir la figure 1). L'aspiration de la bouche crée une dépression et nous avons l'impression de tirer sur l'eau. Ce n'est qu'une impression.



1. EN « ASPIRANT » AVEC UNE PAILLE, on diminue la pression de l'air dans la bouche. La pression dans le gobelet, égale à la pression atmosphérique, lui est alors supérieure. Par conséquent, la pression atmosphérique pousse le liquide, qui monte dans la paille : il n'est pas aspiré.



2. L'AQUARIUM EST FACILEMENT VIDÉ avec un siphon, si l'extrémité libre du tuyau est placée au-dessous du niveau de la surface de l'eau dans l'aquarium. Quant au siphon inversé installé sous le lavabo, son coude rempli d'eau empêche la remontée d'odeurs nauséabondes.

Dessins de Bruno Vacaro

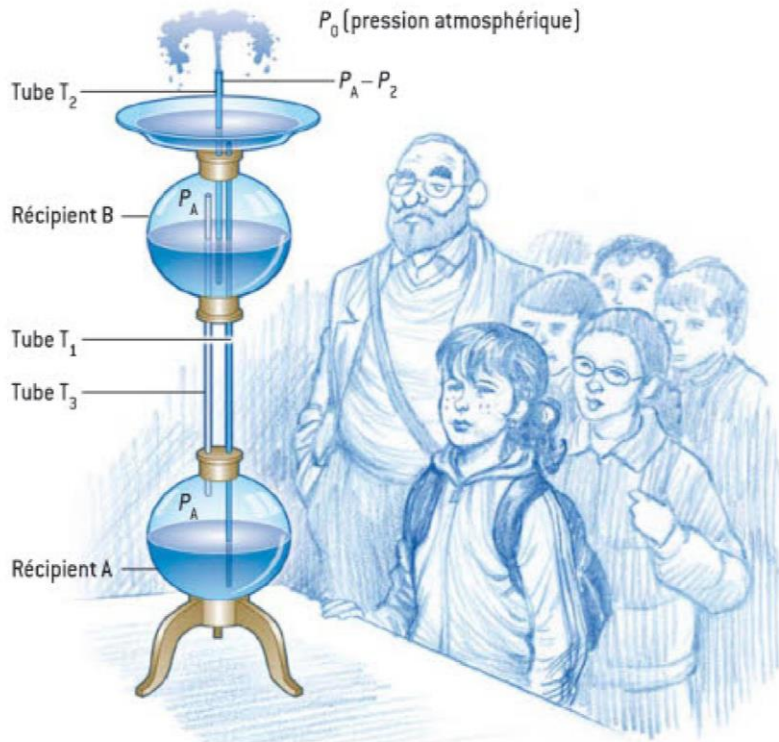
Du côté supérieur, tant que l'eau n'a pas rempli entièrement la paille, ce liquide demeure en contact avec de l'air qui exerce toujours, sous l'effet de l'agitation moléculaire, une pression sur sa surface, donc une force qui s'oppose à sa montée. L'eau monte dans la paille uniquement parce qu'à son extrémité inférieure, l'atmosphère exerce une pression supérieure. En résumé, si l'eau monte, ce n'est pas parce que l'on tire sur elle et qu'elle est mise sous tension comme le serait une corde, mais parce qu'on établit une différence de pression entre ses deux surfaces libres.

La hauteur atteinte traduit alors l'équilibre entre le poids de la colonne d'eau soulevée et les forces de pression qui s'exercent à ses extrémités. Au sein d'un fluide incompressible et immobile, la pression hydrostatique est le produit de la masse volumique du fluide (un kilogramme par litre pour l'eau), de l'accélération de la pesanteur et de la profondeur : c'est le poids de la colonne d'eau rapporté à sa section. La différence de pression imposée pouvant être arbitrairement grande, il n'y a pas de limite à l'élévation possible : dix mètres d'eau avec une atmosphère de pression (en faisant le vide d'un côté), mais beaucoup plus si, à l'entrée, l'eau est sous forte pression comme dans une pompe à refoulement.

Une question de hauteurs d'eau

Le siphon fonctionne comme une paille, mais l'aspiration est inutile parce que la pression au point le plus haut du tuyau en \cap est réduite. On s'en rend compte en analysant comment varie la pression dans la partie descendante [gauche] du tuyau en \cap . Bouchons avec la main l'extrémité du tuyau qui est dans le récipient [l'aquarium de la figure 2]. L'eau s'arrête alors de couler (à condition que le diamètre du tuyau ne soit pas trop grand ; sinon, des bulles d'air s'infiltreraient aisément dans le conduit). Pourquoi ?

À l'extrémité ouverte, l'eau est en contact avec l'air et subit donc la pression atmosphérique. La pression au sommet du tuyau est ainsi diminuée de la pression hydrostatique de la colonne d'eau de la partie gauche du tuyau en \cap . Au niveau de la main, la pression est égale à la pression hydrostatique de la



3. DANS LA FONTAINE DE HÉRON, la pression P_A dans le récipient clos A est égale à $P_0 + P_1$, où P_0 est la pression atmosphérique et P_1 la pression hydrostatique due à l'eau contenue dans le tube T_1 . Dans le récipient clos B, la pression est aussi égale à P_A , grâce au tube d'air T_3 reliant A à B. La pression de l'eau à l'extrémité supérieure du tube T_2 , si cette extrémité est fermée, est alors égale à $P_A - P_2 = P_0 + P_1 - P_2$, où P_2 est la pression hydrostatique due à l'eau contenue dans le tube T_2 . Le tube T_1 étant plus long que T_2 , on a $P_1 > P_2$, donc $P_A - P_2$ est supérieure à P_0 , la pression atmosphérique ; c'est pourquoi l'eau jaillit du tube T_2 .

colonne d'eau de la partie droite du tuyau, mais, cette colonne étant plus courte que celle de gauche, sa pression hydrostatique demeure inférieure à la pression atmosphérique : il s'ensuit qu'au niveau de la main, il y a dépression. On peut ainsi affirmer que c'est le poids de la colonne de gauche, supérieur à celui de la colonne de droite, qui est responsable de la montée à droite.

Dans le cas d'un siphon inversé, où le tuyau est en forme de U, on obtient la conclusion contraire : c'est le poids de la colonne la plus haute qui appuie pour faire jaillir l'eau à l'extrémité la plus basse. C'est ainsi que fonctionne le pont-siphon, un ouvrage d'art qui, comme le siphon de l'Yzeron à Sainte-Foy-lès-Lyon, fait franchir à l'eau, grâce à un dénivelé, une vallée encaissée.

Qu'advient-t-il lorsqu'on retire la main et que l'eau s'écoule de nouveau ? Une analyse énergétique s'impose : il faut alors prendre en compte le travail des forces de pression, le travail du poids, les variations de l'énergie cinétique du fluide et la dissipation d'énergie due à la viscosité et aux turbulences, que

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur

www.pourlascience.fr



■ BIBLIOGRAPHIE

J. J. Ramette et R. W. Ramette, **Siphonic concepts examined : A carbon dioxide gas siphon and siphons in vacuum**, *Physics Education*, vol. 46(4), pp. 412-414, 2011 [en accès libre sur <http://iopscience.iop.org/0031-9120/46/4>].

S. Shakerin, **Water fountains with special effects**, *American Scientist*, vol. 93(5), pp. 444-451, 2005.

P.-M. Binder et A. Richert, **The explicit siphon**, *Physics Education*, vol. 46(6), pp. 710-711, 2011.

l'on regroupe sous le terme de « pertes de charge ». Quand ces dernières sont faibles et que le fluide s'écoule avec un débit constant dans un tuyau de diamètre constant, on retrouve les mêmes différences de pression qu'en hydrostatique, donc les mêmes conclusions quant à la direction du mouvement du fluide.

On peut maintenant comprendre le mécanisme de la fontaine de Héron. Pour ce faire, commençons par boucher le tube vertical d'où jaillit l'eau. La pression à la surface de l'eau du récipient du bas est la pression atmosphérique additionnée de la pression hydrostatique de la colonne d'eau située entre la surface de la coupelle et la surface de ce récipient. Cette pression est intégralement transmise à la surface de l'eau du récipient du haut par l'air qui communique entre les deux récipients. Au niveau de la main, la pression

est égale à cette dernière, diminuée de la pression hydrostatique du tube vertical reliant le récipient supérieur et la coupelle. Ce tube étant plus court que le premier, la pression à son sommet reste plus importante que la pression atmosphérique : grâce à cette surpression, l'eau jaillit si on enlève notre main. On peut montrer qu'en l'absence de pertes de charge, elle s'élèvera à une hauteur égale à la différence de longueur entre les deux colonnes d'eau dans les tubes.

A-t-on inventé un mouvement perpétuel ? Hélas non. Le récipient du haut se vide progressivement dans la coupelle, qui elle-même se vide dans le récipient du bas. Tout s'arrête donc quand le récipient du haut s'est vidé. Malgré son apparente complexité, la fontaine de Héron est bien un siphon : le récipient du haut se vide dans celui du bas, avec l'eau qui monte d'abord, puis descend. ■