

# Biomécanique et sports de combat




"Donnez-moi un levier et je soulèverai le monde", Archimède.



# Introduction



- La théorie mécanique des systèmes articulés est bien connue ; mais les méthodologies d'étude des mouvements en sports de combat se montrent souvent peu adaptées et pour d'autres difficilement adaptables.
  - Ainsi en judo, par exemple, le fait qu'il y ait deux adversaires en interaction par l'intermédiaire de leur kimono constitue un inconvénient majeur d'une étude cinématique de qualité. Cette difficulté à procéder à des manipulations de qualité peut aussi expliquer le peu d'engouement avec lequel les mécaniciens ont examiné les sports de combat en général.
- 

# 3 catégories d'activité

- Nous trouvons dans la première catégorie les activités sportives présentant le système mécanique le plus simple, c'est-à-dire l'homme seul : marche, course, saut, patinage...
- Dans la deuxième catégorie figurent les activités présentant un système mécanique plus complexe du type homme + engin : haltérophile, lanceur de poids...
- A la troisième catégorie appartiennent les sports de combat de préhension : judo, lutte, sambo... Le système mécanique analysé gagne encore en complexité en raison de l'interaction homme + homme caractérisée par **une motricité contrariée de manière aléatoire.**

# Biblio historique:

- Walker (1980) démontre à partir des concepts de bras de levier et de centre de rotation que le travail du déséquilibre initial consiste, de la part de Tori, à déplacer la projection du centre de masse de Uke en dehors du polygone de sustentation, le poids créant dès lors un moment de forces favorable.
- Sacripanti (1987a) propose une classification en deux familles (application d'un couple de forces et système de levier), fondée sur des critères biomécaniques, de l'ensemble des techniques. Le même auteur (1987b) propose une analyse théorique pertinente du concept d'équilibre à partir du résultat de l'action d'une force horizontale sur le barycentre du système considéré.
- Takahashi (1992) propose une application de la biomécanique (couple de forces et bras de levier) à une technique de balayage, Okuri-Ashi-Barai.

Brousse selon Sacripanti (1987a)

distingue 2 types de projection

- a) les techniques qui résultent de l'application d'un couple de forces

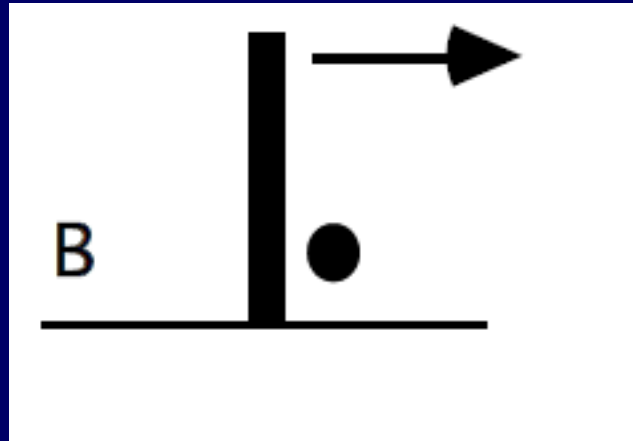
Exemple:



*O soto gari*  
*O uchi gari*  
*Ko uchi gari*  
*Harai goshi*  
*De ashi barai*

# Brousse distingue 2 types de projection

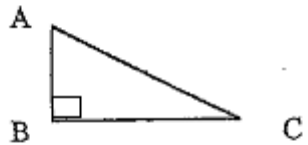
- b) les techniques qui résultent de l'application d'un levier

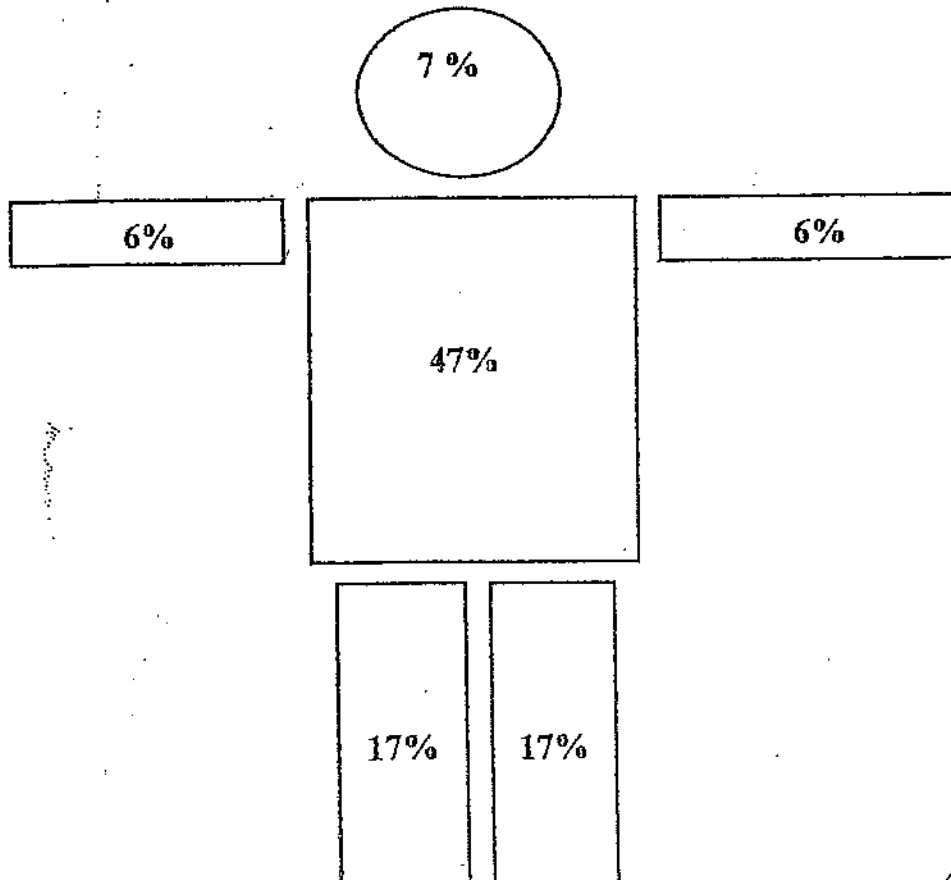


Exemple:

*Koshi guruma*  
*Tai otoshi*  
*Hiza guruma*  
*Seoi nage*  
*Tomoe nage*

## II. RAPPELS TRIGONOMETRIQUES, MECANIKES ET NEURO-PHYSIOLOGIQUES

PYTHAGORE	$AC^2 = AB^2 + BC^2$	
PRESSION	$P = F/S$	F = force S = surface
TRAVAIL	$W = F \times d$	F = force d = hauteur
PUISSANCE	$P = W/t$	W = travail t = temps
ENERGIE CINETIQUE	$E_c = \frac{1}{2} mv^2$	m = masse v = vitesse
MOMENT D'UNE FORCE	$M = F \times d$	F = force d = distance entre droite d'action de F et axe de rotation
MOMENT D'INERTIE	$M_i = \sum m_i d_i^2$	$m_i$ = masse partielle $d_i$ = distance de G partiel à l'axe de rotation  La résistance au mouvement dépend de la répartition des masses autour de l'axe de rotation
MOMENT CINETIQUE	$M_c = M_i \times \omega$	$M_i$ = moment d'inertie $\omega$ = vitesse angulaire



## Répartition des masses corporelles

4

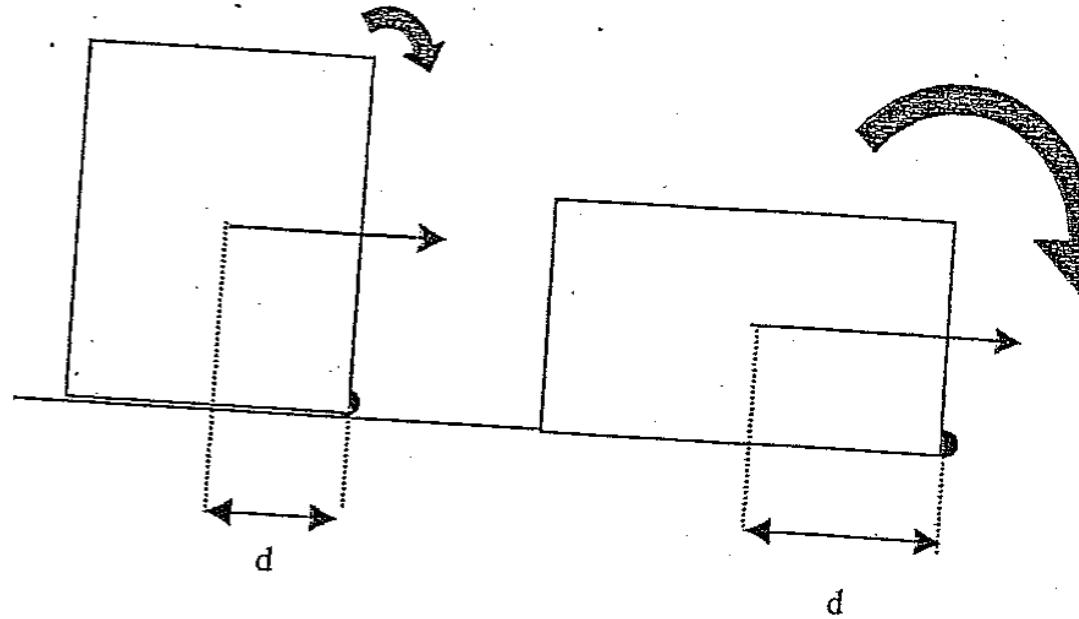
Bruno HILTON  
UFR STAPS Nancy



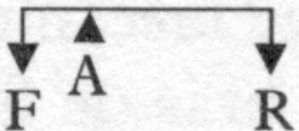
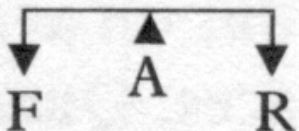
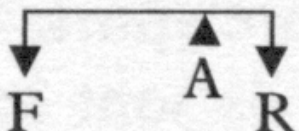
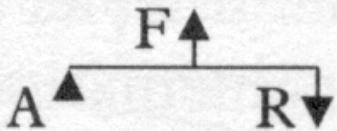
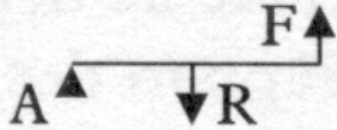
## STABILITE

Elle est fonction

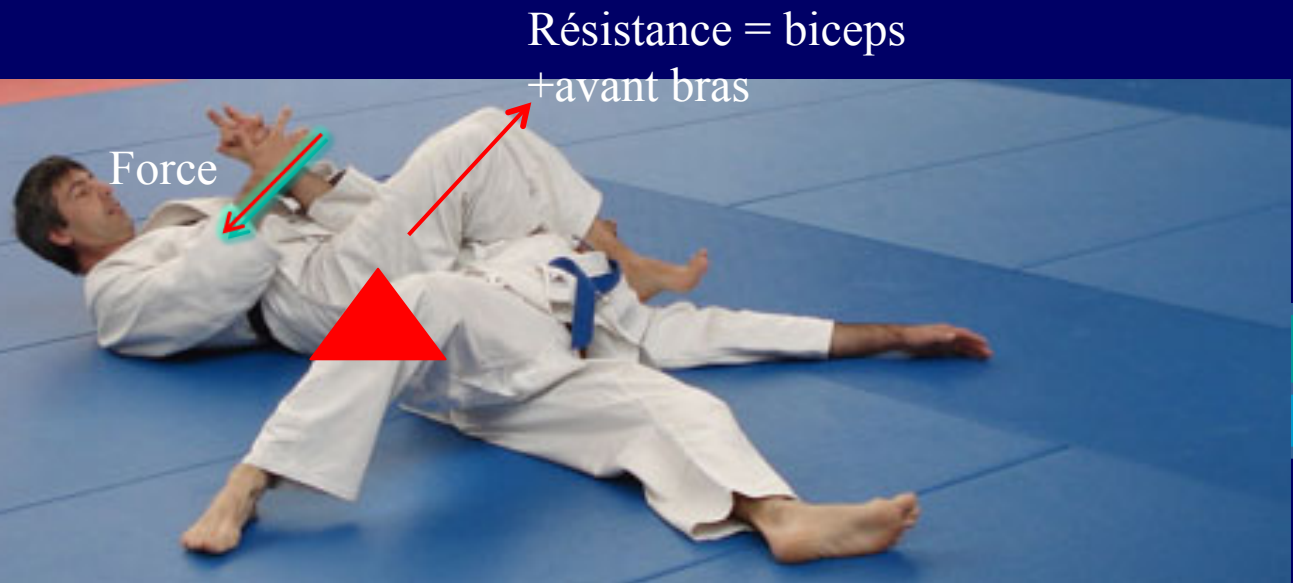
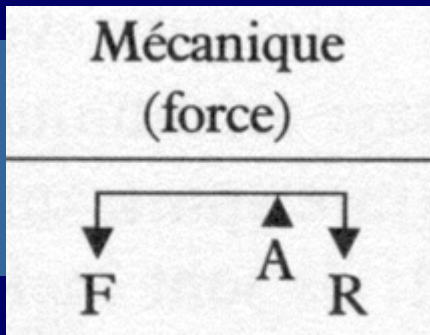
- de la masse
- du polygone de sustentation
- de la hauteur de G
- de la distance horizontale  $d$  entre G et l'axe de pivotement



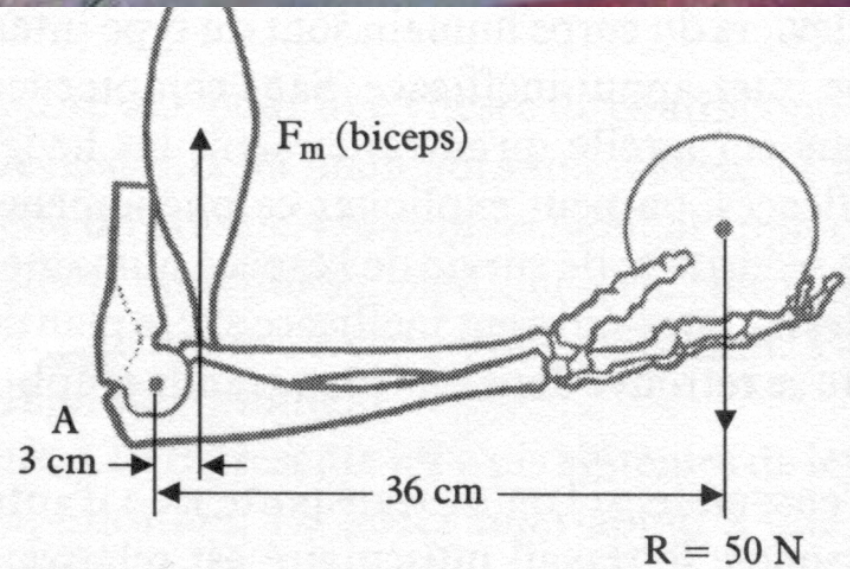
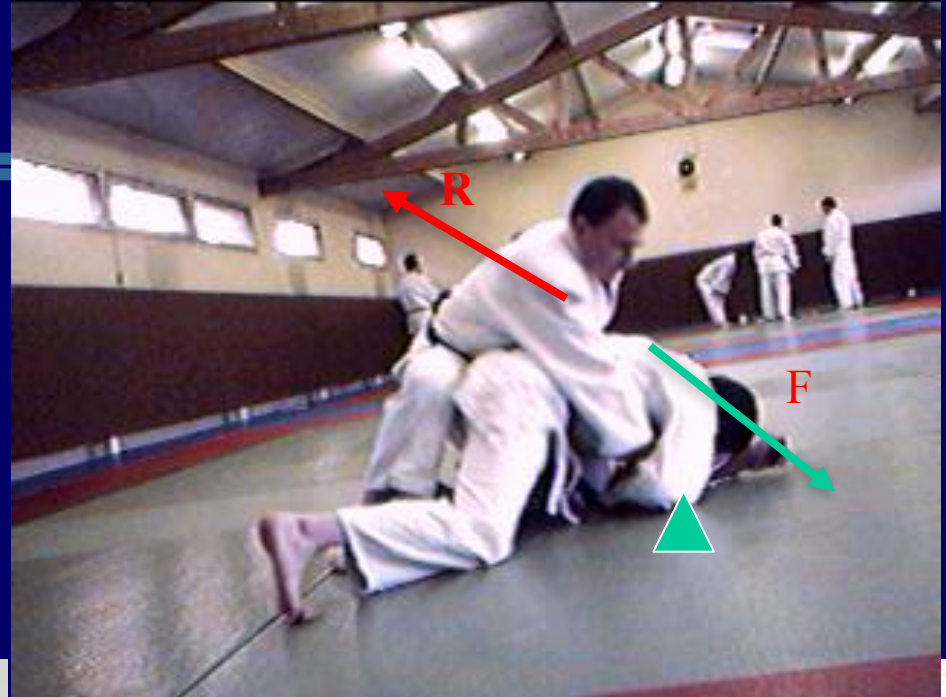
# Types de leviers

Genre \ Avantage	Cinématique (rapidité)	Aucun	Mécanique (force)
Inter-appui			
Inter-moteur			
Inter-résistant			

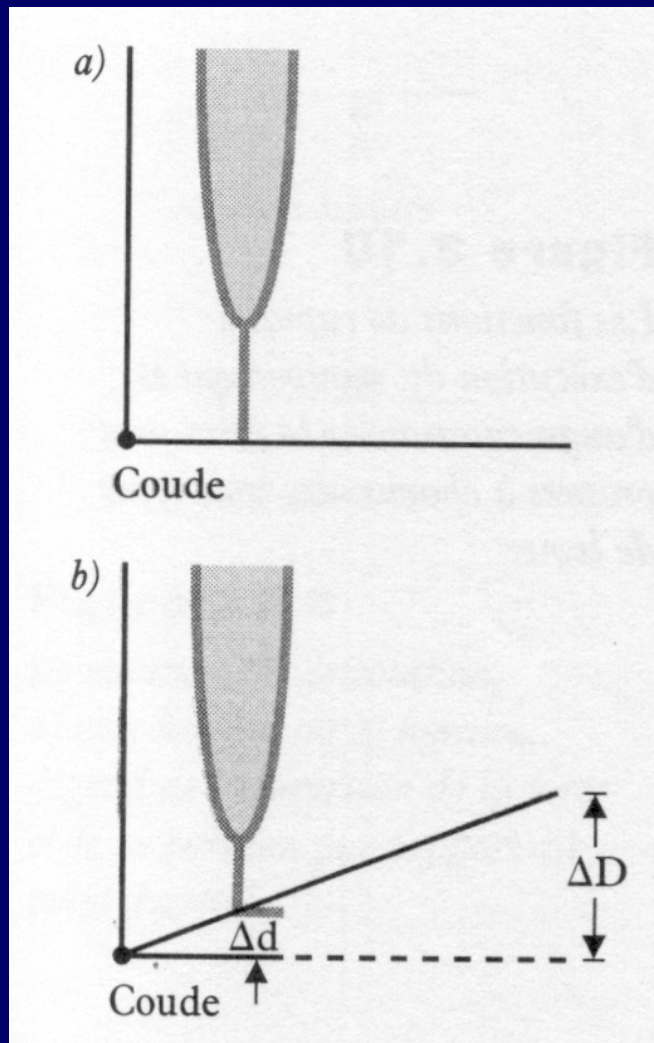
# Levier inter-appui (type 3)



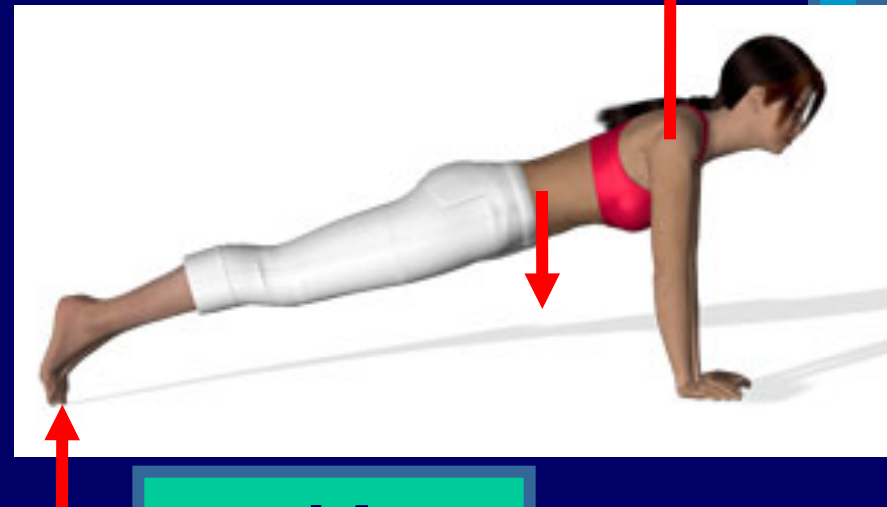
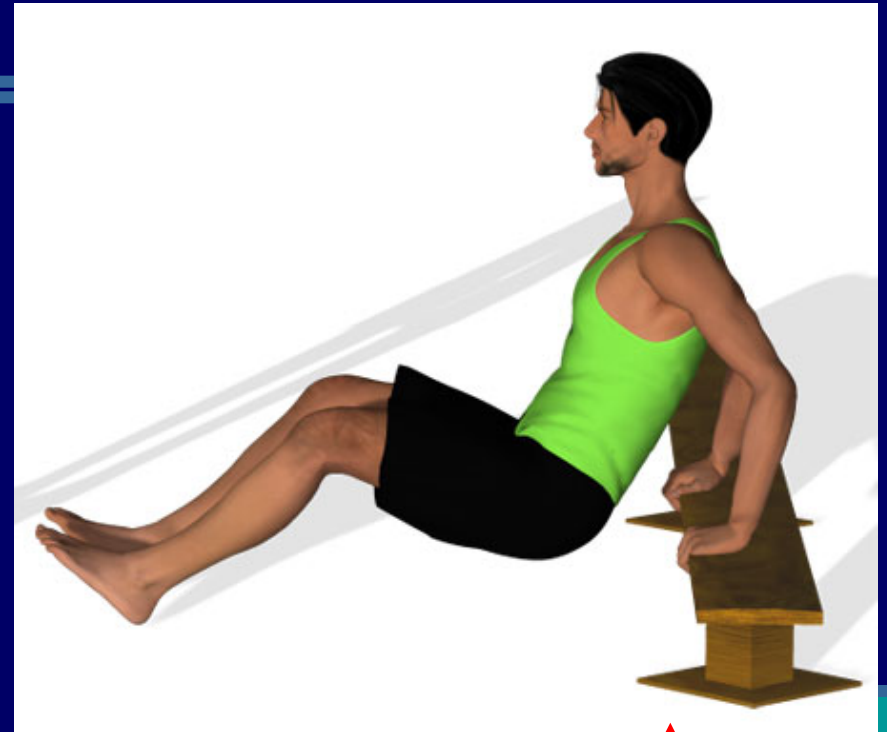
# Levier inter-moteur



# Levier inter-moteur (2)






# Levier inter-résistant



## Différencier les baraïs des garis et des gakés :

On considère que uké est une "poutre indéformable".  
Les projections sont effectuées à droite.

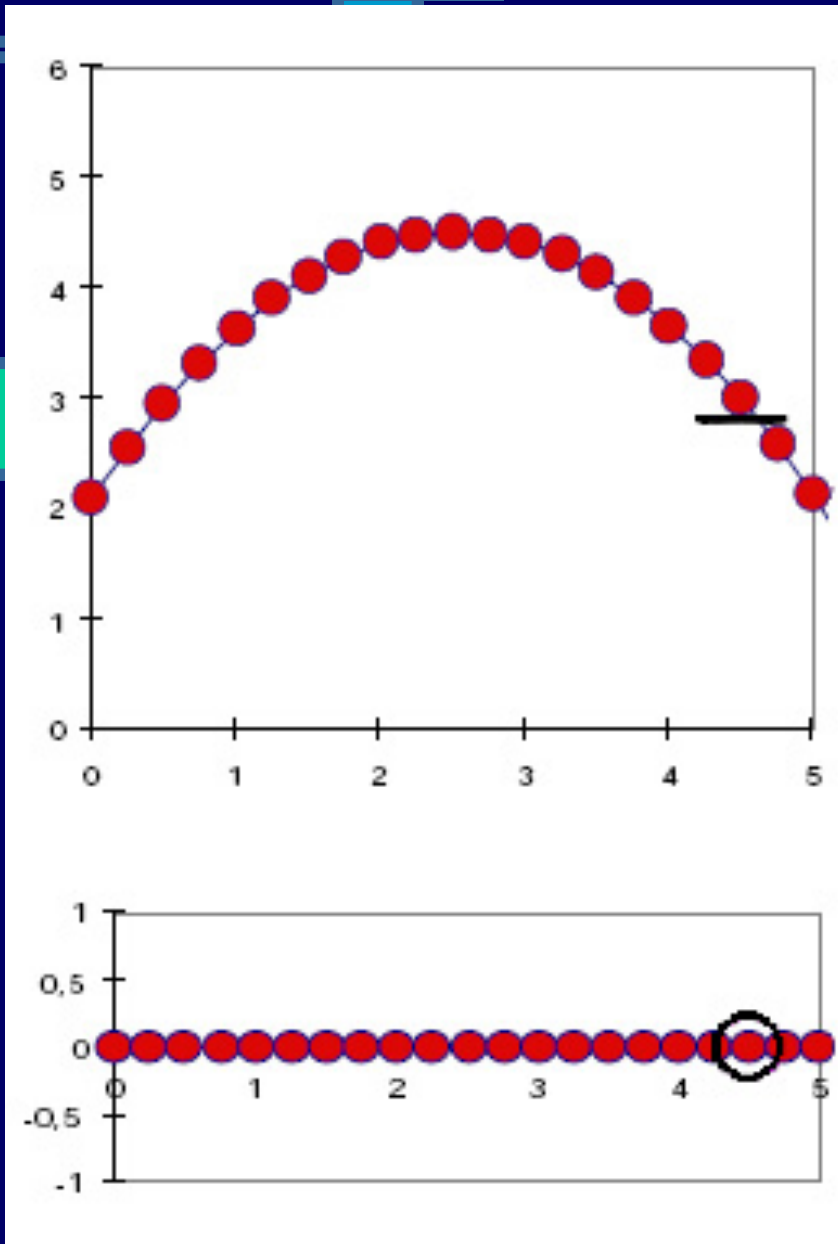
M. CALMET

Balayage : baraï ou haraï	Fauchage : gari	Blocage : gaké
		
Exemple type : de ashi baraï	Exemple type : o soto gari	Exemple type : ko soto gaké
Uké est fixé sur le haut du corps Tori balaye la jambe qui avance	Uké est fixé sur la jambe Tori exerce un couple de force (action des bras conjuguée avec l'action de la jambe)	Uké est fixé sur la jambe Tori exerce une force sur le haut du corps
Tori est en appui sur un pied (droit)	Tori est en appui sur un pied (gauche)	Tori est en appui sur un pied (droit)
A la chute, la majeure partie de uké est à droite de l'appui de tori.	A la chute, le corps de uké est également réparti de part et d'autre de l'appui de tori.	A la chute, la majeure partie de uké est à gauche de l'appui de tori.

# Déplacement

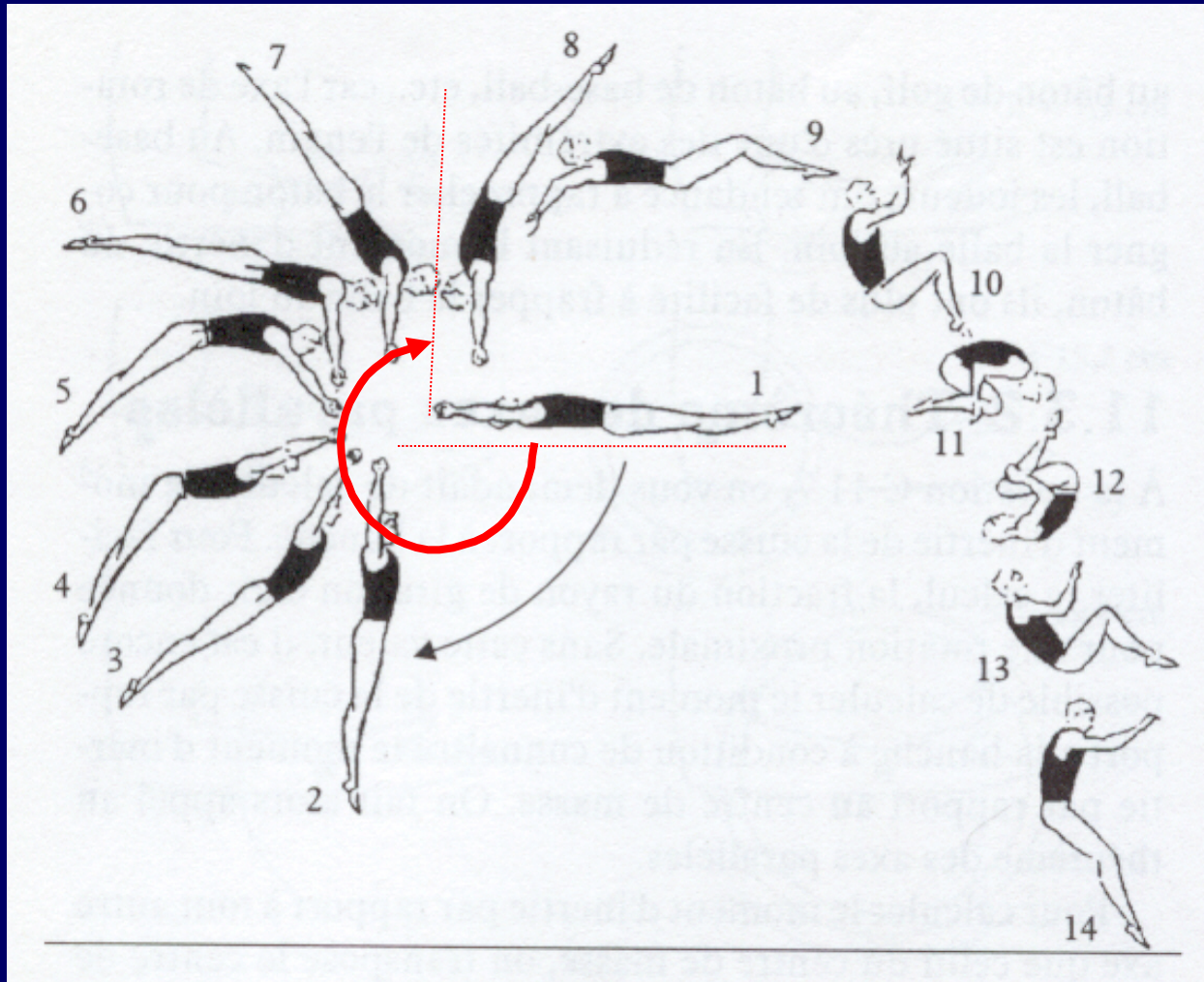
curviligne

en translation





# Déplacement angulaire



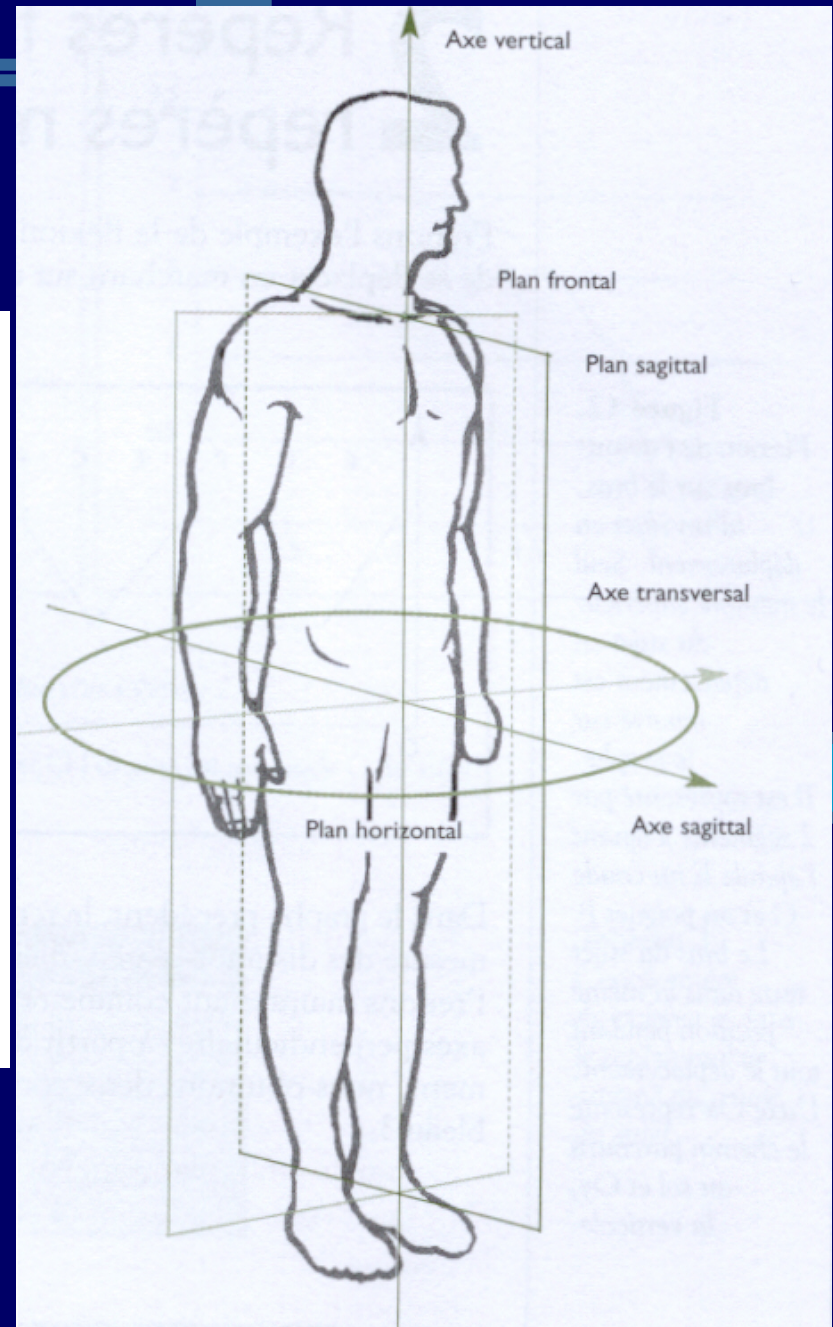
# Dynamique: Loi d'action/ réaction

- **≡ 3ème loi de Newton** : lorsqu'un corps exerce une force sur un autre, le second exerce toujours sur le premier une force d'intensité égale, selon la même direction mais de sens opposé.
- L'action est alors identifiée comme une force interne et la réaction comme une force externe.  
Par exemple au cours de la marche, lors des phases de contact avec le sol, le pied exerce sur le sol une force d'action vers le bas dont la direction et l'intensité varie à chaque instant en fonction du déroulé du pied .
- A cette force d'action correspond une force de réaction exercée par le sol sur le pied : elle est de même direction et de même intensité que la force d'action mais de sens opposé, c'est à dire dans le cas de la marche, orientée vers le haut.
- Son point d'application est appelé centre de pression. Sa position varie à chaque instant.
- Les forces de contact avec le sol et la position du centre de pression sont mesurées à l'aide de plates-formes de forces. Celles-ci sont équipées de capteurs piézo-électriques ou des jauges de déformation collées sur des corps d'épreuve supportant une plaque indéformable. La force d'action sur la plaque est transmise aux capteurs et aux jauges préalablement calibrés. Les signaux sont ensuite amplifiés par des conditionneurs avant d'être numérisés par des cartes de conversion analogique-numérique afin d'être analysés via des tableurs ou des logiciels d'analyse de données.
- La force de réaction du sol ainsi que son point d'application peuvent être représentés par un vecteur 3D dont l'origine est le centre des pressions.
- L'analyse dynamique s'appuie sur l'étude en fonction du temps de l'évolution des composantes antéro-postérieure, médio-latérale et verticale de la force externes et externes.

# Rappels

## □ *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.



## Les trois éléments invariants de l'action

L'approche mécanique et l'analyse de la littérature (cf. Ch. Joly, 1972 notamment) nous ont amenés à dégager trois éléments invariants de l'action. Ces éléments constitutifs de l'action sont indissociables. Composant un système, ils sont en interaction permanente dans l'espace et dans le temps.



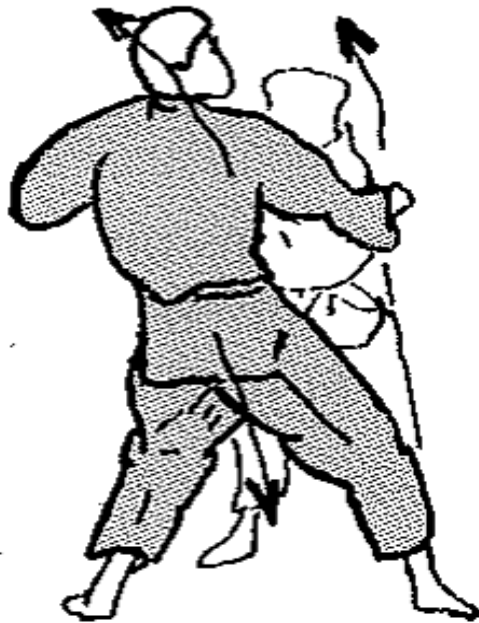
- **Le contrôle** avec l'ensemble des rôles qui lui sont attribués (cf. p. 16).

Trilles et Cadieres, 98

e

## ■ Les moments de force transmis

La transmission de moments de force consiste, pour l'attaquant, quelle que soit la forme d'action choisie, à transmettre au défenseur une quantité de mouvement ( $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ ) en gérant à la fois les déplacements liés à sa propre masse et à ses forces internes.



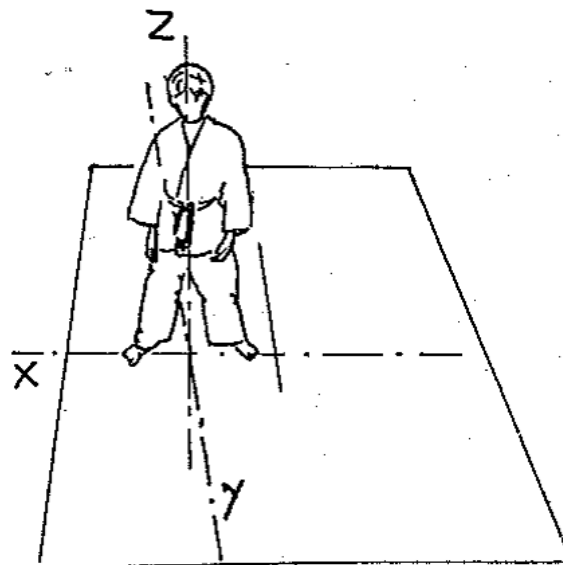
3 ■ **Le placement/déplacement d'action** relatif au défenseur tout au long de la séquence d'attaque.

Le placement relatif au défenseur (déplacement) se construit par des décalages (cf. croquis pour exemple) :

- décalage angulaire, rotation du dos de *Tori*, axe *x*,
- décalage vertical, abaissement de *Tori* par rapport à *Uke*, axe *z*,
- décalage horizontal par éloignement ou rapprochement, axe *y*. *Tori* doit être constamment en mouvement relativement à *Uke*.



L'opposant constitue à la fois la cible de l'action (objet à manipuler, sur lequel on agit) et le référentiel d'orientation de l'action (objet à partir duquel on oriente l'action future).



Ainsi, l'action peut se décrire selon son orientation par rapport à l'opposant :

- dans le plan horizontal, axe antéro-postérieur : se rapprocher de l'opposant ou s'éloigner de lui, axe *y*,

- dans le plan horizontal, axe transversal : déplacement à droite ou à gauche de l'adversaire, axe *x*,
- dans le plan vertical, axe vertical : vers le haut, vers le bas, axe *z*.

Rappelons tout d'abord (cf. les documents cités ci-dessus) que l'analyse de type mécanique permet d'aborder :

- par la dynamographie, les forces d'action développées dans les deux plans de l'espace –  $F_z$  dans le plan vertical,  $F_y$  (axe antéro-postérieur) et  $F_x$  (axe transversal) dans le plan horizontal. Ainsi, une analyse de ce type permet-elle de connaître, pour la durée de toute action (préaction, placement, traction, poussée, pression, projection, etc.), l'incidence relative des forces développées dans les trois directions de l'espace. Cette approche présente toutefois une limite dans la mesure où, si elle donne un résultat global des actions, elle ne permet pas pour autant de détailler avec précision la part relative de chaque force développée par telle ou telle action segmentaire,

## « Quatre invariants déterminés scientifiquement »

*Ce chercheur et judoka, maître de conférence à l'Université des Sports de Poitiers, avec son compère Roger Cadière et l'un de ses élèves, Laurent Blais, a exploré scientifiquement la question de la projection, bardant des judokas de haut niveau de capteurs et calculant des angles d'inclinaison. Il en a tiré des conclusions qui intéressent la Fédération Française de Judo autant qu'elles la rendent frileuse.*

**S**ur moroté-seoi-nage, notre étude montre à la fois des différences entre nos experts, mais aussi des similitudes, qu'il nous paraît très utile de connaître pour mieux comprendre ce que l'on peut appeler les « invariants » de la technique. Pour nous, ils sont au nombre de quatre, auxquels on peut ajouter un cinquième.

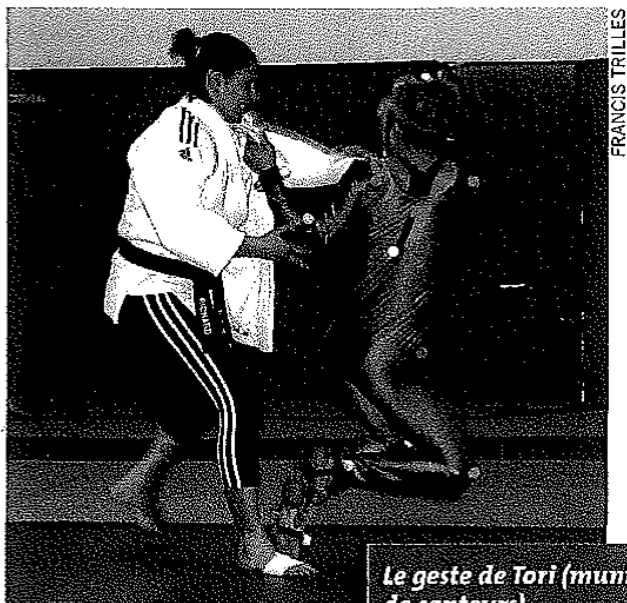
**1) Le décalage vertical.** Ce qu'on appelle « passer en-dessous ». Pour les bons spécialistes, cette différence peut atteindre 60 à 70%.

**2) Le décalage antéro-postérieur.** Le fait de s'engager entre les jambes du partenaire sur le plan horizontal. Là encore, certains bons spécialistes vont carrément de l'autre côté des jambes. En tobikomi (en avançant), c'est Tori qui se place en-dessous de Uke. En hiki-dachi, c'est Uke qui est amené par-dessus Tori.

**3) L'inclinaison.** Le corps de Tori est incliné dans la direction de la chute. Il recherche la mise en parallèle du corps de Uke avec le sien. Avec le décalage vertical simultanément, il y a un glissement de ces deux lignes l'une par rapport à l'autre.

**4) La torsion hanche / épaule.** Comme dans un lancer d'athlétisme, le bassin, libre, tourne avant les épaules, fixé par la saisie. La rotation du bassin entraîne le reste. La différence peut être de 90%.

5) (Le dernier élément pourrait être **l'inclinaison de Tori avant l'action**. Tori s'incline vers Uke pour le faire réagir, ou dans le sens de la projection pour fixer Uke dans un pré-déséquilibre.)



*Le geste de Tori (muni de capteurs) a été décortiqué scientifiquement par l'équipe de Francis Trilles.*



Nos expériences et celles d'autres chercheurs sont parfois dérangelantes pour les habitudes pédagogiques du judo français. On voit par exemple qu'il faut penser une projection comme une séquence dynamique avec, systématiquement, un contrôle, une mise en situation et une technique, laquelle est finalement secondaire au sens strict, dans cet ensemble. Aujourd'hui, de jeunes profs diplômés montrent encore une technique après l'autre, de façon statique, ce qui n'a rien à voir avec la situation de combat. On a fait aussi des expériences de comparaison entre les différents exercices classiques, nage-komi, uchi-komi et travail seul. Les trois approches produisent des résultats très différents et le nage-komi est de loin le plus performant. Les autres modes de travail ne servent, à mon sens, qu'à ceux qui sont déjà très bien formés. On a prouvé aussi que des séances de musculation spécifique couplées avec des nage-komi étaient beaucoup plus efficaces que des séances traditionnelles de judo. ●

# Moment de force

## □ *Cas général*

Pour différencier les forces impliquées dans les mouvements linéaires de celles impliquées dans les mouvements circulaires, les physiciens 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).

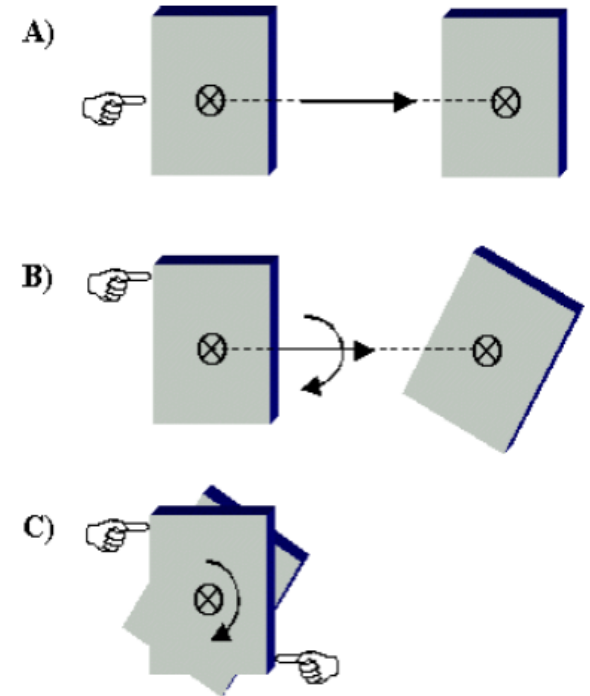
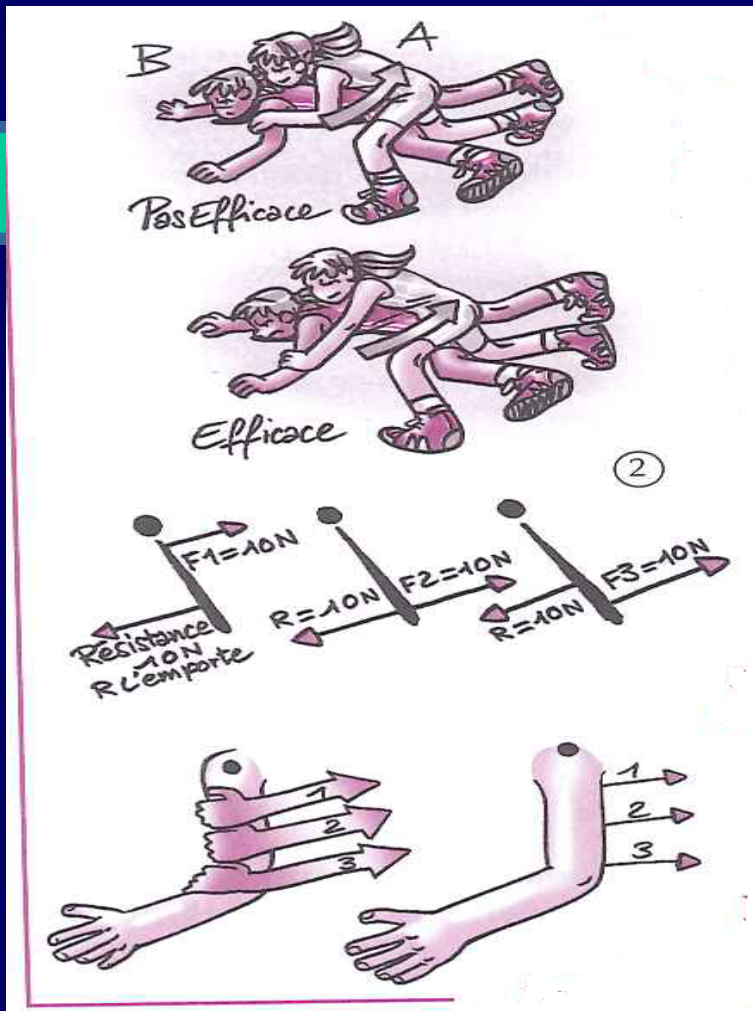


Figure 1 : Effet de la poussée exercée par la main en fonction de sa direction par rapport au CG. En A, application d'une force centrée ; en B, application d'une force excentrée ; en C, application d'un couple de force.

# Bras de levier



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).

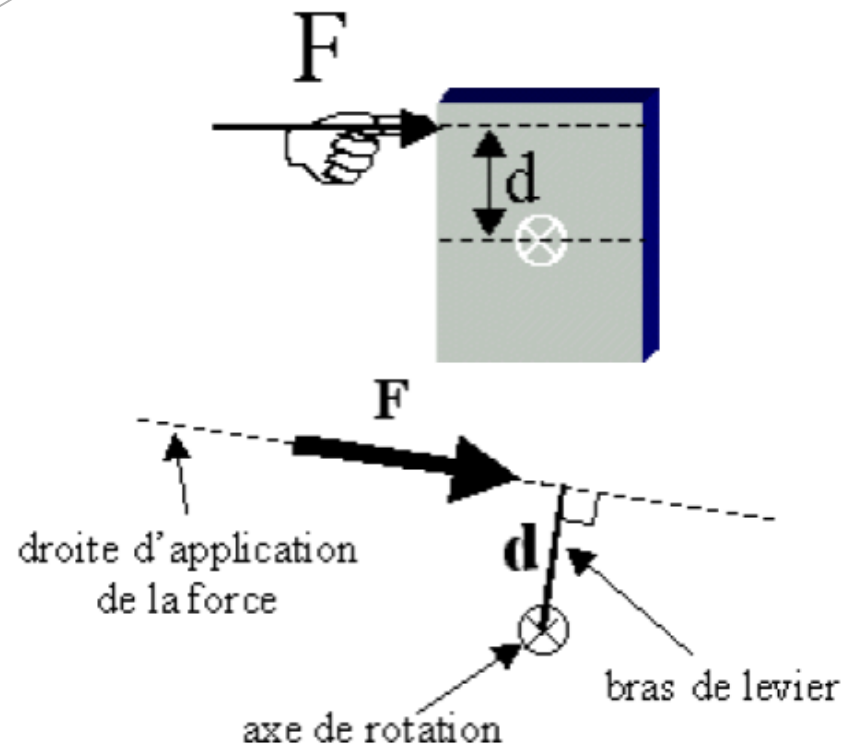


Figure 2 : Composante d'un moment de force. On peut contrôler l'effet de rotation créé par l'application d'une force excentrée en variant 1°) son intensité et/ou 2°) son bras de levier.

# Exemple de calcul

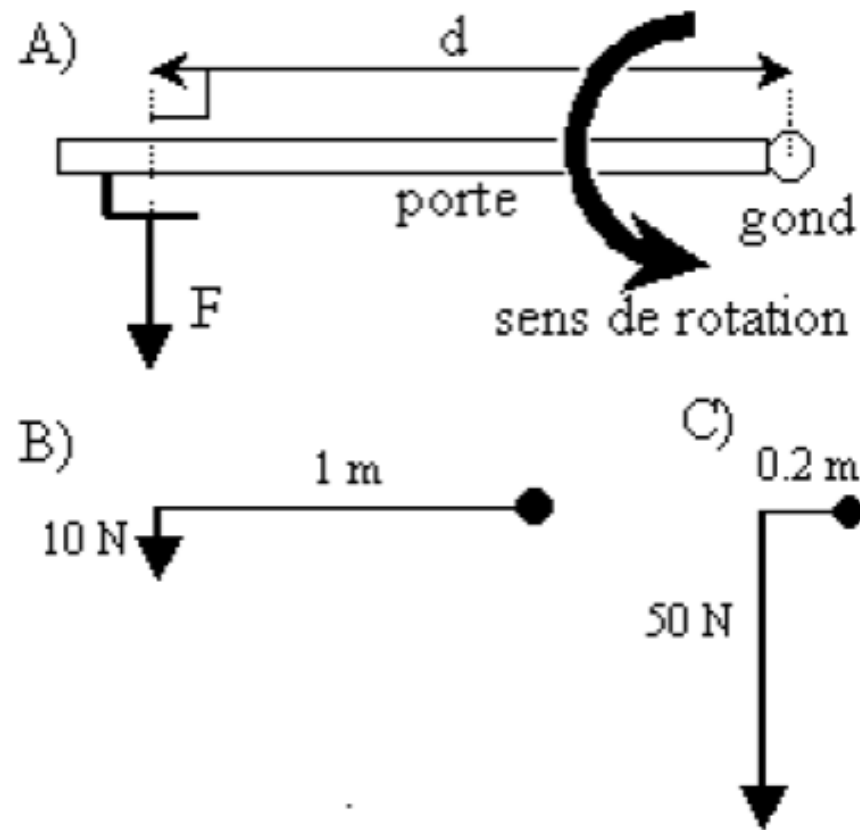
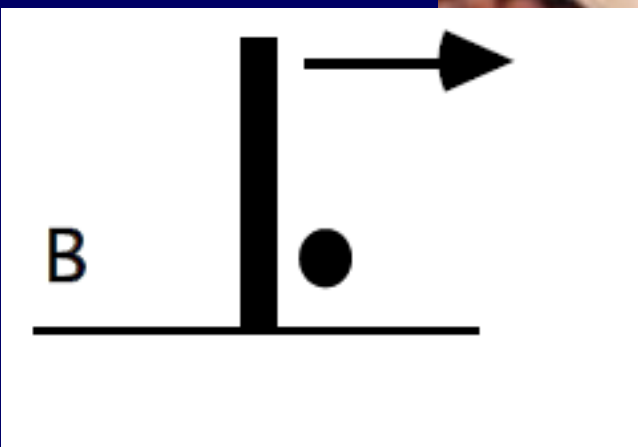


Figure 3 : Moment de rotation en fonction de l'intensité ( $F$ ) de la force et du bras de levier ( $d$ ). En B, il sera plus facile de tirer sur la poignée de la porte qu'en C car le bras de levier est plus important en B ( $1\text{ m}$ ) qu'en C ( $0.2$ ) ; par conséquent, pour obtenir le même effet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



# Moment d'inertie

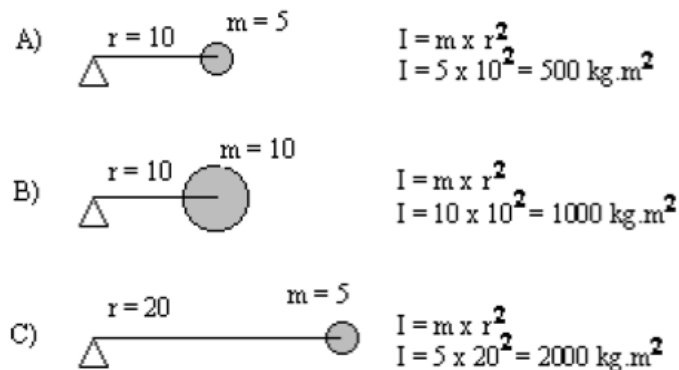


Figure 7 : Moment d'inertie. La résistance à la mise en rotation d'un corps est fonction à la fois de la masse de ce corps et de la distance entre le CG de cette masse et l'axe de rotation (A). Mais les effets de ces deux paramètres ne sont pas les mêmes. Ainsi, en multipliant par 2 la masse du corps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

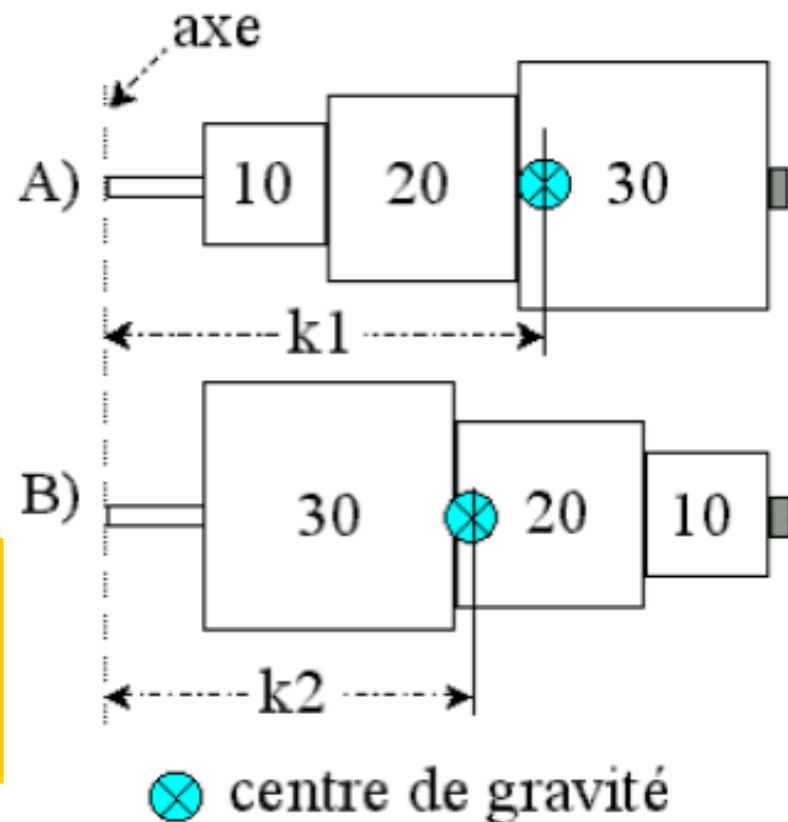
Maintenant, utilisons la notion de moment de force pour expliquer un autre phénomène : la difficulté que l'on a à mettre en rotation un objet autour d'un axe. Notre expérience quotidienne nous apprend que la difficulté à déplacer un objet (inertie) est inversement proportionnelle à sa masse : plus l'objet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

## 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



Dans le cas B, on diminue le rayon de giration, donc le moment d'inertie, on augmente donc la vitesse de rotation...

**Figure 8 : Moment d'inertie d'un système multisegmentaire. 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.**



## ❑ *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.

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

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

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).

$$Q=m*v$$

# Force d'impact en sport de percussion

- Le meilleur résultat pour le karatéka est la **force** maximale, produite par la quantité de mouvement maximal produit en un temps minimal.
- On cherche souvent à modifier la quantité de mouvement d'un objet par la force la plus petite possible. Un boxeur qui reçoit un coup possédant un grand élan cherche à minimiser la force de l'impact. S'il ne peut pas éviter le coup, il a au moins le choix entre la force ( $F$ ) et le temps ( $t$ ) pour fournir l'impulsion nécessaire qui absorbera et modifiera la quantité de mouvement provenant du coup de l'adversaire. La force de l'impact est amoindrie si on allonge le temps de contact (recul sur les coups)

## PRINCIPES BIOMECHANIQUES : (d'après LALES C. 2005)

(Les poings et les pieds peuvent être assimilés à des projectiles lancés sur une cible que constitue le corps adverse).

-L'énergie (E) d'un mobile en déplacement rectiligne varie proportionnellement en fonction de sa masse et au carré de sa vitesse

$$E=1/2MV^2$$

-Par ailleurs, la puissance d'un système, est définie comme étant l'énergie (E) qu'il peut développer par unité de temps.  $P=E/T$ . (+  
 $P=F \times V$ )

Pour augmenter la puissance d'un coup, on peut donc émettre  
l'hypothèse qu'il faut :

augmenter l'énergie emmagasinée par l'arme, pied ou poing, susceptible d'être transmise à la cible.

Réduire le temps de transmission de cette énergie à la cible, c.à.d. réduire la durée de l'impact.

# bibliographie

- « Encore ce livre de biomécanique », Tague (**Begon, Allard et Dalleau**)  
Chapitre 21 : Biomécanique dans les sports de combat 77  
Chapitre 25 : Impacts dans les sports de combat 151
- Conférence introductive aux Jorrescam année x: Biomécanique et judo : revue de question. Francis TRILLES, Patrick LACOUTURE, Jacques DUBOY et Alain JUNQUA.
- « Judo, analyse et propositions pour la pratique de son enseignement » Trilles F & Cadières R., Ed. Revue EP.S, coll cahiers des sports, 2000.
- « Morote seoï, conclusion » Trilles F. in Revue Esprit du judo dec 2010
- Site internet Sciensport, de Pascal Prevost.
- Cours de biomécanique de Bruno HILTON (ufraps Nancy).
- Principes du Judo par Michel Novovitch (8<sup>ème</sup> dan auteur de « gravité zéro »):  
[http://www.dailymotion.com/video/x6ths2\\_principes-du-judo-par-michel-novovi\\_sport](http://www.dailymotion.com/video/x6ths2_principes-du-judo-par-michel-novovi_sport)
- [http://www.knowtex.com/posts/judo-et-biomecanique\\_514](http://www.knowtex.com/posts/judo-et-biomecanique_514)
- <http://www.infokarate.com/info-video/la-science-du-combat.php>