

Rendez-vous



L'ODEUR DE PAIN GRILLÉ...
que vous évoque-t-elle ?



ROSE, POP-CORN, herbe coupée,
Malabar, métro parisien ?



DE LA CAGE D'ESCALIER au gala de
danse, notre monde est fait d'odeurs.

© E. du Bonnel

Complétez votre collection!



Retrouvez tous les numéros depuis 1996 !

Commandez vos numéros sur
www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE | ARCHIVES



Flashez ce QR code
 et accédez
 directement à
 toutes les archives !

IDÉES DE PHYSIQUE

La fontaine-boule : et pourtant elle tourne !

Grâce à un film d'eau légèrement pressurisée, on peut, avec une facilité déconcertante, faire tourner une lourde boule de granit sur son socle.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Qu'ont en commun les villes d'Aix-les-Bains, d'Alençon, de Boulogne-Billancourt, de Mende, de Montbéliard et de Pfaffstatt ? Ce sont les six villes françaises dotées d'une grande « fontaine-boule ». Il s'agit d'une boule de granit massif polie, déposée dans un logement creux parfaitement adapté (voir la figure ci-dessous) : une légère poussée de la main et voilà que la boule tourne longuement sur son socle, maintenue en suspension par un film d'eau de moins d'un millimètre d'épaisseur. Comment ce film si mince

peut-il supporter une masse qui atteint, avec les 2,65 mètres de diamètre de la boule du musée des sciences de Virginie, 27 tonnes ? Pourquoi l'eau n'est-elle pas chassée de dessous la boule ?

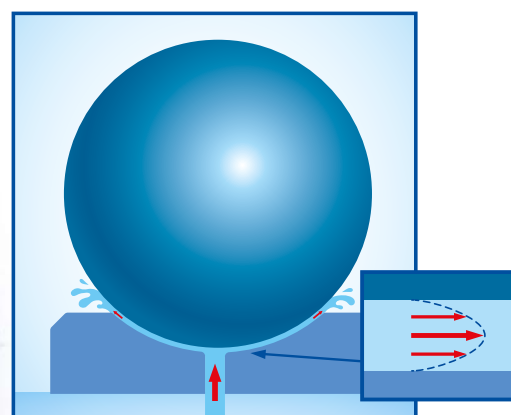
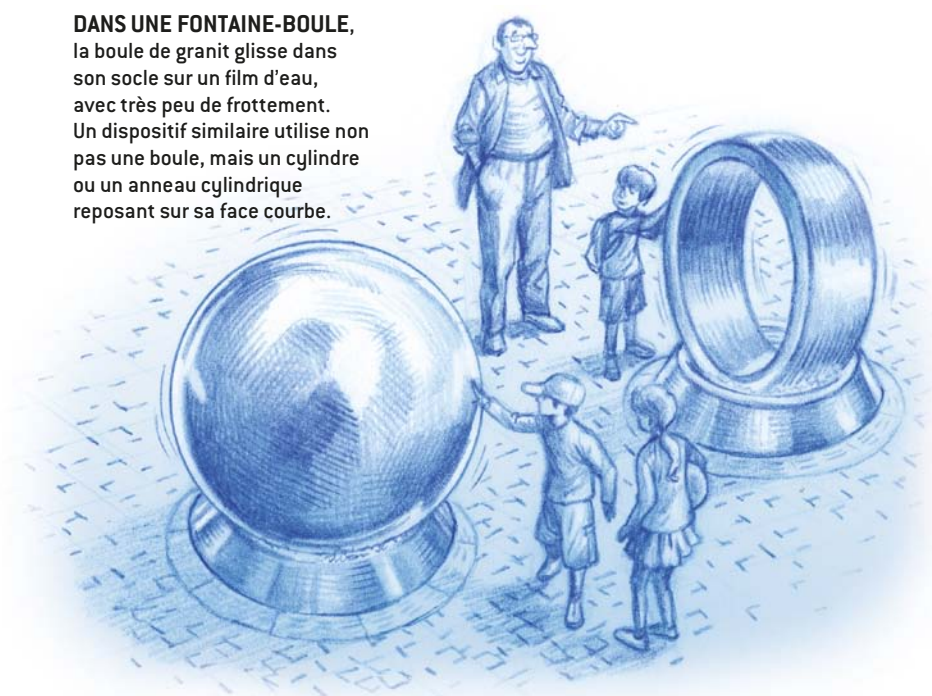
Sustenter avec un jet d'eau

Le granit massif étant 2,75 fois plus dense que l'eau, il ne flotte pas. La seule possibilité pour qu'un film d'eau soulève un objet en granit est que la pression en son sein dépasse la pression atmosphérique. Sachant

qu'une boule de granit de un mètre de diamètre fait environ une tonne et demie, soit un poids de 15 000 newtons, quelle est la pression requise pour la soulever ? Plus précisément, quelle doit être la surpression, en sus de la pression atmosphérique (qui s'applique partout) ?

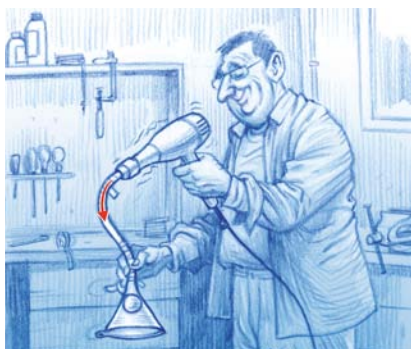
Tout dépend de la surface de contact. Plus elle est étendue, plus la surpression sera faible. On calcule que la surpression est de deux atmosphères si la surface fait 750 centimètres carrés (moins de 5 % de la surface de l'hémisphère de notre boule). C'est peu ou prou la surface de contact des

DANS UNE FONTAINE-BOULE, la boule de granit glisse dans son socle sur un film d'eau, avec très peu de frottement. Un dispositif similaire utilise non pas une boule, mais un cylindre ou un anneau cylindrique reposant sur sa face courbe.



L'ÉPAISSEUR DU FILM D'EAU qui sépare la boule de son support est d'une fraction de millimètre. À travers cette épaisseur, le profil des vitesses du fluide est parabolique. À débit fixé, l'épaisseur de liquide s'ajuste de façon que la force exercée par le film d'eau compense le poids de la boule.

Dessins de Bruno Vacaro



L'EFFET VENTURI explique qu'une balle de ping-pong soit aspirée au fond d'un entonnoir dans lequel on souffle assez fort, et non expulsée comme on s'y attendrait intuitivement. Dans une fontaine-boule, dès que le débit d'eau est trop important, cet effet inertiel peut prendre le dessus sur l'effet de la viscosité et déstabiliser la sustentation de la boule.

■ LES AUTEURS



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



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

pneus sur la route pour une automobile ordinaire. Avec un contact sur l'intégralité de l'hémisphère, la surpression serait 20 fois plus faible, soit un dixième d'atmosphère – une surpression que l'on peut produire en soufflant avec la bouche. Pour les situations intermédiaires, on s'aperçoit qu'une pompe, même peu performante, permettrait d'atteindre la pression désirée.

À l'intérieur d'un pneu ou d'un circuit hydraulique, le fluide est enfermé dans une enveloppe hermétique et peut ainsi être mis sous pression. Ce n'est pas le cas avec la fontaine-boule, puisque l'eau s'écoule à la périphérie du socle. Comment la pression peut-elle être maintenue sous la boule sans que l'eau ne soit chassée ? Réponse : en créant un écoulement et en jouant avec la viscosité du fluide.

Si l'on souhaite maintenir un écoulement d'eau dans un tuyau horizontal dont une extrémité est ouverte à l'air libre, on sait qu'il faut injecter à l'entrée du tuyau une pression supérieure à la pression atmosphérique – ce afin de compenser les « pertes de charge » dues à la viscosité de l'eau, c'est-à-dire au frottement entre les filets d'eau contigus. Ces derniers ont en effet des vitesses différentes : immobile dans les filets au contact des parois, l'eau a une vitesse maximale dans les filets au cœur de l'écoulement. Plus précisément, pour des écoulements pas trop rapides, le profil de vitesse est parabolique (voir la figure de droite page 89).

Pour la fontaine-boule, le phénomène est identique : l'eau, injectée au fond du réceptacle, s'écoule dans le petit interstice qui sépare la boule et le socle, interstice qui fait office de tuyau. Les effets de la viscosité créent alors une variation de pression entre le point d'injection de l'eau, où la pression est maximale, et le bord de la fontaine, où le liquide est à la pression atmosphérique.

Comment s'assurer que la pression est suffisante pour soulever la boule, sans l'éjecter de son socle ? En fait, il n'y a rien à faire : l'ajustement est automatique lorsque l'on contrôle non pas la pression, mais le débit d'eau. Pourquoi ? Selon la loi de Hagen-Poiseuille, établie au XIX^e siècle, quand un fluide visqueux s'écoule entre deux surfaces, la variation de pression par unité de longueur

est proportionnelle au quotient du débit du fluide sur le cube de l'épaisseur de la couche de liquide. Cela signifie qu'à débit constant, une diminution d'épaisseur d'un facteur deux augmente la variation de pression – donc ici la surpression par rapport à la pression atmosphérique – d'un facteur huit.

En fixant le débit, si la (sur)pression est insuffisante au sein du fluide pour porter la boule, cette dernière va s'enfoncer, l'épaisseur de fluide diminuer et la surpression augmenter jusqu'à compenser, par la force exercée sur la surface de contact, le poids de la boule. Au contraire, en cas de pression excessive, la boule s'élève et la surpression diminue jusqu'à atteindre la valeur qui assure l'équilibre.

Avec une surface de contact occupant 17 % de l'hémisphère, un débit somme toute modeste de 1,5 litre par seconde assure la sustentation de notre sphère de un mètre de diamètre à une distance de un tiers de millimètre de son support, valeur que confirment les mesures.

On comprend alors la difficulté de réaliser de telles fontaines : les aspérités des surfaces de la boule et de son logement doivent être d'épaisseur inférieure au tiers de millimètre, faute de quoi elles entreraient en contact et l'on n'aurait pas de sustentation. En revanche, si le polissage est suffisant, la boule est en contact uniquement avec le film d'eau, d'où un frottement considérablement réduit. Et, très bien lubrifiée, la boule tourne sur elle-même lorsqu'on l'effleure de la main.

Éviter l'aspiration

Pour contourner la difficulté liée aux aspérités, on pourrait être tenté d'augmenter le débit de l'eau, afin que la boule s'éloigne de son logement. Hélas, dans cette situation, un second effet entre en jeu, l'effet Venturi. En quoi consiste-t-il ? Lorsque la vitesse d'un écoulement devient importante, les effets inertiels – notamment liés à l'accélération ou à la décélération du fluide – prennent le pas sur les effets de viscosité : en raison de la conservation de l'énergie, la pression diminue quand la vitesse (donc l'énergie cinétique) du fluide augmente. Ainsi, si l'on place une balle de ping-pong dans un

entonnoir et si l'on souffle de l'air par la petite embouchure cylindrique, la balle, contrairement à notre intuition, est attirée par la dépression qui se crée entre elle et la paroi de l'entonnoir [voir la figure page 90].

C'est ce qui peut se passer avec la boule si le débit de la fontaine est trop important. D'une part, à cause de la géométrie sphérique, le fluide ralentit à mesure qu'il s'éloigne du point d'injection, afin que la conservation du débit soit assurée. Par conséquent, du point d'injection jusqu'au bord de la fontaine, la pression du fluide augmente. Et comme au bord, la pression est égale à la pression atmosphérique, cela signifie qu'ailleurs sous la boule, le fluide est en dépression.

En tenant compte simultanément de ces effets inertiels et des effets de viscosité, on montre ainsi qu'à partir d'une certaine vitesse du fluide, l'augmentation du débit

déstabilise la fontaine : la boule est aspirée vers son socle.

C'est pourquoi il est plus difficile de réaliser un dispositif de type fontaine-boule avec de l'air. L'air étant 50 fois moins visqueux que l'eau, pour un même débit, la variation de pression due à la viscosité est 50 fois plus faible qu'avec l'eau. Pour soulever la sphère, il faut donc réduire l'écart entre la sphère et son logement d'un facteur égal à la racine cubique de 50, soit un facteur 3,7, ce qui fait un écartement de 0,08 millimètre. Et si l'on augmente trop le débit, on sera confronté à l'effet Venturi. Malgré la difficulté, une telle sculpture a été réalisée et exposée en 2004 par l'entreprise indienne Brahma Granitech : une boule de granit noir de 40 centimètres de diamètre qui, comme par magie, semblait léviter au-dessus de son socle, soutenue par un film d'air invisible. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. H. Snoeijer et K. van der Weele, **Physics of the granite sphere fountain**, *American Journal of Physics*, vol. 82, pp. 1029-1039, 2014.

Toutes les ARCHIVES

■ Pour la Science

■ Dossier
Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr*

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.



CHAQUE MOIS



CHAQUE TRIMESTRE

Retrouvez vos magazines en kiosque ou directement chez vous

POUR LA SCIENCE

La référence de l'actualité scientifique internationale



LES VERSIONS NUMÉRIQUES
feuiltables en PDF sur le site



L'APPLICATION
téléchargeable sur Appstore
et Google Play pour consulter
vos magazines



Suivez Pour la Science
également sur :



DES CONTENUS INÉDITS
sur le site



WWW.POURLASCIENCE.FR