

Institut Supérieur du Sport et de
L'éducation Physique de
Ksar Saïd



Université de la Manouba



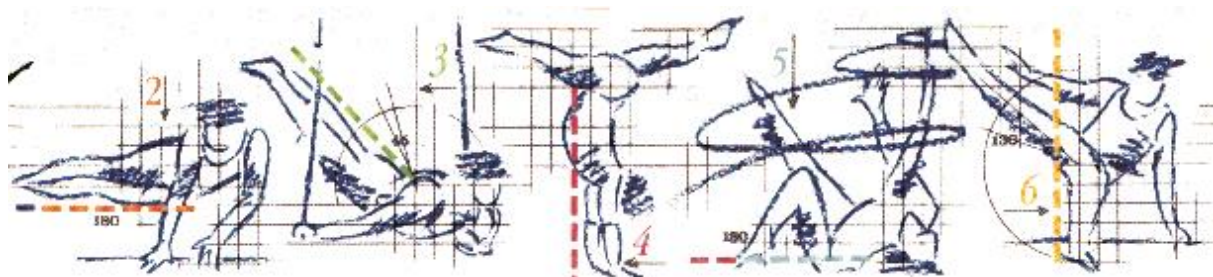
Département des APS
Individuelles

Cellule de gymnastique



COURS DE SPECIALITE "GYMNASTIQUE ARTISTIQUE"

PRINCIPES MECANIQUES EN GYMNASTIQUE SPORTIVE



*Cours élaboré par :
Dr. Bessem MKAOUER*

*Maître Assistant à l'ISSEP Ksar Saïd
Chef de la cellule de gymnastique artistique
Expert scientifique en gymnastique artistique
Entraîneur fédéral de gymnastique artistique*

Année Universitaire 2016 / 2017

PRINCIPES MECANIQUES EN GYMNIQUE SPORTIVE

La biomécanique est l'étude de la mécanique appliquée au corps humain. C'est une science qui a pour objet l'étude des forces et des effets produits par leurs applications.

En gymnastique artistique, l'analyse biomécanique des mouvements présuppose quatre formes d'étude mécanique à savoir :

- La statique : étude des conditions d'équilibre d'un corps sous l'effet de la force.
- La cinématique : étude des mouvements, abstraction faite aux forces qui les produisent.
- La cinétique : étude des mouvements.
- La dynamique : étude des relations entre les forces et les mouvements.

I/- La statique en gymnastique sportive :

Un corps est en équilibre quand les effets de la force qui agissent sur lui se neutralisent. La résultante de ces forces est $= 0$.

Le CG se projette verticalement sur le polygone de sustentation qui est la surface comprise entre les points de contact avec le sol les plus extrêmes.

Si le CG est en dessous du polygone, l'équilibre est stable exp. Suspension à la barre fixe, si le CG est au dessus du polygone, l'équilibre est instable exp. ATR.

II /- La cinématique linéaire en gymnastique sportive :

1/- Les formes de mouvement :

○ Mouvement de translation :

Un mouvement de translation est un mouvement qui se produit quand toutes les parties du corps se déplacent sur la même distance, dans la même direction et en même temps.

Un mouvement de translation peut être de type rectiligne ou curviligne. En gymnastique les mouvements sont généralement de type curviligne (parabolique) exemple : saut au sol et au saut de cheval.

○ Mouvement de rotation :

Le mouvement de rotation est un mouvement qui se produit quand un corps se déplace dans un trajet circulaire autour d'un axe de sorte que toutes les parties du corps se déplacent d'un même angle, dans la même direction et en même temps exemple : les renversements avant, arrière, salto avant, arrière, flip, tempo, saut de main, flip avant...

Les mouvements de rotation en gymnastique sont plus fréquents que les mouvements de translation.

- Mouvement général :

Un mouvement général est un mouvement qui se produit lorsqu'une ou plusieurs parties du corps se déplace en translation alors que, une ou plusieurs parties du corps se déplace en rotation exemple : course d'élan, pas gymnique, transport latéral ...

- Equations de mouvements linéaires :

- Mouvement horizontal :

- $V_y = V_i \cos \alpha$
- $\alpha = \arctang (V_z/V_y)$

- Mouvement vertical :

- $V_f = -gt + V_0 \sin \alpha$
- $V_f^2 = V_i^2 - 2g dz$
- $dz = -\frac{1}{2}gt^2 + (V \sin \alpha)t$
- $V_z = V_i \sin \alpha$

* (V_i) Vitesse initiale; (V_f) Vitesse finale; (V_y) Vitesse horizontale; (V_z) Vitesse verticale; (g) Constante de la force de gravité 9.81; (dz) Déplacement vertical; (t) Temps d'envol; (α) Angle d'envol avec l'horizontale.

2/- La vitesse :

La vitesse avec ces différentes modalités d'expression se manifeste dans la plupart des actions motrices. Elle présente un intérêt particulier pour toutes les disciplines sportives et son apport dans la réalisation des performances est primordiale dans le domaine de la pratique gymnique.

Zatciorskij définit la vitesse comme étant la capacité d'exécuter les actions motrices dans un minimum de temps, dans des conditions respectives. Dans l'exercice gymnique on rencontre la vitesse sous la forme de la combinaison de ces principales composantes vectorielles, à savoir la vitesse verticale (v_z), horizontale (v_y) et latérale (v_x).

3/- L'accélération :

Tout changement dans l'état du mouvement résulte en une accélération, dans un changement de direction, comme un changement de vitesse produit une accélération.

Les accélérations les plus importantes en gymnastique sont celles dû à la force de gravité agissant sur le gymnaste. D'où chaque gymnaste en vol libre est soumis à l'attraction de la pesanteur qui est équivalente à une accélération de 9.81m/s.

4/- Les mouvements linéaires :

Analysant un mouvement linéaire, à l'exemple de la course d'élan au saut de cheval (tableau n°1)

Temps	Positions	Vitesses
0	0	0
1	2	2
2	8	6
3	18	10

Tab. n°1 : Positions et vitesses d'un gymnaste à chaque seconde d'une course d'élan au saut de cheval.

$$V = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{d}{t}$$

x_i = position initiale ; x_f = position finale ; t_i = temps initial ; t_f = temps final

$$V = \frac{18-0}{3-0} = \frac{18}{3} = 6m/s$$

$$\alpha = \frac{V_f - V_i}{t_f - t_i}$$

V_i = vitesse initiale ; V_f = vitesse finale ; t_i = temps initial ; t_f = temps final

$$\alpha = \frac{10-0}{3-0} = \frac{10}{3} = 3.33m/s^2$$

5/- Équations du mouvement linéaire :

$$V_f = V_i + a \cdot t$$

$$V_f^2 = V_i^2 + 2 a \cdot d$$

$$d = V_i \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$$

V_i = vitesse initiale ; V_f = vitesse finale ; a = accélération

t = temps ; d = distance

La première équation permet de calculer la vitesse finale du gymnaste à partir de sa vitesse initiale, de son accélération et du temps mis pour accomplir le mouvement.

Exemple d'une chute libre :

Un gymnaste en appui sur l'échafaudage du plafond d'un gymnase, tombe en chute libre, nous enregistrons le temps mis pour atteindre le sol ; supposant qu'il a mis une seconde alors :

$$t = 1_{\text{sec}} ; a = 9.81 \text{ et } V_i = 0$$

$$\text{Alors : } V_f = V_i + a \cdot t ; V_f = 0 + 9.81 \times 1 = 9.81 \text{ m/sec}$$

Le gymnaste a une vitesse finale d'environ 10 m/sec.

Si on veut calculer la distance parcourue par le gymnaste, alors on utilisera la troisième équation :

$$d = V_i \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2 ; d = 0 \times 1 + \frac{1}{2} \times 9.81 \times 1^2 = 5 \text{ m}$$

Aussi, on peut déterminer (d) par la deuxième équation ainsi :

$$V_f^2 = V_i^2 + 2 a \cdot d ; 10^2 = 0 + 2 \times 9.81 \times d \rightarrow d = 10^2 / 2 \times 9.81 = 5 \text{ m}$$

6/- Les mouvements paraboliques :

Les équations citées précédemment ne peuvent pas être appliquées tel quel sont à des mouvements gymniques nécessitent soit un envol, soit une rotation, soit une combinaison des deux en décrivent une trajectoire parabolique.

La vitesse étant un vecteur quantité, elle peut être décomposée en plusieurs composantes qui lorsqu'en les additionnes ensemble produit la vitesse véritable du gymnaste. La vitesse peut être décomposée en composante verticale V_z , horizontale V_y et latérale V_x .

Souvent, on utilise pour l'analyse des mouvements gymnique la composante verticale et horizontale de la vitesse seulement c'est à dire une analyse en deux dimensions. (2D)

Ainsi, en décomposant ces mouvements en composante verticale et horizontale, on peut utiliser les équations précédentes à chacune des deux composantes à part puis remettre l'ensemble pour produire le mouvement global.

Essayant d'appliquer ces équations à l'analyse du salto arrière :

Un gymnaste effectue une rondade flic-flac salto arrière, au moment de la poussé au sol (l'impulsion après la courbette) pour la réalisation du salto le centre de gravité (CG) du gymnaste monte en direction formant un angle $\alpha = 60^\circ$ avec le sol à une vitesse initiale V_i d'environ 6 m/sec (vitesse de décollage à l'issu de la rondade)

Pour analyser ce mouvement il faut décomposer V_i en sa composante V_Z et V_Y .

$$V_Z = V \sin \alpha$$

$$V_Y = V \cos \alpha$$

$$V_Z = 6 \sin 60^\circ = 5 \text{ m/sec}$$

$$V_Y = 6 \cos 60^\circ = 3 \text{ m/sec}$$

A partir de ces résultats, on peut analyser le salto.

○ Pour la composante verticale :

$V_Z = 5 \text{ m/sec}$ sera considéré comme V_i

$V_f = 0$ c'est le sommet du salto

Le gymnaste décélère verticalement du point d'appel jusqu'au plus haut point du salto à cause de la gravité alors : $a = -9.81$

Par conséquent, $V_i = 5 \text{ m/sec}$; $V_f = 0$; $a = -9.81$; $t = ?$

On utilise alors l'équation n° 1 : $V_f = V_i + a \cdot t$

$$0 = 5 + (-9.81) \cdot t \text{ donc } t = 0.5 \text{ sec}$$

Alors, il faut 0.5 sec pour atteindre le sommet du salto et évidemment 0.5 sec pour redescendre au sol. Ce qui signifie que le gymnaste a 1 sec pour accomplir le salto.

Maintenant on peut déterminer la hauteur du salto par l'équation n° 2 :

$$V_f^2 = V_i^2 + 2 \cdot a \cdot d$$

$$0 = 5^2 + 2 \cdot (-9.81) \cdot d_z ; d_z = 1.25 \text{ m}$$

Le CG du gymnaste s'élève à 1.25 m

○ Pour la composante horizontale :

Si, on ignore les effets de résistance de l'air V_Y sera constante durant tout le mouvement c'est à dire : $a = 0$ et la V_Y initiale (V_i) ainsi que la V_Y finale (V_f) à la réception seront les mêmes (3 m/sec). La distance d_y parcourue lors du salto peut être déterminé par l'équation n° 3 : $d_y = V_i \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$

$$d_y = 3 \times 1 + \frac{1}{2} \times 0 \times 1^2 = 3 \text{ m}$$

A ce propos, nous évoquons le principe de conservation de l'énergie.

Rappelons que l'énergie potentielle (W_p) c'est l'énergie que le gymnaste emmagasine quand il élève son CG. Plus son CG est haut plus il aura de l'énergie.

$$W_p = m \cdot g \cdot h$$

L'énergie cinétique (W_c) est l'énergie que possède un gymnaste grâce à sa vitesse. Plus le gymnaste est rapide plus l'énergie cinétique emmagasinée est importante.

$$W_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2$$

Retournons à l'exemple du salto arrière, où le CG du gymnaste a effectué un déplacement de 1.25 m. Le gymnaste a un poids de 60kg. Le travail effectué par le gymnaste pour élever son CG de 1.25m est égal à :

$$W_p = m \cdot g \cdot h = 60 \times 10 \times 1.25 = 750 \text{ J}$$

Au sommet du salto l'énergie potentielle W_p du gymnaste est de 750 J c'est la quantité d'énergie emmagasinée dans le corps du gymnaste grâce à sa hauteur. Notons que, l'énergie potentielle (W_p) varie durant tout le salto de 0 au décollage ($h = 0$ et V_z max) à sa valeur maximale au sommet du salto (h max et $V_z = 0$) puis de nouveau à 0 lors de l'atterrissage ($h = 0$ et V_z max).

Le gymnaste a une vitesse de décollage de 5 m/sec qui est aussi sa vitesse d'atterrissage. L'énergie cinétique (W_c) emmagasiné par le gymnaste peut être exprimée par : $W_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2 = \frac{1}{2} \times 60 \times 25 = 750 \text{ J}$

En effet, l'énergie cinétique emmagasinée est à un maximum de 750 J au décollage et à l'atterrissage ($h = 0$, $W_p = 0$ et V_z max), alors qu'au sommet du salto elle est nulle (h max, W_p max et $V_z = 0$)

De ce fait, nous remarquons que si W_c est à son maximum (au décollage et à l'atterrissage où V est max et $h = 0$) W_p est nulle. Tandis que, si W_p est à son maximum (au sommet du salto où $V = 0$ et h max) W_c est nulle. C'est le principe de la conservation d'énergie. Durant tout le salto l'énergie total du corps du gymnaste est de 750J. W_c est transformée en W_p durant l'envol et W_p se transforme en W_c pendant la chute (rapport V/h).

Autre exemple, une analyse d'un saut par renversement avant (saut de lune) au cheval sautoir :

Au début de la course, le gymnaste ne possède pas d'énergie sa vitesse initiale $V_i = 0$ c'est à dire l'énergie totale est nulle. Pendant la prise d'élan et la phase d'accélération de la course l'énergie cinétique W_c augmente jusqu'à une valeur maximale qui est atteinte lorsque la vitesse de course est au maximum.

Lors de l'appel sur le tremplin, une partie de la W_c est transformée en énergie élastique par l'action du gymnaste sur le tremplin la V_y sera donc réduite, de même la W_c . Par contre l'énergie élastique emmagasinée par le tremplin est restituée au gymnaste de façon à changer la direction de mouvement (principe de blocage d'un mouvement rectiligne) ce qui fait que le gymnaste est propulsé vers le haut par le tremplin, c'est à dire la vitesse

linéaire sera transformée en une composante verticale (V_z) qui déplace le gymnaste vers le haut et une composante horizontale (V_y) qui continue sa progression en avant.

Pendant le premier envol une partie de W_c du corps est transformée en W_p , alors que le gymnaste s'élève pour l'attaque du cheval.

Durant la répulsion quand le gymnaste pousse sur le cheval, il y a une augmentation de W_c et également un changement de direction du mouvement projetant à nouveau le gymnaste en avant et en haut. Le gymnaste perd de W_c en faveur d'une augmentation de W_p jusqu'au plus haut point atteint du deuxième envol.

Pendant la phase de descente, le corps perd progressivement tout son W_p qui est convertie en W_c , cette énergie est absorbée par le contact avec le sol lors de la chute.

La vitesse de course est très importante pour déterminer la qualité d'un saut qui dépend largement des trois facteurs suivants :

- W_c accumulée durant l'élan
- Energie investie durant l'appel
- W_c transformée par la poussée lors de la répulsion des bras

L'augmentation de 10 % de la vitesse d'appel produit environ 20 % d'augmentation de W_c pour le saut. (tableau n°2)

<i>% d'augmentation de la vitesse d'appel</i>	<i>% approximatif de l'augmentation de W_c</i>
10 %	20 %
20 %	40 %
30 %	70 %
40 %	100 %
50 %	130 %
100 %	300 %

Tab. n° 2 : Augmentation de W_c en fonction de l'augmentation de la vitesse d'appel.

(Smith 1991)

III /- La cinématique angulaire en gymnastique sportive :

1/- Rotation libre dans l'espace :

Si la ligne d'action d'une force ne passe pas par le centre de gravité d'un corps, cela entraînera une rotation de ce corps. Le produit de l'intensité de la force par la droite perpendiculaire (angle droit) à son action (ou direction) passant par le centre de gravité est appelé moment de rotation.

C'est ce moment de rotation ou « couple de rotation » qui 'est à l'origine de la rotation du corps. Il est quelquefois comparé à une poussée excentrée et il est important de réaliser que le gymnaste tournera dans la direction selon laquelle le moment de rotation est appliqué. Si le moment de rotation était appliqué au gymnaste dans le sens des aiguilles d'une montre, alors la rotation du gymnaste s'effectuerait aussi dans le sens des aiguilles d'une montre, et vice versa.

En gymnastique, cependant, nous nous trouvons fréquemment face au problème inverse. Nous pouvons voir le sens de rotation d'un corps au cours d'un mouvement, et nous en déduisons donc la direction de la poussée qui produira le moment de rotation nécessaire.

Examinons la position d'impulsion du corps lors d'un salto avant. C'est la position du salto avant « russe ». Comme le gymnaste doit subir une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre autour du **CG** pour accomplir le mouvement, le moment de rotation appliqué au gymnaste au moment de l'impulsion devra avoir la même direction. Cela ne pourra être le cas que si la poussée **F** du gymnaste sur le sol passe en arrière du **CG**. Le moment de rotation résultant sera égal au produit de la poussée **F** par la droite perpendiculaire à **F** passant par **G** (c'est-à-dire **r**).

Donc, moment de rotation = **F . r**

2/- Rotation autour d'un point d'appui :

Cela peut arriver dans une variété de cas. Lors du saut de lune, flic-flac, saut de main... Le point de rotation instantané ou « pivot » pendant la phase de poussée, est le point de contact des mains. Tous ces mouvements ont une rotation libre suivie d'une rotation autour d'un appui, suivie d'une rotation libre.

Lors du travail aux agrès, l'agrès lui-même est fréquemment le point d'appui autour duquel se fait la rotation du gymnaste. En effet, le gymnaste est constamment en train de créer des moments de rotation nécessaires aux rotations du corps ou aux mouvements de « balancés ».

Un balancé « de base », aux barres parallèles et les ciseaux au cheval d'arçon, une forme de balancé fondamental. Dans ces deux cas, le gymnaste doit créer les moments de rotation afin d'amorcer et de maintenir le balancer. Il y parviendra en éloignant le centre de gravité d'au-dessus du point d'appui (les barres, dans le premier cas, et le cheval d'arçons, dans le second). (figure n°1)

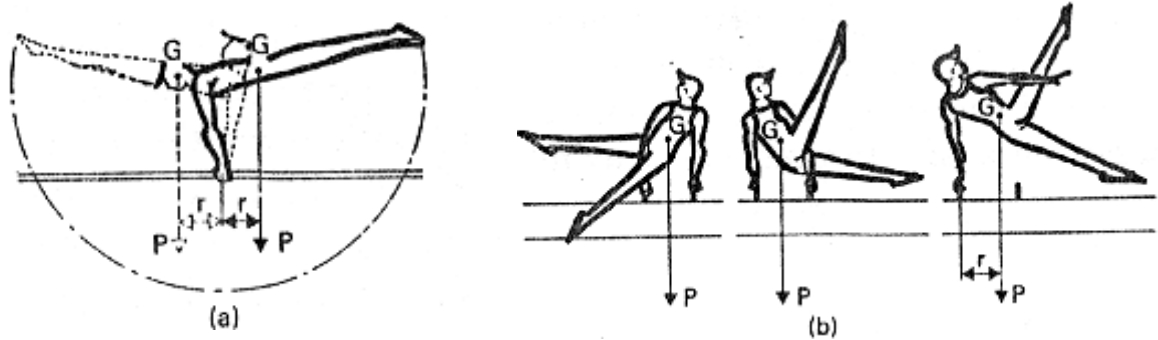


Fig. n°1 : Balancer fondamental.

Cependant, comme le moment de rotation est donné par $P \cdot r$, sa valeur variera évidemment au cours du balancé, d'une valeur maximale en fin de balancé à zéro, lorsque le centre de gravité passera au-dessus du point d'appui.

Considérons maintenant la création des moments de rotation durant un travail à la barre fixe. (figure n°2)

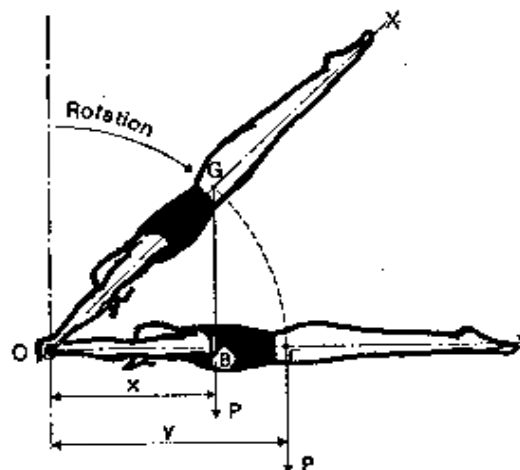


Fig. n°2 : Balancer à la barre fixe.

Un gymnaste dans deux positions durant un grand tour à la barre fixe. La direction de la force, c'est-à-dire la masse du gymnaste, agit verticalement vers le bas en passant par le centre de gravité ; elle est due à la pesanteur. Le moment de rotation à la position X est :

$$\text{Moment de rotation} = F \cdot r = P \cdot OB = P \cdot X$$

Il sera maximal en position Y, quand :

$$\text{Moment de rotation} = F \cdot r = P \cdot OC = P \cdot Y$$

Evidemment, le moment de rotation change tout au long du balancé, de zéro en haut et en bas quand le centre de gravité est directement au-dessus ou en dessous de la barre, à une valeur maximale en position horizontale, quand la droite perpendiculaire à G, à partir de la barre, est maximale.

Une considération sur les moments de rotation va nous permettre une meilleure compréhension de ce qui se passe au cours des balancés fondamentaux aux anneaux. Excepté durant des mouvements d'équilibre ou de force, les anneaux sont en mouvement. Le gymnaste crée constamment des moments de rotation qui facilitent l'exécution d'un enchaînement.

Une technique et une force considérable sont exigées pour atteindre des positions horizontales lors des balancés avant et arrière durant l'exécution de balancés fondamentaux aux anneaux. Au cours de leur exécution, les anneaux ont un important déplacement horizontal (de 1 mètre ou plus, en fonction de la taille du gymnaste)

En bas du balancé, en position, les anneaux et le **CG** du gymnaste sont verticalement au-dessous du point de suspension **O**, des anneaux. Le gymnaste est en position d'équilibre, le moment de rotation est égal à zéro.

A la fin du balancé arrière, le **CG** est encore à la verticale au-dessous du point de suspension **O**. Cependant, le gymnaste a pour point d'appui (local) les anneaux eux-mêmes, et ces derniers sont maintenant séparés du point de suspension des câbles, par une distance horizontale **r**. Le gymnaste est en déséquilibre et il subit par conséquent, un moment de rotation tentant à le remettre en position d'équilibre. La valeur du moment de rotation est :

$$\text{Moment de rotation} = P \cdot r$$

Une situation similaire se produit quand le gymnaste est en balancé avant balancé avant. Le moment de rotation que le gymnaste crée varie de zéro en position alignée à un maximum de $(P \cdot r)$ lors des positions de balancement à l'horizontale. Le **CG** du gymnaste monte et descend verticalement au-dessous du point **O** de suspension des anneaux.

3/- Le balancer du pendule :

Le concept de balancer du pendule est très important en mécanique et a une forte implication dans l'entraînement aux agrès gymniques.

a) Les principes mécaniques.

La forme la plus simple de pendule, c'est un fil avec une masse à son extrémité. Le plomb est suspendu à partir d'un support au point **O** par un fil de longueur **I** et dont le poids est négligeable, si on le compare à celui du plomb. Le centre de cavité du ondule est assimilé à celui du plomb. (figure n°3)

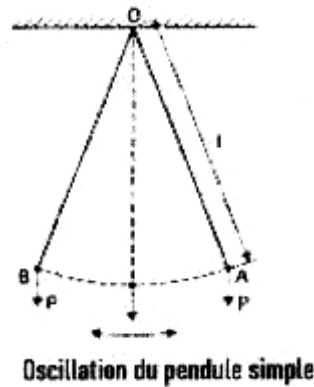


Fig. n°3 : Pendule simple.

Si nous communiquons un petit déplacement au pendule, que nous le lâchons et le laissons osciller (balancer d'avant en arrière) librement, nous pouvons remarquer que le temps de chaque oscillation reste constant ; c'est-à-dire que le temps du balancer de **A** à **B** puis du retour en **A** reste le même pour chaque oscillation. Ceci est appelé période (**T**) du pendule, il est mesuré en secondes/oscillation, c'est-à-dire le nombre de secondes que met le pendule pour accomplir un balancer. La valeur de **T** (pour de faibles oscillations) peut être exactement trouvée par l'équation :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$\pi = 3.14159$; l = longueur du pendule (m) ; $g = 9.81\text{m/s}^2$

Nous pouvons voir que la période de l'oscillation d'un simple pendule dépend seulement de la longueur de celui-ci. Plus la longueur est importante et plus le balancer sera lent et, inversement.

Bien que nous ne puissions pas relier directement cette situation simple aux balancer en gymnastique aux agrès, nous pouvons tout de même faire la généralisation suivante : toutes chose égales, plus le pendule est long (plus le gymnaste est grand) plus il (ou elle) sera lent pendant des exercices en suspension (ou en appui). Il est important que l'entraîneur sache que le temps du balancer en gymnastique est gouverné par des lois naturelles reliées au poids et à la morphologie du gymnaste. Celui-ci ne peut pas modifier le réglage naturel du balancer sans changer la forme de son corps.

b) Pertes d'énergie.

Pendant le balancer du pendule. Il se produit une perte d'énergie due aux frottements. (figure n°4)

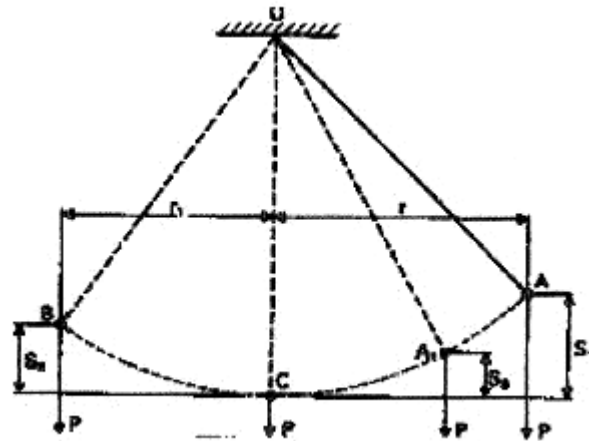


Fig. n° 4 : Balancer d'un pendule.

Si un pendule est déplacé, disons, à la position **A** et lâché, il ne retournera pas au point **A** à cause des frottements mais à une position plus basse **A₁**, comme le montre le schéma. Le balancer complet peut maintenant être expliqué en terme mécanique.

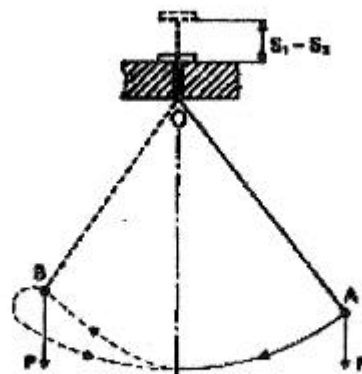
Le pendule a été déplacé de la position verticale **OG** à la position **OA**, puis il est lâché. Comme le **CG** a été écarté de la verticale l'apesanteur agit sur le pendule et tend à le remettre dans sa position "de potentiel le plus bas". Nous avons créé un moment de rotation dont la valeur est $mg \cdot r$ et le pendule a emmagasiné de l'énergie potentielle égale à $mg \cdot s_1$. Lorsque le pendule passe à la verticale, il possède uniquement de l'énergie cinétique, due à la vitesse du balancer, maximale à ce point (il a perdu toute son énergie potentielle). L'énergie cinétique à ce point est égale à l'énergie potentielle au point de départ du balancer moins les pertes dues aux frottements entre la position initiale **OA** et la verticale, l'apesanteur agit encore pour produire un moment de rotation, mais celui-ci agit dans le sens opposé du balancer et par conséquent a un effet de freinage ou de décélération. Le pendule subira une décélération et sera finalement stoppé en position **OB**. C'est une position d'un potentiel inférieur S_2 par rapport au départ du balancer. La différence de hauteur entre ces deux points $S_1 - S_2$ représente la perte de potentiel.

Cela signifie que l'énergie potentielle perdue est $mg \cdot (S_1 - S_2)$ la seconde représente les pertes d'énergie due aux frottements entre **A** et **B**. Pour la seconde partie du balancer, le pendule démarre avec une énergie potentielle de $mg \cdot s_2$ et atteindra la position **A₁** au retour. Par conséquent, les pertes dues aux frottements pendant un balancer complet peuvent être représentées par $mg \cdot (S_1 - S_3)$.

De ce fait, le mouvement du pendule s'arrêtera totalement si aucune énergie ne lui est fournie. Si, durant le balancer, une quantité d'énergie égale à $mg \cdot (S_1 - S_3)$ est fournie pour compenser les pertes dues aux frottements, alors le pendule retournera à sa position initiale **A**. Toute fois, si cette énergie excède les pertes dues aux frottements, le pendule terminera

dans une position plus élevée que celle du départ, c'est-à-dire que l'amplitude du balancer augmentera. Ce principe est important pour maintenir ou pour accroître le balancer pour avoir le maximum d'effet et cela peut être illustré en considérant un modèle suggéré par Happer (1973). (*figure n°5*)

Le pendule est lâché de la position **OA**. Pendant la phase descendante, la longueur du pendule reste aussi longue possible pour que l'effet du moment de rotation de pesanteur soit maximum. C'est à la position verticale que se produit le transfert maximum d'énergie potentielle en énergie cinétique et que la vitesse angulaire atteint son maximum. Pendant la phase ascendante, le travail consiste à compenser les frottements pour maintenir le balancer c'est-à-dire que le pendule doit être élevé d'une quantité égale à la perte de potentiel (S_1-S_3).



Maintien du balancer en raccourcissant le pendule pendant la phase ascendante

Fig. n°5 : Modèle de Happer 1973

Le pendule s'élève à la position **OB**, si le travail effectué pour ceci est exactement égal aux frottements produits durant un balancer complet, alors le pendule retournera à sa position exacte de départ **OA**. Cette opération peut être répétée indéfiniment. Si le travail effectué, pour ramener le pendule vers l'axe de suspension est supérieur aux frottements, alors l'amplitude du balancer sera augmentée. La vitesse angulaire sera maximale au bas du balancer lorsque toute l'énergie potentielle aura été convertie en énergie cinétique. La force centrifuge sera aussi maximale à ce point.

Aux extrémités du balancer, lorsque la vitesse est nulle, la force centrifuge n'agit pas et c'est le point des changements de prises, des coupés rattrapés et ceci, sans être éjecté.

4/- Le balancer du pendule humain :

L'amplitude du balancer peut être maintenue ou même augmentée par l'allongement du corps pendant la descente (pour produire un moment d'inertie aussi grand que possible), et par la flexion du corps durant la phase ascendante (pour réduire le moment d'inertie et accroître la vitesse angulaire).

Pour terminer l'élévation, le **CG** du gymnaste doit être ramené vers l'axe de rotation durant la phase ascendante du balancer. Cela demande un effort musculaire et un travail effectué par le gymnaste.

Si le travail effectué par le gymnaste pour réduire le corps (moment d'inertie) est égal aux frottements engendrés durant le balancer, alors l'amplitude du balancer reste la même. Si, par contre, le travail excède les frottements, l'amplitude augmente.

Pour optimiser les effets de remontée, la diminution du moment d'inertie (c'est-à-dire juste au-dessous du point de suspension). Cependant ceci exige un effort maximum du gymnaste.

La vitesse angulaire du gymnaste (vitesse du balancer) sera maximale quand le balancer passe à la position verticale et la force centrifuge sera donc maximale à ce point.

A la fin du balancer, juste avant que sa direction s'inverse, la force centrifuge agissant sur le gymnaste est nulle. Cela représente le point stationnaire du balancer.

Dans la le pendule simple, une hypothèse était : "Toute la masse du pendule est localisée au centre du pendule". Ceci bien sûr n'est pas vrai pour un gymnaste en suspension ou en appui. La masse du gymnaste est distribuée dans tout le corps et la période de l'oscillation, à la barre fixe ou aux barres asymétriques, pour un petit angle de balancer est donnée par l'équation suivante :

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{(r^2 + h^2)}{g_h}}$$

r = rayon du mouvement de rotation autour du **CG**

h = distance du **CG** du gymnaste au point de suspension

g = accélération = 9.81 m/s²

π = 3.14159

On peut donc voir le réglage naturel du balancer dépend de la distance du centre de gravité du gymnaste à la barre et du moment d'inertie du corps autour du centre de gravité. C'est-à-dire le poids, la forme et l'attitude du corps. Pour de grands angles de balancer à la barre ou pour les balancer principaux aux anneaux aux barres parallèles ou au cheval d'arçons, les équations déterminant la période sont très complexes.

Toutes les formes de balancer sont maintenues par la création d'un moment de rotation du gymnaste, qui étend son corps dans la phase descendante et le réduit dans la phase ascendante. De plus, ils sont tous gouvernés par des lois naturelles comme c'est le cas pour le simple pendule.

Il est important que le gymnaste apprenne à découvrir le réglage naturel associé aux différents balancer en appui ou en suspension selon des attitudes différentes du corps. C'est à cette seule condition que l'effort produit pour maintenir ou accroître l'amplitude d'un balancer peut être fait au bon moment.

5/- Conservation de l'énergie lors des rotations à la barre :

Les principes de la conservation d'énergie sont de puissants outils pour étudier et analyser les mouvements circulaires à la barre fixe, aux barres asymétriques et aux anneaux. Considérons le soleil ou grand tour arrière à la barre fixe.

On considère le départ du mouvement à la position verticale d'équilibre au-dessus de la barre. Pour avoir un potentiel maximal, l'équilibre doit être à l'aplomb de la barre et ainsi le centre de gravité à une hauteur maximale au-dessus de la barre. De ce fait, une quantité maximale d'énergie potentielle est emmagasinée au départ du mouvement.

Pendant la phase descendante. Le centre de gravité est gardé aussi loin que possible de la barre de façon à optimiser l'effet du moment de rotation.

Lorsque le gymnaste passe à la verticale sous la barre son corps se réduit par le carpé (figure n°6). Ceci requiert un effort musculaire pour ramener le centre de gravité vers la barre contre les effets du poids du corps et de la force centrifuge.

Pour faciliter ceci, le gymnaste s'approche de la verticale avec les hanches jambes légèrement en avant. Pour revenir à sa position initiale à haut potentiel, à la fin du balancer (c'est-à-dire à l'appui tendu renversé), le gymnaste doit effectuer un travail durant le dernier quart du balancer en s'allongeant pour passer de la position carpé à celle d'un corps droit. Ceci éloigne le centre de gravité de la barre et est réalisé par la technique de la roulade arrière piquée à l'A.T.R. Le gymnaste produit donc deux énergies : il raccourcit son corps au bas du balancer pour amener le centre de gravité le plus près de la barre et il s'allonge à la fin pour arriver dans une position avec un potentiel élevé.

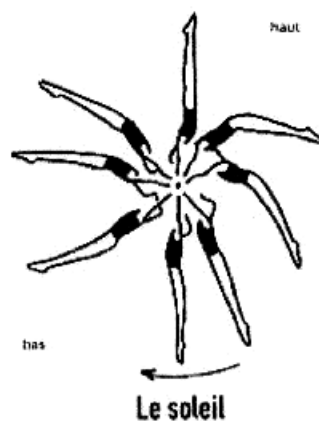


Fig. n° 6 : Grand tour arrière.

Pour accomplir une rotation complète, les énergies produites doivent égaler les pertes engendrées par les frottements (c'est-à-dire les frottements de glissement entre les mains et la barre et ceux dus à la résistance de l'air). Si l'énergie fournie dépasse les pertes. Alors la vitesse angulaire du gymnaste sera plus grande à la fin de la rotation qu'au début : préparation aux sorties, lorsque le gymnaste "mouline" les tours avant le lâcher.

Les balancer d'un angle de 120° produisent au bas du balancer, une force totale qui est approximativement le double du poids du corps.

Allongé, loin de la barre dans une position horizontale (c'est-à-dire que $0=180^\circ$), la force produite est approximativement équivalente à trois fois le poids du corps ; un balancer de 240° réalisé à partir d'une position de 30° au-dessus de la barre en étant allongé, produit une force de quatre fois le poids du corps.

Cette information peut être utilisée pour réaliser un programme d'entraînement progressif. Des forces supérieures à cinq fois du corps peuvent être aisément obtenues lors de travail à la barre fixe, particulièrement lorsque le gymnaste "mouline" ses tours avant une sortie. Et, des forces maximales de six à sept fois le poids du corps peuvent être développées.

6/- Equations de mouvements angulaires :

Les équations du mouvement angulaire peuvent être énoncées de la manière suivante :

$$\omega_f = \omega_i + \alpha t$$

$$\omega_f^2 = \omega_i^2 + 2 \alpha \theta$$

$$\alpha = \omega_i t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

$$V = \omega h$$

* (V) Vitesse; (ω) Vitesse angulaire; (ω_i) Vitesse angulaire initiale; (ω_f) Vitesse angulaire finale; (θ) Déplacement angulaire; (α) Accélération angulaire; (h) Distance du centre de gravité du gymnaste par rapport au point de rotation.

IV/- La dynamique en gymnastique sportive :

La mécanique de certains mouvements en gymnastique accuse une très grande complexité d'analyse, mais à travers les lois de la physique nous pouvons les simplifier, afin de les rendre plus facile à analyser. Ces lois sont basées sur les trois théories connues sous le nom de « lois des mouvements de Newton ».

✓ Première loi du mouvement de Newton :

Un corps au repos reste au repos ou s'il est animé d'un mouvement rectiligne uniforme continuera à se déplacer de façon identique, à moins qu'une force externe n'exerce une action sur lui.

✓ Deuxième loi de l'attraction universelle de Newton :

Le taux de variation de la quantité de mouvement est proportionnel à la force appliquée. Autrement dit, le taux de variation de la vitesse d'un corps est proportionnel à la force résultante qui agit sur lui et a lieu dans la direction où la force agit.

✓ Troisième loi d'action réaction de Newton :

Pour chaque force qui agisse sur un corps, il existe une seconde égale en intensité et de même direction mais de sens opposé qui agit sur ce corps. Autrement dit, à chaque action (**F**) il existe une réaction (**R**).

✓ La quantité de mouvement :

Tout corps en mouvement emmagasine de l'énergie, à savoir : l'énergie potentielle, l'énergie cinétique et l'énergie élastique.

○ L'énergie potentielle :

C'est l'énergie que possède un corps en vertu de sa position par rapport au sol ou par rapport à un point d'appui.

● $E_p = m g h$

m et g restent constantes dans un lieu donné par contre h peut être modifiée.

○ L'énergie cinétique :

C'est l'énergie que possède un corps en mouvement.

● *Mouvement linéaire* : $E_c = \frac{1}{2} m V^2$

● *Mouvement angulaire* : $E_c = \frac{1}{2} m \omega^2$

○ L'énergie élastique :

C'est l'énergie emmagasinée par un corps préalablement déformé qui a tendance à revenir à sa forme initiale. On parle également d'énergie élastique au niveau du système musculaire. Un muscle mis en tension emmagasine de l'énergie permettant un retour contractile plus important.

* (Ep) Energie potentielle; (Ec) Energie cinétique; (m) Masse; (V) Vitesse moyenne; (ω) Vitesse angulaire; (g) Constante de la force de gravité; (h) Hauteur de déplacement du centre de gravité du gymnaste.

✓ La force :

L'état d'un corps "au repos" ou en "mouvement" peut être changé par l'action d'un autre corps. Cette action qui peut être interne ou externe est appelé force. Selon la 2^{ème} loi de Newton elle est proportionnelle au taux de variation de la quantité de mouvement par rapport au temps. La force s'exprime en forme algébrique comme suit :

○ $F = m.a$

La force est un vecteur elle peut être décomposée en composante latérale F_x , horizontale F_y et verticale F_z .

Winter (1990), énonce les équations des trois composantes de force comme suivant :

- $F_x = \sum_{i=1}^N m_i \cdot a_{xi}$
- $F_y = \sum_{i=1}^N m_i \cdot a_{yi}$
- $F_z = \sum_{i=1}^N m_i \cdot (a_{zi} + g)$

Blanchi (2000), énonce la force d'impulsion par les équations suivantes :

- $F_t = m \cdot (V_{zf} - V_{zi})$
- $F_t = m \cdot 2V_h$
- $F_z = m \cdot 2V_h/t$

De même, Smith (1994) dans ces travaux sur la gymnastique sportive, plus particulièrement sur les impulsions, il a présenté des équations pour le calcul de la composante horizontale et verticale de la force lors de l'impulsion. Ces équations sont énoncées comme suivant :

- $F_x = m \cdot \left(\frac{V_{xf} - V_{xi}}{t_i} \right)$
- $F_y = m \cdot \left(\frac{V_{yf} - V_{yi}}{t_p} \right) \cdot g$

* (Fx) Composante horizontale de la force ; (Fy) Composante verticale de la force ; (Vxi) Vitesse horizontale initiale ; (Vxf) Vitesse horizontale finale ; (Vyi) Vitesse verticale initiale ; (Vyf) Vitesse verticale finale ; (ti) Temps d'impulsion « il est égale au temps d'appui plus le temps de poussé "ti= ta+ tp" » ; (ta) Temps d'appui de la gymnaste ; (tp) Temps de poussé de la gymnaste ; (m) Masse de la gymnaste.

✓ Le moment de force :

Considérons qu'un gymnaste effectue un balancement à la barre fixe, il crée un moment de rotation par le passage de la position horizontale à la suspension verticale. Cet effet de rotation est appelé aussi moment de force, il traduit la grandeur de la force provoquée lors de la rotation autour de la barre. Il peut être positif (action dans le sens de la pesanteur) ou négatif (lutte contre la pesanteur). Le moment de force s'exprime en forme algébrique comme suit :

- $M^t = F \times d \text{ (Nm)}$

Le moment de force dépend de deux facteurs :

- * La force appliquée (F) : dans ces conditions c'est la force de pesanteur (g) qui est appliquée au niveau du centre de gravité (G).
- * Le bras de levier (d) : c'est à dire la longueur du segment formant un angle perpendiculaire à la fois à la barre et à la droite d'action de la force qui passe par le centre de gravité (G) du gymnaste.

✓ Le moment d'inertie :

L'inertie c'est la propriété d'un corps a persisté dans son état (1^{ère} loi de Newton). C'est à dire qu'elle se manifeste chaque fois qu'il s'agit de mettre un corps en mouvement, d'accuser à ce corps un changement de direction ou encore de l'arrêter.

○ Mouvement linéaire :

Dans le cas d'un mouvement linéaire cette inertie dépend uniquement de la masse, ainsi plus le corps sera lourd et plus l'inertie sera grande.

● $M_I = m \times v$

○ Mouvement angulaire :

Dans le cas d'un mouvement angulaire, la résistance opposée au mouvement que l'on appelle moment d'inertie (I) dépendra non seulement de la masse, mais aussi de la répartition de cette masse autour de l'axe de rotation.

● $I = m r^2$ (kgm²)

- * (I) Moment d'inertie angulaire; (M_I) Moment d'inertie linéaire; (m) Masse; (r) Rayon de giration; (V) Vitesse.

✓ Le moment cinétique :

Le moment cinétique ou angulaire désigne la quantité de mouvement de rotation que possède un corps. Conformément à la 1^{ère} loi de Newton, s'appliquant au mouvement angulaire : « Un corps en rotation continuera de tourner sur son axe de rotation avec un moment cinétique constant (k) à moins qu'un couple externe ou une force excentrique ne lui soit appliquée (loi de la conservation de la quantité de mouvement) ». Certes, c'est le cas de toutes les rotations créées en l'air ou au sol ; Lorsque le gymnaste quitte l'appui, la trajectoire est alors déterminée. L'équation s'exprime en forme algébrique comme suit :

● $L = I \omega = k$ si $M_G (F_{ext}) = 0$

- * $M_G (F_{ext})$ est le moment en « G » des forces externes qui s'exercent sur le corps.
- * (L) Moment cinétique; (I) Moment d'inertie; (ω) Vitesse angulaire; (k) Constante; (F_{ext}) Forces externes.

✓ Les mouvements de rotations :

○ Axes et plans :

Il existe trois plans et trois axes de rotations, le plan frontal où s'effectue les rotations latérales sur l'axe antéro-postérieur exp. La roue et le salto costal, le plan horizontal où s'effectue les rotations et les renversements en avant et en arrière sur l'axe transversal exp. Le salto avant le flic-fac, en fin le plan sagittal où s'effectue les rotations longitudinales sur l'axe vertical tel que les vrilles et les pirouettes.

✓ Création des rotations :

○ Par un couple de force :

Cette rotation est créée grâce à un ensemble de deux forces parallèles et opposées de même intensités et de part et d'autre de l'axe de rotation exp. Salto costal, tour d'appui arrière, lancer de massue...

○ Par une poussée excentrée :

La direction de la poussée du gymnaste, au moment où son corps quitte le sol ou l'engin ne passe pas par son CG mais passe en avant ou en arrière produit une rotation avant si la réaction passe en arrière du CG et une rotation arrière si la réaction passe en avant du CG du gymnaste exp. Salto arrière sur place.

○ Par blocage d'un mouvement rectiligne :

Le blocage du corps ou d'une partie du corps en déplacement entraîne une rotation exp. Course et frappe sur un tremplin.

○ Par transfert d'énergie :

Le mouvement partiel d'une partie du corps peut se communiquer à l'ensemble du corps pour effectuer une rotation, mais il faut que le mouvement partiel soit terminé avant que les pieds quittent le sol exp. Flic-flac.

TECHNIQUES DE L'ACROBATIE EN GYMNASTIQUE

La particularité technique des exercices acrobatiques se subdivise en quatre phases : prise d'élan, impulsion, l'envol et la chute.

1/- La Prise D'élan :

La prise d'élan doit être particulièrement énergétique, par fois elle doit fusionner avec un autre élément acrobatique à l'exemple du salto arrière qui vient après une rondade flic flac. Une prise d'élan limitée, nécessite de la part du gymnaste l'exécution d'un ensemble d'actions particulièrement techniques dans les phases successives de l'exercice. Le mouvement de translation du corps qui s'obtient au cours de la prise d'élan et qui est réalisé grâce aux appuis successifs des bras et des pieds se transforme en mouvement rotatoire du buste en appui. De cette façon, il peut acquérir avec la prise d'élan une juste vitesse indispensable à créer les meilleures conditions d'exécution du mouvement ; soit la transformation du mouvement de translation du corps à un mouvement de rotation.

2/- L'impulsion :

La durée, la hauteur et la longueur du vol dépendent largement des actions du gymnaste et plus exactement de la qualité du salto dans son ensemble. Une grande partie des exercices acrobatiques s'exécute à travers la poussé des jambes. Notons qu'à chaque type de salto correspond une poussé. Elle peut être de choc avec un temps bref où légère plus prolongé dans le temps.

- La poussé de choc permet de développer une force nettement plus grande dans un intervalle de temps réduit. Exemple : l'impulsion lors d'un double salto arrière se réalise en 0.09 à 0.011 secs, la force d'impulsion peut atteindre 700 à 750 kg. Dans l'impulsion de choc la poussé débute d'une position inclinée avant la verticale jusqu'à la verticale proprement dit. Cette poussé s'appelle poussé d'arrêt.
- La poussé légère conviennent dans l'exécution du salto arrière sur place. Elle est accompagnée par des mouvements oscillatoires des bras. La poussé légère débute du vertical jusqu'à une position d'inclinaison poste verticale.

3/- L'envol :

La trajectoire du vol peut avoir une attitude parabolique curviligne ou relativement droite, haute et plus courte. Ainsi qu'à chaque type de salto correspond un angle, une vitesse et une position bien déterminée qui conditionne son exécution. Après la poussée le gymnaste tourne autour de l'axe transversal du corps qui doit passer à travers le barycentre.

4/- La Chute :

L'arriver au sol est lié au maintien du mouvement rotatoire du corps au moment de l'appui sur les jambes. Ce qui est déterminé par l'action du gymnaste dans la phase précédente. Pour alléger le choc de la chute le gymnaste, doit atterrir sur les pointes des pieds avec un graduel passage sur la totalité de la plante des pieds accompagné d'une flexion au niveau des genoux et de l'abaissement du buste. Pour obtenir une chute stabilisée, les pieds doivent être distancié de 10 à 15 cm. Gavredovskij et coll. 1984.

5/- Exemple d'analyse du salto arrière :

Lors du salto arrière sur place, l'énergie de rotation est créée à la fois par la projection des bras et du buste en ouverture (transfert du moment cinétique) et par la poussée excentrique de l'impulsion jambes. Cette ouverture a tendance à excentrer le barycentre (G) provoquant une quantité de mouvement de rotation supplémentaire lors de l'impulsion des jambes.

Pour le salto réalisé après une rondade flic-flac, la pose des pieds au sol provoque une rotation arrière (principe du blocage d'un mouvement rectiligne). L'impulsion des jambes peut être décomposée en une composante horizontale (F_y) qui facilite le déplacement et une composante verticale (F_z) excentrée par rapport au barycentre (G) qui permet l'élévation verticale et la rotation. L'envoi des bras dynamiques permet de créer un moment cinétique relatif au niveau des membres supérieurs qui est transféré à l'ensemble du corps au moment du blocage de la ceinture scapulaire. L'impulsion jambes, l'envoi des bras et des épaules créent un couple de rotation. Juste après l'impulsion, le gymnaste possède une quantité de mouvement qu'il ne peut plus varier. Son moment cinétique (L) reste constant en phase aérienne par contre son moment d'inertie (I) ainsi que sa vitesse angulaire (ω) changent de la position n°1 à la position n° 3 (*figure 7*). Le moment d'inertie diminue et la vitesse angulaire augmente suite à un groupé dynamique du corps. Pendant la phase entre la position n° 3 et n° 4 (I) et (ω) restent constant puisqu'il n'y a pas de mobilisation segmentaire. Enfin, de la phase n° 4 à la phase n° 6, le dégroupé du corps entraîne le processus inverse. C'est à dire une augmentation du moment cinétique (L) et la diminution de la vitesse angulaire (ω) induisant un ralentissement de la rotation et permettant le contrôle de la réception (Pernet, 1994)

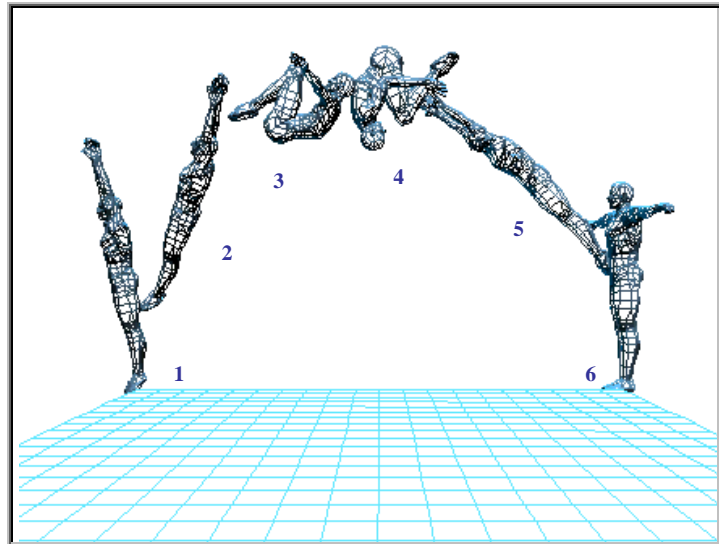


Fig. n° 7 : Schéma du salto arrière groupé

La trajectoire du centre de gravité est définie par la résultante des forces qui s'appliquent sur le corps au moment où celui-ci quitte le sol (l'impulsion jambe, la vitesse de déplacement vers l'arrière et le lancer des bras). La trajectoire ainsi que le moment cinétique total du corps sont déterminés par l'angle de décollage. Smith (1991) a étudié la variation de la trajectoire du centre de gravité (CG) par rapport à l'angle de décollage (α). Il mentionne que pour une même vitesse de décollage, plus on augmente l'angle d'impulsion (α) plus le salto sera élevé et plus il mettra du temps pour s'accomplir (tableau 3).

Angle d'impulsion (α)	Hauteur du salto	Longueur du salto	Temps d'envol
15°	0,13	1,67	0,29
30°	0,41	3,00	0,56
45°	0,78	3,33	0,79
60°	1,25	3,00	1,00
75°	1,47	1,67	1,10
90°	1,59	0,00	1,13

Tab n° 1 : Durée et déplacement du (C.G) pour différents angles d'impulsion. (Smith 1991)

Un angle (α) optimum existera pour une vitesse d'impulsion donnée et en fonction du mouvement exécuté. L'angle (α) propice sera un compromis entre ces deux facteurs. Généralement, l'angle d'attaque du salto arrière est à l'entour de 70° selon les travaux de Hay (1980) et 75° selon Smith (1991).

Bibliographies :

1. ALLARD P., BLANCHI J.P. 1996 : *Analyse du mouvement humain par la biomécanique*. Décarie Editeur, Montréal.
2. BARDY B.G. 1996 : *Approche des systèmes d'action en gymnastique*. Dossiers EPS N° 25, Revue EPS, Paris.
3. BLANCHI J.P. 2000 : *Biomécanique du mouvement et A.P.S*. Vigot, Paris.
4. BROUSSE M.N., LE CHEVALIER J.M., DURING B., PRADET M. 1989 : *Energie et conduites motrices*. INSEP, Paris.
5. COLOMBO C., LE CHEVALIER J.M. 1996 : *Le projet de recherche en gymnastique*. INSEP de Paris, dupuis@numeris96.isdnet.net.
6. COLOMBO C., NOGAKI G. 1989 : *Evaluation des aptitudes spécifiques a la pratique de la gymnastique*. C.R.E.P.S de Nancy.
7. DAL MONTE A. 1983 : *La valutazione funzionale dell'atleta*. Sansoni, Roma.
8. DUBOY J., JUNQUA A., LACOUTURE P. 1994 : *Mécanique humaine* Revu EPS, Paris.
9. Fédération Française de Gymnastique. 1989 : *Mémento de l'entraîneur*. F. F. G, Paris.
10. FEKI Y., MKAOUER B. 1995 : *Entraînement à la force vitesse chez les jeunes gymnastes*. Symposium médico-technique de gymnastique. U.A.G - F.T.G, Monastir.
11. FOX E.L., MATHEWS D.K. 1984 : *Base physiologique de l'activité physique*. Decarie & Vigot, Paris.
12. GAVERDOVSKIJ J.K., GRIGORIEV A., ZGALADA E., KOZLOV E., MALSOV B., MENCHIN A., ROZIN I., MENOV L., SILIN V., SMOLEVSKIJ V.M., CEBURAEV V., CERESNEVA L. 1984 : *Organizzazione, programmazione, tecnica dell'allenamento nella ginnastica artistica*. Societa Stampa Sportiva, Roma.
13. HAY J. 1980 : *Biomécanique des techniques sportives*. Vigot, Paris.
14. HOLVOËT P., LACOUTURE P., DUBOY J. 1998 : *Apport de l'analyse mécanique à l'étude des techniques gymniques : l'exemple de l'influence de 3 techniques d'appel sur la réalisation du salto avant au sol*. Revue EPS, Paris.
15. JEDDI R. 1999 : *L'utilisateur d'un système d'analyse 3D confronté aux problèmes d'une étude mécanique des gestes sportifs*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers.
16. JEMNI, M. 2011 : *The Science of Gymnastics*. Eds., Routledge, Francis and Taylor
17. JEMNI M., FRIEMEL F., LE CHEVALIER J.M., ORIGAS M. 1998 : *Bioénergétique des gymnastes de haut niveau en laboratoire et en compétition*. Revue science et motricité N° 35-36, Paris.

18. LEONARDI V.E. 1990 : *Introduzione alla teoria dell'allenamento. Fratelli Conte Editori. Roma.*
19. MKAOUER B., HAMBLI M., FEKI Y. 2001 : *Contribution de la force vitesse à l'optimisation de l'exercice en gymnastique sportive. Mémoire de fin d'étude approfondi en S.T.A.P.S, I.S.S.E.P Ksar Saïd.*
20. PAOUKOVA M.B. 1980 : *Etude de l'efficacité de la préparation motrice spécifique des jeunes gymnastes. Ed. Fiz : sport, Moscow.*
21. SCHMIDT D. 1989 : *Gymnastique aux agrès. Université Leipzig - Faculté De La Science Du Sport, Leipzig.*
22. SMITH T. 1991 : *Biomécanique et gymnastique. Presses Universitaire de France, Paris.*
23. SPRING H., KUNZ H.R., SCHNEIDER W., TRITSCHLER T., UNOLD E. 1991 : *R.GYM La force théorie et pratique. Masson, Paris.*
24. WEINEK J. 1990 : *Manuel de l'entraînement. Vigot, Paris.*
25. WEINEK J. 1992 : *Biologie du sport. Vigot, Paris.*
26. www.ifrance.com/educatifs-gymniques/nav3/biomeca/chap2.html. Mécanique générale des figures acrobatiques.
27. www.ifrance.com/staps-psud/nouvellepage2.htm. La Biomécanique.