

Optimisation de la performance au lancer de poids en EPS: Approche biomécanique des paramètres de projection

Mohamed AL-HATTAB 1,2, / Mohammed RAJI 3

1. The Laboratory of Engineering in Chemistry and Physics of Matter Faculty of Sciences and Technics, Sultan Moulay Slimane University, BP 523, 23000, Beni Mellal, Morocco.
2. PSES, ERC, Ecole Normale Supérieure, Mohammed V University in Rabat P. O. Box: BP5118 Takkadoun Rabat-10000, Morocco
3. The Higher School of Teachers – Moulay Ismail University
Corresponding author: med.alhattab@gmail.com

Résumé :

Cette étude vise à analyser l'influence de trois paramètres biomécaniques fondamentaux (angle d'envol, hauteur de lâcher et vitesse de lâcher) sur la performance du lancer de poids chez des élèves du secondaire (16–18 ans). Une approche expérimentale quantitative a été adoptée auprès de 200 élèves, garçons et filles, du lycée Omar Ben Abdelaziz à Timoulilt (Maroc). Les participants ont réalisé plusieurs essais de lancer dans différentes conditions expérimentales contrôlant successivement l'angle de projection, la hauteur de lâcher et la présence d'élan. Les résultats montrent que la performance varie significativement selon les conditions testées. L'angle optimal observé est d'environ 38° , inférieur à la valeur théorique de 45° , confirmant l'influence des contraintes biomécaniques humaines. L'ajout d'une plinthe améliore légèrement la performance sans modifier la variabilité des résultats. Enfin, la présence d'un élan entraîne une amélioration nette et stable des performances chez les deux sexes. Ces résultats confirment que la vitesse de lâcher constitue le facteur le plus déterminant de la performance, suivie de l'angle d'envol et de la hauteur de lâcher.

Les Mots-Cles : Lancer de poids, Biomécanique du sport, Angle d'envol, Éducation physique et sportive (EPS)

1. Introduction

Dans le lancer de poids, l'athlète cherche à projeter l'engin le plus loin possible tout en restant à l'intérieur du cercle de lancer. Durant la phase de vol, le poids se comporte essentiellement comme un projectile en mouvement libre, et sa trajectoire peut donc être prédite avec précision si l'on dispose d'informations suffisantes sur les conditions de lâcher (Hubbard, 1988 ; de Mestre, 1990). Pour un projectile lancé avec une vitesse constante depuis une hauteur au-dessus du sol, l'angle de lâcher optimal qui maximise la distance horizontale est toujours inférieur à 45° . Lichtenberg et Wills (1978) ont calculé que l'angle optimal devrait être d'environ 42° pour un lancer de niveau mondial atteignant 22 m, à partir d'une hauteur de lâcher typique de 2,14 m.

Il est bien connu que la plupart des lanceurs de poids de niveau mondial utilisent des angles de lâcher plus faibles que ceux prédits par Lichtenberg et Wills. Les angles mesurés varient généralement entre 26° et 45° , avec une moyenne d'environ 37° (Dessureault, 1978 ; McCoy et al., 1984 ; Susanka et Stepanek, 1988 ; Bartonietz et Borgström, 1995 ; Tsirakos et al., 1995 ; Luhtanen et al., 1997). Plusieurs chercheurs (Tricker et Tricker, 1967 ; Hay, 1973, 1993 ; Dyson, 1986 ; Hubbard, 1988 ; de Mestre, 1990 ; de Mestre et al., 1998 ; Maheras, 1998) ont supposé que cette divergence s'explique par le fait que la vitesse de lâcher, la hauteur de lâcher et l'angle de lâcher ne sont pas indépendants, contrairement à ce qui avait été supposé dans le calcul de Lichtenberg et Wills. Hay (1973) a suggéré qu'il pourrait être impossible pour un lanceur de maintenir la même vitesse de lâcher pour une large gamme d'angles de lâcher. Lorsque les lanceurs utilisent un angle de lâcher élevé, ils doivent lutter davantage contre l'effet de la gravité pendant la phase de propulsion, ce qui entraîne généralement une diminution de la vitesse de lâcher du poids. De plus, la structure du corps humain peut favoriser la production de force (et donc de vitesse de lâcher) dans certaines directions plus que dans d'autres.

Red et Zogaib (1977) ont proposé une méthode de calcul de l'angle de projection optimal dans le lancer du javelot, prenant en compte l'interaction entre l'athlète et l'engin pendant la phase de propulsion. Dans une étude menée auprès

de trois lanceurs masculins de javelot, ils ont observé une diminution linéaire de la vitesse de lâcher lorsque l'angle de lâcher augmente. L'angle optimal de lâcher a été calculé en combinant la relation mesurée entre la vitesse de lâcher et l'angle de lâcher pour chaque athlète avec les équations décrivant la trajectoire du javelot durant la phase de vol. Pour l'athlète le plus expérimenté de l'étude, l'angle optimal calculé (37°) correspondait bien aux angles mesurés chez les lanceurs de javelot de niveau mondial (35° – 38°).

Dans la section suivante, un rappel théorique sur le lancer de poids est présenté, ainsi qu'une analyse des effets de la vitesse de lâcher, de la hauteur de lâcher et de l'angle de lâcher sur la portée d'un projectile en vol libre.

Le lancer de poids exige une grande force explosive, ainsi que la capacité d'exécuter des mouvements précisément synchronisés dans un espace restreint. L'objectif de l'athlète est de projeter le poids le plus loin possible, mais les règlements de la compétition limitent la technique pouvant être utilisée. Le poids doit être lancé depuis l'épaule avec une seule main et doit rester près du menton pendant tous les mouvements préparatoires (IAAF, 2000).

Pendant toute l'exécution du lancer, l'athlète doit rester à l'intérieur d'un cercle de 2,135 m de diamètre, doté à l'avant d'une butée (stop board) de 10 cm de hauteur. Les deux techniques de lancer les plus utilisées sont la technique du glissé (glide technique) et la technique rotationnelle (rotational technique) (Figure. 1). Ces techniques diffèrent principalement dans les mouvements préliminaires permettant à l'athlète de se déplacer à l'intérieur du cercle de lancer, mais la phase finale de propulsion (phase de délivrance) est similaire dans les deux techniques.

Durant la phase de propulsion, l'athlète applique une force sur le poids grâce à une extension explosive des jambes, combinée à une élévation et une rotation du tronc, suivies par une extension rapide du bras dans la direction du lancer.

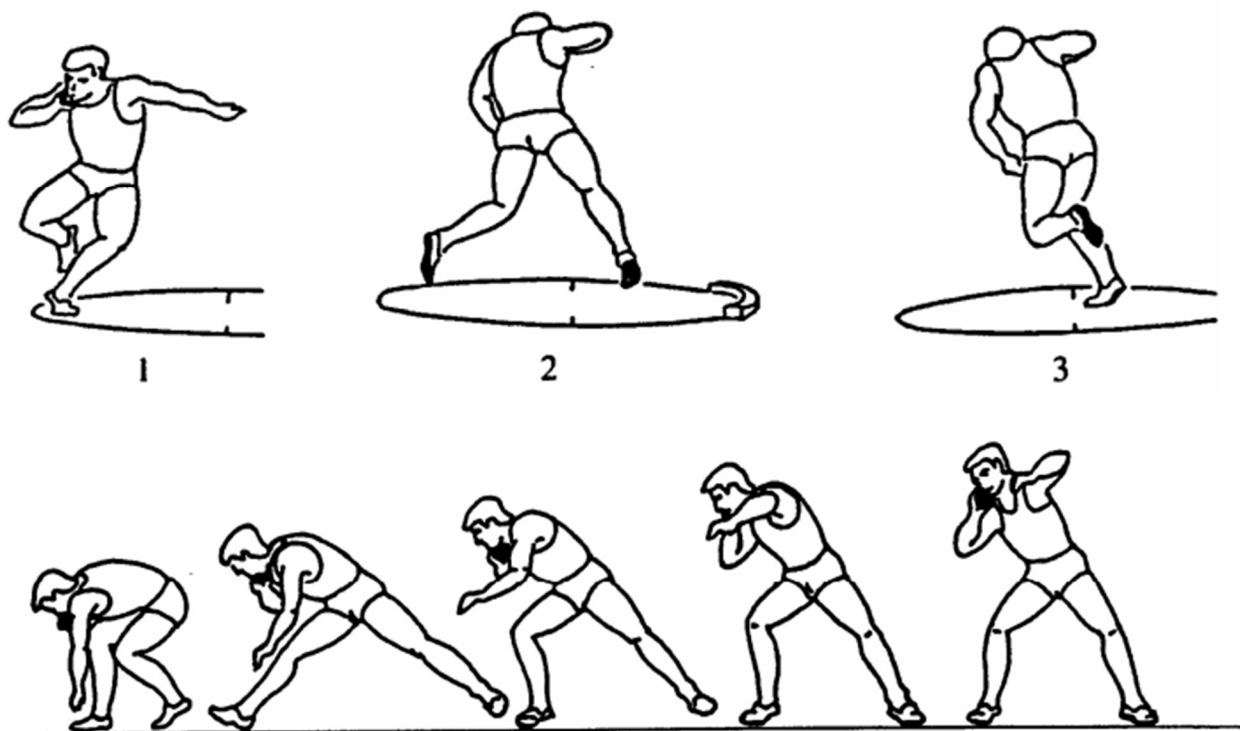


Figure 1 : Les deux techniques de lancer les plus utilisées

La performance au lancer de poids est mesurée par la distance officielle (d_{official}), qui correspond à la distance entre le bord intérieur du cercle de lancer et la marque la plus proche laissée par la chute du poids. Cette distance officielle peut être considérée comme la somme de trois distances (Hay, 1993) :

- la distance de lâcher (d_{release})
- la distance de vol (d_{flight})
- la distance d'atterrissage (d_{landing})

La distance de lâcher correspond à la distance horizontale entre le bord intérieur de la butée et le centre de masse du poids au moment du lâcher. La distance de vol correspond à la distance horizontale parcourue par le centre de masse du poids entre

l'instant du lâcher et celui de l'atterrissage. La distance d'atterrissage correspond à la distance horizontale entre le centre de masse du poids au moment de l'atterrissage et la marque au sol la plus proche du cercle de lancer.

Dans la plupart des lancers, la distance de vol est presque égale à la distance officielle. La distance de lâcher est généralement faible, mais elle peut être positive ou négative, selon la proximité du corps de l'athlète par rapport à la butée et l'angle du bras lanceur par rapport à l'horizontale. La distance d'atterrissage, quant à elle, constitue toujours une très petite composante négative de la distance officielle.

Dans les disciplines d'athlétisme, et particulièrement dans le lancer de poids, la performance dépend de l'interaction entre plusieurs variables biomécaniques liées à la production et à la transmission de la force. Selon Vladimir Zatsiorsky, les performances dans les épreuves de lancer sont principalement déterminées par la capacité de l'athlète à générer une vitesse élevée au moment de la libération de l'engin tout en contrôlant la direction et la hauteur de projection (Zatsiorsky, V. M., & Kraemer, W. J. (2006)). Le lancer de poids peut être considéré comme un mouvement projectile, dans lequel l'engin suit une trajectoire parabolique déterminée par les lois de la mécanique classique.

La littérature scientifique identifie trois paramètres fondamentaux qui influencent la distance de projection dans les épreuves de lancer, la vitesse de lâcher, l'angle d'envol, et la hauteur de lâcher. Ces variables déterminent la trajectoire du projectile et donc la distance finale parcourue.

La vitesse de lâcher : représente la vitesse initiale de l'engin au moment de sa libération. Elle est généralement considérée comme le facteur le plus déterminant de la performance. Les recherches en biomécanique montrent que la distance du lancer augmente de manière proportionnelle avec l'augmentation de la vitesse initiale du projectile. Selon les travaux de Angus M. Linthorne, la vitesse de lâcher explique une grande partie de la variance observée dans la performance des lanceurs de poids. La production de cette vitesse dépend principalement de la force musculaire, la coordination segmentaire, **et** la technique de transfert d'énergie du corps vers l'engin (Linthorne, A. M. (2001)).

L'angle d'envol : correspond à l'angle formé entre la trajectoire initiale de l'engin et le plan horizontal au moment du lâcher. D'un point de vue théorique, un projectile lancé dans le vide avec une vitesse initiale donnée atteindrait sa distance maximale avec un angle de 45° . Cependant, dans le lancer de poids, l'angle optimal observé est généralement plus faible. Les études menées par Angus M. Linthorne montrent que l'angle optimal se situe généralement entre 35° et 40° , en raison de la présence d'une hauteur de lâcher positive et des contraintes biomécaniques liées à la production de force l'engin (Linthorne, A. M. (2001)).

La hauteur de lâcher : correspond à la distance verticale entre le point de libération de l'engin et le sol. Elle dépend principalement de la taille de l'athlète, la longueur du bras, et l'extension corporelle au moment du lâcher. Une hauteur de lâcher plus élevée permet d'augmenter le temps de vol du projectile et peut contribuer à améliorer la distance du lancer. Selon Robert M. Judge, la hauteur de lâcher joue un rôle complémentaire dans la performance, bien que son influence soit généralement moins importante que celle de la vitesse de lâcher (Judge, R. M. (1997)).

Le lancer de poids peut être analysé à l'aide du modèle du mouvement projectile, basé sur les lois fondamentales de la mécanique classique. La trajectoire du poids est décrite par les équations suivantes (Goldstein, H. (1980)):

Position horizontale :

$$x(t) = v_0 \cos(\theta)t$$

Position verticale :

$$y(t) = h + v_0 \sin(\theta)t - \frac{1}{2}gt^2$$

Le temps de vol est obtenu lorsque $y(t) = 0$

où :

v_0 : vitesse de lâcher, θ : angle d'envol, h : hauteur de lâcher, g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2)

Distance théorique du lancer

$$D = \frac{v_0 \cos(\theta)}{g} (v_0 \sin(\theta) + \sqrt{(v_0 \sin(\theta))^2 + 2gh})$$

La distance du lancer dépend donc directement de ces trois paramètres biomécaniques.

Dans le contexte de l'éducation physique et sportive, l'analyse biomécanique du lancer de poids permet d'améliorer la compréhension des facteurs qui influencent la performance des élèves. Selon Roger Bartlett, l'utilisation de principes biomécaniques dans l'enseignement du sport permet d'améliorer l'efficacité technique des gestes sportifs, faciliter l'apprentissage moteur, et d'optimiser les performances (Bartlett, R. (2007). Dans le cadre scolaire, l'enseignement du lancer de poids doit donc intégrer les principes biomécaniques fondamentaux afin de développer chez les élèves (la coordination motrice, la production de force, la maîtrise de l'angle et de la trajectoire de projection).

En nous basant sur ces réflexions, nous nous sommes posé la question suivante :

Dans quelle mesure les paramètres biomécaniques du lancer de poids, notamment la vitesse de lâcher, l'angle d'envol et la hauteur de lâcher, influencent-ils la performance du lancer chez les élèves du secondaire qualifiant en éducation physique et sportive ?

La réponse à cette question nécessite le passage par un certain nombre de questions subsidiaires :

- Quel est l'effet de l'angle d'envol sur la distance du lancer de poids ?
- La hauteur de lâcher influence-t-elle significativement la performance du lancer ?
- Quel est l'impact de la vitesse de lâcher sur la distance de projection ?

Hypothèses de recherche : La performance au lancer de poids dépend significativement des paramètres biomécaniques liés au lâcher de l'engin, notamment la vitesse de lâcher, l'angle d'envol et la hauteur de lâcher.

Objectif de la recherche : L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des paramètres biomécaniques du lancer de poids, notamment la vitesse de lâcher, l'angle d'envol et la hauteur de lâcher, sur la performance des élèves du secondaire qualifiant dans le cadre de l'enseignement de l'éducation physique et sportive.

Pour atteindre cet objectif, l'étude s'est concentrée sur plusieurs axes principaux : l'évaluation de l'effet de l'angle d'envol sur la distance de projection, l'analyse de l'influence de la hauteur de lâcher sur la performance, ainsi que l'étude de l'impact de la vitesse de lâcher sur la distance du lancer. L'étude vise également à comparer les performances des garçons et des filles afin d'identifier d'éventuelles différences biomécaniques liées au sexe. Enfin, cette recherche cherche à déterminer le paramètre biomécanique le plus déterminant dans la réussite du lancer de poids et à mettre en évidence l'intérêt de l'approche biomécanique dans l'amélioration de l'enseignement et de l'apprentissage du lancer de poids en EPS.

2. Méthodologie

L'étude a été menée auprès de 200 élèves du lycée, âgés de 16 à 18 ans, inscrits aux cours d'éducation physique et sportive (EPS). Les participants provenaient du lycée Omar Ben Abdelaziz, situé à Timoulilt, direction provinciale d'Azilal (Maroc). La sélection des participants a été réalisée selon des critères d'inclusion et d'exclusion prédéfinis, présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Critères d'inclusion et d'exclusion des participants à l'étude	
Les critères d'inclusion	Les critères exclusion
-Inscrit au cycle secondaire qualifiant (lycée)	-Non-inscription au cycle secondaire qualifiant
-Participer régulièrement aux séances d'EPS	-Absence ou participation irrégulière aux séances d'EPS.
-Ne présenter aucune blessure musculo-squelettique susceptible	-Blessures musculo-squelettiques actives

d'affecter la performance au lancer de poids	-Refus de participer.
--	-----------------------

Avant le début de l'expérimentation, les élèves ont été informés des objectifs et du déroulement de l'étude. Les principes éthiques relatifs à la recherche scientifique et à la participation volontaire ont été respectés. Cette recherche adopte une approche expérimentale quantitative visant à analyser l'influence de trois variables biomécaniques sur la performance du lancer de poids (l'angle d'envol de l'engin ($^{\circ}$), la hauteur de lâcher de l'engin (m), la vitesse de lâcher de l'engin (m/s)). La variable dépendante de l'étude est la distance du lancer (m). Cette conception expérimentale permet d'évaluer la contribution relative de chaque variable biomécanique à la performance globale.

L'expérimentation s'est déroulée durant plusieurs séances d'éducation physique et sportive (EPS). Dans un premier temps, tous les participants ont réalisé un échauffement standardisé d'une durée d'environ 15 minutes comprenant une course légère, des exercices de mobilisation articulaire ainsi que des exercices spécifiques liés au lancer. Ensuite, l'enseignant a présenté aux élèves les principes techniques fondamentaux du lancer de poids, notamment la position initiale, la phase de poussée de l'engin et la phase de lâcher. Après cette phase d'explication, chaque élève a effectué trois essais de lancer à partir du cercle réglementaire. Un temps de récupération suffisant a été accordé entre chaque essai afin d'éviter la fatigue et de garantir la fiabilité des performances. Par ailleurs, l'ensemble des mouvements a été enregistré à l'aide d'une caméra afin de permettre une analyse ultérieure des paramètres biomécaniques. Enfin, pour chaque participant, la meilleure performance parmi les trois essais a été retenue pour l'analyse statistique.

3. Résultat et discussion

Afin d'analyser l'influence des paramètres biomécaniques sur la performance du lancer de poids, l'expérimentation a été organisée en trois phases expérimentales successives, chacune visant à étudier l'effet d'un facteur spécifique sur la distance du

lancer (l'angle d'envol, la hauteur de lâcher de l'engin, la vitesse de lâcher de l'engin). Pour chaque phase, un facteur était contrôlé ou modifié, tandis que la performance était évaluée à partir de la distance du lancer.

3.1 Première phase : influence de l'angle d'envol

Afin d'étudier l'influence de l'angle d'envol sur la distance du lancer, les élèves ont été guidés pour réaliser leurs lancers selon trois angles approximatifs : 30°, 38° et 45°. Pour contrôler ces angles, un repère visuel a été utilisé. Une barre légère ou une corde a été placée devant la zone de lancer et orientée selon les angles souhaités par rapport à l'horizontale. L'enseignant a également effectué une démonstration préalable afin d'aider les élèves à comprendre la direction de projection correspondante à chaque angle. Les participants ont ensuite été invités à réaliser leurs lancers en essayant de diriger la trajectoire initiale du poids vers le repère correspondant à l'angle demandé. Chaque élève a effectué trois essais pour chaque angle, et la meilleure performance a été retenue pour l'analyse. Dans certains cas, une analyse vidéo latérale a été utilisée afin de vérifier approximativement l'angle de projection au moment du lâcher.

La performance a été évaluée à partir de la distance horizontale parcourue par le poids. La distance a été mesurée entre le bord interne du cercle de lancer, et le premier point d'impact du poids au sol. La mesure a été réalisée à l'aide d'un ruban métrique gradué, avec une précision d'environ 1 centimètre. La distance moyenne a ensuite été calculée pour chaque condition expérimentale. La formule de la moyenne est :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

où :

x_i représente la distance de chaque lancer

n représente le nombre total d'observations.

L'écart-type a été utilisé pour mesurer la **dispersion des performances autour de la moyenne**. La formule de l'écart-type est :

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

x_i représente chaque valeur mesurée, \bar{x} représente la moyenne des distances, n représente le nombre d'élèves. Un écart-type faible indique que les performances des élèves sont relativement homogènes, tandis qu'un écart-type élevé reflète une plus grande variabilité entre les participants. Les résultats ont été analysés séparément pour les garçons et les filles afin d'identifier d'éventuelles différences dans l'influence de l'angle d'envol sur la performance. Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour chaque groupe et pour chaque angle étudié. Cette analyse comparative permet d'évaluer si l'angle optimal varie selon le sexe ou si les tendances observées sont similaires entre les deux groupes.

a. Statistiques descriptives

L'analyse descriptive des performances met en évidence des différences nettes entre les garçons et les filles pour l'ensemble des angles d'envol testés (30°, 38° et 45°). Chez les garçons, les distances moyennes obtenues sont respectivement de 8,37 m à 30°, 9,07 m à 38° et 8,58 m à 45°, avec des écarts-types relativement stables (1,46 à 1,48 m). Chez les filles, les performances sont plus faibles mais présentent la même tendance, avec des valeurs de 5,21 m, 5,81 m et 5,32 m et un écart-type constant de 0,87 m. Les moyennes globales confirment cet écart de niveau, avec une performance moyenne de 8,67 m chez les garçons contre 5,45 m chez les filles.

Tableau 1 : Effet de l'angle d'envol sur la distance de lancer chez les garçons et les filles

Angle d'envol	Distance moyenne (m)		Écart-type	
	Garçons	Filles	Garçons	Filles
30°	8.37	5.21	1.46	0.87

38°	9.07	5.81	1.48	0.87
45°	8.58	5.32	1.48	0.87

b. Effet de l'angle d'envol sur la performance

Les résultats montrent une influence claire de l'angle d'envol sur la distance de lancer, avec une évolution non linéaire commune aux deux groupes. Dans les deux cas, la performance augmente entre 30° et 38°, puis diminue à 45°, traduisant une relation de type quadratique. L'angle de 38° apparaît comme l'angle optimal expérimental, produisant les meilleures performances chez les garçons (9,07 m) et chez les filles (5,81 m). Ce résultat suggère que l'optimisation de la performance ne suit pas l'angle théorique de 45° attendu en conditions idéales, mais dépend de contraintes biomécaniques propres à l'exécution humaine.

c. Analyse de la variabilité interindividuelle

L'étude des écarts-types révèle une variabilité plus importante chez les garçons ($\approx 1,46-1,48$ m) comparativement aux filles (0,87 m constant). Cette différence suggère une plus grande hétérogénéité des stratégies motrices chez les garçons, tandis que les filles présentent une exécution plus homogène mais globalement moins performante.

d. Analyse de la différence entre sexes

L'écart de performance entre garçons et filles est stable à travers les trois angles testés, avec une différence moyenne d'environ 3,2 m en faveur des garçons. Cette stabilité suggère l'absence d'interaction entre le sexe et l'angle d'envol, indiquant que l'effet de l'angle est similaire pour les deux groupes.

e. Modélisation par régression quadratique

Une régression polynomiale de second degré permet de modéliser la relation entre l'angle d'envol et la performance. Les équations obtenues prennent la forme :

$$\text{Garçons : } y = -0.0105x^2 + 0.80105x - 6.225$$

$$\text{Filles : } y = -0.0097x^2 + 0.7323x - 8.06$$

Le coefficient négatif du terme quadratique confirme la forme concave de la courbe, indiquant l'existence d'un maximum. Le calcul du sommet de la parabole montre un angle optimal très proche pour les garçons : $\approx 38,1^\circ$, et pour les Filles : $\approx 37,8^\circ$. Ces résultats confirment empiriquement que l'angle optimal de performance se situe autour de 38° .

f. Interprétation biomécanique

L'angle optimal observé est inférieur à la valeur théorique de 45° prédite dans des conditions idéales sans résistance de l'air ni contraintes motrices. Cette différence peut être expliquée par plusieurs facteurs biomécaniques, notamment la vitesse de libération du projectile, la hauteur de lâcher, ainsi que les contraintes de coordination segmentaire propres au geste de lancer. Ainsi, les sujets adoptent un compromis entre vitesse et angle afin d'optimiser la distance, ce qui explique l'optimum expérimental à environ 38° .

3.2 Effet de la hauteur de lâcher selon le sexe

Afin d'étudier l'influence de la hauteur de lâcher sur la performance du lancer de poids, les élèves ont été invités à réaliser les lancers dans deux conditions expérimentales différentes, permettant de modifier la hauteur initiale du projectile.

Condition sans plinthe : Dans cette condition, les élèves réalisent le lancer de poids en position normale à partir du sol, conformément aux règles habituelles du lancer. La hauteur de lâcher correspond alors à la hauteur naturelle du bras au moment de l'extension complète, généralement comprise entre 1.70 m et 1.90 m selon la taille de l'élève.

Condition avec plinthe : Dans cette deuxième condition, les élèves réalisent le lancer en étant placés sur une plinthe de gymnastique d'une hauteur d'environ 30 à 40 cm. Cette situation permet d'augmenter artificiellement la hauteur de lâcher du projectile, atteignant en moyenne environ 2.10 m.

a. Statistiques descriptives

L'analyse descriptive des performances en fonction de la condition expérimentale (sans plinthe vs avec plinthe) montre des différences légères mais constantes chez les deux groupes. Chez les garçons, la distance moyenne passe de 8,44 m sans plinthe à 8,60 m avec plinthe, avec un écart-type stable de 1,22 m dans les deux conditions. Chez les filles, la performance évolue de 5,06 m à 5,22 m, avec un écart-type constant de 0,87 m.

Tableau 2: Effet de la condition de réalisation (avec et sans plinthe) sur la distance de lancer chez les garçons et les filles

Condition	Distance moyenne (m)		Écart-type	
	Garçons	Filles	Garçons	Filles
Sans plinthe	8.44	5.06	1.22	0.87
Avec plinthe	8.60	5.22	1.22	0.87

b. Effet de la condition expérimentale

Les résultats indiquent une amélioration légère mais systématique de la performance lorsque la plinthe est présente, et ce pour les deux sexes. Cette amélioration homogène suggère un effet positif mais faible de la condition “avec plinthe” sur la performance de lancer.

c. Analyse de la variabilité

Les écarts-types restent constants dans les deux conditions, (Garçons : 1,22 m, Filles : 0,87 m). Cette stabilité indique que la présence de la plinthe n'influence pas la dispersion des performances, mais agit uniquement sur le niveau moyen de réussite.

d. Interprétation pédagogique et biomécanique

L'amélioration observée avec la plinthe peut s'expliquer par un effet de guidage moteur ou de stabilisation du geste, permettant aux élèves d'améliorer légèrement

leur coordination lors du lancer. La plinthe pourrait ainsi jouer un rôle de repère spatial facilitant l'optimisation de la trajectoire du mouvement. Cependant, l'effet reste limité, ce qui suggère que la performance dépend principalement d'autres variables biomécaniques telles que la vitesse de libération, l'angle d'envol et la coordination segmentaire.

3.3 Effet de la vitesse de lâcher selon le sexe

Afin d'analyser l'influence de la vitesse de lâcher sur la performance du lancer de poids, les élèves ont été invités à réaliser les lancers dans les deux conditions expérimentales différentes, permettant de produire des vitesses de sortie variables :

Condition sans élan : Les élèves réalisent le lancer à partir d'une position statique, sans déplacement préalable. Cette situation limite la production de vitesse et correspond à une vitesse moyenne approximative d'environ 9 m/s.

Condition avec élan ; Les élèves réalisent le lancer avec une phase d'élan ou de déplacement contrôlé, permettant d'augmenter la production de force et la vitesse de projection. Cette situation permet d'atteindre une vitesse moyenne d'environ 13 m/s.

a. Statistiques descriptives

L'analyse descriptive des résultats met en évidence une amélioration nette de la performance lorsque la condition de lancer passe de « sans élan » à « avec élan », aussi bien chez les garçons que chez les filles. Chez les garçons, la distance moyenne augmente de 8,54 m sans élan à 9,35 m avec élan, avec des écarts-types très proches (1,02 m et 1,04 m). Chez les filles, la performance évolue de 5,20 m à 6,04 m, avec une variabilité également stable (0,95 m et 0,96 m).

Tableau 3: Effet de la prise d'élan sur la distance de lancer chez les garçons et les filles

Condition	Distance moyenne (m)		Écart-type	
	Garçons	Filles	Garçons	Filles

Sans élan	8.54	5.20	1.02	0.95
Avec élan	9.35	6.04	1.04	0.96

b. Effet de la condition (élan vs sans élan)

Les résultats montrent un effet positif et marqué de l'élan sur la performance. Cette amélioration est relativement similaire entre les deux groupes, ce qui suggère que l'élan bénéficie de manière équivalente aux garçons et aux filles.

c. Analyse de la variabilité

Les écarts-types restent très proches dans les deux conditions, (Garçons : 1,02 → 1,04, Filles : 0,95 → 0,96). Cette stabilité montre que l'introduction de l'élan n'augmente pas la dispersion des performances, mais agit uniquement sur le niveau moyen.

d. Interprétation biomécanique

L'amélioration observée avec l'élan peut s'expliquer par l'augmentation de la vitesse initiale du projectile. L'élan permet une meilleure transmission des forces à travers la chaîne cinétique, améliorant ainsi la vitesse de libération et, par conséquent, la distance de lancer. Cette condition favorise également une meilleure utilisation de l'impulsion corporelle globale, ce qui explique l'amélioration systématique des performances.

4. Vérification de l'hypothèse

La vérification de l'hypothèse montre que la performance au lancer de poids dépend significativement des paramètres biomécaniques liés au moment du lâcher de l'engin, notamment la vitesse de lâcher, l'angle d'envol et la hauteur de lâcher. Les résultats expérimentaux obtenus confirment que ces variables influencent directement la distance de projection réalisée par les élèves. En effet, l'augmentation de la vitesse de lâcher à travers la condition avec élan a entraîné une amélioration

importante des performances, ce qui met en évidence le rôle déterminant de la vitesse initiale dans le lancer de poids. Ces résultats rejoignent les travaux de Angus M. Linthorne, qui a démontré que la vitesse de lâcher constitue le facteur biomécanique le plus important dans la performance du lancer de poids, expliquant une grande partie de la variance de la distance projetée (Linthorne, (2001)). De même, Vladimir Zatsiorsky et William J. Kraemer ont souligné que la capacité à produire une vitesse élevée au moment de la libération de l'engin représente le principal déterminant des performances dans les disciplines de lancer (Zatsiorsky, (2006)).

L'analyse des différents angles d'envol a montré que les meilleures performances ont été obtenues avec un angle proche de 38° , confirmant l'existence d'un angle optimal adapté aux contraintes biomécaniques du geste humain. Ces résultats sont cohérents avec les recherches de Angus M. Linthorne, qui rapporte que l'angle optimal observé chez les lanceurs de poids se situe généralement entre 35° et 40° , soit une valeur inférieure à l'angle théorique de 45° prévu par les modèles mécaniques idéaux (Linthorne, (2001)). Des résultats similaires ont également été observés par Lichtenberg et Willis, ainsi que par Bartonietz et Borgström, qui expliquent cette différence par l'interaction entre la vitesse de lâcher, la hauteur de projection et les contraintes musculaires liées à la production de force (Lichtenberg, (1978), Bartonietz, (1995)).

Par ailleurs, l'augmentation de la hauteur de lâcher a produit une amélioration légère mais constante de la distance du lancer, indiquant que cette variable contribue également à la performance, bien que son influence soit moins importante que celle de la vitesse de lâcher. Cette observation rejoint les conclusions de Robert M. Judge, qui souligne que la hauteur de lâcher augmente le temps de vol du projectile et favorise une amélioration modérée de la distance de projection (Judge, (1979)). Enfin, les résultats obtenus confirment également les analyses de Roger Bartlett, selon lesquelles la performance dans les activités athlétiques résulte d'une interaction complexe entre plusieurs paramètres biomécaniques agissant simultanément lors de l'exécution motrice (Bartlett, R. (2007)). Ainsi, l'ensemble des résultats valide

l'hypothèse générale de l'étude et confirme que la performance du lancer de poids dépend de l'optimisation coordonnée des paramètres biomécaniques du geste technique.

5. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence combinée de trois paramètres biomécaniques essentiels sur la performance du lancer de poids. Les résultats montrent clairement que la vitesse de lâcher constitue le facteur le plus déterminant de la distance de lancer, confirmée par l'amélioration significative des performances en condition avec élan. L'angle d'envol optimal observé expérimentalement se situe autour de 38° , valeur inférieure à celle prédite théoriquement (45°), ce qui s'explique par les contraintes biomécaniques et la relation entre vitesse et angle. La hauteur de lâcher, bien qu'ayant un effet positif, reste un facteur secondaire. Enfin, les différences entre garçons et filles sont constantes mais sans interaction avec les variables étudiées, indiquant des mécanismes biomécaniques similaires entre les deux groupes. Ainsi, la performance en lancer de poids résulte d'un compromis entre vitesse, angle et coordination motrice, confirmant la nature complexe et intégrée de ce geste sportif.

a. Limites de l'étude

Malgré la rigueur méthodologique adoptée dans cette recherche, certaines limites doivent être prises en considération lors de l'interprétation des résultats. Tout d'abord, l'échantillon étudié reste limité à un seul établissement scolaire, ce qui réduit la possibilité de généraliser les résultats à l'ensemble des élèves du secondaire qualifiant. De plus, les paramètres biomécaniques, notamment les angles et les vitesses, ont été contrôlés de manière approximative à l'aide de repères visuels et d'estimations, ce qui peut introduire une certaine marge d'erreur dans les mesures obtenues. Par ailleurs, l'analyse biomécanique réalisée repose essentiellement sur des mesures indirectes basées sur l'enregistrement vidéo et l'estimation des variables, sans recours à des outils de laboratoire de haute précision. En outre, la performance retenue pour chaque participant correspond au meilleur essai réalisé, ce qui peut conduire à une légère surestimation du niveau réel des élèves. Enfin, certaines

variables susceptibles d'influencer la performance, telles que la force musculaire, le niveau technique ou encore l'expérience sportive des participants, n'ont pas été contrôlées dans le cadre de cette étude.

b. Recommandations

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être proposées sur les plans pédagogique, pratique et scientifique. Sur le plan pédagogique en EPS, il apparaît pertinent d'intégrer de manière explicite l'enseignement des principaux paramètres biomécaniques du lancer de poids, notamment la vitesse de propulsion, l'angle d'envol et la hauteur de lâcher, afin d'améliorer la compréhension technique des élèves. L'utilisation d'outils visuels simples, tels que les cordes, les repères au sol ou les vidéos pédagogiques, pourrait également faciliter l'apprentissage de l'angle optimal de projection. Il est par ailleurs recommandé de privilégier des situations pédagogiques avec élan progressif afin de développer simultanément la coordination motrice et la production de force.

Sur le plan de l'entraînement, les résultats suggèrent de mettre davantage l'accent sur le développement de la vitesse de propulsion, considérée comme un facteur déterminant de la performance. Le travail des enchaînements segmentaires entre les jambes, le tronc et les bras devrait également être renforcé afin d'optimiser l'efficacité de la chaîne cinétique lors du lancer. De plus, les exercices proposés devraient être adaptés au niveau des élèves afin de favoriser une progression technique graduelle et sécurisée.

Enfin, sur le plan scientifique, il serait intéressant de poursuivre les recherches en utilisant des outils biomécaniques plus précis, tels que les capteurs de mouvement ou l'analyse tridimensionnelle (3D), afin d'améliorer la fiabilité des mesures. L'élargissement de l'échantillon à plusieurs établissements scolaires et à différents niveaux d'enseignement permettrait également de renforcer la validité externe des résultats. Par ailleurs, l'étude d'autres variables influençant la performance, comme la force explosive, la coordination motrice ou encore la fatigue, pourrait contribuer à une compréhension plus approfondie des déterminants biomécaniques du lancer de poids.

Reference

- Bartlett, R. (2007). *Introduction to Sports Biomechanics: Analysing Human Movement Patterns* (2nd ed.). Routledge.
- Bartonietz, K., & Borgström, A. (1995). *The throwing events at the World Championships in Athletics 1995*.
- de Mestre, N. J. (1990). *The Mathematics of Projectiles in Sport*. Cambridge: Cambridge University Press.
- de Mestre, N. J., et al. (1998). Travaux sur la modélisation avancée du mouvement des projectiles en sport (référence souvent citée dans les analyses biomécaniques du lancer).
- D. K. Tsirakos, R. M. Bartlett and I. A. Kollias, “A comparative study of the release and temporal characteristics of shot put,” *Journal of Human Movement Studies* 28, 227 (1995).
- Dyson, G. H. G. (1986). *The Mechanics of Athletics*. Horwood Publishing.
- Goldstein, H. (1980). *Classical Mechanics* (2nd ed.). Addison-Wesley.
- J. Dessureault, “Selected kinetic and kinematic factors involved in shot putting,” in *Biomechanics VI-B* (edited by E. Asmussen and K. Jørgensen), p 51, Baltimore, MD: University Park Press.
- Judge, R. M. (1997). *Biomechanical factors affecting shot put performance*. *Journal of Sports Sciences*.
- Hay, J. G. (1973). *The Biomechanics of Sports Techniques*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Hay, J. G. (1993). *The Biomechanics of Sports Techniques* (4th ed.). Prentice Hall.
- Hubbard, M., de Mestre, N. J., & Scott, J. (2001). *Journal of Biomechanics*, 34(4), 449–456.
- Hubbard, M. (1988). The throwing events in track and field. *Journal of Biomechanics* / travaux sur la modélisation des projectiles en sport.
- International Association of Athletics Federations (IAAF). (2000). *Coaching manual / technical guidelines for athletics events* (lancer de poids). Monaco: IAAF.
- K. Bartonietz and A. Borgström, “The throwing events at the World Championships in Athletics 1995, Göteborg – Technique of the world’s best

- athletes. Part 1: shot put and hammer throw,” *New Studies in Athletics* 10 (4), 43 (1995).
- Lichtenberg, D. B., & Wills, J. G. (1978). Maximizing the range of the shot put. *American Journal of Physics*, 46(5), 546–549.
 - Linthorne, A. M. (2001). “Optimum release angle in the shot put.” *Journal of Sports Sciences*, 19(5), 359–372.
 - Linthorne, A. M. (2007). *Optimum release angle in the shot put*. *Journal of Sports Sciences*, 25(7), 763–770.
 - Maheras, A. V. (1998). Studies on optimal release parameters in throwing events. *Journal of Sports Sciences* (ou travaux similaires en biomécanique du lancer).
 - M. W. McCoy, R. J. Gregor, W.C. Whiting, R.C. Rich and P. E. Ward, “Kinematic analysis of elite shotputters,” *Track Technique* 90, 2868 (1984).
 - P. Luhtanen, M. Blomquist and T. V`antinen, “A comparison of two elite putters using the rotational technique,” *New Studies in Athletics* 12 (4), 25 (1997).
 - P. Susanka and J. Stepanek, “Biomechanical analysis of the shot put,” *Scientific Report on the Second IAAF World Chamionships in Athletics*, 2nd edn, I/1 (1988), Monaco: IAAF.
 - Red, W. E., & Zogaib, J. (1977). *Javelin and shot put: Optimal angle of release*. *Journal of Biomechanics*, 10(1), 1–10. (référence parfois citée avec variations selon les bases de données)
 - Tricker, R. A. R., & Tricker, B. J. K. (1967). *Introduction to Mechanics*. Oxford University Press.
 - Zatsiorsky, V. M., & Kraemer, W. J. (2006). *Science and Practice of Strength Training* (2nd ed.). Human Kinetics.