

ANALYSE BIOMÉCANIQUE DES ROTATIONS

Comment créer et contrôler les rotations segmentaires ou corporelles ?

Résumé :

Bien que les façons de créer des rotations soient multiples, elles reposent toutes sur les mêmes principes mécaniques et les mêmes lois physiques (loi de Newton). Leur connaissance peut nous aider à comprendre comment sont initiées ces rotations, comment elles peuvent être arrêtées et surtout comment elles peuvent être modifiées en fonction des circonstances dans lesquelles se déroulent les mouvements gymniques.

Introduction

Une grande partie de nos mouvements (pour ne pas dire tous !) sont le résultat de rotations inter-segmentaires. En se raccourcissant pendant une contraction, nos muscles tirent sur les pièces osseuses qui sont, à leur tour, mises en mouvement autour d'une articulation.

Il est possible de créer des mouvements du corps par rapport à différents axes de rotation : par exemple, l'axe transversal pour le salto avant, l'axe antéro-postérieur pour la roue, l'axe longitudinal pour la pirouette, et même deux axes simultanément pour la vrille.

L'objectif de cet article est d'expliquer comment ces rotations sont créées et comment on peut les contrôler. Pour cela, il faut faire appel à des notions de biomécanique. En plus d'expliquer les causes d'un mouvement, elles permettent de détecter où se situe l'origine du problème dans un mouvement donné, quelle solution lui apporter et surtout quelle situation mettre en place pour y remédier et faire progresser le(la) gymnaste. La plupart de ces notions nous sont familières car, sans le savoir, nous les utilisons dans la vie courante. Leur compréhension ne devrait a priori pas poser de problème. La principale difficulté réside à mettre un nom sur un phénomène que l'on connaît de façon intuitive. Une fois ces notions assimilées, nous pourrions aborder les problèmes plus complexes que nous rencontrons en gymnastique.

Moment de force

□ Cas général

Pour différencier les forces impliquées dans les mouvements linéaires de celles impliquées dans les mouvements circulaires, les physiiciens donnent le nom de « *moment de force* » (ou « *moment* » tout court) à l'effet de rotation liée à l'application d'une force sur un corps. Cette notion fait intervenir deux facteurs : la *force* responsable du mouvement et la *distance* à laquelle cette force est appliquée par rapport à l'axe autour duquel se fait la rotation.

Pour comprendre ce concept, imaginons que l'on veuille pousser (force externe) sur un livre posé sur une table (Figure 1). Trois cas peuvent être envisagés.

1°) Si la direction de la poussée passe par le centre de gravité (CG) du livre, il en résultera un mouvement en ligne droite. On dit aussi que la somme des forces (ou force nette) s'exerçant sur le livre provoque une translation de son CG (Figure 1A).

2°) Si cette direction passe par l'un des coins du livre, le livre aura à la fois un mouvement en ligne droite et tournera autour de l'axe (perpendiculaire à la table) passant par son CG. La force nette entraînera un mouvement de translation et de rotation (Figure 1B).

3°) Enfin, l'on exerce une pression avec deux doigts sur deux coins opposés, le livre fera une rotation (pure) autour de l'axe passant par son CG (Figure 1C).

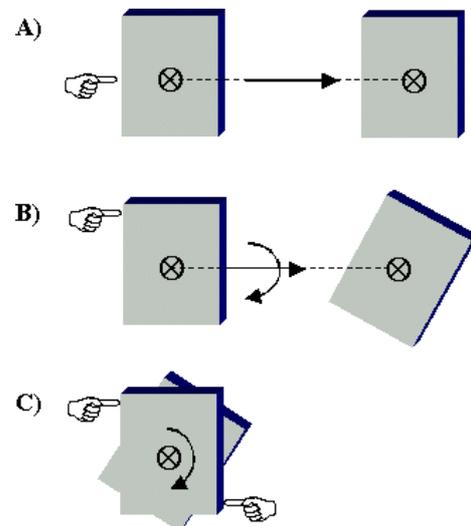


Figure 1 : Effet de la poussée exercée par la main en fonction de sa direction par rapport au CG. En A, application d'une force centrée ; en B, application d'une force excentrée ; en C, application d'un couple de force.

Pour savoir quelle quantité de rotation a été créée par l'application de cette force sur le livre, il suffit de multiplier l'intensité de la force (F) par son bras de levier (d), c'est-à-dire la distance perpendiculaire entre la droite d'application de la force et le CG du livre (Figure 2). On dispose alors de deux façons pour réguler la rotation ainsi créée : varier l'intensité de la force (F) mesurée en newton (N) et/ou le bras de levier (r) mesurée en mètre (m). Le moment s'exprime par conséquent en Newton-mètre (Nm).

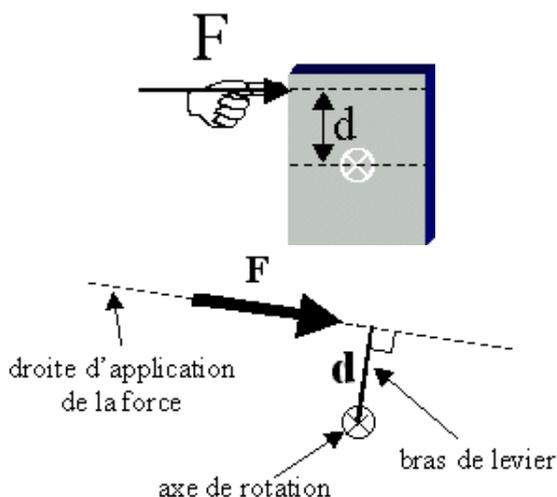


Figure 2 : Composante d'un moment de force. On peut contrôler l'effet de rotation créé par l'application d'une force excentrée en variant 1°) son intensité et/ou 2°) son bras de levier.

Une rotation peut être liée à plusieurs conditions initiales. Prenons un exemple. On veut ouvrir une porte en tirant sur la poignée (Figure 3A). Si celle-ci se trouve à 1 m de l'axe de rotation passant par les gonds et que la force de traction sur la poignée est de 10 N (Figure 3B), le moment (de force) résultant sera de $10 \text{ N} \times 1 \text{ m} = 10 \text{ Nm}$. Maintenant, supposons que la poignée se situe à une distance de 0.2 m des gonds (Figure 3C). La force de traction devra être de 50 N pour obtenir le même effet de rotation ($10 \text{ Nm} / 0.2 \text{ m} = 50 \text{ N}$). L'effet de rotation liée à la traction sur la poignée (10 Nm dans le sens inverse des aiguilles d'une montre) sera le même (la porte s'ouvrira), mais l'effort à fournir sera 5 fois supérieur ($50\text{N}/10\text{N} = 5$) dans le second cas que le premier. D'où l'intérêt de placer la poignée le plus loin possible de l'axe de rotation de la porte pour tirer partie de l'avantage mécanique (moins de force pour un même mouvement) de cette situation.

Pourtant, nos muscles ne respectent pas toujours cette règle. Ils ont souvent une insertion proche de l'axe de rotation représenté par l'articulation. Prenons, par exemple, la flexion du coude (Figure 4). Le muscle biceps brachii (biceps brachial) est un muscle bi-articulaire qui passe à la fois au-dessus de l'articulation de l'épaule et du coude. Son point d'insertion distal (point le plus éloigné de la racine du membre) se trouve sur le radius, à environ 3 cm du coude. Il aurait été plus intéressant de l'insérer plus loin pour permettre d'exercer moins de force lors de la flexion du bras sur l'avant-bras. Tel n'est pas le cas. Pourquoi ? Simplement pour favoriser un autre aspect du mouvement : la vitesse de déplacement d'un point autour d'une articulation. Ainsi, lorsque le bras est maintenu fixe, un faible raccourcissement du biceps entraînera une grande

vitesse de déplacement du poignet. C'est donc un avantage cinématique que d'avoir une insertion proche de l'axe de rotation.

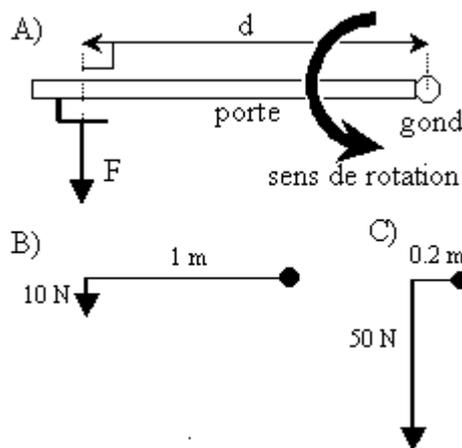


Figure 3 : Moment de rotation en fonction de l'intensité (F) de la force et du bras de levier (d). En B, il sera plus facile de tirer sur la poignée de la porte qu'en C car le bras de levier est plus important en B (1 m) qu'en C (0.2) ; par conséquent, pour obtenir le même effet de rotation (10 Nm), il faudra exercer une traction de $10\text{Nm} / 1\text{m} = 10 \text{ N}$ en B et de $10\text{N} / 0.2\text{m} = 50 \text{ N}$ en C, soit une force 5 fois supérieure. D'où l'intérêt de placer la poignée de la porte le plus loin possible de son axe de rotation.

Lorsque c'est l'avant-bras qui est maintenu fixe, c'est le muscle brachioradialis (long supinateur) qui est le plus favorablement placé pour remplir ce rôle cinématique puisque son point d'insertion est placé environ à la même distance mais sur l'humérus. C'est pour cette raison que c'est le muscle principalement sollicité dans les flexions en suspension à une barre et non le biceps ! Ceci est important car on démontre ainsi l'importance de bien connaître à la fois l'anatomie mais aussi les muscles principalement sollicités dans une action donnée, en vue de programmer un renforcement musculaire spécifique.

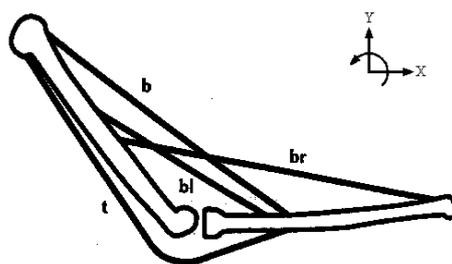


Figure 4 : Muscles de l'articulation du coude. B : biceps brachii, BL : brachialis, BR : brachioradialis, T : triceps.

□ Cas de la force de gravité

Dans les activités gymniques, on peut utiliser les principes du moment de force pour initier un mouvement ou se maintenir en équilibre. Par exemple, lorsque l'on est en équilibre sur un pied ou en ATR, le maintien de cette posture n'est possible que si la projection du CG du corps sur le sol (ligne de gravité) passe dans le polygone de sustentation, c'est-à-dire la surface délimitée par les points d'appui au sol (Figure 5). Si la ligne de gravité sort de ce

polygone, nous tombons car nous donnons à la gravité l'occasion d'exercer une force de rotation autour l'articulation de la cheville (ou du poignet pendant un ATR). Par conséquent, maintenir un équilibre c'est tout simplement faire en sorte que le bras de levier de la gravité soit le plus petit possible.

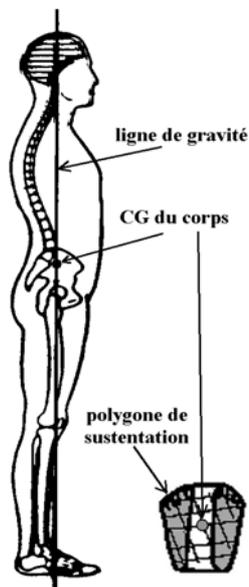


Figure 5 : Le CG est le point autour duquel toutes les forces qui s'exercent sur le corps s'annulent. Sa position peut varier en fonction de celles des segments qui composent notre corps. La ligne de gravité correspond à la projection du CG sur le sol. L'équilibre est maintenu tant que cette projection passe par le polygone de sustentation représenté par la zone hachurée (D'après Bouisset et Maton, 1995, p. 478).

On utilise également ces principes mécaniques pour expliquer la création d'une rotation avant ou arrière lors d'une impulsion au sol (Figure 6). La poussée excentrée est tout simplement l'application d'une force dont la droite d'application ne passe pas par le CG du corps. Cela signifie qu'il y a donc un bras de levier qui lui permet de mettre en rotation notre corps.

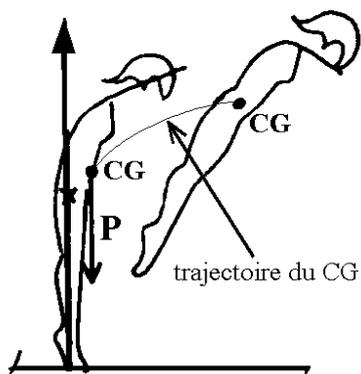


Figure 6 : Création d'une rotation par une poussée excentrée. Le sens de la rotation dépend de la direction de la force de poussée par rapport au CG. Ici, la direction de la force de poussée passe en arrière du CG, ce qui permet de créer une rotation vers l'avant (D'après Piard, 1987, p. 20).

Moment d'inertie

Maintenant, utilisons la notion de moment de force pour expliquer un autre phénomène : la difficulté que l'on a à mettre en rotation un objet autour d'un axe. Notre expérience quotidienne nous apprend que la difficulté à déplacer un objet (inertie) est inversement proportionnelle à sa masse : plus l'objet est lourd, plus il est difficile de le mettre en mouvement ou de l'arrêter.

Pour la rotation, c'est la même chose, sauf que l'on ajoute un paramètre important : la distance de la masse (ou de son CG) par rapport à l'axe de rotation (à nouveau un bras de levier). Plus la masse de l'objet est proche de l'axe de rotation, plus il sera facile de le faire tourner ou d'arrêter sa rotation. L'inverse est aussi vrai. Ce phénomène est résumé par la notion de « moment d'inertie ». Le terme « moment » est utilisé ici pour rappeler que l'on s'intéresse aux rotations. Ici encore, le moment d'inertie correspond au produit de la masse de l'objet par la distance de celle par rapport à l'axe de rotation élevée au carré ($m \times r^2$). Ainsi, le rayon s'avère avoir un effet beaucoup plus important que la masse elle-même.

Ceci est illustré par la Figure 7 qui représente une situation où l'on veut faire tourner un poids placé au bout d'une corde (Figure 7A) comme on le ferait pour une boule de bilboquet. Multiplier la masse par 2, multiplie l'inertie de rotation par 2 (Figure 7B). Par contre, multiplier par 2 la longueur du fil, multiplie par 4 cette même inertie de rotation (Figure 7C).

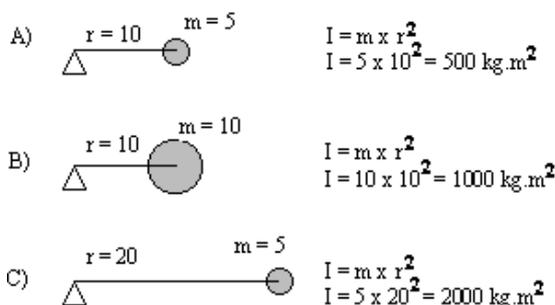


Figure 7 : Moment d'inertie. La résistance à la mise en rotation d'un corps est fonction à la fois de la masse de ce corps et de la distance entre le CG de cette masse et l'axe de rotation (A). Mais les effets de ces deux paramètres ne sont pas les mêmes. Ainsi, en multipliant par 2 la masse du corps (B) on multiplie par deux l'inertie de rotation. Par contre, en multipliant par 2 le rayon de rotation, l'inertie de rotation est multipliée par 4.

La Figure 8 correspond à l'application de ce même principe. Un système composé de plusieurs segments ayant leurs propres masses et dont chacun des CG est situé à des distances différentes de l'axe de rotation. On utilise, dans ce cas, le concept de rayon de giration pour caractériser la distribution des masses du corps par rapport à l'axe de rotation et simplifier ainsi le calcul du moment d'inertie. Ce rayon correspond à la distance à laquelle se trouveraient les masses segmentaires si elles étaient concentrées en un seul point (CG global). Le fait de changer la position des masses (intervertir les masses de 10 et 30 kg) suffit à changer le rayon de giration. Il en résulte que le moment d'inertie est plus important en A

qu'en B (la masse totale est la même dans les deux cas mais le rayon de giration est plus petit en B qu'en A).

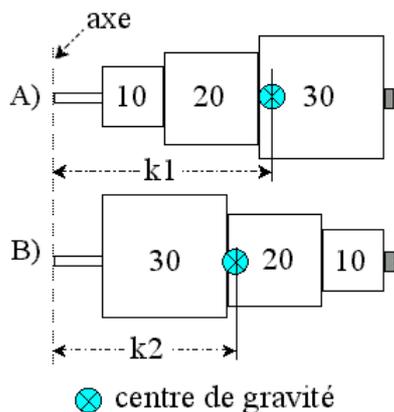


Figure 8 : Moment d'inertie d'un système multiségmentaire. A) Le moment d'inertie d'un tel système est fonction de la masse de chacun de ses éléments (carrés) et de la distance entre leur CG et l'axe de rotation. B) Le simple fait d'inverser la position des poids de 10 et 30 kg suffit à changer le rayon de giration et à diminuer le moment d'inertie.

Pour le corps humain, les choses sont peu différentes. On peut déplacer les masses segmentaires par rapport à un axe de rotation grâce à l'action de nos muscles. Ainsi, pour les rotations transversales (saut avant ou arrière), plus on rapproche les masses segmentaires de l'axe de rotation (passer d'une position corps tendu à une position corps groupé), plus on diminue le rayon de giration. Il en résulte une diminution du moment d'inertie global du corps et il devient alors facile de le faire tourner autour de l'axe transversal.

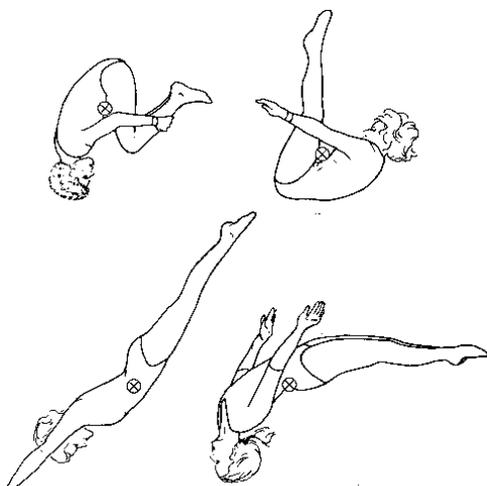


Figure 9 : Modification du moment d'inertie par la modulation du rayon de giration : la position du CG dans l'espace ne change pas dans les 4 postures. Par contre, la répartition des masses segmentaires varie en fonction des actions musculaires. Plus les masses sont proches du CG et plus le rayon de giration diminue (D'après Kreighbaum et Barthels, 1990, p. 48).

Par conséquent, la répartition de nos masses segmentaires autour de l'axe de rotation joue un rôle très important dans le contrôle des rotations puisqu'elle va permettre de moduler le moment d'inertie du corps, et par-là même faciliter ou réduire la rotation. C'est ce qu'illustre la Figure

9 à partir des différentes postures que l'on peut adopter en gymnastique lors d'une rotation autour de l'axe transversal. Si l'on prend comme référence la position groupée, alors la position carquée multiplie par 2.1 le moment d'inertie, la position cambrée par 3.5 et la position tendue par 4.7. Il est donc 4.7 fois plus difficile de faire tourner le corps tendu que groupé.

Moment cinétique

□ Création de moment cinétique

La création d'une rotation est toujours liée à l'application d'une force sur le corps quel que soit l'agrès utilisé ou la figure que l'on souhaite réaliser. Cette force est toujours une force externe (force de gravité, force de réaction) car les forces musculaires ne peuvent à elle seules déplacer le CG ou accélérer le corps, et donc créer un mouvement (Figure 10 et Figure 11). Cela est lié à la troisième loi de Newton (action-réaction) : les forces de traction exercées par le muscle à chacune de ses extrémités s'annulent l'une l'autre puisque le muscle tire de la même façon sur chacune d'elles.

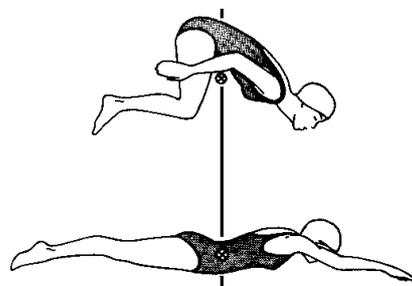


Figure 10 : Forces internes. L'action de nos muscles (forces internes) résulte en un déplacement de nos segments corporels les uns par rapport aux autres. Mais, sans point d'appui, ils ne peuvent produire un mouvement du CG car leurs actions s'annulent entre elles (D'après Kreighbaum et Barthels, 1990, p. 121).

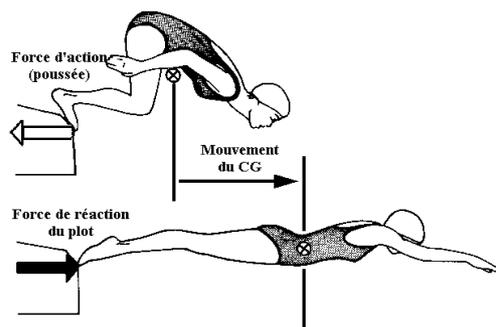


Figure 11 : Forces externes. Lorsque nos muscles permettent d'exercer une pression sur un support, alors elles ne s'annulent plus entre elles. Elles entraînent une réaction de ce support qui constituent ce que l'on appelle une force externe. Cette force peut induire un changement de position du CG et/ou un changement d'état dans lequel se trouve le système au moment de l'application de la force. Le changement de forme du corps permet à la sportive de générer une force de réaction externe sur le plot (D'après Kreighbaum et Barthels, 1990, p. 123).

Lors d'une impulsion par exemple, c'est la force de réaction du sol (qui est de même intensité que celles de nos muscles qui exercent une poussée, mais de direction opposée) qui permet non seulement l'élévation de notre CG mais aussi la rotation du corps autour de l'axe considéré si elle est excentrée. C'est son intensité et son excentricité qui vont fournir l'effet nécessaire pour faire tourner le corps et générer une certaine quantité de rotation. Cette dernière est appelée *moment cinétique ou quantité de mouvement angulaire*. La quantité de mouvement de rotation que l'on peut créer est fonction de la masse totale du corps, de sa vitesse de rotation (ou vitesse angulaire) et de la distribution de la masse par rapport à l'axe de rotation (rayon de giration).

□ **Conservation du moment cinétique**

En l'air, une fois l'impulsion terminée (c'est-à-dire une fois que la force à l'origine de la rotation n'agit plus sur notre corps), la quantité de mouvement angulaire créée par l'athlète au moment du décollage reste inchangée pendant toute la durée du vol. Cette conservation de moment cinétique pendant les phases aériennes impliquent deux choses qui sont très importantes d'un point de vue technique :

1°) Le moment cinétique ne peut être changé que si une nouvelle force externe est appliquée sur le corps ; en d'autres termes, seules les phases où l'on est en contact avec le sol ou un agrès nous permettent d'entretenir ou de changer le moment cinétique du corps. Cette notion est fondamentale puisque ces phases sont généralement très brèves (d'où la difficulté de les maîtriser et la durée de leur apprentissage). Et pourtant, tout se joue à cet instant !

2°) Même si le moment cinétique reste inchangé pendant les phases aériennes, on peut néanmoins agir sur l'un de ces paramètres : le rayon de giration. Rappelons que l'action de nos muscles (forces internes) permet de modifier la distribution des masses segmentaires autour de l'axe de rotation (cf. Figure 8 et Figure 9). Toute modification du rayon de giration a un effet sur le moment d'inertie (la résistance à la mise en rotation). Et toute variation du moment d'inertie entraîne une variation de la vitesse de rotation dans le sens opposée pour que le moment cinétique reste constant. C'est pour cette raison que de grouper le corps (diminution du rayon de giration, donc du moment d'inertie) provoque une augmentation de la vitesse angulaire autour de l'axe de rotation.

□ **Transfert de moment cinétique**

Nous venons de voir, qu'une fois en l'air, il est impossible de modifier le moment cinétique que l'on a créé. Il est néanmoins possible d'agir sur les paramètres qui le composent et surtout de transférer tout ou partie du moment cinétique d'une partie du corps à une autre. Il est même possible d'en transférer une partie d'un axe de rotation à un autre.

Transfert d'une partie du corps à une autre

Lors de l'impulsion du salto arrière, on projette rapidement les bras vers le haut et l'arrière. Cette projection permet de créer une certaine quantité de mouvement de rotation au niveau des bras. Lorsqu'ils vont se bloquer de façon par le jeu des butées articulaires et/ou de façon active par le biais

des contractions des muscles de l'épaule, ce moment cinétique segmentaire va être transmis au reste du corps et faciliter l'élévation du CG et il va participer à la création de la rotation initiée avec la poussée excentrée au niveau du sol.

Lors des fouets aux agrès, on applique exactement le même principe de transfert de moment cinétique grâce la projection rapide des membres inférieurs (création d'un moment cinétique de la partie inférieure du corps). Dès que ces membres sont bloqués à partir d'une certaine position lors de leur passage sous l'agrès, il y a transfert d'une certaine quantité de mouvement de rotation au reste du corps facilitant le retour du CG au-dessus de l'agrès (comme dans le soleil aux barres asymétriques).

Un autre transfert peut se faire dans le sens opposé. Par exemple, demandez à un(e) gymnaste de faire un saut vertical sur un trampoline puis demandez-lui de mettre ces membres inférieurs en position horizontale pendant la phase ascensionnelle grâce à la contraction des muscles psoas-iliaques (Figure 12).

Que va-t-il se passer ?

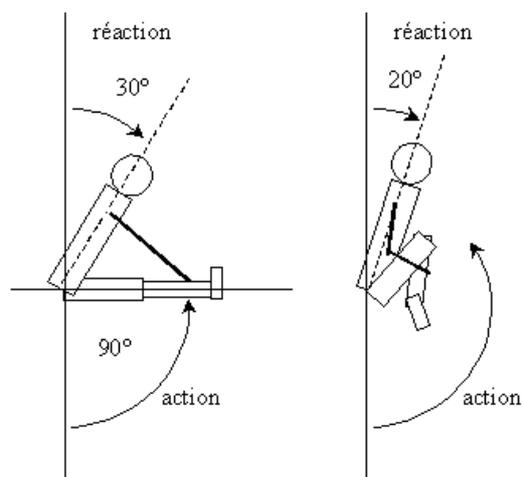


Figure 12 : Transfert de moment cinétique intersegmentaire. Tout mouvement d'une partie du corps est contre-balançé par une autre dans le sens opposé lorsque l'on est en phase aérienne. Ceci est lié au fait que le moment cinétique reste constant durant ces phases.

Sachant que toute action musculaire réalisée dans les airs aura une réaction égale et de sens opposé, on observera le phénomène suivant : sous l'action des muscles responsables de la fermeture jambes-tronc, le tronc basculera vers l'avant en même temps que les membres inférieurs monteront pour venir à l'horizontale. Au 90° demandés pour la partie inférieure du corps correspondront 30° d'inclinaison de la partie supérieure du corps. Pourquoi ? Tout simplement parce que le tronc possède une inertie de rotation 3 fois supérieure à la partie inférieure du corps ; il parcourra donc un angle 3 fois inférieur à celui des membres inférieurs. Si l'on demande cette fois-ci au (à la) gymnaste de faire monter ses jambes en position groupée, l'angle du tronc ne sera que de 20° car, en position groupée, les membres inférieurs ont une inertie de rotation plus faible. Ceci entraîne un mouvement du tronc dans le sens opposé également plus faible (20°). Dans les deux cas, ce phénomène est lié au fait que le moment cinétique reste toujours inchangé pendant les phases aériennes. Chaque mouvement d'une partie du

corps sera (devra être !) contre-balançé par une autre partie dans le sens opposé pour qu'il reste constant.

Dans ce que l'on appelle les vrilles de chat, c'est ce principe que l'on utilise en jouant sur les différences relatives de moment d'inertie entre la partie avant et la partie arrière du corps. Lorsque le chat fait sa vrille en partant d'une position où il est pendu par les pattes à quelques dizaines de centimètres du sol, il commence par allonger ses pattes arrière pour augmenter leur moment d'inertie et permettent aux pattes avant d'initier une rotation (action) plus importante que celle qui apparaît au même instant (réaction) dans le train arrière. Une fois que l'animal a atteint la rotation désirée dans la partie avant du corps, il allonge les pattes avant et rapproche ses pattes arrière de son CG pour leur permettre de tourner à leur tour (action) sans que le reste du corps ne tourne pour autant (réaction). C'est comme cela qu'il peut repositionner ses quatre pattes face au sol avant la réception. L'avantage de ce genre de vrille est qu'elle ne nécessite pas de créer une quantité de mouvement angulaire sur un axe particulier. Elle n'utilise que les différences d'inertie de rotation en fonction de la répartition des masses autour des axes de rotation considérés. En gymnastique, on peut utiliser ce principe lorsque l'on fait un salto avant carpé demi-tour par exemple. On peut également tirer profit d'une autre technique de transfert de moment cinétique qui est la technique classiquement utilisée pour la création des vrilles.

Transfert d'un axe à un autre

Il est effectivement possible de transférer une partie du moment cinétique créé autour d'un axe de rotation sur un autre axe, tout en maintenant constant le moment cinétique du corps. Les physiiciens appellent cela la nutation. Une toupie subit la même chose lorsque sa vitesse de rotation ralentit : elle tourne sur son axe pendant que ce dernier décrit un cercle de plus en plus grand à mesure que la vitesse de rotation diminue.

C'est également ce qui se produit lors d'une vrille. La vrille ne peut être déclenchée que s'il y a eu création au préalable d'un moment cinétique autour de l'axe transversal.

Schématiquement (Figure 13), on peut considérer le (la) gymnaste comme un cylindre que l'on peut faire tourner sur son axe transversal (salto arrière par exemple). En le (la) basculant pour le (la) mettre à l'horizontal, il (elle) continuera à tourner mais, cette fois, autour de son axe longitudinal (pirouette). Maintenant, si on l'incline de quelques degrés au-dessus de l'horizontale, le (la) gymnaste tournera à la fois sur son axe transversal et son axe longitudinal (vrille). Pendant ces trois phases, le moment cinétique est demeuré inchangé : il y a eu simplement transfert d'une partie de celui-ci d'un axe à l'autre (comme dans la troisième position).

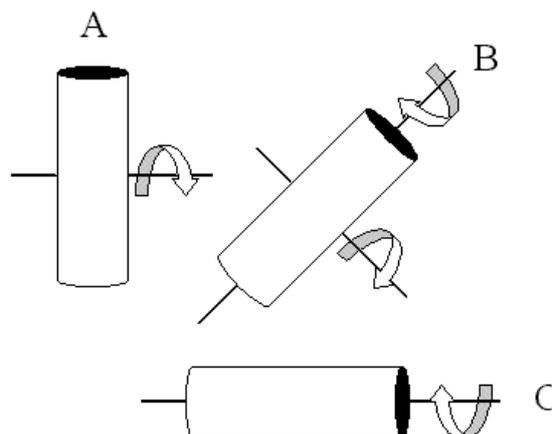


Figure 13 : Transfert de quantité de mouvement angulaire entre différents axes de rotation. Le cylindre est mis en rotation autour de son axe transversal. En l'inclinant de 90°, la rotation continue autour de l'axe longitudinal. En mettant le corps à 45°, la rotation a lieu autour des deux axes à la fois.

Il est important de noter que :

- 1°) quelques degrés d'inclinaison suffisent pour transférer une partie du moment cinétique de l'axe transversal (salto arrière) à l'axe longitudinal (pirouette) ;
- 2°) l'inertie de rotation sur l'axe longitudinal est bien plus faible que sur l'axe transversal : il est non seulement plus facile de mettre en rotation sur le corps sur son axe longitudinal mais il est possible d'obtenir une grande vitesse de rotation sur celui-ci.

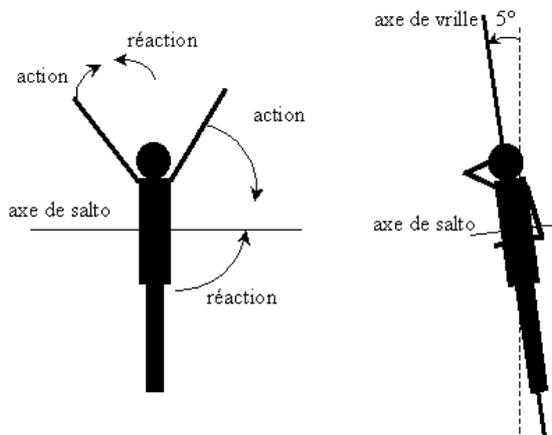


Figure 14 : Transfert de moment cinétique inter-axes. En changeant la répartition des masses autour de l'axe antéro-postérieur par un mouvement des bras dans des sens opposés, le (la) gymnaste peut incliner son corps par rapport à l'axe transversal et transférer une partie du moment cinétique du salto arrière dans la vrille. 5° degrés suffisent pour réaliser ce transfert. Reste ensuite à accélérer la rotation en ramenant les deux bras le plus près possible de l'axe longitudinal (diminution du moment d'inertie) ou à ralentir en écartant les bras (augmentation du moment d'inertie).

L'initiation d'une vrille (Figure 14) à partir d'une rotation arrière se fera alors très facilement en appliquant les mêmes principes. Une fois créée une certaine quantité de mouvement angulaire autour de l'axe transversal (salto) après l'impulsion sur le sol, il faudra abaisser l'un des bras près du corps (adduction) pendant que l'autre s'élève ou non vers la tête (abduction). Ces deux mouvements devront obligatoirement se faire dans le plan frontal pour être efficaces et entraîner l'effet voulu. Comme nous

l'avons vu dans la Figure 12, cette action des bras entraîne une réaction du corps dans le sens opposé qui permet de l'incliner et de transférer une partie du moment cinétique d'un axe (transversal) à l'autre (longitudinal). Une inclinaison de 5° suffit à initier la vrille. Mais, plus l'inclinaison sera importante et plus il y aura de transfert de moment cinétique dans la vrille et de possibilité de faire de rotation sur cet axe. Pour accélérer ou décélérer la rotation sur l'axe longitudinal, il suffira respectivement de rapprocher (adduction) ou d'éloigner (abduction) les bras de cet axe (c'est-à-dire une diminution ou une augmentation du moment d'inertie provoquant simultanément une augmentation ou une diminution de la vitesse angulaire).

Résumé et Conclusion

La création des rotations d'une partie ou totalité du corps fait intervenir des principes mécaniques liés à la notion de moment, c'est-à-dire l'effet de rotation dû à l'application d'une force sur notre corps.

Le moment d'inertie permet de quantifier la résistance à la mise en rotation d'un corps. Il fait intervenir à la fois la masse et sa distribution autour de l'axe de rotation considéré. Pour un solide, cette distance est tout simplement le rayon de rotation autour de l'axe. Pour un corps composé de plusieurs segments comme le nôtre, on utilise plutôt le rayon de giration qui permet de simplifier l'analyse en ne considérant que le rayon sur lequel se trouveraient toutes les masses segmentaires si elles étaient concentrées en un seul point en rotation autour de cet axe..

Le moment cinétique décrit les relations qui existent, d'une part, entre la vitesse de rotation et le moment d'inertie et, d'autre part, entre les rotations entre segments ou entre les axes de rotations. C'est une quantité qui est créée grâce à l'application d'une ou plusieurs forces généralement excentrées par rapport au point d'appui le sol ou de l'axe de rotation lorsque l'on est sur un agrès. Seule l'utilisation d'un nouvel appui permettra d'exercer à nouveau une force pour espérer changer ou entretenir le moment cinétique (comme pendant le saut de cheval pendant l'impulsion jambe puis l'impulsion bras). Cela implique que nous ne pouvons créer de rotation que pendant ces phases.

Une fois en l'air, cette quantité ne peut plus être modifiée. On peut, tout au plus, moduler ses composantes grâce à l'action de nos muscles qui permettent de modifier le rayon de giration de notre corps. Cette modification a un effet inversement proportionnel sur la vitesse de rotation du corps.

Dans la mesure où les phases de création de rotation sont le plus souvent très brèves, les techniques permettant de les optimiser sont relativement difficiles à maîtriser et nécessitent un apprentissage par étapes successives afin de bien faire comprendre les différents moments clés de ce genre de mouvements ; ceux notamment impliquant le transfert de moment cinétique d'un axe à un autre (vrilles,

c'est-à-dire salti + pirouettes). Des exemples de décomposition de ces phases sont disponibles dans le Gym'Technic n°28, pp. 16-19 par exemple.

Enfin, certaines techniques peuvent adapter ces principes pour faire en sorte d'aider le (la) gymnaste à comprendre le déclenchement de rotations dans certaines positions où les repères changent, notamment lors du passage à la verticale (en position renversée) avec ou sans appui (déclenchement d'une vrille à partir d'un point distal aux barres asymétriques – jambes - ou du sol par exemple - tronc). Il n'en reste pas moins que ces aménagements n'enlèveront en rien l'importance de comprendre ces concepts pour maîtriser les figures gymniques impliquant des mouvements de rotation autour des axes longitudinaux et/ou transversaux.

□ *Les plans et axes de mouvement :*

- L'axe transversal est celui qui passe par les hanches.
- L'axe longitudinal passe par la tête et les pieds.
- L'axe antéro-postérieur passe par le ventre et le dos.
- Le plan sagittal est celui qui coupe en partie gauche et partie droite notre corps. C'est sur ce plan que se font les mouvements autour de l'axe transversal.
- Le plan frontal est celui qui sépare le corps en partie avant et partie arrière. Les mouvements autour de l'axe antéro-postérieur se font par rapport à cet axe.
- Le plan horizontal/transversal est le plan qui scinde le corps en partie haute et partie basse. C'est dans ce plan que se font les mouvements autour de l'axe longitudinal.

□ *Annexe : relations mathématiques mettant en correspondance les grandeurs mécaniques étudiées dans cet article*

Pour ceux qui ne peuvent conceptualiser les phénomènes mécaniques sans relations mathématiques, voici les principales quantités utilisées dans cet article :

1°) **Moment d'une force, M :**

$$M = F \times r$$

2°) **Moment d'inertie, I :**

- pour un seul segment :
 $I = m \times r^2$, où m est la masse et r la distance du CG par rapport à l'axe de rotation
- pour un système multisegmentaire : $I = m \times k^2$, où m est la masse et k le rayon de giration

3°) **Moment cinétique (quantité de mouvement angulaire), L :**

- $L = I \times \omega$, où I est le moment d'inertie et ω est la vitesse angulaire. Donc, les paramètres sont impliqués dans le moment cinétique : m , k et ω , en sachant que l'on ne peut agir que sur le rayon de giration, k .