



Atelier sur les vagues

Voici une proposition d'activités dans le cadre de l'atelier « Vagues » pour un atelier du mercredi (15/5/2024) et pour la FDS2024 (octobre 2024).

Merci à R. Barate pour ses commentaires et corrections.

Questions, commentaires : patrick.roudeau@ijclab.in2p3.fr

Création des vaguelettes :



Création de vaguelettes en faisant tomber différents objets. On observe le résultat avec un rétroprojecteur.

Matériel :

+ récipient peu profond aux parois transparentes de petite taille afin qu'on puisse, éventuellement, le poser sur un rétro-projecteur. Nous avons utilisé un bac en plastique de dimensions 36x32x9 cm. Veiller à ce que le fond soit plat et non diffusant afin de conserver la direction des rayons lumineux qui l'éclairent par en-dessous;

+ différents objets : petite baguette, graines, pipette...

Discussion avec les enfants :

+ habitants Soustons ou ses environs vous avez certainement déjà vu des « vagues ». Pouvez-vous expliquer comment elles sont créées et illustrez la méthode en utilisant le récipient ?

On peut s'attendre à :

- + par le vent et l'enfant souffle sur la surface du récipient ;
- + en lançant un objet et il lance une graine dans le récipient ;
- + avec la pluie ; on utilise un pipette et on fait tomber une goutte dans le récipient ;
- + en bougeant ou frappant le récipient ;
- + en nageant et il peut déplacer son doigt sur l'eau ;

Résumé de la discussion :

+ tout ce qui touche la surface de l'eau va créer des « vagues ». Elles seront plus ou moins importantes (hautes par rapport à la surface), plus ou moins serrées.

+ on a observé que les « vagues » s'éloignent de l'endroit où elles sont créées, dans toutes les directions (si aucun obstacle n'est sur leur trajet).

+ on a observé que les « vagues » se réfléchissent sur les parois du récipient et repartent dans une autre direction ;

+ on a observé que les « vagues » se déforment en s'éloignant : leur hauteur sur l'eau diminue, leur espacement augmente (difficile à voir avec un petit récipient, parler d'un caillou lancé dans le lac de Soustons).

Le mécanisme est le suivant : si on fait monter de l'eau dans un endroit de la surface, elle va redescendre aussitôt ce qui va faire monter l'eau qui est autour ; elle-même, en redescendant va entraîner l'eau de son voisinage Et ainsi de suite. La « vague » se déplace ainsi et sa hauteur diminue car, plus on s'éloigne et plus la surface qui doit monter ou descendre est importante alors que c'est la même quantité d'eau, que celle, intéressée au départ qui peut se déplacer.

+ sur une étendue d'eau un peu grande (étang, mer, océan) c'est le vent qui est à l'origine des « vagues ». Sauf dans des cas très particuliers comme un tremblement de terre, un chute de météorite, ... qui peuvent créer des vagues « particulières » et heureusement très rares.

Comment le vent crée t'il les « vagues » ?

Exercice : prendre à 2 mains une feuille de papier A4. Elle se courbe vers le bas. Comment la redresser en soufflant ? Plus précisément doit-on souffler en-dessous ou bien au-dessus de la feuille ? La plupart des réponses préconisent de souffler en-

dessous. On fait alors remarquer que le vent souffle nécessairement au-dessus de l'eau.

Si on souffle en-dessous l'air va pousser la feuille et elle remonte effectivement. Mais, si on souffle au-dessus la feuille remonte également ... sans que l'air ne la pousse.



Image de gauche : bouche positionnée en-dessous de la feuille, on ne souffle pas, la feuille tombe vers le bas. Image de droite : on souffle, dans la même position : la feuille se redresse.



Le même exercice avec la bouche positionnée au-dessus de la feuille !

Le mécanisme est le suivant : si, dans un fluide (air, eau, ...) une partie du fluide se déplace (par exemple s'il y a un courant créé au sein du fluide (comme ici lorsque l'on souffle), la pression dans le fluide en mouvement est plus faible que dans le fluide au repos. Dans le cas présent, comme la pression est plus faible au-dessus qu'en-dessous de la feuille, celle-ci va monter. C'est le même principe qui permet aux avions de voler : le profil des ailes crée une circulation de l'air plus rapide au-dessus qu'en-dessous de l'aile et ainsi une pression plus faible au-dessus de l'aile qu'en-dessous.

Lorsque l'air circule horizontalement au-dessus d'une surface d'eau il va ainsi créer une pression plus faible ce qui permet à l'eau de se soulever à son passage. Il se crée de petites vagues irrégulières se propageant dans toutes les directions. Il faut que le vent souffle sur de vastes surfaces pour que, après avoir parcouru une certaine

distance ne subsistent plus que des vagues régulières qui peuvent parcourir des milliers de kilomètres avant d'atteindre les côtes: **la houle**.

Les grandes structures atmosphériques (dépressions et anticyclones) créent aussi des différences de pression qui affectent de vastes surfaces des mers ce qui entraîne de grands mouvements des eaux et des montées sur les côtes pouvant atteindre un mètre.

*Remarque : si dans un bassin contenant une grande quantité d'eau, un petit courant rapide se crée, la pression de l'eau dans ce courant est plus faible que dans l'eau qui l'entoure et cette dernière va se précipiter dans le « petit » courant qui va alors grossir ; c'est le mécanisme des **courants de baïnes**.*

Et si on parlait d'énergie :

Les oscillations à la surface du bac disparaissent au bout d'un certain temps, sauf si vous continuez à dépenser de l'énergie pour l'agiter, de même la houle a besoin de l'énergie du vent pour s'entretenir.

(Seules quelques vagues solitaires peuvent se propager sans pertes: mascaret sur un fleuve, tsunami sur l'océan).

Les puissantes tempêtes détruisent les côtes, mais on peut essayer de récupérer une partie de cette énergie avec des turbines.

La Lune entretient le système des **marées** sur Terre, mais les pertes d'énergie provoquent un ralentissement de la rotation de la Terre (il y a 600 millions d'années, les strates nous montrent qu'il y avait 400 jours par an: le jour durait 22 heures).

Actuellement, la puissance perdue est d'environ 4000 GW, le jour augmente de 2 ms/siècle (ce qui fait qu'on mesure par laser que la Lune s'éloigne de la Terre de 3.8 cm/an)

L'usine **marémotrice** de la Rance récupère une partie de cette énergie.

Forme des vagues :

Un peu de vocabulaire :

+ le nom « **vague** » : vient du latin « vagus » qui signifie : vagabond, errant, flottant, mouvant, indéfini, indécis

Les « vagues » désignent ainsi tous ces mouvements de l'eau, variés et parfois désorganisés.

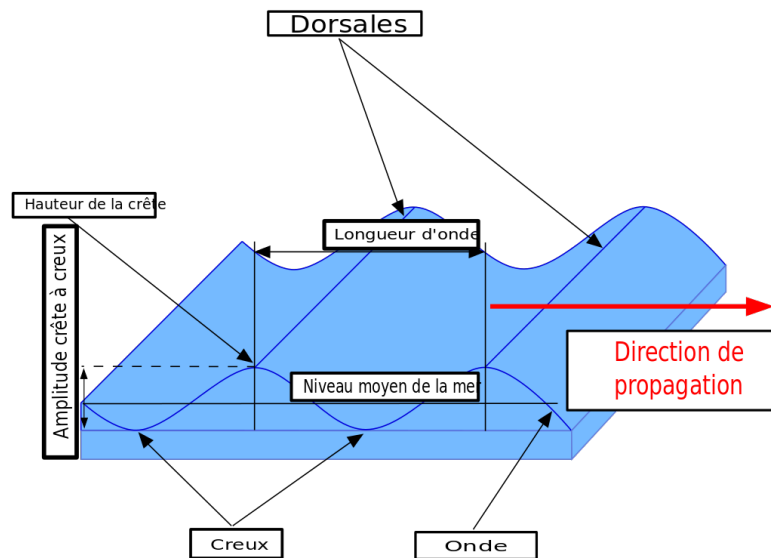
Les Anglais emploient plutôt le terme « wave » ce qui signifie « onde » mettant ainsi l'accent sur le mouvement de l'eau.

+ le nom « **houle** » s'emploie pour décrire le mouvement ondulatoire de la mer. Ce terme désignait en ancien français une cavité (expression que l'on retrouve en Anglais dans « hole » qui désigne un creux).

La distance entre deux creux (ou deux sommets) de la houle s'appelle la **longueur d'onde** ; elle est typiquement de plusieurs dizaines de mètres. La période temporelle

correspond au temps qui s'écoule entre le passage de deux creux ou deux sommets de la houle en un point donné. Elle est typiquement ~10 s. Ces périodes augmentent avec la distance parcourue par la houle pour arriver à la côte. En effet nous verrons que la houle se déplace d'autant plus vite que sa période est grande.

La différence de hauteur entre un creux et un sommet est l'**amplitude** de la houle (petite houle : <2m, modérée : 2-4 m, grande >4m). En approchant de la côte, lorsque la hauteur de l'eau diminue, l'amplitude augmente, la vague ralentit et se brise : c'est le **déferlemen**



t.

Composantes de la houle.
(©Wikipedia)

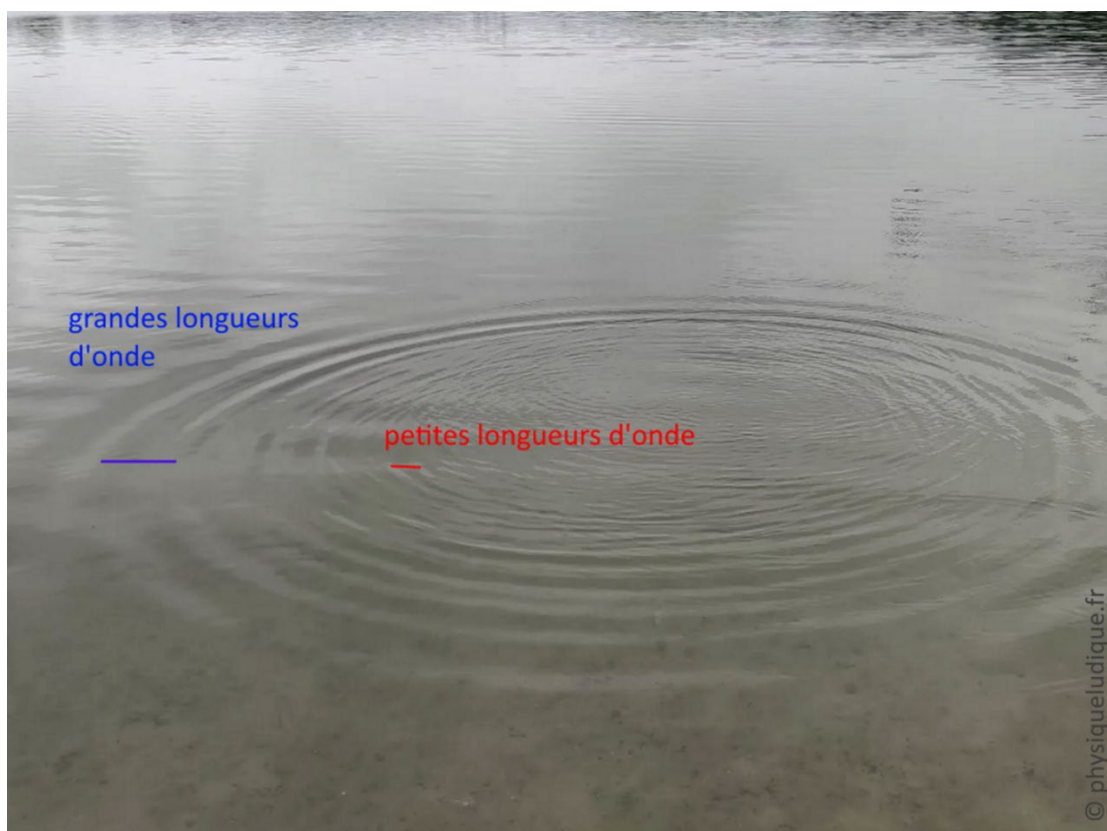
Propagation des vagues lorsque la profondeur est grande devant la longueur d'onde

C'est le cas de la houle sur la haute mer ou bien des vaguelettes sur le lac de Soustons (même s'il est peu profond).

Dans ces circonstances, la vitesse des vagues dépend uniquement de leur longueur d'onde : les plus rapides sont celles de plus grande longueur d'onde. La vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la longueur d'onde.

C'est pour cela que, sur les côtes d'Aquitaine, après des centaines ou des milliers de kilomètres de trajet, arrivent d'abord les houles avec des vagues bien distantes. La distance entre deux vagues renseigne sur la distance de son lieu d'origine. Plus elles sont séparées et plus elles viennent de loin.

Il est difficile de voir cet effet en utilisant une bassine. Sur le lac de Soustons on peut l'observer en jetant un caillou dans l'eau (en l'absence d'autres vagues).



Mouvements des vagues créées en lançant un caillou dans l'eau. Les ondes de plus grande longueur d'onde s'éloignent plus vite.

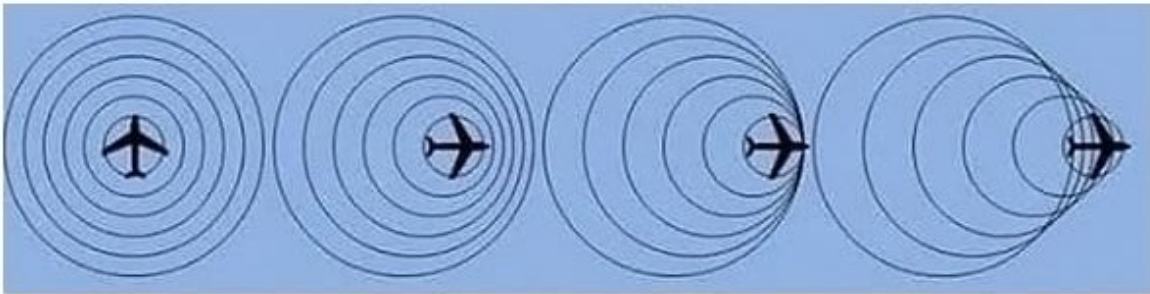
(© <https://physiqueludique.fr/2023/03/comme-une-pierre-que-lon-jette/>)

Cette propriété, appelée **dispersion**, provient d'un couplage entre l'oscillation de l'onde dans l'espace et dans le temps.

Ondes de choc :

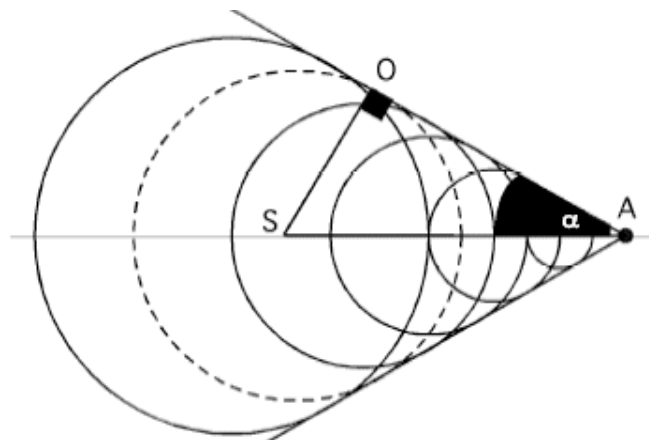
Lorsque la source des ondes se déplace il existe des situations où des ondes émises en différents points peuvent s'additionner. Une onde de choc peut se créer, dans laquelle les énergies transportées par les ondes s'ajoutent.

Un exemple bien connu est celui du passage du mur du son par un avion.



À l'arrêt $V(\text{avion}) < V(\text{son})$ $V(\text{avion}) = V(\text{son})$ $V(\text{avion}) > V(\text{son})$

Les cercles représentent la position de l'onde sonore émise par l'avion à différents instants. À chaque instant, l'onde sonore est située sur la paroi d'une bulle ayant pour centre la position de l'avion et pour rayon la vitesse du son multipliée par le temps écoulé depuis que le son a été émis. Si l'avion est au repos, mais qu'on allume les moteurs, toutes ces bulles ont le même centre et le son occupe tout l'intérieur de la plus grande de ces bulles (créée à l'instant de l'allumage). Si l'avion se déplace, à chaque instant une bulle est créée à la position actuelle de l'avion et se développe. Un observateur aura l'impression que le son est plus aigu lorsque l'avion vient vers lui et plus grave lorsqu'il s'éloigne (effet Doppler que l'on peut percevoir aussi au passage de véhicules ayant une sirène). Lorsque la vitesse de l'avion est plus élevée que celle du son, un phénomène nouveau apparaît. En effet il existe une direction particulière suivant laquelle le son, émis à différents instants peut s'ajouter. Ceci crée, pour un observateur qui le reçoit, le « bang » supersonique.

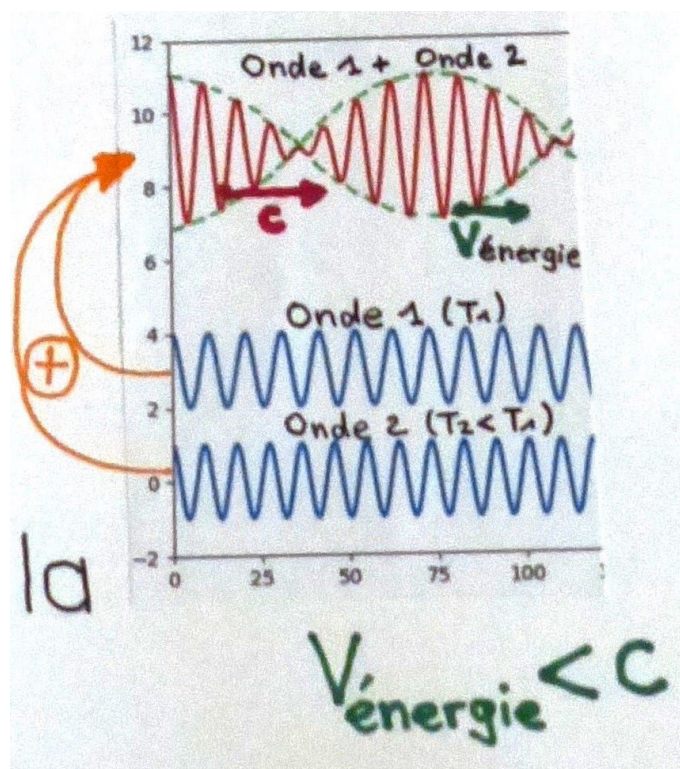


Pendant le même intervalle de temps, lorsque l'avion a parcouru la distance $SA = V(\text{avion}) \times \text{temps}$, le son a parcouru la distance $SO = V(\text{son}) \times \text{temps}$.

Le rapport $SO/SA = V(\text{son}) / V(\text{avion})$ est indépendant de l'intervalle de temps considéré et il en est de même pour l'angle α , dont la valeur dépend de la vitesse de l'avion. En réalité, comme nous sommes dans l'espace à trois dimensions, l'avion « tire » derrière lui un cône dont le sommet est l'avion, l'axe est la direction de l'avion et le demi-angle au sommet vaut α . Lorsque ce cône rencontre quelqu'un, au sol, ce dernier ressentira un bang : le passage du mur du son.

Dans le cas de la houle, le phénomène est un peu plus compliqué car l'interaction entre l'onde et le milieu est prépondérante. De façon très générale, une onde est une oscillation qui a lieu à la fois dans l'espace et dans le temps. Dans l'espace, une onde redevient identique à elle-même après avoir parcouru une longueur d'onde (λ ou période spatiale). Dans le temps, c'est au bout d'une période (temporelle, T) que l'onde redevient identique à elle-même. Par exemple, dans le cas de la houle arrivant vers la plage : λ est la distance, sur une photo, entre deux crêtes de vagues successives et T est le temps écoulé entre le passage de ces crêtes, à un endroit fixe.

On appelle vitesse de phase, la quantité « c » telle que $\lambda = c T$. Si « c » a une valeur constante lorsque l'onde se déplace, le milieu est dit non-dispersif (cas des ondes sonores évoquées précédemment) par contre, si les périodes spatiales et temporelles ne sont pas proportionnelles, « c » n'est pas constante. On définit alors une autre quantité qui dépend de la variation en chaque point ou à chaque instant de la longueur d'onde et de la période. C'est cette « vitesse de groupe » (V_g) qui définit la vitesse de transport de l'énergie, ou de l'information, par l'onde considérée. Le milieu est appelé **dispersif** car la forme de l'onde varie avec le temps de propagation.



Exemple de l'addition de deux ondes (1 et 2), de périodes temporelles différentes et de même amplitude. L'onde résultante, représentée en haut, a des oscillations temporelles dont

la fréquence a une valeur intermédiaire entre les deux fréquences individuelles et l'amplitude est modulée à un rythme correspondant à la différence des deux fréquences. La vitesse de phase correspond à la progression de l'onde « rouge » et la vitesse de groupe à celle de l'onde en « tirets verts ».

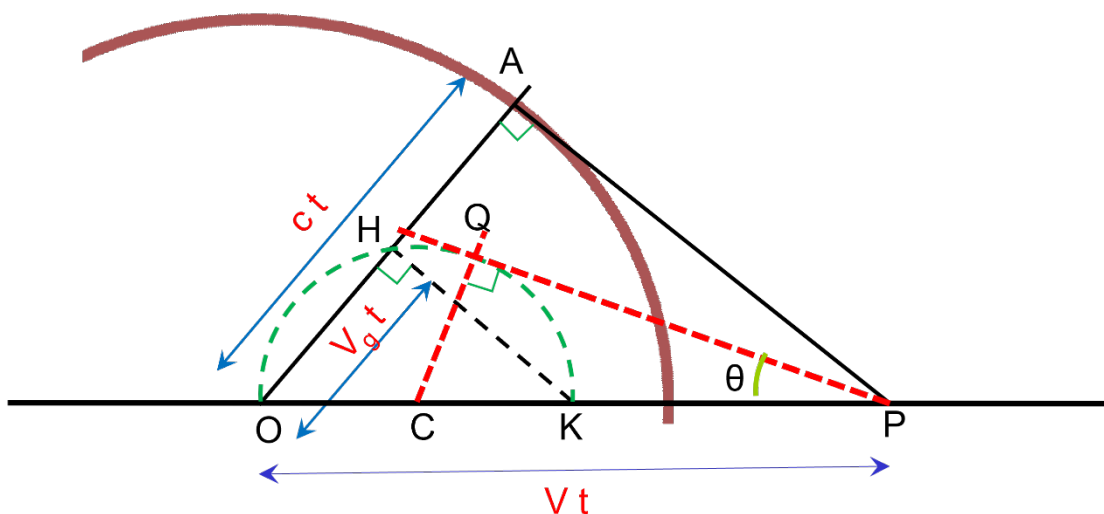
Le mouvement des ondes, à la surface de l'eau, est entièrement déterminé par la force de gravité, par le fait que l'eau est incompressible et par les conditions aux limites (le mouvement du milieu doit s'annuler sur le fond du bassin).

Si la longueur d'onde est grande devant la profondeur alors les conditions aux limites sont prépondérantes et le milieu est non dispersif ($V_g = c$).

Par contre, si la longueur d'onde est faible devant la profondeur de l'océan ou du lac, les conditions aux limites n'interviennent pas car le mouvement de l'eau, sous la surface, disparaît dès que la profondeur est supérieure à une demi-longueur d'onde, environ. Dans ce cas, on trouve que $V_g = c / 2$ (exactement). Le milieu est très dispersif et c'est la situation qui prévaut ici.

Sur le schéma suivant nous avons tenté d'expliquer comment se forme le sillage qui suit un objet se déplaçant sur l'eau suivant la direction OP. Ce dessin correspond à la situation à l'instant où l'objet est en P, pour une onde démarrée précédemment en O par cet objet. L'onde est située sur un cercle de rayon $OH = V_g t$. L'analogue du schéma correspondant aux ondes sonores est le cercle de rayon $OA = c t = 2 OH$. Le point H est situé sur un cercle (tirets verts) de centre C et dont le diamètre vaut la moitié de OP. C'est ce cercle qui va définir l'angle de sillage. Il va y avoir accumulation des vagues suivant la direction PQ, tangente à ce cercle.

L'angle θ est tel que : $\sin(\theta) = CQ / CP$. Sur le schéma on voit que $CQ = OP / 4$ et que $CP = 3/4 OP$ d'où la valeur $\sin(\theta) = 1/3$ ce qui correspond à $\theta = 19^\circ 28'$. Cette valeur est indépendante de la nature de l'objet (ou animal) qui crée les vagues (à condition qu'il ne se déplace pas trop vite).





*Sillage créé par un canard se déplaçant sur un lac.
(©<https://robert-space.fr/physique/sillage.htm>)*

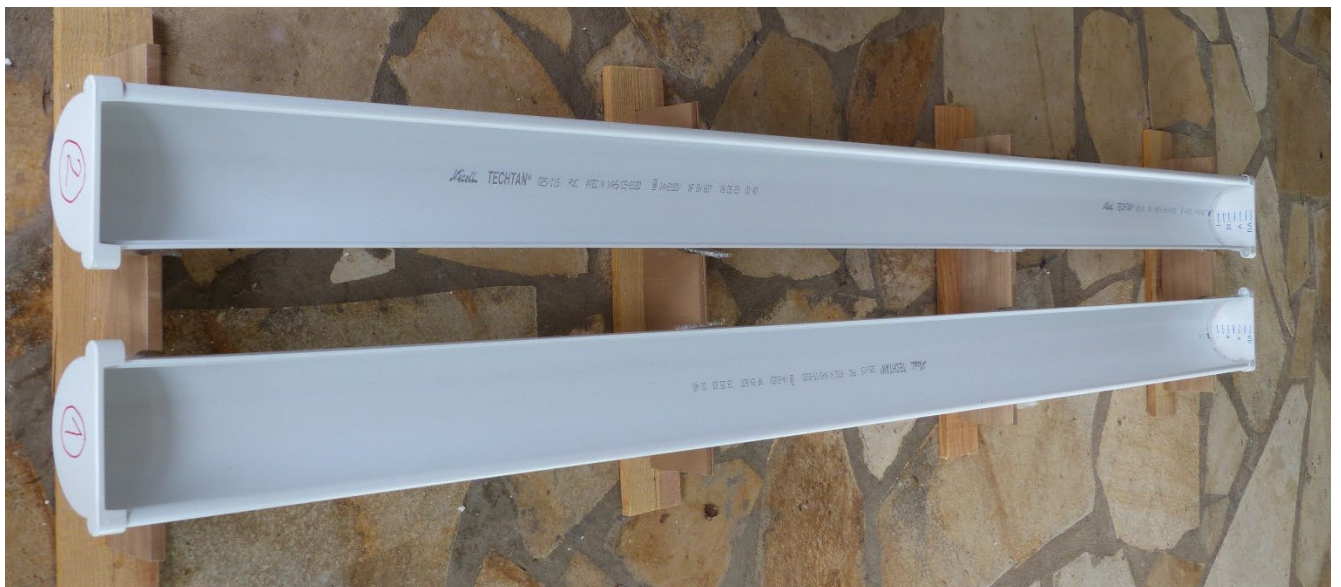


Sillage créé par un porte-conteneurs.

Propagation des vagues lorsque la profondeur est faible devant la longueur d'onde

Dans la première expérience nous avons vu que les « vagues » se déplaçaient rapidement et qu'il était difficile de pouvoir les observer en détail en utilisant un petit récipient. Nous les avons donc « emprisonnées » dans une gouttière de manière à ce qu'elles ne puissent se propager que dans une seule direction et augmenté leur parcours à 2 m.

Comme elles sont contraintes à circuler dans une gouttière leur amplitude s'atténue peu avec la distance qu'elles parcourent. Nous utilisons deux gouttières, chacune contient un niveau d'eau différent. La vague est déclenchée en déplaçant de bas en haut un bouchon en polystyrène.



Les deux gouttières sont parallèles, leur longueur est de 2 m et leur diamètre de 11,5 cm.

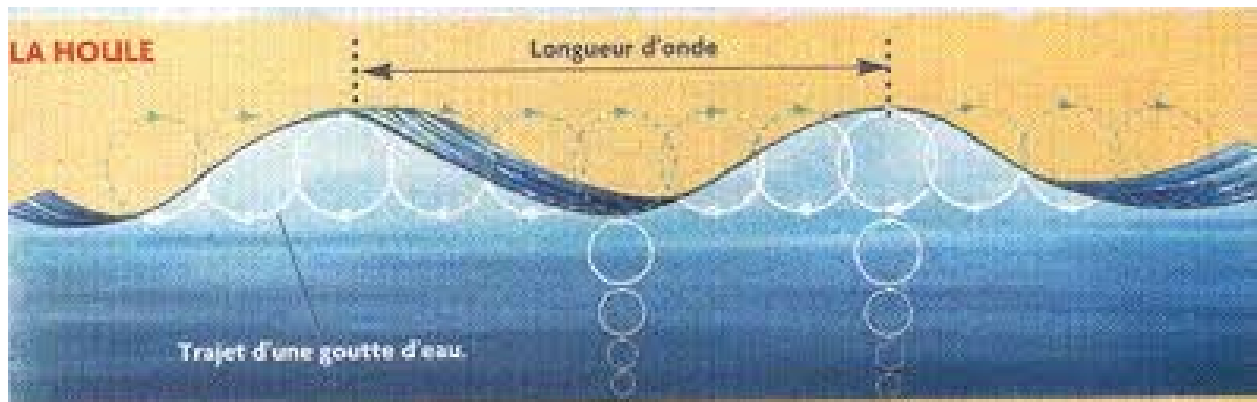
Seule l'onde se déplace horizontalement ; pas l'eau :

+ des bouchons en plastique sont disposés comme flotteurs à différentes distances du départ de l'onde.

+ tour à tour chaque participant déclenche une onde. On peut faire deux constatations :

- les bouchons oscillent de haut en bas au passage de l'onde mais ne se déplacent pas suivant la direction du mouvement de l'onde(*) ;
- arrivée en bout de gouttière l'onde repart dans la direction opposée (elle se réfléchit). On peut observer plusieurs allers-retours.

(*) On peut noter qu'au passage de l'onde les bouchons se déplacent légèrement dans la direction de l'onde (1-2 cm) puis reviennent à leur position initiale lorsque l'onde est passée. Ceci est dû au mouvement de l'eau, sous la surface, qui a lieu suivant des cercles verticaux, ce qui engendre le déplacement de l'onde.



(©<http://tpehoule.free.fr/page.php?page=def>)

La vitesse de l'onde dépend de la hauteur d'eau dans la gouttière :

Dans ce régime, la vitesse des vagues ne dépend plus de la longueur d'onde mais uniquement de la profondeur. **La vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la profondeur.**

+ tour à tour, chaque participant déclenche une onde, simultanément, dans les deux gouttières.

+ les autres participants doivent observer dans quelle gouttière l'onde arrive en premier à l'autre extrémité. Pour cela on a placé deux flotteurs (bouchons en plastique) à proximité de la fin du trajet et qui doivent bouger lors de l'arrivée de l'onde.

Ceci n'est pas très facile à observer. Afin d'améliorer cela on utilise deux lasers dont les faisceaux sont dirigés vers les surfaces de l'eau dans les deux gouttières, au voisinage de la fin du trajet. Les faisceaux réfléchis sont observés sur un écran. En l'absence de vague, les spots sont immobiles. Lorsque les vagues passent dans les faisceaux des lasers, les spots se déplacent.

Expliquer aux participants ce qu'est la réflexion de la lumière.



Les deux gouttières sont parallèles, leur longueur est de 2 m et leur diamètre de 11,5 cm.



Deux faisceaux lasers éclairent la surface de l'eau et sont réfléchis sur un écran. En absence de mouvement de l'eau les spots sont immobiles sur l'écran.

Deux lasers sont dirigés vers la surface de l'eau dans chacune des gouttières. Le laser de gauche (violet) éclaire la gouttière avec un niveau de 3 cm d'eau. L'autre, de couleur verte, éclaire celle contenant 5 cm d'eau. Les faisceaux réfléchis par la surface de l'eau sont observés sur un écran. Les spots sont bien visibles dans la réalité. Sur la photo, on distingue à peine le spot violet (entouré d'un cercle noir) (le laser violet est maintenant remplacé par un rouge ce qui améliore la visibilité)..

Chaque participant va déclencher une vague de manière simultanée dans chacune des gouttières. Il va falloir apprendre le geste afin de ne pas faire bouger les gouttières

pendant cette opération. Les autres surveillent les spots sur l'écran et indiquent quel est celui qui bouge le premier lorsque les ondes arrivent.

Nous avons trouvé que l'onde allait plus vite dans la gouttière contenant 5 cm d'eau (le spot vert bouge avant le violet).

On peut également observer, à partir des oscillations des spots sur l'écran, les allers-retours des vagues dans les gouttières ainsi que la diminution de leur amplitude.

Mesure de la vitesse de l'onde :

+ on reprend l'exercice précédent pour chacune des gouttières en déclenchant un chronomètre (on utilise un téléphone portable) lors de la création de la « vague » et en l'arrêtant quand le spot du laser bouge.

+connaissant la distance parcourue (1,75 m) on peut calculer la vitesse de la vague.

On a mesuré 3,50 s avec 5 cm de profondeur soit 0,50 m/s ou encore 1,8 km/h. Avec 3 cm de profondeur le temps écoulé a augmenté de 1s.

Comparer la valeur trouvée avec d'autres résultats :

+ vitesse des vagues en eau profonde (la longueur d'onde est inférieure à la profondeur de l'eau) : 4 m/s pour des vagues espacées de 10 m et 12,5 m/s pour des vagues espacées de 100 m.

+ vitesse du son dans l'air : 344 m/s. Cela permet de connaître la distance de l'orage quand on a aperçu un éclair et que l'on entend ensuite le grondement (environ 3s par kilomètre).

Les tsunamis :

Ils ont principalement pour origine des séismes ou bien des effondrements sous-marins qui mettent en mouvement toute la colonne d'eau située au-dessus. Ce processus de création de vague est très différent de celui de la houle dans lequel seule la couche d'eau en surface, sur une épaisseur de quelques mètres, se déplace. Le séisme crée, en surface, une vague de très grande longueur d'onde (plusieurs dizaines de kilomètres) et d'assez faible amplitude (quelques mètres). Au large, cette vague passe inaperçue pour les navigateurs.

La vague se déplace suivant le régime où la longueur d'onde est bien supérieure à la profondeur de l'océan. Sa vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la profondeur. Pour un séisme à 4000 m de fond on évalue la vitesse à 700 km/h.

Si l'on utilise la mesure effectuée avec la gouttière où, pour une profondeur de 5 cm nous avons trouvé 1,80 km/h. L'application de la loi précédente donne une estimation de 500 km/h pour un tsunami créé à une profondeur de 4000 m, soit le bon ordre de grandeur ([cela paraît « miraculeux » compte tenu de la simplicité du dispositif ... à décortiquer plus en détail](#)).

Lorsque la vague arrive près de la côte, les zones les plus proches du rivage ralentissent plus vite que celles qui en sont éloignées. La vague se comprime et sa hauteur augmente fortement ; finalement elle déferle et crée des dégâts impressionnants.

Vous trouverez plus d'informations sur les affiches copiées sur le site.

Autres observations possibles avec ce dispositif :

+ avec des élèves plus âgés on peut discuter des différents paramètres qui limitent la précision des mesures et comment on peut améliorer le dispositif :

- déclenchement des vagues ;
- positionnement des lasers par rapport aux vagues ;
- transmission du « start » et du « stop » du chronomètre ;
- ...

+ on peut varier la profondeur de l'eau afin d'avoir plus de mesures et essayer de trouver la dépendance entre la vitesse et la profondeur ;

+ construire des bacs de section rectangulaire au lieu de circulaire (cas de gouttières) afin de comprendre ce que l'on définit comme étant la « profondeur » dans le cas des gouttières ;

+ construire des bacs de section rectangulaire et de largeurs variables afin de mesurer l'effet de la réflexion sur les parois latérales ;

+ autre idées ?