

La Physique du Longe-Côte



Benoît DEPRET
Professeur de Physique en PC*
Classes préparatoires scientifiques
Lycée Jean Bart de Dunkerque
www.prepajeanbart.fr

Le longe-côte est devenu depuis quelques années une discipline sportive très prisée par tous les amoureux de la nature et des sports nautiques et permet à tous de profiter d'une activité de plein air adaptée en fonction de son niveau. Le principe reste le déplacement en groupe à pied dans une eau peu profonde – typiquement jusqu'au plexus – le long de la plage. Le littoral de la mer du Nord est en cela particulièrement adapté à cette discipline, avec ses grandes étendues de plage et son faible dénivelé – le longe-côte est d'ailleurs apparu à Dunkerque – mais nécessite en contrepartie l'utilisation d'une combinaison !



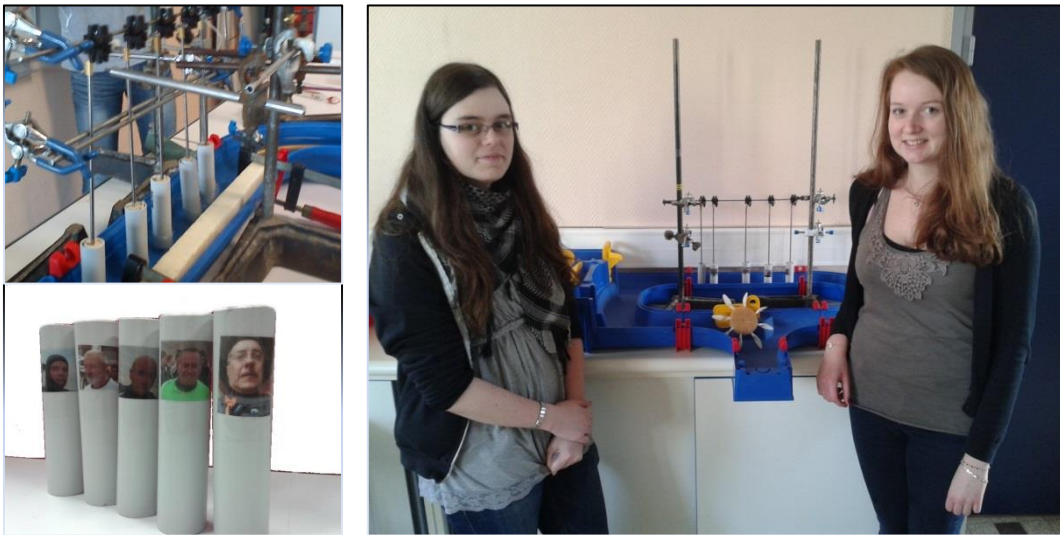
*Longe-côte le long de la plage de Dunkerque : le déplacement des marcheurs s'effectue en ligne.
(photo : Opale Longe-Côte – droits réservés)*

D'un point de vue physique, le déplacement de tout objet dans l'eau va engendrer une dissipation d'énergie à cause des forces de frottement dues à la viscosité du milieu, ce qui explique qu'il est si difficile d'avancer dans l'eau (les forces de frottement existent aussi dans l'air mais celles-ci ont peu d'importance pour un marcheur). La caractéristique principale du longe-côte est donc la configuration particulière prise par les participants qui avancent « en ligne » : l'expérience montre en effet qu'il est plus facile ainsi d'avancer quand on est situé à l'intérieur de la « longe ». Ce phénomène n'est pas nouveau puisque, depuis toujours, les oiseaux migrateurs se déplacent en formant un V et les cyclistes – ou les camions sur l'autoroute ! – se déplacent en ligne ou en peloton. En revanche, tout pratiquant du longe-côte sait aussi que le premier de la ligne est celui qui doit fournir le plus d'effort pour avancer, c'est pourquoi on opère généralement un roulement dans la longe, chacun jouant tour à tour le rôle du premier.

La distance entre deux marcheurs dans une longe est un paramètre crucial du problème et va imposer la puissance totale dissipée par les frottements, c'est à dire l'effort moyen que

chacun devra fournir pour avancer. Celle-ci est souvent adaptée sur le terrain « par expérience ». L'objectif du présent travail est de caractériser précisément le rôle de cette distance dans la nature de l'écoulement afin d'optimiser les paramètres de la longe : existe-t-il une distance optimale entre deux marcheurs qui minimiserait la puissance totale dissipée ?

Des étudiants des classes préparatoires scientifiques PC* et PSI du Lycée Jean Bart de Dunkerque¹ se sont penchés sur la question et ont cherché à modéliser le problème en laboratoire. En tant que futurs ingénieurs et forts de leur cours de Physique – en particulier en Mécanique des Fluides, mais aussi en Mécanique, en Optique et en Electronique – ils ont réalisé une maquette reproduisant les conditions d'un écoulement d'eau autour de différents obstacles cylindriques jouant le rôle des marcheurs. Afin d'étudier l'écoulement dans le référentiel lié aux marcheurs, les obstacles sont en fait ici immobiles tandis que l'on impose l'écoulement d'eau autour d'eux.



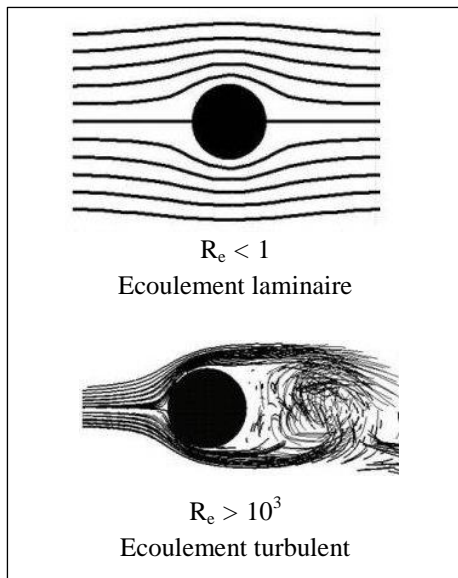
Montage expérimental en situation : les cylindres – représentant les sportifs de l'association Opale Longe-Côte – sont placés dans un écoulement d'eau en circuit fermé ; la vitesse d'écoulement est imposée par une pompe ; un dynamomètre permet de mesurer la force de traînée exercée sur chaque cylindre.

(photos : prépa Jean Bart – droits réservés)

Des mesures effectuées pendant une sortie longe-côte à la plage, en partenariat avec l'association Opale Longe-côte de Dunkerque², ont permis d'évaluer la vitesse moyenne des marcheurs : les sportifs parcourent environ 1,5 km en 30 minutes, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 3 km/h, soit encore 0,8 m/s. La dynamique des fluides permet alors de caractériser le régime d'écoulement de l'eau autour des marcheurs : avec un nombre de Reynolds R_e de l'ordre de $3 \cdot 10^5$ (voir encadré), le régime d'écoulement est turbulent. Pour reproduire ce régime d'écoulement en laboratoire avec des cylindres de diamètre 25 mm, la vitesse de l'écoulement peut donc être de l'ordre de 1 m/s.

¹ Classes préparatoires scientifiques du Lycée Jean Bart de Dunkerque : <http://www.prepajejbart.fr>

² Association Opale Longe-Côte à Dunkerque : <http://www.opalelongecote.fr/>



Ecoulements autour d'un cylindre

Le **nombre de Reynolds** est défini pour un écoulement de masse volumique ρ , de viscosité η , de vitesse V autour d'un obstacle de largeur L par la relation :

$$R_e = \frac{\rho V L}{\eta}$$

Sa valeur permet de caractériser le régime d'écoulement en aval de l'obstacle :

Pour $R_e < 1$: l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire régulier et peu perturbé ;

Pour $R_e > 10^3$: l'écoulement est turbulent, c'est-à-dire très agité dans l'espace et le temps.

Pour l'eau : $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ et $\eta = 10^{-3} \text{ Pl}$.

Un long-coteur de largeur caractéristique $L = 40 \text{ cm}$ se déplaçant à $V = 0,8 \text{ m/s}$ impose ainsi $R_e = 3.10^5$. L'écoulement est turbulent.

La vitesse de l'écoulement d'eau a pu être mesurée en temps réel sur la maquette grâce à un faisceau laser passant à travers une roue à aubes entraînée par le fluide et éclairant une photodiode. Le signal électrique ainsi obtenu à l'oscilloscope numérique à la sortie d'un circuit de conversion électronique reproduit le clignotement du faisceau dont la fréquence est directement liée à la vitesse de l'écoulement. Le débit de la pompe de circulation et la largeur de la maquette ont ainsi pu être adaptés pour obtenir une vitesse d'écoulement de $0,45 \text{ m/s}$ (correspondant au nombre de Reynolds $R_e = 10^4$, donc à un écoulement turbulent), avec une incertitude³ de $0,03 \text{ m/s}$.

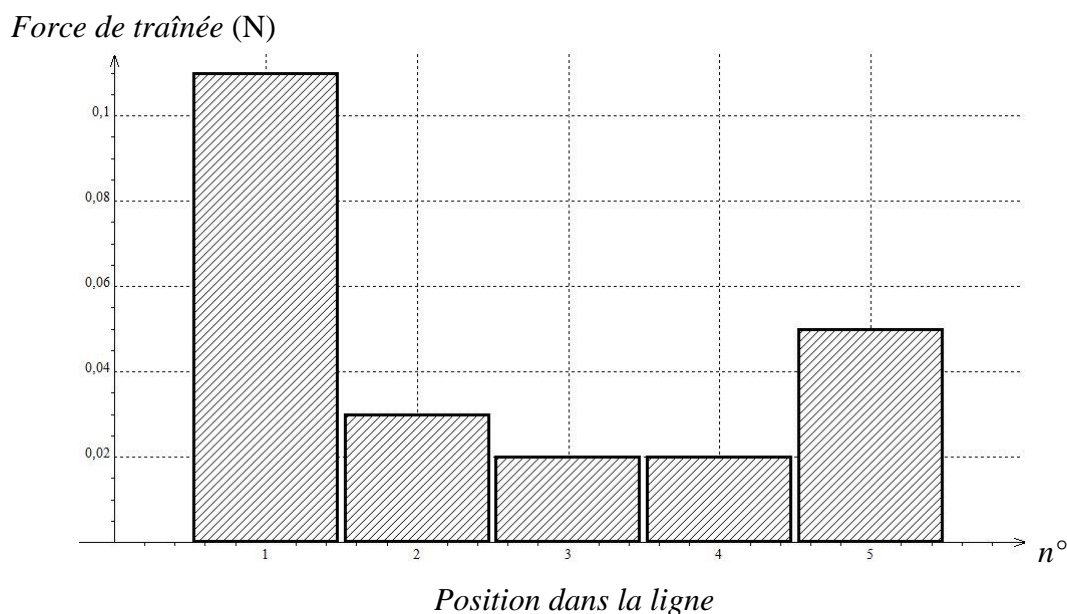
Les marcheurs sont ici remplacés par des cylindres verticaux de diamètre 25 mm , mobiles autour d'un axe, et immergés dans l'écoulement sur une hauteur de 40 mm . La force de frottement – appelée aussi force de traînée – qui s'exerce sur chaque cylindre tend ainsi à les entraîner dans l'écoulement. Un dynamomètre les maintient en fait verticalement en compensant la force de frottement tout en fournissant une mesure quantitative de cette force.

La première expérience consiste à mesurer directement la force de traînée exercée par l'écoulement sur un cylindre *isolé*, modélisant un marcheur seul dans l'eau. Plusieurs mesures effectuées avec le dynamomètre ont permis d'obtenir une force de traînée de $0,21 \text{ N}$, avec une incertitude de $0,05 \text{ N}$. La dynamique des fluides fournit en outre l'expression de la force de traînée exercée sur un obstacle dans un écoulement turbulent : $F = \frac{1}{2} \rho C S V^2$, où ρ est la masse volumique de l'eau (1 kg/L ou encore 10^3 kg.m^{-3}), S est la surface frontale de

³ L'incertitude correspond à l'erreur expérimentale commise lors de la mesure. Toute mesure physique doit être accompagnée d'une incertitude, rendant ainsi compte de la précision des appareils, de la validité de la méthode et... du talent de l'expérimentateur.

l'obstacle vue par l'écoulement (soit ici le produit du diamètre du cylindre par la hauteur immergée) et V la vitesse de l'écoulement. Le coefficient sans dimension C , appelé coefficient de traînée, vise à rendre compte de la forme aérodynamique (ou plutôt ici hydrodynamique) de l'obstacle utilisé. Pour un cylindre, $C = 2$. Numériquement la force de traînée obtenue avec cette relation vaut 0,20 N, ce qui correspond bien, aux incertitudes de mesures près, à la valeur obtenue expérimentalement, validant ainsi le modèle utilisé.

On place alors plusieurs cylindres régulièrement répartis dans l'écoulement afin de modéliser le comportement d'une ligne de marcheurs. Avec la même méthode que celle utilisée pour un cylindre seul, on mesure la force de traînée exercée sur chacun des cylindres en fonction de leur position dans la longe. Les résultats obtenus pour une ligne de 5 cylindres espacés de 40 mm sont reportés sur le graphe ci-dessous.



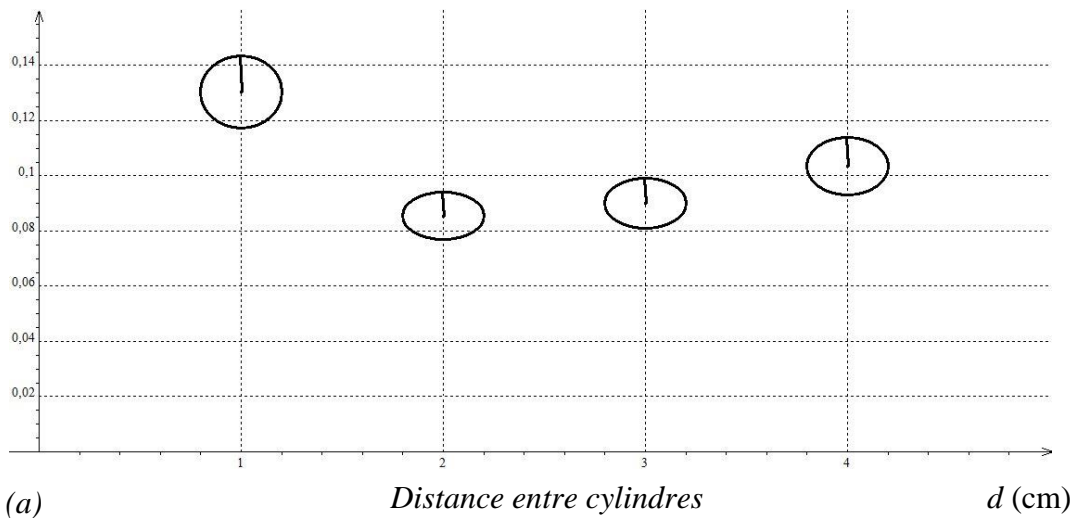
*Force de traînée exercée sur chacun des 5 cylindres de la longe, espacés de 40 mm.
Le premier de la file est le n°1, le dernier est le n°5.*

Les résultats expérimentaux montrent, comme on pouvait s'y attendre, que la force de traînée est plus faible sur les cylindres situés à l'intérieur la ligne, tandis qu'elle est la plus importante pour le premier cylindre : le premier marcheur est bien celui qui doit fournir le plus d'efforts pour compenser les frottements et avancer. Dans cette configuration, on constate même numériquement que la force de traînée exercée sur les cylindres du milieu est 5 fois plus faible que celle exercée sur le premier de la file, et pratiquement 10 fois plus faible que s'ils étaient isolés ! Il est réellement plus avantageux de se déplacer en ligne. D'autre part, le premier de la file, même s'il doit fournir les efforts les plus importants, subit quand même une force de traînée deux fois plus faible que s'il était seul, profitant lui aussi de l'effet de groupe. Enfin, on constate également que le dernier de la file n'est pas celui qui travaille le moins, puisqu'il subit en moyenne une force de traînée deux fois plus importante que pour les marcheurs au milieu de la ligne.

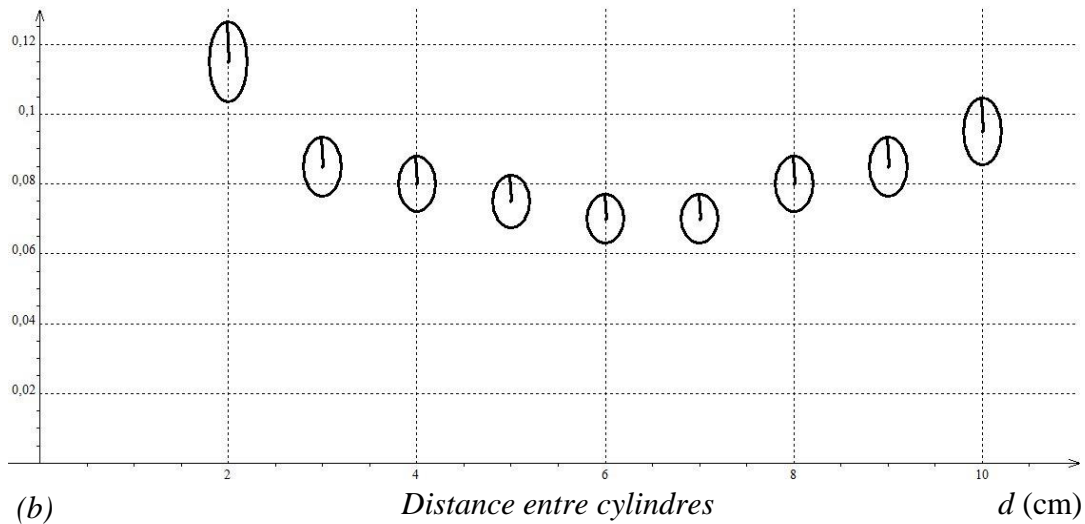
Lorsque le groupe se déplace à vitesse constante, les marcheurs doivent fournir une puissance mécanique qui compense la puissance perdue par les frottements, égale au produit de la force de traînée par la vitesse de déplacement. La puissance totale dissipée par les frottements exercés sur les 5 cylindres dans la configuration précédente vaut alors 0,10 W. A titre de comparaison, la puissance totale dissipée sur les 5 cylindres si ceux-ci étaient isolés (ou très éloignés les uns des autres) vaudrait 0,45 W.

L'objectif étant de minimiser la puissance totale dissipée par l'ensemble du groupe, on se propose d'étudier l'évolution de cette puissance en fonction de la distance séparant deux cylindres consécutifs. Les résultats sont reportés sur les graphes ci-dessous, obtenus avec 5 cylindres et 3 cylindres respectivement.

Puissance totale dissipée (W)



Puissance totale dissipée (W)



(a) Mesures avec 5 cylindres et (b) avec 3 cylindres. On a représenté les ellipses d'incertitude.

On constate sur ces graphes que la puissance totale dissipée augmente lorsque les cylindres sont trop éloignés les uns des autres, mais également lorsqu'ils sont trop proches les uns des autres : ces résultats expérimentaux font donc apparaître une distance optimale pour laquelle la puissance totale dissipée est minimale. Numériquement, la distance optimale mesurée correspond à environ 1 à 2 diamètres de cylindre. Toutes proportions gardées, cela correspondrait pour une ligne de longes-coteurs à une distance comprise entre 40 cm et 80 cm à respecter entre deux marcheurs consécutifs. La puissance dissipée par le groupe en configuration optimale de ligne est alors 5 fois plus faible que si les marcheurs étaient seuls.

Conclusion

Les résultats obtenus lors de cette étude expérimentale inédite d'une ligne de longe-côte montrent bien numériquement l'intérêt de cette configuration particulière en ligne : les marcheurs dépensent moins d'énergie à avancer en groupe que s'ils étaient chacun isolés. L'explication de ce phénomène trouve en fait son origine dans la forme de l'écoulement de l'eau autour des marcheurs : la zone turbulente à l'arrière de chaque marcheur est en fait déformée et reportée à la fin de la ligne. Chaque marcheur au sein de la ligne profite alors d'un écoulement plus calme lui permettant d'avancer sans peine, tandis que le premier et le dernier de la file dépensent plus d'énergie en subissant une force de traînée plus importante. Cette étude montre également l'existence d'une distance optimale, de l'ordre de 40 cm à 80 cm, à maintenir entre les marcheurs pour minimiser la dépense totale énergétique du groupe. Forts de ces nouvelles données physiques, les longes-coteurs pourront apprécier plus longtemps les sorties en mer en respectant une configuration optimale, sans doute déjà très proche de la configuration acquise par expérience.

Remerciements

Ce travail expérimental a été réalisé par les élèves des classes préparatoires scientifiques seconde année PC* et PSI du Lycée Jean Bart de Dunkerque – Julie, Sandra, Christopher, Yann et Hugo – encadrés par leurs professeurs de Physique B. Dépret et P. Dépret, dans le cadre de leur préparation aux concours d'entrée en Ecoles d'Ingénieurs et à l'épreuve orale de T.I.P.E.

Tous nos remerciements au personnel du laboratoire de Physique du Lycée Jean Bart pour son aide dans l'élaboration du dispositif expérimental.

Ce projet est le fruit d'un partenariat exceptionnel entre les classes préparatoires scientifiques du lycée Jean Bart et l'association Opale Longe-Côte de Dunkerque, sans laquelle tout ce travail n'aurait pu voir le jour. Nous remercions ainsi tous les membres de l'association pour leur gentillesse et leur disponibilité, et tout particulièrement son président Jean-Paul Gokelaere qui a tout de suite cru en cette approche un peu folle du longe-côte. A tous merci.