

Introduction

Ce poster se concentre sur la discipline du plongeon olympique, discipline dans laquelle un athlète s'élance d'un tremplin et doit effectuer des figures acrobatiques devant un jury qui lui attribuera une note, et plus particulièrement sur la phase précédant le saut effectué par les plongeurs. En effet, les athlètes estiment qu'ils savent s'ils vont réussir leur saut dès le décollage. L'objectif principal de ce projet est donc d'optimiser la hauteur de saut que peut atteindre le plongeur, celle-ci étant déterminante par la suite pour lui permettre de réaliser ses figures artistiques :

Comment optimiser la hauteur de saut atteinte par les plongeurs lors d'une épreuve de plongeon olympique ?

Pour répondre à cette problématique, il semble essentiel d'étudier *a priori* les plongeurs d'aujourd'hui, ce qui passe par :

- l'analyse des vidéos de plongeurs réalisés par des professionnels en compétitions officielles
- la mise au point de trois expériences permettant de modéliser trois mécanismes différents:
 1. le rebond du plongeur sur le plongeur
 2. le dernier appui que le plongeur prend
 3. un saut sans excitation préalable du plongeur

Observation et analyse vidéo

Afin de comprendre les mécanismes mis en jeu lors d'un saut, nous avons étudié avec attention de nombreuses vidéos de plongeurs de haut niveau. L'enjeu principal de cette étude va être d'identifier les différents échanges d'énergie entre le tremplin et le plongeur. En effet, afin d'atteindre une hauteur de saut maximum, le sauteur doit emmagasiner un maximum d'énergie cinétique car une fois dans l'air, le plongeur est en chute libre, et l'énergie cinétique qu'il aura accumulé en sortie de plongeur sera transformée en énergie potentielle.

Après observation, on peut décomposer le saut en 8 phases distinctes:

- Phase 1:** le plongeur commence son saut dos au bassin, sur l'extrémité du tremplin qui oscille légèrement (figure 1).
- Phase 2:** lorsque le tremplin se situe à son altitude minimum, le plongeur se met sur la pointe des pieds, ce qui a pour effet de surélever légèrement son centre de gravité (figure 2). Lors de cette deuxième phase, le plongeur n'échange pas (ou du moins très peu) d'énergie avec la planche.



Figure 1



Figure 2

- Phase 3:** une fois la planche revenue à son altitude maximale, après une demie oscillation, le plongeur se laisse brutalement tomber sur ses pieds (figure 3). Cet abaissement brutal de son centre de gravité permet d'augmenter l'énergie du tremplin ce qui augmente son amplitude d'oscillation.

- Phase 4:** puis, une demie oscillation plus tard, lorsque le tremplin est à son altitude minimum, le plongeur va élever son centre de gravité, tout d'abord en levant les bras en l'air (figure 4), puis en se mettant sur la pointe des pieds lors de la montée.

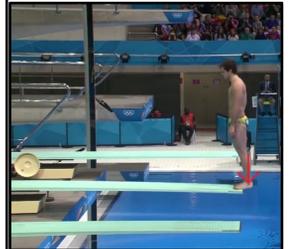


Figure 3

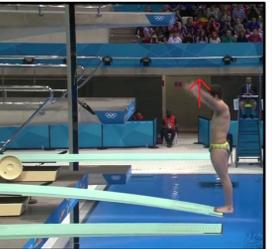


Figure 4

- Phase 5:** cette accélération verticale de son centre de gravité va lui permettre de décoller de la planche une fois que celle-ci a atteint son altitude maximale (figure 5).

- Phase 6:** une fois en l'air, le plongeur va plier ses jambes et rabaisser ses bras afin d'avoir une position lui permettant de se propulser pour effectuer son saut (figure 6). En retombant sur le tremplin, le plongeur va lui transmettre une partie de son énergie cinétique, ce qui va le faire osciller avec une grande amplitude.

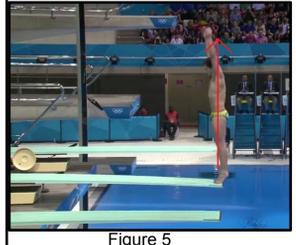


Figure 5

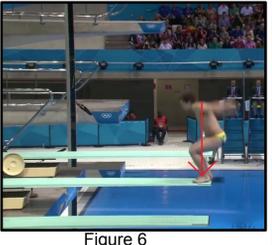


Figure 6

- Phase 7:** une fois le tremplin ayant atteint son altitude minimum (figure 7), le plongeur va détendre ses jambes et relever ses bras en l'air, accélérant son centre de gravité pour lui donner une vitesse maximum.

- Phase 8:** ainsi, lorsque le tremplin atteint son altitude maximum, le plongeur aura une énergie cinétique maximale (figure 8), lui permettant d'atteindre une hauteur de saut maximale.

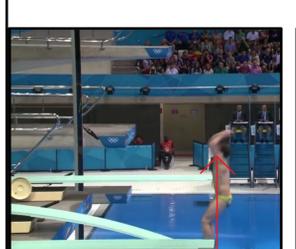


Figure 7

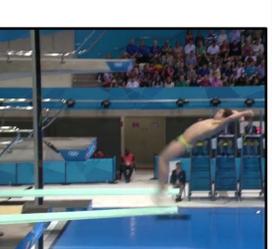


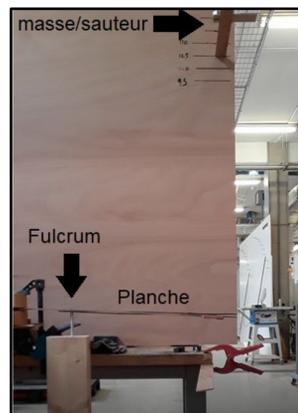
Figure 8

Modélisation du rebond sur le plongeur

L'analyse des vidéos nous a montré que le combat entre la planche et le sauteur pouvait parfois tourner à l'avantage de la planche, ce qui se convertissait en un saut raté. Pour essayer de mieux appréhender ce phénomène, nous avons mis au point une expérience visant à regarder l'influence de l'écart de vitesse entre la planche et le sauteur sur l'altitude de sortie du sauteur.

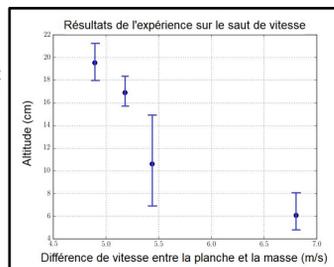
Dispositif expérimental

Pour simuler la différence de vitesse entre la planche et le sauteur (que l'on représentera par une masse ponctuelle comme un bouchon), on choisit de lâcher la masse représentant le sauteur à une hauteur fixe sur la planche, contrôlant ainsi sa vitesse qui sera la même à chaque manipulation. La différence de vitesse apparaîtra dans le temps d'excitation de la planche; on excite la planche pendant un temps T variable, avant de lâcher la masse.



Résultats

On observe l'altitude atteinte par la masse en ayant successivement excité la planche pendant 0, 1, 2 et 3 secondes (en l'écartant à chaque fois d'une même distance). On obtient les résultats ci-contre:



Interprétation

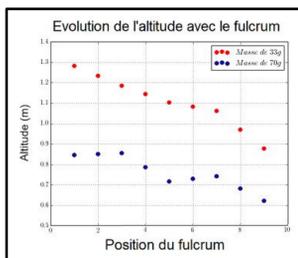
On voit alors que plus l'écart de vitesse entre la planche et la masse en chute libre est grande, moins l'altitude de sortie de la masse sera importante. A noter que les écarts de vitesse sont ici absolus. En effet, on a observé sur nos manipulations (et également sur les vidéos de sauteurs professionnels) que le sens des vitesses avait une importance. Le sauteur aurait en effet **tout intérêt à arriver sur la planche quand celle-ci est en train de redescendre**, de manière à limiter l'action du choc entre les deux éléments; au contraire, c'est lors d'un contact frontal, c'est à dire quand la masse et la planche se rencontrent avec des vitesses de sens opposé que le risque de saut raté est grand.

Modélisation du dernier appui

Le but est ici de vérifier le lien direct entre raideur de la planche (via la position du fulcrum), et hauteur de saut. Qualitativement on sent que plus la raideur sera importante et plus l'énergie disponible sera grande, mais les oscillations seront plus rapides et ce sera plus dur pour le sauteur; un compromis doit être trouvé.

Dispositif expérimental

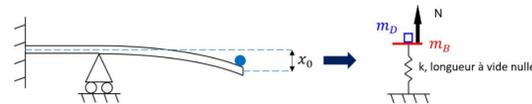
L'idée est de mesurer la hauteur atteinte par une masse inerte posée sur la planche, lorsqu'on lâche la planche sans vitesse initiale, en faisant varier différents paramètres comme le fulcrum et la masse. On obtient les résultats suivants :



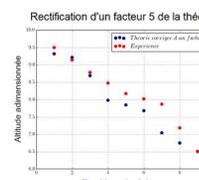
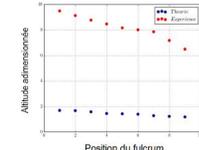
On remarque ce à quoi on s'attendait: plus le fulcrum se rapproche de l'extrémité libre, plus l'altitude atteinte par les différentes masses est importante. Ce phénomène, qu'on a attribué *a priori* à la raideur de la planche se rapproche des différentes observations qu'on a pu tirer des vidéos de sauteurs professionnels.

Théorie

$$\begin{cases} m_a \ddot{x}_a = -m_a g + N \\ m_b \ddot{x}_b = -m_b g - N - kx_b \end{cases}$$



Comparaison modèle/expérience pour une masse de 33g



En s'inspirant de la littérature [1], [2] et [3], on modélise la planche par un ressort, et on distingue deux phases : la première où la masse représentant le sauteur et la planche sont en contact, et la seconde où le sauteur a décollé. On exprime l'équation du mouvement pour chaque phase et on obtient alors les résultats ci-contre.

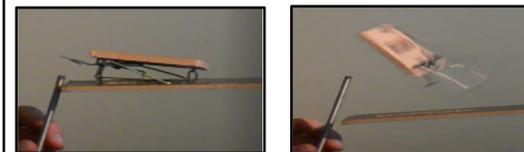
On remarque qu'il y a un écart entre le modèle qu'on a développé et l'expérience (courbes au centre et à gauche). Théorie et expérience s'accordent à un facteur 5 près (courbe de droite). L'oubli de notre part, et qu'il conviendrait de regarder plus en détail, vient de l'ordre de grandeur des manipulations que nous avons effectuées; notre modèle fonctionne pour des petites déformations (ici, le rapport entre l'écart initial de la planche et la longueur de celle-ci), or nous n'avons pas tenu compte de ce point, ce qui fausse les comparaisons.

Modélisation du saut sans vibration du plongeur

Cette partie est consacrée au dépliage des jambes du plongeur. Ce dépliage est modélisé par le déclenchement d'une tapette à souris modifiée par nos soins. Celle-ci modélise ainsi les jambes du plongeur, le cadre métallique étant assimilée à la partie basse, et la partie en bois assimilée à la partie haute de la jambe.

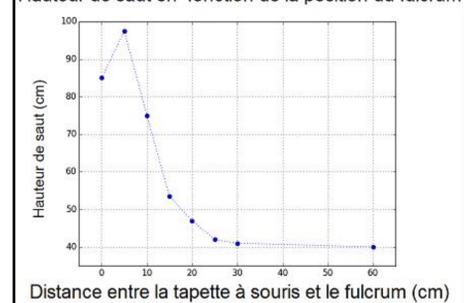


Pour déclencher le mécanisme, nous sollicitons son "interrupteur" (élément métallique sur lequel la souris doit marcher pour déclencher le piège) : l'articulation se déplie, résultant en un saut de la tapette et une déflexion de la planche.



En réalisant plusieurs expériences on remarque que plus le fulcrum est proche du bord du plongeur, plus celui-ci est raide, donc plus il est difficile pour le plongeur de fléchir la planche. Nous mettons alors en évidence la relation entre la hauteur de saut atteinte et la distance entre le fulcrum et le bord, directement liée à la raideur.

Hauteur de saut en fonction de la position du fulcrum



Observations

Si la raideur de la planche est trop importante, la hauteur de saut est importante, mais pas maximale ; elle l'est pour une distance entre le fulcrum et le bord légèrement plus élevée que 0. Passé ce maximum, la hauteur de saut chute avec la raideur et finit par se stabiliser aux alentours de 40 cm.

Enseignements

Intuitivement, on peut penser qu'une planche plus raide permet une meilleure hauteur de saut qu'une planche souple, car la planche se déforme peu et toute l'énergie est transmise au plongeur. Cependant, la présence du maximum met en valeur le fait qu'une planche trop raide va dissiper trop d'énergie (effet pare-choc), et qu'une planche trop souple entraînera un choc mou.

Dans les deux cas, on s'éloigne du choc élastique recherché permettant de conserver l'énergie cinétique au cours du choc et donc de fournir plus d'énergie à la tapette.

Conclusion

Étapes importantes d'un saut

- mise en vibration du plongeur
- dernier appui
- décollage

Importance du dernier appui

Le sauteur doit tenter d'atterrir sur la planche en étant en phase avec son mouvement, c'est-à-dire qu'il doit l'atteindre lorsqu'elle est en phase descendante et si possible lorsqu'elle est au plus bas.

Réglages adaptés au sauteur

Références

[1] Denise S. Stilling Eric J. Springings and L. Glen Watson. Development of a model to represent an aluminum springboard in diving. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1989
[2] Katja Mombaur Jens Koschorreck. Modeling and optimal control of human platform diving with somersaults and twists. *Springer Science+Business Media*, 2009
[3] Ben Hellera Dave Schoraha Jose Gomez Steve Haakea, Simon Goodwilla. Dynamic modeling of a springboard during a 3 m dive. *Sports Engineering Research Group, Sheffield Hallam University, Sheffield*, 2010.