Annexes

Sommaire :

- Annexe A- Protocole détaillé de 3 configurations de saut
- Annexe B – Justifications bibliographiques (synthèse)
- Annexe C – Exemples de dispositifs existants pour la mesure de force en saut vertical
- Annexe D – Critères d'invalidité d'un essai (analyse vidéo)
- Annexe E – Tables anthropométriques de De Leva (1996)
- Annexe F – Protocole de pose des marqueurs
- Annexe G – Validation des essais par mesure de l'angle du tronc
- Annexe H – Plans détaillés et liste des composants
- Annexe I – Calcul détaillé des incertitudes pour l'analyse vidéo
- Annexe J – Courbes
- Annexe K – Calcul détaillé des incertitudes pour l'analyse plateforme

Annexe A - Protocole détaillé des 3 configurations de saut

A.1. Conditions générales (communes aux trois sauts)

- Plateforme de mesure : le sujet prend appui sur la plaque instrumentée, pieds écartés à largeur d'épaules.
- Atterrissage : volontairement hors de la plateforme, environ 30 à 50 cm devant celle-ci (repère visuel au sol). Une légère translation horizontale pendant la phase aérienne est tolérée.
- Validation d'un essai : un saut est invalidé si l'analyse vidéo montre une inclinaison excessive du tronc (signe d'une poussée horizontale non négligeable) ou si le sujet touche la plateforme à l'atterrissage.
- Nombre d'essais : 3 essais valides par configuration, la meilleure performance étant retenue.

A.2. Saut A – Squat Jump (SJ)

Position de départ :

- Pieds écartés largeur d'épaules
- Genoux fléchis à environ 90° (cuisses parallèles au sol)
- Buste droit, mains sur les hanches
- Immobilité maintenue pendant 2 secondes (pas d'élan préparatoire)

Déroulement :
Sur signal, le sujet saute verticalement par simple extension des jambes, sans abaissement préalable. Les mains restent sur les hanches pendant tout le mouvement.

A.3. Saut B – Countermovement Jump (CMJ) sans bras

Position de départ :

- Debout, jambes tendues
- Mains sur les hanches

Déroulement :

1. Descente rapide jusqu'à un angle de genou confortable (environ 90°, identique au saut A)
2. Remontée immédiate (pas de temps d'arrêt en position basse)
3. Poussée vers le haut
   Les mains restent sur les hanches.

A.4. Saut C – CMJ avec balancement des bras

Position de départ :

- Debout, jambes tendues
- Bras le long du corps (ou légèrement en arrière)

Déroulement :

1. Descente rapide (comme saut B) – les bras descendent naturellement
2. Remontée immédiate – les bras sont projetés violemment vers le haut pour aider l'impulsion
3. Poussée vers le haut

Annexe B – Justifications bibliographiques (synthèse)

B.1. Squat Jump vs Countermovement Jump

Van Hooren & Zolotarjova (2017) – *The Difference Between Countermovement and Squat Jumps*

- Le SJ évalue la force concentrique pure (sans aide élastique)
- Le CMJ fait intervenir le cycle étirement-détente : stockage d'énergie élastique dans les tendons (notamment le tendon d'Achille) et réflexe d'étirement
- La différence de hauteur (CMJ – SJ) quantifie la contribution élastique

B.2. Contribution des bras

Harman et al. (1990) – *A Biomechanical Comparison of Different Vertical Jump Techniques with and without Arm Swing*

- Le balancement des bras augmente significativement la hauteur de saut
- Effets combinés :
    - Force de réaction au sol plus élevée
    - Puissance crête accrue
    - Élévation du centre de masse avant même le décollage

B.3. Rôle du cycle étirement-détente

Komi (2000) – *Stretch-shortening cycle* (in *Journal of Biomechanics*)

- Description du mécanisme : contraction excentrique (étirement sous tension) → stockage d'énergie élastique → restitution lors de la contraction concentrique
- Application au saut vertical et à la locomotion humaine

Annexe C – Exemples de dispositifs existants pour la mesure de force en saut vertical

Dans le domaine de l'analyse biomécanique du saut vertical, plusieurs types de plateformes de force sont couramment utilisés. Les systèmes les plus répandus dans les laboratoires de recherche sont les plateformes piézo-électriques, comme celles commercialisées par la société Kistler. Ces dispositifs offrent une très haute fréquence d'acquisition (supérieure à 1000 Hz) et une excellente précision, mais leur coût élevé les réserve essentiellement aux applications professionnelles.

Une autre technologie largement employée repose sur des jauges de contrainte (strain gauges), notamment avec les plateformes de la marque AMTI. Ces systèmes sont fréquemment utilisés en clinique et en analyse sportive, car ils offrent un bon compromis entre précision et robustesse, tout en restant plus abordables que les solutions piézo-électriques.

En parallèle de ces solutions industrielles, il existe une catégorie de dispositifs pédagogiques ou de prototypage réalisés par des étudiants ou des laboratoires universitaires. Ces systèmes utilisent souvent des capteurs de force bas coût (capteurs à jauge de contrainte, cellules de pesée) ou des capteurs de déplacement (potentiomètres, capteurs ultrasonores, lidar). La plupart de ces projets intègrent une carte microcontrôleur de type Arduino pour l'acquisition des données, associée à un traitement sous Python ou MATLAB.

Notre plateforme s'inscrit dans cette dernière catégorie. Elle se distingue toutefois par une architecture mécanique originale : l'utilisation de dix ressorts disposés symétriquement pour assurer la déformation verticale, couplée à un potentiomètre unique placé au centre pour mesurer le déplacement. **À notre connaissance**, cette combinaison précise (ressorts multiples + potentiomètre central) ne correspond à aucun modèle commercial standard ni à un dispositif pédagogique largement documenté dans la littérature. Elle constitue donc une réalisation spécifique à ce projet, adaptée aux contraintes de coût, de simplicité de mise en œuvre et d'enseignement à un niveau L3.

Annexe D – Critères d'invalidité d'un essai (analyse vidéo)

Un saut est invalidé et doit être recommencé si :

- Le sujet atterrit sur la plateforme
- Le sujet décolle avec une inclinaison du tronc > 10° par rapport à la verticale (signe d'une poussée horizontale non négligeable)

- Le sujet n’est pas immobile avant le départ (saut A uniquement)
- Le sujet marque une pause en position basse (saut B ou C)
- Les mains quittent les hanches (sauts A et B)

Annexe E – Tables anthropométriques de De Leva (1996)

Segment	Masse (% masse totale)	Distance entre le début du segment et le CM
Pied	1,29 % x 2	On prend le marqueur cheville comme repère et on considère que le CM du pied est à 40,14% de la distance entre la cheville et la pointe. On peut aussi ignorer le pied de par sa faible masse.
Jambe (du genou à la cheville)	4,81% x 2	43,52% à partir du genou
Cuisse (de la hanche au genou)	14,74% x 2	36,12 % à partir de la hanche
Tronc + tête (de la hanche aux épaules)	42,57%	49,64% à partir de la hanche
Bras (de l’épaule au coude)	2,55% x 2	57,54% à partir de l’épaule
Avant bras + main (du coude au poignet)	1,38% x 2	45,59% à partir du coude

Remarque : Les valeurs correspondent à un sujet féminin. L'incertitude sur la position du centre de masse est d'environ 5 %.

Source : De Leva, P. (1996).

Annexe F – Protocole de pose des marqueurs

Marqueurs	Emplacement	Objectif
Cheville	Malléole latérale (os qui dépasse à l’extérieur)	Repère le bas de la jambe
Genou	Epicondyle fémorale(côté extérieur du genou)	Repère l’articulation

Hanche	Crête iliaque (haut du bassin sur le côté)	Repère le tronc
Epaule	Acromion (pointe de l'épaule)	Repère le haut du corps
Coude	Epicondyle latéral (côté extérieur du coude)	Repère l'avant bras
Poignet	Tête du cubitus (côté extérieur du poignet)	Repère la main

Pour les sauts A et B, seuls cheville, genou, hanche et épaule sont nécessaires.

Annexe G – Validation des essais par mesure de l'angle du tronc

Calcul : $\theta = \arctan\left(\frac{z_{\text{épaule}} - z_{\text{hanche}}}{y_{\text{épaule}} - y_{\text{hanche}}}\right)$

Seuil de 10° : Vanrenterghem et al. (2008) ont montré qu'une inclinaison de 30° réduit la puissance des hanches de 37 %. Un seuil plus strict (10°) est choisi pour garantir la reproductibilité des essais.

Source : Vanrenterghem, J., Lees, A., & De Clercq, D. (2008). *Journal of Biomechanics*, 41(Supplement 1), S464.

Annexe H – Plans détaillés et liste des composants

H.1. Dimensions générales

Élément	Valeur
Matériau	Contreplaqué, épaisseur 24 mm
Dimensions des plaques	Environ 50 cm × 50 cm (adaptables selon disponibilité)
Surface d'appui	Suffisante pour une position pieds écartés largeur d'épaules

H.2. Usinage des plaques

Disposition des ressorts :

- 10 ressorts disposés symétriquement sur un cercle de rayon 16 cm
- Espacement angulaire : 36° entre chaque ressort
- Distance au bord : environ 10 cm (évite la flexion des plaques)
- Distance au centre : suffisante pour ne pas gêner le potentiomètre

Plaque inférieure (fixe) :

Opération	Diamètre	Profondeur	Remarque
Creux pour ressort	12 mm	5 mm	Positionne le ressort
Trou pour insert fileté	8 mm	12 mm	Centré dans le creux
Insert fileté	M6	12 mm	À visser dans le trou

Vérification de l'épaisseur restante (plaque 24 mm) :

- Profondeur creux : 5 mm
- Profondeur insert : 12 mm
- Épaisseur restante : 24 - 5 - 12 = 7 mm (≥ 4 mm requis, validé)

Plaque supérieure (mobile) :

Opération	Diamètre	Profondeur	Remarque
Creux pour ressort	12 mm	2 à 3 mm	Positionne le ressort
Trou lisse pour tige	11 mm	Sur toute l'épaisseur	Laisse passer la tige filetée
Trou central pour vis nylon	4,5 mm	Sur toute l'épaisseur	Au centre exact de la plaque

H.3. Composants de guidage et fixation

Composant	Caractéristique	Quantité	Rôle

Tiges filetées	M6, acier zingué, longueur 80 mm	8	Guidage vertical
Rondelles	M6, diamètre extérieur ≤ 11,8 mm	20	Protection bois et répartition charge
Vis nylon	M4, tête hexagonale	1	Transmission mouvement / fusible mécanique
Équerre	Profilé alu 30×30 mm, épaisseur 2 mm, non prépercée	1	Fixation du potentiomètre
Vis à bois inox	Tête fraisée, longueur adaptée	(selon besoin)	Assemblage

Remarque sur les rondelles : Le diamètre extérieur doit être inférieur à 12 mm pour entrer dans les creux. Une valeur de 11,5 mm ou 11,8 mm est recommandée.

H.4. Composants électroniques

Composant	Référence	Caractéristique	Rôle
Potentiomètre	Bourns 3046L-2-103	10 kΩ, course 8 mm	Mesure du déplacement
Carte Arduino	Uno (ou équivalente)	Alimentation 5 V, entrée analogique 10 bits	Acquisition et conversion
Ordinateur	-	Communication série USB	Stockage et traitement Python

H.5. Remarques de montage

- L'équerre aluminium est percée sur mesure pour fixer le potentiomètre à la hauteur adaptée
- La vis nylon doit être réglée pour effleurer juste le curseur du potentiomètre quand la plaque est au repos
- Un contre-écrou nylon peut être ajouté sur la vis nylon pour bloquer le réglage

- Les fils du potentiomètre sortent par un petit trou latéral percé dans la plaque inférieure
- L'ensemble est réalisable à la I-Factory (arrêt de tram La Doua)

Annexe I – Calcul détaillé des incertitudes pour l'analyse vidéo

I.1. Sources d'incertitude

La hauteur de saut est obtenue par suivi vidéo du centre de masse. L'incertitude sur la mesure provient de plusieurs sources identifiées dans le tableau J.1.

Tableau J.1 : Sources d'incertitude pour la mesure vidéo

Source	Symbole	Type	Ordre de grandeur
Résolution spatiale de la caméra	$u_{spatiale}$	Aléatoire	±1,9 mm
Positionnement manuel des marqueurs (tracking)	$u_{tracking}$	Aléatoire	±3,7 mm
Bruit de suivi (oscillations parasites)	u_{bruit}	Aléatoire	±2,0 mm
Étalonnage de l'échelle (pixel → m)	$u_{échelle}$	Systématique	±1,0 mm (±0,5 %)
Tables de De Leva (position du CM)	u_{DeLeva}	Systématique	±10,0 mm (±5 %)

J.2. Justification des valeurs

J.2.1. Résolution spatiale

La caméra utilisée a une résolution de [1920×1080] pixels. La hauteur filmée est d'environ

2,00 m. Un pixel correspond donc à : $1\ pixel\ =\ \frac{2000\ mm}{1080} \approx\ 1,85\ mm$. L'incertitude liée à la discrétisation est estimée à $\pm\ 0,5\ pixel$, soit $u_{spatiale} = 0,5\ \times\ 1,85\ \approx\ 0,9\ mm$

Remarque : une valeur plus conservative de ±1 pixel (1,85 mm) peut être retenue selon la qualité du tracking. Nous retenons ±1,9 mm (arrondi à 1 pixel).

J.2.2. Positionnement manuel des marqueurs

Le tracking est effectué manuellement image par image. L'opérateur peut commettre une erreur de l'ordre de 1 à 2 pixels par rapport à la position réelle du marqueur. Nous retenons 2 pixels, soit : $u_{tracking} = 2\ \times\ 1,85\ \approx\ 3,7\ mm$

J.2.3. Bruit de suivi

Les oscillations observées sur la courbe
yCM(t) ont une amplitude crête à crête d'environ 4 mm. L'incertitude aléatoire associée est estimée à la moitié, soit : $u_{bruit} =\ \ \pm\ 2,0\ mm$

J.2.4. Étalonnage de l'échelle

Une règle de 1,00 m placée dans le champ de la caméra sert de référence. L'incertitude sur sa longueur est de ±1 mm (soit 0,1 %). À cela s'ajoute une possible erreur de parallaxe si la règle n'est pas exactement dans le plan du mouvement. Nous retenons une incertitude élargie de ±0,5 % sur la conversion pixels/mètres. Pour une hauteur de 200 mm, cela donne: $u_{échelle} = 0,5\%\ \times\ 200\ =\ 1,0\ mm$

J.2.5. Tables de De Leva (1996)

Les tables anthropométriques de De Leva présentent une incertitude d'environ 5 % sur la position du centre de masse de chaque segment . Pour une hauteur de saut de 200 mm, cela donne : $u_{DeLeva} =\ 5\%\ \times 200\ =\ 10,0\ mm$

Cette incertitude est systématique : elle affecte toutes les mesures de la même façon.

J.3. Combinaison des incertitudes pour la hauteur absolue

Les incertitudes aléatoires (spatiale, tracking, bruit) sont combinées quadratiquement entre elles. Les incertitudes systématiques (échelle, De Leva) s'ajoutent quadratiquement aux aléatoires.

$$u_h = \sqrt{u^2_{spatiale} + u^2_{tracking} + u^2_{bruit} + u^2_{echelle} + u^2_{DeLeva}}$$

$$AN :\ u_h = \sqrt{1,9^2\ +\ 3,7^2\ +\ 2,0^2\ +\ 1,0^2\ +\ 10,0^2}\ =\ 11,1\ mm$$

L'incertitude type sur la hauteur absolue est d'environ ±1,1 cm. En prenant un facteur d'élargissement k=2 (intervalle de confiance de 95 %), on obtient : $u_h = 2 \times 1,1 \approx \pm 2,2\ cm$

J.4. Combinaison des incertitudes pour la différence B–C

Pour la différence $\Delta h = h_C - h_B$, les incertitudes systématiques (échelle, De Leva) se compensent car elles sont identiques pour les deux sauts. Seules les incertitudes aléatoires subsistent : $u_{\Delta h} = \sqrt{u^2_{aléatoire,B} + u^2_{aléatoire,C}}$

avec $u_{aléatoire} = \sqrt{u^2_{spatiale} + u^2_{tracking} + u^2_{bruit}}$

$u_{aléatoire} = \sqrt{1,9^2 + 3,7^2 + 2,0^2} = 4,6\ mm$

En supposant des incertitudes aléatoires identiques pour les deux sauts :

$u_{\Delta h} = \sqrt{4,6^2 + 4,6^2} = 6,5\ mm$

L'incertitude type sur la différence est d'environ $\pm\ 0,65\ cm$. Avec un facteur d'élargissement k = 2. $U_{\Delta h} = 2 \times 0,65 \approx \pm\ 1,3\ cm$

J.5. Conclusion sur les incertitudes

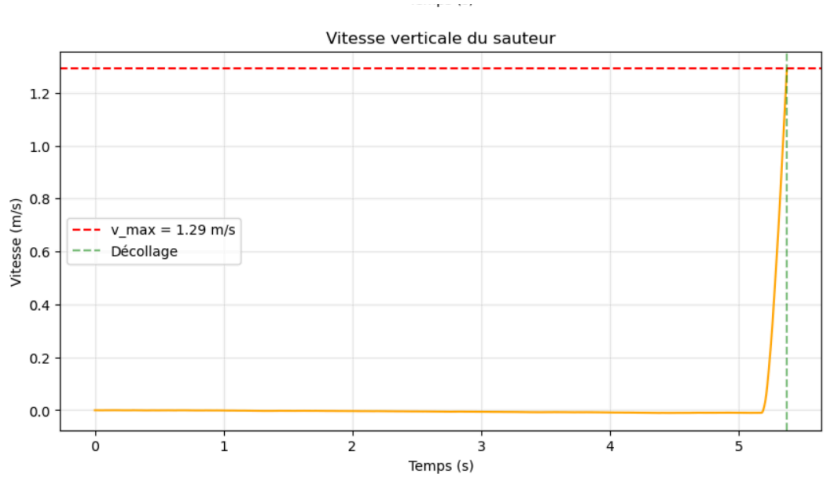
Grandeur	Valeur mesurée	Incertitude type	Incertitude élargie (k=2)
Hauteur B	20,4 cm	±1,1 cm	±2,2 cm
Hauteur C	26,9 cm	±1,1 cm	±2,2 cm
Différence C–B	6,5 cm	±0,65 cm	±1,3 cm

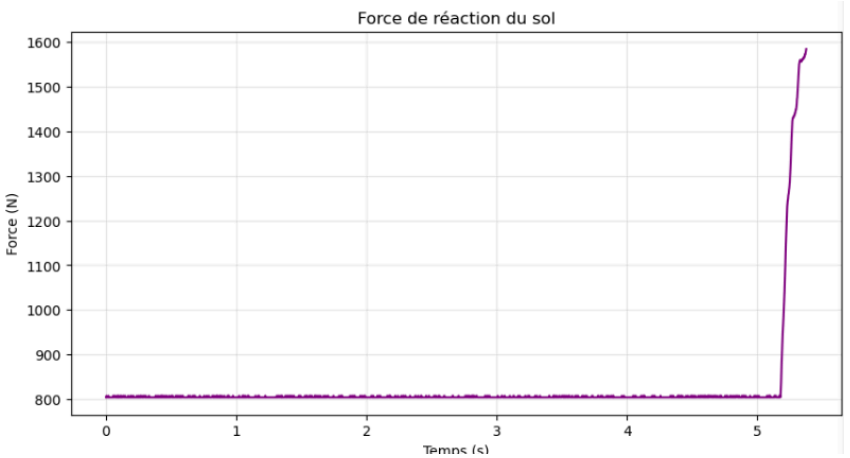
La différence mesurée de 6,5 cm est donc significative au regard de l'incertitude élargie de ±1,3 cm (intervalle de confiance à 95 %).

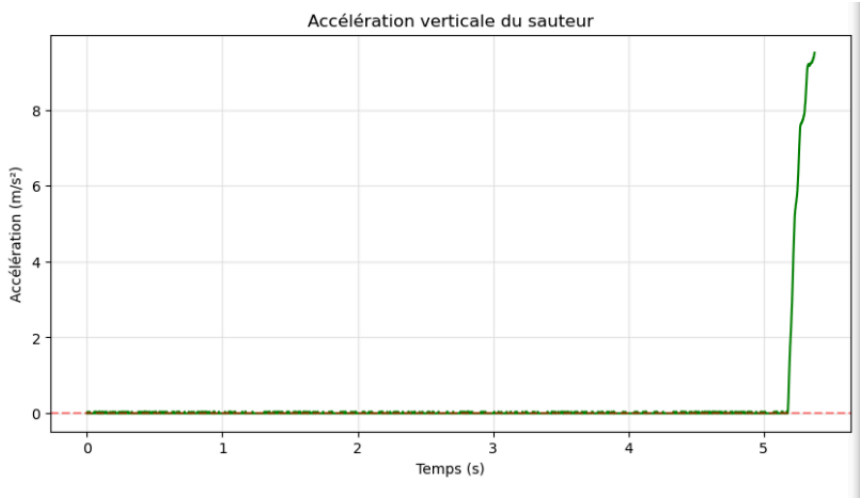
Référence : De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1223-1230.

Annexe J - Courbes

Résultat des paramètres biomécaniques obtenus pour le saut B







Annexe K - Calcul des incertitudes pour l'analyse plateforme

Les incertitudes associées aux hauteurs de saut obtenues par traitement Python ont été estimées à partir de la propagation des erreurs liées aux différentes étapes du calcul numérique.

La hauteur du saut est déterminée à partir de la vitesse au décollage grâce à la relation : $h = \frac{v_0^{\,2}}{2g}$.

L'incertitude principale provient donc de l'estimation de la vitesse v_0, elle-même obtenue à partir de plusieurs calculs successifs :

- conversion tension–déplacement ;
- calcul de la force par la loi de Hooke ;
- calcul de l'accélération ;
- intégration numérique de l'accélération.

Une variation sur le déplacement mesuré entraîne ainsi une variation sur la force calculée puis sur la vitesse obtenue au moment du décollage.

Afin d'estimer l'incertitude sur la hauteur finale, plusieurs essais de traitement ont été réalisés en modifiant légèrement certains paramètres du calcul :

- tension de repos utilisée comme référence ;
- instant du décollage ;
- plage de données conservée avant suppression des oscillations ;
- valeur maximale retenue pour la vitesse.

Les variations observées sur les hauteurs calculées ont ensuite permis d'estimer une plage d'incertitude globale pour chaque saut.

Les principales sources d'erreur prises en compte sont :

- la précision limitée du potentiomètre ;
- les vibrations de la plateforme et des ressorts ;
- le bruit électrique de l'acquisition ;
- les approximations liées à l'étalonnage ;
- les erreurs introduites lors de l'intégration numérique ;
- l'identification approximative de l'instant du décollage.

Les résultats finaux ont ainsi été exprimés sous la forme :

- saut B : (8.5 ± 1)cm ;
- saut C : (22.4 ± 2.7) cm.

Ces incertitudes correspondent à une estimation expérimentale de la précision des résultats obtenus. Le faible nombre d'acquisitions exploitables ne permet cependant pas de réaliser une étude statistique complète ni une détermination rigoureuse des écarts-types expérimentaux.

Pour vraiment comprendre en détail, se référer au programme python disponible dans le dossier annexe sur Moodle.