

Analyse et optimisation du relais 4×100m

Maé Mavromatis¹

¹ENS Rennes - ISTIC Université Rennes 1.

J'ai effectué mon stage de L3 à l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) dans l'équipe P3M (Performance Motrice et Modélisation Multiéchelles) à Marseille. Ce rapport reprend le contexte dans lequel s'inscrit ce stage, ainsi que le travail effectué et présente les résultats obtenus. Je me suis intéressée en particulier à la variabilité de la cadence des athlètes à l'approche du passage de témoin.

Analyse de données | Capteurs | GPS | Performance | Relais

1. Introduction

A. Le projet. Mon stage est adossé à un projet collaboratif qui rassemble des partenaires académiques (Université d'Aix-Marseille et Université de Rennes) et la Fédération Française d'Athlétisme. Deux demandes de financement ont été déposées : l'une dans le cadre de l'Appel à Projets (AAP) 2019 lancé par l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance, l'autre dans le cadre de l'AAP lancé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) "Sport de très haute performance" dans la perspective des Jeux Olympiques (JO) de 2024 à Paris. L'objectif final est de concevoir un dispositif d'entraînement au relais en réalité virtuelle qui permettrait à un athlète de s'entraîner avec un avatar de manière à optimiser les instants de déclenchement de la course. Un des enjeux de ce type de dispositif est d'analyser le comportement d'un athlète et tout particulièrement les coordinations inter-personnelles qui sont le cœur de la réussite sur une course de relais. Pour cela, une première étape consiste à analyser et essayer de déterminer les critères de performance lors du passage de témoin lors du relais 4×100m.

B. Mon objectif de stage. Il m'a été demandé de mettre en place une méthode de traitement et de visualisation des résultats pour analyser et optimiser le passage de témoin lors du relais 4×100m. Pour cela, 5 fichiers de données brutes au format csv issus des acquisitions sur le terrain m'ont été fournis. Cela représente environ 31 MB de données. J'ai étudié la fréquence de la pose de pied comme indicateur des coordinations inter-personnelles. L'objectif était de conclure sur l'existence d'ajustements fonctionnels au niveau de la fréquence de la pose de pied, et de les associer au caractère optimal (ou non) du passage de relais.

C. Le socle disponible. Un premier travail a été effectué pendant les deux mois précédents le début de mon stage par un étudiant en STAPS (sciences et techniques des activités physiques et sportives) en fin de Master 1. Il a notamment réalisé des acquisitions de données GPS sur le terrain lors de relais réalisés en conditions réelles de pratique afin de caractériser les patrons de course et les coordinations inter-personnelles produits. Ce sont les seules données disponibles à ce jour, dont on reparlera dans la partie 3, sur lesquelles je me suis appuyée durant mon stage.

D. Contexte sportif. Le relais 4×100m est une discipline regroupant 4 athlètes sélectionnés selon leurs aptitudes en sprint. Ils forment une équipe, qui doit faire parcourir 400 mètres à un bâton (le relais) le plus vite possible sous certaines conditions. Il y a 3 zones de transmission dans lesquelles le témoin doit être transmis sans tomber, ni être jeté. Elles mesurent chacune 30 mètres, et s'étendent de 20 mètres avant la distance repère jusqu'à 10 mètres après (1).

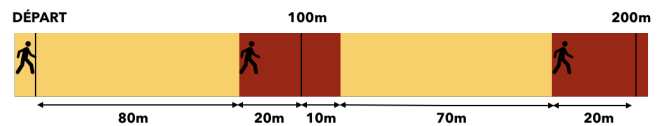


Fig. 1. Séquençage d'une course de relais.

Le receveur du témoin (appelé "receveur" dans la suite) doit partir avec les deux pieds dans la zone de transmission (il part généralement au début de celle-ci). Il a le droit d'avoir une marque au sol dans son couloir en amont de la zone de transmission pour repérer son instant de départ : il part lorsque le porteur du témoin (appelé "donneur"), passe à la verticale de la marque. Il faut noter que la marque repère du receveur est spécifique à chaque couple, et dépend de l'état de forme des athlètes et des capacités d'accélération de vitesse maximales de chacun.

Le système {donneur + receveur} (appelé "couple") doit effectuer la transmission la plus efficace possible pour que la course totale soit la plus rapide possible. La meilleure performance pour un couple est obtenue lorsque le donneur maintient sa vitesse maximale jusqu'à la transmission du témoin, et que le receveur a atteint sa vitesse maximale lorsqu'il le reçoit. Pour permettre au receveur d'atteindre cette vitesse, le point de

transmission doit être au plus proche de la fin de la zone de transmission.

Cette performance optimale n'est généralement pas atteinte, à cause de régulations fonctionnelles ou non-fonctionnelles à la fois chez le donneur et le receveur (1), qui tentent chacun de compenser la variabilité de performance de leur partenaire.

2. État de l'art

Dans le cadre de la course de relais, une étude sur les régulations opérées par le receveur lors de l'approche du donneur a été menée en 1999 par Boyadjian et Bootsma (1). Il a été constaté, à l'aide d'un dispositif de caméras à 50Hz, que le receveur ne part pas toujours quand le donneur franchit la marque, s'il a l'impression que la vitesse d'approche du donneur n'est pas sa vitesse maximale. Des ajustements de la part du donneur en réponse à des erreurs du receveur ont également été repérés.

Ce type d'ajustements fonctionnels a été également étudié dans d'autres disciplines. On peut notamment citer une étude sur le saut en longueur (2) qui montre qu'il y a un ajustement de la longueur de foulée pour obtenir une distance appuis-planche très faible à l'appel. Cette analyse montre une augmentation de la variabilité de la longueur de foulée à l'approche de la planche, et une diminution de la variabilité de la distance appuis-planche dans le même temps.

On peut également citer une étude menée en 1998 (3) qui met en lumière l'ajustement des angles tronc-cuisse et cuisse-jambes en salto arrière, grâce à deux caméras à 100 Hz. Deux autres études, datant de 2017, (4) et (5), ont été menées l'une sur la variabilité de la vitesse au passage d'une intersection dans un simulateur de voiture et l'autre sur les stratégies de passage de témoin en patinage de vitesse sur piste courte.

Ces ajustements ont un impact direct sur la performance des athlètes. Ils n'ont pas été étudiés et quantifiés pour le relais, et demandent donc une étude ciblée. C'est l'objectif du projet commandé par la FFA.

3. Expériences et données

Mon stage, d'une durée de deux mois, a débuté juste après la fin de celui d'un étudiant de STAPS en M1, Thomas Choury De Lavigerie. Cette partie présente la méthodologie et les vérifications mises en places par Thomas pour obtenir les données mises à ma disposition.

Thomas a travaillé avec 5 femmes et 5 hommes entre

16 et 22 ans. Ces athlètes sont les meilleurs français, juniors et espoirs, en sprint (100m et 200m). Ils ont chacun couru 3 fois dans le rôle de donneur, et 3 fois dans le rôle de receveur. Les mesures ont donc été faites sur 30 passages de témoin. Toutefois, seuls 27 sont exploitables puisque des écarts au règlement (départ trop tôt, passage de témoin raté...) ont été identifiés lors de 3 essais.

Thomas s'est servi de 5 systèmes de positionnement par satellites (GNSS : Global Navigation Satellite System) avec une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz et qui utilisaient les constellations de satellites américains et russes (GPS et GLONASS). Les données de vitesse fournies par ces dispositifs GNSS sont calculées par effet Doppler et ne sont pas liées aux données de position. Thomas a effectué tout un travail de vérification de la validité du dispositif, au cours duquel il a montré que les données de position statique sont inutilisables contrairement aux mesures de vitesse qui sont exploitables. J'ai donc pu me baser sur 27 mesures de vitesses indépendantes.

4. Contribution

A. Développement informatique. Thomas a travaillé en Matlab. Cependant, à mon arrivée, mes encadrants m'ont informé d'une transition de Matlab vers Python. J'ai donc travaillé en Python pendant toute la durée de mon stage.

J'ai développé une application (2), qui, à partir des données de vitesse, permet de sélectionner le type d'information que l'on souhaite calculer et visualiser d'une part, et les séquences (passages de témoin) pour lesquelles on veut avoir ces informations d'autre part. Elle permet de visualiser pour chaque course :

- les vitesses ;
- les vitesses zoomées à 60% de la vitesse maximale du receveur ;
- les points correspondants aux poses de pied (3) ;
- les variations de la fréquence de la pose de pied.

Suite à une étude des modules permettant de réaliser une interface graphique sous Python et puisque `tkinter` semble difficilement compatible avec `matplotlib.pyplot`, à cause de la gestion des événements, j'ai choisi d'utiliser `wxwidgets` et `wxpython`. J'ai ainsi pu obtenir une interface utilisateur fonctionnelle. Je l'ai implémentée séparément du code de traitement des informations de façon à ne pas créer de forte dépendance entre le code de traitement et celui de l'interface.

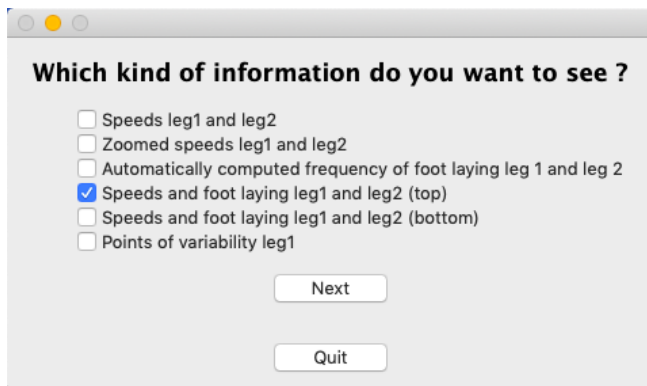


Fig. 2. Boîte de dialogue pour le choix du traitement à représenter.

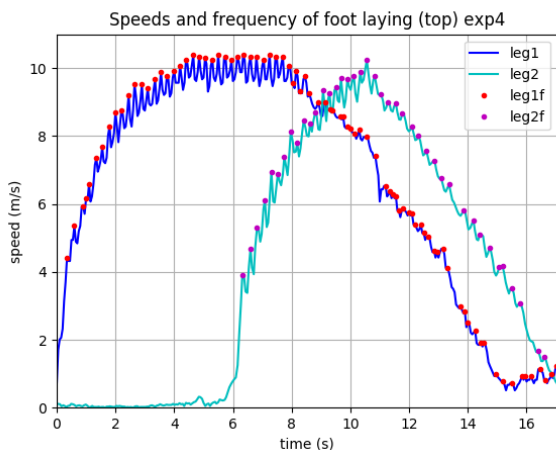


Fig. 3. Profils de vitesse pour l'expérience 4 avec poses de pied.

B. Étude de la fréquence de la pose de pied. L'obtention d'un moyen de visualisation constituait une partie de mon objectif. Une fois qu'il a été atteint, j'ai tenté de mettre en relief un indicateur d'ajustements fonctionnels dans la fréquence de la pose de pied.

Une pose de pied se repère sur la mesure de vitesse grâce aux maxima locaux. En effet, lorsque l'athlète pose son pied au sol, il subit une importante décélération suivie d'une forte accélération au moment où il pousse le sol. J'ai réalisé cette détection avec la fonction `find_peaks` du module `scipy.signal`.

J'ai alors projeté les points obtenus sur l'axe du temps, pour pouvoir mesurer le temps qui s'écoule entre deux poses de pied. J'ai ainsi obtenu la fréquence sur laquelle je souhaitais travailler.

Pour le donneur, on observe une portion de course stabilisée entre la fin de son accélération et le départ du receveur (voir figure 4). Elle n'existe pas chez le receveur, puisque le passage de témoin survient au cours de sa phase de mise en action. J'ai donc traité différemment les données selon le rôle de l'athlète.

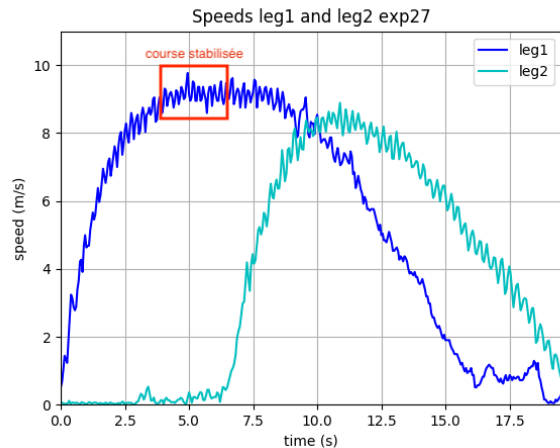


Fig. 4. Présence d'une portion de course stabilisée pour le donneur.

B.1. Donneurs. Pour déterminer les points de variabilité dans la fréquence de la pose de pied, j'ai utilisé une méthode classique de comparaison à la moyenne. Pour les donneurs, je me suis placée sur la portion de la course stabilisée. J'ai calculé la moyenne et l'écart type de la fréquence de la pose de pied dans cette zone. Grâce à ces valeurs, j'ai pu caractériser les poses de pied temporellement plus éloignées les unes des autres que la moyenne. Cela permet de détecter la présence d'ajustements entre le départ du receveur et le passage de témoin à chaque foulée.

J'ai regardé les maxima dans les intervalles :

- $[\mu - \sigma ; \mu + \sigma]$ (figure 5)
- $[\mu - 1.5\sigma ; \mu + 1.5\sigma]$ (figure 6),
- $[\mu - 2\sigma ; \mu + 2\sigma]$ (figure 7),

afin d'observer les maxima temporellement éloignés selon ces trois seuils (on note μ la moyenne et σ l'écart type).

Étant donné que certains maxima locaux ne sont en réalité pas dus à une pose de pied, mais à un mouvement du GPS dans le gilet ou à une erreur de mesure, il est important de faire une observation graphique et pas seulement quantitative des résultats.

Il faut également noter que la détection est faite pour toute la course, mais que la zone qui nous intéresse spécialement se situe entre le départ du receveur et la dégénérescence du pattern de course du donneur. Cette zone, qui correspond au voisinage du passage de témoin, est difficile à repérer de façon automatique en n'ayant pas connaissance de la date du relais.

B.2. Receveurs. Il aurait été intéressant d'appliquer également la méthode précédente pour les receveurs. Toutefois, comme relevé au dessus, le profil du receveur ne possède pas de portion de course stabilisée. De plus, il

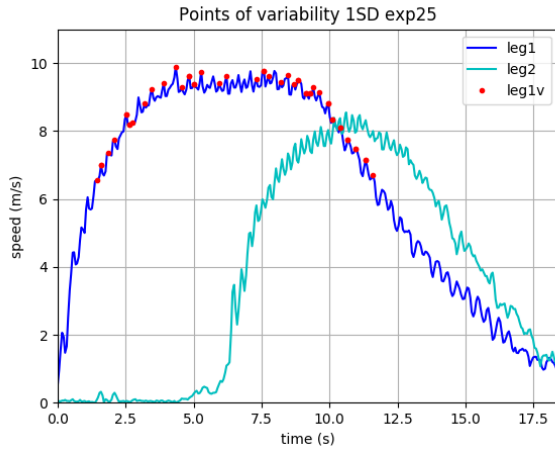


Fig. 5. Détection des maxima à au moins un écart type de la moyenne pour l'expérience 25.

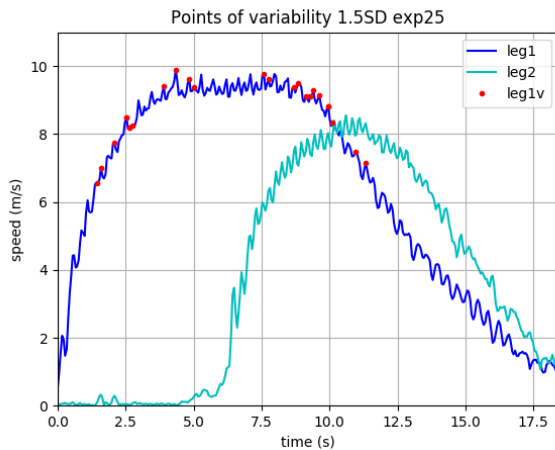


Fig. 6. Détection des maxima à au moins un écart type et demi de la moyenne pour l'expérience 25.

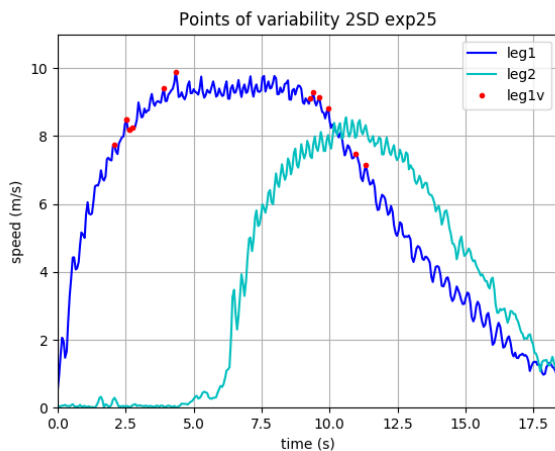


Fig. 7. Détection des maxima à au moins deux écarts types de la moyenne pour l'expérience 25.

est impossible de se servir d'une portion de course stabilisée issue d'une autre course, puisque l'on ne peut pas supposer qu'il y a une corrélation entre la foulée

de deux courses différentes. En outre, la date exacte du passage de témoin étant inconnue, j'ai dû me résoudre à mener une étude spéculative des données de vitesses obtenues pour le receveur.

J'ai donc représenté la distance temporelle entre les pics détectés sur la courbe du receveur, pour pouvoir avoir une intuition de la répartition de la fréquence de pose de pieds (figure 8).

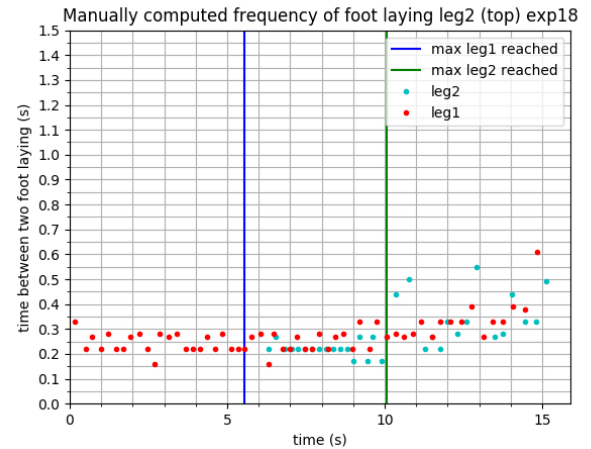


Fig. 8. Répartition des distances temporelles entre les maxima locaux en fonction du temps.

5. Discussion

A. Utilisabilité du travail effectué.

A.1. Développement informatique. L'interface utilisateur est fonctionnelle, et il suffira de peu de modifications pour l'adapter aux nouvelles données.

A.2. Étude de la fréquence de la pose de pied. Le travail que j'ai effectué ne permet pas de conclure sur des indicateurs de perte ou de gain en performance. Il a toutefois mis en lumière le caractère insuffisant des données actuelles, et devrait permettre de faire des mesures exploitables lors des prochaines acquisitions.

A.3. Les résultats. Chez le receveur, on a observé des poses de pieds à fréquence constante sur des périodes de plusieurs foulées, ce qui est invraisemblable pour un système biologique. Nous avons alors réalisé que l'origine de ces résultats peu crédibles est dans la fréquence d'échantillonnage. En effet, échantillonner à 20 Hz revient à avoir une mesure toutes les 0.05 secondes, c'est à dire de l'ordre d'un quart de la distance temporelle entre deux poses de pied. Cette fréquence de mesure est donc insuffisante, puisqu'elle masque toutes les variations d'un quart de la valeur "standard". C'est cette

trop faible valeur d'échantillonnage qui explique aussi le peu de résultats observés pour le donneur.

B. Les données. Les données sur lesquelles j'ai travaillé ont permis de mener une première analyse, nécessaire à une étude ciblée des comportements observés, mais ne permettent pas dans l'état d'aller beaucoup plus loin. En effet, des marqueurs importants, tels que l'entrée dans les différents zones des coureurs, ainsi que la date du passage de témoin sont des données essentielles à l'approfondissement de la caractérisation des comportements des athlètes.

La fréquence d'échantillonnage, trop faible, constitue également un frein à l'approfondissement de l'étude dans l'état. Les études relevées dans la partie 2 utilisent des fréquences d'échantillonnage comprises entre 50Hz et 100Hz, au lieu de 20Hz ici. La technologie GPS utilisée seule dans cette étude justifie cette fréquence d'échantillonnage, et représente donc en elle-même une limite.

6. Conclusion

Étant données les limites que présentent les données actuellement, il est difficile de conclure sur des ajustements fonctionnels en l'état. Toutefois, ces limites peuvent être facilement dépassées en faisant d'autres mesures sur le terrain, pour lesquelles on prendra soin de corriger les erreurs faites lors des premières acquisitions. La pose d'un système de détection de la pression sur le bâton pourrait permettre d'enregistrer la date du passage de relais; de plus, des systèmes à effet Doppler pourraient permettre d'obtenir des repères statiques, et une fréquence d'échantillonnage plus élevée, atteinte par couplage d'une centrale inertielle, (100 Hz par exemple) permettra une résolution suffisante à l'observation d'ajustements fonctionnels.

7. Remerciements

Je remercie Monsieur Richard Kulpa du laboratoire M2S (Mouvement, Sport et Santé) à Rennes grâce à qui j'ai eu accès à ce stage, ainsi que mes encadrants, Messieurs Guillaume Rao et Gilles Montagne, de l'équipe P3M à l'ISM.

8. Bibliographie

1. Alain Boyadjian and Reinoud Bootsma. Timing in relay running. *Perceptual and motor skills*, 88 : 1223–30, 07 1999. doi : 10.2466/pms.1999.88.3c.1223.
2. David Lee, J Roly Lishman, and James A. Thomson. Regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 8 :448–459, 06 1982. doi : 10.1037/0096-1523.8.3.448.
3. Benoit Bardy and Michel Laurent. How is body orientation controlled during somersaulting? *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 24 :963–77, 07 1998. doi : 10.1037/0096-1523.24.3.963.
4. Julie Mathieu, Reinoud Bootsma, Catherine Berthelon, and Gilles Montagne. Information–movement coupling in the control of driver approach to an intersection. *Ecological Psychology*, 29 :317–341, 10 2017. doi : 10.1080/10407413.2017.1369853.
5. Andrew Hext, Ben Heller, John Kelley, and Simon Goodwill. Relay exchanges in elite short track speed skating. *European Journal of Sport Science*, 17(5) :503–510, 2017. doi : 10.1080/17461391.2016.1276219. PMID : 28100123.

9. Annexe

Le code que j'ai produit est disponible sur mon site <http://perso.eleves.ens-rennes.fr/people/mae.mavromatis/>. Il est composé :

- de deux fichiers de configuration qui contiennent des tableaux de valeurs caractéristiques ou d'indices utiles au repérage des expériences :
 - *DatesOfExperiments.py* définit par exemple les tableaux des indices de début et de fin de courses, ou encore les tableaux de repérage des phases stabilisées au sein des courses du donneur;
 - *OrderOfExperiments.py* définit les tableaux des numéros des GPS pour chaque coureur pour chaque course.
- du fichier *Experiment.py* qui définit les méthodes de calcul et les représentations graphiques. C'est ici qu'il faut ajouter/modifier quelque chose si l'on veut effectuer un nouveau traitement des données;
- du fichier *GraphicInterface.py* qui définit l'interface utilisateur, et fait appel aux méthodes de la classe *Experiment* pour satisfaire les demandes de l'utilisateur.