

Cavitation et Vasque Olympique

Nous sommes le 26 juillet 2024. Il est 23 h 24. *Teddy Riner* et *Marie-José Pérec* s'approchent ensemble de la vasque olympique, créée par le designer français *Matthieu Lehanneur*, torche olympique à la main, pour l'illuminer. Le ballon d'hélium doré s'envole, point de départ de la parenthèse magique des jeux olympiques et paralympiques de Paris. Un an plus tard, ce symbole des jeux fait son retour dans la capitale française.

Réinstallée dans le jardin des Tuileries le 12 juin, la vasque [01] se prépare à prendre son envol du 21 juin au 14 septembre 2025 et elle devrait revenir encore durant les étés 2026 et 2027. Dans ce cadre, les @ramis furent sollicités pour monter une animation à l'occasion des journées de la science à Limoges au mois de septembre 2024 et présentèrent leur petite vasque olympique [02], (petite, car en rapport avec les moyens disponibles), mais qui fonctionnait (presque) suivant les mêmes principes, avec toutefois une technologie un tantinet différente.

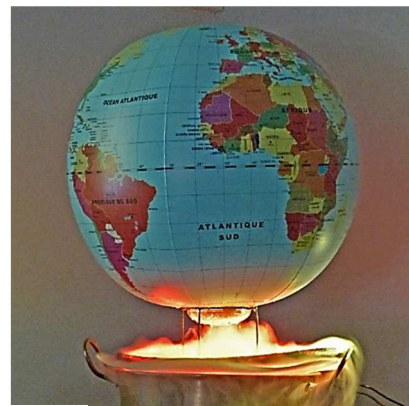
Comment se présente la vasque olympique ?

Il s'agit d'une structure d'une hauteur totale de 30 mètres, constituée essentiellement d'une vasque (anneau rempli d'eau) de 7 mètres de diamètre, soutenue par un ballon captif de 22 mètres de diamètre, gonflé à l'hélium et s'élevant à 60 mètres au-dessus du sol. L'illusion d'une flamme est créée à partir d'un aérosol d'eau projetée au moyen de 200 buses et éclairée par de la lumière issue de 40 projecteurs LED. L'ensemble est électrique et n'utilise aucun combustible fossile.

Les plus curieux apprendront que le nuage est formé de minuscules gouttelettes d'eau, mais n'en sauront guère plus sur son origine, à moins que le mot de *cavitation* (de latin *cavus*, trou), susurré par les plus informés, ne leur soit parvenu aux oreilles.



[01]



[02]

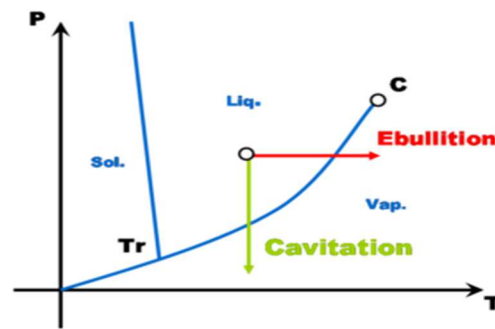
Mais, qu'est-ce que la cavitation ?

Le phénomène de *cavitation* fut observé pour la première fois en 1895 par Sir *John Thornycroft* et *Sidney Barnaby*, qui remarquèrent que les hélices d'un nouveau modèle de bateau s'usaient très vite, ce qui rendait le bateau très peu efficace. Le phénomène physique sous-jacent fut compris quelques années plus tard (en 1917) par *Lord Rayleigh*.

Pour l'expliquer, il nous faut rappeler que l'eau existe sous forme liquide, solide (glace) et gazeuse (vapeur). La température à laquelle l'eau passe d'un état à un autre dépend non seulement de la température (ici, elle ne varie pas beaucoup autour de l'ambiante), mais surtout de la pression. Ainsi, sous la pression usuelle de 1 bar, l'eau bout à 100 degrés. Mais plus la pression augmente, plus la température nécessaire est élevée. Plus la pression est basse, plus la température nécessaire est faible.

C'est ainsi qu'au sommet de l'Everest, l'eau ne bout qu'à 72°C. Mais il y a une autre manière de passer de l'état liquide à l'état vapeur : au lieu d'augmenter la température, on peut abaisser la pression ce qui se produit lors de la *cavitation*.

La dépression peut avoir pour origine l'écoulement du fluide (comme dans le cas de notre bateau ou de la vasque olympique), une onde acoustique (comme celle montrée aux journées de la science de Limoges) ou la focalisation d'un rayon laser de forte intensité qui, provoque également la formation de bulles dans le liquide, ce qui est la définition de la cavitation. On parle alors de cavitation optique.



La cavitation provoquée par un écoulement de fluide

Il faut naturellement que l'écoulement du liquide soit à forte vitesse. Par exemple, si un liquide s'écoule dans une tuyauterie dont le diamètre diminue au fur et à mesure qu'il avance, sa vitesse va augmenter, et surtout, il subit une dépression lorsque sa vitesse augmente, ce que l'on appelle l'effet *Venturi**.

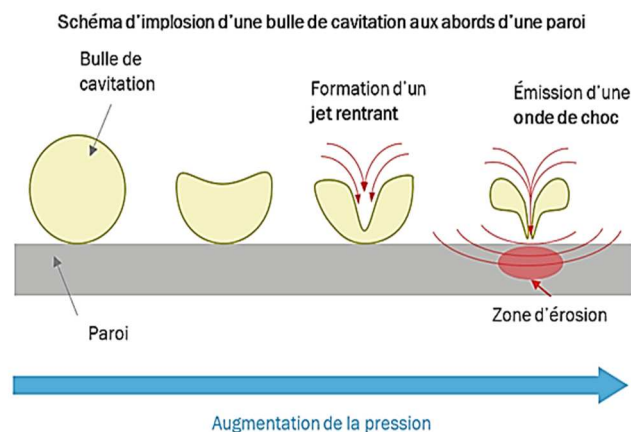
Dans les zones montagneuses, l'effet *Venturi* est fréquemment présent. Par exemple, lorsque le vent rencontre une montagne, la pression de l'air augmente, ce qui veut dire que la section de passage de l'air diminue. La section de passage de l'air étant moindre, cet air se retrouve dès lors accéléré de manière à conserver le même débit qu'avant (quantité d'air passant par un point par unité de temps).

C'est pour cette raison que le vent qui règne au sommet des montagnes est toujours plus important que celui que l'on trouve à leur base. Un détroit maritime entre deux côtes montagneuses crée aussi un puissant effet *Venturi*. Ainsi des sites comme Tarifa (point le plus resserré du détroit de Gibraltar) ou les Bouches de Bonifacio en Corse sont des lieux très ventés (et très fréquentés par les amateurs de planche à voile ou de surf).

Les tours aéroréfrigérantes caractéristiques des centrales nucléaires, avec leur forme hyperboloïde génèrent un effet *Venturi* au niveau de leur col. Mais cette forme est choisie pour l'augmentation de résistance au vent de la tour et non pas pour l'effet *Venturi* qu'elle provoque.

* L'effet *Venturi* n'est qu'une conséquence du théorème de *Bernoulli* établi en 1738 par *Daniel Bernoulli*, et qui énonce que pour l'écoulement incompressible d'un fluide homogène soumis uniquement aux forces de pression et de pesanteur, une augmentation de vitesse entraîne une diminution de pression.

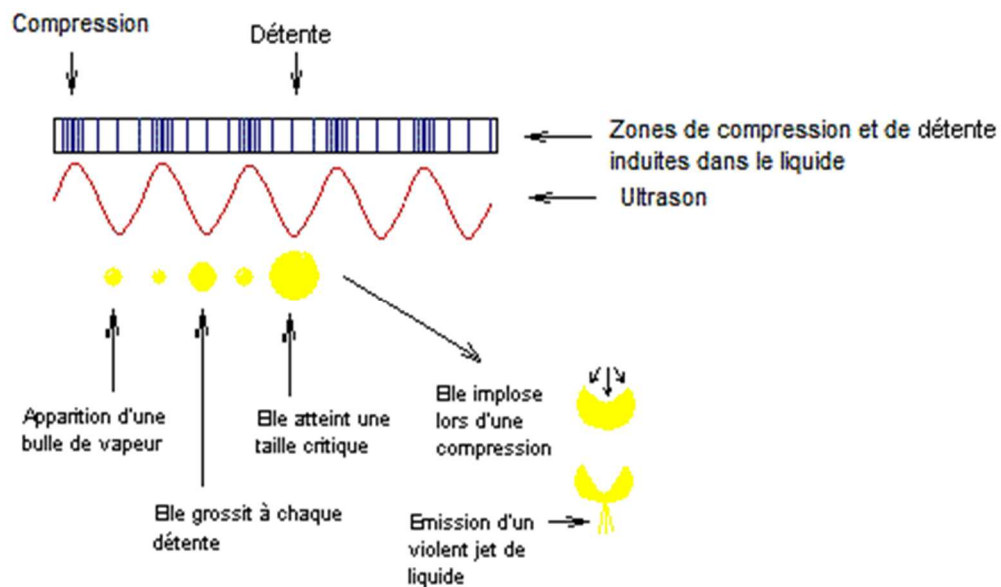
L'équation de *Bernoulli* adaptée à l'effet *Venturi* s'écrit : $P + (1/2) \rho v^2 = \text{Cste}$. P étant la pression, exprimée en Pa, ρ la masse volumique du fluide (en kg/m³) et v la vitesse d'écoulement (en m/s).



L'écoulement de l'eau au voisinage de l'hélice d'un bateau ou d'un sous-marin provoque une diminution de la pression qui peut devenir inférieure à la pression de vapeur saturante de l'eau d'où la formation d'une bulle de cavitation. La pression de vapeur d'eau à l'intérieur de cette bulle est égale à la pression de vapeur saturante de l'eau, très inférieure à la pression atmosphérique. Cette bulle n'est donc pas stable et va éclater avec formation d'une onde de choc qui, répétée, provoque la corrosion de l'hélice.

La cavitation provoquée par des ultrasons

Lorsqu'un liquide tel que l'eau est soumis à un son de fréquence élevée (ultrason), les ondes sonores qui se propagent dans le milieu liquide entraînent une alternance de cycles de haute pression (compression) et de basse pression (raréfaction), dont les valeurs dépendent de la fréquence, ce qui génère des petites bulles de vapeur appelées *bulles de cavitation* qui se forment durant les cycles de basse pression. Plus la fréquence des ultrasons est basse (16 à 28 kHz) plus les bulles ont le temps de grossir. Plus la fréquence est élevée (jusqu'à 70 kHz et au-delà) plus elles sont fines ; au-delà de 3 MHz, la formation de bulles de cavitation n'est plus possible. Pour que le phénomène de cavitation acoustique soit observé, il est aussi nécessaire que la puissance de l'onde atteigne un minimum de $0,5 \text{ W/cm}^2$ pour l'eau sous pression atmosphérique.



Lorsque les bulles atteignent un volume tel qu'elles ne peuvent plus absorber d'énergie, elles s'effondrent violemment au cours d'un cycle de haute pression. C'est le phénomène de cavitation. Lors de l'implosion, des températures (environ 5 000 K) et des pressions (environ 2 000 atm) très élevées peuvent être atteintes localement ce qui déclenche l'émission très brève (durant un milliardième de seconde) d'un rayon lumineux, phénomène que l'on appelle la *sonoluminescence*.

La puissance lumineuse émise peut être comprise entre 1 et 10 mW. À titre de comparaison, la température de flamme d'un chalumeau oxyacétylénique est de 2500°C . L'implosion de la bulle de cavitation produit également des jets de liquide d'une vitesse pouvant atteindre 280 m/s à partir du moment où l'intensité de l'onde ultrasonore est suffisamment forte.

Dans le cas de la vasque présentée par les @ramis, le but n'est pas de provoquer des réactions chimiques ni de produire de la lumière, mais simplement d'obtenir de la vapeur d'eau, par conséquent, il n'est pas nécessaire d'utiliser des ondes ultrasonores de haute intensité.

La cavitation par ultrasons a eu comme première application le nettoyage du matériel ; on plonge du matériel très sale (matière accrochée aux parois) dans un bain de détergent que l'on fait traverser par des ultrasons. Les jets dus aux implosions des bulles de vapeur vont décrocher la matière des parois. Cette méthode est particulièrement utile lorsque les surfaces à nettoyer possèdent des parties difficilement accessibles.

Obtention de l'illusion d'une flamme

L'illusion d'une flamme dans la vasque olympique, est créée à partir d'un aérosol d'eau et de faisceaux de lumière provenant de 40 projecteurs LED qui traversent un nuage de brume produit par 200 buses de brumisation propulsant l'eau à haute pression (60 bars) à travers de très petits orifices, créant ainsi une fine brume. Cette technique est couramment utilisée dans les brumisateurs industriels et d'extérieur.

Dans le cas de la vasque olympique, la technologie est entièrement électrique et n'utilise pas de combustible fossile. La quantité d'eau consommée est de 3 m³/h (en vol) ou de 2 m³/h (au sol). Le Flux lumineux émis par les projecteurs est de 4 millions de lumens [un lumen (lm) est une candela (cd) × stéradian (sr)], mais, pour ceux qui ne sont pas à l'aise dans la manipulation des unités lumineuses, il est plus simple de dire que 4 millions de lumens correspondant environ à une puissance de 6 kW pour de la lumière visible, soit celle nécessaire au fonctionnement d'un studio.

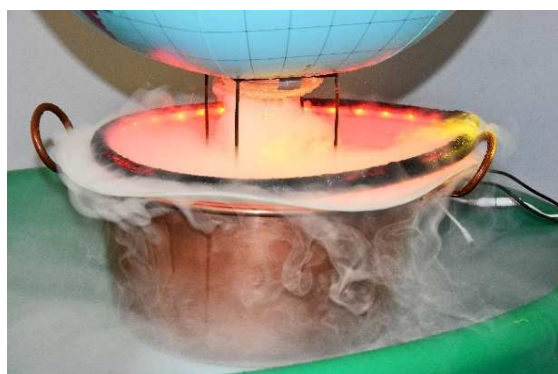
La taille des gouttelettes fabriquées par la buse est inférieure à 16 µm, ce qui provoque leur évaporation immédiate (la tension de vapeur saturante de l'eau sous forme de fines gouttelettes augmente lorsque leur diamètre diminue**), ce qui par ailleurs produit du froid. Les curieux s'en rendent compte immédiatement s'ils ont l'idée de plonger leur main dans la vapeur !

** La formule de *Kelvin* donne la pression de vapeur saturante P d'une gouttelette de rayon r en fonction de sa tension P_0 au-dessus d'une surface plane, T étant la température, V_m le volume molaire, σ la tension superficielle et R la constante des gaz parfaits est : $P / P_0 = \exp (2 \sigma V_m / r RT)$

Utilisation de la cavitation

Une bonne compréhension du phénomène permet de l'exploiter dans un but un peu moins élémentaire que le nettoyage des surfaces inaccessibles, comme par exemple en *sonochimie* qui utilise la température et la pression obtenues dans certaines bulles pour obtenir des réactions chimiques inhabituelles ou la *sonoluminescence* qui peut arriver quand une onde sonore d'intensité suffisante fait se contracter rapidement une cavité gazeuse présente dans un liquide. Les flashes lumineux émis par les bulles sont extrêmement courts, entre 35 et quelques centaines de picosecondes (1 ps = 10⁻¹² s) avec des pics d'intensité de l'ordre de 1 à 10 mW. La longueur d'onde de la lumière émise peut être très courte, pouvant atteindre l'ultraviolet, laissant présumer une température de la bulle d'au moins 20 000 K, pouvant atteindre le MK (10⁶ K). Des estimations plus élevées, pouvant atteindre le GK (10⁹ K) ont été annoncées, mais elles reposent sur des modèles qui ne peuvent pas être vérifiés aujourd'hui.

Dans le règne animal, La crevette *pistolet* peut produire un type de *sonoluminescence* par l'effondrement d'une bulle provoquée par le claquement rapide d'une pince spécialisée. L'animal crée alors une bulle de cavitation acoustique qui génère des pressions allant jusqu'à 80 kPa (soit presque 1 atmosphère) à une distance de 4 cm et surtout une température centrale de 5 000 K. La vitesse de déplacement de la bulle peut atteindre près de 100 km/h et libère un son atteignant jusqu'à 218 décibels. Cette pression est assez forte pour tuer des petits poissons. La lumière produite est de plus faible intensité que la lumière produite par *sonoluminescence* typique et n'est pas visible à l'œil nu. Cet effet biologique découvert en 2001 a été surnommé « *shrimpluminescence* », de l'anglais *shrimp* qui signifie crevette.



Pierre Perrot