



Dossier : Le poids

06 - J.O. PARIS 2024

Les jeux antiques
Interview d'Alain Cadu
par Jean-Claude Farault

09 - ÉDUCATION ATHLÉTIQUE

la formation du jeune demi-fondeur
Par Christopher Morrissey

23 - DOSSIER POIDS

Avantages et inconvénients des techniques
de prises de vitesse en translation et en rotation
Par Laurence Manfredi

39 - ENTRAÎNEMENT

Économie de course, biomécanique de la foulée
et capacités musculaires des coureurs de trail élite
Par Thibault Besson et collaborateurs

Lancer de Poids

par Jean-François Debril

Haut, loin, vite... suivant le bon angle

Abaques de lancer de poids



PAR JEAN-FRANÇOIS DEBRIL

Docteur en biomécanique,
Ingénieur de recherche du ministère des sports
CREPS de Poitiers

DÉFINITIONS ET HYPOTHÈSES

Le lancer de poids est un sport de jet qui comprend deux phases balistiques : interne et externe.

La phase de balistique externe commence quand le boulet n'est plus touché par le lanceur et se termine à l'impact du boulet au sol. Lors de cette phase aérienne, quatre actions mécaniques s'exercent sur le boulet et influencent sa trajectoire. La principale action mécanique subie par le boulet lors de cette phase est l'accélération de la gravité, c'est-à-dire que, chaque seconde, la vitesse verticale du boulet augmente de 9,81 m/s vers le bas. La deuxième action mécanique est l'effet Magnus. Compte-tenu des vitesses angulaires relativement faibles du boulet, cette force peut être négligée. La troisième action mécanique est issue des frottements de l'air, encore appelée force de traînée aérodynamique. Cette force freine l'avancée du boulet mais ne réduit la portée du tir que de moins d'un pourcent (8 cm au maximum). Par souci de clarté et de simplification, cette force est aussi négligée. La quatrième action mécanique est la poussée d'Archimède (oui, l'air est bien considéré comme un fluide). Compte-tenu des différences de densité entre le boulet et l'air, cette force est considérée négligeable.

À la suite du colloque national FFA/AEFA de Poitiers les 5 et 6 novembre 2022, vous avons sollicité J-F Debril à faire un focus sur l'importance de l'angle de visée au lancer de poids pour venir en complémentarité des autres articles de ce dossier. La principale référence des travaux présentés est la thèse de doctorat de Fabien Achard de Leluardière soutenue à Poitiers en 2005. Cette thèse est à l'origine de la station de mesure et d'analyse du lancer de poids située au CREPS de Poitiers et ouverte aux sportifs de haut niveau,

En résumé, pour cet article, la phase de balistique externe assimilera le boulet à son centre de gravité en chute libre sous la seule action de son poids. Pour les plus curieux, la lecture de l'article de Wikipédia sur **L'Approche mathématique de la balistique extérieure** est des plus instructifs. Il faut retenir que la trajectoire du boulet en phase aérienne est entièrement déterminée et uniquement par l'état du boulet à l'instant du lâcher. Cet état est décrit par la position du centre du boulet par rapport à l'aire de lancer et par le vecteur vitesse de ce point dans l'espace. La masse n'intervenant pas, ce modèle est vrai pour toute masse de boulet.

Tout l'art du lanceur et de son entraîneur va être de mettre en mouvement le boulet pour qu'à l'instant du lâcher il soit dans son état optimal pour atteindre la plus grande portée. Cette phase de balistique interne détermine la phase de balistique externe.

LES DÉTERMINANTS DE LA PERFORMANCE DU LANCER DE POIDS

L'idée est de regarder l'influence d'un paramètre du lancer à la fois. Ainsi, lorsqu'un paramètre est modifié, les autres sont considérés comme restant les mêmes.

Point du lâcher – vue de dessus

Avancer au maximum le point de lâcher par rapport au centre de l'aire de lancer, sans invalider le tir bien sûr, permet de gagner de précieux centimètres. Sur la Figure 1 (page suivante), cela revient à avancer vers la droite le point E d'éjection du boulet pour que son projeté sur le sol, le point D

du début de la phase aérienne, soit le plus loin possible du centre O de l'aire de lancer.

Lors de la mesure de la performance, le mètre ruban est tendu entre le point d'impact I et le centre de l'aire de lâcher O. Pour éviter de perdre quelques précieux centimètres, il est pertinent d'aligner au maximum ces deux points avec le point D correspondant au lâcher au niveau du sol (Figure 1 vue de dessus). En d'autres termes, si au moment du lâcher le boulet est légèrement désaxé, il vaut mieux que le lancer se prolonge suivant la même direction pour que le point I soit dans le prolongement de OE.

Trajectoire du boulet – plan de vol

Vu les hypothèses posées pour cet article au paragraphe 1, la trajectoire du boulet lors de la balistique externe est contenue dans un plan perpendiculaire au sol et contenant entre autres : le point du lâcher, le zénith de la trajectoire, le point d'impact et les vecteurs représentant la vitesse du boulet. C'est le plan qui contient les points E, D et I de la Figure 1.

La portée du boulet commence au point D de début et se termine par le point I d'impact. C'est cette distance qu'il convient de maximiser. Elle est portée par l'axe (D, xp) de la Figure 1 en vue de dessus.

HAUTEUR DU LÂCHER

Le temps de vol du boulet est déterminé par la hauteur du lâcher et la composante verticale de la vitesse d'éjection du boulet. Plus cette hauteur est importante et plus longtemps le boulet pourra rester en l'air. Ainsi, il pourra parcourir plus de chemin sur l'axe de la performance (D, xp) (Figure 1).

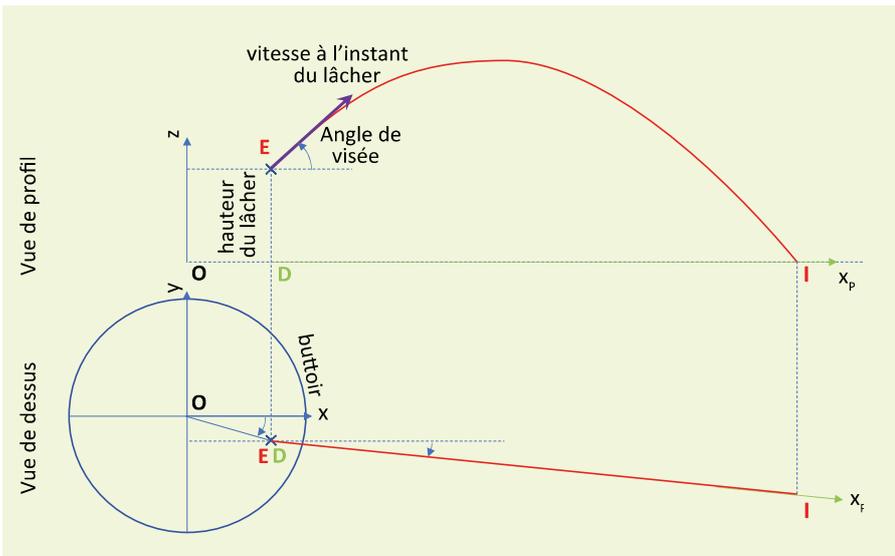


Figure 1 : Représentation de la trajectoire du boulet en rouge sur l'aire de lancer

INTENSITÉ DE LA VITESSE

Dans le plan de vol du boulet, il est pratique de représenter la vitesse du boulet au point du lâcher à l'instant du lâcher par un vecteur. Cela correspond à flèche violette sur la Figure 1. Pour tracer cette vitesse, les quatre composantes du vecteur doivent être définies.

- **L'origine** : le point du lâcher E. Nous avons traité ce point plus haut.
- **L'orientation** : l'angle de visée représenté par rapport à l'horizontal sur la Figure 1. La trajectoire du boulet au début de la phase aérienne tangente cette orienta-

tion. Nous reviendrons en détails sur cette orientation dans la suite de cet article.

- **Le sens** : vers l'avant et le haut.
- **La longueur** : l'intensité de la vitesse. Plus le boulet est rapide et plus l'intensité de la vitesse est dite grande. Bien sûr, cette intensité de la vitesse est liée directement à la performance. Augmenter l'intensité de la vitesse permet d'augmenter proportionnellement la vitesse horizontale, parallèle à (D, x_p) , et la vitesse verticale. Plus la vitesse horizontale est grande et plus le boulet pourra parcourir de chemin pendant le temps de vol. Et ce temps de vol dure d'autant plus que la vitesse verticale est grande.

PROBLÉMATIQUE DE L'ANGLE DE VISÉE

Pour une intensité de vitesse donnée, l'angle de visée correspond à un équilibre entre les composantes horizontale et verticale de la vitesse. Avec un angle de visée à 90° par exemple, la composante horizontale de la vitesse est nulle tandis que la composante verticale est maximale. Ainsi, le temps de vol sera le plus long mais la distance parcourue sera nulle, le boulet retombant au point D. À l'opposé, un angle de visée nul correspond à la plus grande vitesse horizontale. Le boulet va se déplacer rapidement vers l'avant mais la vitesse verticale nulle fera chuter la durée du vol ne permettant pas au boulet de maximiser sa portée.

Quel est alors l'angle de visée idéal ? 45° pourrait-on supposer. Ce serait exact si les hauteurs d'éjection et d'impact étaient les mêmes. Mais dans notre cas du lancer de poids, ce n'est pas juste. Nous avons vu que partir de plus haut permettait d'augmenter le temps de vol et donc la distance parcourue par rapport au sol.

En fait, l'angle optimal qui permet de maximiser la portée va dépendre à la fois de la hauteur du point d'éjection et de l'intensité de la vitesse. La Figure 2 résume les optimums qu'il conviendrait de rechercher en lancer de poids pour exploiter au mieux les lois universelles de la physique.

OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE

Supposons que la technique gestuelle et l'entraînement d'un lanceur lui permette

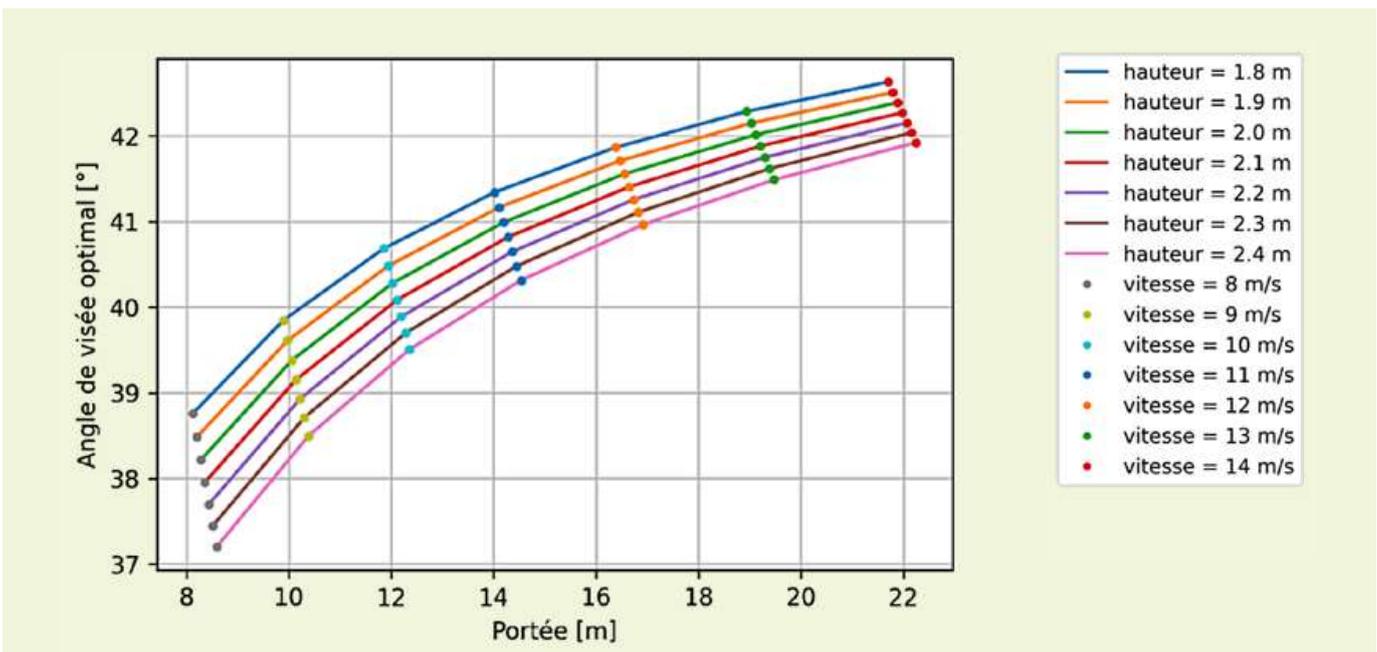


Figure 2 : Angles optimaux de visée permettant d'atteindre la plus grande portée pour différents états d'intensité de vitesse et de hauteur du boulet à l'instant du lâcher.

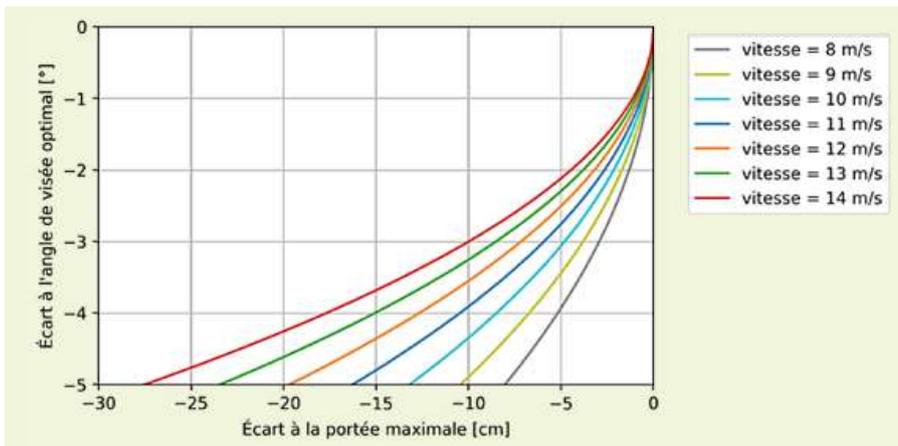


Figure 3 : Perte de performance liée à un angle de visée inférieur à l'angle optimal, pour une hauteur de lâcher à 2,0 m.

de lâcher le boulet à une certaine hauteur avec une intensité de vitesse donnée. Quel angle de visée le lanceur doit-il appliquer au boulet pour maximiser la portée de lancer ?

Dans notre contexte, les équations de la mécanique parlent d'elles-mêmes. Mais elles sont parfois peu pratiques à utiliser au quotidien. La Figure 2 se propose de regrouper un large éventail de cas fréquemment rencontrés, de 1,80 à 2,40 m de hauteur de lâcher et de 8 à 14 m/s d'intensité de vitesse.

Prenons comme exemple un lanceur qui lâche son boulet à 2 m de haut avec une intensité de vitesse à 10 m/s. La hauteur de 2 m est représentée par la courbe verte. La vitesse de 10 m/s est représentée par les points cyan. En considérant donc le point cyan sur la courbe verte, on se rend compte que la portée atteignable est de 12 m à condition de viser à 40,3°.

En regardant la Figure 2 dans sa globalité, on peut tirer quelques généralités telles que :

- Plus la hauteur de lâcher est basse et plus l'angle optimal est grand
- Plus l'intensité de vitesse est basse et plus l'angle optimal est petit, et inversement
- Plus la hauteur de lâcher est haute et plus la portée est grande pour une intensité de vitesse donnée

Globalement, les angles optimaux sont compris entre 37 et 39° pour les faibles intensités de vitesse et aux alentours de 42° pour les intensités plus importantes.

Au cours des mesures réalisées avec la plateforme de mesure et d'analyse du lancer de poids au CREPS de Poitiers, il a souvent été relevé des angles de visées inférieurs aux angles optimaux. Mais est-ce si grave de viser un peu bas ?

La Figure 3 présente les centimètres perdus pour une intensité de vitesse donnée quand l'angle de visée réalisé s'éloigne de l'angle optimal. L'exemple de cette figure est pris pour une hauteur de lâcher de 2,0 m. Cette hauteur a peu d'influence sur les ordres de grandeurs obtenus. Si on prend pour exemple la vitesse d'intensité 13 m/s, on se rend compte que viser 4° trop bas fait perdre 15 cm de performance.

Globalement, avec 2° d'erreur, la perte reste inférieure à 5 cm. L'erreur de visée a une influence plus faible sur les lancers de faible intensité de vitesse. A contrario, plus l'intensité de vitesse est grande et plus le gain à viser au bon angle est prépondérant.

CONCLUSION

Le lancer de poids comprend deux phases balistiques interne et externe. La balistique extérieure est entièrement déterminée par l'état du boulet en fin de balistique interne. Une trajectoire aérienne optimale du boulet, c'est-à-dire permettant une portée maximale, résulte d'un compromis entre la hauteur du point de lâcher, l'intensité de la vitesse du centre du boulet et son orientation au moment du lâcher. Les abaques des Figure 2 et Figure 3 résument ces compromis pour des lanceurs de différents niveaux.

Estimer l'état du boulet (hauteur et vitesse) à l'instant du lâcher permet d'évaluer le potentiel d'un lanceur et d'orienter les consignes d'entraînement vers les paramètres physiques désirés du boulet. Avec de la méthode et de la rigueur, la mesure de ces paramètres peut être envisagée en première approximation avec un logiciel comme Kinovea.

Cependant, est-ce qu'une trajectoire aérienne optimale est suffisante ? Non. La position du point d'éjection par rapport au centre de l'aire et l'orientation du plan de vol permette aussi des gains de performances.

Ce qu'il faut retenir, c'est que la performance en lancer de poids est multifactorielle mais qu'il est possible de quantifier l'importance de chacun de ces facteurs sur la performance produite en étudiant la trajectoire aérienne du centre du boulet par rapport à l'aire de lancer. Ces données objectives doivent permettre d'évaluer le potentiel d'un lanceur et de suivre l'impact des entraînements réalisés.

En perspective, pour décortiquer en détails la phase de mise en mouvement du boulet, il faut savoir qu'il est possible de mesurer précisément en trois dimensions le mouvement du boulet et des segments corporels du lanceur avec un système de « caméras 3D ». C'est ce type d'outil qui a été utilisé pour le lancer de poids (Thèse de Fabien Achard de Leluardière, 2005) et que le CAIPS⁽¹⁾ met en œuvre régulièrement pour différents sports. Enfin, nous étudions avec attention toute candidature spontanée en ingénierie du sport pour faire évoluer nos protocoles et instrumentations.

REMERCIEMENT

Une pensée toute particulière pour Gérard Lacroix, Entraîneur d'Athlétisme et féru de biomécanique. Tu as toujours été disponible pour tous les athlètes de tous niveaux. Merci pour tout ce que j'ai appris auprès de toi.

BIBLIOGRAPHIE

[FADL05] Contribution à la formation des entraîneurs par la recherche en mécanique humaine. Deux spécialités : le lancer du poids et la course de vitesse. Thèse de doctorat de l'université de Poitiers soutenue le 14/03/2005 par Fabien Achard de Leluardière, <https://www.theses.fr/2005POIT2261>.

[Kin22] <https://www.kinovea.org/>, consulté le 28/11/2022.

[Wik22] Approche mathématique de la balistique extérieure, https://fr.wikipedia.org/wiki/Balistique#Approche_math%C3%A9matique_de_la_balistique_ext%C3%A9rieure, consulté le 24/11/2022. >>

1. Le Centre d'Analyse d'Images et Performance Sportive est un consortium d'accompagnement scientifique à la performance sportive regroupant les partenaires suivants : CNRS, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, CRIIT Sport Loisirs, CREPS de Poitiers. <http://www.caips.fr/>