

Cours généraux de la formation « Moniteur Sportif Entraîneur »

Thématique 3 : Facteurs déterminants de performance et de l'activité

Module 2 : Optimisation des facteurs biomécaniques de l'activité et de la performance sportive

SCHWARTZ Cédric, Laboratoire d'Analyse du Mouvement Humain, Université de Liège
cedric.schwartz@ulg.ac.be

CROISIER Jean-Louis, Département des Sciences de la Motricité, Université de Liège
jlcroisier@ulg.ac.be

Fédération Wallonie-Bruxelles, Administration Générale d'Aide à la Jeunesse, de la Santé et du Sport, Direction Générale du Sport (Adeps), Service « Formation de cadres ».
adeps.formationdecadres@cfwb.be

⇒ **RESUME :**

Ce module de formation est le prolongement des modules *CG2_Th3_Mod2_La machine humaine à l'effort* et *CG2_Th3_Mod3_Introduction à l'analyse du mouvement et du geste sportif*. Pour rappel, dans le cadre d'une formation dont l'objectif est de préparer de futurs moniteurs qui auront comme vocation l'entraînement de sportifs en vue de les faire performer, la compréhension de la « machine » dont l'individu va se servir pour pratiquer son sport est indispensable.

Au premier stade de formation (MS Initiateur), la « machine humaine » a été décrite de façon très générale.

Au deuxième stade de formation (MS Educateur), la « machine humaine » a été appréhendée lors de l'activité et de l'exercice physique. Un module introductif à l'analyse de base du mouvement sportif a permis d'aborder les premières notions de « facteurs biomécaniques de la performance sportive ».

Au regard des différents facteurs déterminants de la performance sportive (voir *CG2_Th3_Mod1_Définition des facteurs de la performance sportive*), l'objectif de ce module du troisième stade de formation est d'appréhender plus en profondeur les facteurs biomécaniques en vue d'optimiser la performance.

L'analyse et l'étude conjointes de l'anatomie et des principes fondamentaux de mécanique appliqués au mouvement humain constitueront le sujet central de cette unité de formation.

Au terme de cette unité de formation, le candidat « moniteur sportif entraîneur » devrait donc pouvoir comprendre et connaître les principaux concepts de biomécaniques qui permettront d'optimiser la performance du geste sportif (traduit par le facteur « technique » de la performance). Le MS Entraîneur appréhendera aussi les éléments fondamentaux de biomécaniques en vue de toutes actions préventives aux risques de blessures, potentiellement occasionnées par le « mauvais geste » ou la « technique défailante ».

⇒ **METHODOLOGIE :**

- Exposé magistral
- Séance « questions-réponses »

⇒ **SUPPORTS DE COURS :**

- Syllabus
- Foire aux questions (FAQ)
- Présentation assistée par ordinateur (PAO)

⇒ **MODALITES D'EVALUATION :**

- Question ouverte
- Etude de cas

⇒ **CHARGE THEORIQUE DE TRAVAIL POUR LE CANDIDAT :**

- En présentiel :

- 3 heures de cours magistral
- 45 minutes d'évaluation

- En non présentiel :

- 9 heures d'étude indépendante et personnelle en guise de préparation à l'évaluation

Sommaire

COURS GENERAUX DE LA FORMATION « MONITEUR SPORTIF ENTRAINEUR »	1
THEMATIQUE 3 : FACTEURS DETERMINANTS DE PERFORMANCE ET DE L'ACTIVITE.....	1
MODULE 2 : OPTIMISATION DES FACTEURS BIOMECANIQUES DE L'ACTIVITE ET DE LA PERFORMANCE SPORTIVE	1
1 QU'EST CE QUE LA BIOMECANIQUE ?	5
2 QUEL EST L'INTERET DE LA BIOMECANIQUE POUR LE SPORT ?	5
3 QU'EST CE QU'UNE FORCE ?	5
4 COMMENT DECRIRE UN MOUVEMENT, UNE FORCE ?	6
5 COMMENT DECRIRE L'EVOLUTION D'UN PARAMETRE AU COURS DU TEMPS ?	8
6 QUEL EST LA DIFFERENCE ENTRE LA POSITION, LA VITESSE ET L'ACCELERATION ?	10
7 COMMENT DECRIRE LE MOUVEMENT D'UNE ARTICULATION ?	12
8 LA LONGUEUR DES MEMBRES PEUT-ELLE AVOIR UNE INFLUENCE SUR LA PERFORMANCE ?	14
9 COMMENT LANCER UNE BALLE LE PLUS LOIN POSSIBLE ?	16
10 POURQUOI UNE BALLE DANS L'AIR VA TOUT DROIT (OU PAS) ?	20
11 COMPRENDRE DES RISQUES DE LESION A L'AIDE DE LA BIOMECANIQUE ?	23
12 ACTION, REACTION !	26
13 COMMENT ESTIMER LA HAUTEUR D'UN SAUT VERTICAL A PARTIR DE SON TEMPS DE VOL ?	29
14 QUE SE PASSE-T-IL LORS D'UN IMPACT ?	31
15 QUELLES SONT LES DIFFERENCES ENTRE LES NOTIONS DE TRAVAIL, DE PUISSANCE ET ENERGIE ?	36
16 POURQUOI LE PATINEUR ARTISTIQUE GARDE-T-IL SES BRAS LE LONG DU CORPS LORS D'UN SAUT ?	40
17 SUIS-JE EN EQUILIBRE ?	42
18 BIBLIOGRAPHIE	44
19 TABLE DES FIGURES	44

1 Qu'est ce que la biomécanique ?

La biomécanique est la science qui étudie les effets des forces sur les êtres vivants. Cette étude peut être décomposée en 2 parties :

- la cinématique qui s'intéresse à décrire le mouvement (déplacement, vitesse, accélération)
- la cinétique qui s'intéresse à décrire les forces qui créent ou qui résultent du mouvement des corps.

2 Quel est l'intérêt de la biomécanique pour le sport ?

La description du mouvement et les causes de ce mouvement à l'aide de principes physiques aide à quantifier des paramètres caractérisant le geste sportif. Ces paramètres sont ensuite utiles tant pour optimiser la performance que pour diminuer le risque lésionnel. La biomécanique aide le préparateur et l'entraîneur à comprendre les causes et les effets d'un mouvement. Cela peut donc lui permettre d'adapter des techniques spécifiquement à son athlète, comprendre les qualités et les défauts de son athlète ou d'autres athlètes afin de s'en inspirer judicieusement.

3 Qu'est ce qu'une force ?

Définition :

Une force constitue une action qui va modifier le mouvement d'un corps (d'un athlète, d'un objet, ...). Une force s'exprime en Newton (N).

Selon la seconde loi de Newton, que l'on verra plus en détail dans la suite de ce document, la somme des forces qui s'exercent sur un corps est égale à une masse multipliée par une accélération. L'action d'une force peut donc être vue comme une action d'accélération ou de décélération d'un objet d'une certaine masse. Une force a une direction (dans quel sens s'applique la force), une amplitude (l'intensité de la force) et un point d'application (l'endroit

où s'applique la force) : il est donc possible de l'exprimer comme un vecteur en un point. Nous reviendrons sur la notion de vecteur dans la section suivante.

Nous venons de dire qu'une force va créer ou modifier le mouvement d'un corps : par exemple la force exercée par une raquette de tennis sur la balle ou le pied d'un joueur sur une balle. Cependant certaines actions ne seront pas forcément visibles car il existe aussi des forces qui vont s'opposer au mouvement : si vous essayer de soulever un poids sans être suffisamment fort, celui-ci ne bougera pas : la force qui s'oppose à la votre est ici la force de pesanteur qui s'applique sur le poids.

4 Comment décrire un mouvement, une force ?

Un mouvement peut être caractérisé par :

- une amplitude (une distance) : par exemple le sprinter a couru 100 m.
- une direction : par exemple le sauteur en hauteur s'est déplacé vers le haut.

De la même manière une force peut être caractérisé par :

- une amplitude (la quantité de force) : par exemple, le sauteur a exercé une poussée de 2000 N.
- une direction : par exemple, le sauteur a poussé vers le haut et un peu vers l'avant.

Il est possible de rassembler ces 2 paramètres par une seule quantité : le vecteur.

Définition :

Le vecteur est caractérisé par :

- une amplitude (un nombre),
- une direction.

Un vecteur est en général représenté par une flèche orientée suivant la direction du mouvement et de longueur égale à l'amplitude du mouvement.

Un vecteur peut servir à représenter de nombreux paramètres et pas uniquement un mouvement. Voici à titre d'exemples d'autres possibilités :

- une force : le vecteur peut représenter la direction et l'amplitude de la poussée d'un joueur de rugby dans une mêlée ou d'un joueur de tennis lors d'un service (Figure 1).
- une vitesse : le vecteur peut représenter la vitesse et la direction d'une balle.

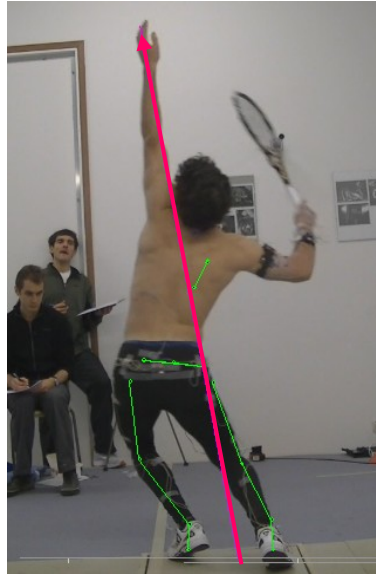


Figure 1 – Vecteur (en rose) représentant la direction et l'amplitude du vecteur de poussée des jambes lors d'un service au tennis.

Il est possible de décomposer le vecteur suivant ces composantes dans les différents plans de l'espace : par exemple le plan vertical et le plan horizontal. Cette décomposition peut être utile pour décomposer l'amplitude du vecteur suivant des directions d'intérêt. Par exemple, lors d'un squat jump il n'est pas utile d'avoir une poussée horizontale alors que celle verticale sera déterminante pour la performance. De la même manière pour un sprinter, si le vecteur sert maintenant à décrire la vitesse, il sera souvent plus intéressant d'étudier la vitesse vers l'avant c'est-à-dire la composante horizontale du vecteur. La Figure 2 décrit comment calculer les composantes horizontales et verticales d'un vecteur lorsque celui-ci est décrit dans un plan.

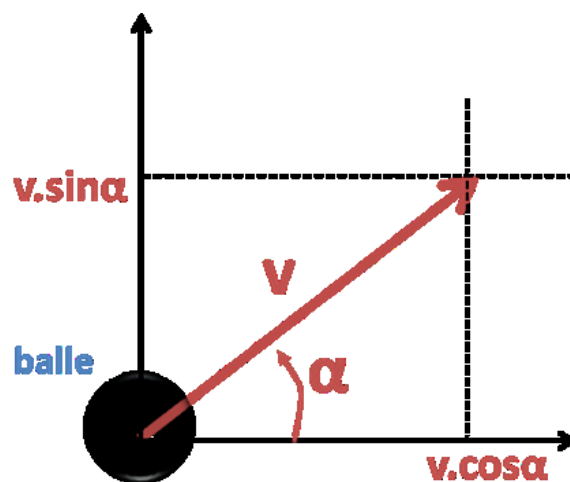


Figure 2 – Vecteur représentant la direction et l'amplitude du vecteur vitesse (V) d'une balle. Il est possible d'exprimer les composantes horizontales et verticales du vecteur en fonction de l'angle (α) définissant sa trajectoire.

Il est également possible d'additionner des vecteurs. Cela est très utile par exemple si plusieurs forces s'appliquent sur un corps et que l'on souhaite connaître la force totale (que l'on appelle aussi *force résultante*). Pour cela il faut en théorie que le point d'application des forces soit le même : on ramène en général le point d'application au centre de gravité du sujet. Graphiquement, il suffit ensuite de positionner les vecteurs, les uns à la suite des autres puis de tracer le vecteur allant du point initial au point final. La Figure 3 prend l'exemple d'un joueur de rugby qui est poussé par un autre. Le joueur de rugby subit 3 forces : la force de pesanteur, la force de réaction au sol et la force de poussée du joueur adverse. La force de pesanteur et la réaction au sol se compense, c'est pourquoi la résultante des forces (la somme des 3 forces) est égale à la force de poussée du joueur adverse.



Figure 3 – Somme de vecteurs

5 Comment décrire l'évolution d'un paramètre au cours du temps ?

Lors d'un geste sportif les paramètres biomécaniques évoluent au cours de la performance. Par exemple lors d'un 100m, la vitesse n'est pas constante au cours de la course.

Définition :

La valeur moyenne de vitesse est représentative de la performance globale de l'athlète dans certaines disciplines et s'obtient à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Vitesse} = \text{distance} / \text{temps}$$

Attention :

Si la distance est exprimée en mètres et le temps en seconde, la vitesse obtenue est exprimée en mètre par seconde.

La valeur moyenne de 2 athlètes sur un 100 m peut être identique (et par conséquent leur performance : ils coupent la ligne en même temps) sans que leurs courses aient elles été identiques. Un coureur a pu accélérer plus vite alors que l'autre au contraire a terminé plus rapidement. A haut niveau, un entraînement spécifique est nécessaire et la connaissance de l'évolution de la course l'est également. Pour cela, on ne se sert plus d'une valeur moyenne mais d'une valeur instantanée : à chaque instant, on a une estimation de la vitesse du coureur. Une méthode efficace pour se représenter l'évolution d'un paramètre est de tracer un graphique (Figure 4) représentant les valeurs que prennent le paramètre d'intérêt (axe des ordonnées) en fonction du temps (l'axe des abscisses). Un logiciel comme Excel permet de tracer ce type de représentation très facilement.

Définition :

La valeur instantanée est la valeur à un temps donné.

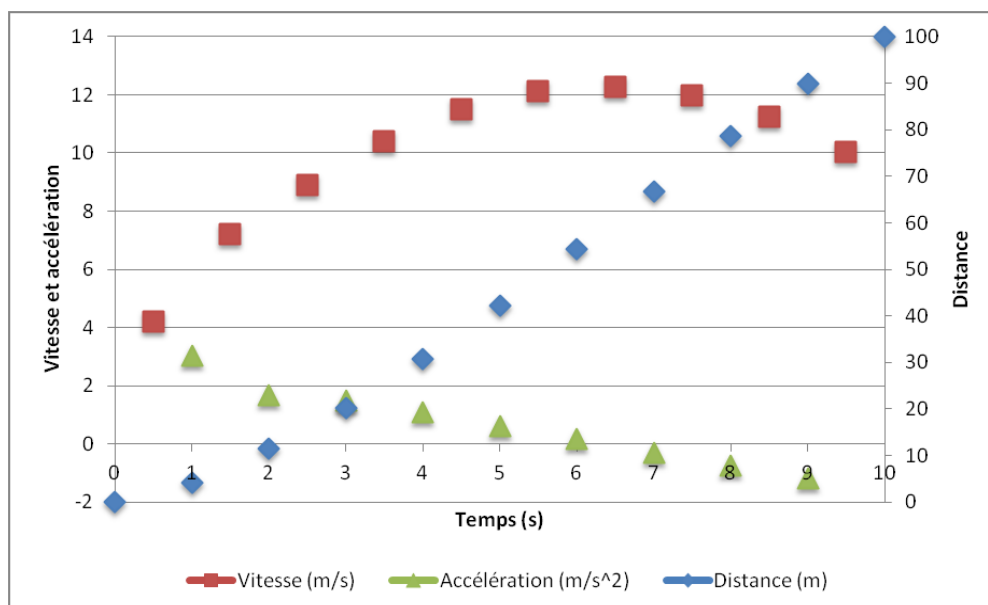


Figure 4 – Evolution de la vitesse et de l'accélération d'un sprinter au cours d'un 100m (d'après *Biomécanique du sport et de l'exercice* de P. Grimshaw et A. Burden)

6 Quel est la différence entre la position, la vitesse et l'accélération ?

Définition :

- La position est l'endroit où se trouve une personne ou un objet.
- La vitesse correspond à la variation de position par unité de temps :

$$\text{Vitesse} = (\text{position au temps 2} - \text{position au temps 1}) / (\text{temps 2} - \text{temps 1})$$

- L'accélération correspond à la variation de vitesse par unité de temps :

$$\text{Accélération} = (\text{vitesse au temps 2} - \text{vitesse au temps 1}) / (\text{temps 2} - \text{temps 1})$$

A titre d'illustration, une accélération importante mais pendant un temps très court ne conduira qu'à une faible variation de la vitesse (par exemple un changement de direction lors d'un dribble). Au contraire une accélération moyenne pendant un temps plus long, entrainera une variation importante de la vitesse (un skieur par exemple atteint plus progressivement sa vitesse maximum). Selon le sport, les capacités d'accélération d'un sportif (à mettre en relation avec son explosivité) auront plus ou moins d'importance : un sprinter devra avoir une capacité d'accélération importante alors que cela sera moins important chez un marathonien.

Pour aller plus loin :

Sur une courbe de position, la vitesse à un instant donné correspond à la pente de la courbe à cet instant. Plus la courbe décrivant la position du sujet sera « raide » plus la vitesse du sujet est importante à ce moment. Au contraire si la courbe de position est plate, cela signifie que la vitesse du sujet est nulle. De manière identique, sur une courbe de vitesse, l'accélération correspond à la pente de la courbe à cet instant (Figure 5).

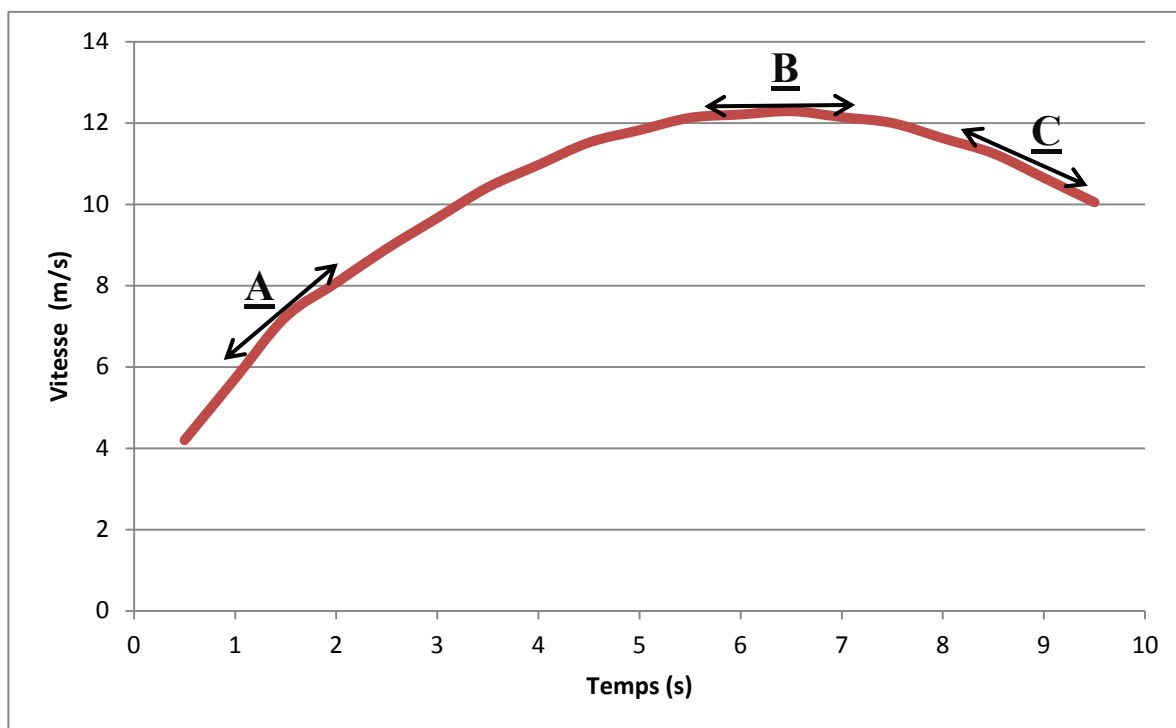


Figure 5 – Estimation de l'accélération sur un graphique vitesse/temps à partir de la pente de la courbe : en A, l'accélération est positive (pente ascendante) – la vitesse augmente - alors qu'en B, l'accélération est nulle (pente nulle) – vitesse stable - , et en C, l'accélération est négative (pente descendante) – la vitesse diminue.

Sur la courbe de vitesse précédente (Figure 4), on peut décomposer visuellement le sprint en 3 phases :

- de 0 à 60 m : la pente de la courbe de vitesse est positive, cela signifie que le sujet accélère. Comme la courbe est plus « pentue » entre 0 et 30 m, cela signifie que le sujet accélère plus dans cette phase que lors des 30-50m.
- entre 60 et 70 m : la courbe est relativement plate. Cela signifie que le sujet n'accélère plus, il a atteint sa vitesse maximale. L'accélération est nulle.
- entre 70 et 100 m : la pente de la courbe est légèrement négative. Cela signifie que le sujet décélère un peu : il perd de la vitesse.

Pour aller plus loin :

L'opération mathématique utilisée pour passer de la position à la vitesse et de la vitesse à l'accélération s'appelle la dérivation.

L'opération mathématique utilisée pour passer de l'accélération à la vitesse et de la vitesse à la position s'appelle l'intégration.

A retenir :

Les notions de position, vitesse et accélération sont liées mathématiquement : à une constante près il est possible de déduire les unes des autres. Graphiquement, la pente donne rapidement des indications sur les valeurs de vitesse, d'accélération.

7 Comment décrire le mouvement d'une articulation ?

La notion de position est très utile pour décrire l'endroit où se trouve une personne ou un objet. Il permet de décrire des mouvements linéaires. Cette notion n'est cependant pas adaptée aux articulations qui ont des mouvements de rotation. On se sert alors de la notion d'angle : l'angle du genou correspond à l'orientation du fémur par rapport au tibia (Figure 6).



Figure 6 – Angulation du genou lors d'un départ de sprint

De la même manière qu'une position évolue au cours du temps, un angle peut évoluer au cours du temps : lors de la course, l'angle du genou n'est évidemment pas constant (Figure 7). La Figure 7 représente l'évolution de l'angle de genou lors de la course pour 1 cycle. Lors de l'impact du pied au sol (temps 0.68s), le genou est légèrement fléchi (20°). La flexion augmente ensuite lors de la phase d'amortissement (40°). La jambe s'étend ensuite lors de la phase de propulsion (27°). Lors de la phase de vol, il existe une flexion importante de la jambe (80°). La flexion de la jambe permet de réduire l'inertie de celle-ci et ainsi de rendre plus facile la flexion de hanche pour ramener à nouveau la jambe à l'avant du corps. Nous verrons plus tard dans ce document ce que signifie le principe d'inertie.

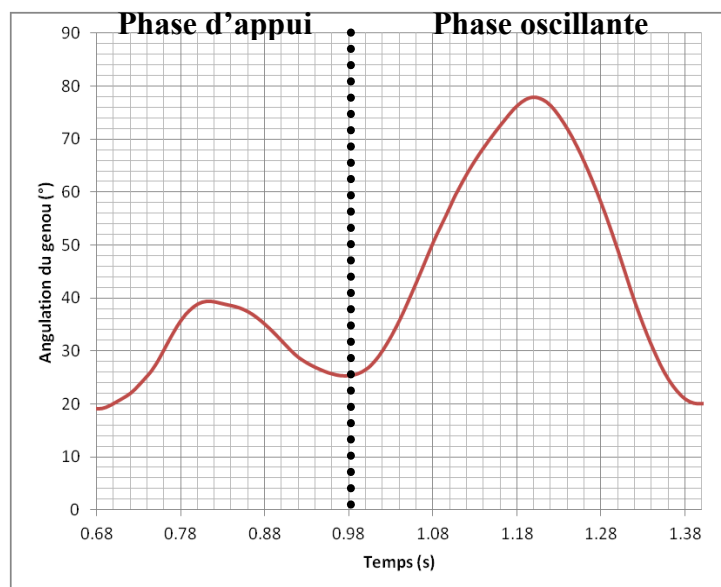


Figure 7 – Evolution de l'angulation du genou lors d'une activité de course

Certaines des notions que l'on a décrites pour les positions existent aussi pour les angles. On parle ainsi de :

- vitesse angulaire ($^{\circ}/s$)
- accélération angulaire ($^{\circ}/s^2$)

A retenir :

- Un mouvement linéaire comme le déplacement du centre de gravité d'un sujet est décrit par sa position, sa vitesse, son accélération.
 - Un mouvement de rotation comme la flexion du coude d'un sujet est décrit par son angulation, sa vitesse angulaire, son accélération angulaire.
-

8 La longueur des membres peut-elle avoir une influence sur la performance ?

Lorsque nous fléchissons ou nous étendons notre genou, sans bouger la position de notre bassin, cela a une influence sur la position de notre cheville. Il existe donc intuitivement une relation entre un mouvement de rotation et un mouvement linéaire (et vice versa).

Lorsque le genou bouge d'un angle θ , et que la jambe a une longueur l , la cheville bouge d'une distance d égale à :

$$d = l \cdot \theta$$

Il est intéressant de remarquer qu'une extension de la jambe d'un même angle chez 2 sportifs n'aura pas forcément pour conséquence un déplacement de la cheville d'une distance identique : la distance de déplacement dépend également de la longueur de la jambe.

On obtient le même type de relations pour les vitesses et les accélérations :

- $v = l \cdot \omega$ avec v la vitesse de déplacement et ω la vitesse angulaire.
- $a = l \cdot \alpha$ avec a l'accélération du déplacement et α l'accélération angulaire.

Ces équations illustrent très bien comment des paramètres purement anthropométriques peuvent avoir une conséquence directe sur la performance. Imaginons 2 joueurs de football capable d'étendre leur jambe de « shoot » à la même vitesse (vitesse angulaire). La vitesse de la balle (la performance) va être fortement corrélée à la vitesse de la cheville. Or comme nous venons de le voir, la vitesse de la cheville et la vitesse d'extension du genou sont liés par la longueur de la jambe. Cela signifie que si l'un des joueurs a des jambes plus longues que

l'autre, pour une même vitesse d'extension du genou, son shoot sera plus rapide. Suivant le même raisonnement un joueur de tennis avec un bras plus long aura besoin d'une rotation de son bras plus faible pour atteindre une même vitesse de raquette (et donc de balle).

Reprenons l'exemple du joueur de foot mais en supposant qu'il se sert maintenant à la fois de sa hanche et de son genou pour frapper dans la balle (ce qui est plus réaliste !). Est t'il possible de connaître la contribution relative de la hanche et du genou dans la vitesse finale du pied ? Si on pose (Figure 8) :

- l_1 et l_2 : les distances entre la balle et respectivement les axes de rotation du genou et de la hanche à l'instant étudié,
- ω_1 et ω_2 : les vitesses de rotation respectivement du genou et de la hanche

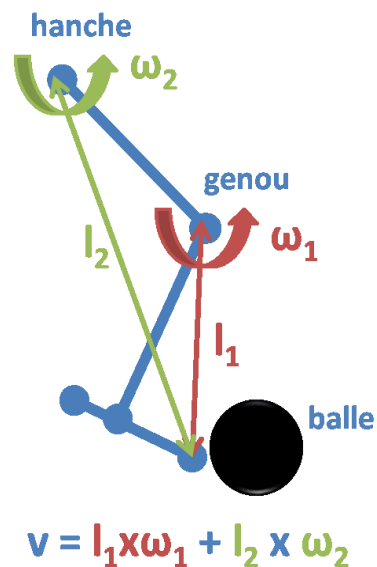


Figure 8 – Représentation schématique de la jambe lors du shoot d'une balle

Et si l'on reprend les équations que l'on vient de voir, nous pouvons écrire :

- pour le genou : $v_1 = l_1 \cdot \omega_1$
- pour la hanche : $v_2 = l_2 \cdot \omega_2$

A l'instant étudié, la vitesse totale v du pied est égale à la somme des contributions de chacune des articulations :

$$v = v_1 + v_2$$

La contribution relative du genou est donc de v_1/v et celle de la hanche de v_2/v .

A retenir :

La vitesse d'un point anatomique distal à une articulation dépend à la fois de la vitesse de rotation de l'articulation et de la distance entre l'axe de rotation et ce point. Si plusieurs articulations sont en jeu, la vitesse « globale » est égale à la somme des contributions de chaque articulation. En pratique, ceci met en lumière l'importance de la mise en jeu d'une chaîne musculaire.

9 Comment lancer une balle le plus loin possible ?

Il est possible de décrire la trajectoire d'un objet qui a été lancé (poids, balle de tennis frappée par une raquette, ...) à l'aide de la seconde loi de Newton.

Définition :

La seconde loi de Newton stipule que :

« un objet qui subit une force constante accélère également à un taux constant ».

D'un point de vue mathématique, la somme des forces externes s'exerçant sur l'objet est égale à la masse de l'objet multiplié par son accélération :

$$\Sigma F = m.a$$

avec ΣF la somme des forces externes, m la masse du corps et a l'accélération du corps.

Par « forces externes », on entend les forces qui s'appliquent sur le corps (la force de pesanteur, la résistance de l'air, l'action du sol, ...) par opposition aux forces internes (forces de cohésion des atomes et des molécules, ...).

Assez couramment, l'objectif est de lancer la balle le plus loin possible. La balle qui est en l'air ne subit qu'une seule force (si l'on néglige pour le moment les forces de frottement de l'air) : la force verticale de pesanteur (ou poids de l'objet). Celle-ci est égale à la masse de l'objet multipliée par l'accélération de pesanteur g (égale à $-9,81 \text{ m.s}^{-2}$ verticalement à la surface de la terre).

Pour aller plus loin :

Pour notre balle, nous avons donc :

$$m.g = m.a$$

si l'on intègre une fois entre le temps $t_0 = 0$ et le temps t et en supposant que la vitesse initiale est égale à v_0 :

$$g.t = v - v_0$$

puis en intégrant une nouvelle fois, on obtient la position p à l'instant t (on suppose ici que la position à t_0 est égale à 0) :

$$g.t^2/2 = p - v_0.t$$

Exprimons maintenant cette équation suivant les axes horizontaux et verticaux. Suivant l'axe horizontal (x), la force de gravité est nulle. Si on note θ l'orientation du lancer, nous obtenons :

$$x - v_0.\cos\theta.t = 0 \text{ ou encore } t = x / (v_0.\cos\theta)$$

Suivant l'axe vertical (z), en remplaçant t par l'expression que l'on vient d'obtenir, il vient :

$$g.x^2 / (2. v_0^2. \cos^2 \theta) = z - x.(v_0.\sin\theta) / (v_0.\cos\theta)$$

ou encore :

$$z = g.x^2 / (2. v_0^2. \cos^2 \theta) + x.\sin\theta / \cos\theta$$

A retenir :

Lorsque les frottements de l'air sont négligeables, la trajectoire d'un projectile est parabolique (Figure 10). Dans la direction du mouvement, la trajectoire est rectiligne et la vitesse reste constante. Suivant l'axe vertical, l'objet subit la force de pesanteur.

Connaissant l'équation de la trajectoire de la balle (voir section précédente « Pour aller plus loin »), il est possible d'étudier comment optimiser la distance du lancer : quelle valeur donner à la vitesse et à l'angle de lancer ? De cette analyse, il apparaît que pour optimiser la distance du lancer, il est possible d'intervenir soit sur l'angle du lancer, soit sur la vitesse du lancer. Il est à noter que c'est le carré de la vitesse qui intervient dans l'équation d'où l'importance prépondérante de ce paramètre.

Pour aller plus loin :

La balle retombe à la distance $x = D$, lorsque $z=0$, on obtient donc :

$$g \cdot D^2 + v_0^2 \cdot \sin 2\theta \cdot D = 0$$

ou encore

$$D = v_0^2 \cdot \sin 2\theta / (-g)$$

Nous observons aussi que la distance du lancer augmente proportionnellement au carré de la vitesse (Figure 9).

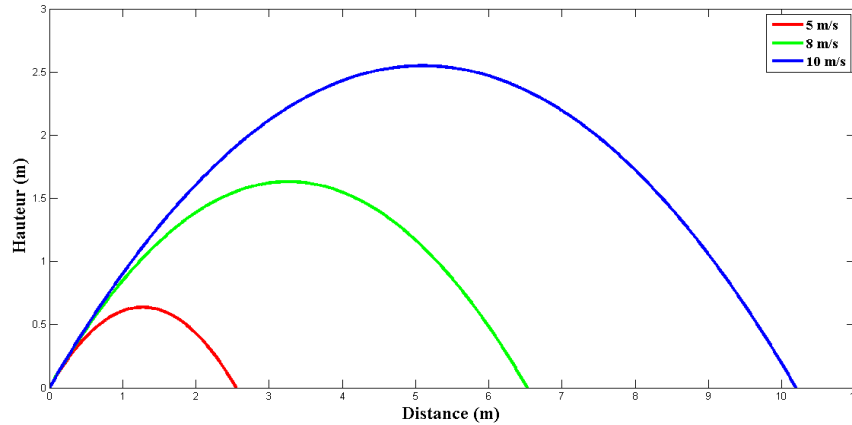


Figure 9 – Influence de la vitesse de lancer sur la performance pour un même angle de lancer (45°)

Suivant les situations, la balle ne parcourt parfois qu’une partie des courbes que l’on a présentées sur les graphique. Par exemple lors d’un smash au tennis, la balle est frappée dans une position haute vers le bas. Il n’y aura donc pas de phase acendante comme sur les figures précédentes. C’est aussi pour cela que l’on peut avoir l’impression que la trajectoire de la balle est droite (fin de la courbe bleue par exemple). En réalité, elle parcourt une petite partie d’une trajectoire parabolique (en supposant que l’on néglige les frottements de l’air).

Concernant l’angle, il faut avoir $\sin(2\theta) = 1$ c’est à dire $\theta = 45^\circ$ (Figure 10).

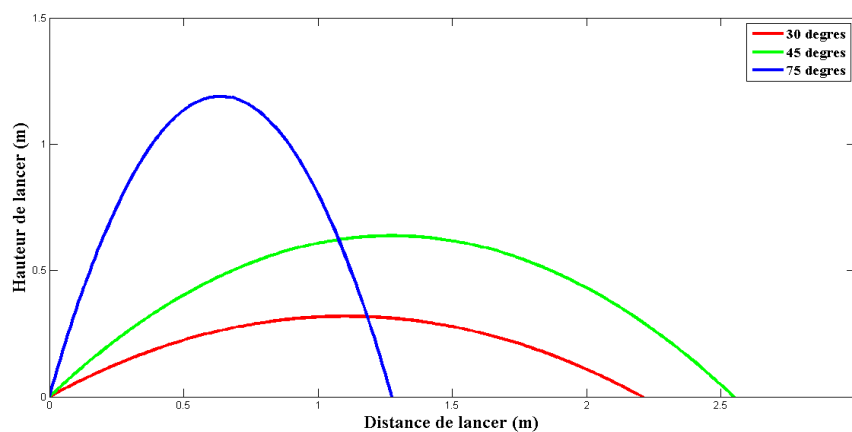


Figure 10 – Influence de l’angle du lancer sur la performance pour une même vitesse de lancer (5 m/s)

Cette valeur de 45° n'est que théorique car elle ne prend pas en compte les notions de portance et de traînée sur lesquelles nous reviendrons. En pratique, de manière à optimiser le rapport portance/trainée l'angle de lancer est en général inférieur à 45° . A titre d'illustration, l'angle de projection du javelot se situe entre 30 et 36° et de $35-37^\circ$ pour le disque. Ces valeurs dépendent aussi du vent qui peut être présent lors de la manifestation sportive. A l'angle de projection s'ajoute également un angle d'attaque : l'objet n'est pas exactement orienté suivant la direction du lancer. L'augmentation de l'angle d'attaque permet d'améliorer la portance de l'objet (jusqu'à un certain point) (Figure 11) mais augmente également la traînée. Le lancer est donc toujours la recherche d'un compromis entre plusieurs facteurs.

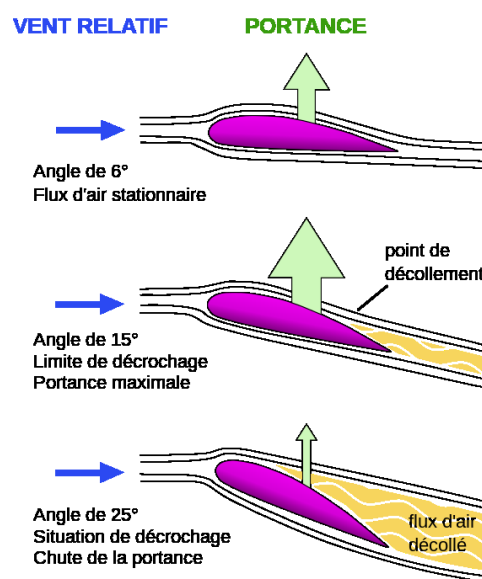


Figure 11 – Effet de l'angle d'attaque sur la portance (d'après Wikipedia « Portance (mécanique des fluides) »)

10 Pourquoi une balle dans l'air va tout droit (ou pas) ?

Définition :

La première loi de Newton stipule :

« *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme dans lequel il se trouve, à moins que quelque résultante de force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.* »

Cela signifie qu'un corps qui se déplace aura une trajectoire rectiligne tant que l'on ne lui applique pas une nouvelle force. On peut imaginer le patineur qui ne bouge pas et qui glisse tout droit sur la patinoire.

La première raison qui explique qu'une balle (de tennis, foot, volley, ...) n'a pas une trajectoire rectiligne est qu'elle est soumise à la force de pesanteur. Comme nous l'avons vu dans la section précédente cela conduit à une trajectoire parabolique. Cependant d'autres effets viennent s'ajouter faisant que dans la réalité, la trajectoire d'une balle est rarement parabolique. Ces modifications de la trajectoire sont principalement dues aux effets appliqués à la balle (rotation de la balle sur elle-même) ainsi qu'au type d'écoulement (laminaire ou turbulent) de l'air autour de celle-ci.

Outre la gravité, une balle subit 2 autres forces :

- la force de portance créée par une différence de pression entre le haut et le bas de l'objet,
- la force de traînée créée par une différence de pression entre l'avant et l'arrière de l'objet.

Lorsqu'il existe une différence de pression, apparaît une force d'amplitude proportionnelle à la différence de pression : plus la différence de pression est grande, plus la force est importante.

Prenons quelques exemples pour illustrer ces phénomènes. Une balle de foot entre en rotation sur elle-même lorsque la force qui lui est appliquée est excentrée vis-à-vis de son centre de gravité (qui est aussi son centre de rotation). Cela signifie donc que l'on applique une force à une distance non nulle de son centre de rotation (nous retrouvons donc la notion de « moment » vu précédemment). En appliquant une force sur le côté de la balle, on crée un moment qui va entraîner la rotation de celle-ci. En fonction d'où on frappe la balle (au dessus,

en dessous, sur le côté) la balle va entrer en rotation dans une direction différente. C'est pour cela qu'il est possible de donner des effets différents à une balle. Lorsque la balle tourne sur elle-même, la friction entre la balle et l'air fait que l'air est accélérée d'un côté de la balle et ralenti de l'autre. Lorsque l'air est accéléré il se crée une dépression et au contraire lorsque l'air est ralenti il se crée une surpression (Figure 12). Pour résumer, la rotation de la balle crée une différence de pression entre les 2 faces de la balle. La balle va se déplacer vers la zone de basse pression : la trajectoire n'est plus rectiligne. Cet effet est connu sous le nom d'effet Magnus.

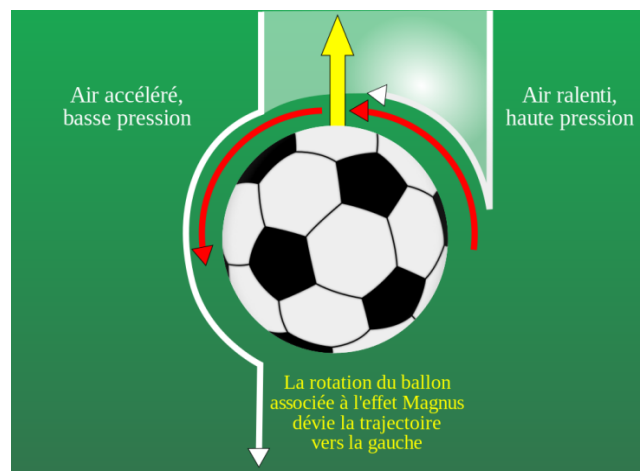


Figure 12 – Effet de la rotation de la balle sur la pression de l'air l'environnant (d'après Wikipedia « Effet Magnus et turbulences dans le football »)

Au tennis, lorsque l'on donne un effet lifté à la balle, on brosse la balle par le haut de manière à la faire tourner vers l'avant (Figure 13). Cela a pour effet de créer une dépression sous la balle : la balle aura tendance à retomber plus rapidement. Cet effet est donc particulièrement intéressant lors de la réalisation d'un lob. Au contraire une balle coupée aura, pour une même force de frappe, une trajectoire plus longue. C'est pourquoi les balles coupées sont en général frappées moins fort.

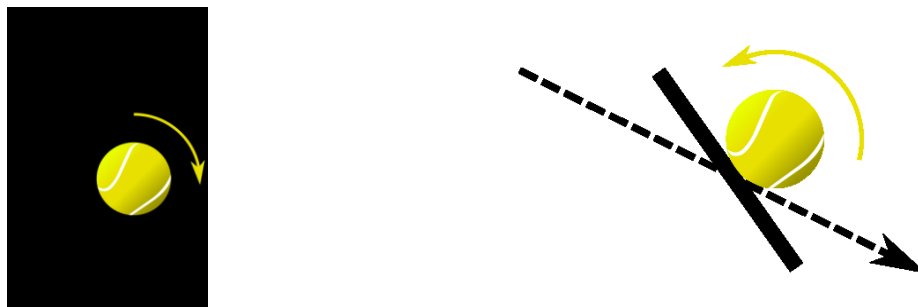


Figure 13 – Effet lifté (gauche) et coupé (droite) au tennis (d'après Wikipedia « Les principaux effets du tennis »)

L'écoulement de l'air autour de la balle peut être de 2 types : laminaire ou turbulent. Un écoulement est dit laminaire lorsque le fluide (l'air pour la balle, l'eau autour d'un nageur) se déplace en couche parallèle. L'écoulement est au contraire dit turbulent lorsque le fluide se déplace de manière désordonnée (création de tourbillons) autour du corps. Dans certaines conditions, une couche limite turbulente peut se créer autour de la balle. L'apparition de cette couche turbulente limite la résistance de l'air et par conséquent l'effet Magnus. L'apparition de cette couche limite turbulente est favorisée par la présence d'irrégularités à la surface de la balle.

A retenir :

En pratique, la trajectoire d'un projectile n'est pas forcément rectiligne. Plusieurs facteurs vont avoir tendance à influencer sa trajectoire dont l'effet de rotation mis dans la balle mais aussi les irrégularités à sa surface. C'est pourquoi différents ballons de foot, malgré des poids et la tailles standardisés, peuvent avoir des comportements différents d'une compétition à l'autre, pour des conditions atmosphériques variables (vent, humidité, ...) et/ou des positions géographiques (niveau de la mer vs altitude)

11 Comprendre des risques de lésion à l'aide de la biomécanique ?

Nous avons vu dans une section précédente comment la seconde loi de Newton s'applique aux translations. La seconde loi de Newton a aussi son équivalent pour les rotations.

Définition :

De la même manière qu'une force représente l'aptitude à faire entrer un objet en translation, le moment d'une force quantifie l'aptitude d'une force à faire tourner (faire effectuer une rotation) un solide autour d'un axe. D'un point de vue mathématique, on définit le **moment** M d'une force F autour d'un axe de rotation Δ comme il suit :

$$M = F.d$$

d étant la distance entre l'axe Δ et le point d'application de la force. Cette distance d est aussi parfois appelée « bras de levier ».

A tester !

Une manière assez simple de se représenter le moment d'une force consiste à essayer de pousser une porte de plusieurs manière (Figure 14) :

- Pour commencer ouvrir la porte en poussant à côté de la poignée (la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation est grand)
- Ensuite essayer d'appliquer la même force qui vous avait permis d'ouvrir la porte mais en étant proche des gonds (la distance entre le point d'application de la force et l'axe de rotation est faible).

Normalement cela devrait être beaucoup plus difficile. La même force n'a pas la même aptitude à ouvrir (induire la rotation) la porte. Le "moment" est différent. Cela est tout simplement dû au fait que dans un cas nous nous trouvons loin de l'axe de rotation alors que dans l'autre cas nous sommes très proches. La manière naturelle de compenser est de pousser plus fort (augmenter la force) pour avoir un moment de force identique et avoir ainsi la même action (par exemple ouvrir la porte à la même vitesse).

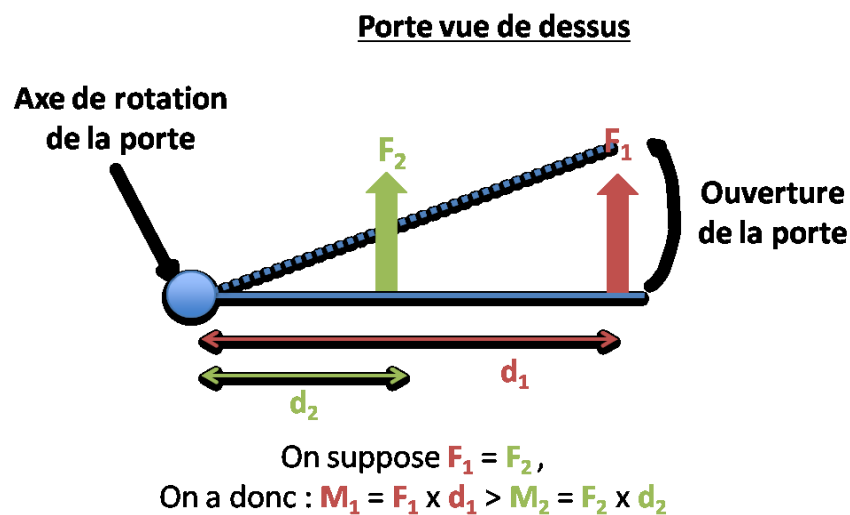


Figure 14 – Le moment de force est différent en fonction de où la poussée s'exerce pour ouvrir la porte

Dans l'exemple suivant (Figure 15) nous montrons comment l'étude des moments de force peut expliquer pourquoi certaines techniques sont plus à risque que d'autres. A la réception d'un saut, un athlète peut présenter plus ou moins de valgus des genoux. On supposera ici que

la force de réaction au sol F est la même pour les 2 types de réception. Dans un cas la distance d_1 entre l'axe de rotation du genou (en abduction) est très faible alors que dans le second cas celle-ci d_2 est beaucoup plus importante. Comme la force est identique cela signifie que le moment d'abduction autour du genou est d'autant plus important que le valgus l'est : $M_1 < M_2$. Lors de la réception, l'athlète cherche à se stabiliser et donc à s'opposer (annuler) les moments, qui, on le rappelle, représente la capacité à induire une rotation. Pour cela l'athlète « utilise » ses muscles et ses ligaments. Plus le moment de force est important, plus le travail des muscles et les contraintes sur les ligaments vont être importants. Logiquement, si les efforts demandés sont supérieurs à la résistance des muscles et ligaments, il y aura déchirure ou rupture. Une réception en valgus est donc ici plus dangereuse pour l'athlète.

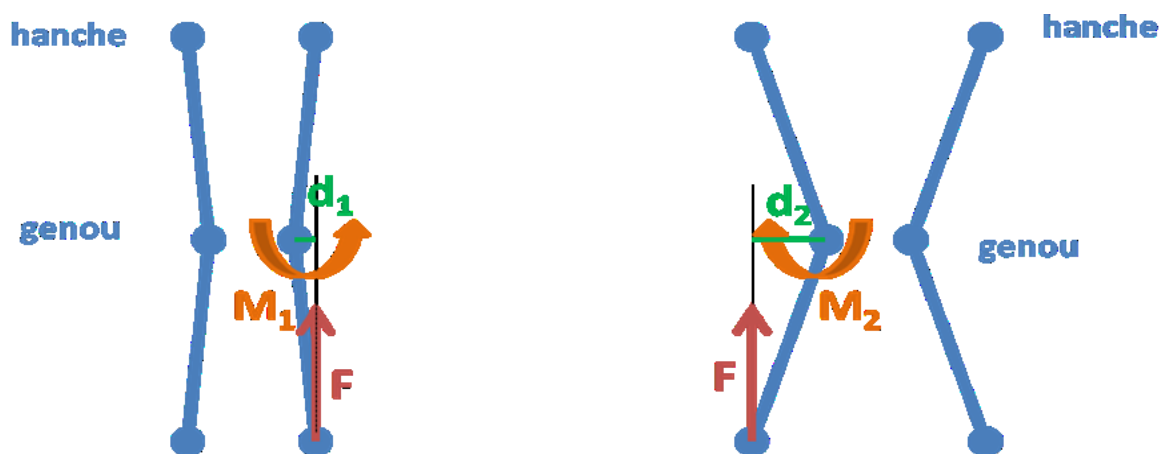


Figure 15 – Représentation schématique dans le plan frontal de deux réceptions de sauts

Attention !

Des moments de force importants ne sont pas forcément une mauvaise chose. Lorsque la ligne d'action d'un muscle est plus éloigné de l'axe de rotation de l'articulation, le moment qu'exerce le muscle est plus important. Pour une même force, son action est plus efficace. C'est ce que permet en outre la rotule en éloignant l'insertion du quadriceps de l'axe de rotation du genou.

Pour aller plus loin :

Il existe pour les rotations l'équivalent de la seconde loi de Newton. Pour rappel, la seconde loi de Newton stipulait que la somme des forces extérieures était égale à l'accélération du corps multipliée par sa masse. Pour les rotations, elle indique que la somme des moments de force M qui s'applique à un corps est égale à son accélération angulaire α multipliée par son moment d'inertie. Comme nous le verrons plus tard, le moment d'inertie I représente la réticence de l'objet à entrer en rotation. Nous avons donc :

$$\Sigma M = I . \alpha$$

Dans l'exemple de la réception du sauteur, nous avons supposé qu'il était déjà stable : autrement dit l'accélération angulaire au niveau du genou était nulle. C'est pour cela que l'on avait simplement que la somme des moments était nulle : le moment créé par les muscles et les ligaments devait être de même amplitude mais de signe opposé à celui créé par la réaction avec le sol.

12 Action, réaction !

Définition :

La troisième loi de Newton (ou principe des actions réciproques) dit que :

« Tout corps A exerçant une force sur un corps B subit une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé, exercée par le corps B. »

Prenons l'exemple d'un sprinter sur son starting block : l'athlète pousse (applique une force) sur le starting block (on suppose que celui-ci est bien fixé) et en retour le starting block va « pousser » l'athlète d'une même force mais de direction opposée (vers l'avant) ce qui lui permettra de s'élancer vers l'avant. Lorsque un athlète cours, c'est la force de frottement entre le sol et la chaussure qui permet de s'opposer à l'action horizontale de la jambe et qui permet au final à l'athlète d'avancer. Si la force de frottement est inférieure à l'action de poussée

horizontale de l'athlète, celui-ci va glisser. Les forces de frottements donc vont dépendre du type de sol (et aussi évidemment de l'humidité) et du type de chaussure. En sprint, les spikes aident à augmenter l'adhérence. L'athlète est ainsi capable d'appliquer des forces plus importantes (et donc d'accélérer plus vite). Lors des courses de fond, les accélérations sont bien moins élevées et les spikes aux chaussures ont moins d'importance que pour un sprinter.

Si l'on prend l'exemple de 2 patineurs immobiles sur une patinoire. Un patineur pousse l'autre, que ce passe t'il ? Seul le patineur qui est poussé entre en mouvement ou les deux ? On peut supposer que les patins glissent parfaitement sur la glace, il n'y a donc pas de frottements au niveau du sol. Le premier patineur exerce une force et donc le second va partir vers l'arrière. Mais la troisième loi de Newton nous dit le premier patineur subit en retour une force égale à celle qu'il a exercé mais d'une direction opposé : il partira lui aussi vers l'arrière !

Ces notions montrent donc l'importance d'appuis solides dans de nombreux sports.

A tester !

Pour mettre en évidence ce phénomène sans aller sur une patinoire, vous pouvez faire le test suivant : mettez vous avec un collègue, chacun sur une chaise à roulettes : si un de vous deux pousse l'autre, les 2 chaises devraient bouger. Le phénomène peut être un peu moins évident que sur une patinoire car il existe dans ce cas beaucoup plus de frottements (entre la chaise et le sol, orientation des roulettes, ...), mais vous devriez tout de même être capable de l'observer.

Un dernier exemple très évident mais auquel on ne fait que rarement attention peut illustrer cette loi. Lorsque vous tenez debout, vous exercez une force sur le sol : votre poids et pourtant vous ne vous enfoncez pas. Tout simplement le sol exerce une force contraire de même amplitude. Les forces que l'on exerce sur le sol peuvent être mesurées avec des plates formes de force dans un laboratoire. Ces plateformes donnent des informations sur les forces verticales mais également sur les forces latérales et celles vers l'avant et l'arrière. Lors d'un

saut, il est ainsi possible de vérifier avec ce type d'outil, si les 2 jambes poussent de manière identique.

Dans l'exemple de la Figure 16, nous pouvons observer les forces de réaction du sol lors d'un saut vertical (squat jump). Le graphique montre que :

- **Phase 1** : dans un premier temps (jusqu'à environ 7,6s), le sujet est immobile avec les jambes fléchies à 90°. Le sol ne fait que « compenser » le poids du sujet. Si on fait la somme des forces des jambes droite et gauche lors de cette phase on arrive à peu près à 750N c'est-à-dire 76kg, le poids du sujet.
- **Phase 2** : dans un second temps (jusqu'à 8s), le sujet pousse pour effectuer le saut. En fonction du degré d'extention des jambes la force de réaction au sol évolue et dépasse le poids du sujet de manière à vaincre la pesanteur.
- **Phase 3** : dans un dernier temps (à partir de 8s), le sujet est en l'air. Il n'est plus en appui sur le sol ; les forces de réaction sont donc nulles.

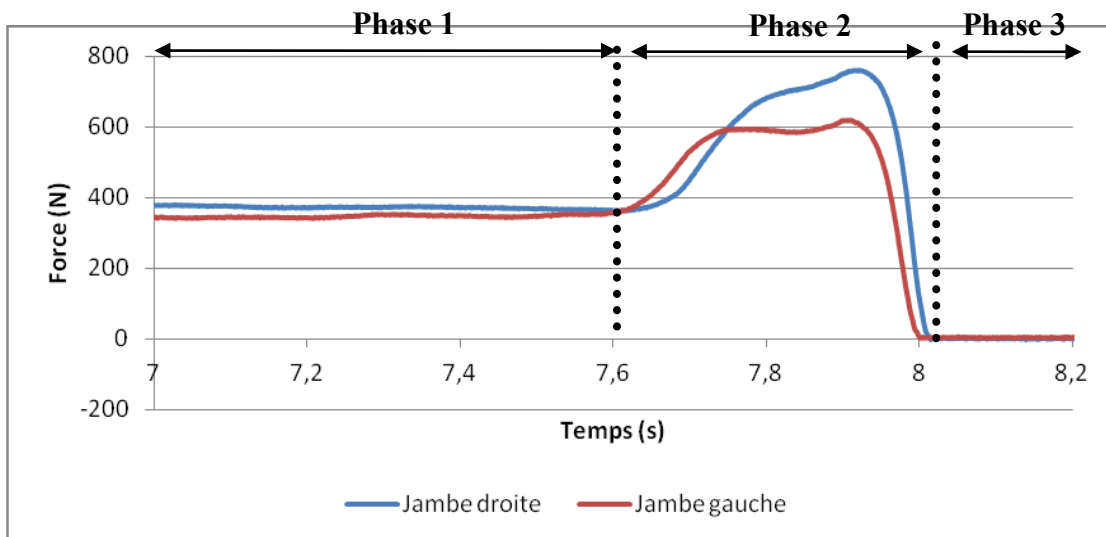


Figure 16 – Force de poussée verticale pour chacune des jambes lors d'un squat jump

13 Comment estimer la hauteur d'un saut vertical à partir de son temps de vol ?

Définition :

Un corps peut posséder 2 types d'énergie :

- de l'**énergie potentielle** (E_p). Une énergie potentielle est une énergie que l'on a « emmagasinée ». Dans le cadre sportif, il s'agira la plupart du temps d'énergie potentielle de pesanteur. Cette énergie est liée à la hauteur h à laquelle l'objet se trouve et à sa masse m :

$$E_p = m.g.h$$

L'énergie potentielle peut également être de type élastique. Ce type d'énergie est principalement emmagasinée dans les structures musculo-tendineuses lors d'une phase d'étirement et est beaucoup plus difficile à quantifier.

- de l'**énergie cinétique** (E_c). Cette énergie est liée à la vitesse v et à la masse m de l'objet :

$$E_c = m.v^2/2$$

L'énergie totale E_{Tot} du sujet est égale à la somme de ces énergies potentielles et cinétiques :

$$E_{Tot} = E_p + E_c$$

Le principe de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale d'un système isolé est invariante. Dans le cadre de l'étude de sportif cela correspondra à des systèmes qui ne subissent pas d'autres forces que la pesanteur.

Prenons l'exemple d'un athlète réalisant un squat jump. Il part d'une position basse (par exemple les genoux fléchis à 90°). A partir du décollage et jusqu'à l'atterrissage, le sauteur

n'est plus soumis à aucune force autre que la pesanteur. Il est donc possible d'appliquer le théorème de conservation de l'énergie pour estimer la hauteur du saut en ne connaissant que le temps de vol du sujet.

Pour aller plus loin :

Au moment du décollage, le sauteur a une vitesse initiale de v_0 . On fixe la hauteur h_0 égale à 0. On a donc une énergie totale E_0 (somme de l'énergie cinétique et potentielle) égale à :

$$E_0 = m \cdot v_0^2 / 2$$

Lorsqu'il atteint sa hauteur de saut h maximale, le sauteur a une vitesse nulle. L'énergie totale à cet instant E_1 est égale à :

$$E_1 = m \cdot g \cdot h$$

Comme l'énergie est conservée, nous avons :

$$E_0 = E_1$$

c'est-à-dire :

$$m \cdot v_0^2 / 2 = m \cdot g \cdot h$$

En partant de la seconde loi de Newton, que nous avons vu précédemment (imaginer que la balle est maintenant le sauteur et que l'angle de lancer est de 90°), on a :

$$v_0 = g \cdot t_{vol} / 2$$

avec t_{vol} le temps de vol.

On obtient :

$$h = g \cdot t_{vol}^2 / 8$$

A retenir :

La loi de conservation de l'énergie permet, entre autres, d'estimer la hauteur d'un saut en connaissant le temps de vol du sujet. Les systèmes tels que l'Optogait utilise ces principes physiques pour estimer la hauteur d'un saut en hauteur. On remarquera que pour obtenir une estimation correcte du temps de vol (et donc de la hauteur du saut), il est nécessaire que le sujet atterrisse dans la même position que lors du décollage, c'est-à-dire les membres inférieurs tendus.

14 Que se passe-t-il lors d'un impact ?

Lors d'un saut, l'athlète passe par une phase dite d'impulsion. Il s'agit de la phase pendant laquelle l'athlète pousse sur le sol pour ensuite décoller. Cette phase est donc définie à la fois par sa durée (le temps de poussée) et son intensité (la force de poussée). La phase d'impulsion est en général un compromis entre ces 2 paramètres : il est difficile de pousser fort longtemps. De la même manière si l'on pousse très fort pendant peu de temps, la performance ne sera pas optimale. Une optimisation de la technique de l'athlète peut ainsi consister à augmenter la durée de l'impulsion (en supposant que l'on arrive à conserver une force moyenne identique). Par exemple, c'est pour cela que le lanceur de javelot a le tronc légèrement en arrière durant la phase d'élan et se redresse à la fin du mouvement: cela lui permet d'augmenter la durée pendant laquelle il peut exercer une force sur le javelot.

Définition :

L'impulsion I d'une force F appliquée pendant un temps t est égale à :

$$I = F.t$$

L'impulsion s'exprime en N.s

L'impulsion a vocation à donner une vitesse à un corps (soit directement à l'athlète comme lors d'un saut ou d'un sprint, soit à un objet comme un poids, un javelot, ...). La variation de vitesse du corps dépendra à la fois de l'intensité de l'impulsion mais aussi du poids de l'objet. Pour une même impulsion, un objet lourd ira moins vite. En pratique cela signifie tout simplement qu'un athlète plus lourd devra fournir une impulsion plus importante qu'un athlète plus léger pour obtenir la même performance. La quantité de mouvement est une grandeur qui prend en compte à la fois la vitesse du corps et de sa masse.

Définition :

La quantité de mouvement Q d'un corps est égal à sa masse m multiplié par sa vitesse v :

$$Q = m.v$$

Comme l'impulsion, la quantité de mouvement s'exprime en N.s.

La notion d'impulsion est importante car à l'aide de la seconde loi de Newton, on peut obtenir une relation directe entre l'impulsion, c'est-à-dire l'action d'une force sur un corps pendant un certain temps, et la variation de vitesse (de la vitesse v_0 à la vitesse v_1), c'est à dire de la variation de quantité de mouvement, de ce corps de masse m :

$$I = m.(v_1 - v_0)$$

Dans l'absolu, pour obtenir une accélération maximale, il faudrait être capable d'exercer une force la plus grande possible pendant un temps le plus long possible. Cependant, en pratique, le temps d'application de la force ne peut parfois pas être prolongé comme dans le cas d'un sprinter où le temps de contact du pied au sol est limité. Une augmentation de ce temps ne serait d'ailleurs pas forcément une bonne chose car même si cela signifiait une accélération plus importante, cela signifierait aussi plus de temps passé au sol en avançant peu. L'optimisation de la technique de l'athlète consiste souvent à développer des gestes permettant d'optimiser ces 2 paramètres : durée de l'action de la force, optimisation de la force moyenne exercée.

Lors d'un saut vertical maximum :

- si le sauteur fléchit très peu les jambes, il aura très peu de temps pour exercer sa force de poussée : il ne sautera pas haut.
- si le sauteur fléchit complètement les jambes, il aura beaucoup de temps pour exercer sa force de poussée, mais il aura du mal à exercer une force très importante : il ne sautera pas au maximum de ses capacités.
- il existe une flexion optimale des genoux (environ 90°) qui permet d'optimiser la force exercée par les muscles des jambes et la durée de poussée et donc au final la hauteur du saut.

Les notions d'impulsion et de quantité de mouvement sont également très intéressantes dans le cadre de la prévention lésionnelle. Par exemple, lors de la réception d'un saut, afin de se stabiliser (perdre la quantité de mouvement qu'il possède), le sauteur doit amortir sa chute. S'il fléchit peu les jambes (jambes raides), il aura peu de temps pour perdre la quantité de mouvement qu'il possède, les forces seront importantes. Au contraire, s'il fléchit les jambes, il aura plus de temps pour compenser la quantité de mouvement : les forces à appliquer seront plus réduites.

A retenir :

L'impulsion dépend à la fois de la durée pendant laquelle est exercée la force et de l'intensité de celle-ci. La quantité de mouvement dépend à la fois de la masse de l'objet et de sa vitesse. L'impulsion et la quantité de mouvement sont liées : une impulsion a pour conséquence une variation de la quantité de mouvement. La technique de l'athlète a des conséquences directes sur la valeur de l'impulsion et donc à la fois sur sa performance et son risque de lésion.

Définition :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement précise que si aucune force n'agit sur un système de corps (ensemble d'objets), la quantité de mouvement totale du système reste constante.

Prenons l'exemple d'un gardien de but réceptionnant une balle (Figure 17). On cherche à savoir comment va être modifiée la vitesse du joueur par l'impact. La quantité de mouvement du système « gardien de but + balle » avant l'impact est égal à Q_{avant} :

$$Q_{avant} = m_{balle} \times v_{balle} + m_{joueur} \times v_{joueur} = 0.5 \times 15 + 75 \times (-0.1)$$

De la même manière après l'impact, nous avons $Q_{après}$:

$$Q_{après} = m_{balle} \times v_{balle} + m_{joueur} \times v_{joueur} = 0,5 \times 0 + 75 \times V$$

D'après le principe de conservation nous avons ;

$$Q_{avant} = Q_{après}$$

On en déduit que $V = 0 \text{ m/s}$: l'impact avec la balle a stoppé le gardien de but.

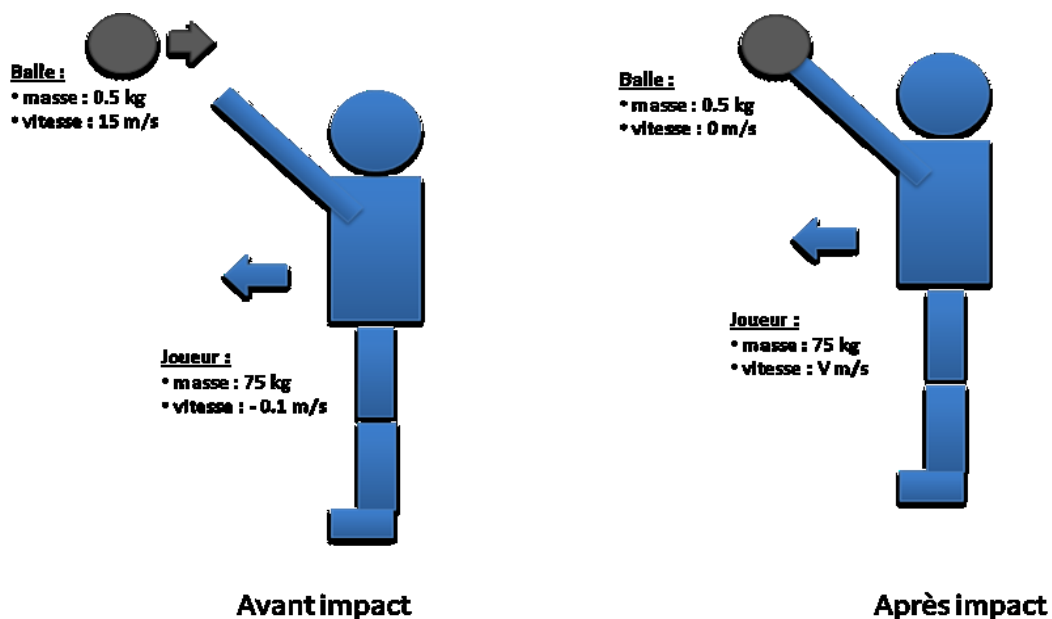


Figure 17– Gardien du but réceptionnant une balle. On ne connaît pas la vitesse V du joueur après l'impact

A retenir :

La quantité de mouvement se conserve pour un groupe d'objets (qui ne subit pas de forces extérieures) et en particulier lors d'un impact. Au tennis par exemple, l'utilisation d'une raquette plus lourde pourrait ainsi permettre de donner plus de vitesse à la balle. Cependant, une modification importante de la masse ne serait probablement pas efficace sur le long terme car la manipulation d'une raquette plus lourde demanderait plus d'efforts au joueur et donc plus de fatigue.

Attention !

En pratique, cependant, lors d'impacts, une partie de l'énergie cinétique (de la vitesse) du système est perdue : la perte peut être due à un travail de déformation ou à une création de chaleur. Plusieurs cas de figure sont possibles :

- si l'énergie cinétique est conservée, il s'agit d'une collision élastique
- si il y a une perte d'énergie cinétique, il s'agit d'une collision inélastique

Le coefficient de restitution e mesure le degré d'inélasticité du choc et dépend des caractéristiques des corps qui entrent en collision. Plus le coefficient e est proche de 1, plus la collision est élastique. On contraire si le coefficient e est égal à 0, il s'agit d'une collision parfaitement inélastique (choc mou) : les 2 objets restent en contact avec une vitesse nulle. A titre d'exemple le tableau suivant donne les coefficient de restitution de quelques types de balle et de quelques types de surface :

Type de balle	Coefficient de restitution
Ballon de basket	0.89
Ballon de football	0.76
Ballon de volley	0.74
Balle de tennis neuve	0.77
Balle de tennis usagée	0.71

Type de surface	Coefficient de restitution
Pelouse artificielle	0.76
Béton	0.74
Gazon	0.43

La diminution du coefficient de restitution de la balle de tennis en fonction de son utilisation explique pourquoi les balles sont régulièrement changées au cours d'un match

15 Quelles sont les différences entre les notions de travail, de puissance et énergie ?

Définition :

Lorsqu'une force F s'applique sur un corps, le **travail** W de cette force est égale au produit de cette force par le déplacement d du corps :

$$W = F.d$$

Un travail s'exprime en Joule (J).

Cela signifie que si une force s'applique à un corps sans que celui-ci ne se déplace, le travail est nul. Par exemple, si un haltérophile essaye de soulever un poids sans y parvenir, la force qu'il aura exercée n'aura pas produit de travail.

Définition :

La **puissance** correspond au travail réalisé par unité de temps. On peut exprimer la puissance P en fonction du travail W réalisé et du temps t comme étant :

$$P = W/t$$

Une puissance s'exprime en Watt (W).

Si 2 haltérophiles soulèvent la même charge en 2 temps différents, celui qui aura soulevé la charge le plus rapidement sera aussi celui qui aura développé la plus grande puissance moyenne.

Une puissance peut également être vue comme une force multipliée par une vitesse. Lors d'un squat jump (Figure 18), à l'instant initial la vitesse est nulle, la puissance l'est donc également. Au moment du décollage, la vitesse n'est plus nulle mais la force l'est maintenant. La puissance est donc à nouveau nulle. La puissance est maximale à un instant au cours de la poussée.

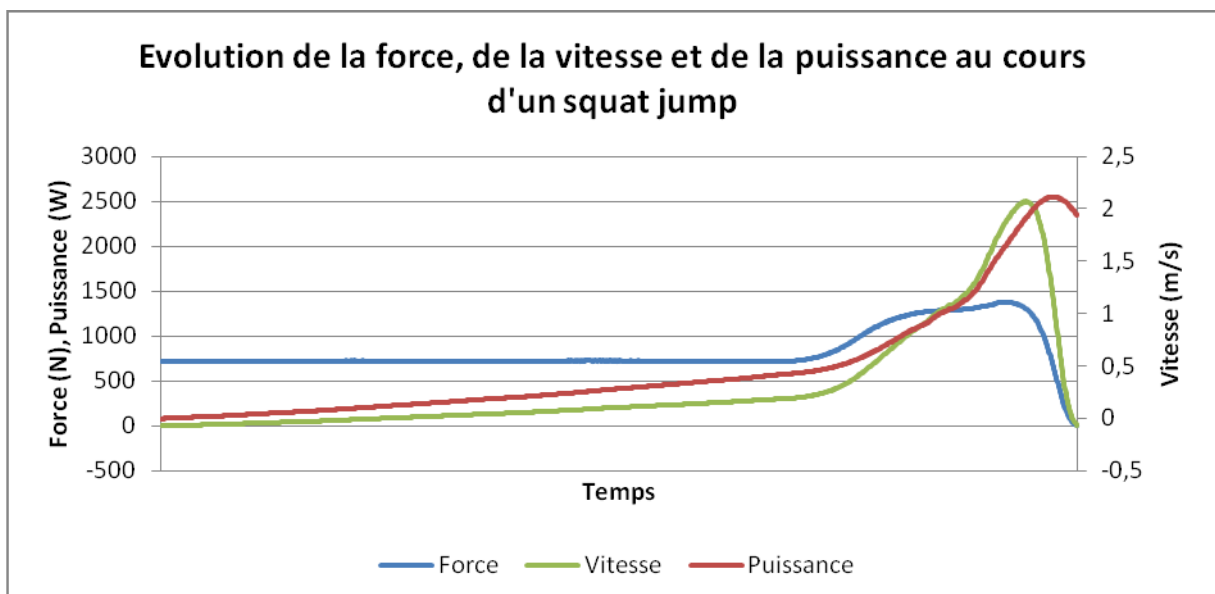


Figure 18 – Evolution de la force, de la vitesse et de la puissance au cours d'un squat jump. Le moment du décollage correspond à la fin du graphique

On remarquera également que la vitesse maximale de l'athlète n'est pas atteinte au moment du décollage mais un peu avant celui-ci. Cela est dû au fait que lors de la phase finale de poussée, la force développée est insuffisante pour contrer complètement l'effet de la force de pesanteur.

Définition :

La notion d'**énergie** caractérise la capacité à effectuer un travail. L'énergie, comme le travail, s'exprime en Joule (J).

C'est pourquoi, la modification de la quantité d'énergie d'un corps entre 2 instants reflète le travail qui a été effectué. Autrement dit le travail est la différence d'énergie que possède un corps entre 2 instants différents.

Nous avons déjà vu que l'énergie d'un corps est composée d'une partie liée à sa vitesse et d'une autre liée à son altitude. Si aucune force ne s'exerce, l'énergie du système ne varie pas. Si une force est appliquée, la force va modifier le mouvement du corps en l'accélérant (ou décélérant). Et donc modifier son énergie.

Pour aller plus loin :

Prenons à nouveau l'exemple d'un athlète réalisant un squat jump :

- en position basse, à une hauteur h_1 , sa vitesse est nulle. Son énergie est égale à :

$$E_1 = m.g.h_1$$

- juste avant le décollage, à une hauteur $h_2 > h_1$, sa vitesse v_2 est supérieure à zéro. Son énergie est égale à :

$$E_2 = m.g.h_2 + m.v_2^2/2$$

- Le travail W accompli par les muscles des membres inférieurs entre ces 2 positions est égale à :

$$W = E_2 - E_1 = m.g.(h_2 - h_1) + m.v_2^2/2$$

Dans cette équation le premier terme correspond à l'énergie qu'il a fallu dépenser pour passer

de la position basse à la position jambes tendues avant le décollage. Le second terme correspond à la « réserve » d'énergie qui va servir à décoller du sol.

Plus la vitesse au décollage sera importante, plus le saut sera haut.

A retenir

Le travail correspond à une variation d'énergie. Celui-ci peut être positif. Par exemple, lors d'un saut, le travail des muscles augmente l'énergie cinétique que possède l'athlète. L'énergie est ensuite transformée en énergie potentielle. Le travail peut aussi être négatif : c'est le cas lors de la réception du saut. Le but est d'arriver à un état d'équilibre, donc d'annuler toute son énergie cinétique.

La puissance, elle, correspond à la quantité d'énergie que l'athlète est capable de fournir par unité de temps. Des athlètes peuvent être très puissants mais seulement pendant une petite période de temps alors que d'autres, moins puissants, seront capables de maintenir cette puissance pendant des durées beaucoup plus longues. Les profils de puissance sont très différents d'une discipline à l'autre.

16 Pourquoi le patineur artistique garde-t-il ses bras le long du corps lors d'un saut ?

Définition :

L'**inertie** est définie comme la réticence qu'à un corps à subir un changement de vitesse en translation ou en rotation.

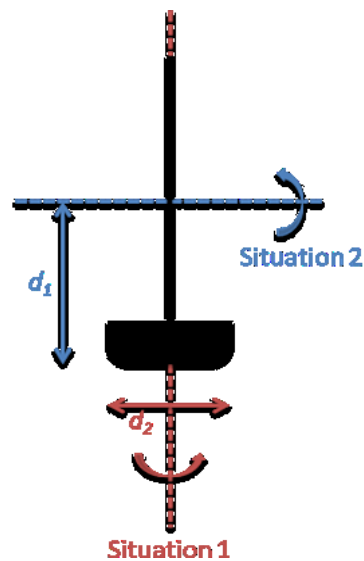
- En ce qui concerne les translations, l'inertie est proportionnelle à la masse d'un objet. Autrement dit plus un objet est lourd, plus il sera difficile de le mettre en mouvement, ou d'en modifier le mouvement.
- En ce qui concerne les rotations, le moment d'inertie est lié à la répartition des masses par rapport aux axes de rotation de l'objet. Plus les masses seront éloignées de l'axe de rotation, plus le moment d'inertie sera important et il sera difficile d'effectuer une rotation autour de cet axe.

Le patineur, lors d'une pirouette, cherche à entrer en rotation autour d'un axe qui va de sa tête à ces pieds. Si les bras sont étendus latéralement, la masse des bras est relativement loin du centre de rotation. Au contraire si les bras sont proches du corps, leur masse est proche de l'axe de rotation. Nous avons vu que plus les masses sont proches de l'axe de rotation, plus le moment d'inertie est faible et donc plus il est facile d'entrer en rotation. Si le patineur souhaite effectuer un nombre maximal de rotations, il a intérêt à garder ses bras proche de son corps.

Dans le cas du plongeur acrobatique, la dimension artistique, fait que l'athlète ne cherche pas forcément à réduire son moment d'inertie : certaines rotations se font corps tendu. Cependant lorsque l'athlète casse son corps en deux, il est d'un seul coup capable d'augmenter sa vitesse de rotation.

A tester !

Pour mettre en évidence ce phénomène facilement, il vous suffit de prendre un balai. Essayez alternativement de le faire tourner autour du manche (situation 1) et autour d'un axe perpendiculaire (situation 2). Autour de quel axe cela est t'il le plus facile ? Autour du manche ! Le moment d'inertie est plus faible car les masses sont plus proches de l'axe de rotation ($d_1 < d_2$).



A retenir

La réticence qu'aura un objet à accélérer en translation sera liée à sa masse. Sa réticence à modifier sa vitesse de rotation dépendra de l'éloignement des masses composant le corps de l'axe de rotation étudié. Plus les masses sont éloignées, plus la rotation est difficile.

Il est aussi important de réaliser qu'un objet ayant une inertie importante a plus de mal à augmenter sa vitesse, mais il est aussi plus difficile ensuite de la faire diminuer. Cela peut-être dans certains cas un avantage : un joueur de rugby de masse importante sera plus difficile à « déplacer » ou à ralentir pour les joueurs de l'équipe adverse.

17 Suis-je en équilibre ?

Définition :

Le **centre de masse** d'un objet correspond au barycentre de l'ensemble des masses d'un corps.

Pour le corps humain, il n'existe pas un centre de masse unique : celui-ci varie en fonction de la morphologie du sujet (cuisses très développées, tronc très développé, ...) et de sa position (droit, penché, fléchi).

La stabilité consiste à être capable de maintenir une position d'équilibre. Pour cela, il est nécessaire que la projection verticale du centre de masse passe par la base d'appui (ou base de sustentation) du sujet (Figure 19).

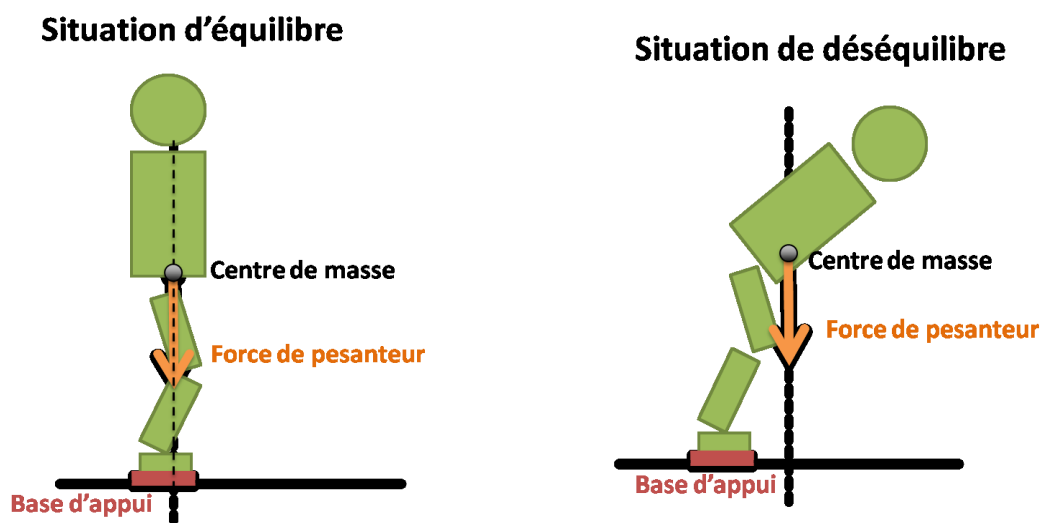


Figure 19 – Position relative du centre de masse et de la base d'appui

Avoir les jambes écartées permet d'avoir une base d'appui plus large et donc un meilleur équilibre. Par contre, comme il est plus difficile de quitter cette base d'appui, il est aussi plus difficile d'être réactif. Lors d'un départ de sprint ou de natation, l'athlète a donc tout intérêt

d'être proche des limites de sa base d'appui. Au contraire, un joueur de tennis a intérêt à être stable sur ses appuis pour mieux maîtriser sa frappe.

La distance entre le centre de masse et le sol a aussi une influence sur la stabilité. La notion de moment que nous avons vu s'applique à nouveau ici : la force qui s'applique est la force de pesanteur, la distance est la distance horizontale entre le centre de masse et la base d'appui et le point de rotation est la base d'appui. Plus le centre de masse est haut, plus un léger décalage crée une distance horizontale importante entre le centre de masse et la base d'appui. Par conséquent plus le centre de masse est haut plus il est facile de créer un moment important capable de déséquilibrer le sujet. C'est pourquoi de grands athlètes auront tendance à être moins stables. Il est possible de jouer sur la hauteur de son propre centre de masse par exemple en fléchissant les jambes.

La stabilité dépend donc à la fois de la position du centre de masse et de l'étendu de la surface d'appui.

18 Bibliographie

- Grimshaw P. – *Biomécanique du sport et de l'exercice* – 2010
- Dufour M., Pillu M. – *Biomécanique fonctionnelle* - 2007

19 Table des figures

FIGURE 1 – VECTEUR (EN ROSE) REPRESENTANT LA DIRECTION ET L'AMPLITUDE DU VECTEUR DE POUSSEE DES JAMBES LORS D'UN SERVICE AU TENNIS.	7
FIGURE 2 – VECTEUR REPRESENTANT LA DIRECTION ET L'AMPLITUDE DU VECTEUR VITESSE (V) D'UNE BALLE. IL EST POSSIBLE D'EXPRIMER LES COMPOSANTES HORIZONTALES ET VERTICALES DU VECTEUR EN FONCTION DE L'ANGLE (A) DEFINISSANT SA TRAJECTOIRE.	7
FIGURE 3 – SOMMATION DE VECTEURS.	8
FIGURE 4 – EVOLUTION DE LA VITESSE ET DE L'ACCELERATION D'UN SPRINTER AU COURS D'UN 100M (D'APRES <i>BIOMECHANIQUE DU SPORT ET DE L'EXERCICE</i> DE P. GRIMSHAW ET A. BURDEN).	9
FIGURE 5 – ESTIMATION DE L'ACCELERATION SUR UN GRAPHIQUE VITESSE/TEMPS A PARTIR DE LA PENTE DE LA COURBE : EN A, L'ACCELERATION EST POSITIVE (PENTE ASCENDANTE) – LA VITESSE AUGMENTE - ALORS QU'EN B, L'ACCELERATION EST NULLE (PENTE NULLE) – VITESSE STABLE - , ET EN C, L'ACCELERATION EST NEGATIVE (PENTE DESCENDANTE) – LA VITESSE DIMINUE.	11
FIGURE 6 – ANGULATION DU GENOU LORS D'UN DEPART DE SPRINT.	12
FIGURE 7 – EVOLUTION DE L'ANGULATION DU GENOU LORS D'UNE ACTIVITE DE COURSE.	13
FIGURE 8 – REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA JAMBE LORS DU SHOOT D'UNE BALLE.	15
FIGURE 9 – INFLUENCE DE LA VITESSE DE LANCER SUR LA PERFORMANCE POUR UN MEME ANGLE DE LANCER (45°)	19
FIGURE 10 – INFLUENCE DE L'ANGLE DU LANCER SUR LA PERFORMANCE POUR UNE MEME VITESSE DE LANCER (5 M/S)	19
FIGURE 11 – EFFET DE L'ANGLE D'ATTAQUE SUR LA PORTANCE (D'APRES WIKIPEDIA « PORTANCE (MECANIQUE DES FLUIDES) »)	20
FIGURE 12 – EFFET DE LA ROTATION DE LA BALLE SUR LA PRESSION DE L'AIR L'ENVIRONNANT (D'APRES WIKIPEDIA « EFFET MAGNUS ET TURBULENCES DANS LE FOOTBALL »)	22
FIGURE 13 – EFFET LIFTE (GAUCHE) ET COUPE (DROITE) AU TENNIS (D'APRES WIKIPEDIA « LES PRINCIPAUX EFFETS DU TENNIS »)	22
FIGURE 14 – LE MOMENT DE FORCE EST DIFFERENT EN FONCTION DE OU LA POUSSEE S'EXERCE POUR OUVRIR LA PORTE.	24

FIGURE 15 – REPRESENTATION SCHEMATIQUE DANS LE PLAN FRONTAL DE DEUX RECEPTIONS DE SAUTS	25
FIGURE 16 – FORCE DE POUSSEE VERTICALE POUR CHACUNE DES JAMBES LORS D’UN SQUAT JUMP	28
FIGURE 17– GARDIEN DU BUT RECEPTIONNANT UNE BALLE. ON NE CONNAIT PAS LA VITESSE V DU JOUEUR APRES L’IMPACT.....	34
FIGURE 18 – EVOLUTION DE LA FORCE, DE LA VITESSE ET DE LA PUISSANCE AU COURS D’UN SQUAT JUMP. LE MOMENT DU DECOLLAGE CORRESPOND A LA FIN DU GRAPHIQUE	37
FIGURE 19 – POSITION RELATIVE DU CENTRE DE MASSE ET DE LA BASE D’APPUI.....	42