

Concours C'Génial 2016

Le phénomène des eaux mortes



Table des matières

| | |
|---|----|
| 1.Résumé..... | 3 |
| 2.Remerciements..... | 4 |
| 3.Problématique..... | 4 |
| 4.En quoi consistent les eaux mortes ?..... | 4 |
| 5.Construction du bassin d'expérience..... | 4 |
| 6.Obtention de deux couches de salinités différentes | 4 |
| 7.Choix et emplacement du colorant..... | 5 |
| 8.Vérification de la différence de salinité des deux couches..... | 5 |
| 9.Relation entre salinité, conductivité et masse volumique..... | 5 |
| 10.Construction du système de traction du bateau..... | 6 |
| 11.Choix du bateau..... | 8 |
| 12.Le lancement du bateau : utilisation d'un électroaimant..... | 8 |
| 13.Prise de vue..... | 8 |
| 14.L'exploitation des vidéos..... | 9 |
| 15.Résultats d'une expérience..... | 9 |
| 16.Influence de la surface immergée du bateau..... | 12 |
| 17.Influence de la longueur du bateau..... | 13 |
| 18.Expérience utilisant deux couches d'eau de températures différentes..... | 13 |
| 19.Conclusion..... | 13 |
| 20.Annexe..... | 14 |
| 21.Bibliographie..... | 14 |

1. Résumé

Le réchauffement climatique permettrait d'ouvrir des voies maritimes passant par le pôle en été. Mais un curieux phénomène a lieu lors de la fonte des glaces. Les navires sont parfois retenus par une force telle qu'ils n'avancent presque plus. D'où provient cette force qui risque de perturber la navigation des navires ? Dans une cuve de 2 m de long munie d'une paroi transparente dans laquelle nous réalisons deux couches d'eau, l'une est salée et l'autre, colorée, est douce et surnage. Un petit bateau jouet est tiré par un dispositif de traction à force constante. Nous filmons l'expérience. Nous observons qu'une onde de forte amplitude prend naissance sur l'interface entre les deux couches d'eau, et que le bateau est freiné d'une manière périodique. Les mesures montrent que la vitesse du bateau oscille en synchronisme avec l'onde d'interface. Donc une onde est créée sur l'interface, d'amplitude si importante que le mouvement d'un navire peut être fortement perturbé.



2. Remerciements

Nous remercions M Jouve, professeur de physique au lycée Rosa Parks, qui nous a guidé dans notre démarche, M Dauxois directeur de recherche CNRS à l'ENS Lyon qui nous a donné des éléments clefs pour la bonne réalisation des expériences et madame Dugourgeot, proviseur de lycée Rosa Parks qui nous prête une salle dans laquelle nous pouvons réaliser notre projet sans être dérangés.

3. Problématique

Le réchauffement climatique permettrait d'ouvrir des voies maritimes passant par le pôle Nord en été. Mais un curieux phénomène a lieu lors de la fonte des glaces. Les navires sont parfois retenus par une force telle qu'ils n'avancent presque plus. D'où provient cette force et dans quelles conditions risque-t-elle de perturber la navigation des navires ?

4. En quoi consistent les eaux mortes ?

La description historique se trouve dans la thèse de M Mercier p 155 :

« En 1893, l'explorateur Norvégien Fridtjof Nansen à bord de son bateau Le Fram fut le témoin d'un étrange phénomène. Alors qu'il naviguait à proximité de l'archipel Nordenskiöld au nord de la Sibérie, Nansen raconte que Le Fram semblait être comme freiné par une force mystérieuse, comme si le moteur ne répondait pas correctement ? (...).

Des travaux réalisés par Eckmann au début du XX^{ème} siècle on montré que cet effet est dû à une onde provoquée par le mouvement du bateau, de forte amplitude, qui se propage sur la surface de séparation entre l'eau douce et l'eau salée, alors que la surface libre reste très peu perturbée.

Le nom « d' eaux mortes » provient, selon le site http://salishsea.typepad.com/blog/2005/07/dead_water.html , d'une légende qui expliquait que le phénomène était dû à une main du cadavre d'un marin noyé qui s'agrippait au bateau et le retenait.

5. Construction du bassin d'expérience.

Matériaux :

- plaques de polystyrène extrudé de dimensions 1,20×60×7 cm
- une plaque de polystyrène cristal transparent de dimensions 2,0 ×0,50×0,003 m, colle silicone.

Dimension de la cuve : L= 2,0 m, l =: 11 cm, h =: 50 cm .

Un dispositif de remplissage avec des tuyaux est fixé sur le bassin.

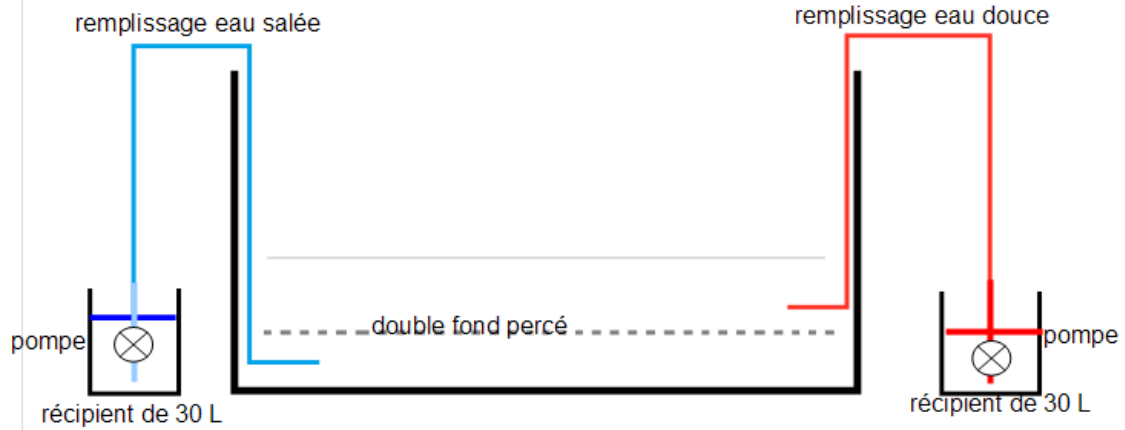


Vue en 3D du bassin d'expérience avec les tuyaux de remplissage

6. Obtention de deux couches de salinités différentes

Nous avons mis au point une technique utilisant un double fond percé de nombreux trous. Ceci

permet d'éviter que les turbulences mélangent les deux types d'eau.



Deux pompes d'aquarium immergées, alimentées entre 2V et 15 V, permettent de régler le débit de remplissage.

On remplit d'abord l'espace situé sous le double fond avec de l'eau salée afin qu'elle affleure la face supérieure de la plaque et ensuite nous faisons couler doucement sur le double fond toute la couche d'eau douce. Ensuite on injecte l'eau salée, très délicatement, sous le double fond, l'eau douce est poussée vers le haut sans se mélanger avec l'eau salée.

7. Choix et emplacement du colorant

Colorants : le bleu patenté le rouge d'alizarine et le bleu de méthylène dissous dans l'eau douce car l'aspect net de l'interface a une durée de vie plus grande que lorsqu'il est placé dans l'eau salée. Cela est dû à la faible polarité des molécules de colorants qui sont moins solubles dans l'eau salée que dans l'eau douce.

8. Vérification de la différence de salinité des deux couches

Pour connaître la variation de salinité selon la verticale, nous utilisons un conductimètre préalablement étalonné.

Résultats pour une salinité de 26g/L :

| | | | | | | | | |
|------------------|----|------|------|------|----|-----|-----|-----|
| h(cm) | 0 | -2 | -4 | -6 | -8 | -10 | -12 | -14 |
| σ (ms/cm) | 12 | 12,1 | 12,5 | 16,5 | 25 | 29 | 31 | 33 |

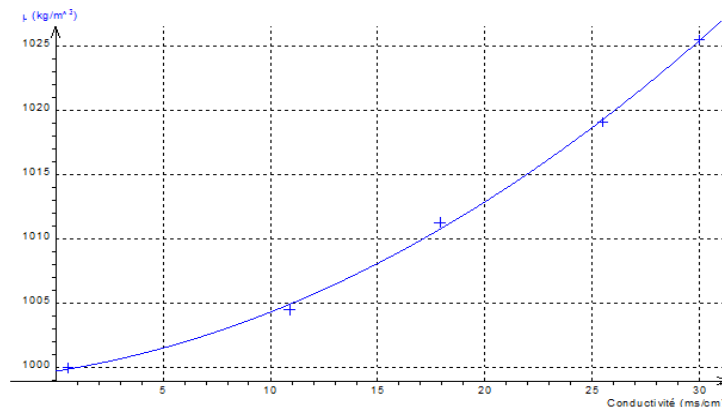
L'origine des distances est située au niveau de la surface libre de l'eau.

9. Relation entre salinité, conductivité et masse volumique

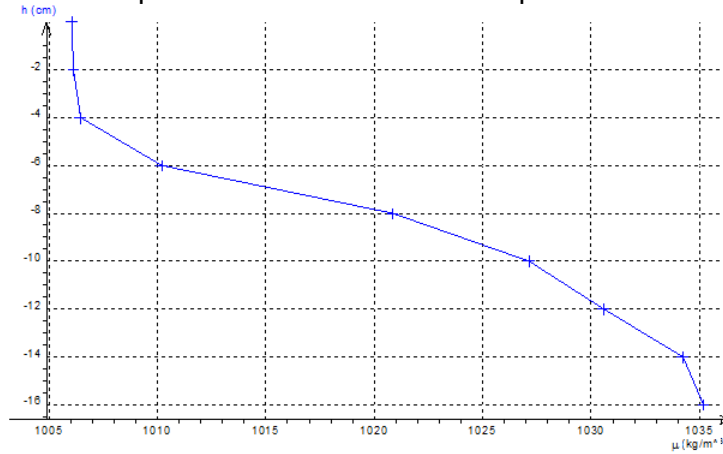
Masse volumique et conductivité de nos solutions salines en fonction de la concentration en sel de cuisine dans l'eau du robinet de Neuville/Saône.

| | | | | | |
|----------------------|-----|--------|--------|--------|--------|
| c (g/L) | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| Conductivité (ms/cm) | 0,6 | 10,9 | 17,9 | 25,5 | 30 |
| Masse de 1 L(g) | 998 | 1004,5 | 1011,3 | 1019,1 | 1025,5 |

Courbe d'étalonnage :



Le modèle avec 0,4 % d'écart relatif est $\mu = 10^3 + 2,59 \sigma + 1,99 \cdot \sigma^2$ où σ en mS/cm et μ exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.
 D'où la variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la profondeur :



10. Construction du système de traction du bateau

10.1. Vitesse limite du bateau dans le cas d'un milieu homogène

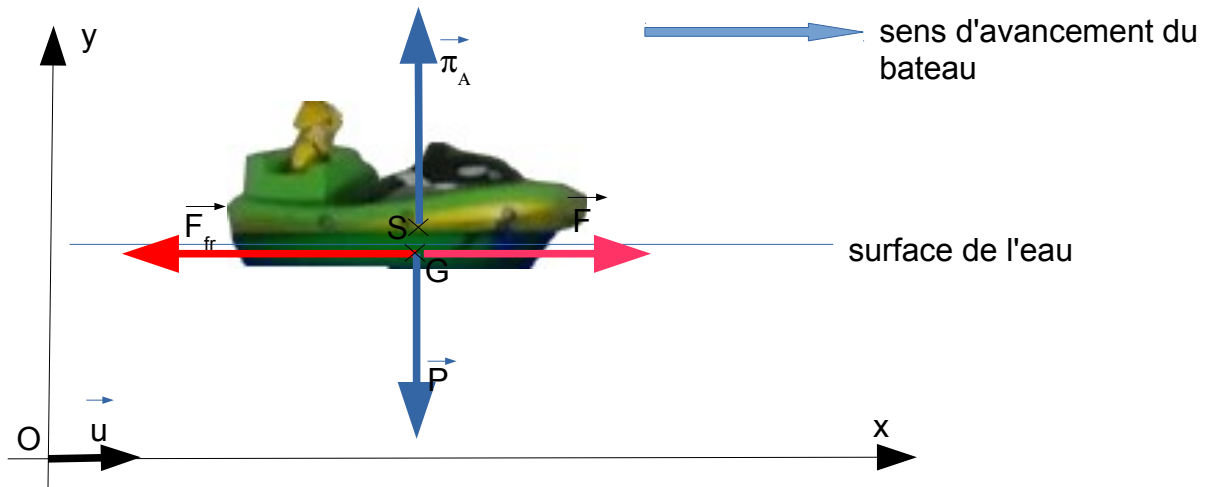
Analyse des forces agissantes sur le bateau :

poids du bateau, \vec{P}

poussée d'Archimède $\vec{\pi}_A$

Force de traction \vec{F}

Force de frottement fluide $\vec{F}_r = -k \cdot v^2 \vec{u}$ où k est un facteur de proportionnalité qui dépend de la forme de la coque et du fluide, $\vec{v} = v \cdot \vec{u}$



La deuxième loi de Newton montre la vitesse atteint une valeur limite telle que

$$F - k \cdot v_{\text{lim}}^2 = 0, \text{ donc } v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{F}{k}}.$$

10.2. Validité de l'expression de la force de frottement

Nombre de Reynolds Re .

$Re = \rho \frac{V \cdot L}{\eta}$ où ρ est la masse volumique du fluide, V la vitesse du fluide, η sa viscosité dynamique du fluide et L la longueur caractéristique.

Vitesse du bateau : $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, la longueur caractéristique est la largeur du bateau $L = 10 \text{ cm}$.

Masse volumique de l'eau : $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Viscosité de l'eau : $\eta = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ à 20°C .

Donc $Re = 1000 \frac{0,1 \times 0,1}{10^{-3}} = 10^4 \gg 1$, la force de frottement sera donc proportionnelle au carré de la vitesse.

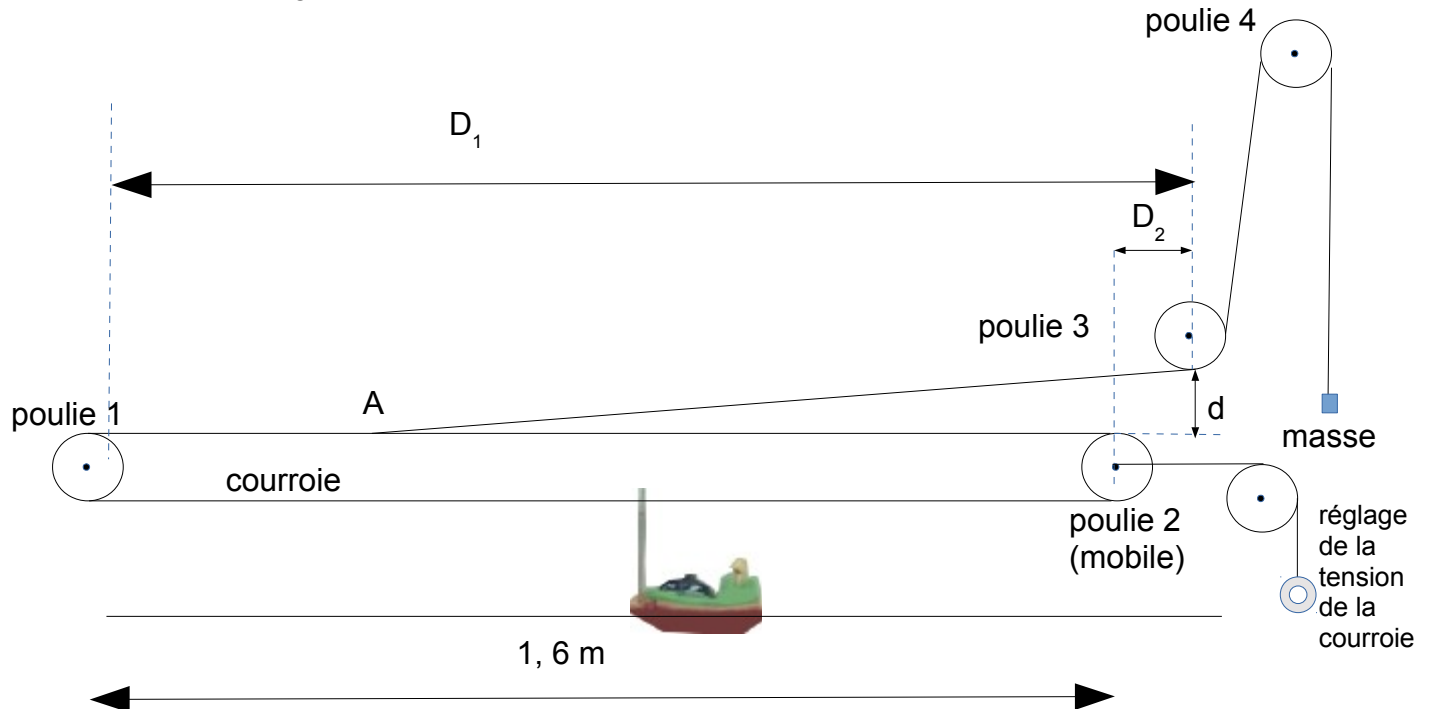
$$F_r = k \cdot v^2$$

10.3. Nécessité d'une force de traction constante

Pour pouvoir comparer le mouvement du bateau et de l'onde créée à l'interface des deux eaux dans différents cas, il faut que le bateau soit soumis à une force de traction bien déterminée et constante au cours du mouvement.

10.4. Réalisation du dispositif de traction constante

Nous avons repris le dispositif présenté dans la thèse de M Mercier
Il est représenté sur la figure ci-dessous :



$$D_2 = 0,23 \text{ cm}$$

$$D_1 = 1,80 \text{ m}$$

$$d = 7,7 \text{ cm}$$

Les poulies possèdent des roulements à billes.

10.5. La tension de la courroie

La courroie doit être tendue mais très peu pour éviter de trop grands frottements sur les roulements à billes des poulies, juste pour éviter que les portions situées entre les deux poulies ne soient pas courbées par la pesanteur et aient une forme de « chaînette ». La tension de la courroie est ajustée à une valeur proche de 14 mN à l'aide d'une masse suspendue qui tire sur l'axe de la poulie n°2.

10.6. La force de traction

La force de traction est égale au poids de la masse suspendue : $P = m \cdot g$ avec $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Les masses suspendues sont très petites, constituées par des petites rondelles en acier de masse $m = 0,250 \text{ g}$.

On peut régler la force de traction entre 4 mN et 12 mN.

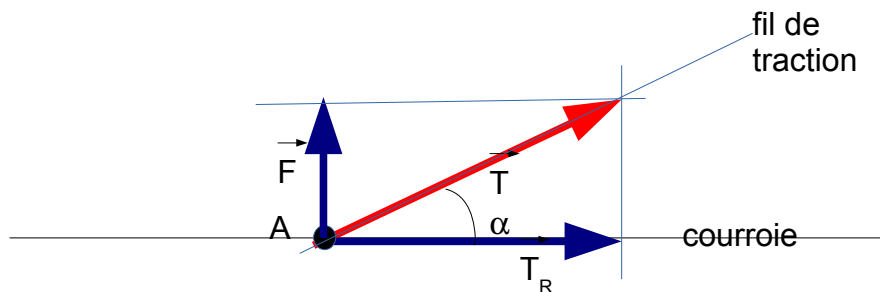
Il faut tenir compte aussi de la masse du fil de traction qui a une masse de 0,019 g pour 1 m.

10.7. La force de traction est-elle réellement constante ?

Soit A le point d'attache du fil sur la courroie.

La tension du fil \vec{T} se décompose en deux forces :

- la force de traction \vec{T}_R qui tire longitudinalement sur la courroie
- la force \vec{F} verticale qui tire sur la courroie vers le haut.



L'angle α varie au cours du mouvement du bateau, donc la force tractrice T_R n'est pas constante, mais varie peu car l'angle α reste petit.

La courroie ne peut pas rester rectiligne en A, elle forcément déformée vers le haut.

La longueur du fil suspendu passe de 0 à 1,60 m donc sa masse passe de 0 à 0,03 g.

Donc la force de traction n'est pas rigoureusement constante. Par contre d'un essai à l'autre ses caractéristiques sont reproductibles et permettent de comparer les divers mouvements.

10.8. Choix du fil constituant la courroie et le fil de traction

Le choix initial d'un fil nylon trop élastique s'avérant peu judicieux, nous avons utilisé un fil de pêche tressé. Nous avons mesuré les raideurs des deux types de fil et nous avons obtenu une raideur $k = 1000 \text{ N/m}$ pour le fil tressé et $k' = 70 \text{ N/m}$ pour le fil nylon.

Le fil tressé est beaucoup plus rigide que le fil nylon.

10.9. Système d'attache du fil tracteur à la courroie.

L'utilisation d'un émerillon de pêche permet au fil tracteur de pas être entraîné par le mouvement de vrillage de la courroie sur elle même.

11. Choix du bateau

Bateau Playmobil avec un pêcheur et un orque amovibles (M Mercier)

Une tige en acier peinte en noir mat, verticale, fixée sur l'avant du bateau permet d'attacher le bateau à la courroie.

Coque : Longueur \times hauteur \times largeur = $20,0 \times 5,0 \times 10,0 \text{ cm}^3$

Masse à vide avec sa tige 157 g

Masse avec le pêcheur 174 g

Masse avec l'orque + pêcheur : 240 g

On a rajouté deux petites cales sur chaque bord du bateau pour éviter que le bateau ne frotte trop les parois.

12. Le lancement du bateau : utilisation d'un électroaimant

Un petit électroaimant permet de lâcher le bateau sans mouvement parasite. Il est alimenté avec une pile de 9 V et attire la tige de bateau en acier.

13. Prise de vue

13.1. Choix du système de prise de vue et réglages.

Webcam HD de 1280×720 pixels.

Logiciel « VirtualDub » pour réaliser la capture des séquences.

Nombre d'images par seconde fixé à 5 image/s et on désactive tous les réglages automatiques tels que ajout automatique d'image, suppression des images identiques, synchronisation avec le son, etc.,.

13.2. Éclairage

Le relevé automatique de la position du bateau avec le logiciel d'analyse d'image (ImageJ), nécessite un éclairage uniforme sur tout le trajet du bateau. On utilise :

- Un spot LED de 20 W est placé à 1 m de la cuve, à une hauteur légèrement en dessous du fond de la cuve et orienté vers le haut en direction du centre du bassin .

- deux rampes DEL placée à 1 m de la cuve, à la même hauteur que le spot, qui éclaire les deux parties droite et gauche du bassin

13.3. Réalisation de la prise de vue

On place le bateau au départ en maintenant sa tige verticale à l'aide de l'électroaimant.
On lance d'abord l'enregistrement puis on coupe l'alimentation de l'électroaimant, le bateau démarre.
On arrête l'enregistrement 1 min après l'arrêt du bateau afin d'enregistrer l'onde d'interface.

14. L'exploitation des vidéos

14.1. Le repérage automatique des positions du bateau

Utilisation du logiciel ImageJ(FiJi).

Ouverture du fichier vidéo,

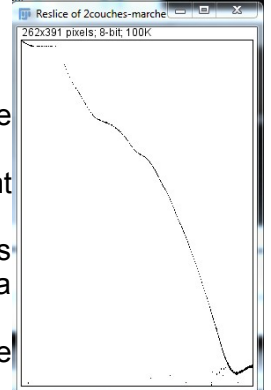
Séparation des trois canaux rouge, vert, bleu.

Sur un canal, augmentation du contraste afin que la tige du bateau apparaisse noire sur fond blanc.

Avec l'outil « reslice » on obtient une image donnant en ordonnée les positions d'un point du mat du bateau et en abscisse le temps.

Sur cette image avec l'outil « threshold » on obtient une image bicolore dans laquelle les positions du bateau apparaissent très nettement noires sur fond blanc comme sur la figure ci-contre.

Finalement avec l'outil « analyze particles » on obtient les coordonnées de chaque position du bateau ($x_{\text{pixels}}, y_{\text{pixels}}$) exprimées en pixels dans un tableau de format csv.



14.2. Tracé de la vitesse du bateau en fonction du temps

Le fichier « mesures.csv » est ensuite ouvert avec Regressi.

On obtient un tableau à deux colonnes : colonne correspondant à x_{pixels} et une colonne correspondant à y_{pixels} .
L'image « Reslice » a pour dimension horizontale en pixels le nombre d'images de la vidéo, chaque pixel étant séparée du suivant par $1/5^{\text{ème}}$ de seconde (5 images par seconde).

La dimension verticale de l'image en pixels correspond à la largeur du bassin..

L'échelle des distances est déterminée à l'aide de l'outil « set scale » d'ImageJ, elle dépend de la position de la webcam, elle est en générale égale à $\text{echellepx} = 1200$ pixels pour 2m si le champ de prise de vue correspond à la largeur de la cuve d'expérience. On la vérifie pour chaque vidéo.

Dans regressi on réalise les opérations suivantes.

Les dates sont obtenues par la relation $t = \frac{x_{\text{pixels}}}{5}$

On calcule les positions x du bateau avec la simple règle de proportionnalité $x = Y_{\text{pixel}} \frac{2}{\text{echellepx}}$

La vitesse est déterminée en créant une nouvelle variable dérivée $\frac{dx}{dt}$ et l'accélération avec $a = \frac{dv}{dt}$

L'image est légèrement déformée sur les bords du fait de l'objectif de la webcam.. Nous avons pu évaluer que la précision sur les valeurs des positions est de 3 % environ.

15. Résultats d'une expérience

15.1. Essai avec une seule couche d'eau douce

a) Conditions de l'expérience

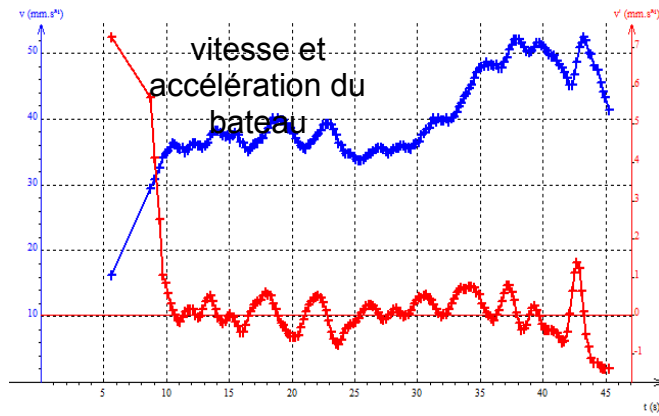
Bateau complet, donc de masse 240 g, température 20°C

Masse volumique de l'eau : $\rho_1 = 1,000 \text{ g.cm}^{-3}$

Hauteur d'eau $h = 12 \text{ cm}$

Masse suspendue : 0,62 g donc force de traction $F = 6,2 \text{ mN}$ environ

b) Courbes obtenues



Des frottements sur les axes des poulies, pour l'essai présenté ici, expliquent les irrégularités observées. La courbe rouge représente l'accélération du bateau, elle tend bien vers une valeur très faible, preuve que la vitesse tend vers une valeur limite « constante ».

La vitesse limite v_{lim} peut donner une valeur du coefficient de frottement k . On prend pour $V_{lim} = 50 \text{ mm.s}^{-1}$

$$V_{lim} = \sqrt{\frac{F}{k}} \text{ donc } k = \frac{F^2}{V_{lim}^2} = \frac{(6,2 \cdot 10^{-3})^2}{5,0 \cdot 10^{-2}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ N.m}^{-2} \cdot \text{s}^2 \text{ que l'on peut arrondir à l'ordre de grandeur } 10^{-3}$$

$\text{N.m}^{-2} \cdot \text{s}^2$ compte-tenu de la mauvaise détermination de la vitesse limite.

15.2. Essai avec les deux couches.

a) Conditions de l'expérience

Bateau complet, donc de masse 240 g, température 20°C

Masse volumique de la couche supérieure : $\rho_1 = 1,010 \text{ g.cm}^{-3}$

Masse volumique de la couche inférieure $\rho_2 = 1,020 \text{ g.cm}^{-3}$

Hauteur d'eau supérieure $h_1 = 4 \text{ cm}$

Hauteur d'eau inférieure $h_2 = 7 \text{ cm}$

Masse suspendue : 0,62 g donc force de traction $F = 6,2 \text{ mN}$ environ

Sur le canal « green » :

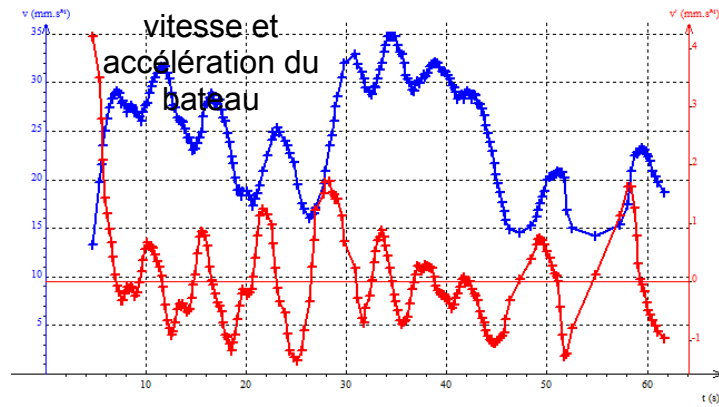


On observe l'onde d'interface alors que la surface de l'eau est presque immobile.

Cette vidéo est disponible sur dailymotion : http://www.dailymotion.com/video/x3kwmzt_phenomene-des-eaux-mortes-au-lycee-rosa-parks-de-neuville-sur-saone_tech

b) Etude de la vitesse du bateau

La vitesse en fonction du temps donne le graphes ci-dessous :



On constate que le bateau est soumis à une action ayant un caractère oscillant.

Ekman donne la célérité de l'onde d'interface :
$$c = \sqrt{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}}$$

Avec les valeurs de l'expérience $c = 7,6 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$

La vitesse limite du bateau dans le système à une seule couche de 50 mm/s est inférieure à la célérité de l'onde. C'est pour cela que la vitesse du bateau oscille.

c) Étude de l'onde d'interface

I. Étude qualitative

On a réalisé plusieurs diagrammes spatio-temporels en dessinant des lignes à différentes hauteurs sur toute la largeur du bassin :

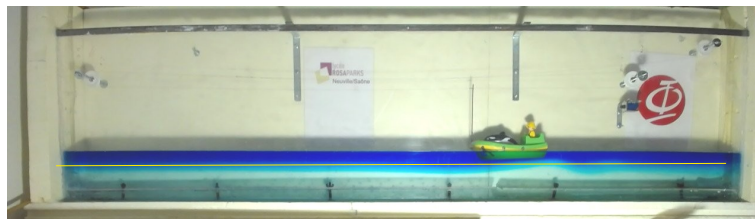


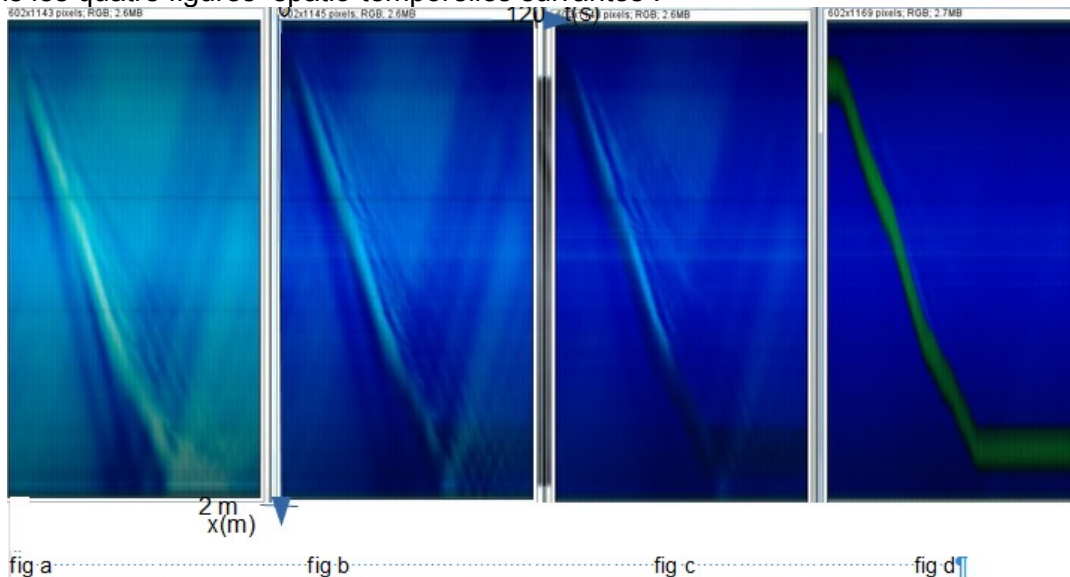
fig a : une ligne au niveau de la position d'équilibre de l'interface

fig b : une ligne dans l'onde elle même,

fig c : une ligne juste en dessous du bateau,

fig d : une ligne qui affleure la coque du bateau qui donne la trace jaune.

Nous obtenons les quatre figures spatio-temporelles suivantes :



Sur les figures ci-dessus , :

- 602 pixels de large correspondent à 120 s
- 1143 pixels de haut correspond à 2 m.

La vitesse de l'onde n'est pas constante , l'onde est couplée avec le bateau. .

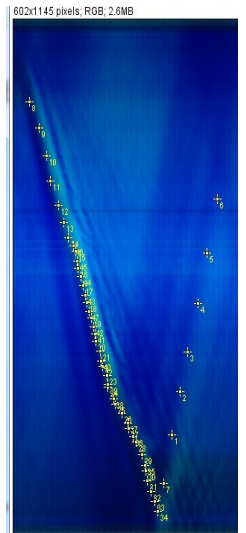
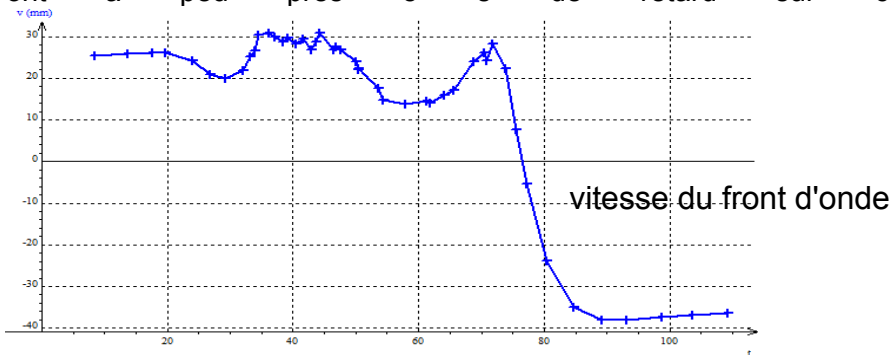
II. Détermination de la vitesse de l'onde d'interface.

On utilise l'une des figures spatio-temporelles en repérant manuellement le front de l'onde avec l'outil

« multipoints » d'ImageJ.

Nous obtenons une image comme indiquée ci-contre.

La vitesse du front d'onde suit donc la coque du bateau. On peut constater un décalage temporelle entre les variations de la vitesse de l'onde et celles du bateau. Celles de l'onde ont à peu près 5 s de retard sur celles du bateau.



L'onde est d'abord créée par le mouvement du bateau, elle le rattrape, le fait ralentir ce qui la fait ralentir ensuite.

La vitesse de l'onde non couplée est ici de 38 mm/s est la vitesse de groupe qui, pour les ondes de gravité, est égale à la moitié de la vitesse de phase donnée par la formule d'Ekman de 76 mm/s

On peut donc conclure que le phénomène des eaux mortes correspond à un couplage, un échange d'énergie périodique entre l'onde d'interface et le bateau.

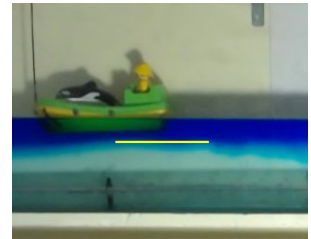
d) Fréquence des oscillations du mouvement du bateau

La fréquence des oscillations du bateau est donnée par :

$$f_b = \frac{c_g}{\lambda_g}$$

où c_g est la vitesse de groupe de l'onde et λ_g la longueur d'onde caractéristique de l'onde, correspondant à la distance entre les deux premiers maxima.

Les deux premiers maxima sont distants de 20 cm comme le montre une photo ci contre, extraite de la vidéo. La vitesse de groupe est de 3,0 cm/s en moyenne.



Donc $f_b = \frac{3,0}{20} = 0,15$ Hz soit une période de 7s valeur voisine de la période observée qui est de 8 s.

15.3. Cas où la vitesse limite du bateau est supérieure à celle des ondes.

On augmente la force de traction. Pour une force supérieure 8,5 mN, le caractère oscillant du mouvement du bateau disparaît, le bateau finit par échapper de l'onde interfaciale pour atteindre sa vitesse limite obtenue dans un système à une seule couche.

15.4. Bilan de cette étude

En annexe, se trouvent les résultats d'une expérience montrant l'évolution du type de mouvement du bateau en fonction de la force tractrice.

Nous retrouvons le résultat développé par M Mercie qui considère le Nombre de Froude : $F_r = \frac{U}{c}$ où U est

la vitesse limite du bateau sans l'onde d'interface, et c la vitesse de l'onde d'interface.

Si $F_r < 1$ alors la vitesse du bateau est oscillante.

Si $F_r > 1$ alors la vitesse du bateau s'accroît au cours du temps jusqu'à l'obtention d'une vitesse limite constante.

16. Influence de la surface immergée du bateau

On a constaté que l'amplitude de l'onde est la plus grande lorsque la hauteur immergée du bateau est égale à la moitié de l'épaisseur de la couche d'eau douce.

17. Influence de la longueur du bateau

Nous avons utilisé un autre bateau de longueur $L = 30$ cm et un autre de longueur 10 cm.

On constate que la longueur d'onde de l'onde prend alors une valeur de 30 cm pour l'un et 10 cm pour l'autre environ.

Il semblerait que la longueur d'onde soit d'autant plus importante que le bateau a une taille importante

18. Expérience utilisant deux couches d'eau de températures différentes

18.1. Réalisation de l'expérience.

Couche d'eau chaude : 5 cm

Température de l'eau chaude : 31°C donc densité $d = 0,9956$

Couche d'eau froide : 10 cm : 15°C donc densité $d = 0,9990$

Différence de masse volumique $\Delta\rho = 0,0028 \text{ g.cm}^{-3}$

La vitesse des ondes est $c = \sqrt{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2}} = 9.10^{-2} \text{ m.s}^{-2}$.

Masse du bateau : 174 g (bateau + pêcheur)

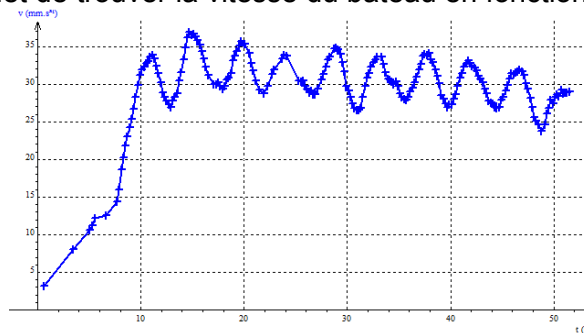
Force tractrice $F = 7,5 \text{ mN}$.

Observation:



18.2. Résultats de l'expérience.

L'analyse de la vidéo nous permet de trouver la vitesse du bateau en fonction du temps ci-dessous :



On retrouve les oscillations observées lors de l'étude utilisant une stratification en concentration saline.

Il est donc bien possible que ce phénomène soit responsable de noyades dans les lacs surchauffés en surface et restant froids à quelques mètres en profondeur.

19. Conclusion

Nous avons pu étudier le phénomène des eaux mortes que nous ne connaissions pas avant. Nous avons reproduit des travaux d'universitaires et sommes satisfaits d'avoir pu retrouver leurs résultats avec nos moyens de lycéens. Le phénomène des « eaux mortes » aura peut-être une plus grande incidence pour la navigation près des pôles dans le futur, puisque le réchauffement climatique va provoquer la fusion d'une grande partie de la banquise et générer une couche d'eau douce probablement très importante. Notre étude montre que cela peut perturber le mouvement des bateaux puisque la taille de l'onde augmente avec la taille du bateau.

20. Annexe

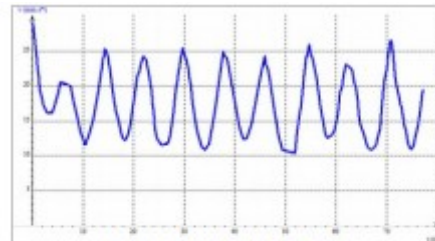
Evolution du mouvement du bateau en fonction de la force tractrice

Conditions :

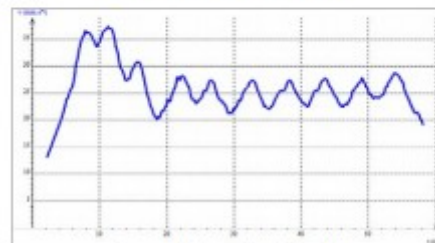
$h_1 = 7 \text{ cm}$; $h_2 = 7 \text{ cm}$; masse du bateau 240 g

$\rho_1 = 1010 \text{ kg.m}^{-3}$ $\rho_2 = 1026 \text{ kg.m}^{-3}$

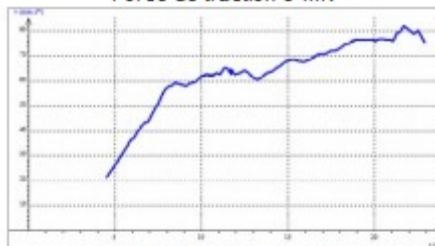
Vitesse du bateau



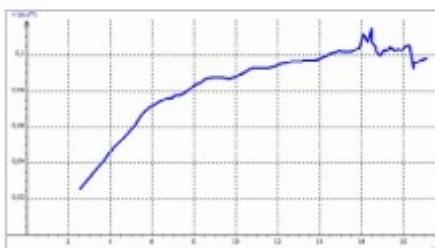
Force de traction 5 mN



Force de traction 6 mN



Force de traction 8 mN



Force de de traction 10 mN

21. Bibliographie

<http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Phenomene-eaux-mortes.xml>

<http://acces.ens-lyon.fr/acces/terre/paleo/systemclim/gulf-stream/images-gulf-stream/images-dossier-scientifique/relationstdensite/view>

<http://www.seafriends.org.nz/oceano/waves2.htm>

<http://www.univ-brest.fr/lpo/instrumentation/09.htm>

<http://lecalve.univ-tln.fr/oceano/fiches/fiche3C.htm>