

REFLEXION SUR LA

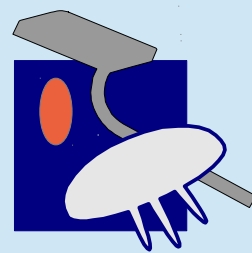
PROPULSION

DE LA

MEDUSE

ET DU

BATEAU POP-POP



Préambule

Le charme du bateau pop-pop, c'est sa simplicité apparente de fonctionnement. Un moteur thermodynamique sans aucune pièce en mouvement, une bougie, et voilà qu'il avance en chassant et aspirant alternativement une petite quantité d'eau.

En observant ce mode de propulsion, on remarque que c'est aussi celui de la méduse ou du calmar, sauf qu'eux utilisent la force animale comme motorisation. D'autres exemples ou analogies simplificatrices pourraient être trouvés, comme l'histoire imaginaire suivante :

« Un bonhomme dans une barque se retrouve malencontreusement immobilisé au milieu d'un lac sans moteur ni rame. L'eau est trop froide pour nager ou ramer avec les mains et il commence à désespérer de pouvoir regagner la rive, lorsque qu'il a une idée :

Avec un seau, il puise de l'eau du lac puis l'expulse avec force hors du bateau vers l'arrière. Par réaction la barque avance et acquiert un élan, donc une vitesse et une quantité de mouvement.

Il répète l'opération une deuxième fois. Maintenant pour être embarquée, l'eau puisée doit passer de la vitesse nulle qu'elle a dans le lac à la vitesse précédemment acquise par le bateau. Il en résulte que lors du puisage la composante horizontale d'une petite quantité de mouvement est déduite de celle du bateau diminuant sa vitesse. Mais si l'eau est ensuite éjectée vers l'arrière avec une vitesse suffisante, l'élan de la barque augmente finalement.

Après maintes opérations similaires, le bonhomme est en mesure de regagner la berge ! »

A méditer...

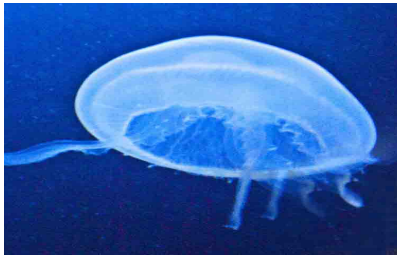
La réflexion qui suit, étayée par plusieurs expériences, tente d'éclaircir le mystère de la propulsion du bateau pop-pop de la méduse ou du calmar, cela en cherchant à comprendre plus particulièrement pourquoi la phase d'aspiration de l'eau ne provoque pas un recul.

Sommaire

- la méduse -----	page	2
- le bateau pop-pop -----		2
- objet de cette réflexion -----		2
- expérience liée à l'énergie cinétique -----		3
- expériences liées à la quantité de mouvement -----		3
- expériences liées à la disposition des tuyères -----		5
- incidence des tourbillons dans la propulsion -----		6
- expériences liées à l'aspiration -----		7
- conclusion -----		10

Deux choses aussi différentes qu'une méduse et un bateau pop-pop présentent toutefois une similitude dans leur mode de propulsion. Mais d'abord, décrivons les succinctement :

La méduse



Cette créature marine issue de la préhistoire se déplace par la force animale en déformant son ombrelle, **en expulsant puis en aspirant de l'eau.**

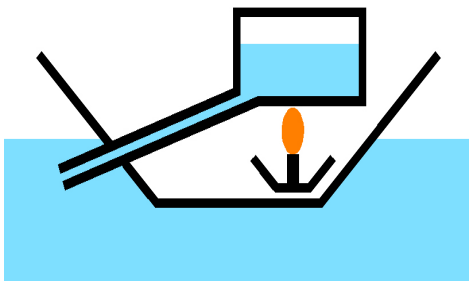
Le bateau pop-pop



Le bateau pop-pop, jouet du début du XXe siècle, avance suivant le même principe que la méduse, **en chassant et pompant alternativement de l'eau** par une tubulure à l'aide de son moteur thermodynamique.

Sans décrire son fonctionnement dans le détail, on peut dire qu'il est composé dans sa forme la plus simple :

- d'une chaudière chauffée par combustion externe (bougie, "méta") ;
- d'une tubulure aboutissant à l'extérieur de la coque sous la ligne de flottaison.



Dans un premier temps, l'eau contenue dans la chaudière est vaporisée sous l'effet de la chaleur, et une petite quantité de liquide est chassée du tube provoquant par réaction l'avancement du bateau.

Cette éjection entraîne dans un deuxième temps une dépression dans la chaudière et la condensation de la vapeur, ce qui a pour effet une aspiration de liquide extérieur dans le tube.

Objet de cette réflexion

Supposons acquis par hypothèse que la méduse ou le bateau pop-pop avancent en échangeant alternativement une petite quantité d'eau avec le milieu extérieur.

On comprend par intuition que l'éjection de l'eau entraîne en sens contraire une force de réaction et un déplacement. **Mais que se passe-t-il lors de la phase d'aspiration ?**

Le bateau ou la méduse reculent-ils alors, ou restent-ils immobiles ? Par quel mécanisme avancent-ils en fin de compte après plusieurs phases de fonctionnement ?

Dans les pages suivantes quelques expériences sont décrites, parmi lesquelles celles liées à l'énergie cinétique, à la quantité de mouvement, à la disposition des tuyères, aux tourbillons, à l'aspiration, cela pour essayer de proposer une explication pertinente à ces questions.

Expérience liée à l'énergie cinétique $e = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$

Une des idées pour expliquer la propulsion est de supposer que l'eau en quantité égale est éjectée plus vite qu'elle n'est aspirée, d'où une différence d'énergie cinétique entre ces deux phases qui engendre l'avancement.



Réalisons le bricolage suivant :

Une coque flottante est équipée d'une sorte de grosse seringue mue par un moteur électrique. Ce dispositif aspire et éjecte alternativement de l'eau à l'arrière de la coque avec une vitesse et une énergie cinétique variant de façon quasi-sinusoïdale.

Ce bateau avance à la manière d'un pop-pop !

L'intérêt de cette expérience est qu'elle prouve que malgré une énergie cinétique de l'eau semblable dans les deux phases, le bateau avance.

Autrement dit, une différence d'énergie cinétique à l'aspiration et à l'éjection ne suffit pas à elle seule à expliquer la propulsion du bateau pop pop ou de la méduse.

Expériences liées à la quantité de mouvement $\vec{P} = m \cdot \vec{V}$

Pour les besoins des expériences suivantes construisons un **dispositif décomposant sur un temps plus long les phases d'éjection et d'aspiration.**

On utilise un bateau expérimental constitué de deux flotteurs et propulsé par une pompe entraînée par un moto réducteur électrique.

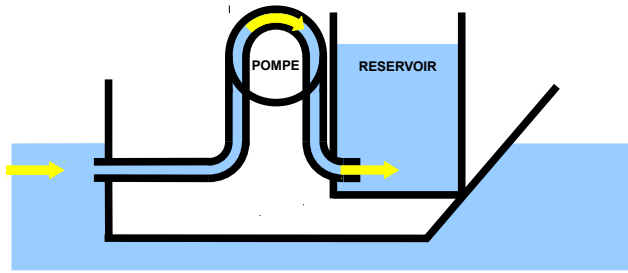


La pompe du type péristaltique offre l'avantage d'un auto amorçage, et du changement facile du sens de transfert du fluide par inversion de sens de son alimentation électrique.

Outre les batteries électriques, le bateau embarque aussi un réservoir qui servira comme nous le verrons à stocker de l'eau.

Enfin, un jeu de tuyères que l'on peut disposer de différentes façon permet de tester plusieurs configurations possibles. On aperçoit sur un des flotteurs une double tuyère concentrique.

Phase d'aspiration :



Le bateau expérimental est dans un premier temps configuré pour aspirer l'eau extérieure et l'embarquer dans le réservoir de bord.

Lors du pompage, le bateau reste immobile.

Mieux : si d'une chiquenaude on lance le bateau à la vitesse \vec{V} dans un sens quelconque, il ne tarde pas à s'immobiliser.

On peut expliquer ce phénomène comme suit :

La masse d'eau embarquée $M(eau)$ passe de la vitesse nulle du plan d'eau extérieur à la vitesse du bateau $\overline{V(bateau)}$.

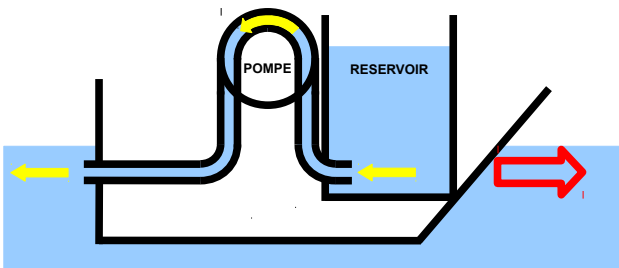
La quantité de mouvement qui lui est transmise est : $\overline{P(eau)} = M(eau) \cdot \overline{V(bateau)}$

En application de la loi de conservation de la quantité de mouvement, la valeur de $\overline{P(eau)}$ décrite précédemment est déduite de la quantité de mouvement propre du bateau $\overline{P(bateau)}$.

Si celui-ci épuise ainsi tout son élan, il s'immobilise même si la pompe continue de remplir le réservoir.

En d'autres termes, lors de la phase d'aspiration le bateau pop-pop et la méduse tendent à s'immobiliser mais ne reculent pas.

Phase d'éjection :



Inversons le sens de rotation de la pompe afin de vider le réservoir et refouler l'eau à l'extérieur du bateau sous la ligne de flottaison.

Comme on pouvait le prévoir, le bateau avance réaction.

La quantité de mouvement que le bateau acquiert durant cette phase est fonction de la masse de l'eau expulsée et de sa vitesse d'éjection :

$$\overline{P(bateau)} = M(eau) \cdot \overline{V(eau)}$$

et la vitesse du bateau, fonction de sa propre masse, devient :

$$\overline{V(bateau)} = \overline{P(bateau)} / M(bateau) + \text{vitesse déjà acquise}$$

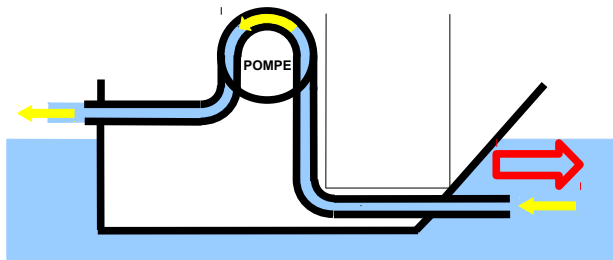
Conclusion :

En considérant un même volume d'eau échangé, pour que le bateau accélère il faut que la quantité de mouvement de l'eau éjectée soit supérieure en valeur absolue à celle de l'eau embarquée : $|M(eau) \cdot \overline{V(eau)}| > |M(eau) \cdot \overline{V(bateau)}|$

Ou encore : **Pour que le bateau pop-pop ou la méduse accélèrent , il faut que la vitesse de l'eau éjectée soit supérieure en valeur absolue à la vitesse d'avancement déjà acquise.** $| \overline{V(eau)} | > | \overline{V(bateau)} |$

Expériences liées à la disposition des tuyères

Pour mesurer la vitesse atteinte par le bateau expérimental précédent suivant les différentes dispositions possibles des tuyères, on le fait naviguer dans un bassin de quatre mètres de long constitué de trois planches de coffrage étanchéifiées par un film de plastique. Un fil de pêche tendu en partie haute guide le bateau et lui évite de frotter contre les parois.



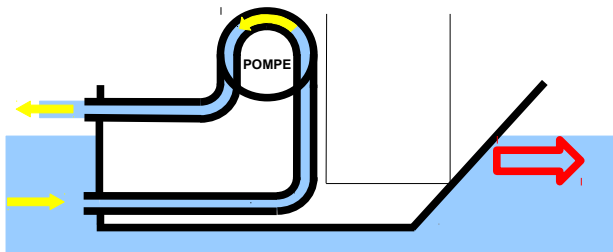
Configuration n° 1

Tuyères séparées

Aspiration à l'avant
Ejection à l'arrière en l'air

Vitesse atteinte : 0,123 m/s

La vitesse la plus élevée atteinte par le bateau correspond cette configuration où l'eau extérieure est aspirée à l'avant puis refoulée à l'arrière au dessus de la ligne de flottaison. La poussée mesurée à l'éjection correspond à la poussée théorique $T_p = \rho \cdot S \cdot V^2$. C'est le cas de figure où les tourbillons près de l'orifice des tuyères sont les plus réduits.

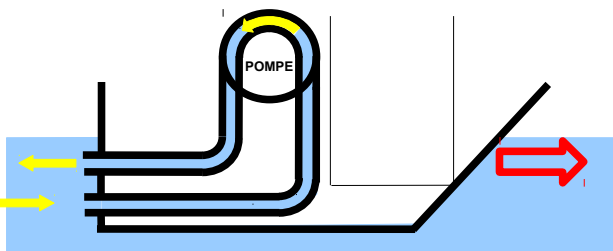


Configuration n° 2

Tuyères séparées

Aspiration à l'arrière
Ejection à l'arrière en l'air

Vitesse atteinte : 0,117 m/s



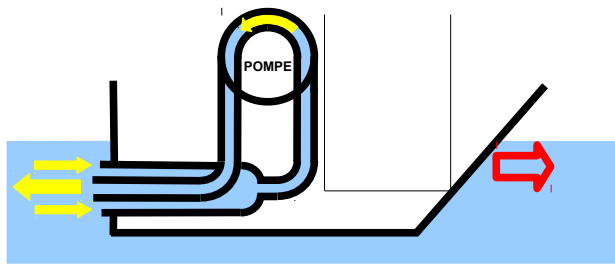
Configuration n° 3

Tuyères séparées

Aspiration à l'arrière
Ejection à l'arrière dans l'eau

Vitesse atteinte : 0,099 m/s

La configuration n° 2 donne une performance supérieure à celle de la configuration n°3. De cette observation, on déduit que lors de l'éjection la propulsion par réaction ne résulte pas forcément d'un appui sur l'eau environnante, et que l'appui uniquement sur l'eau expulsée en l'air produit un meilleur résultat. Le débit massique est le même dans les deux cas.

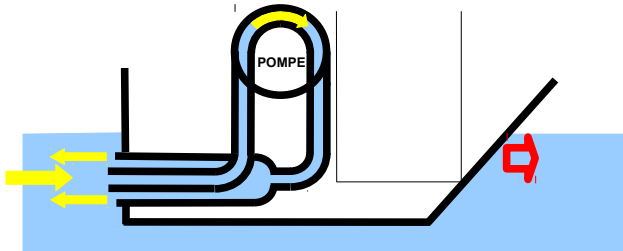


Configuration n° 4

Tuyères concentriques

Aspiration à la périphérie
Ejection au centre

Vitesse atteinte : 0,075 m/s



Configuration n° 5

Tuyères concentriques

Aspiration au centre
Ejection à la périphérie

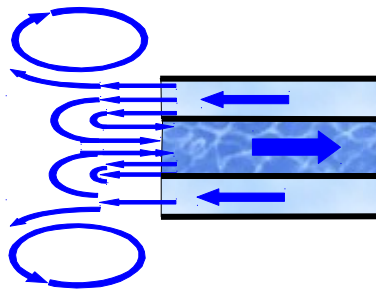
Vitesse atteinte : 0,036 m/s

La configuration n° 5 engendre une très mauvaise performance. Effectuons l'expérience suivante pour essayer de comprendre pourquoi :



Un colorant (brou de noix) est introduit dans le flux éjecté par la tuyère périphérique.

On constate qu'une grande partie du jet sortant par cette tuyère est intercepté par le tube aspirant central et retourne donc dans la pompe sans avoir interagi avec le milieu extérieur.



Cela explique le mauvais rendement de cette configuration en terme de propulsion.

Incidence des tourbillons dans la propulsion

Les diverses configurations précédentes montrent que la vitesse atteinte par le bateau décroît avec l'importance des tourbillons engendrés près de l'orifice des tuyères. Cette vitesse est maximale dans la configuration n°1 où les flux entrants et sortants subissent peu l'influence du milieu extérieur. Elle se dégrade progressivement lorsque les tourbillons s'intensifient. L'énergie cinétique du flux sortant se dissipe dans les mises en mouvements désordonnés des filets d'eau adjacents, cela au détriment de la poussée.

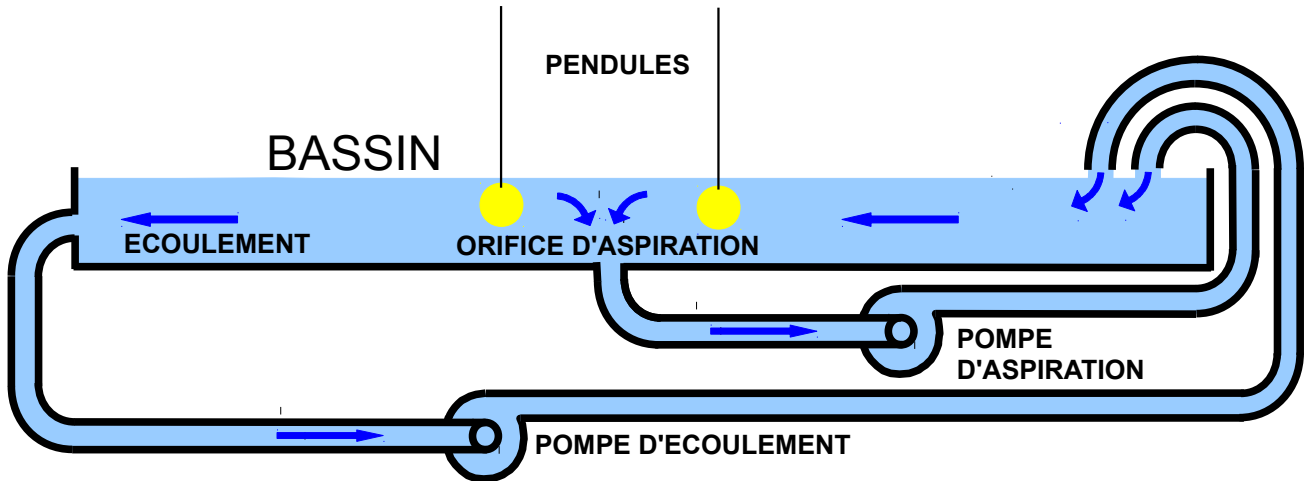
Cela explique en partie le mauvais rendement dans la propulsion du bateau pop-pop où les cycles se succèdent à un rythme rapide entraînant une turbulence chaotique à l'arrière de la tuyère.

Quant à la méduse, elle économise ses efforts en observant une pause entre les deux mouvements très lents, le temps que les tourbillons s'atténuent. Pas bête la bête !

Expériences liées à l'aspiration

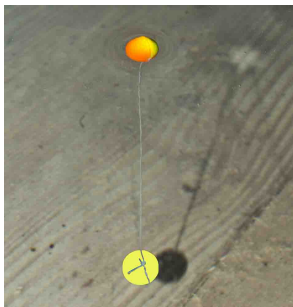
Pour comprendre ce qui se passe près d'un tube d'aspiration, équipons de deux pompes le bassin utilisé précédemment :

- une pompe d'écoulement permettant d'entretenir une circulation d'eau dans le bassin ;
- une pompe d'aspiration qui tend à vidanger le bassin par un orifice d'aspiration.



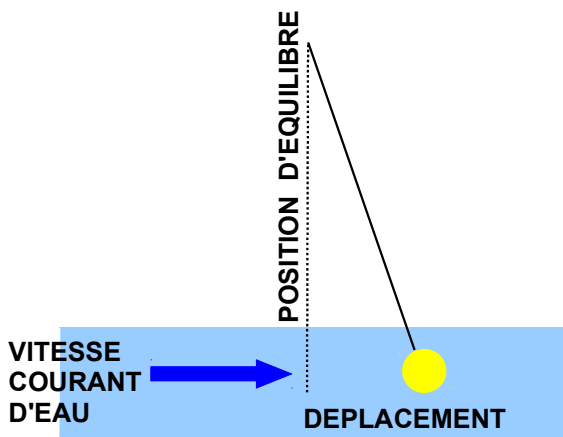
Ce montage matérialise la phase d'aspiration d'un pop-pop, mais dans un repère inversé. C'est à dire que pour simplifier l'expérience, l'orifice d'aspiration du bateau ne se déplace pas dans l'eau du bassin ; il est fixe et baigne dans un écoulement longitudinal qui traverse le bassin et simule l'avancement.

Des pendules disposés autour de l'orifice d'aspiration permettent d'estimer le sens et la vitesse de déplacement du flux d'eau dans lequel ils sont plongés.



La vitesse d'écoulement longitudinal dans le bassin est mesurée par le déplacement d'un flotteur relié à une grosse perle immergée.

Cette vitesse sert à étalonner les pendules décrits ci-après.



Les pendules sont fait de grosses perles suspendues à des fils de 1,60 m environ. Quand ces sphères sont immergées, elles se déplacent par rapport à la verticale d'une distance fonction de la vitesse du flux qui les emporte.

Compte tenu des conditions d'expérimentation, la vitesse peut s'exprimer par la formule :

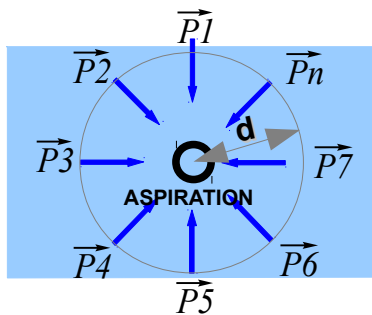
$$vitesse = 0,1578 \cdot \text{déplacement}^{1,0184}$$



La disposition des pendules dans un plan autour de l'orifice d'aspiration permet de déterminer la vitesse des filets d'eau à une distance donnée d du centre.

Il convient toutefois de signaler que cette expérience est difficile à réaliser du fait des turbulences qui rendent les mesures imprécises.

Aspiration dans l'eau immobile du bassin



A une distance donnée d du centre d'aspiration, la vitesse des filets d'eau élémentaires est la même. Elle varie comme l'inverse du carré de la distance considérée.

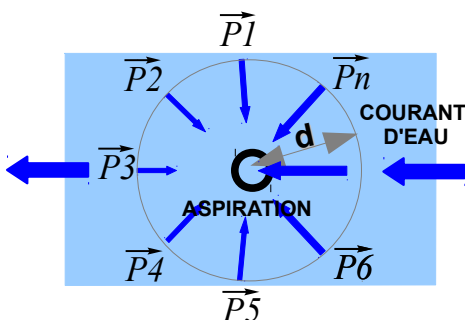
La résultante cinétique de l'eau aspirée est nulle,

$$\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \dots + \vec{P}_n = 0$$

C'est le phénomène qui se produit lors de l'aspiration à la tuyère d'un bateau pop-pop immobile. Il explique le non recul dans cette configuration.

Toutefois, comme nous allons le voir, cette théorie est erronée si le bateau est en mouvement par rapport au plan d'eau.

Aspiration avec un écoulement longitudinal dans le bassin



A une distance donnée d du centre d'aspiration, les pendules indiquent des vitesses différentes pour les filets d'eau qui convergent vers ce centre.

La somme des quantités de mouvement discrètes n'est plus égale à zéro $\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \dots + \vec{P}_n \neq 0$

Par suite, la dérivée temporelle de la quantité de mouvement, ou poussée s'exerçant sur la tuyère n'est pas nulle.

$$\vec{F} = \frac{d(\vec{P})}{dt} \neq 0 \quad \text{ou encore} \quad F = \rho \cdot S \cdot V^2 \neq 0$$

C'est le cas dans la phase d'aspiration du bateau pop-pop ou de la méduse lorsqu'ils avancent. Le milieu extérieur exerce alors sur eux une poussée qui tend à les immobiliser, phénomène que l'on a déjà observé au début dans l'expérience liée à la quantité de mouvement.

Mise en évidence plus concrète des observations précédentes :

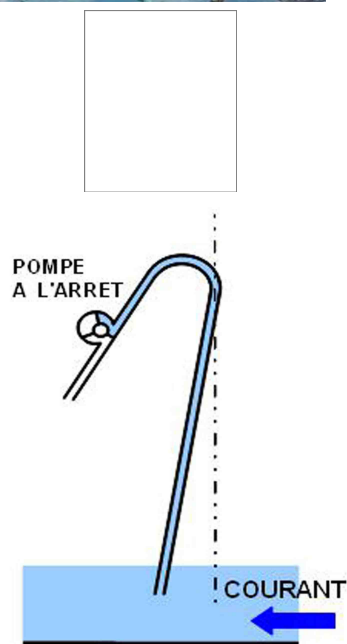
Pour visualiser l'effet de la poussée s'exerçant sur la tuyère en phase d'aspiration, effectuons l'expérience suivante :



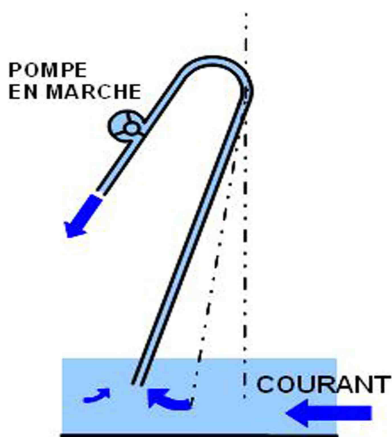
Dans un canal transitant un débit d'eau relativement important, plongeons un tuyau vertical en silicone d'environ 1,50 m de long, de façon à pouvoir aspirer de l'eau du canal à l'aide d'une pompe.

Lestons l'extrémité inférieure du tuyau d'un tube de cuivre percé diamétralement en couronne, ce qui permet d'aspirer suivant un plan horizontal et non pas suivant une sphère.

Cette disposition permet d'augmenter la force de poussée sans modifier le principe de la théorie.



Lorsque la pompe est à l'arrêt, le tube entraîné par le courant est dévié par rapport à la verticale.



Actionnons la pompe : l'angle que prend le tube par rapport à la verticale augmente brusquement.

Ce phénomène met clairement en évidence la théorie précédente selon laquelle en phase d'aspiration la tuyère reçoit une poussée du milieu extérieur en mouvement.

Cette poussée provoque le déplacement de l'extrémité aspirante du tube, laquelle tente de suivre la dérive du courant pour s'immobiliser par rapport à celui-ci.

Cette expérience sommaire demanderait à être perfectionnée en utilisant un canal idéal présentant une section semi-circulaire importante et dont les parois seraient assez éloignées du tube. En application de la formule de « Manning-Strickler », la pente de ce canal devrait pouvoir varier ainsi que le débit, cela afin de faire varier la vitesse du courant pour une section d'écoulement constante. Dans ces conditions difficiles à mettre en pratique, une série de mesures permettrait de déterminer la valeur de la poussée en fonction de la vitesse du courant et du débit massique dans le tube.

Conclusion

Cette série d'expériences permet de faire les observations suivantes :

- la propulsion est indépendante du mode de motorisation qui peut être animale, thermodynamique, électrique ou autre ;
- une différence d'énergie cinétique à l'aspiration et à l'éjection ne suffit pas à elle seule à expliquer la propulsion du bateau pop pop ou de la méduse ;
- l'avancement lors de l'éjection ne résulte pas forcément d'un appui sur l'eau du bassin mais plutôt d'un appui sur l'eau expulsée, car on constate que la force de propulsion est plus importante quand l'éjection se fait au-dessus de la ligne de flottaison ;
- les tourbillons qui se forment dans le milieu extérieur dégradent le rendement de la propulsion en fonction de leur importance ;
- lors de l'aspiration, et quand le bateau ou la méduse sont déjà lancés, le milieu extérieur exerce sur eux une poussée négative qui tend à les immobiliser. Cette force découle de la quantité de mouvement transmise à l'eau aspirée laquelle passe d'une vitesse nulle à la vitesse du bateau.

Compte-tenu de ces remarques, on peut proposer la théorie suivante :

« On peut considérer que la propulsion d'un bateau pop-pop, comme celle d'une méduse, peut s'expliquer quel que soit le système de motorisation. L'avancement résulte de la différence des quantités de mouvement mises en œuvre pour échanger de petits volumes d'eau avec le milieu extérieur. »

Fait en: juin 2010
modification en: décembre 2012
Dernière modification en: novembre 2017

Si le sujet vous intéresse et que vous pensez mon raisonnement erroné, je vous propose d'en débattre afin de tenter de dégager si possible un consensus. (medusepoppop@orange.fr)

Au plaisir de vous lire,
médusepoppop