

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

HUMBERT Tanguy
Encadré par PUCHEU Suzon

8 décembre 2024

Résumé

Des points d'impacts sur un tapis de gymnastique ont été prédits à partir de signaux d'accéléromètres par un traitement avec un code sous Python. Les impacts de différents paramètres ont été étudiés afin d'étudier la possibilité d'une utilisation de ce système pour des athlètes professionnelles.

1 Contexte de l'étude

La gymnastique est un sport dans lequel les blessures au niveau des membres inférieurs sont surreprésentées, 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 afin de déduire les efforts articulaires qu'ils subissent, et donc prévenir les blessures. 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. L'utilisation de plateforme de forces, classiquement utilisées en bio-mécanique, étant compliquée in-situ, ce travail s'intéresse à une autre méthode pour caractériser les impacts. L'approche choisie ici consiste à s'inspirer des méthodes de l'étude de la santé des structures. Ces méthodes s'utilisent principalement sur des plaques, des hypothèses seront donc posées sur le tapis de réception. Certaines de ces méthodes sont présentées dans [Kun13], parmi lesquelles la trilatération, la formation de rayon tirée ou l'analyse modale de la propagation d'ondes élastiques. Ce travail s'intéresse principalement à la première, la trilatération, et aux différents paramètres qui influent sur la prédictabilité du point d'impact sur un tapis de gymnastique via des accéléromètres.

2 Matériel et méthode

L'objectif est d'instrumenter un tapis de gymnastique avec des IMUs afin de récupérer les données d'accélération à différents endroits du tapis et la localisation de l'impact. Une fois ces données obtenues, un algorithme est utilisé pour construire le point d'arrivée et le comparer au point d'arrivée réel.

2.1 Intrumentation

Un tapis de gymnastique GYMNOVA de dimensions $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 20\text{ cm}$ et un surtapis de dimensions $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10\text{ cm}$ ont été utilisés (Figure 2). Les 8 IMUs utilisées ont été disposés sur les bords du tapis, conformément à la Figure 1. L'impacteur instrumenté (Figure 1) est aussi équipé de plusieurs marqueurs afin de savoir où l'impact a eu lieu. De plus, une masse jusqu'à 10 kg a été ajoutée pour augmenter la force d'impact, afin de se rapprocher de la force d'un saut. Pour récupérer la position des marqueurs, une capture de mouvement optoélectronique Qualisys a été utilisée à l'aide de marqueurs réfléchissants visibles sur la Figure 3.

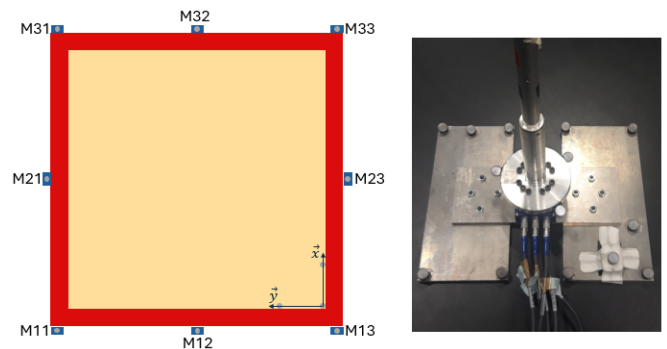


FIGURE 1 – Disposition des IMUs sur les bords du tapis et impacteur instrumenté.

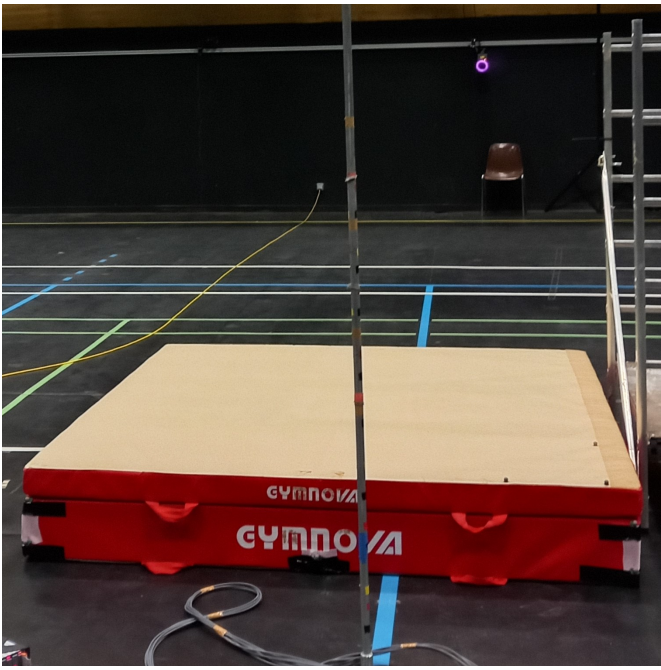


FIGURE 2 – Tapis instrumenté pour des essais

2.2 Expérimentation

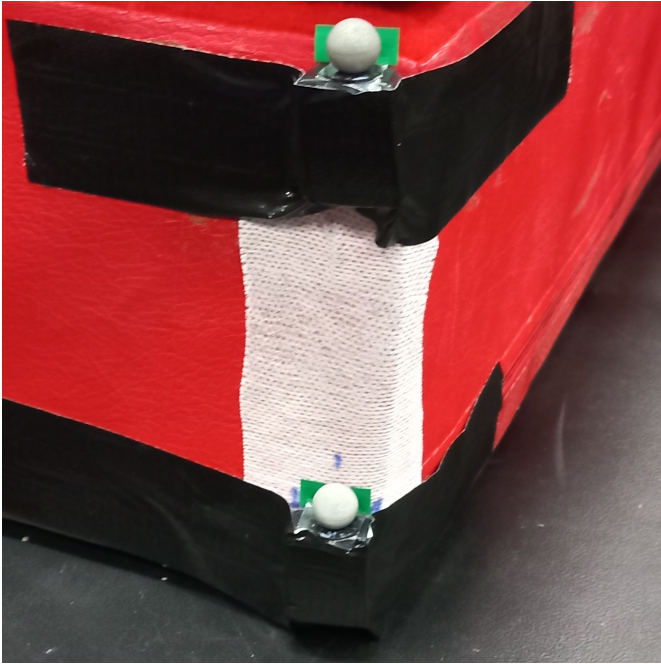


FIGURE 3 – Impacteur instrumenté pour des essais

2.2.1 Déroulé

Pour les sauts, un sujet a sauté d'une hauteur de ... pour atterrir sur le tapis. Pour les impacts, l'impacteur était utilisé pour taper sur le tapis pendant une minute. Les essais ont été réalisés depuis plusieurs endroits pour avoir une distribution bien répartie des impacts.

2.2.2 Méthode de localisation

La méthode de localisation donnée par Kundu et al dans [Kun13] repose sur d'importantes hypothèses : Les ondes ont une propagation isotropiques ($H1$) et une vitesse constante ($H2$). Ces hypothèses sont ici considérées plausibles dans la surface du tapis.

La méthode consiste alors à minimiser 1 dont les paramètres sont les coordonnées du point d'impact.

$$E(x_0, y_0) =$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n [t_{ij}(d_k - d_l) - t_{kl}(d_i - d_j)] \quad (1)$$

avec $t_{ij} = t_i - t_j$, où t_i est le temps d'arrivée du signal au capteur i , $d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$ la distance entre le point d'origine du signal et le capteur i et n le nombre de capteurs.

Cette méthode nécessite au moins trois capteurs pour fonctionner correctement, et est d'autant plus précise que le nombre de capteurs est élevé.

2.2.3 Comparaison des données

Les données obtenues lors des essais sont les lectures des IMUs lors d'un essai et la position de l'impact lors de ce même essai. Pour l'impacteur, ce point est le centre de la surface de l'impacteur en contact avec le tapis.

Avec ces données, d'autres données intermédiaires sont calculées. La norme entre les points obtenus 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 appelé ratio. Il est calculé en divisant par 8 le nombre de comparaisons éléments par éléments des deux ordres.

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 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 significativement 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.

2.2.4 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 naif, la cross correlation et le seuil d'enveloppe.

Le signal obtenu par les IMUs ressemble au signal de la Figure 4.

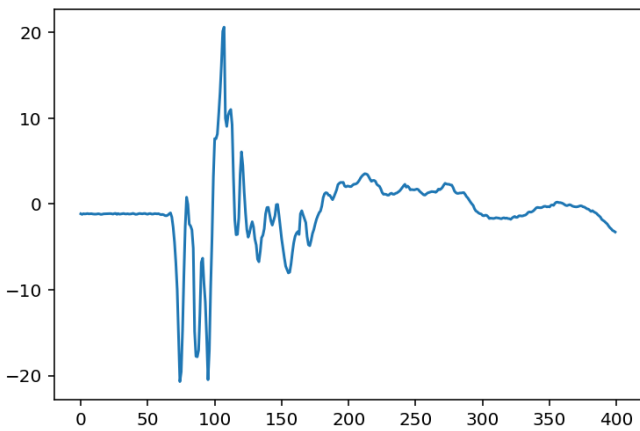


FIGURE 4 – Signal de réponse du CI selon l'axe vertical pour un essai de saut sur surtapis.

Pour utiliser la trilatération, il est nécessaire d'avoir accès à la différence de temps d'arrivée (TdA) du signal entre deux IMUs. Pour ce faire, trois méthodes ont été employées. La première, le seuil naif, consiste considérer que le signal est arrivée lorsqu'il dépasse une certaine valeur absolue. Une fois les temps d'arrivée identifiés pour chaque IMU, on calcule les différences de TdA entre eux.

La seconde méthode, la cross-correlation, fait une corrélation croisée entre deux signaux et renvoie un retard qui minimise la différence entre les deux signaux. Ce retard est alors le TdA entre deux IMUs.

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 [SGA12].

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

2.2.5 Type d'optimisation

L'optimisation est réalisée par la fonction *optimize* de Python, pour laquelle 14 méthodes sont implémentées. Le détail peut être retrouvé sur la page de documentation de la méthode¹. Le point de départ se situe au centre du tapis et des bornes de la longueur du tapis sont imposées.

2.2.6 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 verticale de l'accélération est récupérée soit les calculs sont réalisés pour en extraire la norme.

Pour le spatial, la position des IMUs est obtenue à partir d'un essai statique réalisé après les essais ou à partir d'une moyenne sur leur position pendant un impact.

2.2.7 Jeu de données

Différents jeux de données sont présents, liés aux différences de réalisation des expérimentations. En effet, il y a différents résultats selon si les impacts étaient réalisés avec l'impacteur ou en sautant, si le surtapis était présent ou non et enfin si les essais ont été réalisés durant le stage de M^{me} PUCHEU ou durant ce projet de recherche.

2.2.8 Jeu de paramètres

Ces différents paramètres sont résumés dans la Table 1 en annexe ainsi que des abbreviations pour désigner les jeux de paramètres en juxtaposant les abbreviations.

3 Résultats

3.1 Méthodes d'optimisation

Pour comparer les différentes méthodes utilisées, les jeux de paramètre étaient $T-SN-_-N-TSS$, avec $_$ prenant la valeur des différentes méthodes.

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.

1. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.minimize.html>

C'est donc cette méthode qui a été préférée : la **Default**.

3.2 Traitement de l'accéléromètre : temporel

Pour comparer les résultats suite au traitement des données temporelles de l'accéléromètre, les jeux de paramètre étaient $T - SN - D - _ - TSS$.

Le test statistique a montré que les différences entre un traitement seulement sur l'axe vertical et sur la norme sont significativement différents, avec le traitement sur la norme qui donne une erreur plus faible.

3.3 Traitement de l'accéléromètre : spatial

Pour comparer les résultats suite au traitement des données spatiales de l'accéléromètre, les jeux de paramètre étaient $T - SN - D - N - T_IP$.

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.

Comparaison des Cls statiques ou moyennés Kruskal-Wallis et Dunn

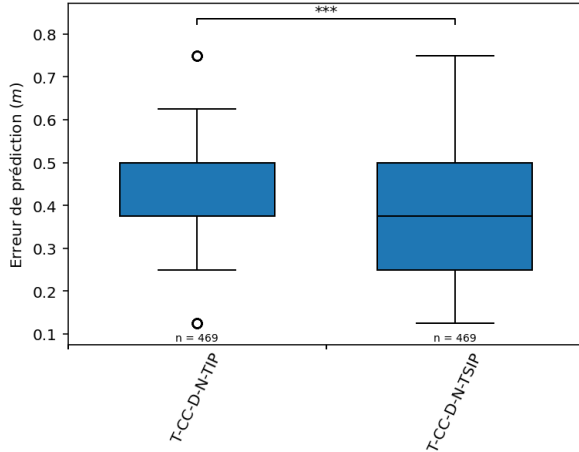


FIGURE 5 – Différence des valeurs moyennes et des écart-types entre position moyennée et statique.

3.4 Détermination du TdA

Pour comparer les résultats suite à la méthode de détermination du TdA, les jeux de paramètre étaient $T - _ - D - N - TSS$.

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

Comparaison des calculs de TdA Kruskal-Wallis et Dunn

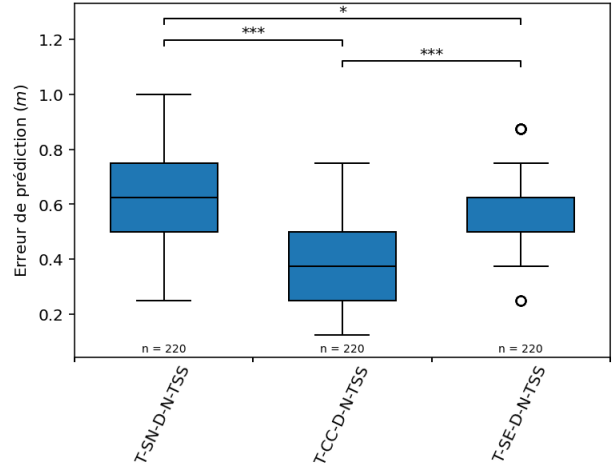


FIGURE 6 – Différence des valeurs moyennes et des écart-types entre position moyennée et statique.

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

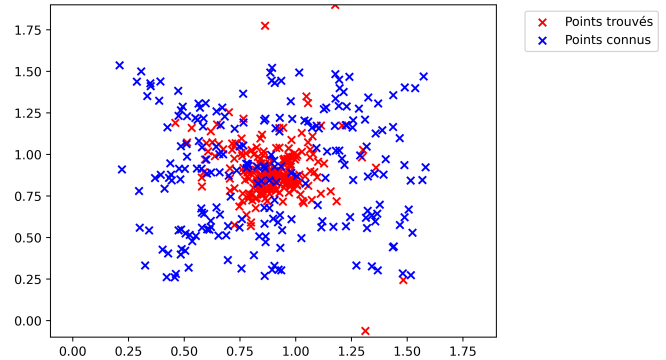


FIGURE 7 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Naif.

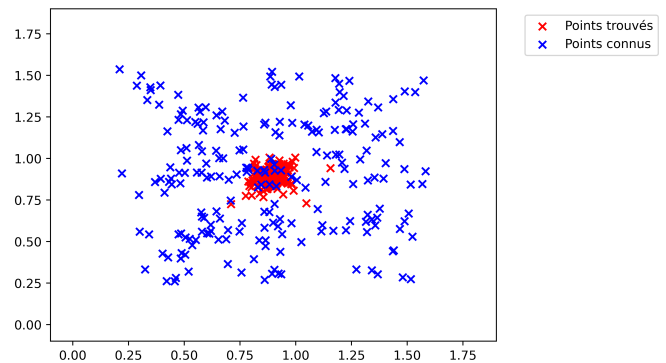


FIGURE 8 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Cross Correlation.

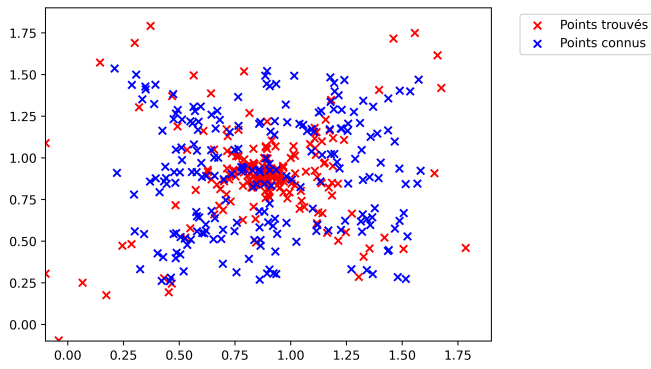


FIGURE 9 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Enveloppe.

3.5 Différence entre saut et impacts pour les sauts et les impacts

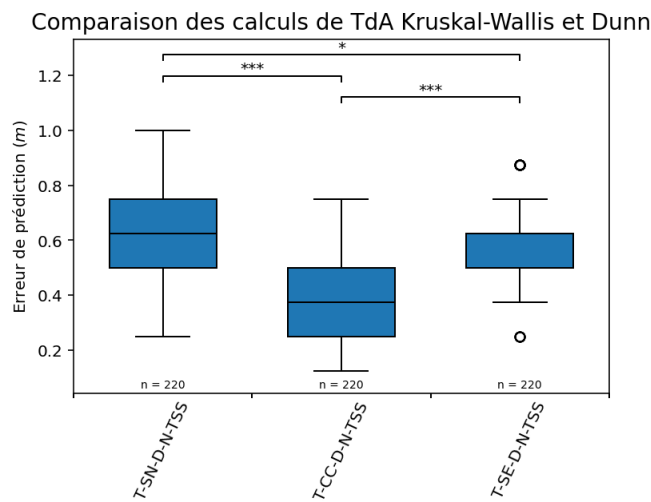


FIGURE 10 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Enveloppe.

3.6 Différence impacts entre le stage et le projet pour les sauts et les impacts

3.7 Différence saut surtapis entre stage et projet

4 Discussion

4.1 Différence des méthodes de détermination des TdA

Suite aux différents tests 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

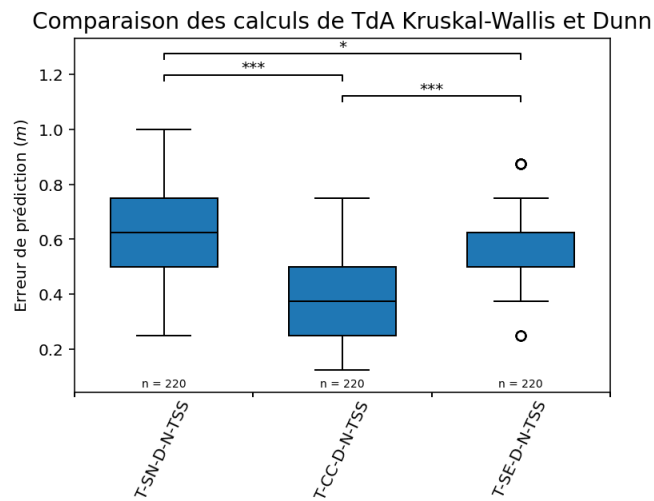


FIGURE 11 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Enveloppe.

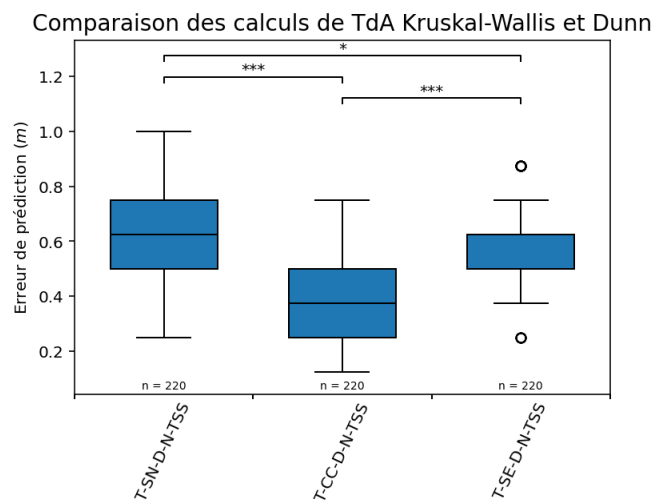


FIGURE 12 – Répartition des points prédits et réels pour la méthode Seuil Enveloppe.

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 globalement.

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

Références

- [Kun13] Tribikram KUNDU. « Acoustic source localization », Dans : *Ultrasonics* (2013). ISSN : 0041-624X. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2013.06.009>.
- [SGA12] Z SHARIF-KHODAEI, M GHAJARI et M H ALIABADI. « Determination of impact location on composite stiffened panels », Dans : *Smart Materials and Structures* (2012). DOI : 10.1088/0964-1726/21/10/105026.

Paramètre	Options	Abbréviation
Localisation	Trilateration	T
Méthode de TdA	Seuil naif / Cross-Correlation / Seuil enveloppe	$SN/CC/SE$
Méthode d'optimisation	Default / Nelder-Mead / Powell (*)	$D/NM/P$
Traitement de la position de l'accéléromètre	Composante verticale / Norme	Z/N
Jeu de données	Tapis / Surtapis - Statique / Moyenne - Saut / Impact - Stage / Projet (**)	$T/S - S/\emptyset - S/I - S/P$

(*) Elles sont plus nombreuses mais ne pouvaient être toutes citées ici.
(**) Un jeu de donnée consiste en une combinaison de ces quatre options.

TABLE 1 – Conductance values depending on the solution