

*Codjia Paul
Lespes Arnaud
Pigassou Michel
Sidorenko Iaroslav*



**Projet présenté dans le cadre de la 12^{ième} Edition des Olympiades de Physique.
Encadré par M.Cruz et M.Genest.**

Introduction: Ces étranges figures que l'eau et le vent dessinent sur le sable

Les rides de sable que l'on observe sur les dunes et dans le fond des ruisseaux sont des phénomènes étranges que tout le monde a déjà observé.

Notre objectif est donc de visualiser et de comprendre comment se déplacent les grains de sable lors de la formation des rides.

Tout d'abord pour bien comprendre ce phénomène nous allons concevoir une expérience visant à reproduire la formation de rides en laboratoire, dans deux fluides différents : l'eau et l'air.

Après avoir réalisé ces expériences nous décrirons comment se déplace le sable sous l'action du vent, lors de la formation des rides (seules les expériences préliminaires ont été effectuées dans l'eau, nous n'avons pas encore de résultats numériques précis).

Enfin nous essaierons de trouver un modèle pour expliquer nos observations précédentes.

Par rapport à notre objectif initial, il nous reste encore à effectuer les mesures concernant les rides dans l'eau.



Photographie du Barthos
(vitesse estimée de l'eau 30cm/s)



Photographie de ride formée par le vent
(vitesse estimée à 70 km/h)

I Comment fabriquer des rides en laboratoire ?

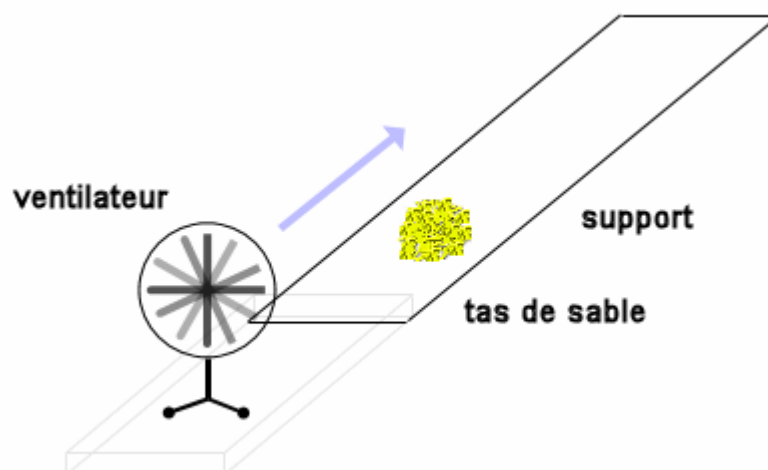
Nous cherchons à reproduire les conditions naturelles en laboratoire en essayant de minimiser les coûts de fabrication de notre maquette.

Les photos de l'introduction ont été faites dans les conditions de vents $v=70\text{km/h}$ et eau $v=0.3\text{m/s}$: ce sont ces conditions que nous chercherons à reproduire.

1 Une maquette difficile à mettre en oeuvre

Les rides que nous observons sur les dunes n'ont pas toujours le même espacement selon le vent qui souffle. La vitesse du vent est donc un paramètre que nous devons maîtriser. Notre premier objectif est donc de reproduire un vent de vitesse uniforme sur une assez grande surface de sable.

Nous avons mis en place une maquette très simple. Un ventilateur mis devant une table recouverte de 3cm de sable.

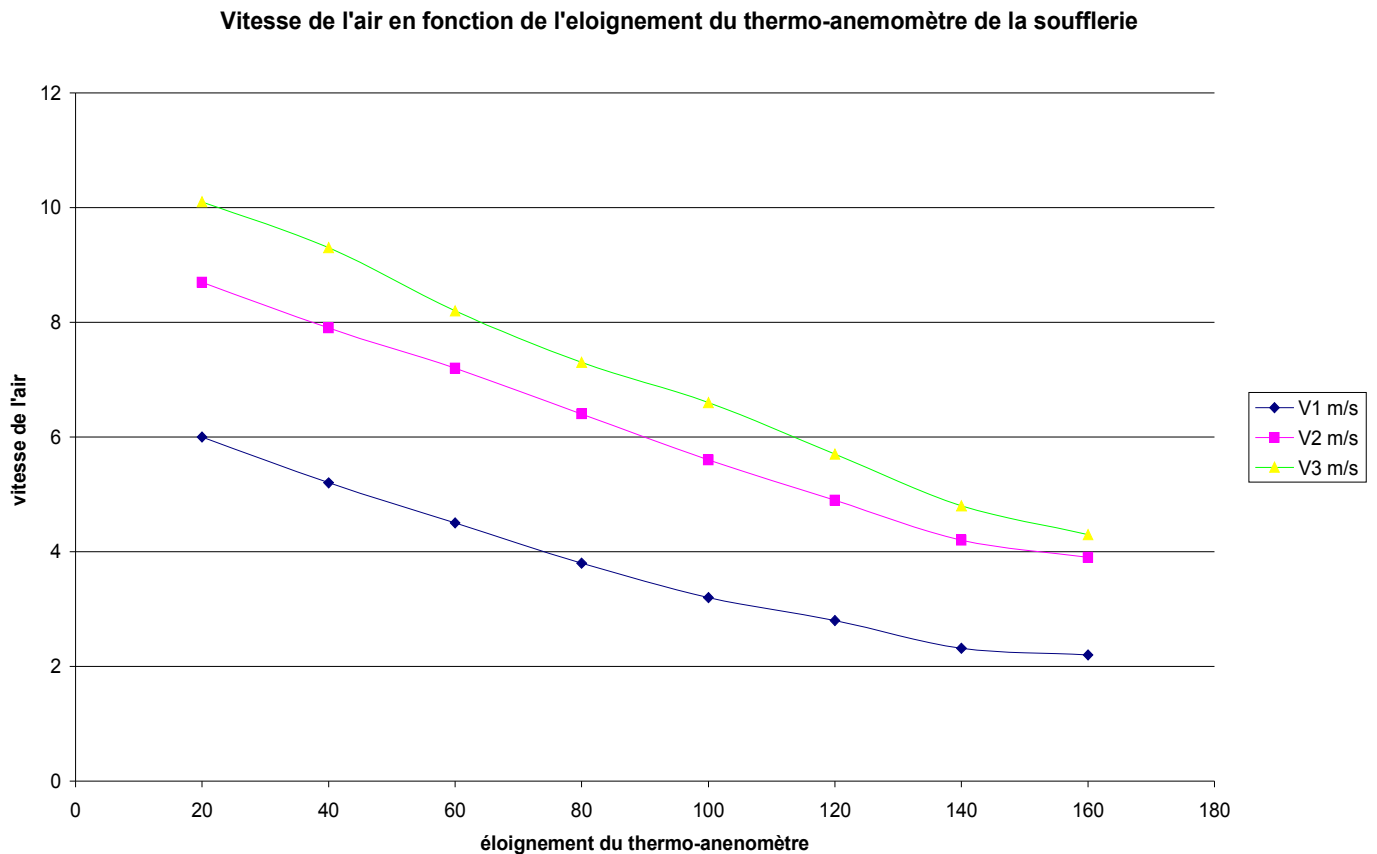


Notre expérience s'est avérée totalement inadaptée pour les mesures que nous voulions effectuer. En effet, les figures que nous obtenons à la fin de l'expérience ne sont pas reproductibles plusieurs fois ; ce n'est donc pas assez précis. Le ventilateur semble en être la cause car l'air n'est pas pulsé régulièrement à cause des pales.

Nous nous sommes alors adressés au Laboratoire d'Acoustique de l'IUT de Mesures Physiques de L'Université de Bordeaux qui nous a prêté une petite soufflerie à vitesse variable.

Avec cette soufflerie nous souhaitons obtenir une vitesse uniforme. Afin de connaître la vitesse de l'air en sortie de la soufflerie, nous mesurons celle-ci à l'aide d'un thermo-anémomètre¹ à fil chaud. Nous avons établi différents profils de vitesse de l'air en sortie de la soufflerie. Profil longitudinal (tableau des mesures annexe I) :

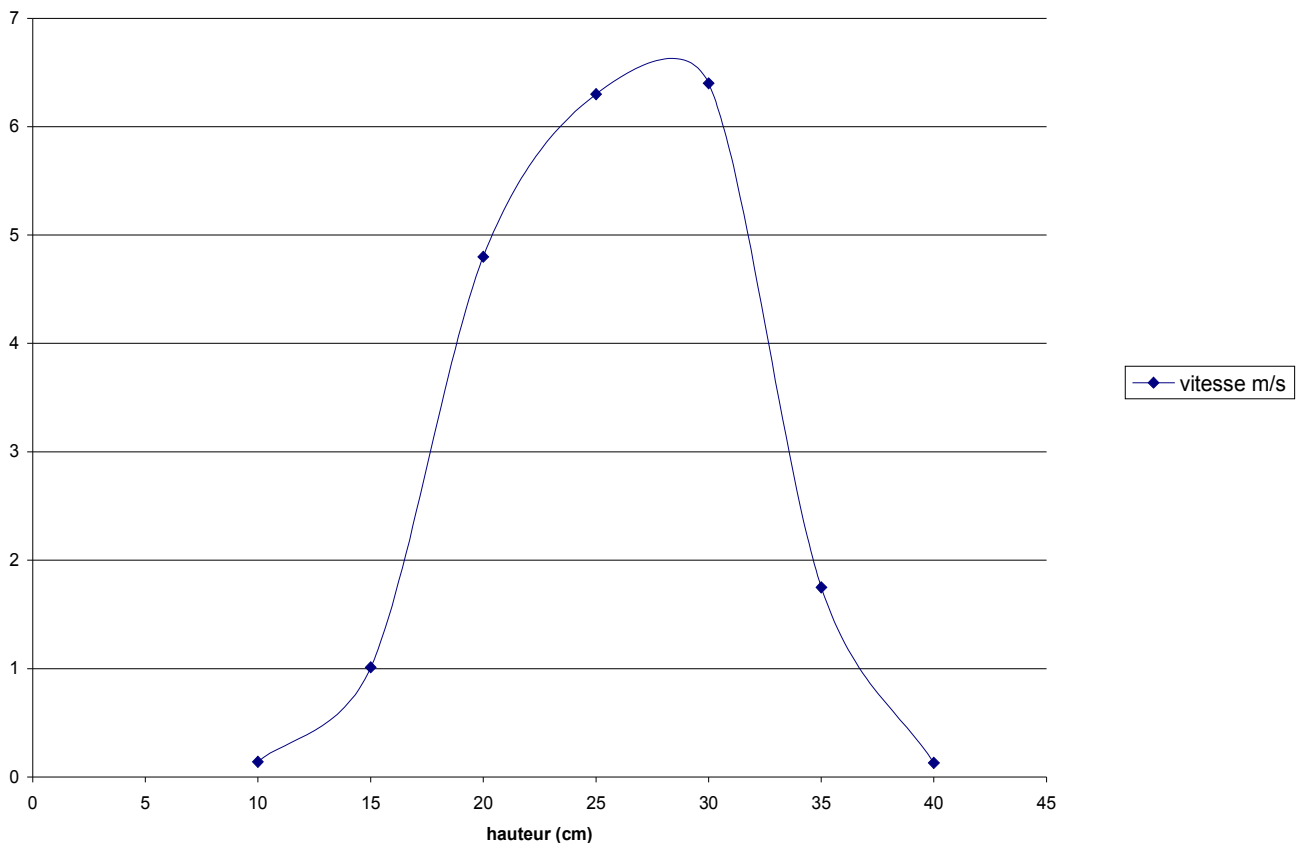
On place le thermo-anémomètre au centre du flux d'air produit par la soufflerie et on effectue une série de mesures tous les 20 cm. Les résultats sont consignés en annexe I et permettent de tracer la courbe suivante :



Profil transversal (tableau des résultats annexe II)

On réalise le profil vertical de la vitesse à 40 cm de la sortie de la soufflerie. On prend ces mesures pour un pourcentage de puissance égal à 50%. Le milieu de la soufflerie est à une hauteur de 25,5 cm par rapport au sol. Résultats annexe II.

vitesse de l'air en fonction de la hauteur du thermo-anemomètre



Conclusion

On remarque en calculant la vitesse en fonction de l'éloignement qu'au bout d'un mètre il y a une réduction de plus de 50% de la vitesse d'écoulement de l'air. La vitesse est comme on peut le voir très rapidement décroissante le long de l'axe de la soufflerie. De plus, à la sortie de la soufflerie, l'air diverge², ce qui entraîne une perte de puissance. La vitesse n'est assez uniforme ni longitudinalement ni transversalement.

De là nous est venue l'idée de canaliser l'air dans un tunnel de section rectangulaire. Nous avons établi les premiers plans d'un tunnel en bois de dimension 0,5m*0,5m*2m réalisé par le menuisier du Lycée. Malheureusement les dimensions sont trop grandes et le jet reste trop étalé : nous obtenons des rides de tailles très inégales.

Nos recherches parallèles sur la reproduction des conditions naturelles dans l'eau nous ont conduit à visiter le département de Géologie Marine de l'Université de Bordeaux I qui dispose d'un gros canal hydraulique⁴ alimenté par une pompe et munie d'une vanne permettant de faire varier la vitesse de l'eau.

Nous avons alors pensé à utiliser un canal pour l'eau, puis en couvrant celui-ci obtenir un tunnel pour l'air.

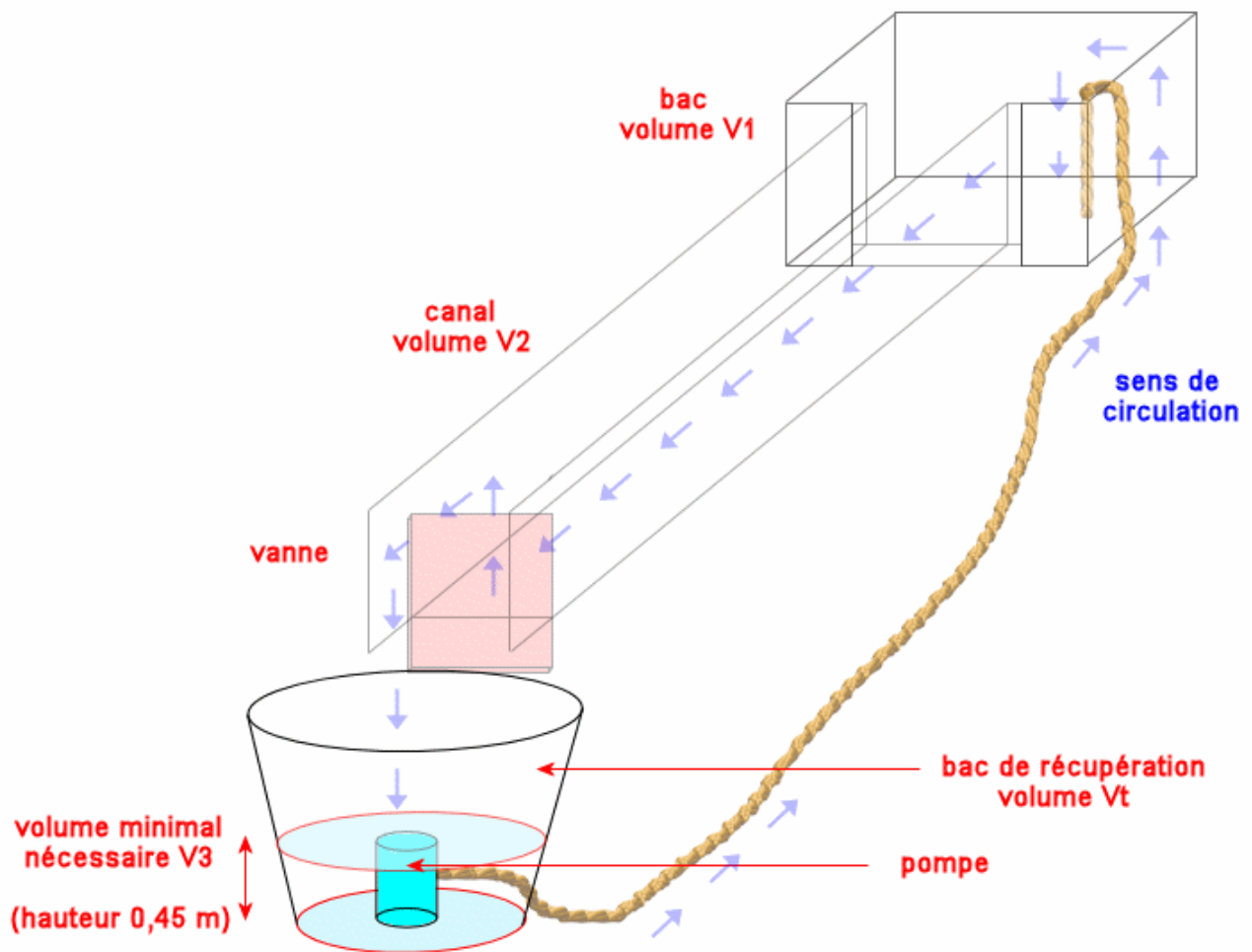
2 Le canal une solution pour étudier l'air et l'eau à la fois.

Comment choisir les dimensions du canal ?

Le plexiglas est le matériau le mieux adapté à nos expériences, ses principaux avantages étant la transparence et la solidité. Cependant ce matériau présente certaines contraintes dont la principale est le prix (100 euros hors taxe le mètre carré).

Pour l'utilisation avec la soufflerie la section ne doit pas être trop grande par rapport à la taille du convergent³ de la soufflerie.

Pour le canal hydraulique le principe est le suivant.



Pour mettre en place tout le système du canal avec un écoulement constant, nous avons besoin d'un bac pour la pompe, où s'écoulerait l'eau à la sortie du canal. Ce bac doit cependant avoir des dimensions bien précises.

En effet, à l'arrêt, toute l'eau du système va se trouver dans le bac de la pompe. Ainsi, nous avons besoin d'un bac dont le volume total soit assez important pour amorcer le système (avant l'ouverture de la vanne, il faut que le canal soit rempli d'eau) mais aussi pour laisser la pompe immergée avant que la vanne ne soit ouverte.

La pompe doit être immergée de 45 cm d'après les « données constructeur ».

On note :

V1 : volume du bac au début du canal ;

V2 : volume du canal avec la vanne fermée ;

V3 : volume requis pour que la pompe soit immergée d'une hauteur d'eau de 45 cm ;

Vt : volume total du bac de la pompe.

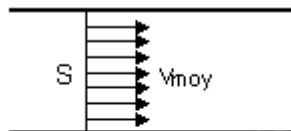
$$V1 = 38L ; \quad V2 = 68.2L ; \quad V3 = 88,4L ; \quad Vt = 150L.$$

On remarque que $V1+V2+V3$ est plus grand que Vt . Ce n'est pas grave car nous avons surestimé $V2$ et $V1$ en supposant l'eau à ras bord des contenants.

Nos calculs sont faits de façon à obtenir une vitesse de sortie de l'eau d'au moins $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ à pleine section sachant que le réglage de la vanne permettra d'accélérer ou de ralentir l'eau au niveau du fond du canal.

Dans le cas du ruisseau de la photographie en introduction, la vitesse d'écoulement de l'eau est estimé à 0.30 m.s^{-1} (chronométrage de la dérive d'un objet flottant). Nous obtenons ainsi la vitesse d'écoulement que doit avoir l'eau à l'intérieur de notre canal. Nous devons donc déduire de la vitesse théorique que nous avons calculé, le débit que doit avoir notre pompe.

On suppose que la vitesse est uniforme dans tout le canal. Par définition le débit q est proportionnel à la vitesse v et à la surface de conduite S . Si S est la section de l'eau dans le canal, h la profondeur d'eau, et l la largeur du canal :



$$v_{moy} = \frac{q_v}{S}$$

$$q_v = S.v$$

$$q_v = (h \cdot l).v$$

On sait que la largeur du canal est $l=14\text{cm}$. On souhaite une hauteur d'eau minimale de 5 cm dans le canal.

Avec l'application numérique, nous obtenons avec la formule précédente :

$$q = (5 \cdot 10^{-2} \cdot 14 \cdot 10^{-2}) \cdot 3 \cdot 10^{-1}$$

$$q = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{soit } q_v = \underline{7,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}$$

Nous avons au début de la mise en place du canal prévu d'utiliser une pompe vide cave (prêtée par le Lycée) qui a un débit de $7,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Il nous faudra probablement deux pompes de ce genre si nous souhaitons explorer les phénomènes pour des vitesses supérieures à 30 cm.s^{-1}

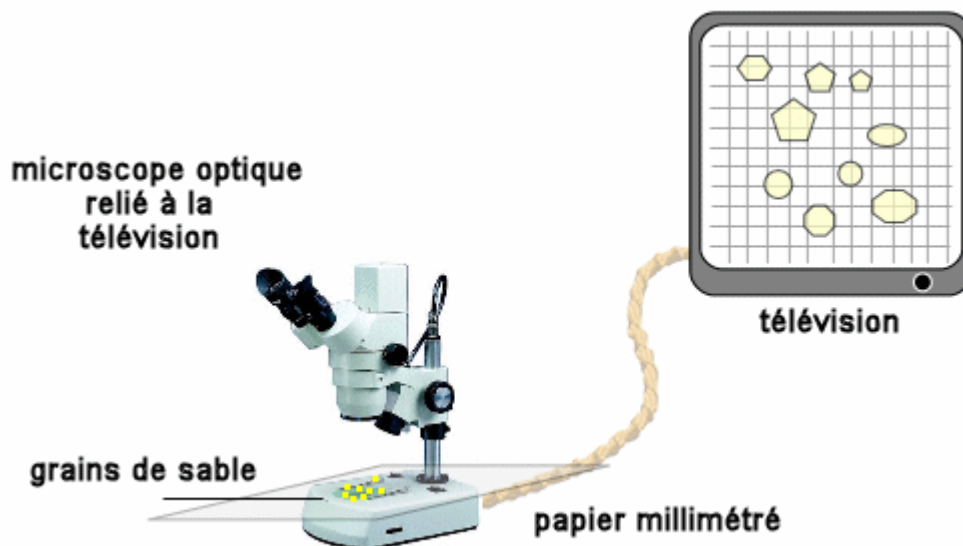
II Le transport du sable par l'air

1 Mise en évidence expérimentale des différents modes de transport du sable

Le sable utilisé

On utilise du sable provenant d'un ruisseau, préalablement rincé et filtré. Pour déterminer ses caractéristiques, nous avons dû mesurer la taille des grains de sable et effectuer une moyenne.

Pour ce faire, on dispose plusieurs grains de sable placés sur une feuille de papier millimétré qui va nous servir de repère pour la mesure. À l'aide d'une caméra, normalement employée dans les TP des Sciences de la Vie et de la Terre, montée sur un microscope et reliée à un poste de télévision, on affiche les grains de sable qui sont sur la feuille de papier millimétré. On va donc pouvoir mesurer directement avec un double-décimètre la taille du grain de sable sur la télévision, et calculer leur taille réelle. L'échelle de la mesure est de 1 mm réel pour 75 mm sur la télévision.



Le détail des mesures est présenté dans le tableau en annexe III.

Sur le graphique en annexe III on trouve que **la taille moyenne des grains de sable est de 0,89 mm** (deux chiffres significatifs en raison de la précision au millimètre du double-décimètre utilisés pour les mesures).

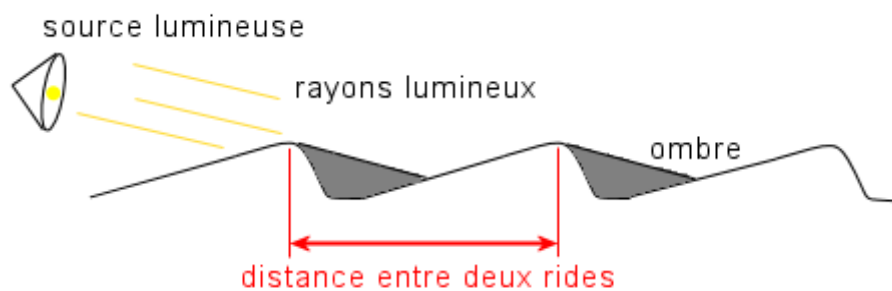
Protocole expérimental

On répartit le sable à peu près uniformément dans le canal en plaçant une grande quantité de sable à son extrémité où se trouve la soufflerie ce sable sert de réservoir au fur et à mesure que les grains sont déplacés.

Après quelques essais nous nous sommes aperçus que la vitesse est plus uniforme dans le tunnel quand le centre de la soufflerie est placée à 10 cm de l'entrée du canal à hauteur du sable.

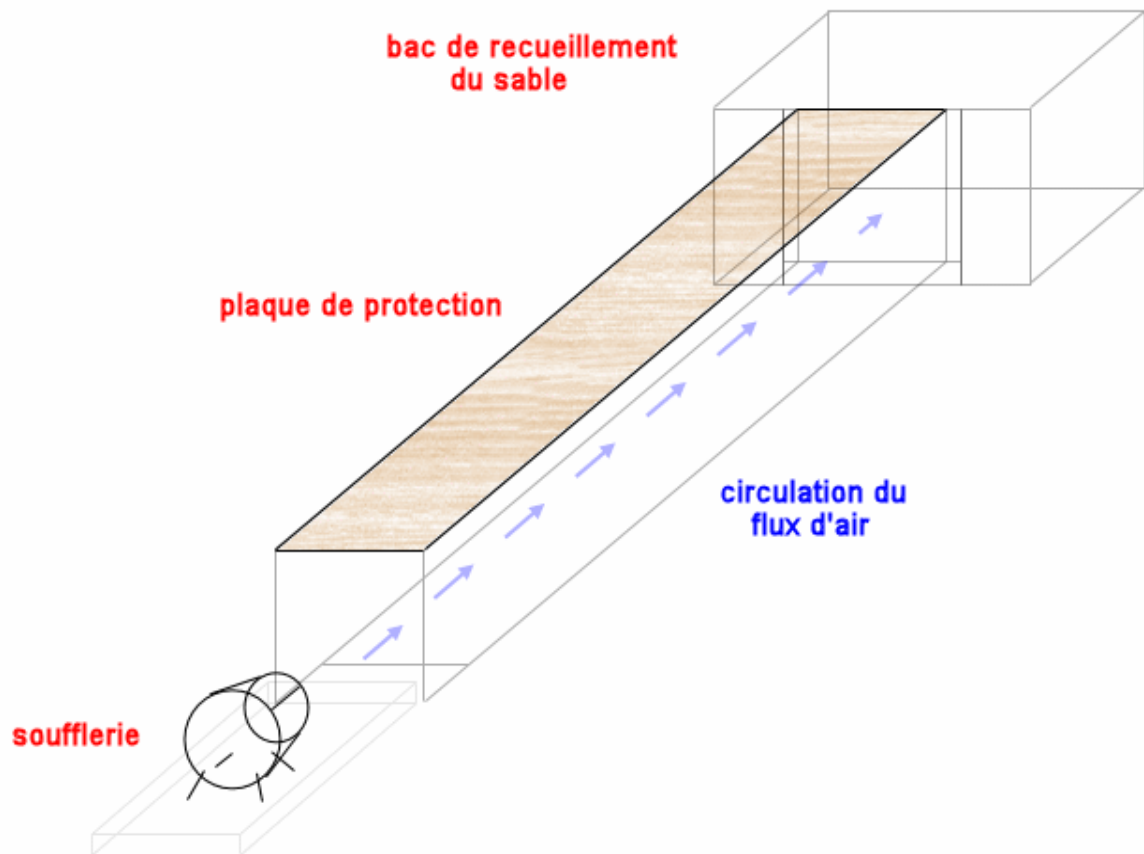
Pour différentes vitesses, on va effectuer plusieurs mesures : la vitesse de l'air en entrée et en sortie du canal, pour s'assurer de son uniformité, la masse de sable transportée, de l'espacement entre les rides.

On mesure l'espacement entre les rides de la façon suivante.



Un faisceau de lumière parallèle éclaire les rides. On peut alors distinguer la différence entre creux et bosse. La partie basse (ou creux) ainsi que celle située derrière la ride sont dans l'ombre. On mesure la distance entre deux ombres successives.

Schéma du montage :



Lors de chaque expérience, on laisse la soufflerie fonctionner entre 4 et 12 minutes, le maximum permettant de suivre l'évolution des rides lorsqu'elles se forment au delà il n'y a plus assez de sable et elles disparaissent.



Le tableau annexe IV regroupe les résultats obtenus.

On remarque ainsi qu'il existe un **seuil de vitesse** V_{seuil} en deçà duquel le sable ne se déplace pas.

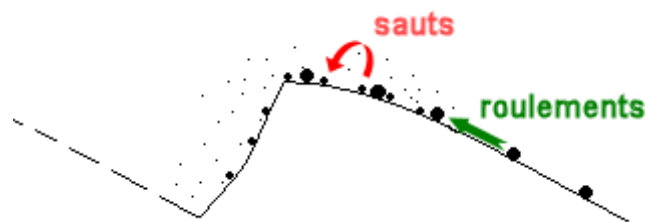
Si la **vitesse est inférieure**, il n'y a **aucun mouvement**.

Si la **vitesse est égale** à V_{seuil} on observe la mise en mouvement des plus petits grains de sable. Ils se **déplacent** par **roulements** sur les autres grains au bout plusieurs minutes le phénomène s'arrête : soit les petits grains se retrouvent coincés entre des gros grains fixes soit ils sont arrivés dans notre piège à sable où ils seront pesés. Il ne se **forme aucune figure** particulière.

Pour une **vitesse à peine supérieure** au seuil, aux roulements se rajoutent des bonds : le sable se déplace par sauts et aussi en roulant. Lorsqu'on attend quelques minutes on voit apparaître des rides.

On observe que l'espacement des rides croît avec la vitesse du vent tout comme la longueur du saut des grains

On peut donc penser que la formation des rides est due au déplacement par saut et que leur espacement est lié aux sauts des grains de sable.



Lors de la formation des rides, leur forme correspond à ce schéma :



A l'œil nu, il nous a semblé voir une différence de taille entre les grains selon leur position sur la ride.

Nous avons prélevé des grains de sable à des endroits différents : sur la face exposée à l'air et sur la face cachée.

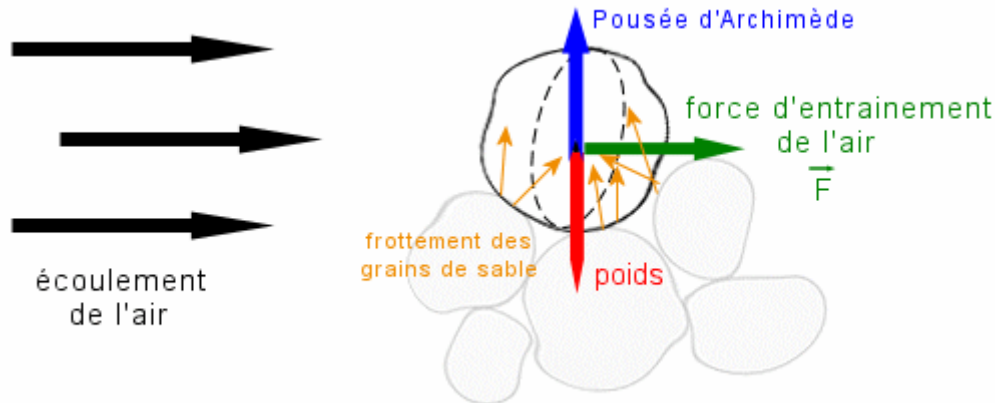
Des mesures menées de la même façon que précédemment ont confirmé notre observation. Ainsi pour une vitesse de 8m/s et des rides de taille moyenne 6cm les grains de la face exposée au vent, ont une taille moyenne de $46 \times 10 \mu\text{m}$ ceux de l'autre face une taille moyenne mesurée est de $61 \times 10 \mu\text{m}$.

Ainsi, sur la face protégée du vent on trouve des grains de taille plus importante que sur celle exposée au vent.

Nous allons maintenant essayer de décrire le seuil de mise en mouvement du sable.
Puis nous modéliserons le saut d'un grain de sable à l'aide d'un modèle mécanique, car il semble que l'espacement entre deux rides soit lié à l'existence d'une force d'entraînement et à la taille du saut.

2 Modélisation de la mise en mouvement

Nous devons simplifier notre étude qui est très compliquée si on considère un grain de sable posé à côté d'autres grains de sable.



Les forces exercées sur le grain de sable étudié sont

- ♦ la poussée d'Archimède ;
- ♦ le poids ;
- ♦ la force de frottement de l'air sur le grain de sable ;
- ♦ les réactions de contact des autres grains.

Tout d'abord nous assimilons le grain de sable étudié à une sphère de diamètre D .

La poussée d'Archimède peut être négligée.

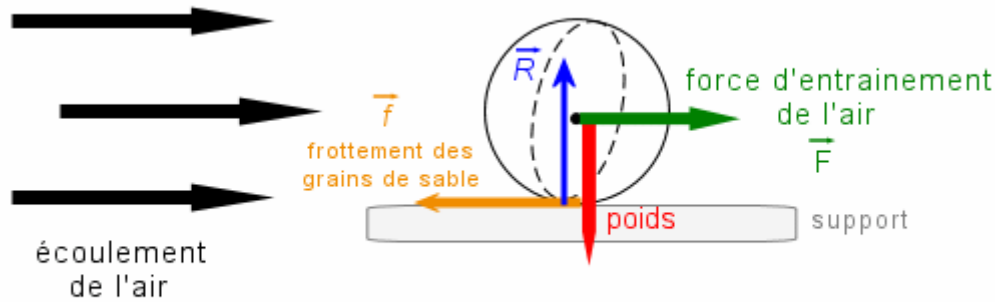
Poids d'un grain de sable (masse volumique de la silice $\rho_s = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$$\begin{aligned}
 P &= \text{volume} \times \text{masse volumique} \times g \\
 &= \left(\frac{4}{3} \times \pi \times R^3\right) \times \text{masse volumique} \times g \\
 &= \left(\frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{420 \cdot 10^{-6}}{2}\right)^3\right) \times 2500 \times 9,81 \\
 &= 9,6 \cdot 10^{-7} \text{ N}
 \end{aligned}$$

Poussée d'Archimède sur un grain de sable

$$\begin{aligned}
 P &= \text{volume} \times \text{masse volumique de l'air} \times g \\
 &= \text{volume} \times 1,3 \times 9,81 \\
 &= 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ N}
 \end{aligned}$$

On constate que l'intensité du poids est 2000 fois supérieure à celle de la poussée d'Archimède. On peut donc négliger cette force devant le poids.



(sur la modélisation, le poids et la réaction du support sont décalés pour permettre une meilleure lisibilité.)

Les réactions de contact des autres grains sont simplifiées

Ces forces sont ramenées à une seule force qui en modélise la somme ; elle est formée de deux composantes : la réaction perpendiculaire au support \mathbf{R} , et une force \mathbf{f} de frottement du support qui s'oppose au mouvement.

Nous avons adopté une relation courante dans les exercices de physique

$$\mathbf{f} = \alpha \cdot \mathbf{R}$$

α est appelé coefficient de frottement du sol sur le sable

La force de frottement de l'air sur le grain de sable

Cette force entraîne le grain de sable dans le sens de l'écoulement. Cette force est appelée force de traînée et fut l'objet d'une étude dans des précédentes Olympiades. Dans la littérature on trouve une estimation de cette force pour sphère dans un fluide en écoulement uniforme de vitesse V

$$F = 1/2 \cdot \rho_f \cdot C_x \cdot S \cdot V^2$$

C_x : coefficient dépendant de la forme de l'objet et de la vitesse de l'air on trouve dans les livres $C_x = 0,5$

ρ_f : masse volumique de l'air

S : section du grain de sable exposé à l'écoulement ici un rond $S = \pi d^2 / 4$

V : vitesse de l'air

Cette formule est valable au milieu d'un fluide. Or le grain de sable est proche du sol ; nous sommes conscients de cette approximation.

Seuil de mise en mouvement du sable

Lorsque le sable est immobile, jusqu'à la limite où il commence à rouler, la somme des forces est égale à 0 d'après le principe d'inertie.

Si on projette ces forces verticalement et horizontalement on trouve :

$$P=R$$

$$F=f$$

$$\text{Soit : } R=m.g$$

$$F=\alpha.R=\alpha m.g$$

Donc avec l'expression de F on a :

$$F=1/2.\rho_f.Cx. S.V^2=\alpha m.g$$

Pour un grain de masse $m=Vol.\rho_s$ on en déduit :

$$V_{\text{seuil}}^2=2.\alpha.g.(Vol/S).(\rho_s/\rho_f).(1/Cx)$$

Notre vitesse d'entraînement dépend :

- ♦ du coefficient de frottement au sol α ;
- ♦ de la forme du grain par Vol/S et Cx ;
- ♦ de la nature du sable et du fluide ρ_s/ρ_f ;
- ♦ de la vitesse V car Cx dépend de V .

Si on mesure la vitesse V qui permet d'entraîner le sable on peut trouver une valeur du coefficient de frottement α . Mais il serait plus intéressant de connaître α par un autre moyen pour déterminer V et comparer à l'expérience.

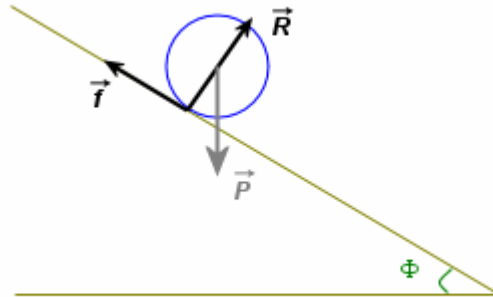
Cependant nous devons remarquer que le problème est complexe.

- ♦ plusieurs paramètres sont liés les un aux autres ;
- ♦ nous avons fait beaucoup d'hypothèses pour simplifier le problème.

Il nous faut maintenant trouver une méthode pour déterminer α le coefficient de frottement d'un grain de sable sur ces voisins en dessous c'est l'objectif de notre semaine précédent les Olympiades.

Comment déterminer le coefficient de frottement du sable sur le sable

Notre professeur nous a conseillé de lire un chapitre sur le frottement dans le livre Mécanique 1 de Feynman. Nous avons alors pensé à l'expérience suivante : on incline une surface sableuse ; l'angle à partir duquel les grains roulent sur les autres permet de trouver le coefficient de frottement. Comme précédemment on simplifie les forces de tous les grains à une seule et voici le schéma de notre modèle très simple.



Si on projette les forces R, f et P sur Ox et Oy on trouve

$$R = mg \cos(\Phi)$$

$$f = mg \sin(\Phi)$$

Et comme $f = \alpha \cdot R$ alors

$$\tan(\Phi) = \alpha$$

Au début de notre projet nous avons déjà fait plusieurs expériences pour trouver cette pente d'équilibre d'un tas de notre sable. La méthode de mesure et les résultats sont en annexe V. On trouve pour nos grains de 0,89 mm une pente de 60°.

Conclusion :

Expression de la vitesse V_{seuil} de début d'entraînement par l'air du sable

On a

$$V_{\text{seuil}}^2 = 2 \cdot \tan(\Phi) \cdot g \cdot (\text{Vol}/S) \cdot (\rho_s/\rho_f) \cdot (1/Cx)$$

Pour notre sable :

- ♦ $Cx = 0,5$ u.s.i
- ♦ $g = 10 \text{ ms}^{-2}$
- ♦ $\Phi = 60^\circ$
- ♦ $\text{Vol} = 4/3 \pi \cdot (D/2)^3$
- ♦ $S = \pi (D/2)^2$
- ♦ $\rho_s = 2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- ♦ $\rho_f = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

On trouve une vitesse $V_{\text{seuil}}=6,5 \text{ ms}^{-1}$ alors que d'après les expériences on a mesuré $8,3 \text{ ms}^{-1}$.
La valeur obtenue n'est pas très précise $(8,3-6,5)/8,3*100=25\%$ d'erreur.
Cependant notre modèle simple donne un ordre de grandeur correct de V_{seuil} .

3 Modélisation des sauts d'un grain de sable

Nous adopterons le principe du mouvement d'un projectile à la surface de la Terre vu en cours.

Pour le grain de sable le bilan des forces se résume aux mêmes forces que précédemment :

- ♦ la poussée d'Archimède négligée comme précédemment ;
- ♦ le poids ;
- ♦ l'entraînement du grain de sable par l'air.

Dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen nous appliquerons la deuxième loi de Newton au centre d'inertie du grain de sable.

Nous cherchons actuellement la force d'entraînement du grain de sable par l'air.

Epilogue

L'idée du phénomène de formation des rides nous a été donnée par une observation lors d'une promenade en forêt. Nous avons remarqué au fond d'un ruisseau la présence de rides sur le lit de sable. Mais quelques jours après, la figure formée par les rides avait été modifiée. Nous avons alors interrogé nos professeurs, qui nous ont proposé d'étudier la formation des rides.

Quand nous avons voulu reproduire le phénomène en laboratoire, nous ne pensions pas que cela prendrait autant de temps. Il a fallu tenir compte du prix du pexiglas : plusieurs mois auront été nécessaires pour trouver un prix correct.

De plus, pour chaque idée nouvelle apportée il fallait chercher une solution réalisable. La soufflerie n'a pas été facile à trouver alors qu'on croyait pouvoir utiliser un ventilateur.

Nous avons consacré beaucoup trop de temps à la recherche d'un canal servant à la fois pour l'eau et l'air : environ la moitié du temps.

Nos premières expériences ont été faites il y a un mois et demi. L'étude théorique est donc récente.

Nous avons découvert la difficulté de mener un projet où il fallait concevoir une maquette.

Conclusion

Nous avons entamé l'explication de l'existence de plusieurs régimes de déplacement (roulement, saut) du sable à l'aide de nos connaissances de terminale.

Nous avons trouvé une expression pour la vitesse du vent qui met en mouvement un grain de sable. Elle fournit un ordre de grandeur correct.

Il nous faut maintenant trouver l'équation du saut d'un grain de sable.

Nous avons établi une approche théorique du sable dans l'air et pensons l'appliquer à l'eau.

Ce sujet est riche ; nous pourrions aussi prendre des grains de sable de diamètres différents et comparer le saut et la mise en mouvement. Notre sujet est directement en relation avec la géologie car l'étude de la formation des rides peut nous permettre d'étudier différentes caractéristiques du milieu (ex. hauteur d'eau). Nous pouvons aussi établir une corrélation avec la biologie car en connaissant les conditions du milieu, on peut en déduire les caractéristiques d'une espèce et de son milieu d'évolution.

Vitesse de l'air en fonction de la distance à la soufflerie :
profil longitudinal

distance cm	V1 m/s	V2 m/s	V3 m/s
20	6	8,7	10,1
40	5,2	7,9	9,3
60	4,5	7,2	8,2
80	3,8	6,4	7,3
100	3,2	5,6	6,6
120	2,8	4,9	5,7
140	2,32	4,2	4,8
160	2,2	3,9	4,3

Vitesses d'entrée:

V1: 40% de la puissance maximale de la soufflerie

V2: 60% de la puissance maximale de la soufflerie

V3: 70% de la puissance maximale de la soufflerie

Profil transversal

hauteur par rapport au sol	vitesse
cm	m/s
10	0,14
15	1,01
20	4,8
25	6,3
30	6,4
35	1,75
40	0,13

Hauteur :
Position du thermo-anémomètre par rapport au sol. Le centre de la soufflerie étant lui-même à 25,5 cm du sol

Tableau 3: Résultats expérimentaux de la mesure des grains de sable.

Expérience	Diamètre réel
1	0,73 mm
2	1,0 mm
3	1,1 mm
4	0,86 mm
5	0,73 mm
6	1,3 mm
7	0,53 mm
8	0,83 mm

Graphique 3: Représentation graphique des résultats obtenus.

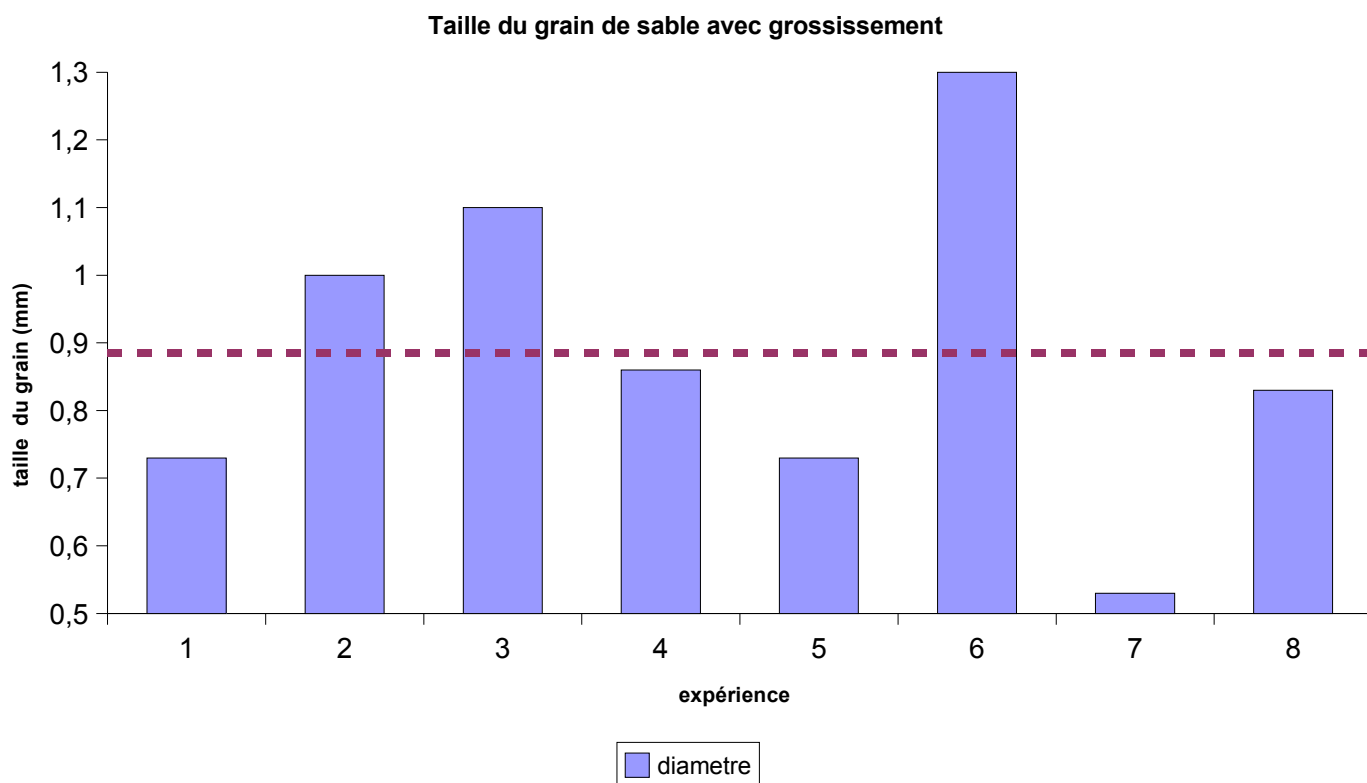
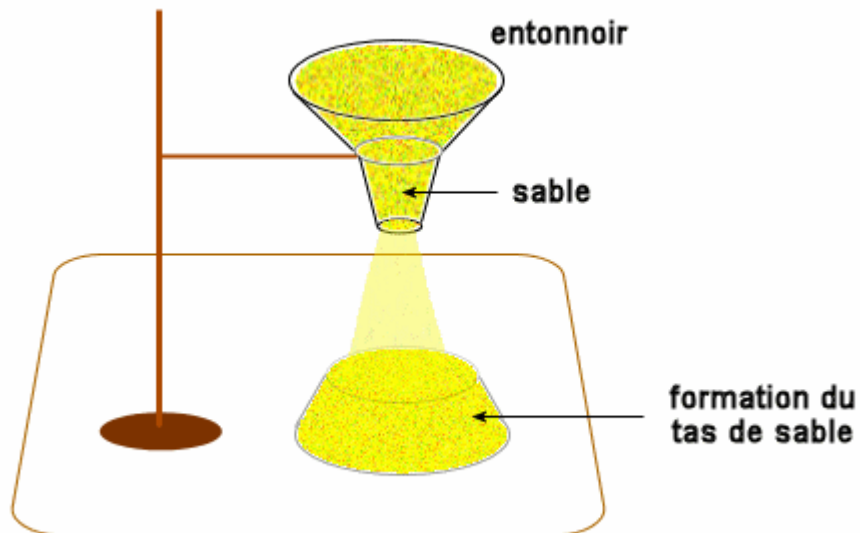


TABLEAU 4: RÉSULTATS EXPERIMENTAUX DE LA MESURE DES GRAINS DE SABLE.

Cas	Vitesse d'entrée	Vitesse de sortie	Débit de sable	Allures des rides relevées
1	7.5m/s	5.2m/s	0.0052g/s	Il n'y a pas de formation de rides, seuls les petits grains roulent, il n'y a que des gros grains en surface.
2	8.3m/s	6.5m/s	0.023g/s	Cette fois-ci il y a formation de rides, les gros grains roulent et les petits sautent. Les rides sont espacées par une distance environ régulière.

Re marques

Il existe un seuil de vitesse à partir duquel, il y a déplacement de sable, à partir de ce seuil, seuls les petits grains de sable se déplacent par des roulements. Ces deux expériences ont été réalisées avec la même quantité de sable disposée au fond du canal, car si la quantité de sable n'avait pas été la même il est possible que le débit de sable à calculer en eu été modifié.



Versement	diamètre	rayon	hauteur	angle	Angle
1	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>radian</i>	°
2	8	4	2	1,10714872	63,4349488
3	9,4	4,7	2,8	1,03351161	59,2158535
4	10,2	5,1	3,3	0,9964915	57,0947571
5	11,8	5,9	3,9	0,98671527	56,5346207
6	13,5	6,75	4,2	1,01419701	58,1092082
7	14,8	7,4	4,3	1,04440396	59,8399392
8	15,2	7,6	4,5	1,036202	59,3700015
9	16	8	4,7	1,03961871	59,5657642
10	16,8	8,4	4,9	1,04272188	59,7435628
11	17,5	8,75	5	1,05165021	60,2551187
12	17,8	8,9	5,4	1,02543453	58,7530706
13	18,6	9,3	5,4	1,04472991	59,8586144
14	19,2	9,6	5,5	1,05052914	60,1908858
15	19,8	9,9	5,6	1,05601224	60,5050442

moyenne	59,4622421
écart type	1,64077438
variance	2.69

Lexique

1. Thermo-anémomètre: est un dispositif qui possède un « fil chaud » qui est un fil ayant une température et une résistance propre. En étant exposé à un flux d'air, la température du fil diminue et la résistance varie. Le thermo-anémomètre est capable d'établir un lien entre la variation de la résistance et la vitesse du flux d'air.

2. La divergence de l'air: ce phénomène physique est à l'origine des vitesses différentes à l'intérieur du flux d'air: plus on s'éloigne du milieu, plus la vitesse est faible: l'air diverge.

3. Le convergent: est la partie qui empêche l'air de diverger à la sortie de la soufflerie.

4. Au final notre canal est composé au total :

- du corps principal en pexiglas, surmonté d'une armature métallique ;
- d'une vanne en pexiglas servant à contrôler le débit ;
- d'un bac rouge qui dans les expériences dans l'air nous sert à recueillir le sable à l'extrémité du canal et qui dans les expériences avec l'eau représente le premier --volume dans lequel l'eau est déversée (avant de pénétrer dans le canal) ;
- d'un bac de volume plus important dans lequel se déverse l'eau dans les expériences qui s'y rapportent (la pompe se trouve dans ce bac) ;
- d'une pompe qui amène l'eau du plus grand bac au plus petit, ainsi qu'un tuyau de diamètre important ;
- d'une soufflerie à vitesse variable.