

# MOUVEMENTS ARTICULAIRES ET COORDINATION

---

DANS L'ANALYSE DE LA PERFORMANCE SPORTIVE

Septembre 2022  
Diane HAERING



# Plan du cours

- A) Indicateurs de la performance associés aux mouvements articulaires
  
- B) Cinématique et calcul des angles articulaires au cours d'un mouvement



# Objectifs

- Connaître et expliquer le lien entre des indicateurs liés mouvements articulaires et la performance d'un geste
- Connaître les différents outils de mesure du mouvement, et être capable de choisir celui qui est le plus adapté au contexte d'évaluation d'une performance donnée
- Savoir réaliser/reconnaître une bonne vidéo pour l'analyse du mouvement
- Être capable d'extraire et de représenter l'évolution des angles articulaires au cours d'un geste sportif à partir d'une capture de mouvement



# A) INDICATEURS DE LA PERFORMANCE ASSOCIÉS AUX MOUVEMENTS ARTICULAIRES

---

Amplitude articulaire dynamique  
Coordination intersegmentaire  
Organisation proximo-distale



# Mouvement articulaire

- Définition :
  - C'est le mouvement de rotation d'un segment autour d'une articulation
  - Le mouvement global du corps reflète l'ensemble des mouvements articulaires
  - Les caractéristiques de ces mouvements articulaires sont donc primordiaux pour la performance



# Amplitude articulaire dynamique

- L'amplitude articulaire est la différence entre l'angle maximal et minimal d'une articulation
- L'amplitude articulaire dynamique correspond à l'amplitude de mouvement utilisée lors d'un mouvement, elle peut correspondre à l'ensemble ou une partie de l'amplitude maximale de l'articulation
- L'amplitude articulaire statique ou dynamique maximale caractérise la souplesse de l'articulation, souplesse limitée la plupart du temps par la raideur musculaire.



## Exemple 1: Tir au penalty

1. Quel est l'objectif du tir au penalty?
2. De quel angle articulaire dépend cet objectif et de quelle manière?



# Exemple 1: Tir au penalty



Nunome, H., Ikegami, Y., Kozakai, R., Apriantono, T., & Sano, S. (2006). Segmental dynamics of soccer instep kicking with the preferred and non-preferred leg. *Journal of sports sciences*, 24(05), 529-541.

Amiri-Khorasani, M., Osman, N. A. A., & Yusof, A. (2011). Acute effect of static and dynamic stretching on hip dynamic range of motion during instep kicking in professional soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(6), 1647-1652.



# Exemple 1: Tir au penalty

## 1. Quel est l'objectif du tir au penalty?

- envoyer la balle suffisamment vite dans zone autour du gardien limitée par les poteaux de façon à ce que celui-ci n'ait pas le temps d'atteindre la balle

## 2. De quelle manière cet objectif dépend-il des angles articulaires?

- la vitesse de la balle est donc un des paramètres les plus importants pour la réussite du tir
- pour transmettre le plus de vitesse possible à la balle, il faut que le pied qui frappe la balle ait lui-même la plus grande vitesse possible
- l'articulation la plus impliquée dans la création de la vitesse de la cuisse, de la jambe et du pied est la hanche; celle-ci doit être capable d'accélérer le plus possible (atteindre la vitesse angulaire la plus importante possible avant la frappe).
- or plus j'accélère longtemps, plus la vitesse finale est grande. l'amplitude dynamique du mouvement de la hanche pendant l'armer du tir doit être la plus large possible pour permettre à cette accélération de durer le plus longtemps possible.

SI J'AUGMENTE L'AMPLITUDE ARTICULAIRE DYNAMIQUE D'UNE ARTICULATION, J'AUGMENTE LA DUREE DE L'ACCELERATION POSSIBLE, ET POSSIBLEMENT LA VITESSE FINALE

(C'est comme si j'augmentais la longueur de la course d'élan)



# Coordination inter-segmentaire

- Le corps est un système redondant mis en mouvement par plusieurs centaines de muscles et articulations.
- Les gestes sportifs nécessitent la coordination entre plusieurs membres ou articulations qui simplifient la gestions de ces articulations grâce à des relations spatio-temporelles stables.
- L'identification de ces coordinations permet de mieux comprendre l'organisation et le contrôle du mouvement du mouvement



## Exemple 2: Lancer de fléchettes



1. Quel est l'objectif du lancer de fléchette?
2. De quelle manière cet objectif dépend-il de la coordination intersegmentaire mise en jeu?



## Exemple 2: Lancer de fléchettes



1. Quel est l'objectif du lancer de fléchette?
  - lancer au plus près de la cible et de façon répétitive
2. De quelle manière cet objectif dépend-il de la coordination intersegmentaire mise en jeu?
  - une bonne coordination segmentaire peut être plus répétable et moins sujette au bruit extérieur

Bartlett, R. (2008). Movement variability and its implications for sports scientists and practitioners: an overview. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 3(1), 113-124.



# Coordination intersegmentaire sur la durée

- La coordination sur la durée est caractérisée par la variation de coordination intersegmentaire au cours d'une activité répétitive et prolongée.
- Cette variabilité est généralement attribuée à la fatigue.
- La coordination inter-segmentaire et sa variabilité est couramment représentée par des graphiques angle-angle

Muñoz, J. E., Villada, J. F., Casanova, S., Montoya, M. F., & Henao, O. A. (2018, September). Dynamic systems theory in human movement exploring coordination patterns by angle-angle diagrams using Kinect. In *2018 10th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)* (pp. 1-4). IEEE.



## Exemple 3: Aviron

1. Quel est l'objectif de l'aviron?
2. De quelle manière cet objectif dépend-il de la coordination intersegmentaire sur la durée?



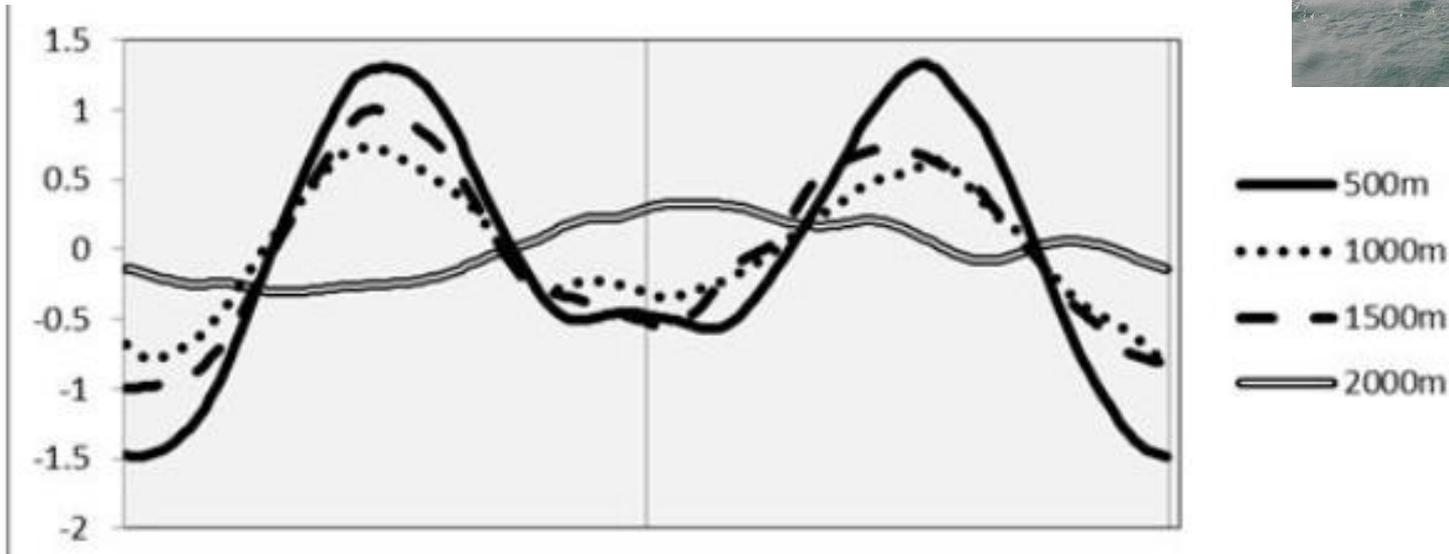
## Exemple 3: Aviron



1. Quel est l'objectif de l'aviron?
  - parcourir la distance donnée le plus rapidement possible
2. De quelle manière cet objectif dépend-il de la coordination intersegmentaire sur la durée?
  - si la coordination intersegmentaire varie au fur et à mesure de la course, l'efficacité initiale du geste peut être diminuée et la vitesse du bateau diminue



## Exemple 3: Aviron

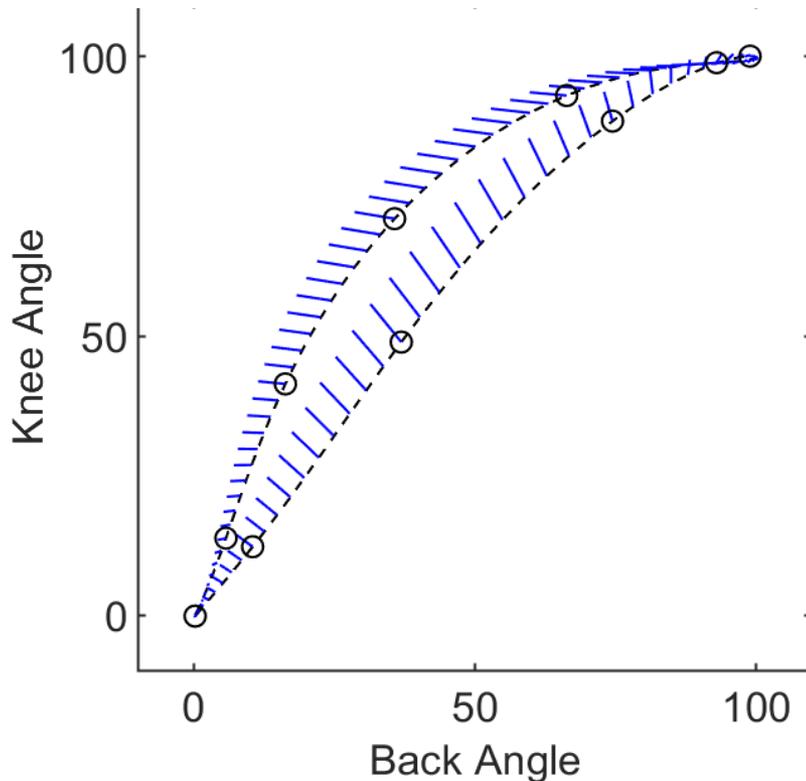


*Coefficient de variabilité au cours du cycle de rame (0=pas de variabilité) pour chaque type de course*

Zainuddin, F. L., Zahiran, A., Umar, M. A., Shaharudin, S., & Razman, R. M. (2019). Changes in lower limb kinematics coordination during 2000m ergometer rowing among male junior national rowers. *Journal of Physical Education and Sport*, 19(3), 1656-1662.



## Exemple 3: Aviron



*Représentation de la variabilité (lignes bleues) par rapport à la relation moyenne (ligne pointillée) entre la flexion du genou et de l'orientation du dos pendant le cycle de rame*

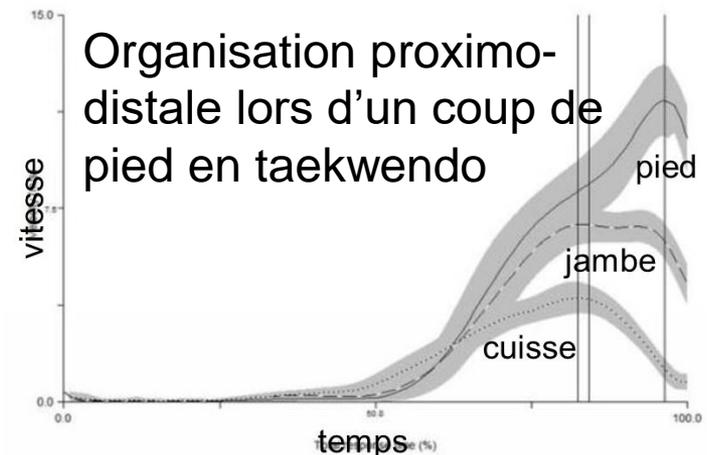
Becker, A., Herrebrøden, H., Sánchez, V. E. G., Nymoen, K., Freitas, C. M. D. S., Torresen, J., & Jensenius, A. R. (2019, October). Functional Data Analysis of Rowing Technique Using Motion Capture Data. In *Proceedings of the 6th International Conference on Movement and Computing* (pp. 1-8).



# Organisation proximo-distale

- La séquence proximo-distale est un mouvement multi-segmentaire (geste complexe) où les segments les plus proches de l'axe du corps (aussi les plus lourds), seront mobilisés avant les segments les plus excentrés.
- Souvent cette séquence est mise en évidence par l'ordre d'apparition des pics de vitesse des différents segments ou articulations

Allard P et Blanchi JP. Analyse du mouvement humain par la biomécanique. Paris : Vigot, 2000.



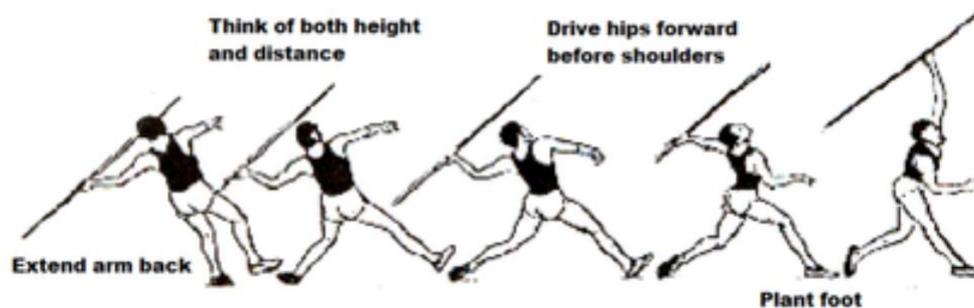
## Exemple 4: Lancer de javelot

1. Quel est l'objectif du lancer de javelot?
2. De quelle manière cet objectif dépend-il des vitesses articulaires?



# Exemple 4: Lancer de javelot

<https://www.youtube.com/watch?v=FuRWWnxaoul>



Pelvis (°/s)	202.5 ± 48.1
Upper torso (°/s)	391.0 ± 93.5*
Humeral hor. adduction (°/s)	383.9 ± 129.7*
Elbow extension (°/s)	1281.9 ± 204.9
Humeral internal rotation (°/s)	2293.7 ± 484.3

Urbin, M. A., Stodden, D., & Fleisig, G. (2013). Overarm throwing variability as a function of trunk action. *Journal of Motor Learning and Development*, 1(4), 89-95.

Peak joint center speeds (m · s<sup>-1</sup>)

Hip	7.7
Shoulder***	9.1
Elbow**	15.4
Wrist***	20.9
Hand***	23.5

Time from beginning of contact for peak joint center speeds (ms)

Hip	16
Shoulder	56
Elbow	83
Wrist	121
Hand	127

Antti, M., Komi, P. V., Korjus, T., Navarro, E., & Gregor, R. J. (1994). *Body Segment Contributions to Javelin Throwing during Final Thrust Phases*. *Journal of Applied Biomechanics*, 10(2), 166–177.



## Exemple 4: Lancer de javelot

1. Quel est l'objectif du lancer de javelot?
  - lancer l'objet le plus loin possible, donc avec une vitesse la plus importante et la mieux orientée possible
2. De quelle manière cet objectif dépend-il des vitesses articulaires?
  - pour atteindre la vitesse la plus importante du javelot, il faut que la main qui lance le javelot ait elle-même la vitesse la plus importante au moment de lâcher l'objet.
  - pour cela l'organisation des vitesses articulaires de façon proximo-distale (cheville, genou, hanche, épaule, coude, poignet est la plus performante)
  - de cette façon, la vitesse articulaire aux membres inférieurs est transférée au tronc et aux membres supérieurs, puis additionnée avec la vitesse de l'épaule, elle-même transmise aux bras, avant-bras et main, puis additionnée avec la vitesse du coude, elle-même transmise au bras et à la main, et additionnée à la vitesse du poignet et transmise à la main et à l'objet
  - La vitesse de la main est donc le résultat cumulé de toutes les vitesses articulaires précédentes.
  - De plus si la main et l'objet ont une petite masse par rapport au corps, la vitesse transmise à travers les segments de la chaîne proximo-distale peut vraiment s'accumuler de façon exponentielle par le jeu des quantités de mouvement (cf cours sur les masses)



# Exercice 1

- Choisissez un des gestes sportifs suivant et identifier les éléments suivants:
  - coup de pied arrêter au rugby,
  - tir en suspension au handball,
  - course d'élan lors du saut en longueur
- 1. Quel est l'objectif de ce sport? (qu'est ce qui détermine une victoire dans ce sport?)
- 2. En quoi ce geste permet-il d'atteindre cet objectif ou une partie de cet objectif?
- 3. Quelles sont les contraintes spécifiques à ce geste? (souvent liées aux caractéristiques de l'environnement)
- 4. Quels paramètres biomécaniques du mouvement sont liés le plus directement possible avec la performance? (choisissez parmi les paramètres liés aux organisations et contributions segmentaires vues en cours). Montrer ce lien.



# Exercice 2 (à faire pour le 09.11)

- 1. Quelle est votre spécialité sportive?
- 2. Quel est l'objectif de cette discipline?  
(qu'est ce qui détermine une victoire en compétition dans ce sport?)
- 3. Choisissez un geste dans cette discipline qui permet-il d'atteindre cet objectif ou une partie de cet objectif: justifiez votre choix.
- 4. Quelles sont les contraintes spécifiques à ce geste? (souvent liées aux caractéristiques de l'environnement)
- 5. Selon la littérature scientifique, quels paramètres biomécaniques du mouvement sont liés le plus directement possible avec la performance? (choisissez parmi les paramètres liés à la gestion du centre de masse, ou aux organisations et contributions segmentaires vus en cours). Montrer ce lien.



# B) CINÉMATIQUE ET CALCUL DES ANGLES ARTICULAIRES ET VITESSES ARTICULAIRES AU COURS D'UN MOUVEMENT

---

Outils de mesure du mouvement,

Obtenir une vidéo pour l'analyse du mouvement,

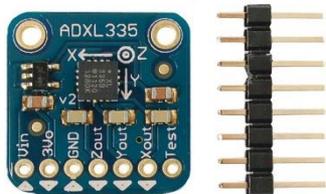
Obtenir des angles articulaires à partir d'une vidéo

Calculs de la vitesse angulaire à partir des angles



# Quels sont les outils pour mesurer les paramètres cinématiques?

- Capteurs inertiels : accéléromètre + gyroscope pour mesurer l'accélération linéaire et l'orientation des segments



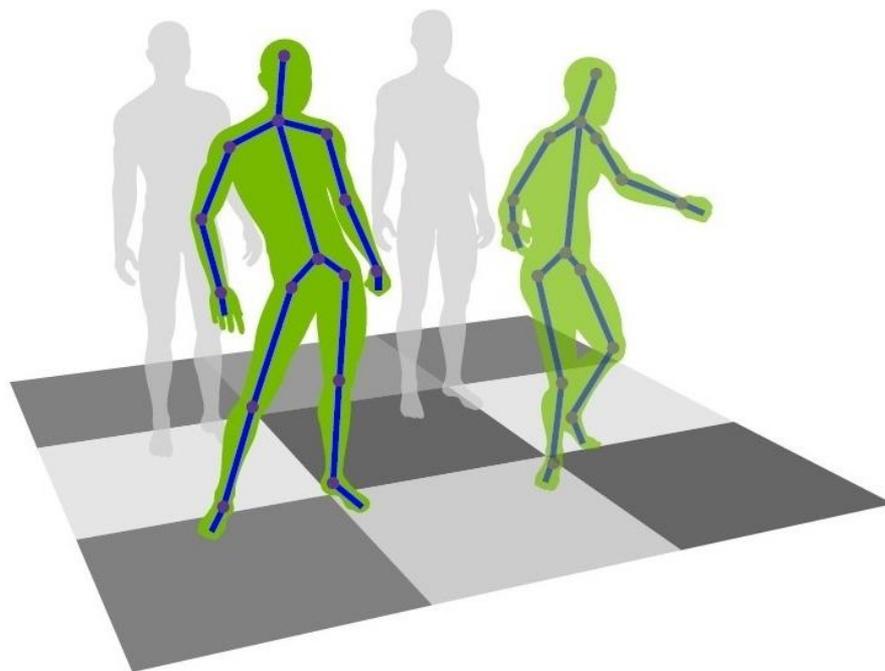
# Quels sont les outils pour mesurer les paramètres cinématiques

- Caméra ou caméra haute fréquence : pour mesurer des positions de repères articulaires et segmentaires en 2D



# Quels sont les outils pour mesurer les paramètres cinématiques

- Caméras + caméras de profondeur (kinect): pour mesurer des positions et orientations segmentaires en 3D

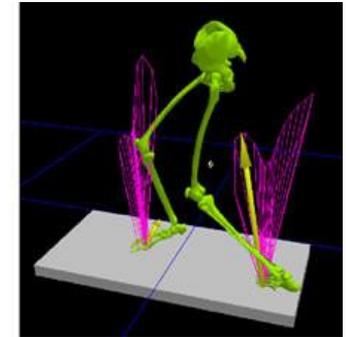
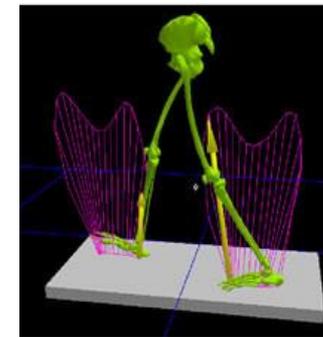


KINECT  
for XBOX 360.



# Quels sont les outils pour mesurer les paramètres cinématiques

- Système optoélectroniques: pour mesurer des positions de repères anatomiques en 3D



# Comment obtenir une vidéo pour l'analyse de mouvement avec peu de matériel?

- Avec un smartphone ou une tablette
- Avec une caméra numérique



# Qu'est-ce qu'une bonne vidéo?

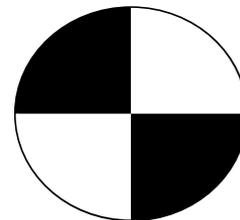
- L'image est de bonne qualité
  - la résolution est bonne, l'image n'est pas trop pixélisée
  - l'acquisition est rapide, l'image n'est pas trop floue,
  - la luminosité et les contrastes sont bien réglés, je distingue les différents éléments de l'image
- La caméra est bien positionnée
  - je peux suivre ou déduire les points d'intérêts dont j'ai besoin tout au long du mouvement
  - la caméra est perpendiculaire aux angles que je souhaite mesurer
  - la caméra est fixée, l'image ne bouge pas trop
  - La caméra est à la bonne distance je peux voir tout le mouvement, sans voir forcément tout l'environnement.



# Comment obtenir les positions dont j'ai besoin sur une vidéo?

- Logiciel d'analyse de mouvement à partir d'images vidéo (exemple: Kinovea OU Tracker --> ne fonctionnent pas bien sous mac, mais installés en salles informatiques).
- Importer les vidéos dans le logiciel.
- Suivre le tutoriel pour extraire les données de position.

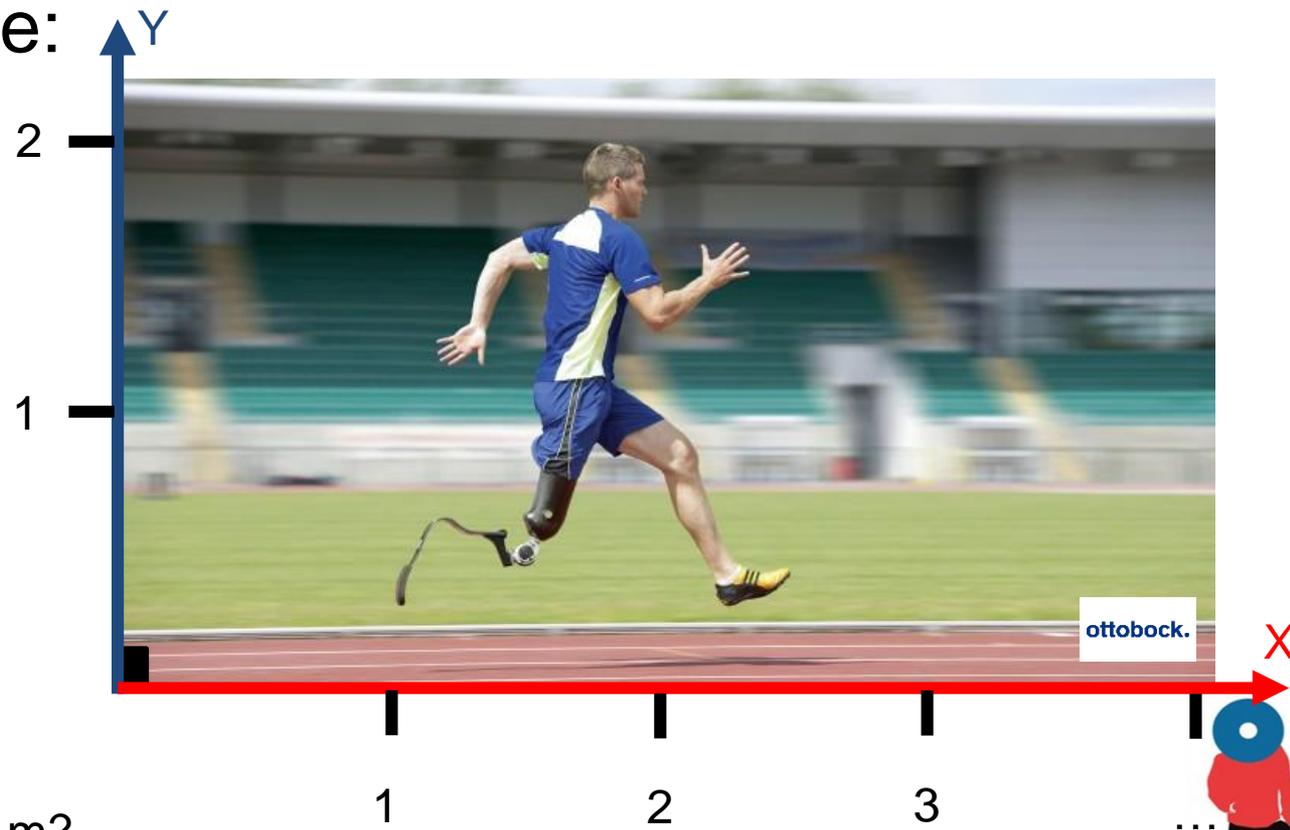
!!NB: Afin de mieux suivre des éléments (points d'intérêt) au cours du mouvement, des gommettes bien visibles peuvent être collées sur le sujet !!



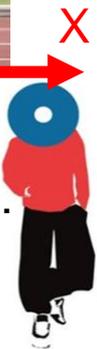
# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

- Des coordonnées dans un repère:

2D = 2 axes  
orthogonaux  
normés  
directes



en mm, en cm, ou en m?

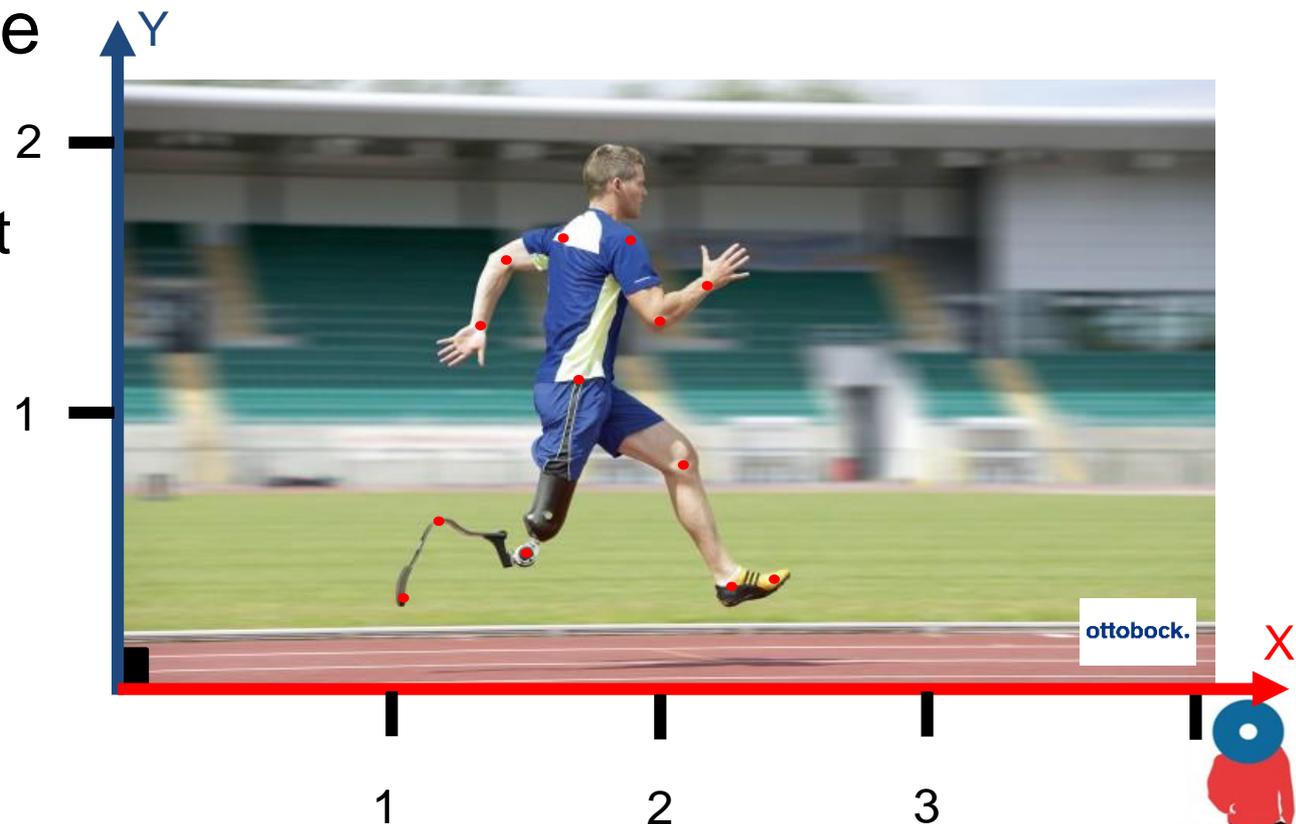


# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

- Des coordonnées dans un repère

qui correspondent à des **points anatomiques**,

en général à des **articulations**



# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

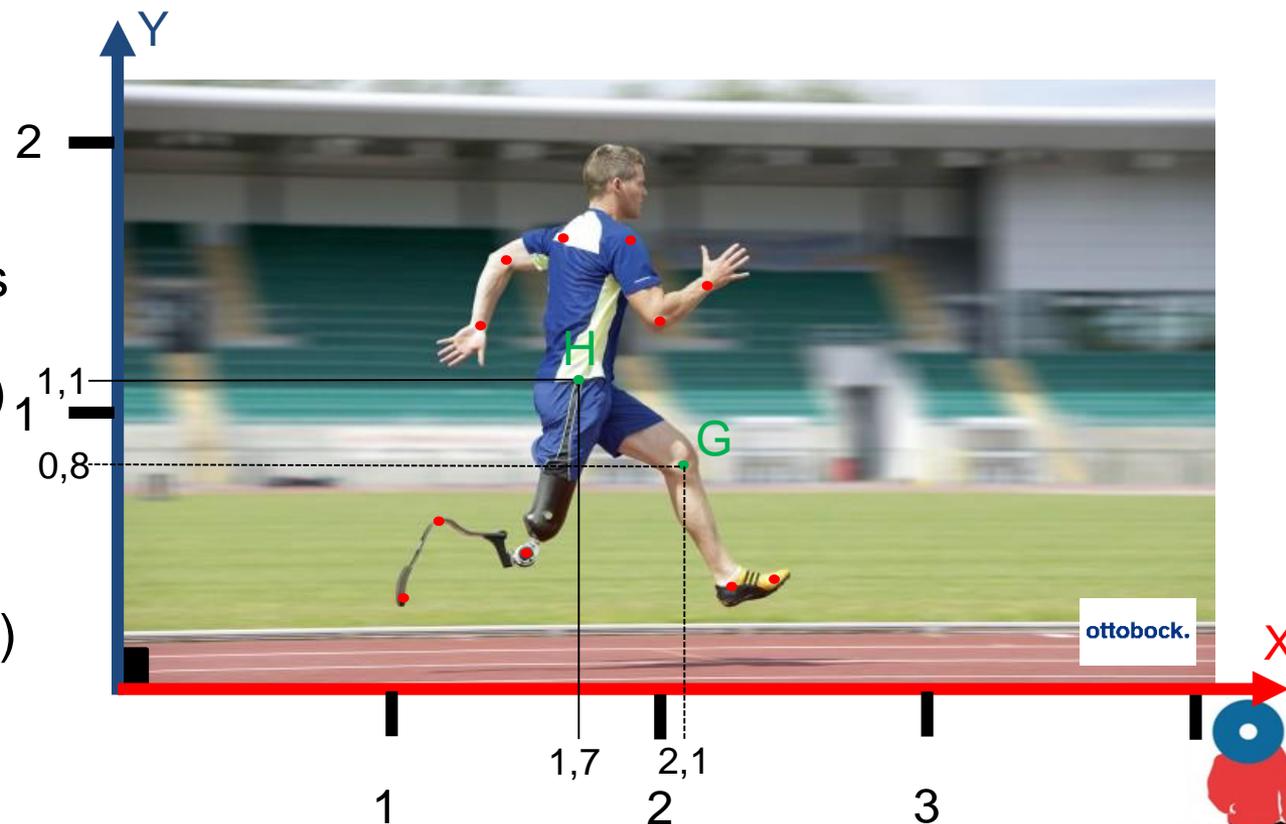
Ex:

Les coordonnées des Hanches sont:

$$H(x_H; y_H) = H(1,7; 1,1)$$

Les coordonnées du Genou sont:

$$H(x_G; y_G) = G(2,1; 0,8)$$

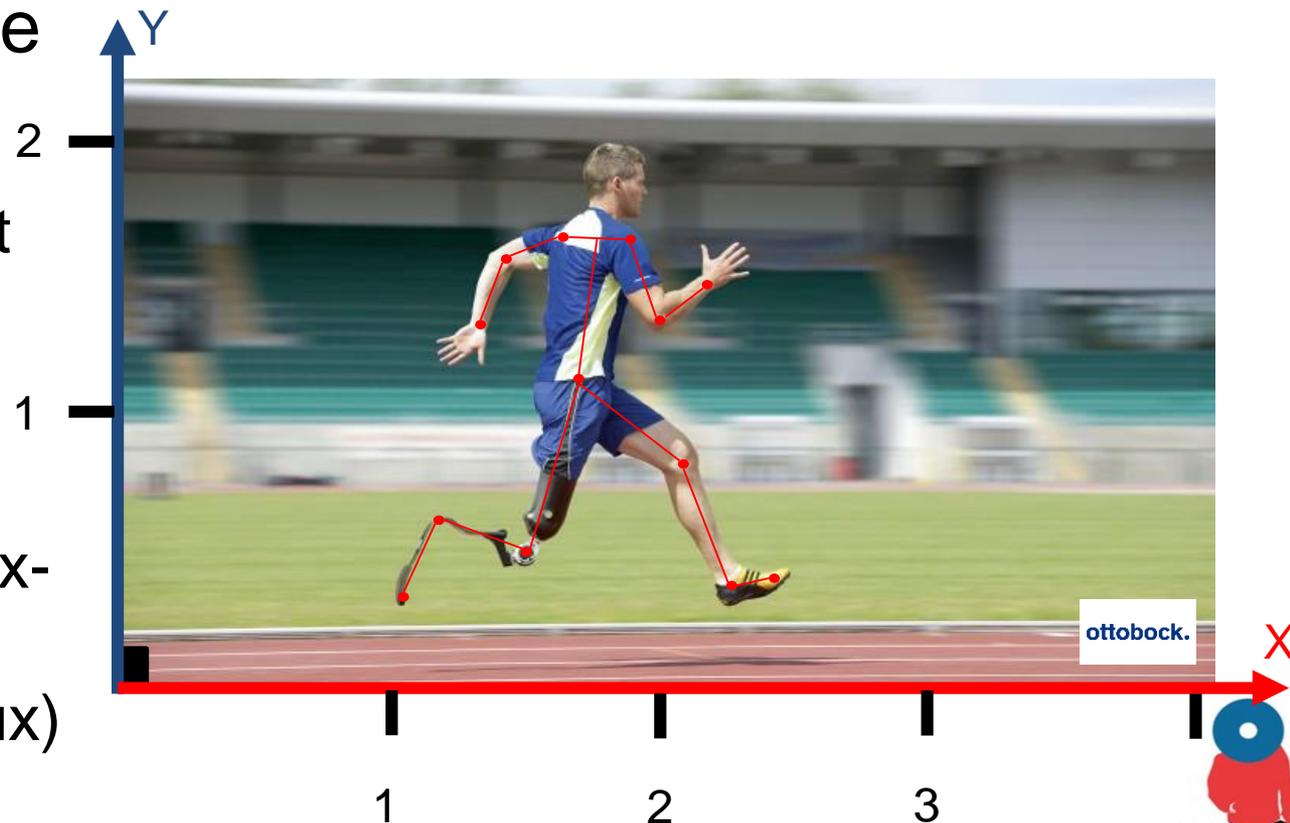


# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

- Des coordonnées dans un repère

qui correspondent à des **points anatomiques**,

qui définissent eux-mêmes **des segments** (osseux)



# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

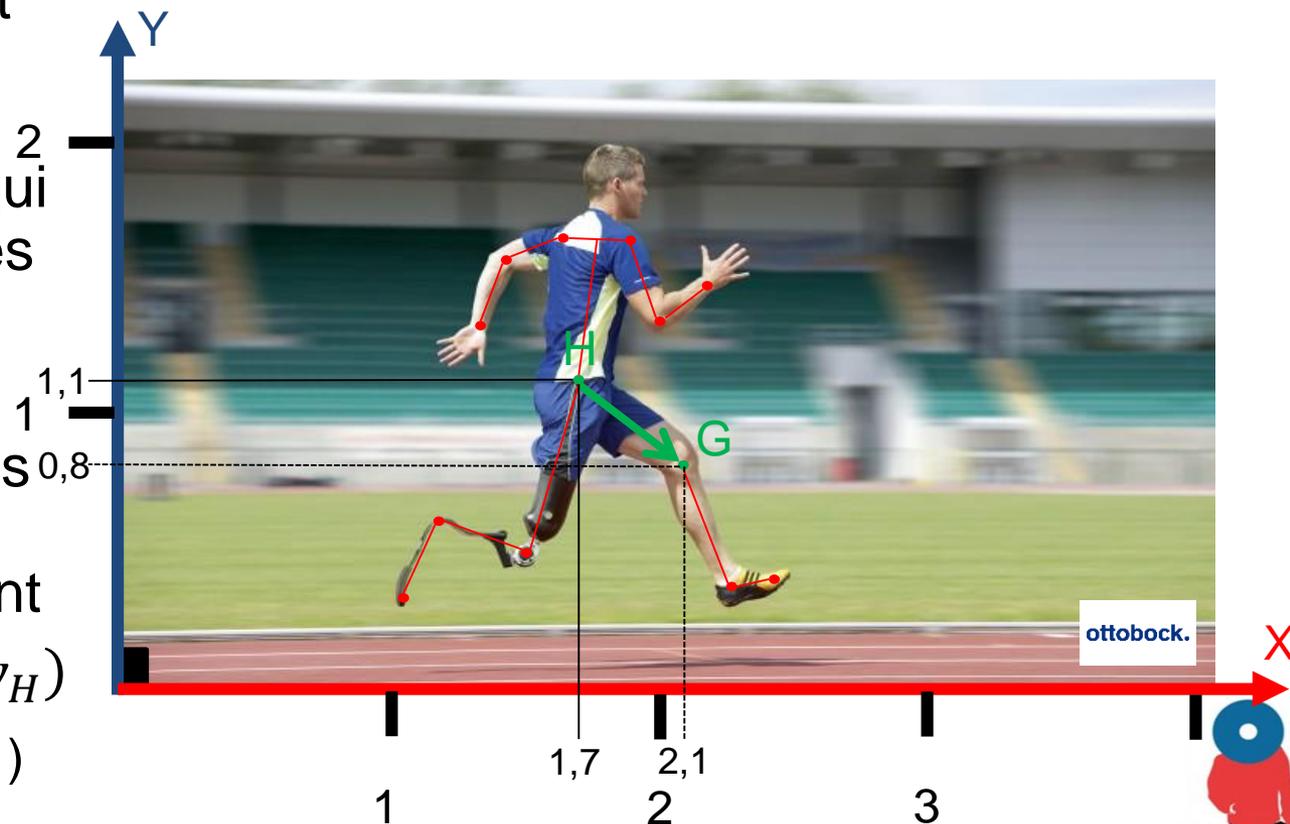
Les **segments** sont représentés mathématiquement  $2$  par des **vecteurs** qui possèdent aussi des coordonnées

Ex: les coordonnées du vecteur cuisse (hanche-genou) sont

$$\overrightarrow{HG}(x_G - x_H; y_G - y_H)$$

$$(2,1 - 1,7; 0,8 - 1,1)$$

$$(0,4; -0,3)$$



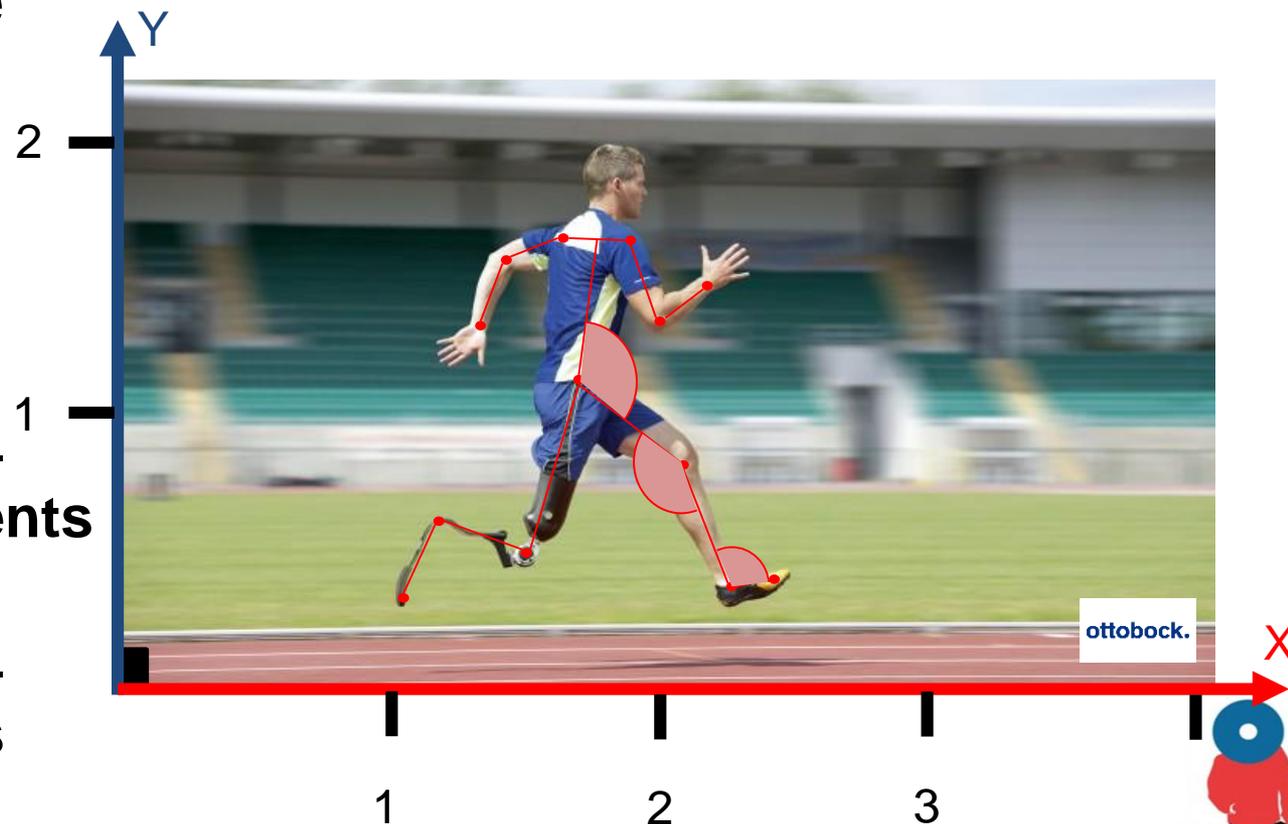
# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

- Des coordonnées dans un repère

qui correspondent à des **points anatomiques**,

qui définissent eux-mêmes des **segments**

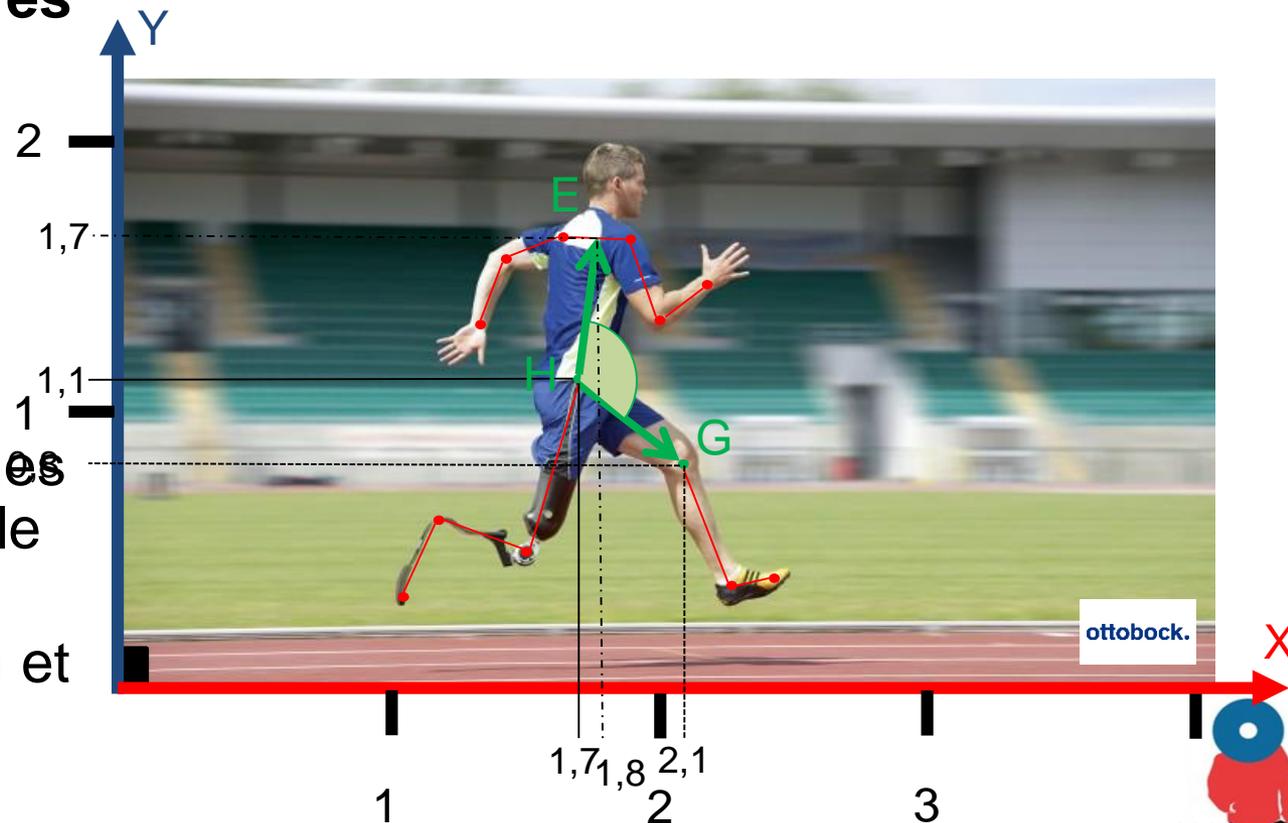
qui définissent eux-mêmes des **angles articulaires**



# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

Les **angles articulaires** peuvent aussi être calculés à partir des coordonnées des segments grâce au **produit scalaire**

Ex: l'angle des hanches peut être calculé par le produit scalaire des vecteurs  $\overrightarrow{HG}(0,4;-0,3)$  et  $\overrightarrow{HE}(0,1;0,6)$



# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

Le produit scalaire a 2 formules:

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{HG} \cdot \overrightarrow{HE} = x_{HG}x_{HE} + y_{HG}y_{HE} \\ \overrightarrow{HG} \cdot \overrightarrow{HE} = \|\overrightarrow{HG}\| \|\overrightarrow{HE}\| \cos(\theta) \end{array} \right.$$

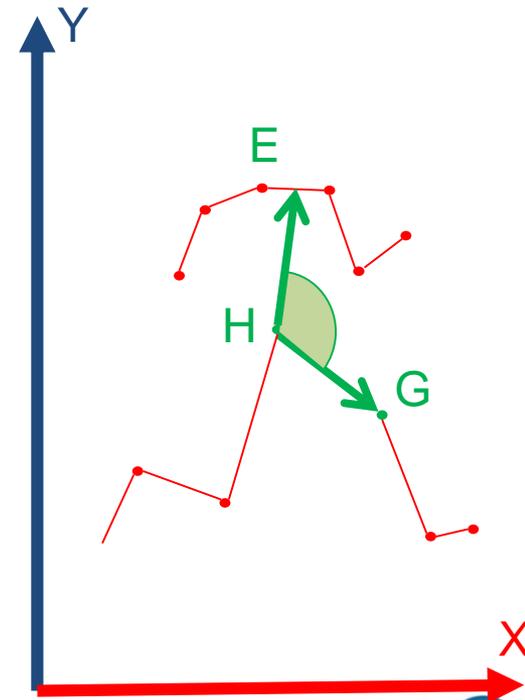
$$x_{HG}x_{HE} + y_{HG}y_{HE} = \|\overrightarrow{HG}\| \|\overrightarrow{HE}\| \cos(\theta)$$

$$\cos(\theta) = \frac{x_{HG}x_{HE} + y_{HG}y_{HE}}{\|\overrightarrow{HG}\| \|\overrightarrow{HE}\|}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{x_{HG}x_{HE} + y_{HG}y_{HE}}{\|\overrightarrow{HG}\| \|\overrightarrow{HE}\|}\right)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{0,4*0,1 + (-0,3)*0,6}{\|\overrightarrow{HG}\| \|\overrightarrow{HE}\|}\right)$$

normes des vecteurs  
(longueurs)



# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

Pour calculer la **longueur** d'un segment on utilise le **théorème de Pythagore**:

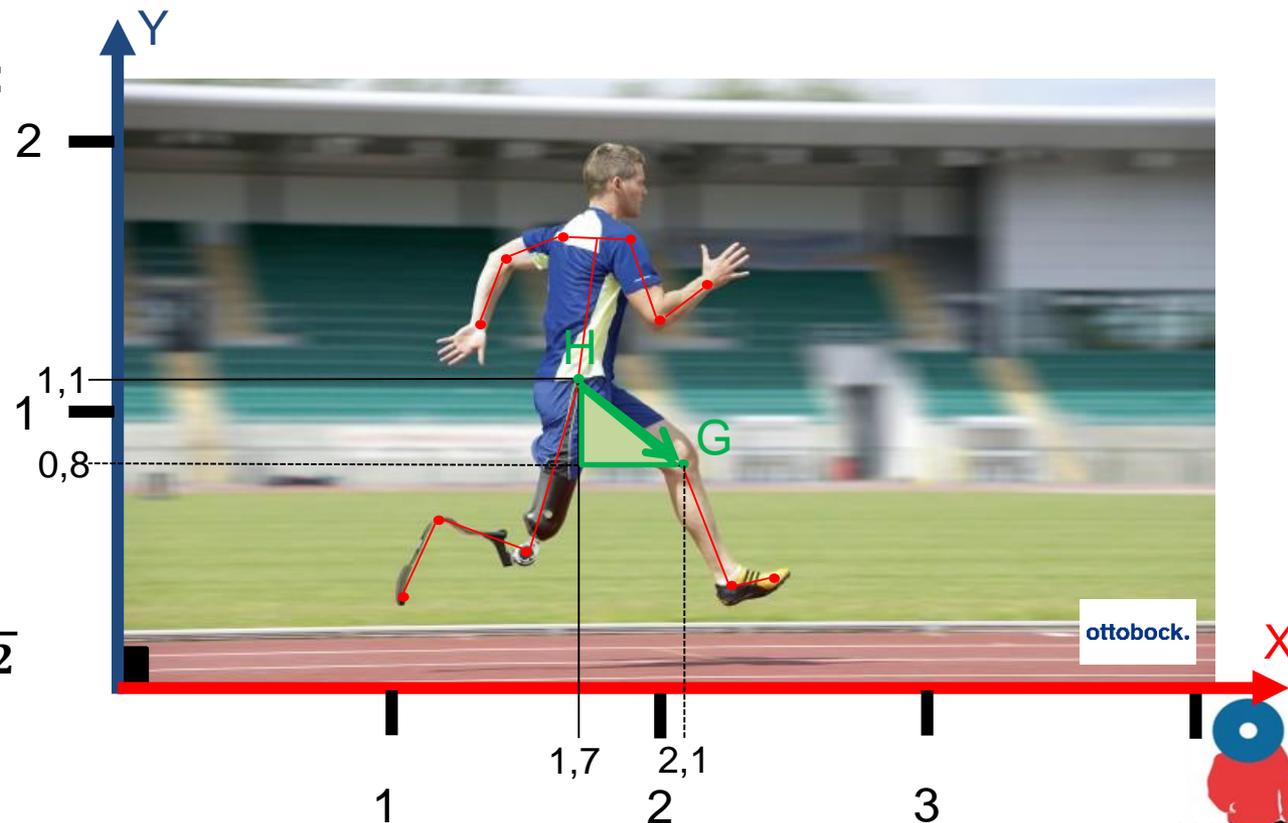
*Ex: longueur de la cuisse*

$$\|\overrightarrow{HG}\|^2 = x_{HG}^2 + y_{HG}^2$$

$$\|\overrightarrow{HG}\| = \sqrt{x_{HG}^2 + y_{HG}^2}$$

$$\|\overrightarrow{HG}\| = \sqrt{0,4^2 + -0,3^2}$$

$$\|\overrightarrow{HG}\| = 0,5\text{m}$$



# A quoi correspondent les valeurs associées à la position?

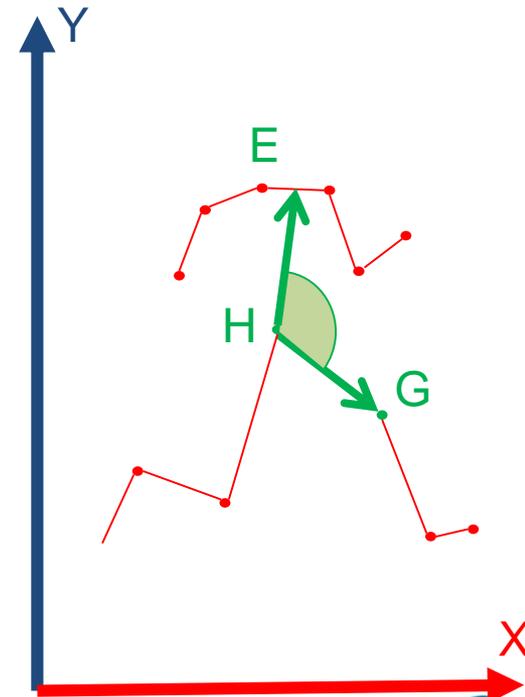
Valeur finale de l'angle de la cuisse

$$\theta = \arccos\left(\frac{0,4*0,1 + (-0,3)*0,6}{0,5*0,6}\right)$$

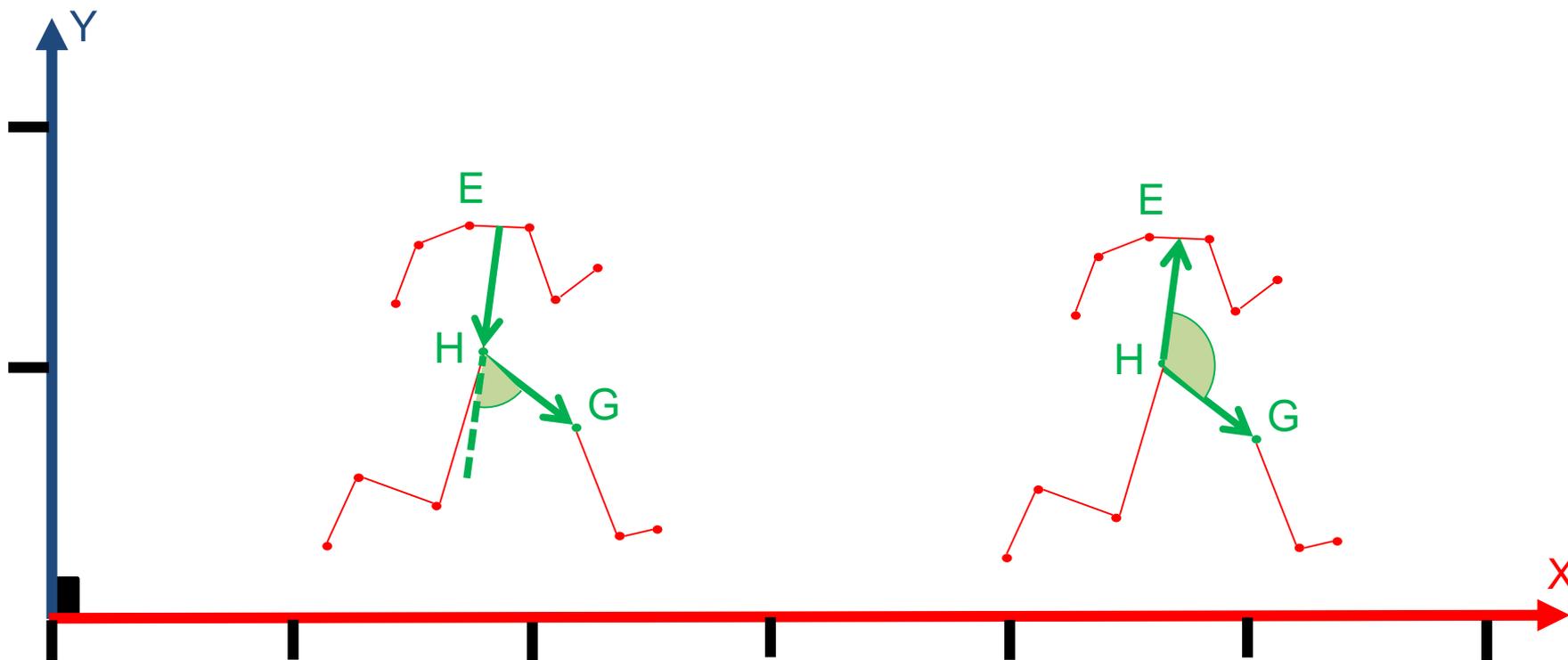
Le résultat est en radians

$$\theta = 1,7 \text{ rad}$$

$$\theta = 100^\circ \quad * \frac{180}{\pi} \text{ (je pense au demi-cercle trigonométrique)}$$



# Attention à l'orientation des vecteurs



# Comment obtient-on les vitesses et accélérations à partir des positions angulaires?

- Angle  
 $\theta$

- Vitesse angulaire

$$\omega = d\theta / dt = (\theta_{t2} - \theta_{t1}) / (t2 - t1)$$

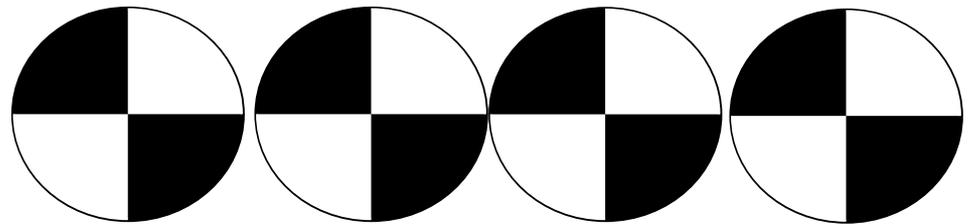
- Accélération angulaire

$$\alpha = d\omega / dt = (\omega_{t2} - \omega_{t1}) / (t2 - t1)$$



# Exercice 3 Vidéo (à faire pour le 16.11 à plusieurs si besoin)

1. Choisissez un geste utilisé dans votre spécialité sportive qui pourrait selon vous faire appel à une coordination proximo-distale.
2. Prenez un moment à l'entraînement, ou en cours pour réaliser une vidéo de ce mouvement (en utilisant si possible ces marqueurs pour repérer les articulations sur la peau ou sur des vêtements unis)



3. Essayer au maximum de prendre en compte les critères vus dans le cours

