

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu

D' – Energy Expenditure and Recovery Dynamics: Validation of the Bartram Mathematical Model During Continuous Exercise

Mohamed Dayaa Eddine Guermat^{*1}, Abderrahmen Hadji²,

• ¹ Université de Bejaia, mohameddayaaeddine.guermat@univ-bejaia.dz ,

• ² Université de Bejaia, abderrahmen.hadji@univ-bejaia.dz, ¹² la boratoire des sciences de l'expertise et de la technologie des activités physique et sports (c1671700) université Alger 3

Date de réception: 02/02/2026

Date d'acceptation: 05/06/2026

Date de publication: 06/06/2026

Résumé:

Cette étude a évalué la validité des modèles continus de Bartram pour prédire le temps jusqu'à l'épuisement (TTE) chez de jeunes footballeurs. Vingt joueurs masculins U19 (~17 ans ; $VO_2 \text{ max} = 50,7\text{--}52,9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) ont réalisé des tests de course pour déterminer la vitesse critique, suivis d'un test continu à 110 % jusqu'à l'épuisement. Les TTE prédits ont été comparés aux TTE réels à l'aide d'analyses statistiques sous Jamovi 2.3.28. Les résultats montrent une sous-estimation systématique des performances ($\approx 220 \text{ s}$ contre $\approx 284 \text{ s}$). Les corrélations entre TTE prédit et réel étaient faibles, avec des R^2 compris entre 0,08 et 0,09. Ces résultats indiquent une validité prédictive limitée du modèle de Bartram en conditions de terrain.

Mot clé: D' ; Dépense énergétique ; Dynamique de récupération ; Modèle de Bartram ; Effort continu

Abstract:

This study evaluated the validity of the continuous Bartram models for predicting time to exhaustion (TTE) in young football players. Twenty male U19 athletes (~17 years; $VO_2 \text{ max} = 50.7\text{--}52.9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) completed running tests to determine critical speed, followed by a continuous run at 110% until exhaustion. Predicted and actual TTE were compared using linear regression analyses. All models underestimated performance ($\approx 220 \text{ s}$ vs. $\approx 284 \text{ s}$). Weak relationships and high prediction errors ($R^2 \approx 0.08\text{--}0.09$; $RMSE \approx 36 \text{ s}$) indicate limited predictive validity under field conditions.

Key words: D' ; Energy expenditure ; Recovery dynamics ; Bartram model ; Continuous Effort

* Author correspondent.

1-Introduction

La compréhension des mécanismes physiologiques limitant la performance d'endurance constitue un enjeu majeur en sciences du sport. Parmi les indicateurs les plus utilisés pour évaluer la tolérance à l'effort et prédire la performance figure le temps jusqu'à l'épuisement (Time to Exhaustion, TTE), qui reflète la capacité d'un individu à soutenir un exercice à intensité constante jusqu'à l'incapacité volontaire (Jones et Carter, 2000). Le TTE est largement employé dans les sports d'endurance et les sports collectifs, notamment le football, où la capacité à maintenir des intensités élevées sur des durées prolongées conditionne la performance individuelle et collective (Buchheit & Laursen, 2013).

Depuis les travaux fondateurs de Monod & Scherrer (1965), le concept de vitesse critique (VC) ou puissance critique (PC) s'est imposé comme un seuil physiologique déterminant, représentant l'intensité maximale pouvant être soutenue sur une longue durée sans dérive progressive vers l'épuisement. Associée à ce seuil, la capacité de travail au-dessus de la VC/PC (D' ou W') correspond à une réserve énergétique finie mobilisée lors des exercices supra-critiques (Poole et al., 2016). L'interaction entre ces deux paramètres permet de modéliser la relation entre l'intensité de l'exercice et le temps jusqu'à l'épuisement.

Plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour estimer la VC/PC et prédire le TTE à partir de tests de durée limitée, parmi lesquels les modèles linéaires, hyperboliques et en temps inverse sont les plus répandus (Jones et al., 2010 ; Skiba et al., 2012). Bien que largement utilisés en laboratoire, ces modèles présentent certaines limites, notamment une sensibilité au protocole expérimental, une variabilité interindividuelle importante et des erreurs de prédiction parfois élevées en conditions de terrain (Black et al., 2015 ; Wright et al., 2017).

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abbderrahmen Hadji

Dans une tentative de dépasser ces limites, Bartram et al., (2018) ont proposé un modèle continu de la puissance/vitesse critique, visant à assurer une continuité mathématique entre les différentes intensités d'exercice et à améliorer la stabilité des estimations du TTE. Ce modèle a suscité un intérêt croissant dans la littérature, en raison de son approche théorique innovante et de sa capacité potentielle à mieux représenter la relation non linéaire entre intensité et durée de l'effort.

Cependant, malgré son attrait conceptuel, la validité prédictive du modèle de Bartram demeure insuffisamment établie, en particulier dans des contextes appliqués impliquant des athlètes jeunes, entraînés et évoluant en milieu réel. Plusieurs études ont montré que les modèles basés sur la VC/PC peuvent sous-estimer ou surestimer le TTE réel, notamment lors d'efforts continus réalisés à des intensités supra-critiques (Vanhatalo et al., 2008 ; Jones et al., 2019). Cette problématique est d'autant plus marquée dans les sports collectifs, où les profils physiologiques sont hétérogènes et les conditions de test moins standardisées que dans les protocoles de laboratoire (Buchheit et al., 2013).

Par ailleurs, la plupart des travaux existants se concentrent sur des disciplines cyclistes ou sur des tests en laboratoire, laissant un vide scientifique concernant l'application du modèle de Bartram en course à pied, et plus particulièrement chez les jeunes footballeurs. Or, chez ces populations, la précision des modèles prédictifs est essentielle pour orienter l'entraînement, prévenir le surmenage et optimiser la performance (Dupont et al., 2004 ; Malone et al., 2017).

Les analyses récentes suggèrent également que la relation entre le TTE prédit et le TTE réel est souvent faible, avec des coefficients de détermination modestes et des erreurs de prédiction élevées, remettant en question la capacité des modèles existants à fournir des estimations fiables à l'échelle individuelle (Karsten et al., 2016) . Ces constats soulignent la nécessité d'évaluer rigoureusement la validité des modèles émergents, tels que celui de Bartram.

**D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du
modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abdderrahmen Hadji**

Ainsi, la question actuelle est de savoir si le modèle de Bartram est réellement valable pour prédire les performances sportives, en particulier le temps réel jusqu'à l'épuisement, lorsqu'il est appliqué à des athlètes de terrain. Cette interrogation revêt une importance pratique majeure, car un modèle insuffisamment valide pourrait conduire à des erreurs d'interprétation physiologique et à des prescriptions d'entraînement inadaptées.

Dans ce contexte, le présent article vise à évaluer la validité prédictive du modèle continu de Bartram, à travers ses différentes formulations (linéaire, hyperbolique et temps inverse), en comparant les TTE prédits aux TTE réellement observés chez de jeunes footballeurs. En s'appuyant sur des analyses descriptives, des nuages de points et des modèles de régression linéaire, cette étude ambitionne de déterminer si le modèle de Bartram constitue un outil pertinent pour la prédiction des performances sportives ou s'il présente des limites significatives en conditions appliquées.

2. Méthodes et matériels

2.1 Participants

Vingt footballeurs amateurs, tous de sexe masculin et en bonne santé, appartenant à la catégorie des moins de 19 ans du club sportif de Sidi Moussa (CSSM), évoluant en division régionale de la Ligue de football de la wilaya d'Alger (Algérie), ont participé à cette étude. L'entraîneur de l'équipe a assuré le rôle de chercheur principal. Les participants ont été informés du protocole de l'étude et leur participation était conditionnée par la signature d'un formulaire de consentement éclairé. Ce formulaire a également été signé par leurs parents et validé par le cachet officiel du président du club. Les participants présentaient un âge moyen de 17 ± 4 ans (moyenne $\pm$ écart-type), une taille moyenne de 173 ± 2 cm et un poids moyen de 65 ± 7 kg. Leur IMC moyen était de $21,8 \pm 1,29$, avec une vitesse aérobie maximale (VAM) moyenne de $14 \pm 4,7$ lors de la session 1

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abdderrahmen Hadji

(S1) et de $15 \pm 1,2$ lors de la session 3 (S3). Leur VO_2 max moyenne était de $50,7 \pm 3$ pour la S1 et de $52,9 \pm 2,37$ pour la S3.

2.2 Matériels

L'expérimentation s'est déroulée sur une piste extérieure de 200 mètres, aménagée à l'aide de cônes disposés sur un terrain de football, les dimensions ayant été mesurées à l'aide d'un mètre ruban. La montre Kalenji BT a été utilisée pour collecter les données de vitesse et de fréquence cardiaque, ainsi que pour déterminer la vitesse critique (VC) ou la puissance critique (PC) et la capacité associée (D' ou W') à l'aide du logiciel EXphysLab, selon trois méthodes de modélisation : linéaire, quadratique et temps inverse (s^{-1}). Après une pause de deux jours, un test continu a été réalisé à 110 % de la VC. Une fois les données enregistrées, un programme Python a été utilisé pour estimer le temps jusqu'à l'épuisement (TTE) selon le modèle de Bartram.

2.3 Plan expérimental et procédure

L'étude s'est étendue sur une période de trois mois. La première session s'est déroulée du 17 au 21 septembre 2024 et la seconde du 16 au 20 novembre 2024. Lors de chaque session, les participants ont réalisé trois tests de course d'une durée de 3, 6 et 12 minutes. Ils ont également effectué un test d'effort continu jusqu'à l'épuisement. Les tests ont été réalisés sur une piste de 200 mètres préalablement aménagée. Pendant ces tests, les athlètes devaient courir soit jusqu'à l'épuisement, soit jusqu'à la fin du temps imparti. Pour chaque session, la distance parcourue et la fréquence cardiaque en fin d'effort ont été enregistrées.

2.4 Analyse statistique

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel Jamovi version 2.3.28. Comme indiqué précédemment, des statistiques descriptives (moyenne $\pm$ écart-type, médiane, minimum, maximum) ont été

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abbderrahmen Hadji

calculées pour le temps prédit jusqu'à l'épuisement (TTE) et le TTE réel. La normalité des données a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro–Wilk ainsi que des graphiques Q–Q. Des régressions linéaires simples ont été réalisées pour les trois modèles de Skiba (linéaire, hyperbolique et temps inverse) afin d'évaluer la relation entre le TTE prédit et le TTE réel. Chaque modèle a fourni le coefficient de corrélation (R), le coefficient de détermination (R²), l'erreur quadratique moyenne (RMSE), la statistique t et la valeur p. Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$ et la taille d'effet a été interprétée selon les recommandations de Cohen (1988). Les performances des modèles ont été évaluées à l'aide des valeurs de R² et de RMSE, dans l'optique de vérifier leur validité prédictive.

3 Résultats

Echantillon

	N	Mean $\pm$ SD (m/s)	Max - Min
Age	20	17.4 $\pm$ 0.50 (y)	17 $\pm$ 18
Weight	20	65.7 $\pm$ 4.27 (	58 $\pm$ 72.5
Height	20	1.73 $\pm$ 0.05	1.65 $\pm$ 1.84
BMI	20	21.8 $\pm$ 1.29	19 $\pm$ 23
VO2max S01	20	50.7 $\pm$ 3	45.5 $\pm$ 56.3
VO2max S03	20	52.9 $\pm$ 2.37	49 $\pm$ 57.4

**D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du
modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji**

3.1 Bartram lineaire continu

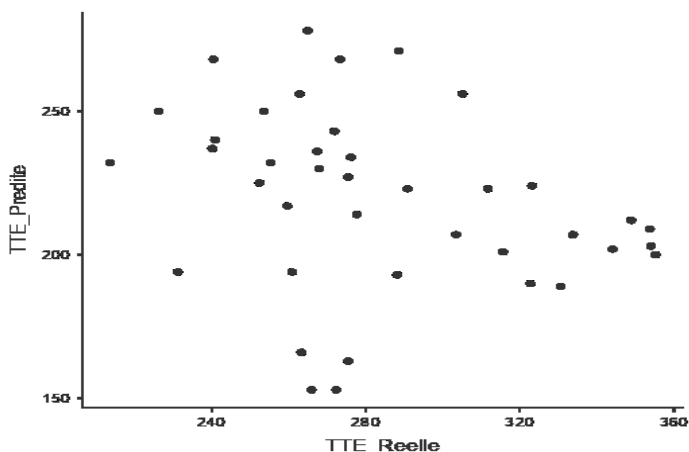
Table 1: Analyse comparative des performances prédites et réelles
(TTE en secondes)

Statistique	TTE Prédit (s)	TTE Réel (s)
N	40	40
Moyenne	219	284
Médiane	223	274
Écart-type	31.0	38.0
Minimum	153	214
Maximum	278	355

Le tableau met en évidence une différence notable entre les performances TTE prédites et réelles pour un échantillon de 40 observations. Les TTE réels sont systématiquement plus élevés que les TTE prédits, comme l'indiquent la moyenne (284 s contre 219 s) et la médiane (274 s contre 223 s), révélant une sous-estimation globale des temps par le modèle de prédiction. Par ailleurs, la dispersion est plus importante pour les valeurs réelles, avec un écart-type de 38 s contre 31 s pour les valeurs prédites, ce qui suggère que le modèle ne capture pas entièrement la variabilité observée en situation réelle. Les valeurs minimales et maximales confirment cette tendance, les TTE réels restant supérieurs aux TTE prédits sur l'ensemble de l'échantillon.

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji

Figure 1: Nuage de points du TTE prédit en fonction du TTE réel – Modèle linéaire continu de Bartram



La figure montre une dispersion marquée des valeurs de TTE prédites en fonction des TTE réels, indiquant une relation faible à modérée entre les deux variables. Les points ne suivent pas clairement une droite de tendance, ce qui suggère que le modèle linéaire continu de Bartram explique imparfaitement la variabilité du TTE réel. On observe également que, pour des valeurs élevées de TTE réel, les TTE prédits tendent à rester plus faibles, confirmant une sous-estimation systématique déjà observée dans l’analyse statistique. Cette dispersion traduit donc une précision limitée du modèle et une capacité restreinte à reproduire fidèlement les performances réelles.

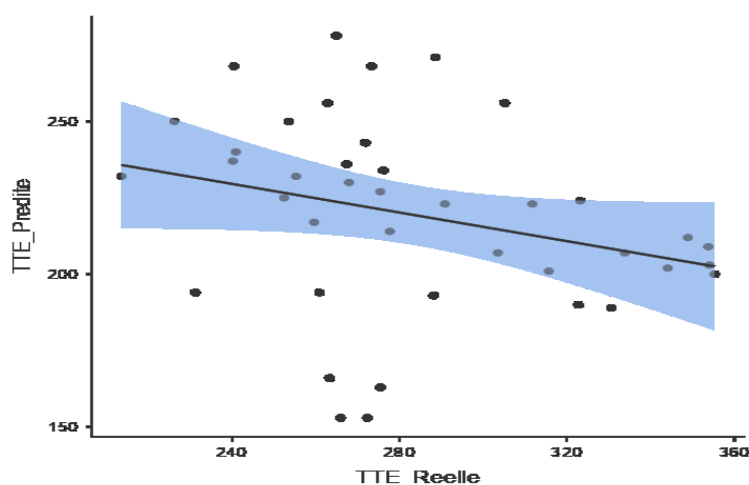
Table 2: Résumé du modèle de régression linéaire du TTE réel en fonction du TTE prédit – Modèle linéaire continu de Bartram

Modèle	R	R²	RMSE	t	p
1	0.285	0.0811	36.0	-1.83	0.075

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abdderrahmen Hadji

Le tableau montre que le modèle de régression linéaire présente une corrélation faible entre le TTE prédit et le TTE réel ($R = 0,285$). Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0811$) indique que le modèle n'explique qu'environ 8 % de la variabilité du TTE réel, ce qui traduit un faible pouvoir explicatif. L'erreur quadratique moyenne ($RMSE = 36$ s) reste relativement élevée, signalant des écarts importants entre les valeurs observées et estimées. Enfin, le test de significativité ($t = -1,83$; $p = 0,075$) montre que la relation n'est pas statistiquement significative au seuil de 5 %, bien qu'elle soit proche du seuil, ce qui suggère une tendance faible mais insuffisante pour conclure à une relation linéaire robuste.

Figure 2: Régression linéaire entre le TTE prédit et le TTE réel – Modèle linéaire continu de Bartram



La figure met en évidence une relation linéaire faible et négative entre le TTE prédit et le TTE réel. La droite de régression présente une pente descendante, indiquant que lorsque le TTE réel augmente, le TTE prédit tend à diminuer légèrement, ce qui est contre-intuitif et révélateur d'un mauvais ajustement du modèle. La large bande

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abbderrahmen Hadji

d'intervalle de confiance et la forte dispersion des points autour de la droite confirment une incertitude élevée et une capacité prédictive limitée du modèle linéaire continu de Bartram. Cette figure illustre donc visuellement la faible corrélation et le manque de robustesse du modèle.

3.2 Bartram hyperbolique continu

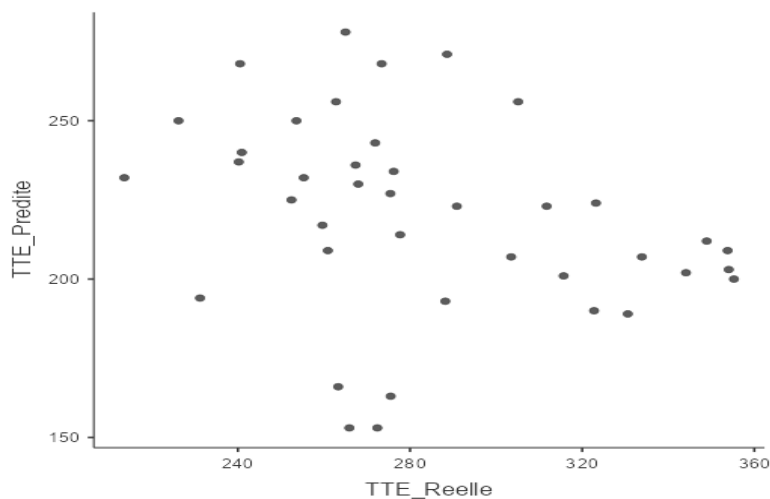
Tableau 3: Analyse comparative des performances prédites et réelles (TTE en secondes)

Statistique	TTE Prédit (s)	TTE Réel (s)
N	40	40
Moyenne	220	284
Médiane	223	274
Écart-type	31.0	38.0
Minimum	153	214
Maximum	278	355

Le tableau 3 présente une comparaison entre le TTE prédit et le TTE réel pour 40 observations. Les résultats montrent que le TTE réel est nettement supérieur au TTE prédit, comme l'indiquent la moyenne (284 s contre 220 s) et la médiane (274 s contre 223 s), révélant une sous-estimation systématique des performances par le modèle. La dispersion est également plus importante pour le TTE réel, avec un écart-type de 38 s contre 31 s pour le TTE prédit, ce qui traduit une variabilité plus élevée des performances observées. Les valeurs minimales et maximales confirment cette tendance, les TTE réels restant globalement plus élevés que les TTE prédits sur l'ensemble de l'échantillon.

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji

Figure 3: Nuage de points du TTE prédit en fonction du TTE réel –
Modèle heyperbolique continu de Bartram



La figure montre une forte dispersion des points du TTE prédit en fonction du TTE réel, sans tendance linéaire clairement identifiable. Les valeurs prédites restent globalement concentrées dans une plage relativement étroite, tandis que les TTE réels s’étendent sur un intervalle plus large, ce qui indique que le modèle hyperbolique continu de Bartram peine à s’adapter aux variations du TTE réel. On observe également une tendance générale à la sous-estimation des TTE élevés, les prédictions demeurant plus faibles lorsque le TTE réel augmente. Cette dispersion suggère une relation faible entre les valeurs prédites et observées, traduisant une capacité prédictive limitée du modèle.

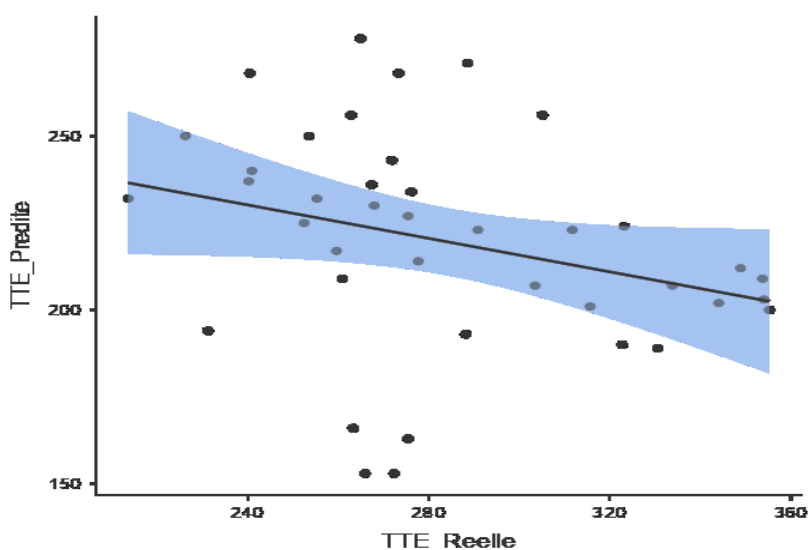
Tableau 4: Résumé du modèle de régression linéaire : TTE réel en fonction du TTE prédit Bartram hyperbolique continu

Modèle	R	R ²	RMSE	t	p
1	0.294	0.0867	35.9	-1.90	0.065

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abdderrahmen Hadji

Le tableau 4 indique que le modèle de régression linéaire basé sur le modèle hyperbolique continu de Bartram présente une corrélation faible entre le TTE prédit et le TTE réel ($R = 0,294$). Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0867$) montre que le modèle n'explique qu'environ 9 % de la variabilité du TTE réel, ce qui traduit un faible pouvoir explicatif. L'erreur quadratique moyenne ($RMSE = 35,9$ s) reste relativement élevée, indiquant des écarts importants entre les valeurs observées et estimées. Enfin, la valeur de p ($p = 0,065$) associée au test t ($t = -1,90$) n'atteint pas le seuil de significativité statistique de 0,05, bien qu'elle en soit proche, suggérant une tendance faible mais non significative de la relation entre les deux variables.

Figure 4: Régression linéaire entre le TTE prédit et le TTE Réel bartram hyperbolique continu



La figure illustre une relation linéaire faible et négative entre le TTE prédit et le TTE réel pour le modèle hyperbolique continu de Bartram. La droite de régression présente une pente descendante, indiquant que l'augmentation du TTE réel s'accompagne d'une légère diminution du TTE prédit, ce qui traduit une inadéquation du modèle. La dispersion

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji

importante des points autour de la droite ainsi que la largeur de l'intervalle de confiance soulignent une forte incertitude et une capacité prédictive limitée. Cette figure confirme visuellement le faible pouvoir explicatif du modèle observé dans les résultats statistiques.

3.3 Bartram inverse temps

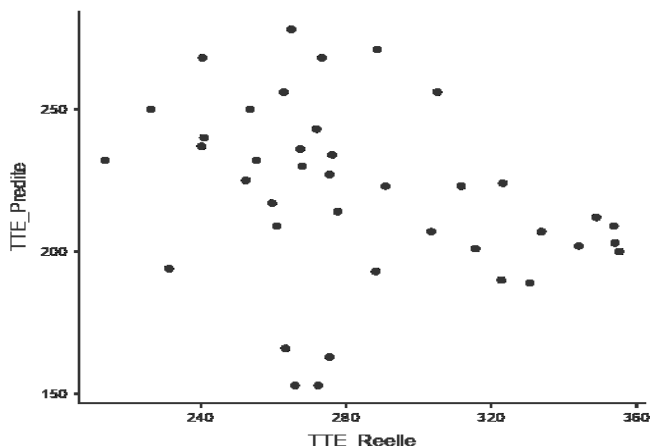
Tableau 5: Analyse comparative des performances prédites et réelles (TTE en secondes)

Statistique	TTE Prédit (s)	TTE Réel (s)
N	40	40
Moyenne	220	284
Médiane	223	274
Écart-type	31.0	38.0
Minimum	153	214
Maximum	278	355

Le tableau 5 présente la comparaison entre le TTE prédit par le modèle de Bartram en temps inverse et le TTE réel pour 40 observations. Les résultats montrent que, comme pour les autres modèles, le TTE réel est nettement supérieur au TTE prédit, avec une moyenne de 284 s contre 220 s et une médiane de 274 s contre 223 s, indiquant une sous-estimation systématique du temps jusqu'à l'épuisement. La variabilité est plus élevée pour les valeurs réelles, comme en témoigne un écart-type plus important (38 s contre 31 s), suggérant que le modèle ne rend pas pleinement compte de la dispersion observée en conditions réelles. Les valeurs minimales et maximales confirment cet écart constant entre les performances prédites et observées, traduisant une capacité prédictive limitée du modèle inverse temps de Bartram.

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji

Figure 5: Nuage de points TTE prédit en fonction du TTE réel Bartram 1/ Temps Continu



La figure montre une dispersion importante des points entre le TTE prédit et le TTE réel pour le modèle de Bartram en temps inverse continu. L’absence d’une tendance claire indique une relation faible entre les valeurs prédites et observées. Les TTE prédits restent globalement regroupés dans une plage restreinte, tandis que les TTE réels présentent une variabilité plus large, ce qui suggère une sous-estimation des TTE élevés par le modèle. Cette configuration traduit une capacité limitée du modèle à prédire fidèlement le temps réel jusqu’à l’épuisement.

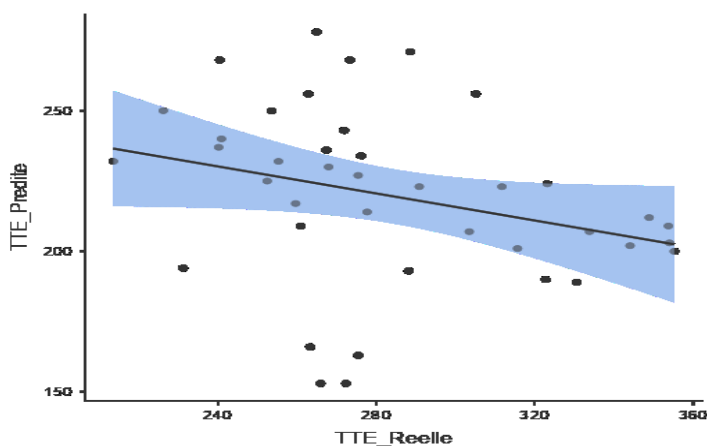
Tableau 6 : Résumé du modèle de régression linéaire : TTE réel en fonction du TTE prédit Bartram 1/temps continu

Modèle	R	R²	RMSE	t	p
1	0.294	0.0867	35.9	-1.90	0.065

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abbderrahmen Hadji

Le tableau 6 indique que le modèle de régression linéaire basé sur le modèle de Bartram en temps inverse continu présente une corrélation faible entre le TTE prédit et le TTE réel ($R = 0,294$). Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,0867$) montre que le modèle n'explique qu'environ 9 % de la variabilité du TTE réel, ce qui reflète un faible pouvoir explicatif. L'erreur quadratique moyenne ($RMSE = 35,9$ s) demeure relativement élevée, indiquant des écarts notables entre les valeurs observées et estimées. Enfin, la valeur de p ($p = 0,065$) associée au test t ($t = -1,90$) ne permet pas de conclure à une relation statistiquement significative au seuil de 5 %, bien qu'elle suggère une tendance faible mais non significative entre le TTE prédit et le TTE réel.

Figure 6 : Régression linéaire entre le TTE prédit et le TTE Réel Bartram inverse temps continu



La figure 6 met en évidence une relation linéaire faible et négative entre le TTE prédit et le TTE réel pour le modèle de Bartram en temps inverse continu. La pente descendante de la droite de régression indique que le TTE prédit tend à diminuer lorsque le TTE réel augmente, traduisant une inadéquation du modèle. La dispersion

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abbderrahmen Hadji

importante des points autour de la droite ainsi que la largeur de l'intervalle de confiance confirment une forte incertitude et une faible capacité prédictive. Cette figure corrobore les résultats statistiques, montrant que le modèle explique peu la variabilité du TTE réel.

4 Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la validité prédictive du modèle continu de Bartram (linéaire, hyperbolique et en temps inverse) pour estimer le temps jusqu'à l'épuisement (TTE) chez de jeunes footballeurs, en comparant les valeurs prédites aux performances réellement observées lors d'un test continu à 110 % de la vitesse critique. Les principaux résultats montrent une sous-estimation systématique du TTE réel, une faible corrélation entre les valeurs prédites et observées, ainsi qu'un pouvoir explicatif limité pour l'ensemble des variantes du modèle.

Les analyses descriptives (Tableaux 3 et 5) mettent en évidence que, quel que soit le modèle de Bartram utilisé, le TTE prédit est nettement inférieur au TTE réel, avec des différences marquées au niveau des moyennes et des médianes. Cette tendance à la sous-estimation est cohérente avec plusieurs travaux antérieurs ayant montré que les modèles basés sur la vitesse ou la puissance critique peuvent sous-évaluer la tolérance réelle à l'effort, notamment lors d'exercices continus réalisés à intensité supra-critique (Vanhatalo et al., 2008 ; Black et al., 2015).

Cette sous-estimation pourrait s'expliquer par le fait que les modèles mathématiques supposent une consommation linéaire et fixe de la capacité D'/W' , alors que, dans la réalité, les mécanismes physiologiques sous-jacents à la fatigue (cinétique du VO_2 , recrutement neuromusculaire, tolérance métabolique) sont plus complexes et variables selon les individus (Poole et al., 2016 ; Jones et al., 2019). Chez les jeunes footballeurs, cette variabilité peut être accentuée par des différences de maturité biologique et de profils d'entraînement.

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji

Les nuages de points et les régressions linéaires (Figures 1 à 6) montrent une dispersion importante des données et l'absence d'une relation forte entre le TTE prédit et le TTE réel. Les coefficients de corrélation observés ($R \approx 0,28-0,29$) indiquent une relation faible, confirmée par des coefficients de détermination très modestes ($R^2 \approx 8-9\%$). Ces résultats suggèrent que le modèle de Bartram explique moins de 10 % de la variabilité du TTE réel, ce qui limite fortement son intérêt prédictif en pratique.

Ces observations rejoignent celles de Karsten et al (2016) , qui ont montré que les modèles de prédiction du TTE présentent une fiabilité limitée à l'échelle individuelle, malgré une validité acceptable pour des comparaisons groupées. De plus, la présence d'une pente négative dans les régressions observées dans cette étude est contre-intuitive sur le plan physiologique et suggère une inadéquation structurelle du modèle dans ce contexte, phénomène également rapporté dans certaines études appliquées en course à pied (Jones et al., 2010).

Le modèle continu de Bartram a été initialement proposé afin de corriger certaines discontinuités mathématiques des modèles traditionnels et d'améliorer la stabilité des prédictions du TTE (Bartram et al., 2018). Toutefois, les résultats de la présente étude indiquent que, malgré cette amélioration théorique, le modèle ne parvient pas à prédire fidèlement les performances réelles en conditions de terrain.

Cette divergence entre théorie et pratique a déjà été évoquée dans la littérature, où plusieurs auteurs soulignent que la validité des modèles de puissance/vitesse critique dépend fortement du mode de locomotion, du protocole de test, et du niveau d'entraînement des participants (Burnley et Jones, 2018). En football, les adaptations physiologiques spécifiques, telles que la capacité à tolérer des intensités élevées grâce à des stratégies de pacing implicites, pourraient expliquer la meilleure performance réelle par rapport aux valeurs prédites (Buchheit et Laursen, 2013).

D'un point de vue appliqué, les résultats suggèrent que le modèle de Bartram, sous ses différentes formes, ne peut pas être utilisé comme outil unique et fiable pour prédire le TTE individuel chez de jeunes footballeurs. L'erreur de prédiction relativement élevée (RMSE ≈ 36

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji

s) et l'absence de significativité statistique des relations observées ($p > 0,05$) indiquent que son utilisation pourrait conduire à des erreurs d'interprétation dans la planification de l'entraînement.

Cependant, il convient de souligner que le modèle pourrait conserver une valeur descriptive ou comparative à l'échelle collective, comme le suggèrent certaines études sur les modèles de puissance critique (Jones et al., 2019). De futures recherches pourraient explorer des approches combinant les modèles mathématiques avec des indicateurs physiologiques complémentaires (VO_2 max, fréquence cardiaque, perception de l'effort) afin d'améliorer la précision des prédictions (Malone et al., 2017).

5. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer la validité prédictive du modèle continu de Bartram pour estimer le temps jusqu'à l'épuisement (TTE) chez de jeunes footballeurs, en comparant les valeurs prédites aux performances réellement observées lors d'un effort continu à intensité supra-critique. Les résultats obtenus montrent de manière cohérente que, quelle que soit la formulation du modèle considérée (linéaire continu, hyperbolique continu ou temps inverse continu), le modèle de Bartram présente des limites importantes dans la prédiction du TTE réel.

Les analyses descriptives ont mis en évidence une sous-estimation systématique des performances réelles, tandis que les analyses graphiques et les régressions linéaires ont révélé une relation faible et non significative entre le TTE prédit et le TTE réel. Les faibles coefficients de détermination et les erreurs de prédiction relativement élevées confirment que le modèle explique une part très limitée de la variabilité interindividuelle de la performance. Ces résultats suggèrent que, dans un contexte appliqué et en conditions de terrain, le modèle de Bartram ne permet pas une estimation fiable du TTE individuel chez des jeunes footballeurs.

D'un point de vue pratique, ces constats invitent à la prudence quant à l'utilisation du modèle de Bartram comme outil unique de prescription ou de suivi de l'entraînement. Bien qu'il repose sur des fondements

**D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du
modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abderrahmen Hadji**

théoriques solides et qu'il puisse conserver une valeur descriptive à l'échelle collective, son application pour la prédiction individuelle des performances sportives apparaît limitée. L'intégration de paramètres physiologiques complémentaires, tels que la VO_2 max, la fréquence cardiaque, la perception de l'effort ou encore les réponses neuromusculaires, pourrait contribuer à améliorer la précision des modèles de prédiction du TTE.

Enfin, cette étude souligne la nécessité de poursuivre les recherches sur la validité écologique des modèles de vitesse et de puissance critique, en particulier dans les sports collectifs et chez les jeunes athlètes. De futures investigations devraient explorer des approches multimodales, combinant modélisation mathématique et indicateurs physiologiques, afin de développer des outils plus robustes et mieux adaptés aux exigences réelles de la performance sportive.

6 Références bibliographiques

- Bartram, J. C., Thewlis, D., Martin, D. T., & Norton, K. I. (2018). Accuracy of W' Recovery Kinetics in High Performance Cyclists-Modeling Intermittent Work Capacity. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(6), 724- 728. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0034>
- Black, M. I., Jones, A. M., Bailey, S. J., & Vanhatalo, A. (2015). Self-pacing increases critical power and improves performance during severe-intensity exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquée, Nutrition Et Metabolisme*, 40(7), 662- 670. <https://doi.org/10.1139/apnm-2014-0442>
- Buchheit, M., & Laursen, P. B. (2013). High-Intensity Interval Training, Solutions to the Programming Puzzle. *Sports Medicine*, 43(5), 313- 338. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0029-x>
- Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J. C., Bourdon, P. C., Voss, S. C., Hocking, J., Cordy, J., Mendez-Villanueva, A., & Coutts, A. J. (2013). Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 16(6), 550- 555. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.12.003>
- Burnley, M., & Jones, A. M. (2018). Power-duration relationship : Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *European Journal of Sport Science*, 18(1), 1- 12. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249524>
- Dupont, G., Akakpo, K., & Berthoin, S. (2004). The effect of in-season, high-intensity interval training in soccer players. *Journal of Strength and*

D- prime Dépense énergétique et dynamique de récupération : validation du modèle mathématique de Bartram lors d'un effort continu
Mohamed Dayaa Eddine Guermat, Abbderrahmen Hadji

- Conditioning Research*, 18(3), 584- 589. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)18%253C584:TEOIH1%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)18%253C584:TEOIH1%253E2.0.CO;2)
- Jones, A. M., Burnley, M., Black, M. I., Poole, D. C., & Vanhatalo, A. (2019). *The maximal metabolic steady state : Redefining the 'gold standard' -*. Wiley Online Library.
<https://physoc.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.14814/phy2.14098>
- Jones, A. M., & Carter, H. (2000). The Effect of Endurance Training on Parameters of Aerobic Fitness. *Sports Medicine*, 29(6), 373- 386.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200029060-00001>
- Jones, A. M., Vanhatalo, A., Burnley, M., Morton, R. H., & Poole, D. C. (2010). Critical Power : Implications for Determination of V'O₂max and Exercise Tolerance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(10), 1876.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181d9cf7f>
- Karsten, B., Stevens, L., Colpus, M., Larumbe-Zabala, E., & Naclerio, F. (2016). The Effects of a Sport-Specific Maximal Strength and Conditioning Training on Critical Velocity, Anaerobic Running Distance, and 5-km Race Performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(1), 80- 85. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0559>
- Malone, J. J., Lovell, R., Varley, M. C., & Coutts, A. J. (2017). *Unpacking the Black Box : Applications and Considerations for Using GPS Devices in Sport*.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0236>
- Monod, H., & Scherrer, J. (1965). The Work Capacity of a Synergic Muscular Group. *Ergonomics*, 8(3), 329- 338.
<https://doi.org/10.1080/00140136508930810>
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B., & Jones, A. M. (2016). Critical Power : An Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(11), 2320.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000939>
- Skiba, P. F., Chidnok, W., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2012). Modeling the Expenditure and Reconstitution of Work Capacity above Critical Power. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(8), 1526.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182517a80>
- Vanhatalo, A., Doust, J. H., & Burnley, M. (2008). Robustness of a 3 min all-out cycling test to manipulations of power profile and cadence in humans. *Experimental Physiology*, 93(3), 383- 390.
<https://doi.org/10.1113/expphysiol.2007.039883>
- Wright, J., Bruce-Low, S., & Jobson, S. A. (2017). The Reliability and Validity of the 3-min All-out Cycling Critical Power Test. *International Journal of Sports Medicine*, 38(6), 462- 467.
<https://doi.org/10.1055/s-0043-102944>