

# Localisation de source d'impact par triangulation pour l'analyse des réceptions de saut en gymnastique artistique.

HUMBERT Tanguy  
Encadré par PUCHEU Suzon

6 décembre 2024

## Résumé

### 1 Contexte de l'étude

L'objectif principal de notre travail est d'estimer la position d'un impact sur un tapis de gymnastique en utilisant la méthode de triangulation via des accéléromètres. En effet, la gymnastique est un sport dans lequel sont surreprésentées les blessures des membres inférieurs, notamment à la cheville et au genou. Afin de réduire les risques de blessure, il est intéressant de pouvoir localiser et caractériser les impacts que subissent les gymnastes lors de leurs réceptions. Cependant les tapis de gymnastique étudiés sont composés de superpositions de couches de mousses aux propriétés mécaniques différentes, ce qui rend le comportement mécanique de l'ensemble difficilement modélisable. De plus, ces tapis se déforment pour absorber une partie de la force ce qui rend l'utilisation de plateforme de force, classiquement utilisée en biomécanique, impossible puisque ce qui nous intéresse sont les efforts sous les pieds, et non sous le tapis. De plus, l'objectif est de permettre un monitoring du plus grand nombre de gymnastes possible, or l'installation d'une telle plateforme engage des frais importants et les mesures ne peuvent se faire que là où les plateformes sont installées. C'est pourquoi nous allons nous intéresser à une méthode de trilatération et allons l'appliquer aux données relevées par des centrales inertielles, qui sont non invasives, afin de deviner la localisation de l'impact.

## 2 Matériel et méthode

### 2.1 Matériel

Pour récupérer l'accélération aux différents points des tapis, ce sont des centrales inertielles (CI) qui ont été utilisées, entre 8 et 12. Un tapis de gymnastique GYMNOVA et un surtapis de dimensions ont été uti-

lisés (Figure 1). Un impacteur avec des masses de deux kilos ont été utilisés pour réaliser des impacts (Figure 2). Une interface de Motion Capture a été utilisée pour récupérer la position des CIs et de l'impacteur/personne en train de réaliser l'impact/saut lors des essais.



FIGURE 1 – Tapis instrumenté pour des essais

### 2.2 Méthode d'expérimentation

Le tapis a été préparé en collant les CIs aux différents endroits précisés sur la Figure 3, comme visible sur la Figure 4.

Pendant une minute, l'impacteur était utilisé pour taper sur la tapis, à l'aide des bras de l'expérimentateur. Les essais ont été réalisés depuis plusieurs endroits pour avoir une distribution bien répartie des impacts.

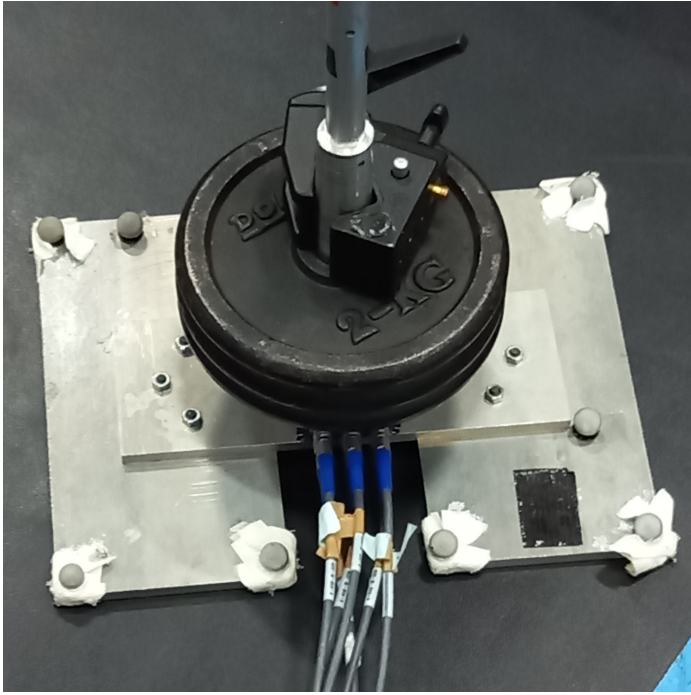


FIGURE 2 – Impacteur instrumenté pour des essais

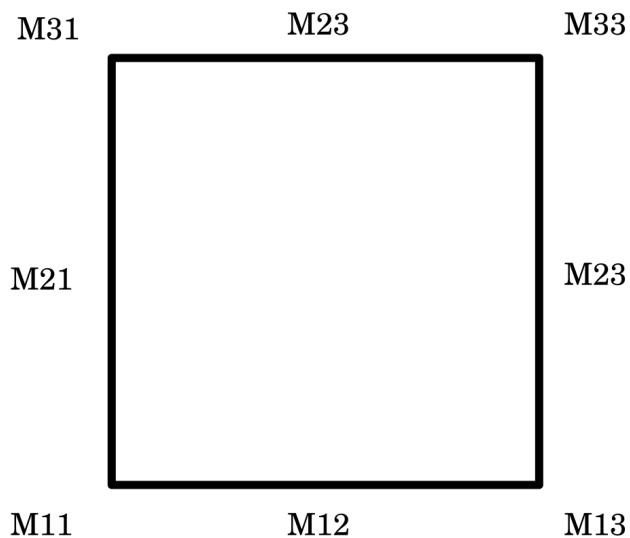


FIGURE 3 – Impacteur instrumenté pour des essais

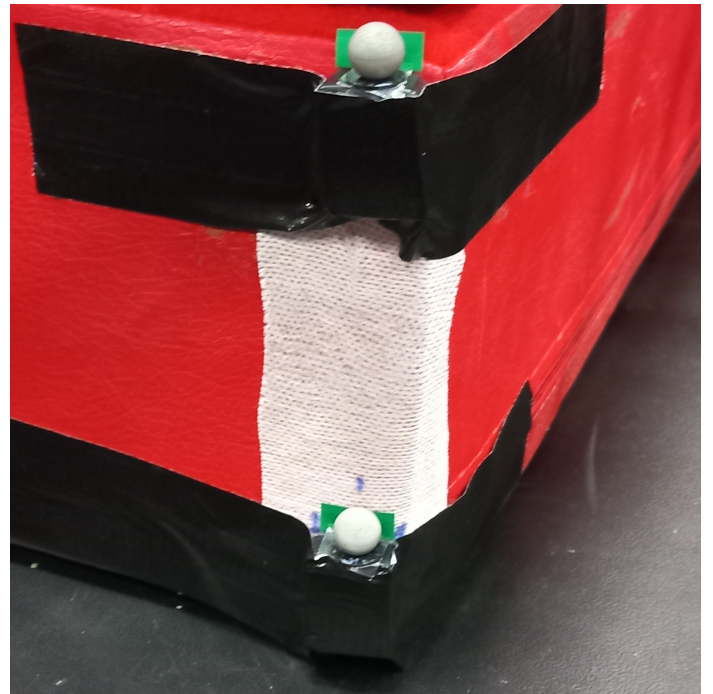


FIGURE 4 – Impacteur instrumenté pour des essais

## 2.3 Méthode de traitement des données

### 2.3.1 Comparaison des données

La norme entre les points obtenus via le system de motion Capture et les points prédits par le code est considérée comme l'erreur de la prédiction. La différence entre l'ordre d'arrivée du signal théorique, c'est-à-dire basé sur les distances avec une vitesse constante et isotropique, et l'ordre effectivement trouvé est calculé avec une bibliothèque python est appelé ratio.

Les erreurs des différents jeux de paramètres sont comparées entre elles par le biais de leur moyenne et de leur écart-type. Pour être sûr que les différences trouvées entre les différents jeux ne soient pas dues à des artefacts, plusieurs tests statistiques sont réalisés.

Tout d'abord, la normalité de l'échantillon, c'est-à-dire la liste d'erreur d'un jeu, est vérifiée avec un test de Shapiro. D'une part, si l'échantillon est effectivement normal, s'ensuit une oneway\_anova avec un seuil de confiance de 5 % et pour hypothèse nulle une égalité des moyennes. Si le test rejette l'hypothèse nulle, alors un test post-hoc de tukey\_hsd est réalisé pour savoir quels échantillons sont différents entre eux. D'autre part, si l'échantillon n'est pas normal, c'est un test de Kruskal Wallis qui est réalisé dans les mêmes conditions et un test de Dunn pour le test post-hoc.

Les différents paramètres étudiés ici sont les suivants :

- La méthode de localisation est la méthode de trilatération de Kundu et al.

- La méthode de calcul de la différence de temps, parmi seuil naïf, cross-correlation et seuil enveloppe.
- Méthode d’optimisation, dans la méthode de *scipy*. Toutes les méthodes sont utilisables, mais ne seront pas décrites ici.
- Le traitement des données des CIs, selon soit seulement l’axe Z soit en norme pour le temporel et soit moyennées soit statiques pour le spatial.
- Le dataset traité, parmi tout ceux disponibles.

Nous allons revenir plus en détail sur les différents paramètres qui nécessitent de plus amples explications.

### 2.3.2 Méthode de localisation

La méthode de localisation donnée par Kundu et al repose sur d’importantes hypothèses : Les ondes ont une propagation isotropiques ( $H1$ ) et constante ( $H2$ ). Nous considérons ici que ces hypothèses sont plausibles dans la surface du tapis.

Pour ce qui est de la méthode en elle-même, elle consiste à utiliser les différences de temps d’arrivée des signaux pour déterminer une position, en minimisant une fonction.

Cette méthode nécessite au moins trois capteurs pour fonctionner correctement, et est d’autant plus précise que le nombre de capteurs est élevé. Ici nous en avons 8 à notre disposition.

### 2.3.3 Méthode de calcul de TdA

Cette partie est l’un des éléments majeur de différenciation entre les différentes approches. Nous en avons essayé trois différentes : Le seuil naïf, la cross correlation et le seuil d’enveloppe.

Pour utiliser la méthode de Kundu et al., il est nécessaire d’avoir accès à la différence de temps d’arrivée (TdA) du signal entre deux CIs. Pour ce faire, trois méthodes ont été employées. La première, le seuil naïf (SN), consiste considérer que le signal est arrivée lorsqu’il dépasse une certaine valeur. Une fois les temps d’arrivée identifiés pour chaque CI, on calcule les différences de TdA entre eux.

La seconde méthode, la cross-correlation (CR), fait une comparaison entre deux signaux et renvoie un retard qui minimise la différence entre les deux signaux. Ce retard est alors le TdA entre deux CIs.

La troisième méthode, le seuil enveloppe, se base sur le même principe de seuil, mais appliqué à l’enveloppe du signal. L’enveloppe est calculée à l’aide d’une transformée de Hilbert, le détail est disponible dans la publication . . .

Les données des CIs ont été traitées de telle sorte à enlever un offset continu, notamment du à la gravité.

### 2.3.4 Type d’optimisation

L’optimisation était réalisée par la fonction *optimize* de Python, pour laquelle différente méthode sont implémentées. Le détail peut être retrouvée sur la page de documentation de la méthode.

### 2.3.5 Traitement accéléromètre

Pour le signal temporel, les données de l’accéléromètre sont traitées tout d’abord en enlevant un offset qu’il peut y avoir sur les données, par exemple celle de la gravité qui doit être enlevée. Ensuite, soit seule la composante en Z est récupérée soit les calculs sont réalisés pour en extraire la norme.

Pour le spatial, les données de l’accéléromètre sont moyennées sur toute la durée pour ou sont statiques, c’est-à-dire réalisé avant les essais.

### 2.3.6 Jeu de données

Les essais ont été réalisés sur différents dataset, obtenus via les méthodes décrites plus tôt. Les datasets utilisés sont pour le tapis ou surtapis et saut ou impacteur et stage ou projet de recherche.

## 3 Résultats

### 3.1 Méthodes d’optimisation

Pour comparer les différentes méthodes utilisées, les paramètres utilisés ont été le SN, un traitement d’accéléromètre en norme et un dataset de saut sur tapis en stage.

Le test statistique a montré que les moyennes étaient comparables à 5 %. Ainsi, les méthodes d’optimisation n’ont pas d’impact sur l’erreur. Il y a cependant une différence de temps entre les méthodes, la pire durant 50s et le plus rapide 30s. C’est donc cette méthode qui a été préférée, la **Default**.

### 3.2 Traitement de l’accéléromètre

Pour comparer les résultats suite au traitement des données temporelles de l’accéléromètre, les paramètres utilisés étaient le SN, en Default, et le dataset de saut sur stapis en stage.

Le test statistique a montré que les différences entre un traitement seulement sur l’AxeZ et sur la normes sont significativement différents, avec le traitement sur la norme qui est plus intéressant.

Pour comparer les résultats suite au traitement des données spatiales de l'accéléromètre, les paramètres utilisés étaient le SN, en Default, traitement en Norme et les datasets Statique et non statique pour les impacts sur le tapis pour le projet de recherche.

Le test statistique a montré que les différences entre une moyenne sur les positions pendant les essais et un positionnement statique sont significativement différents, avec le le positionnement statique qui est plus intéressant. La différence est visible sur la Figure 5.

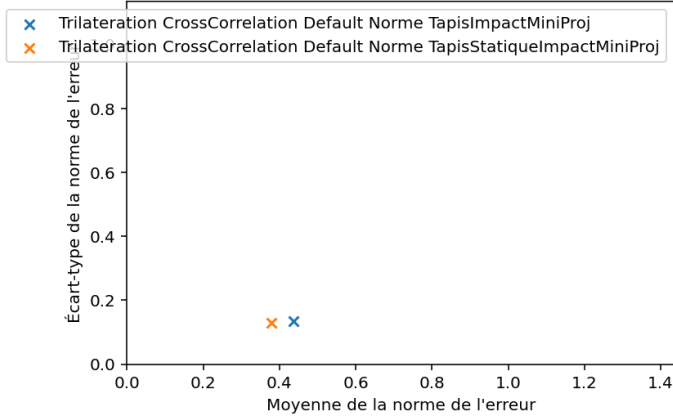


FIGURE 5 – Différence des valeurs moyennes et des écart-types entre position moyennée et statique.

### 3.3 Détermination du TdA

Pour comparer les résultats suite à la méthode de détermination du TdA, les paramètres utilisés étaient la méthode d'optimisation par défaut, l'accélération en norme et le dataset de saut sur tapis en stage.

Le test statistique a montré une différence significative pour les trois couples de méthode. Ceci est illustré sur la Figure 6.

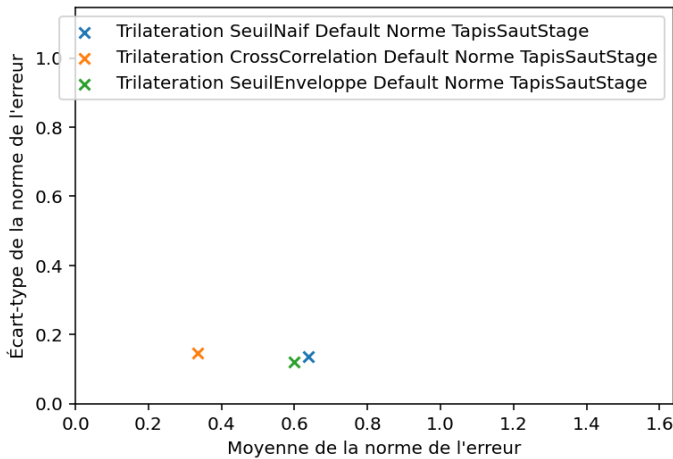


FIGURE 6 – Différence des valeurs moyennes et des écart-types entre position moyennée et statique.

De plus, l'ensemble des points ont été tracés pour sur un essai, et ce pour les trois méthodes, sur les Figures 7, 8 et 9.

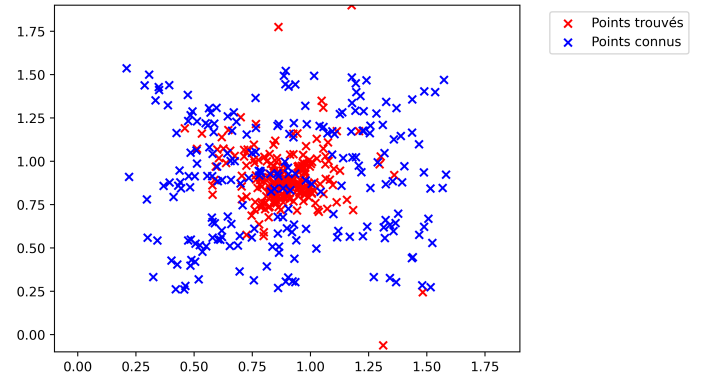


FIGURE 7 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Naif.

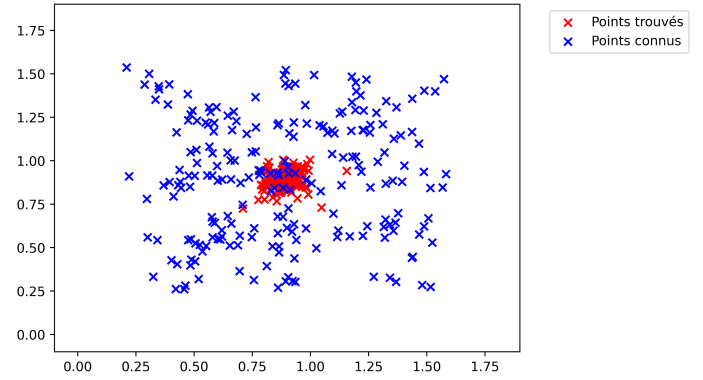


FIGURE 8 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Cross Correlation.

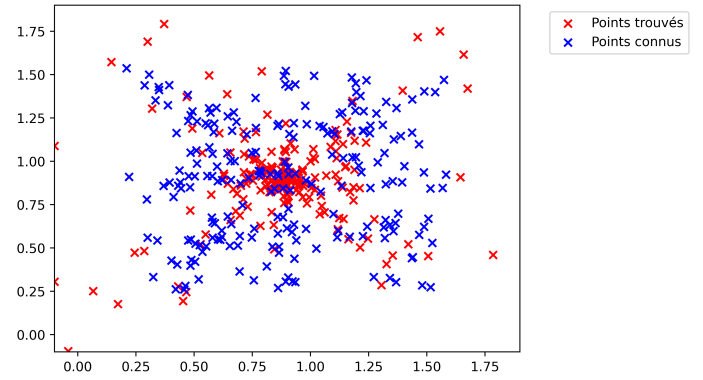


FIGURE 9 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Enveloppe.

## 4 Interpretation

### 4.1 Différence des méthodes de détermination des TdA

Suite aux différents réalisés, la méthode la plus intéressante semble être celle de la cross correlation. Cependant, en regardant la répartition des points sur les Figures 7, 8 et 9, nous remarquons que la méthode de crosscorrelation a tendance à placer tous les points au centre. Et ceci expliquerait pourquoi la moyenne des erreurs est plus faible que les autres méthodes, puisque c'est un point au centre qui minimisera la distance aux autres points pour un grand nombre de points.

De plus, la tendance de la crosscorrelation à placer les points au centre peut s'expliquer de par le fait que si les TdAs sont très proches, alors le point au centre est celui qui est équidistant des IMUs.

## 5 Conclusions

### A Table of the solutions used and their composition