

L'EFFET DES MIRAGES SUR LA VISÉE EN TIR SPORTIF

Gabrielle Laloy-Borgna, encadrée par Hervé Gayvallet et Philippe Odier

École Normale Supérieure de Lyon

Introduction

Le tir sportif est un sport olympique comportant de nombreuses disciplines avec différentes armes, différentes distances de tir (de 25 à 300 m), différentes positions de tir, par exemple debout, couché, ou dans trois positions différentes au cours de l'épreuve. Les épreuves olympiques, exceptée la finale, se déroulent en extérieur et sur des terrains qui peuvent être de natures très différentes, donc les tireurs sont dans l'obligation de s'adapter à des conditions météorologiques très variables. En particulier, les tireurs ont depuis longtemps remarqué qu'ils sont gênés par l'effet de mirage, résultant de l'inhomogénéité spatiale des grandeurs thermodynamiques de l'air.



FIGURE 1 : Rémi Moréno Flores, tireur français, aux championnats du monde de tir 2018 en Corée.

Situation du problème

Michel Bury, à travers un article dans les Cahiers du pistolet et du carabinier (Bury [1989]) est le premier et le seul à ce jour à s'être intéressé au problème spécifique des mirages en tir sportif. En effet, les tireurs ont tous plus ou moins conscience qu'il existe un biais entre leur visée et la position réelle du centre de la cible. Michel Bury a cherché à estimer les écarts entre le centre de la cible et la visée perçue par les tireurs. Le dessin manuel présenté ci-dessous, extrait d'un dossier sur les mirages des cahiers du pistolet et du carabinier, montre les décalages les plus fréquemment observés par les tireurs : vers 11 heures et vers 1 heure. Les décalages observés sont donc toujours vers le haut, avec une composante latérale qui est soit vers la gauche soit vers la droite, selon le vent présent.

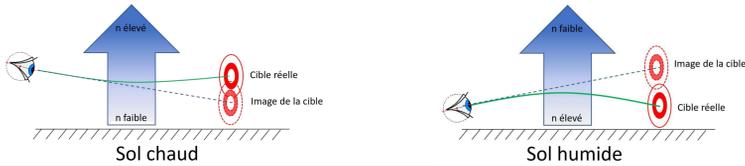


FIGURE 2 : Extrait des cahiers du pistolet et du carabinier par Michel Bury, sur l'effet des mirages en tir sportif.

Un mirage apparaît lorsque les rayons lumineux ne suivent pas une trajectoire rectiligne. Dans ce cas l'objet observé (visé) apparaît à une position (légèrement) différente de sa position réelle (voir les deux figures plus bas). Ce phénomène est une conséquence de la non-uniformité de l'indice optique n de l'air. Cet indice varie avec la température de l'air (mirage dit « thermique ») et sa teneur en humidité (mirage dit « humide »). Généralement, le sol est plus chaud que l'air, l'indice n croît alors avec la distance au sol. S'il est humide (herbe, rosée, pluie récente), les couches d'air près du sol sont plus humides que celles plus éloignées, l'indice n décroît alors avec la distance au sol. L'expression de l'indice optique n de l'air en fonction de ses paramètres thermodynamiques (Smith and Weintraub [1953]) prend en compte parallèlement ces deux causes :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = N_{therm} + N_{humide} = 77,6 \cdot \frac{P}{T} + 3,732 \cdot 10^5 \frac{P_V}{T^2}$$

- n indice optique de l'air au-dessus du sol,
- P pression atmosphérique totale en hPa,
- P_V pression partielle en vapeur d'eau,
- T température en K.



Mirages chauds

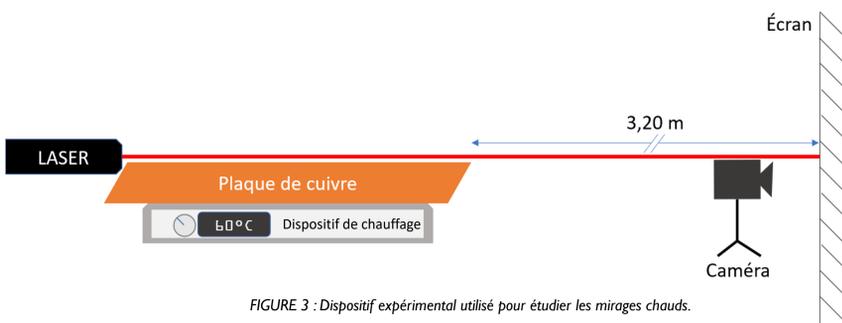


FIGURE 3 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier les mirages chauds.

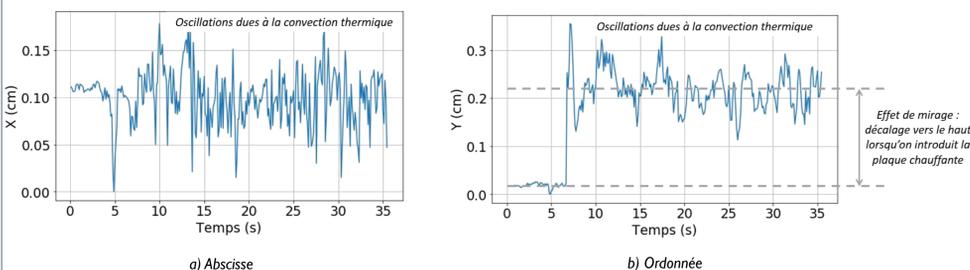


FIGURE 4 : Position du spot laser au cours du temps, une plaque chauffante est glissée sous le trajet du laser à $t = 7$ s.

Références

- M. Bury, Cahiers du Pistolet et du Carabinier. (131) : 16-19, Février 1989.
- E. Smith and S. Weintraub. The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. Proceedings of the IRE, 41 (8) : 1035-1037, Aug. 1953.

Traitement des images

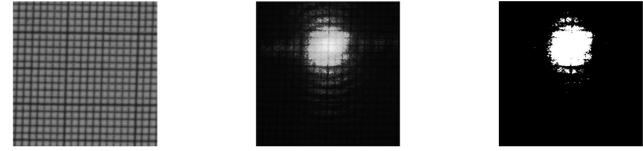


FIGURE 5 : Exemples d'images obtenues quand on filme le spot laser en direct.



ImageJ

- Calibration de la caméra grâce au papier millimétré
- Enregistrement du film de la projection du spot laser sur un écran
- Binarisation des images (noir/blanc)
- Détection de cercles → localisation des pixels blancs
- Repérage du centre du spot laser à 0,05 mm près

Mirages humides

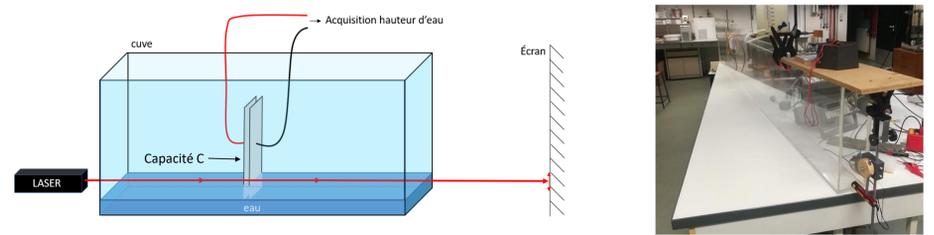


FIGURE 6 : Dispositif expérimental utilisé pour étudier les mirages humides.

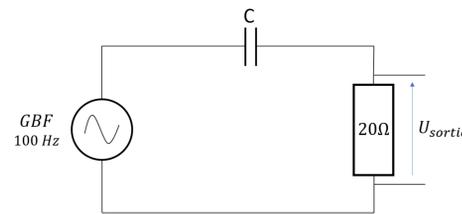


FIGURE 7 : Circuit électrique utilisé pour mesurer la capacité du capteur de hauteur d'eau.

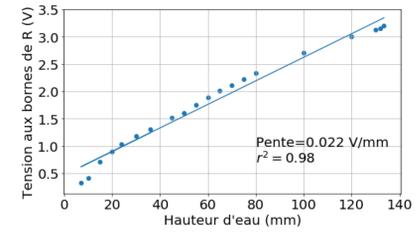


FIGURE 8 : Calibration du capteur de hauteur d'eau.

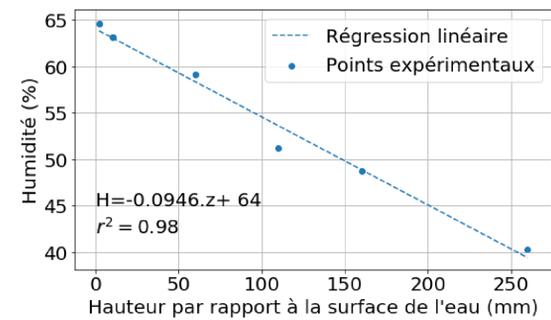


FIGURE 9 : Mesure de l'hygrométrie en fonction de la hauteur par rapport à la surface de l'eau dans la cuve utilisée pour l'étude des mirages humides. On trouve un profil linéaire, en accord avec la résolution de l'équation de diffusion en régime stationnaire, avec des conditions limites à la surface de l'eau et en dehors de la cuve.

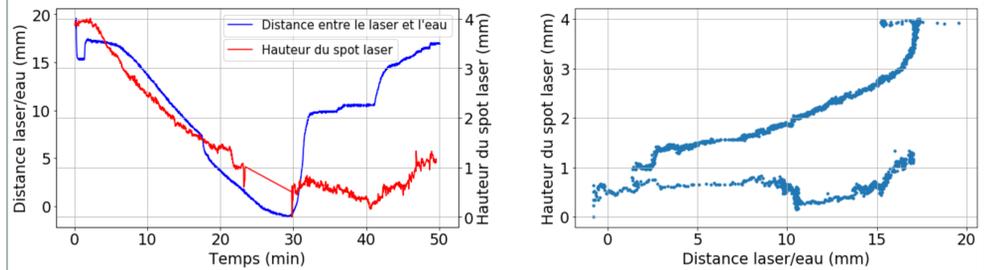


FIGURE 10 : Résultats obtenus pour l'expérience de remplissage et de vidage de la cuve, permettant d'observer l'effet d'un gradient d'humidité dans l'air sur la propagation d'un faisceau laser.

Conclusion et utilisation de ces résultats par les tireurs

Mesures d'hygrométrie et de température

T_0 = température ambiante
 h_0 = hygrométrie ambiante
 $\Delta h = h^{sup} - h^{inf} (\%)$
 $\Delta T = T^{sup} - T^{inf} (^\circ C)$

$$\Delta z = d^2 \left[0,093315 \frac{\Delta h}{T_0^2} - \left(\frac{0,0776}{T_0^2} + \frac{0,18663 \cdot h_0}{T_0^3} \right) \Delta T \right]$$

FIGURE 11 : Protocole d'estimation des décalages dus aux mirages proposé aux tireurs sportifs.

ΔT (°C)	Δh (%)	0%	-2%	-4%	-6%
0°C		0 mm	5,4 mm	10,8 mm	16,3 mm
-2°C		-7,1 mm	-1,6 mm	3,7 mm	9,1 mm
-4°C		-14,2 mm	-8,8 mm	-3,4 mm	2,07 mm
-6°C		-21,3 mm	-15,9 mm	-10,5 mm	-5,0 mm

FIGURE 12 : Décalages Δz attendus pour différents gradients de température ΔT et d'hygrométrie Δh . Calcul réalisé à $T_0 = 21^\circ C$, pour une hygrométrie ambiante $h_0 = 70\%$, pour une distance de tir $d = 50$ m.