

L'enseignement et la technologie du ski alpin en 2024

François Roux, ARESA¹.

2 Forces de la nature et ruses sensorimotrices

Mots clé : interaction, poids gravitationnel, poids apparent, force externe, force interne, masse, inertie, moment de force, énergie cinétique, translation, rotation, modélisation, pendule inversé.

En écrivant ce chapitre, nous avons l'ambition d'explicitier un certain nombre de concepts de mécanique utiles à la compréhension du système "*corps du skieur et de la skieuse-skis-contexte physique*". D'autres tout aussi importants le seront aux chapitres suivants.

Article relu par Gilles Dietrich, Enseignant Chercheur - Maître de Conférences HDR- Université Paris V. Développeur du logiciel « *Digital modelling* » 3D vision.

¹ ARESA pour Applications de résultats de Recherches technologiques pour l'Entraînement des Skieurs Alpains
<http://www.aresa-ski-montagne.com/about.html>

Table des matières

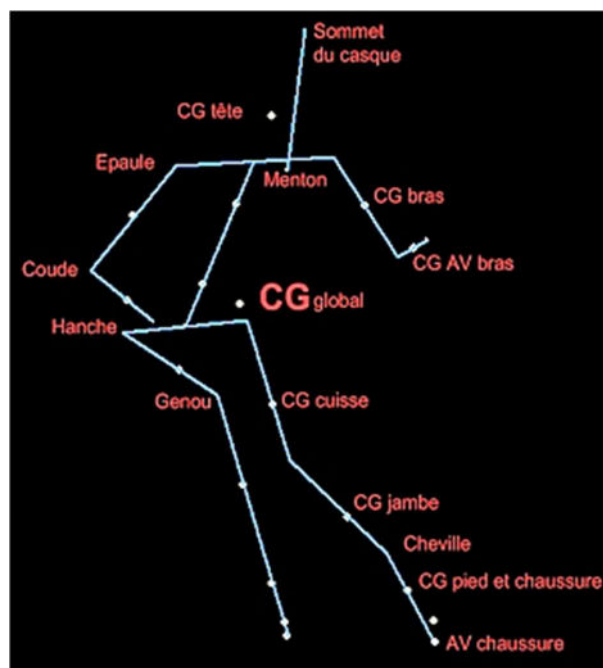
2 FORCES DE LA NATURE ET RUSES SENSORIMOTRICES	1
2.1 À QUOI ÇA SERT DE CONNAÎTRE PRÉCISÉMENT CERTAINES LOIS DE LA PHYSIQUE ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIOLOGIQUES DES HUMAIN·E·S ?	3
2.2 C'EST QUOI UNE RÉACTION D'APPUI ?	3
2.3 C'EST QUOI L'INTERACTION NEIGE→SKI(S) ?	4
2.4 C'EST QUOI UNE FORCE ?	4
2.4.1 <i>Les forces externes</i>	5
2.4.2 <i>les forces internes</i>	5
2.5 C'EST QUOI LA MASSE ?	6
2.6 C'EST QUOI L'INERTIE D'UN OBJET ?	6
2.6.1 <i>Le principe d'inertie</i>	6
2.6.2 <i>C'est quoi la quantité de mouvement d'un système en translation rectiligne ?</i>	7
2.6.3 <i>Le principe fondamental de la dynamique des objets animés d'un mouvement de translation rectiligne</i>	7
2.7 C'EST QUOI LE TRAVAIL LINÉAIRE D'UNE FORCE ?	8
2.8 C'EST QUOI UNE IMPULSION LINÉAIRE ?	9
2.8.1 <i>Saut à pieds joints, ou quand l'humain·e centre sur son CG, de la direction de la force avec laquelle iel crée son impulsion</i>	9
2.9 L'ÉNERGIE POTENTIELLE ÉLASTIQUE	10
2.9.1 <i>La viscoélasticité musculotendineuse : le modèle de Hill</i>	11
2.9.2 <i>Le cycle étirement-renvoi avec réflexe myotatique</i>	12
2.9.3 <i>L'élasticité mécanique ou loi de Hooke</i>	12
2.9.4 <i>La raideur musculaire analytique</i>	13
2.10 LE MODÈLE MASSE-RESSORT	13
2.11 C'EST QUOI UN MOMENT DE FORCE ?	14
2.11.1 <i>Quelles caractéristiques définissent un mouvement angulaire ?</i>	15
2.11.2 <i>C'est quoi le travail angulaire d'une force ?</i>	16
2.11.3 <i>C'est quoi le rayon de giration d'un système animé d'un mouvement angulaire ?</i>	16
2.11.4 <i>C'est quoi le produit d'inertie d'un objet animé d'un mouvement angulaire ?</i>	17
2.11.5 <i>C'est quoi une quantité de mouvement angulaire appelée moment cinétique ?</i>	17
2.11.6 <i>C'est quoi une impulsion angulaire ?</i>	19
2.11.7 <i>Le vissage du tronc fléchi</i>	19
2.11.8 <i>Le principe fondamental de la dynamique d'un système animé d'un mouvement angulaire</i> 21	
2.12 C'EST QUOI UNE IMPULSION ANGULAIRE ?	23
2.13 ÉTUDES DES MOUVEMENTS CURVILIGNES.....	23
2.13.1 <i>Décentrer de son CG la direction de la force créant son impulsion, pour effectuer un saut périlleux</i>	24
2.13.2 <i>Décentrer la direction de son interaction neige→ski(s) par rapport à son CG ou réciproquement, pour se piloter avec ses skis</i>	26
2.14 L'ÉQUILIBRE EST UNE ILLUSION	29
2.15 LE MODÈLE DU SKI ALPIN EST ANALOGUE À CELUI D'UN PENDULE INVERSÉ	30
2.16 C'EST QUOI L'ÉNERGIE CINÉTIQUE D'UN SYSTÈME ?	31
2.16.1 <i>Comment varie l'énergie cinétique totale d'un objet ou d'un système ?</i>	32

2.1 À quoi ça sert de connaître précisément certaines lois de la physique et caractéristiques physiologiques des humains ?

À devenir capable de détecter les usages de leur corps, qu'utilisent ceux qui sont devenus virtuoses d'une activité professionnelle, artistique ou sportive et particulièrement dans ce chapitre, comprendre pourquoi les champion·ne·s de ski alpin ont incorporé ces ruses technologiques. Pour savoir comment il faut mobiliser ses ressources sensorimotrices pour interagir efficacement dans un contexte physique, afin d'aider réellement chaque apprenti·e skieur ou skieuse de loisir ou chaque athlète à améliorer sa technicité¹. C'est-à-dire en évitant de transmettre des savoirs et des combinaisons de techniques corporelles devenues erronées, dangereuses ou inefficaces, du fait des évolutions des paradigmes technologiques orientant les conceptions des équipements et la transformation du contexte physique de la pratique concernée (préparation des pistes). Des connaissances permettant d'imaginer qu'il est possible de se piloter sans faire pivoter ses skis actuels avec son corps et/ou ses pieds. Parce qu'ils ont été conçus pour décrire une trajectoire courbe, en modifiant seulement les positions relatives de ses segments afin d'appuyer sur son ski extérieur et de décentrer la direction de son interaction neige→skis vis-à-vis de son CG ou réciproquement, pour augmenter, diminuer ou inverser ses angle(s), quand on est constamment en contact(s) avec le manteau neigeux. Ou créer un rebond déclenchant un temps de suspension, durant lequel un vissage du tronc fléchi est préférable à des rotations de l'ensemble de son corps, pour conserver une vitesse optimale...

2.2 C'est quoi une réaction d'appui ?

Le système « corps polyarticulé d'une skieuse ou d'un skieur-skis-contexte physique » s'appuie sur le manteau neigeux, à chaque centre des pressions² (CP) de chacune de ses zones de contact constituées par la semelle de glissement de chacun de ses skis. Chaque segment de son corps muni de ses équipements³ est soumis au champ gravitationnel de la terre qui exerce une force sur son centre de gravité (poids segmentaire)⁴. La résultante des forces de gravité qui s'applique sur chacun de ses segments et sur chacun de ses équipements, s'exerce en un lieu nommé CG global qui n'a pas de réalité matérielle (dessin 1). Car sa position dans l'espace



Dessin 1 Logiciel analyse 3D Digital Modeling, Diétrich G.

¹ Les humains ont élaboré des associations de connaissances raisonnées et empiriques, toutes éprouvées par la pratique, qui assurent l'efficacité de leurs actions et permettent de concevoir, de réaliser, d'utiliser des dispositifs de caractère technique. Combarrous M., 1984, *Les techniques et la technicité*, Éditions sociales.

² En physique, on définit le centre des pressions de la surface de contact qu'un objet A partage avec un objet B, comme le lieu de cette surface où la résultante de toutes les forces unitaires que l'objet A exerce sur l'objet B et réciproquement, annule tout moment de force tendant à faire osciller chaque objet, l'un vis-à-vis de l'autre (2.6).

³ Skis, chaussures, fixations, casque, bâtons, vêtements...

⁴ Le centre de gravité d'un objet est le point d'application de la résultante de la force de gravitation ou pesanteur, qui s'exerce sur chacune de ses particules.

dépend essentiellement de la configuration des positions relatives de ses masses segmentaires munies de leurs équipements.

À l'arrêt, quand sa configuration segmentaire est constante et la surface du manteau neigeux horizontale. Ce dernier repousse le système par l'intermédiaire de ses skis, en se déformant d'autant moins que sa dureté est grande et/ou que ses skis sont "à plat" (surface maximale). Car sans cette réaction neige→skis, le système passerait au travers, et s'appuierait sur le sol (dessin 2). Comme lorsque nous continuons de marcher sur le sable de la plage qui s'enfonce sous la surface de la mer.



Dessin 2

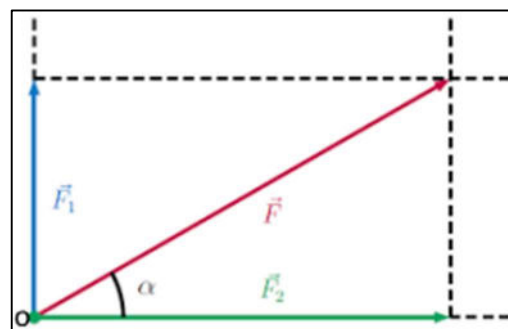
Enfin, en vertu du « principe des actions réciproques » ou troisième loi de Newton, qui spécifie que « tout corps A exerçant une force sur un corps B, se trouve réciproquement contraint par une force exercée par le corps B sur le corps A, au CP de sa zone de contact. ». La relation entre le système et le manteau neigeux n'est donc pas une réaction d'appui, mais une interaction neige→skis.

2.3 C'est quoi l'interaction neige→ski(s) ?

Dès l'instant où l'on tient compte de la pratique réelle du ski alpin. C'est-à-dire, des déplacements curvilignes quasi constants du CG global du système dans l'espace, provoqués intentionnellement par les forces musculaires (internes) de la·le pratiquant·e transformant les positions relatives de ses segments, pour modifier les caractéristiques mécaniques de chacun de ses contacts neige→ski en effectuant des déploiements et des replis de son CG par rapport à son CP ou des inclinaisons du premier vis-à-vis du second pour manœuvrer ses skis afin de modifier la trajectoire de son CP avec laquelle iel le pilote. On ne peut plus tenir compte de son seul poids pour estimer justement la grandeur de l'action exercée par le système sur le manteau neigeux. Mais des fluctuations des caractéristiques de son interaction avec celui-ci, engendrées par la skieuse ou le skieur sur ses contacts neige→ski(s) et les variations du relief de la surface sur laquelle glisse le système, qui modifient sa grandeur, sa direction et son sens.

2.4 C'est quoi une force ?

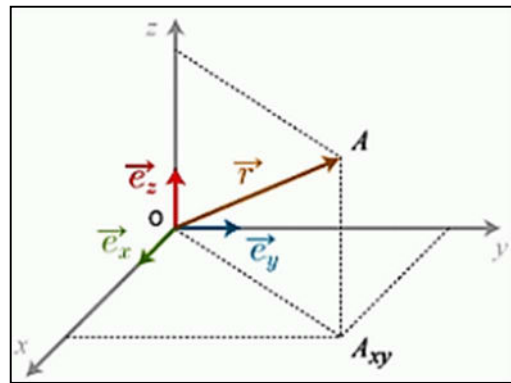
Une force est donc l'interaction qu'exerce un objet sur un autre, le champ de gravité terrestre sur le CG de notre avant-bras, un muscle sur l'insertion d'un os... Les physicien·ne·s utilisent des vecteurs¹ pour modéliser les forces, afin de réaliser des calculs en 2D, qui permettent d'imaginer justement les effets combinés qu'elles produisent dans un même plan (dessin 3). Ou pour calculer ce qui se passe en 3D dans l'espace (dessin 4).



Dessin 3

¹ Un vecteur est un segment de droite orienté, formant un être mathématique sur lequel on peut effectuer des opérations.

Un vecteur force à quatre caractéristiques : son point d'application o situé sur le système sur lequel il s'exerce ; sa direction dans laquelle il agit, c'est-à-dire l'orientation de la droite qui le porte ; son sens indiquant vers où il agit ; son intensité ou grandeur de la force \vec{F} , dont l'unité est le Newton (N). La grandeur du vecteur \vec{F} représenté sur le dessin 3 est $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Celle du vecteur \vec{r} illustré par le dessin 4 est déterminée par ses projections sur les axes x , y et z . Soit : $\vec{r}_x + \vec{r}_y = \vec{oA}$ puis $\vec{r}_z + \vec{oA} = \vec{r}$ (relation de Chasles).



Dessin 4

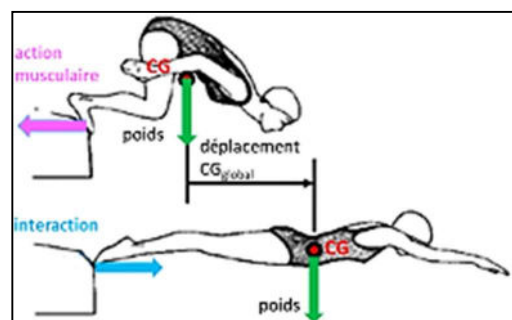
Remarque. Si F est accentué par une flèche, c'est pour noter que \vec{F} est un vecteur dont la direction et le sens sont orientés dans l'espace à trois dimensions. C'est important d'y être attentif et d'avoir précisément à l'esprit la signification de ce symbole, pour apprendre à imaginer par exemple, la conséquence mécanique de la collision d'un ski reprenant contact avec le manteau neigeux après un temps de suspension, en créant une force de freinage orienté en sens inverse du déplacement du CP neige \rightarrow ski(s), quand des forces excentrées du CG de la le pratiquant e créent des mouvements de rotation autour de celui-ci (2.11) ...

Le point d'application d'une force peut être ponctuel, comme lorsqu'une pointe appuie sur un objet ou répartie sur un volume, comme le champ gravitationnel de la terre s'exerçant sur un segment, ou sur une surface comme celle du ou des talus courbe(s) formé(s) le(s) ski(s) dans le manteau neigeux, sur lequel glisse le système en repoussant sa ou ses semelle(s) de glissement (trace.s). Ce qui impose d'avoir recours à la notion de centre de gravité (CG) pour préciser la position du lieu où s'applique la force gravitationnelle sur ce segment (poids) et de centre des pressions (CP) pour situer l'endroit où s'exerce l'interaction neige \rightarrow ski(s). On calcule la position du CG d'un segment en tenant compte de chaque force élémentaire appliquée par la gravité sur chacune de ses particules. On tient compte des forces élémentaires s'exerçant sur chaque surface élémentaire du contact entre le talus et la semelle de glissement du ski, pour définir où se situe son CP. C'est-à-dire le lieu où s'exerce l'interaction neige \rightarrow ski(s).

Remarque. Les forces apparaissent par couple formant une interaction composée d'une force d'action et d'une force de réaction de sens opposé.

2.4.1 Les forces externes

Les forces d'origine externe sont celles que l'environnement exerce sur le corps polyarticulé de la nageuse représentée sur le dessin 5. Il s'agit de la gravité (poids) et des interactions de contact qu'elle provoque entre elle et son environnement, avec ses forces musculaires. Les forces externes sont, selon Isaac Newton, celles qui sont capables de modifier l'état de repos ou de mouvement d'un objet matériel.



Dessin 5

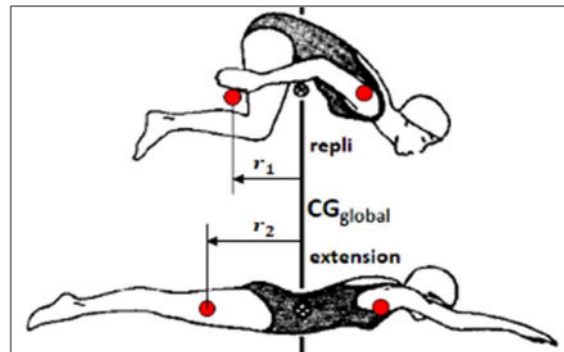
2.4.2 les forces internes

Les forces d'origine interne sont celles qu'exerce chaque muscle de la nageuse sur les os formant chaque articulation dans lesquels s'insère chacun de ses tendons (dessin 6¹). Elles ne

¹ Prévost P., 2003, *Analyse biomécanique des rotations*, Université Paris XII.

peuvent déplacer son CG sans qu'un de ses segments soit en contact avec le bord de la piscine. Parce qu'étant de sens opposé, elles s'annulent. Ce sont donc les forces hydrodynamiques d'origine externe qui lui permettent de nager.

Similairement, elles ne modifient pas la trajectoire du CG d'un skieur ou d'une skieuse dont le contact avec le manteau neigeux est interrompu (temps de suspension). Néanmoins, ce sont ses forces internes qui ellui permettent de conserver un glissement bipède, en transmettant partiellement ou totalement, d'un segment à l'autre, en fonction de la raideur de chaque articulation concernée, les forces externes qu'exerce son environnement.



Dessin 6

2.5 C'est quoi la masse ?

La masse est la quantité de matière d'un objet ou d'un système. Elle se mesure généralement en kilogrammes. Sa propriété essentielle est qu'elle s'oppose à toute variation de la vitesse de son CG et à toute modification de sa trajectoire, lorsqu'une force s'exerce sur lui. Conformément à la loi d'inertie découverte par Galileo Galilée et formalisée par Isaac Newton. Sa grandeur est intrinsèque à l'objet. La masse d'un système formé de plusieurs parties est la somme des masses de ces parties. Par exemple, la masse du système « *corps polyarticulé de la-le pratiquant-e et de ses skis* » est égale au total des masses de tous ses segments et de tous ses équipements.

2.6 C'est quoi l'inertie d'un objet ?

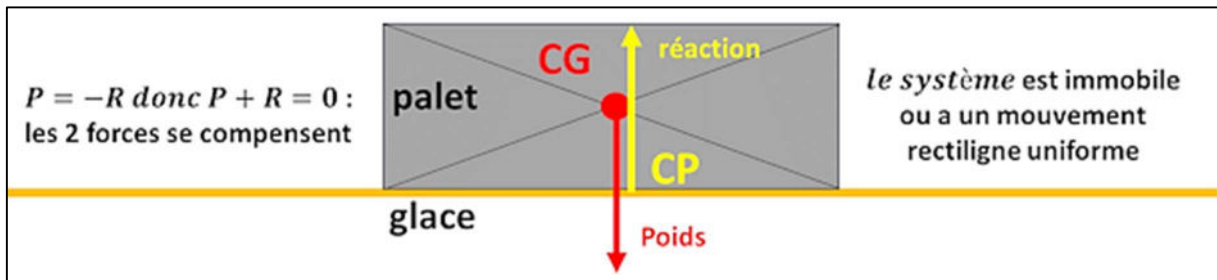
Le concept d'inertie d'un objet et d'un système diffère suivant la façon dont il se déplace. Quand il est animé d'un mouvement de translation¹ linéaire, son inertie dépend directement de la grandeur de sa masse. S'il est animé d'un mouvement de rotation, son inertie dépend de la répartition de sa masse par rapport à son axe ou de son point de rotation. Ou être animé d'un mouvement curviligne combinant un déplacement linéaire et une rotation (2.13).

Remarque. Comme nos actions s'effectuent toujours dans les trois dimensions de l'espace (3D). Pour éviter d'avoir à utiliser une écriture mathématique complexe. Nous raisonnerons le plus souvent en deux fois deux dimensions (2D). C'est-à-dire en vue de face et en vue de côté. Mais il ne faut jamais oublier de recombinaison ces raisonnements, pour les étudier rigoureusement par rapport à un repère fixe, afin de les objectiver rigoureusement. Dans le but d'apprendre à répondre justement à la question : pourquoi les athlètes qui montent régulièrement sur les podiums agissent-ils ainsi plutôt qu'autrement ? De manière à justifier explicitement les conseils que nous adressons aux apprenti·e·s skieurs et skieuses de loisir et aux compétiteur·ice·s, dont nous avons pour responsabilité de les aider à améliorer réellement leur technicité.

2.6.1 Le principe d'inertie

Le principe d'inertie peut être mis en évidence en posant un palet sur la glace d'une patinoire. Ce faisant, la réaction de la glace sur le palet compense la force que le champ de gravité de la terre exerce sur son centre de gravité (poids) et l'on peut négliger ses forces de frottement avec la glace et l'air (dessin 7). Dans cette situation que l'on nomme « *pseudo-isolée* », si aucune

¹ Le déplacement d'un objet est une translation, quand les droites reliant chacun de ses points, entre deux positions, sont parallèles.



Dessin 7

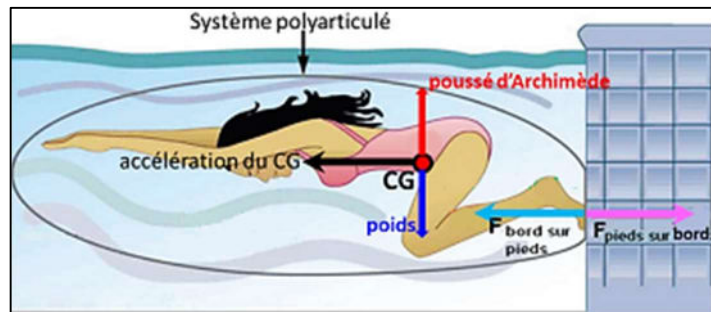
autre force extérieure ne s'applique sur lui, il ne peut avoir que deux états : arrêté ou à vitesse constante avec une trajectoire rectiligne à vitesse uniforme. Ce qu'énonce le principe d'inertie formalisé par Isaac Newton. Qui s'écrit actuellement : « Dans un référentiel galiléen (fixe), si la somme des forces extérieures $\sum \vec{F}_{ext}$ appliquées à un système mécanique est nulle ($\sum \vec{F}_{ext} = 0$), son centre d'inertie G est au repos ou possède un mouvement rectiligne uniforme. » Le principe d'inertie est ce qui explique qu'un skieur ou une skieuse continue de glisser, sur une certaine longueur, en arrivant avec les skis "à plat" sur un "replat" (frottement neige \rightarrow ski(s)).

2.6.2 C'est quoi la quantité de mouvement d'un système en translation rectiligne ?

La quantité de mouvement d'un objet ou d'un système en translation rectiligne, formalisée par Isaac Newton, est le produit de sa masse m par la vitesse de son CG \vec{v}_{CG} . Que l'on traduit en langage mathématique par : $\vec{p} = m \times \vec{v}_{CG}$. Un objet n'a donc pas besoin d'une force pour se mouvoir, car son mouvement comme son immobilisme caractérisent l'état mécanique de sa masse. La quantité de mouvement se conserve, l'immobilité aussi.

2.6.3 Le principe fondamental de la dynamique des objets animés d'un mouvement de translation rectiligne

Observons le dessin 8¹. Notons qu'à l'instar du palet illustré par le dessin 7, le poids de la nageuse et la poussée d'Archimède exercée par l'eau sur son corps se compensent. On la dit alors pseudo isolée de son environnement, parce que nous estimons, pour notre raisonnement actuel, qu'il est possible de négliger sa force de frottement corps \rightarrow eau.



Dessin 8

Dans cette situation, si la nageuse pousse avec ses pieds sur le bord de la piscine, la résultante de ses forces internes (musculaires) crée, par réaction (2.2), une force externe \vec{F} qui change l'état mécanique du centre de gravité de son corps en modifiant sa vitesse. « Le principe fondamental de la dynamique des mouvements de translation rectiligne » ou 2^{ème} loi de Newton, prédit la grandeur de ce changement de vitesse créé par la résultante de ses forces musculaires, avec la relation : $\sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}$

Avec $\sum F_{ext}$ la grandeur en Newton N , de la résultante des forces externes créée par l'interaction qui s'exerce sur chacun de ses pieds, en réaction à ses forces musculaires internes s'appliquant sur le bord de la piscine, modifie la vitesse du CG de la masse m de son corps en kilogrammes kg (quantité de matière), avec une accélération \vec{a} , en mètres par seconde à chaque

¹ D'après Khan academy, Sciences Physiques 5e année secondaire, Lois de Newton.

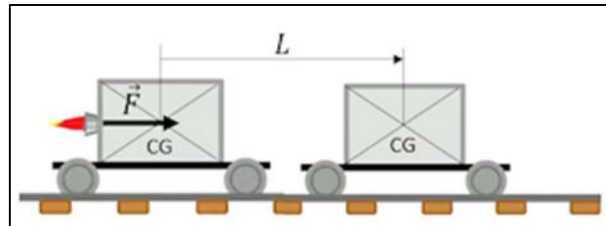
seconde ou m/s/s ou encore m/s². Dont la grandeur moyenne entre l'instant t_2 où il a acquis une vitesse v_2 et l'instant t_1 où il avait une vitesse v_1 est $a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$ ou $a = \frac{\Delta t}{\Delta v}$

Autrement dit, l'accélération \vec{a} de son CG est d'autant plus grande que la résultante $\overrightarrow{\sum F_{ext}}$ des forces externes l'est aussi ou que sa masse m est petite et réciproquement. Car : $\vec{a} = \overrightarrow{\sum F_{ext}}/m$

2.7 C'est quoi le travail linéaire d'une force ?

Le dessin 9¹ illustre la notion de travail mécanique. C'est le produit de la longueur du déplacement en translation qu'effectue le centre de gravité d'un objet, ici un wagonnet, quand une force extérieure F_{ext} . s'exerce sur lui. Ici, celle produite par la fusée. Sa formalisation mathématique est donc : $W = F_{ext} \times L$

Avec W , qui symbolise la quantité de travail en Joules. F_{ext} . la grandeur de l'interaction produite par la force extérieure en Newton. L la longueur du déplacement du CG de l'objet en mètres.



Dessin 9

Le travail d'une force extérieure fournit ou retire de l'énergie mécanique à l'objet ou au système sur lequel elle s'exerce.

Connaître précisément ce qu'est la notion de travail effectué par une interaction qu'engendre une force est d'une grande importance pour les éducateur·ice·s sportif·ve·s de ski alpin. Parce qu'elle leur permet d'objectiver leurs réflexions à propos des *tempi* des techniques qu'il est préférable d'utiliser pour être performant·e. Notamment celles qui ont une influence sur les grandeurs des forces de frottement neige→ski et air→système² qui, parce qu'une force de frottement est toujours orientée en sens inverse du déplacement du système sur lequel elle s'applique, tend à faire décroître la quantité d'énergie mécanique dont il est doté, du fait de sa hauteur (énergie potentielle de position). Parce qu'en en dissipant une partie sous forme de chaleur dans le manteau neigeux et dans l'air, elle devient indisponible pour être transformée en vitesse par glissement.

Dans le chapitre 4, nous développerons les notions de composantes de l'énergie mécanique, sa transformation et sa conservation. Mais nous voyons d'ores et déjà que deux paramètres sont à prendre en compte : la grandeur de la force engendrant l'interaction neige→ski(s) et la distance pendant laquelle elle "frotte" sur le manteau neigeux. Ce qui pose une question cruciale à l'intervenant·e : dans cette courbe, vaut-il mieux appuyer fort sur une distance courte ou moins fort sur une longueur plus longue ? Un troisième paramètre plus habituel doit être ajouté à ces raisonnements : celui du coefficient de frottement lié à l'état du manteau neigeux, à celui de la surface des semelles de glissement des skis (rugosité) et à leur fartage, qui participent à la détermination de la grandeur de la force de frottement neige→ski(s).

¹ D'après Clipédia, la science et moi.

² Barelle C., 2003, *Modélisation dynamique du geste sportif à partir de paramètres posturaux : application à l'entraînement en ski alpin*, Université Lyon 1.

2.8 C'est quoi une impulsion linéaire ?

On appelle impulsion linéaire I , la quantité de mouvement $\vec{p} = m \times \vec{v}_{CG}$, que transfère sur un objet ou un système, une force extérieure $\vec{F}_{ext.}$, dont la direction est centrée sur le CG de sa masse m constante, pendant un intervalle de temps $\Delta t = t_{final} - t_{initial}$

Si la grandeur de la force est constante :

$$\text{à } t_{initial}, \vec{p}_{initial} = m \times \vec{v}_{CG\ initial}$$

$$\text{à } t_{final}, \vec{p}_{final} = m \times \vec{v}_{CG\ final}$$

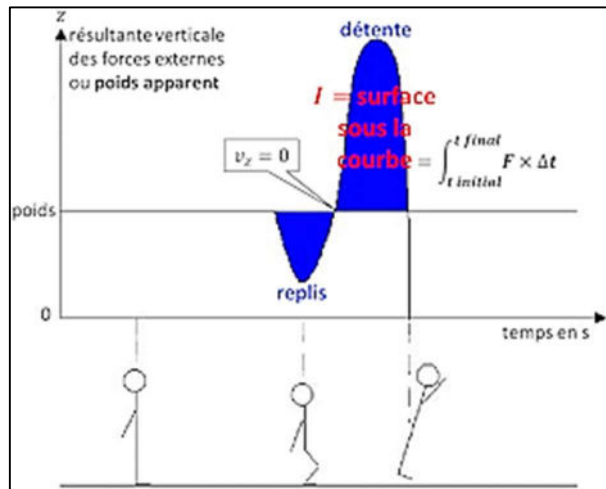
Donc la grandeur de la quantité de mouvement transférée par l'impulsion correspond à : $\vec{p}_{final} - \vec{p}_{initial} = m \times \vec{v}_{CG\ final} - m \times \vec{v}_{CG\ initiale}$. Soit $\Delta\vec{p} = m \times \vec{v}_{CG\ final} - \vec{v}_{CG\ initiale}$ Soit : $\Delta\vec{p} = m \times \Delta\vec{v}$

Mais dans la nature, la grandeur de la force générant une impulsion est rarement constante et instantanée, notamment lorsqu'il s'agit de celle qu'un·e humain·e génère quand iel désire sauter à pieds joints. Alors, mesurer sa grandeur réelle suppose d'avoir recours à une plate-forme de force (graphique 1¹), et sa modélisation mathématique devient : $I = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} F \times (t_{final} - t_{initial})$ (1) ou : $I = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} F \times (dt)$ (1)

Remarque. Si la·le sauteur·euse ne marque pas un temps d'arrêt à la fin de sa flexion, la grandeur de son impulsion comprendra, en plus de la grandeur de la résultante de ses forces musculaires, celle qu'engendre la restitution de la quantité d'énergie potentielle élastique qui s'est accumulée dans ses muscles au cours du freinage de son repli (2.9).

2.8.1 Saut à pieds joints, ou quand l'humain·e centre sur son CG, de la direction de la force avec laquelle iel crée son impulsion

Quand l'humaine illustrée par le dessin 10 décide d'effectuer un saut à pieds joints. Comme son système nerveux a automatisé cette activité au cours de ses multiples expérimentations. Il la simule proactivement² à son insu, en réactivant des réseaux neuronaux associant l'action motrice et le ressenti des résultats d'autres bondissements ayant visé similairement une hauteur maximale, parce qu'ils ont été déjà impliqués lors d'expérimentations antérieures semblables situées dans des contextes analogues. Celui-ci augmente proactivement l'acuité des mécanorécepteurs de chacune de ses soles plantaires. Ceux avec lesquels iel égalise ses interactions sol↔pied et les localise juste en arrière de ses orteils (coussinets), pour optimiser les centrages transversal et longitudinal de la direction de son interaction s'exerçant sur son CP, sur son CG (3.2.10). De manière à sauter verticalement et à percevoir précisément l'écart éventuel entre la conséquence perçue de ce saut et celle qu'elle avait prédite, qui générerait un feedback capable



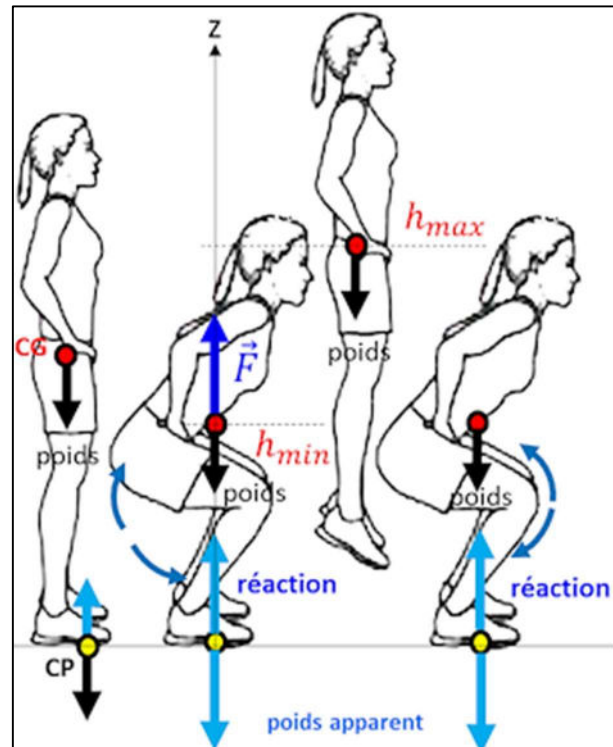
Graphique 1

¹ Durocher, C., 2005, *Analyse, modélisation et simulation de l'impulsion au sol dans les activités physiques*, Université Rennes 2.

² Proactif signifie agir en prévision d'un résultat anticipé par la simulation souvent inconsciente d'une manière de faire ou d'une interaction, qui a déjà été ressentie comme conséquence d'une expérimentation semblable dans un contexte analogue.

de la minimiser lors d'autres expérimentations, vers les zones sensorimotrices de son système nerveux qui ont initié celle-ci¹.

Alors, à l'instant où elle mobilise ses muscles pour exercer sur son support, avec la résultante de ses forces internes, une action durant un intervalle de temps (impulsion linéaire), dont la réaction propulse le CG de son corps vers le haut (interaction) avec une accélération plus grande que celle de la gravité qui, en lui transmettant une énergie cinétique (vitesse), se métamorphose en énergie potentielle de position (hauteur), en effectuant un travail de son poids au cours d'une translation verticale le menant à une altitude maximale h_{max} , qui se retransforme en énergie cinétique en descendant exactement sur le même lieu, jusqu'à ce qu'une synergie musculotendineuse freine son CG au cours d'un choc mou avec le sol, qui la transforme en chaleur. Si elle n'a pas décidé de créer un choc élastique, en engendrant un cycle étirement-renvoi avec réflexe myotatique qui la fait rebondir (2.9.2).



Dessin 10

Sachant qu'à l'instant où elle commence à exercer sa force de poussée, la quantité de mouvement de son CG est simplement $\vec{p} = m \times \overrightarrow{v_{CG\ décollage}}$, du fait que sa $vitesse_{initiale} = 0$.

Il est alors possible, si l'on a mesuré la grandeur de l'impulsion I à l'aide de la méthode évoquée précédemment (2.7) et la masse de l'athlète avec la même plateforme de force ($Poids = m \times g \Rightarrow m = Poids/g$), de déduire la vitesse verticale de son CG $\overrightarrow{v_{CG\ z\ dec}} = \vec{p}/m$, à l'instant où son contact s'interrompt avec son support, qu'enregistre la plateforme de force (décollage). Car, en intégrant l'équation 1 (2.8), le déplacement vertical de son CG sur l'axe z est :

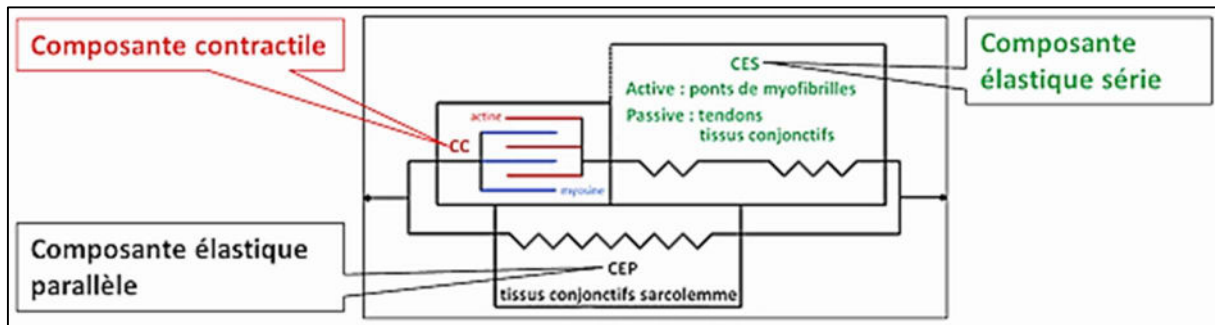
$$hauteur\ CG_{max} - hauteur\ CG_{min} = vitesse\ décollage^2 / 2g^2$$

2.9 L'énergie potentielle élastique

Dans les paragraphes qui suivront, nous symboliserons la liaison musculosquelettique entre le centre des pressions (CP) de l'humain-e interagissant avec son support et son centre de gravité (CG), celle qui lui permet de conserver une marche, une course, un glissement bipède... en faisant usage de ses forces internes, sous la forme d'un ressort. Un ressort biomécanique dont la raideur macroscopique peut être améliorée en recourant à des séances spécifiques d'éducation

¹ Clark A., *Une vision unifiée du cerveau-corps-environnement, in le cerveau à tous les niveaux*, 2018.

² Samozino P., 2009, *Capacités mécaniques des membres inférieurs et mouvements explosifs, Approches théoriques intégratives appliquées au saut vertical, Sciences du Vivant [q-bio], Université Jean Monnet - Saint-Etienne*.



Dessin 12

physique et de renforcement musculaire, notamment pliométrique, amorti par une viscosité intrinsèque.

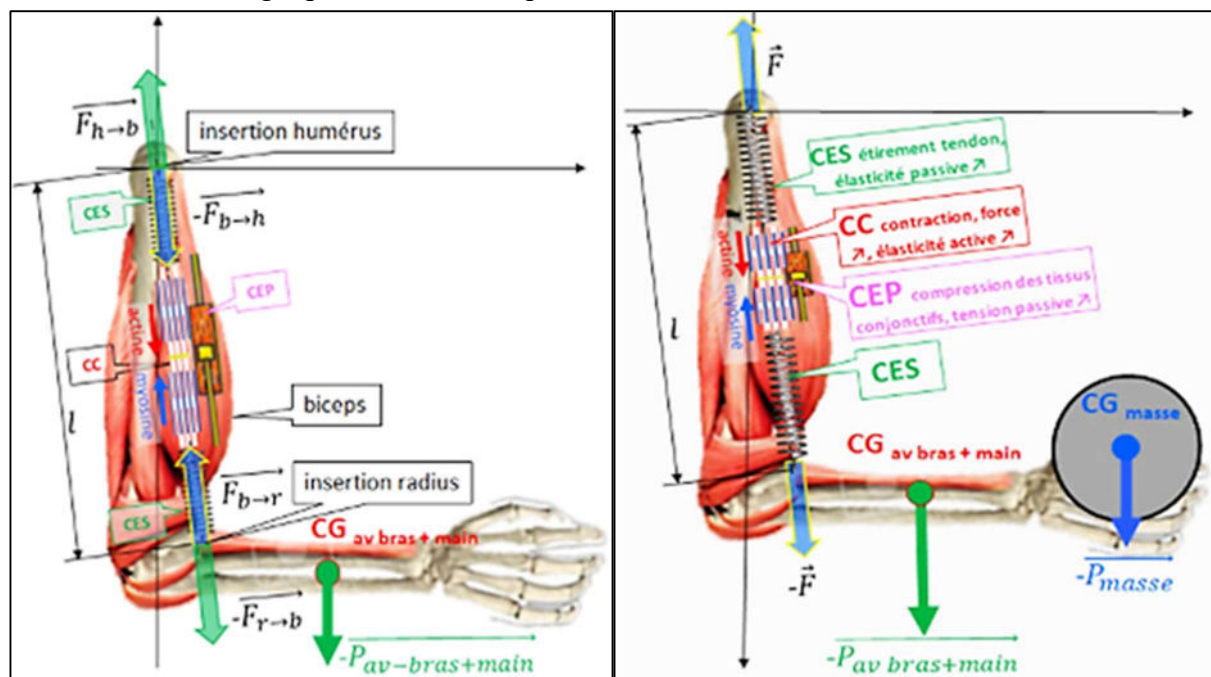
2.9.1 La viscoélasticité musculotendineuse : le modèle de Hill

Le modèle de Hill décrit les trois composantes biologiques produisant la force qu'exerce un complexe musculotendineux entre ses deux insertions osseuses (dessin 11).

La composante contractile (CC) est localisée au niveau des sarcomères. Elle est produite par le processus de génération de la force musculaire engendrée par des ponts formés entre les molécules d'actine et de myosine.

La composante élastique parallèle (CEP) est passive. Elle est générée par les enveloppes musculaires et du tissu conjonctif.

La composante élastique série (CES) assure le lien entre la composante contractile et le squelette. Elle est constituée d'une fraction active localisée au niveau des ponts actine-myosine et d'une fraction passive qui correspond essentiellement aux structures tendineuses. La CES est l'élément de transmission de la force contractile, qui tient compte du processus de stockage-restitution de l'énergie potentielle élastique¹.



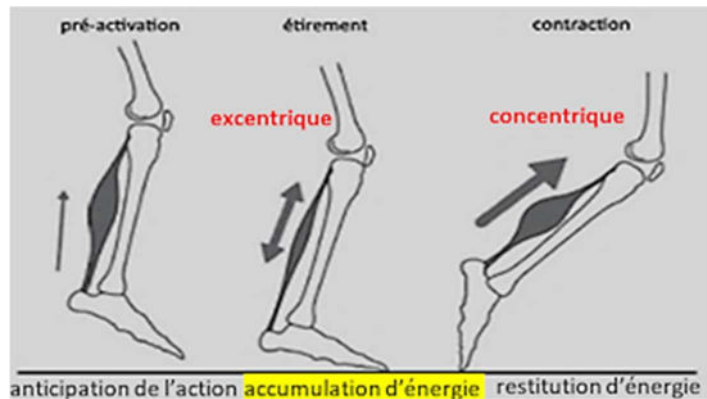
Dessin 11

¹ Rabita G., Couturier A., Lambertz D., Métais F., Gadal M., Blonde M., 2006, Élasticité musculotendineuse et raideur musculosquelettique globale chez les pongistes de haut-niveau, Rapport du projet de recherche MJSVA N° 04-013, Institut National du Sport et de l'Éducation Physique (INSEP).

Le dessin 12 illustre à grands traits le fonctionnement d'un complexe musculotendineux : celui du biceps brachial. L'image de gauche montre comment contribuent les trois composantes décrites par le modèle de Hill, pour satisfaire à la consigne : le bras et l'avant-bras de l'expérimentateur·ice doivent former un angle droit au niveau de leur articulation (coude). L'image de droite décrit la façon dont s'autoorganisent les éléments constituant le complexe, pour satisfaire à la consigne, malgré la surcharge appliquée sur la main. On voit qu'un raccourcissement de la CC vient compenser les étirements de CES, alors que la CEP augmente. Cette compensation se manifeste par l'augmentation du volume du biceps (boule).

2.9.2 Le cycle étirement-renvoi avec réflexe myotatique

Il a été mesuré que la force produite lors d'un mouvement augmente, quand les muscles qui l'engendrent ont été préétirés par des muscles antagonistes, avant qu'ils ne soient mis en tension excentrique par l'objet ou le contexte avec lequel l'organisme interagit. Car au cours d'un cycle étirement-raccourcissement, la quantité d'énergie potentielle élastique qui s'accumule dans les structures musculotendineuses pendant la phase d'étirement excentrique, peut augmenter sa grandeur en se restituant lors de la phase de raccourcissement concentrique. Si aucun relâchement la dissipant sous forme de chaleur dans l'atmosphère n'a lieu, au cours de cette alternance¹ (dessin 13). C'est le réflexe myotatique qui déclenche involontairement la contraction des muscles agonistes, en réponse à leurs propres étirements.



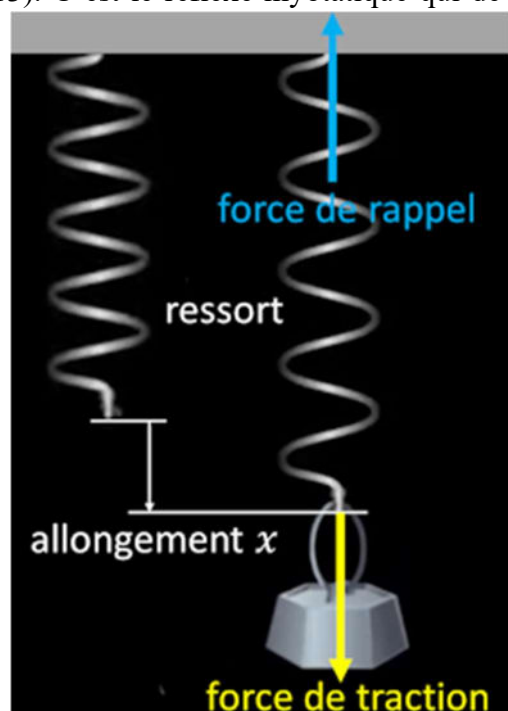
Dessin 14

L'expérimentation décrite par le dessin 34 peut nous servir d'exemple pour mettre en évidence le fait qu'une quantité d'énergie potentielle élastique s'accumule dans le biceps brachial, sous l'effet d'une force exercée par une tierce personne sur la main de l'expérimentateur·ice qui, tout en lui répétant la consigne : maintien l'angle de ton coude à 90°. La lâche de manière impromptue. On constate alors un vif repli de l'avant-bras sur le bras, qui traduit la restitution de l'énergie potentielle élastique accumulée dans le biceps brachial. Le recours à une tierce personne effectuant la manipulation est impératif, afin d'éviter que l'expérimentateur·ice ne puisse anticiper l'interruption de la contrainte.

L'expérimentation décrite par le dessin 34 peut nous servir d'exemple pour mettre en évidence le fait qu'une quantité d'énergie potentielle élastique s'accumule dans le biceps brachial, sous l'effet d'une force exercée par une tierce personne sur la main de l'expérimentateur·ice qui, tout en lui répétant la consigne : maintien l'angle de ton coude à 90°. La lâche de manière impromptue. On constate alors un vif repli de l'avant-bras sur le bras, qui traduit la restitution de l'énergie potentielle élastique accumulée dans le biceps brachial. Le recours à une tierce personne effectuant la manipulation est impératif, afin d'éviter que l'expérimentateur·ice ne puisse anticiper l'interruption de la contrainte.

2.9.3 L'élasticité mécanique ou loi de Hooke

L'élasticité mécanique est la propriété qu'ont certaines matières de reprendre, au moins partiellement, leur forme et leur volume primitifs, quand la force qui s'exerçait sur eux cesse d'agir.



Dessin 13

¹ Laffaye G., 2013, *Prédiction et modélisation de la performance sportive : une approche biomécanique intégrative*, HDR Université Paris Sud.

La loi de Hooke formalise le comportement mécanique des solides élastiques soumis à des contraintes. Elle modélise la relation entre la grandeur de la raideur k constante d'un ressort idéal fixé à un point immobile à l'une de ses extrémités, tandis qu'il est contraint par une force de traction F à son autre extrémité, qui l'allonge d'une longueur x . La grandeur de la raideur du ressort est : $k = F/x$ (dessin 14). Tant qu'elle est réversible, cette déformation accumule une quantité d'énergie potentielle élastique $J_{ep} = 1/2 k \times x^2$ dans sa structure, qu'il restitue dès que la contrainte cesse.

2.9.4 La raideur musculaire analytique

Si l'on mesure la raideur d'un muscle unitaire. On constate qu'elle n'est pas constante comme l'est celle d'un ressort mécanique, mais croît lorsque la tension développée par le muscle augmente (dessin 15). L'aire recouverte de pointillés correspond à l'énergie potentielle élastique accumulée dans le muscle.

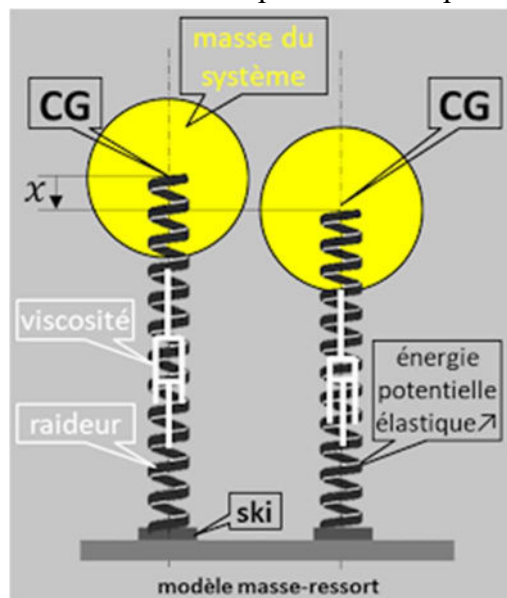


Dessin 15

2.10 Le modèle masse-ressort

Quand on mesure la raideur macroscopique d'un organisme humain. C'est-à-dire celle qui résulte de la combinaison de toutes les raideurs musculaires modifiant celles de toutes les articulations qu'il sollicite quand il reprend par exemple, contact avec le sol après un saut à pieds joints (2.7.1). On constate qu'étant constante, comme celle d'un ressort mécanique, du fait de l'organisation synergique et proactive de son système musculo-squelettique, qu'apprend son système nerveux depuis ses premiers pas, ses premières courses, ses premiers sauts..., il est possible de modéliser sa viscoélasticité musculotendineuse globale par un système masse-ressort¹ dont la raideur peut être modifiée par une préparation physique spécifique et l'amortissement par l'échauffement² (dessin 38). Comme preuve que ce qui définit un système complexe, vient du fait que les caractéristiques du tout ne sont pas situées dans ses parties, mais dans leurs interactions³.

Ainsi, conformément au modèle du pendule inversé de la régulation posturo-cinétique du système pratiquant e-skis proposé au paragraphe 2.15 (par analogies avec les dessins 34 et 35). La modélisation



Dessin 16

¹ Laffaye G., 2013, *Prédiction et modélisation de la performance sportive : une approche biomécanique intégrative*, HDR Université Paris Sud.

² Zerkouri S., 2014, *L'impact de deux types d'échauffements "classique et russe" sur la performance sportive*, direction Cometti C., Université de Bourgogne, Centre d'Expertise de la Performance Gilles Cometti.

³ Morin E., 2005, *Introduction à la pensée complexe*, Gallimard, Point Essais.



Dessin 17

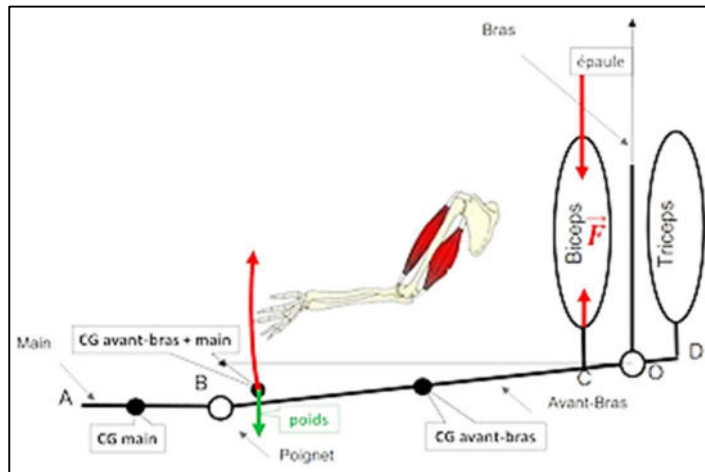
technologique de la pratique “ski alpin” doit intégrer le fait qu’il s’agit d’un système essentiellement instable, composé du corps polyarticulé, proactif et viscoélastique de la le pratiquante, qui interagit avec son contexte physique, notamment l’air et le manteau neigeux par l’intermédiaire d’un ou deux ski(s). Justifié par le fait que la position de son centre de gravité (CG) est située au-dessus de son centre des pressions (CP) par rapport au centre de la terre. Une instabilité inhérente à la bipédie, qu’à l’instar de la le marcheur·euse, de la le coureur·euse, la skieuse ou le skieur utilise pour se piloter en anticipant autant que possible les perturbations d’origine contextuelles et les effets de celles internes qu’iel génère en manœuvrant ses skis pour modifier les caractéristiques de son interaction neige->ski(s). Celles avec lesquelles iel guide son CG sur la trajectoire désirée ou prescrite par la le traceur·e de la compétition à laquelle iel participe. En créant des décentrement engendrant des moments cinétiques (2.11.4) qui la le fait osciller dans les trois dimensions de l’espace (3D), autour de son CP quand il existe ou de son CG quand celui-ci s’interrompt, afin de conserver un glissement bipède (dessin 17 en vue de dessus).

2.11 C’est quoi le moment d’une force ?

En observant la façon dont nous faisons bouger chacun de nos segments en contractant certains de nos muscles. Nous constatons que tous leurs mouvements sont des rotations autour d’une articulation. C’est le cas d’une de nos jambes oscillant autour de l’axe articulaire de son genou, d’un de nos avant-bras autour de son coude, d’un de nos bras autour de son point de rotation qu’est son épaule ...

C’est aussi un moment de force qui qu’utilise un·e gymnaste pour effectuer un saut périlleux (2D), en décentrant la direction de sa force d’appui par rapport à son CG. Et encore un moment de force dont fait usage un skieur ou une skieuse utilisant la même ruse technologique pour se faire osciller latéralement en 2D autour de son CP neige->skis quand il existe (contact neige->ski(s)) ou en 3D autour de son CG, au cours du temps de suspension qu’iel provoque en déclenchant un rebond, comme nous le verrons dans le chapitre étudiant les mouvements curvilignes (2.13). Pour un·e éducateur·ice sportif·ve, savoir précisément ce qu’est un moment de force est donc indispensable à l’exercice de son métier.

On appelle “*moment*”, toute cause mécanique capable de faire tourner un objet ou un système, en 2D autour d’un axe ou en 3D autour d’un point (pivot). Le dessin 18 illustre ce concept, parmi les plus importants pour la biomécanique. Il précise, par exemple, que la force \vec{F} qu’exercent les tendons du biceps, dont l’un fait partie de la coiffe de l’épaule et l’autre, s’insère sur le radius et le cubitus, au point C , à une distance OC de l’axe o du coude, crée un moment M par rapport à l’axe o , soit M_o , dont

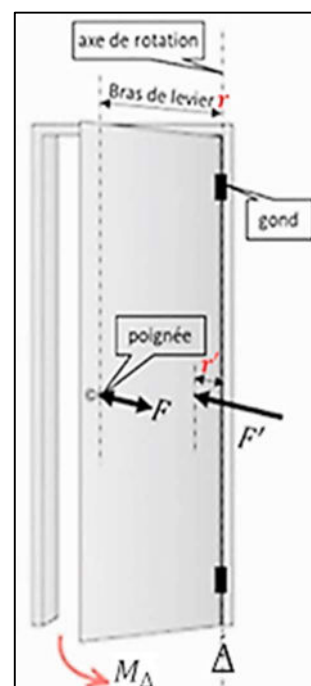


Dessin 19

la grandeur est $M_o = \vec{F} \wedge \overrightarrow{OC}$ qui tend à faire tourner le CG de l’ensemble avant-bras + main autour du coude.

Le signe \wedge symbolise qu’il s’agit d’un produit vectoriel, qui précise que l’axe de rotation de ce moment est perpendiculaire au plan formé par l’axe avant-bras + main et l’axe bras. C’est-à-dire, celui de l’articulation du coude.

Prenons l’exemple trivial de la porte de notre salle de bain tournant autour de l’axe Δ de ses gonds, pour expliciter les relations entre les termes de cette équation. C’est en exerçant avec notre main une force F sur sa poignée située à une distance r de l’axe Δ que nous l’ouvrons ou la fermons usuellement (dessin 19). Parce qu’en agissant ainsi, nous créons un moment M_Δ dont la grandeur est $M_\Delta = F \wedge r \times \sin \alpha$. Quand la direction de la force est perpendiculaire au bras de levier r , $\sin \alpha = 90^\circ = 1$. Donc $M_\Delta = F \wedge r \times 1$.

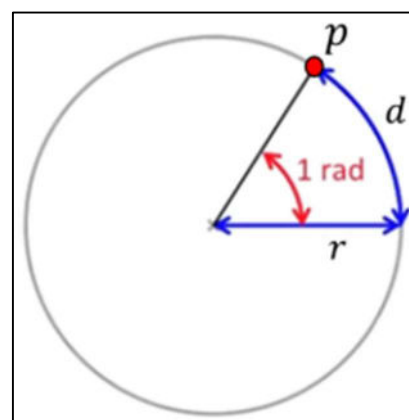


Dessin 18

Ce modèle mécanique rend bien compte de ce que nous ressentirions si nous manœuvrions la porte à une distance de l’axe Δ $r' < r$. Car alors, la grandeur de la force F' que nous devrions exercer devrait être d’autant plus grande que le bras de levier r' serait petit. Il révèle donc pourquoi cela devient impossible de la faire tourner en la poussant directement sur l’axe Δ . Puisqu’alors, si $r' = 0$, $M_\Delta = F \wedge 0 \times 1 = 0$. Et montre aussi qu’en la poussant perpendiculairement à son champ, M_Δ devient nul, du fait que la direction de F passant par l’axe des gonds (centré), forme un angle nul avec le bras de levier et qu’ainsi, $\sin 0^\circ = 0$, $M_\Delta = F \wedge r \times 0 = 0$

2.11.1 Quelles caractéristiques définissent un mouvement angulaire ?

On qualifie d’angulaire, le mouvement d’un point p tournant à équidistance d’un même axe ou d’un même point. L’unité d’un déplacement angulaire α est le radian (*rad*). Il est symbolisé par celui du point p illustré par le dessin 20. Le déplacement angulaire du point p est égal à 1 radian, quand il a parcouru un arc dont la longueur d est égale au rayon r de sa trajectoire.



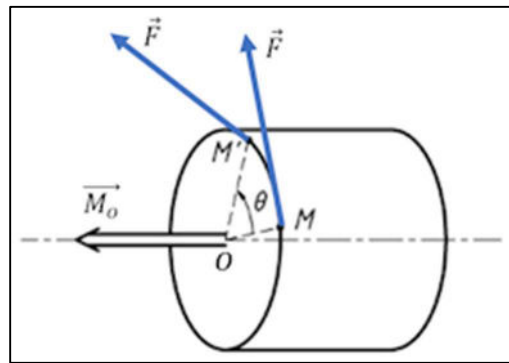
Dessin 20

Donc, quand $d = r$, $\alpha = 1 \text{ rad}$. Ainsi, quand il effectue un tour, il parcourt un chemin égal à la longueur de la circonférence C du cercle constituant sa trajectoire. Soit *un tour* $= C = 2 \times \pi \times r = 2 \times 3,14 \times r = 6,28 \text{ rad}$ car $\pi = \text{pi} = 3,14$. Le radian est une unité pratique, parce qu'elle définit directement le déplacement angulaire d'un point ainsi que la longueur du chemin qu'il parcourt, en fonction du rayon r de sa trajectoire¹.

La vitesse angulaire du point p est habituellement désignée par la lettre oméga ω qui s'exprime en radian par seconde rad/s et son accélération ou sa décélération angulaire par α , qui symbolise la variation de celle-ci en radian par seconde ou rad/s et par seconde, qui s'écrit rad/s^2

2.11.2 C'est quoi le travail angulaire d'une force ?

Similairement au travail linéaire d'une force \vec{F} , son travail angulaire est le produit du moment qu'elle exerce sur un objet ou un système, du fait que son point d'application est situé à une distance \overline{oM} de l'axe o autour duquel il tourne d'un angle θ . Soit : $W = M_o F \times \theta$ (dessin 21)

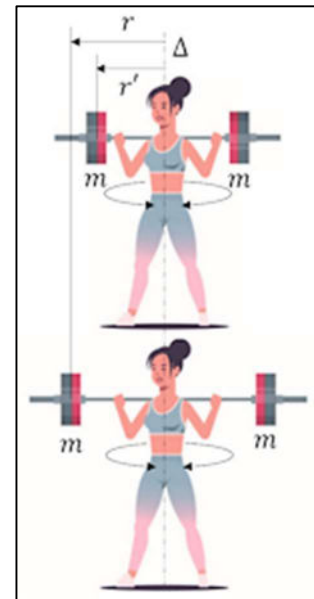


Dessin 21

Le travail angulaire d'un moment de force extérieure, fournit ou retire de l'énergie mécanique à l'objet ou au système sur lequel elle s'exerce.

2.11.3 C'est quoi le rayon de giration d'un système animé d'un mouvement angulaire ?

Nous avons vu que l'inertie d'un objet animé d'un mouvement de translation dépend proportionnellement de sa masse en kg. Ainsi, plus sa masse est grande, plus il est difficile à déplacer (2.6). Mais pour déterminer l'inertie d'un objet animé d'un mouvement angulaire, nous devons tenir compte d'un ressenti empirique. En comparant, par exemple, dans les deux situations décrites par le dessin 22, la grandeur de l'effort que nous devons produire pour faire osciller, avec les obliques de notre ceinture abdominale, l'altère que nous portons. Nous constatons qu'il est plus difficile de le faire osciller, quand la distance séparant le CG de chaque masse m de l'axe Δ autour duquel il tourne, est plus grande (r , dessin du bas) que lorsqu'elle est plus petite (r' , dessin du haut). Autrement dit, l'éloignement de la répartition des masses constituant un objet animé d'un mouvement angulaire autour d'un axe Δ ou d'un point o détermine la grandeur de son inertie. Des humains ont donné à cette distance le nom de "rayon de giration", habituellement symbolisé par la lettre r . Le rayon de giration correspond donc à la distance séparant de son axe ou de son point de rotation, le lieu théorique où, si toute sa masse en kg y était concentrée, ses caractéristiques mécaniques seraient identiques².



Dessin 22

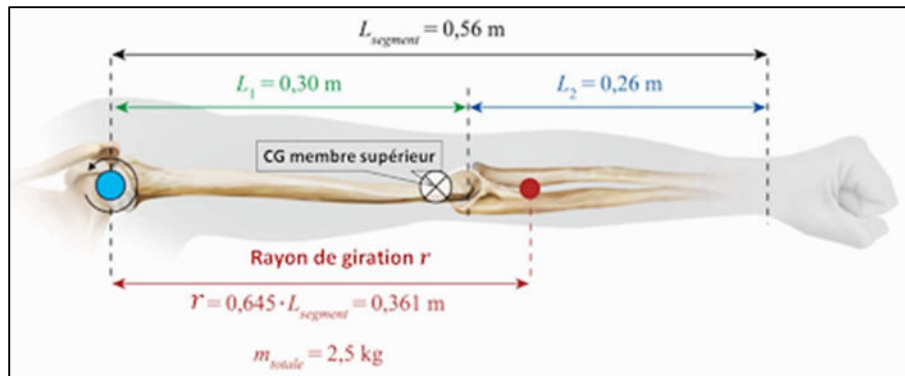
Il est possible de calculer la position de ce lieu, quand il s'agit d'un solide de composition homogène, ayant des caractéristiques géométriques pouvant être formalisées mathématiquement. Mais lorsqu'il s'agit d'objet dont la composition est hétérogène et la forme complexe comme le sont les segments des organismes, leurs rayons de giration sont déterminés

¹ On peut par exemple convertir un angle de 30 degrés en radians. Comme un demi-tour $180^\circ = \pi \text{ rad}$, puisque $360^\circ = 2\pi \text{ rad}$, $30^\circ \times \pi/180 = 30 \times 3,14159/180 = 0.5235 \text{ rad}$

² http://staps.toile-libre.org/Semestre%201/Unit%E9%203/Calcul_de_Moment_d_inertie_Exo_type.pdf

expérimentalement, et font l'objet de publications statistiques, sous forme de tableaux édités dans des ouvrages dédiés à la biomécanique.

Prenons l'exemple du membre supérieur d'un être humain, coude en extension, illustré par le dessin 23¹. Lorsqu'il le fait tourner en 3D autour de son épaule, la grandeur de son rayon de giration est égale à 0,645 fois sa longueur épaule-



Dessin 23

poignet. La grandeur de son rayon de giration serait inférieure si son coude était fléchi, parce qu'alors la répartition des masses de son bras, de son avant-bras et de sa main, serait modifiée. Elle le serait aussi, pour la même raison, s'il tournait autour de son axe longitudinal.

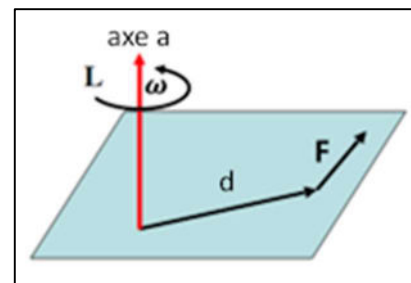
2.11.4 C'est quoi le produit d'inertie d'un objet animé d'un mouvement angulaire ?

Le produit d'inertie d'un objet ou d'un système animé d'un mouvement angulaire par rapport à son axe de rotation a , habituellement désigné par le symbole I_a , qui est l'équivalent de la masse d'un objet animé d'un mouvement de translation linéaire (2.11.3), est : $I_a = m \times r^2$. Avec m la masse totale de l'objet et r son rayon de giration. Ainsi, il varie en fonction de la grandeur de sa masse totale et du carré de la longueur de son rayon de giration, qui dépend de la répartition des parties de celle-ci vis-à-vis de son axe ou de son point de rotation. On noterait $I_o = m \times r^2$ pour un objet ou un système tournant en 3D autour d'un point de rotation o .

Remarque. La grandeur du produit d'inertie d'un système polyarticulé comme l'est le corps d'un skieur ou d'un skieuse, fluctue donc en fonction de la façon dont iel modifie, avec ses forces musculaires (internes), les positions relatives de chacun de ses segments munis de ses équipements. Parce que leur configuration détermine la grandeur de son rayon de giration par rapport à son axe de rotation qui peut être, soit la direction du déplacement de son CP quand un contact neige→ski au moins existe (2D, vecteur vitesse), soit son CG quand plus aucun CP n'existe, conséquemment à un rebond (temps de suspension) (3D). Alors que la masse m de son corps et de ses équipements reste constante.

2.11.5 C'est quoi une quantité de mouvement angulaire appelée moment cinétique ?

Le moment cinétique d'un objet ou d'un système animé d'un mouvement angulaire autour d'un point ou d'un axe, habituellement désigné par la lettre L (dessin 24), est analogue à la quantité de mouvement d'un objet animé d'un mouvement de translation d'un solide indéformable (2.6.2). Quand il tourne en 2D autour d'un axe de rotation a , comme le fait, par l'articulation de son genou, une jambe vis-à-vis de son fémur ..., sa grandeur est : $L_a = I_a \times \vec{\omega}$. Avec ω sa vitesse angulaire et $I_a = m \times r_a^2$ (2.11.4). Il s'écrirait $I_o = m \times r_o^2$,



Dessin 24

¹ Deschamps, M., Manuel Mécanique et biomécanique en techniques de physiothérapie, Cégep de Sherbrooke, 475, rue du Cégep, Sherbrooke, Québec J1E 4K1.

s'il tournait en 3D autour d'un point o , comme le fait un membre supérieur autour de son épaule (dessin 23).

Ainsi, du fait principe d'inertie (2.6.1), il existe une équivalence entre la quantité de mouvement d'un objet animé d'un mouvement de translation $p = m \times v$, la quantité de mouvement d'un solide animé d'un mouvement angulaire $L_a = I_a \times \vec{\omega}$. L'une et l'autre se conserve, tant qu'aucune force extérieure ou aucun moment de force extérieur n'interagit avec lui.

Si la compréhension de la notion de quantité de mouvement linéaire explique le fait qu'un skieur ou une skieuse puisse continuer de glisser lorsqu'iel arrive sur une piste horizontale. Sur une distance d'autant plus grande qu'iel met ses "skis à plat" pour limiter la force de frottement que le manteau neigeux exerce sur ses skis. Celle de quantité de mouvement angulaire ou moment cinétique nous permet de comprendre pourquoi une skieuse ou un skieur continue de tourner en l'air, après avoir décollé du tremplin sur lequel iel glissait (image 1¹), une fois qu'iel a combiné ses actions musculaires qui la·le font sauter en interagissant avec le tremplin et engendre sa rotation. Sans qu'iel ne puisse plus modifier la trajectoire de son centre de gravité, dès l'instant où son contact neige→skis s'interrompt (principe d'inertie). Alors, celle-ci, projetée sur un plan horizontal, est rectiligne et sa vitesse constante et parabolique une fois projetée sur un plan vertical. À cause de son poids qui l'attire sans cesse vers le centre de la terre (pesanteur).



Image 1

ner en l'air, après avoir décollé du tremplin sur lequel iel glissait (image 1¹), une fois qu'iel a combiné ses actions musculaires qui la·le font sauter en interagissant avec le tremplin et engendre sa rotation. Sans qu'iel ne puisse plus modifier la trajectoire de son centre de gravité, dès l'instant où son contact neige→skis s'interrompt (principe d'inertie). Alors, celle-ci, projetée sur un plan horizontal, est rectiligne et sa vitesse constante et parabolique une fois projetée sur un plan vertical. À cause de son poids qui l'attire sans cesse vers le centre de la terre (pesanteur).

Attention, s'il est facilitant de se référer au fonctionnement d'un solide indéformable pour apprendre à imaginer le fonctionnement d'une skieuse ou d'un skieur. Nous devons aussi savoir penser d'une façon suffisamment dialectique, pour sans cesse tenir compte du fait que le corps d'un·e humain·e est un système polyarticulé autonome qui la·le rend capable de modifier volontairement les positions relatives de ses segments. Cette aptitude inhérente aux organismes ayant, quand il tourne en 2D autour d'un axe, des conséquences mécaniques qu'il est possible de rendre manifestes, en installant l'un·e d'entre eux sur un plateau pivotant réduisant drastiquement sa force de frottement avec son support, de manière à en faire un système pseudo-isolé que l'on peut animer d'un mouvement de rotation, **en exerçant sur lui un moment angulaire externe**, dont la vitesse angulaire ω autour de cet axe a devient constante dès la fin de cette intervention². Alors, quand iel écarte ses membres supérieurs par exemple, les masses segmentaires qui les composent s'éloignent de son axe de rotation, augmentant par conséquent son rayon de giration r , donc son moment d'inertie $I_a = m \times r_a^2$. De ce fait, comme $L_a = I_a \times \omega$ est constant puisque qu'aucun moment de force ne s'applique plus sur lui (principe d'inertie) et que sa masse m l'est aussi, ω diminue. Elle augmenterait pour des raisons inverses, quand iel les rapprocherait de ses hanches. Notons que ce phénomène s'exercerait en 3D, si le mouvement de rotation s'effectuait autour d'un point comme son CG . Ce qui explique pourquoi, au cours de son vol, la·le sauteur·se de l'image 1, modifie l'écartement de ses bras pour gérer

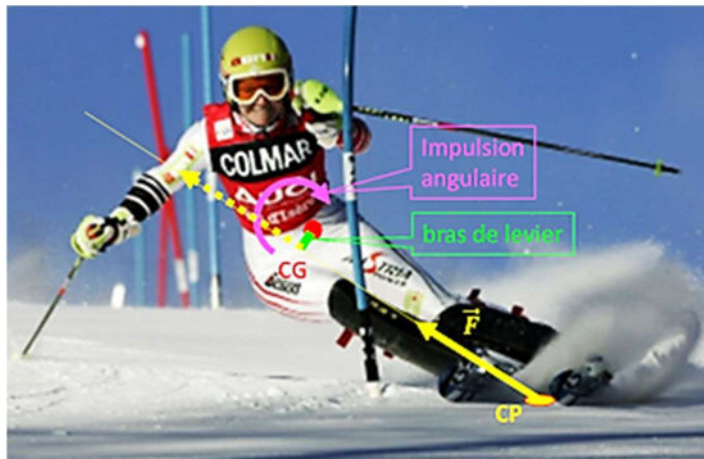
¹ Source : Affinity designer.

² <https://www.youtube.com/watch?v=-WhfgoStNw>

son déplacement angulaire, afin de reprendre contact avec le manteau neigeux, dans la direction souhaitée.

2.11.6 C'est quoi une impulsion angulaire ?

À l'instar d'une impulsion linéaire, l'impulsion angulaire a pour conséquence d'engendrer une différence de quantité de mouvement angulaire. Soit une modification du moment cinétique de l'objet ou du système sur lequel une force extérieure décentrée de son CG, exerce sur lui un moment.



Dessin 25

La grandeur d'une impulsion angulaire est donc : $\Delta L_{CG} = I_{CG} \times \omega_{final} - I \omega_{final}$. Sachant que s'il s'agit d'un organisme, nous devons tenir compte d'une éventuelle modification de son rayon de giration due aux transformations de la configuration des positions relatives de ses segments modifiant son moment d'inertie $I_{CG} = m \times r_{CG}^2$, qu'il peut provoquer avec ses forces internes (musculaires). Dans ce cas, pour un même moment de force extérieure $\vec{F} \wedge d$ (2.13), la vitesse de rotation, autour de son CG, de la skieuse illustrée par le dessin 25, sera d'autant plus grande qu'elle les regroupera autour de celui-ci.

2.11.7 Le vissage du tronc fléchi

Cette même aptitude peut engendrer un autre effet qu'utilisent actuellement tous les athlètes qui montent sur les podiums de la Coupe du monde, dont la causalité biomécanique peut être révélée en installant une personne sur plateau pivotant, en ayant cette fois une vitesse de rotation nulle, donc un moment cinétique nul. Du fait que dans la relation $L_a = I_a \times \omega$ qui le définit, si $\vec{\omega} = 0$, $L_a = 0$ (image centrale du dessin 26).

Alors, si on lui demande de faire usage des muscles obliques de sa ceinture abdominale pour visser son tronc afin de produire, par exemple, un déplacement angulaire de l'axe de ses épaules vers sa droite entraînant ses membres supérieurs (image de droite du dessin 26) ou réciproquement (image de gauche du dessin 26). On remarque qu'un déplacement angulaire de l'axe de ses hanches entraînant ses membres inférieurs se produit automatiquement en sens contraire, de part et d'autre de son CG (articulation lombo-sacrée).



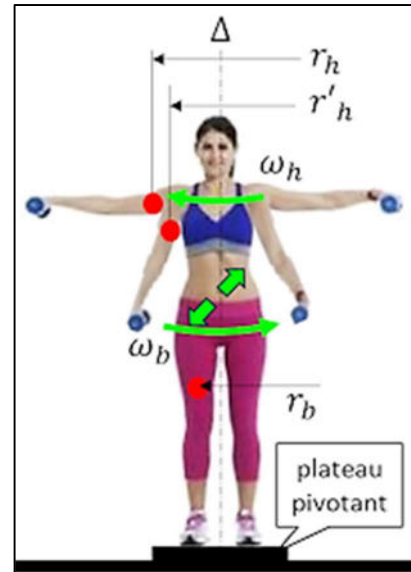
Dessin 26

Sans qu'aucun déplacement de son CG ne puisse être observé. Signe qu'aucune **force extérieure ne s'exerce sur lui**. On peut donc écrire en langage mathématique (2.11.5) : $L_a \text{ axe des épaules} + L_a \text{ axe des hanches} = 0$. Donc $L_a \text{ axe des épaules} = -L_a \text{ axe des hanches}$ (1).

Nous proposons de formaliser ce phénomène par la loi technologique suivante : « si une skieuse ou d'un skieur engendre, avec ses seules forces musculaires (forces internes), une rotation d'une partie de ses masses segmentaires dans un sens quand l'interaction entre le système composé de son corps et de ses équipements est isolé (temps de suspension) ou pseudo isolé (skis "à plat" sur le manteau neigeux), **automatiquement**, d'autres masses segmentaires

tournent en sens inverse, de telle sorte que la quantité de mouvement du système reste constante (principe d'inertie) ». C'est-à-dire que la somme de leurs moments cinétiques soit nulle.

Cela ne signifie pas que ses deux ensembles segmentaires tournent en sens inverse à des vitesses angulaires ω égales. Car, si l'expérimentatrice située sur un plateau pivotant, représentée sur le dessin 27, fait tourner vers sa droite, avec les muscles obliques de sa ceinture abdominale (forces internes), autour de l'axe Δ , l'axe reliant ses épaules entraînant ses membres supérieurs, que nous appellerons "partie haute de son corps" (h), automatiquement, son bassin et ses membres inférieurs, que nous appellerons "partie basse" (b) de celui-ci, tournent en sens inverse. Comme nous venons de l'étudier.



Dessin 27

Alors, quand elle modifie l'écart de ses bras d'une grandeur $r'h_{\Delta}$ à une autre rh_{Δ} , le rayon de giration de la partie haute de son corps s'accroît de $r'h_{\Delta}$ à rh_{Δ} et son moment d'inertie de $I'h_{\Delta} = m \times r'h_{\Delta}^2$ à $Ih_{\Delta} = m \times rh_{\Delta}^2$. Tandis que celui de la partie basse de son corps $Ib_{\Delta} = m \times rb_{\Delta}^2$ reste constant (2.11.4).

Ainsi, compte tenu du principe d'inertie et du fait que la quantité de mouvement angulaire du corps de l'athlète est initialement nulle. Il est possible de formaliser la relation entre la vitesse angulaire de l'axe de ses épaules et celle de celui de ses hanches, quand le rayon de giration de la partie haute de son corps varie indépendamment de celui de sa partie basse.

Car, d'après la relation (1) $Lh_{\Delta} = -Lb_{\Delta}$ et de celle qui formalise la grandeur de la quantité de mouvement angulaire $I_{\Delta} = m \times r_{\Delta}^2$ (2.11.14).

En remplaçant : $Ih_{\Delta} \times \omega h = -Ib_{\Delta} \times \omega b$ (dessin 27).

Donc, finalement, $m \times rh_{\Delta}^2 \times \omega h = -m \times rb_{\Delta}^2 \times \omega b$ (2)

Comme les masses m des parties basse et haute de son corps sont constantes et que le rayon de giration rb_{Δ} de la partie de la partie basse de son corps l'est aussi. Quand le rayon de giration de la partie haute de son corps augmente de $r'h_{\Delta}$ à rh_{Δ} parce qu'elle écarte ses bras. Le respect de l'égalité (2) impose que la vitesse angulaire ωb de la partie basse de son corps augmente alors, par rapport à celle de la partie haute ωh (signe négatif). Puisqu'**aucune force externe ne s'exerce sur l'expérimentatrice.**



Dessin 28

Ce qui objective l'observation de cette expérimentation, que chaque apprenti·e éducateur·ice sportif·ve peut effectuer et faire éprouver par chaque apprenti·e skieur et skieuse de loisir ou de

compétition. Sachant que l'inverse se produirait si l'expérimentateur·ice rapprochait ses mains de ses hanches et écartait ses pieds.

Cette loi mécanique est universelle. Alors, si la skieuse représentée au cours d'un temps de suspension sur le dessin 28 augmente la flexion-torsion de son tronc (image de gauche). Comme elle est momentanément isolée parce qu'en apesanteur, simultanément, ses membres inférieurs et les équipements qui y sont assujettis oscillent latéralement en sens inverse, dans les trois dimensions de l'espace, autour de son CG (articulation lombo-sacrée).

Remarque. Quand un objet tourne dans les 3 dimensions de l'espace autour d'un point o alors que tout contact avec son environnement est supprimé. Comme un bras autour de son épaule, un membre inférieur autour de sa hanche ou un skieur ou une skieuse autour de son CG. La relation définissant sa quantité de mouvement angulaire ou moment cinétique par rapport à ce point s'écrit : $L_o = I_o \times \omega_o$ ou $L_{CG} = I_{CG} \times \omega_{CG}$.

2.11.8 Le principe fondamental de la dynamique d'un système animé d'un mouvement angulaire

Le principe fondamental de la dynamique d'un système animé d'un mouvement angulaire autour d'un axe a , comme la direction du CP neige→ski(s) ou d'un point o , semblable au CG d'une skieuse ou d'un skieur, est analogue à celui d'un système animé d'un mouvement de translation qu'a formalisé Isaac Newton avec la relation $\sum \vec{F}_{ext} = m \times \vec{a}$ (2.6.3). Alors que cette causalité montre que la somme des forces extérieures $\sum \vec{F}_{ext}$ qui s'exerce sur un objet ou un système, est égale à sa masse m multipliée par son accélération \vec{a} linéaire. L'autre, qui a été formalisé par l'équation $\sum \vec{\tau}_{ext/a} = I_a \times \vec{\alpha}$, précise que $\sum \vec{\tau}_{ext/a}$, la somme des moments de force extérieurs par rapport à l'axe de rotation a qui s'applique sur l'objet ou le système, est égale à son moment d'inertie $I_a = m \times r_a^2$, multiplié par son accélération angulaire $\vec{\alpha} = \Delta\vec{\omega}/\Delta t$. Ainsi, à la masse m de l'objet ou du système qui détermine le principe fondamental de la dynamique des mouvements linéaires, est substitué le moment d'inertie I_a rapport à l'axe de rotation a de l'objet ou du système animé d'un mouvement angulaire et son l'accélération linéaire \vec{a} en mètres/seconde/seconde ou m/s^2 , par son accélération angulaire $\vec{\alpha}$ en radians/seconde/seconde ou rad/s^2 (2.11.1).

Prenons l'exemple concret du skieur exclusivement en appui sur son ski extérieur, qu'il illustre le dessin 29. Pour lui, $\sum \vec{\tau}_{ext/CP}$ est le moment de force par rapport à son CP, M_{CP} créé par le décentrage d de la direction de la force $\vec{F}_{ext.}$ qu'exerce le manteau neigeux sur son CP_{ext.}¹.



Dessin 29

Observons maintenant un autre exemple concret. Celui de la skieuse en appui sur ses

deux skis, représentée par le dessin 30. Pour elle, $\sum \vec{\tau}_{ext/CP}$ est la somme des moments de force $M_{CP ext.} + M_{CP int.}$, créée par les décentrages $d_{ext.}$ et $d_{int.}$ par rapport à son CG, des directions des forces $F_{ext.}$ et $F_{int.}$ qu'exerce respectivement le manteau neigeux sur les CP_{ext.} et CP_{int.} Cette

¹ Mkaouer B., 2017, Principes mécaniques en gymnastique sportive, l'ISSEP Ksar Saïd.

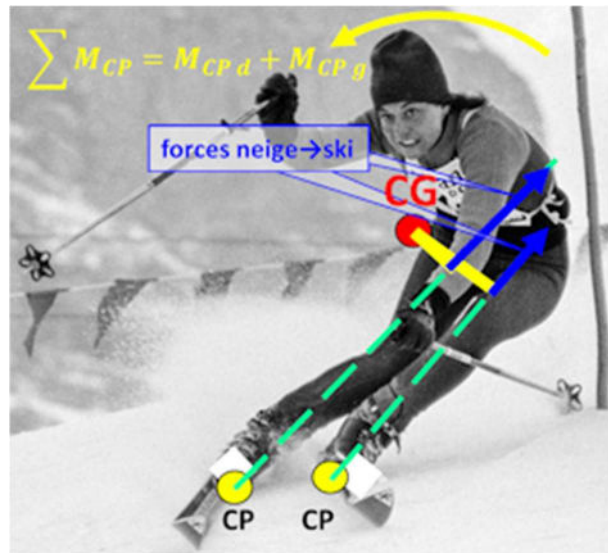
somme pouvant s'annuler ou s'inverser, suivant la façon dont elle modifie les positions relatives de ses segments avec ses forces musculaires (internes), pour se piloter suivant la trajectoire qu'elle désire parcourir ou qui lui est imposé par la traceur.e de la compétition à laquelle elle participe.

Cette partie typique du contrôle posturo-cinétique est aussi celui qui évite au skieur exposé par le dessin 31, d'osciller latéralement au cours d'une trace directe "skis à plat" face à la pente. Du fait qu'il configure les segments de son corps, afin que $\sum \overrightarrow{\tau_{ext/CP}}$, la somme des moments angulaires $M_{CP\ droit}$ et $M_{CP\ gauche}$ créée par les décentrages d_{droit} et d_{gauche} par rapport à son CG, des directions des forces $\overrightarrow{F_{droite}}$ et $\overrightarrow{F_{gauche}}$ qu'exerce le manteau neigeux sur leur CP respectif, s'annulent.

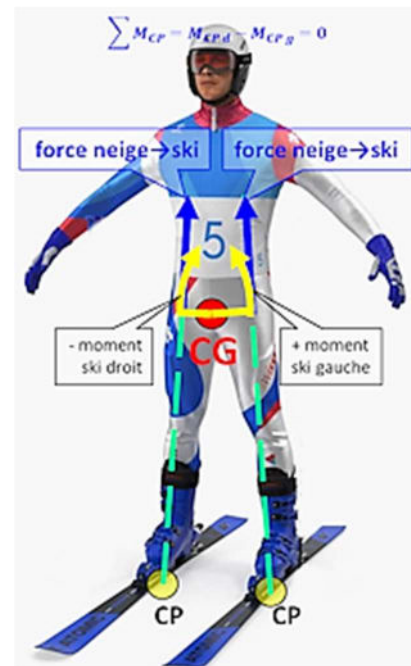
Le même raisonnement nous permet d'inférer de ce que nous observons sur le dessin 32, que la conséquence biomécanique qu'engendre la somme $\sum \overrightarrow{\tau_{ext/CP}}$ des moments angulaires $M_{CP\ ext.}$ et $M_{CP\ int.}$ créée par les décentrages $d_{ext.}$ et $d_{int.}$ par rapport à son CG, des directions des forces $F_{ext.}$ et $F_{int.}$ qu'exerce le manteau neigeux sur leur CP respectif, tend probablement à le faire osciller vers l'intérieur du virage.

Dans tous les cas, le sens et la grandeur de l'accélération angulaire $\vec{\alpha}$ qui fait osciller la le pratiquant.e autour de son CP, est égale à la somme des moments des forces extérieures neige→ski, divisée par son moment d'inertie, $\vec{\alpha} = \frac{M_{CP\ int.}}{m \times r_{CP\ int.}^2} + \frac{M_{CP\ ext.}}{m \times r_{CP\ ext.}^2}$. Donc, plus r_{CP} augmente (déploiement), plus $\vec{\alpha}$ diminue.

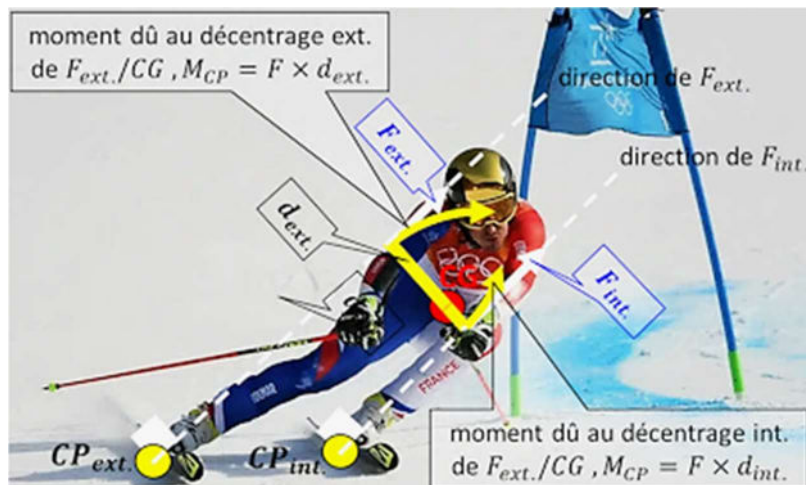
Remarque. À l'instar du principe fondamental de la dynamique d'un objet ou d'un système animé d'un mouvement linéaires, la masse m d'un objet ou d'un système animé d'un mouvement angulaire est constante, mais son moment d'inertie dépend des modifications des positions relatives de ses segments, qu'engendre avec ses forces musculaires la le pratiquant.e, pour manœuvrer ses skis ou adapter sa technicité à son environnement naturel et/ou artificiel



Dessin 31 Rosie Mittermayer-Neureuther



Dessin 30



Dessin 32

(tracé), parce qu'elles modifient la grandeur de son rayon de giration r .

Notons 1) que chaque action diminuant le rayon de giration d'un segment ou d'un membre par rapport à l'articulation autour de laquelle il oscille permet, à résultante de ses forces musculaires égale, d'augmenter la vélocité de son oscillation. 2) qu'à rayon de giration égal, plus la résultante des forces musculaires mobilisées pour le faire osciller autour de son articulation est grande et plus l'énergie potentielle élastique accumulée dans chaque système musculotendineux qui la produit est importante (2.9), plus son oscillation sera véloce. 3) il en va de même pour le tronc fléchi et vissé, vis-à-vis de son articulation lombo-sacrée.

2.12 C'est quoi une impulsion angulaire ?

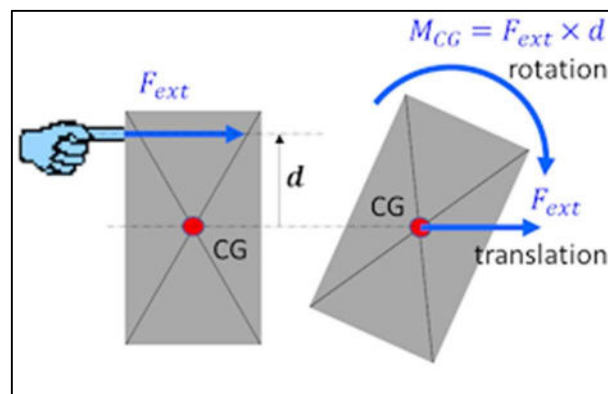
Par analogie à une impulsion linéaire I , une impulsion angulaire I_a par rapport à un axe a , s'exprime par la relation suivante : $\Delta L_a = I_a(\overline{\omega_{finale}} - I_a \times \overline{\omega_{initiale}})$, quand exceptionnellement, la configuration de ses segments demeure constante. Soit $I_r = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} I \cdot \omega \cdot dt$

Après qu'une impulsion due à un moment angulaire engendré par une force extérieure ait modifié la quantité de mouvement angulaire de l'objet ou du système isolé ou pseudo-isolé sur lequel elle s'est exercée, son état demeure invariable (principe d'inertie), aussi longtemps qu'un autre moment, angulaire, engendré par une autre force extérieure dont la direction est décentrée de son CG, ne s'exerce à nouveau sur lui. Indépendamment des moments dus à ses forces internes modifiant la configuration de ses segments, donc son rayon de giration et par conséquent sa vitesse angulaire (2.11.5).

Rappel. Isolé signifie que l'objet n'est soumis à aucune force extérieure, comme c'est le cas dans l'espace intersidéral. Le contexte pseudo-isolé est décrit par le dessin 7, au paragraphe 2.6.1.

2.13 Études des mouvements curvilignes

« La modélisation biomécanique a pour but de simplifier des phénomènes complexes, en substituant au système réel, une représentation mentale ou physique exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique¹. » C'est donc un outil didactique permettant d'objectiver directement ou par analogie, la causalité qu'un·e éducateur·ice attribue à chaque combinaison de techniques corporelles mises en œuvre par ceux, dont la virtuosité contribue à perfectionner une pratique de référence professionnelle, sportive ou de loisir. Il participe aussi au guidage de son regard, donc de son attention discriminant précisément, dans les scènes perceptives où les champion·ne·s agissent en visant la réalisation de leur but situé dans un contexte, des repères auxquels la modélisation attribue une efficacité pour y parvenir, à l'exclusion des autres. Une sélectivité qui le rend capable de remonter justement des conséquences qu'il perçoit, aux causes qui les produisent, pour élaborer justement des conseils pertinents facilitant réellement l'amélioration de la technicité de ceux qui désirent les apprendre.



Dessin 33

¹ Durey, A. (1997). *Physique pour les sciences du sport*. Paris : Édition Masson.

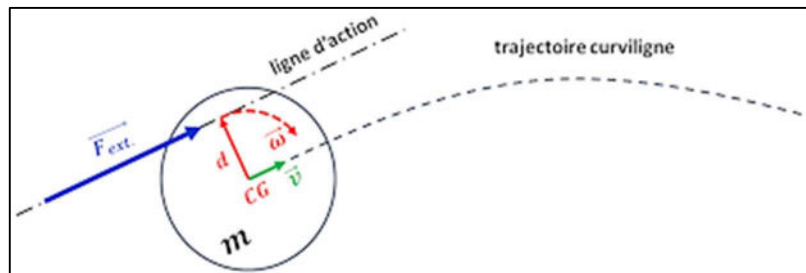
Le dessin 33¹ illustre, en vue de dessus, la modélisation de la conséquence qu'à sur la trajectoire du CG d'un objet pseudo isolé de masse m constante glissant sur une patinoire, l'application d'une impulsion dont la direction de la force extérieure F_{ext} . qui la produit s'exerce sur lui pendant un intervalle de temps $\Delta t = t_{final} - t_{initial}$, est décentrée d'une distance \vec{d} de son CG.

Comme il est démontré que la trajectoire complexe du CG d'un objet ou d'un système, résulte toujours de l'addition d'un mouvement de translation de son CG et d'un mouvement de rotation de l'objet ou du système autour de son CG². La trajectoire de son CG est déterminée par la somme de la quantité de vitesse linéaire \vec{v}_{CG} et de la quantité de vitesse angulaire $\vec{\omega}_{CG}$ transférée par cette impulsion.

1) pour le mouvement linéaire de son CG : la grandeur d'une impulsion linéaire est $I = \Delta \vec{p} = m \times \Delta \vec{v}_{CG}$ (2.7). Soit $\Delta \vec{p} = \vec{p}_{finale} - \vec{p}_{initiale} = m \times \Delta \vec{v}_{CG\ finale} - m \times \Delta \vec{v}_{CG\ initiale}$. Ou, parce que $\vec{v}_{CG\ initiale} = 0$, $\vec{p} = m \times \vec{v}_{CG}$. Ou encore, comme $\vec{F}_{ext.} = m \times \vec{a}$ (2.6.3), devenant $\vec{F}_{ext.} \times t = m \times \vec{a}_{CG} \times t$, si l'on multiplie les deux termes de l'équation par t . Donc $I = \vec{F}_{ext.} \times t = m \times \vec{v}_{CG}$, puisque $\vec{a} \times t = \vec{v}$.

2) pour le mouvement angulaire de son CG : la grandeur de l'impulsion angulaire $I_{CG} = \Delta L_{CG} = I_{CG} \times \Delta \omega_{CG}$ (2.9). Soit $I_{CG} = \Delta L_{CG} = I_{CG} \times \omega_{CG\ finale} - I_{CG} \times \omega_{CG\ initiale}$. Ou, si $\omega_{CG\ initiale} = 0$, $I_{CG} = L_{CG} = I_{CG} \times \omega_{CG}$. Ou encore, parce que $M_{CG} = I_{CG} \times \alpha_{CG}$ (2.7.6) devenant $M_{CG} \times t = I_{CG} \times \alpha_{CG} \times t$, si l'on multiplie les deux termes de l'équation par t . Donc $I_{CG} = M_{CG} \times t = I_{CG} \times \vec{\omega}_{CG}$, puisque $\omega_{CG} = \alpha_{CG} \times t$. Mais, comme $M_{CG} = \vec{F}_{ext.} \times \vec{d}$ (2.8). Alors, $I_{CG} = \vec{F}_{ext.} \times \vec{d} \times t$. Soit : $I_{CG} = I_{CG} \times \vec{\omega}_{CG}$

En synthèse. L'impulsion linéaire due à l'application sur l'objet d'une force extérieure $\vec{F}_{ext.}$ dont la direction est décentrée d'une distance d de son CG, lui transfère une combinaison de quantité de mouvement linéaire $\vec{p}_{CG} = \vec{F}_{ext.} \times t = m \times \vec{v}_{CG}$ et de



Dessin 34

quantité de mouvement angulaire $\vec{L}_{CG} = \vec{F}_{ext.} \times \vec{d} \times t = I_{CG} \times \vec{\omega}_{CG}$, qui détermine la trajectoire de son CG projeté sur le plan de la patinoire recouverte de glace (dessin 34³).

Par conséquent : 1) quand $\vec{F}_{ext.}$ et/ou t augmente, \vec{v} croît ; 2) si $\vec{F}_{ext.}$ et/ou d et/ou t grandit, $\vec{\omega}$ fait de même ; 3) quand le sens de $\vec{F}_{ext.}$ et ou de \vec{d} s'inverse, ceux de \vec{v} et de $\vec{\omega}$ font de même.

2.13.1 Décentrer de son CG la direction de la force créant son impulsion, pour effectuer un saut périlleux

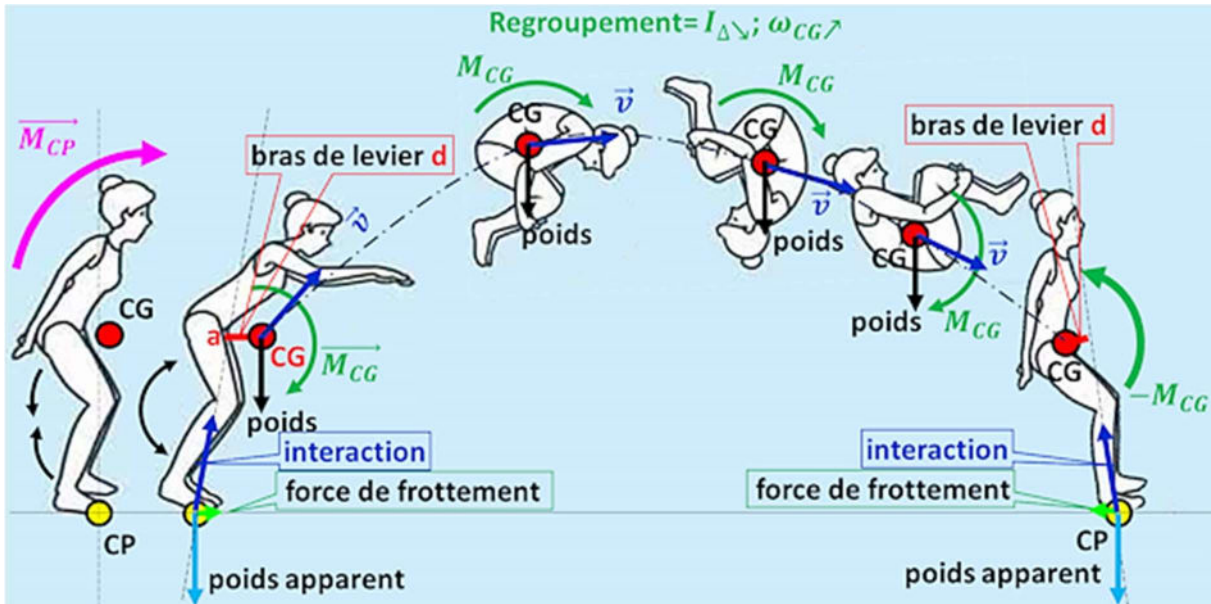
Même si ce n'est pas *a priori* évident, la modélisation mécanique que nous venons d'entreprendre, va faciliter notre compréhension de l'usage que fait de son corps l'humaine effectuant un saut périlleux, illustrée en vue de côté par le dessin 35. Et analogiquement, de découvrir les significations biomécaniques qu'ont certaines techniques corporelles utilisées par les

¹ Prévost P., 2003, déjà cité.

² Plaut E, 2007, Module de mécanique fondamentale, Mécanique générale et analytique, ENSEM.

³ http://julienlagarde.free.fr/UE_41_A_cinetique_CM8.pdf.

champion·ne·s de ski alpin, pour inverser efficacement la direction du rayon de la trajectoire qu'il désire parcourir. Des savoirs présentant un intérêt majeur pour les intervenant·e·s sportif·ve·s de ski alpin, désirant faciliter réellement les apprentissages des skieuses et des skieurs de loisir et améliorer la compétitivité des pratiquant·e·s sportif·ve·s. Comme nous le montrerons au paragraphe 2.13.



Dessin 35

Pour ceux qui ont appris à transformer leur observation empirique en observation technologique (4.11). Il est possible de distinguer les techniques corporelles utilisées par la sauteuse à pieds joints étudiées précédemment (2.8.1, dessin 10), de celles qu'effectue l'humaine ayant l'intention d'effectuer un saut périlleux avant. Car iel est devenu·e capable de discriminer, au cours de la phase précédant l'impulsion de la première, qu'elle privilégie une posture centrant la résultante de ses forces musculaires sur son CG, de manière à la transformer en force externe la propulsant verticalement et linéairement, en interagissant avec le sol. Tandis que durant la même période, matérialisée entre la figurine la plus à gauche et celle qui lui succède en allant vers la droite sur le dessin 35, la seconde modifie les positions relatives de ses segments pour se faire osciller dans la direction de son futur saut (flèche violette), de manière à décentrer de son CG, d'une distance $\vec{d} = \vec{a} - \vec{CG}$ en sens inverse du déplacement (bras de levier), la direction de l'interaction qu'elle provoque, en exerçant sur le sol la résultante de ses forces musculaires (interaction) qui propulse son CG vers le haut, tout en faisant tourner son corps autour de celui-ci. Elle agit ainsi, parce qu'elle est devenue capable de prédire, sur la base de ses expérimentations antérieures (mémoire), que ce décentrement créera une combinaison de quantités de mouvements linéaire et angulaire qui réalisera probablement son but. Autrement dit, une impulsion angulaire dont la conséquence est similaire à celle que nous avons étudiée en modélisant les mouvements curvilignes (2.13).

Puis, la sauteuse en hauteur se déplace verticalement jusqu'à atteindre l'apogée de son saut, pour redescendre en reprenant contact avec le sol sur le lieu même de son envol. Tandis que pendant son vol, la gymnaste se regroupe d'abord autour de son CG pour augmenter la vitesse de rotation ω de son corps autour de lui et se déploie ensuite avant d'atterrir pour la diminuer. Afin de contrôler l'équilibration de sa posture lors de son atterrissage (voir ci-dessous le rappel). Car sa stabilité au cours de celui-ci est un critère d'évaluation primordial de son saut. Alors, elle touche le sol en étant judicieusement inclinée en sens inverse de son déplacement (vers l'arrière), parce qu'elle sait d'expérience et/ou parce qu'elle a été guidée par un·e plus sachant·e qu'elle, qu'en agissant ainsi, elle réalise régulièrement ce but. Sans être nécessairement

consciente de l'effet mécanique qu'elle produit en faisant usage de cette ruse sensorimotrice. Parce qu'en fait, en décentrant la direction de son interaction avec le sol en avant de son CG (silhouette finale), elle inverse le sens du bras de levier, donc le sens du moment de force avec lequel elle avait engendré sa volte, de manière à l'annuler.

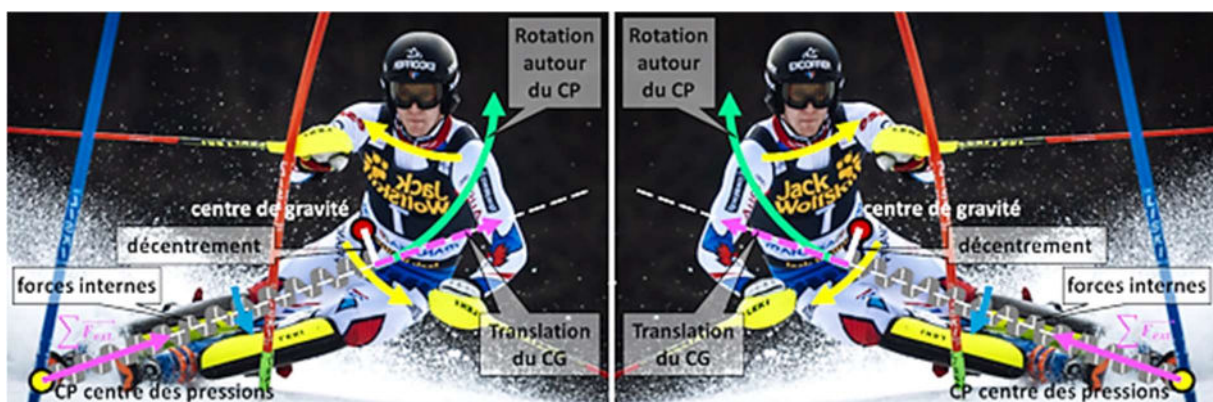
Rappel. La grandeur de l'impulsion angulaire est : $\vec{L}_{CG} = \vec{F}_{ext.} \wedge \vec{d} \times t$ (2.11.6). Comme sa vitesse angulaire initiale était nulle et qu'en vertu du principe d'inertie, sa quantité de mouvement angulaire, ou moment cinétique devient constante dès l'instant où l'impulsion cesse, c'est-à-dire quand elle quitte le sol. Après cet instant : $\vec{L}_{CG} = \vec{F}_{ext.} \wedge \vec{d} \times t = I_{CG} \times \vec{\omega}_{CG}$ (2.11.5) et parce que $I_{CG} = m \times r_{CG}^2$ (2.11.4). Finalement : $\vec{L}_{CG} = m \times r_{CG}^2 \times \vec{\omega}_{CG}$

Dans cette égalité, comme sa quantité de mouvement angulaire \vec{L}_{CG} et sa masse m est constante. Si r_{CG} augmente quand elle éloigne, par exemple, les extrémités de ses segments de son CG avec ses forces musculaires. Sa vitesse angulaire ω_{CG} diminue nécessairement et réciproquement, quand elle les rapproche de celui-ci.

2.13.2 Décentrer la direction de son interaction neige→ski(s) par rapport à son CG ou réciproquement, pour se piloter avec ses skis

Les humain·e·s comme les autres organismes incorporent, en transformant leurs aptitudes¹ biologiques depuis leur vie intra-utérine pour les mammifères, des ruses sensorimotrices modifiant judicieusement les caractéristiques de leurs interactions avec leurs environnements, afin de satisfaire leurs besoins et parfois leurs désirs. Iels reproduisent ainsi des savoir-faire et des savoir-être devenus non-conscients, parce qu'ils s'automatisent au cours de leurs expérimentations redondantes situées dans des contextes terrestres, aériens ou aquatiques, du fait que leurs résultats sont prévisibles. Et inventent parfois d'autres façons de faire ou de penser, en recombinaison expérimentalement des savoirs et/ou des manières de faire usage de leur corps, guidés intuitivement ou plus rationnellement par leur imagination, parfois onirique. Ainsi, les skieuses et les skieurs ont appris, sans en être nécessairement conscient·e·s, à modifier astucieusement les positions relatives de leurs segments avec leurs forces musculaires, pour transformer les caractéristiques de leurs interactions avec le manteau neigeux en manœuvrant leurs skis, afin de se piloter sur la trajectoire qu'ils désirent parcourir ou que la·le traceur·e de la compétition à laquelle iels participent leur impose.

Des ruses que les technologues tentent de repérer, comme nous l'avons fait au cours de notre travail de thèse visant à modéliser la pratique "ski alpin". En analysant les mouvements des plus habiles avec des instruments susceptibles d'affranchir au mieux la·le chercheur·e de ses

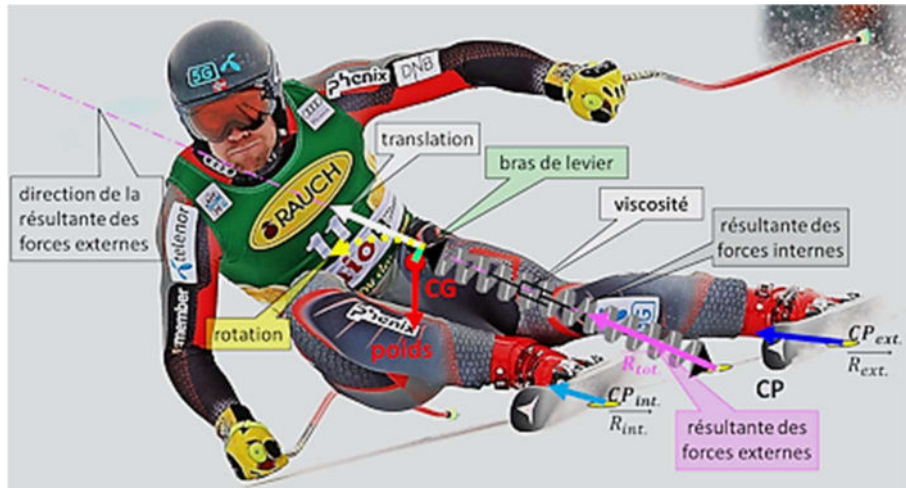


Dessin 36 En contact avec le manteau neigeux.

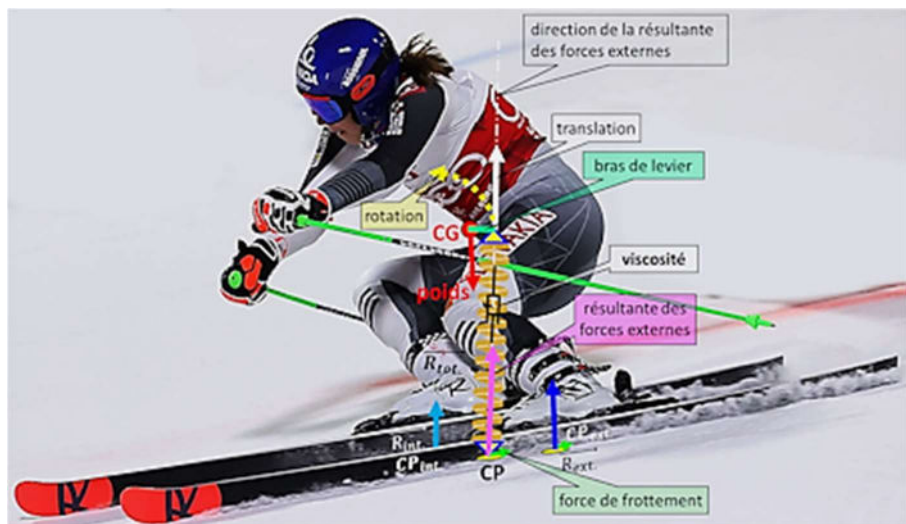
¹ Nuttin J., Piéron H., La psychologie différentielle. In : Revue Philosophique de Louvain. Troisième série, tome 48, n°17, 1950. pp. 168-169.

illusions¹, afin de leur attribuer une signification biomécanique objectivée, en fonction du résultat visé par l'athlète situé dans son contexte et en mesurant leurs interactions environnementales (plate-forme de force). Puis en confrontant aux lois de la nature, aux caractéristiques sensorimotrices et aux spécificités neuropsychologiques des pratiquant·e·s, les croyances que leurs observations induisent.

Une démarche scientifique qui se réfère à des modèles typiques d'activités sensorimotrices analogues, comme celui qui formalise les causalités biomécaniques mises en œuvre par la gymnaste effectuant un saut périlleux, qu'il illustre le dessin 35. Que nous avons étudié en deux dimensions et en vue de côté au paragraphe



Dessin 37 En vue de face, au cours d'un processus d'inversion d'angle de carre en contact avec le manteau neigeux.



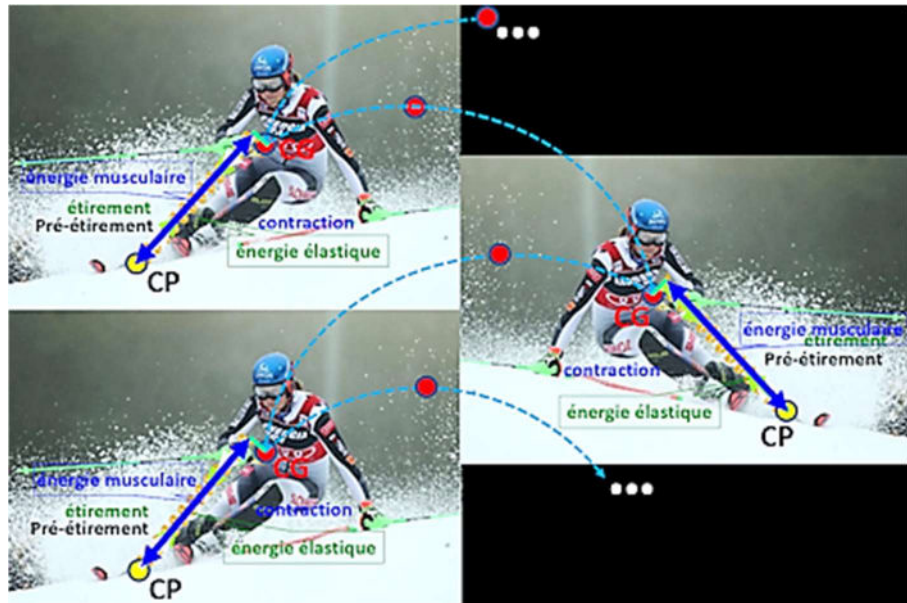
Dessin 38 En vue de côté quand la force de frottement augmente.



Dessin 39 Durant un temps de suspension.

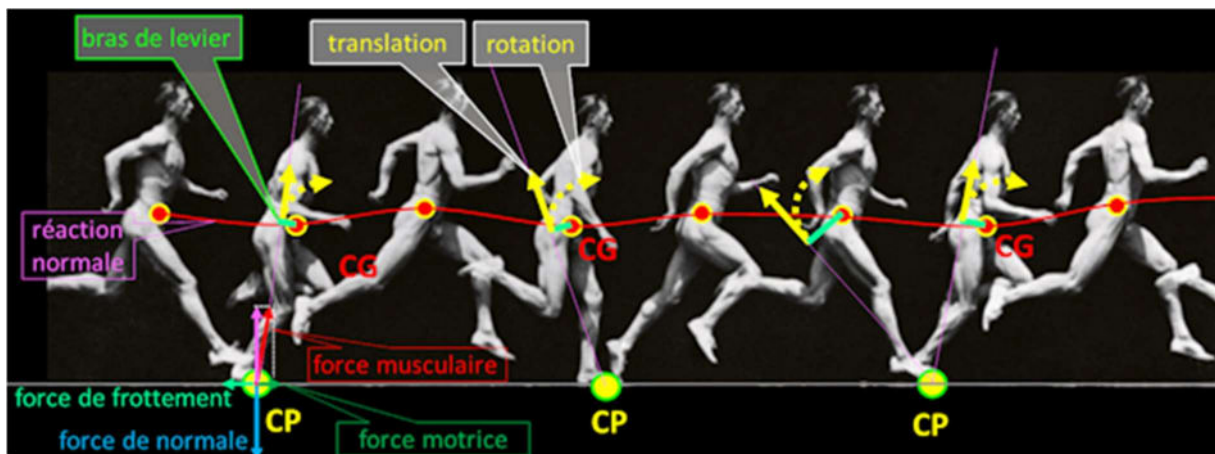
¹ Logiciel d'analyse des mouvements en 3D "digital modeling" Gilles Dietrich, Université Paris V.

2.13. Un modèle qui élucide, à condition d'opérer une rotation mentale de 90°, la façon qu'ont les skieurs et les skieuses d'inverser, par l'intermédiaire de chacun de leurs outils skis, le rayon de la trajectoire sur laquelle ils se pilotent. Seulement en appuyant dessus et en inversant l'angle que fait sa semelle de glissement avec le manteau neigeux (angle de carre)¹. En inversant essentiellement l'excentration, par rapport à leur CG, de la direction de la résultante des forces externes qu'exerce le manteau neigeux sur elleux ou, réciproquement, leur CG relativement à la direction de celle-ci. Uniquement en transformant les positions relatives de leurs segments avec leurs forces internes, pour se faire osciller autour de leur CP. Ou faire tourner leur CG relativement à leur CP, quand le contact avec celui-ci existe (dessins 36 et 37). Voire pour se



Dessin 40

faire rebondir d'un pied sur l'autre en engendrant des cycles étirement-renvoi avec réflexe myotatique (2.9.2), pour créer des temps de suspension (impulsion), au cours desquels, étant provisoirement en apesanteur, ils oscillent en 3D autour de leur CG, dévissent et revissent leur tronc pour anticiper la répartition prédominante de leur poids apparent sur celui qui se trouve à l'extérieur du virage² (dessin 39). Le type de virage que nous qualifions de 3D, pour dans les trois dimensions de l'espace, qu'illustre le dessin 40. Similairement, c'est ce qu'effectue



Dessin 41

¹ Un chapitre est consacré à la technologie des skis alpins.

² Il y a au moins trois raisons qui font privilégier ce pied à l'autre : 1) les masses musculaires de l'intérieur de la cuisse (abducteurs) étant plus puissantes que les externes (adducteurs), elles résistent plus efficacement au moment de force tendant à remettre le ski extérieur "à plat" ; 2) le fait que l'angle de flexion du genou du membre inférieur extérieur est moins fléchi que l'intérieur, rend plus efficace pour résister à l'augmentation de l'effort dû à l'accélération radiale du déplacement angulaire du ski extérieur, cela d'autant plus que son rayon est petit ; 3) une réchappe est toujours possible sur le pied intérieur, quand le ski extérieur dérape.

longitudinalement le coureur pied illustré par le dessin 41, pour rebondir de son pied d'appui sur l'autre, qui va le devenir.

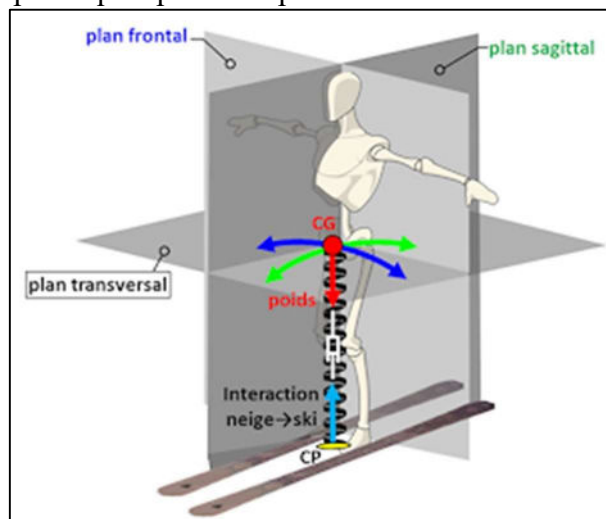
L'éducateur·ice sportif·ve instruit·e de ces causalités biomécaniques sera probablement plus compétent qu'un·e autre qui les ignore, pour évaluer justement la technicité d'un·e pratiquant·e, afin d'élaborer des conseils pertinents susceptibles de l'aider à l'améliorer.

2.14 L'équilibre est une illusion

Deux conditions sont requises pour qu'un objet ou un système soit en équilibre. Il l'est quand la somme des forces et la somme des moments des forces extérieures qui s'exercent sur lui est nulle. Soit : $\sum \overrightarrow{F_{ext.}} = 0$ et $\sum \overrightarrow{M_{ext.}} = 0$.

Donc, pas plus qu'un·e coureur·e à pied, un skieur alpin ou une skieuse alpin·e n'est en équilibre, quand l'un·e court ou l'autre skie. Excepté lorsqu'iel est à l'arrêt, si l'on néglige les micro-oscillations de son CG par rapport à son CP, qu'utilise à son insu son système nerveux central, pour réguler sa locomotion ou son glissement bipède. Prenons l'exemple du système « *corps du skieur ou de la skieuse-skis-contexte physique* ». Son centre de gravité est accéléré vers le centre de la Terre par la force qu'exerce sur lui le champ gravitationnel de la Terre (poids). Tandis qu'avec ses forces musculaires, la·le pratiquante interagit continuellement avec le manteau neigeux par l'intermédiaire de ses skis, pour conserver un glissement bipède quand iel se met à glisser sur celui-ci. C'est-à-dire, dès que la composante motrice de son poids (pente), devient supérieure à la force de frottement que le manteau neigeux applique sur eux. Alors que la force de frottement que l'air oppose directement sur son corps le freine aussi et qu'iel modifie intentionnellement l'orientation de son corps dans l'espace et la configuration de ses segments, pour réguler proactivement les conséquences mécaniques des techniques corporelles qu'iel effectue pour se piloter en manœuvrant ses skis et les perturbations contextuelles imposées par les incessants changements de relief du manteau neigeux quand ils sont prévisibles ou *a posteriori* quand ils ne le sont pas.

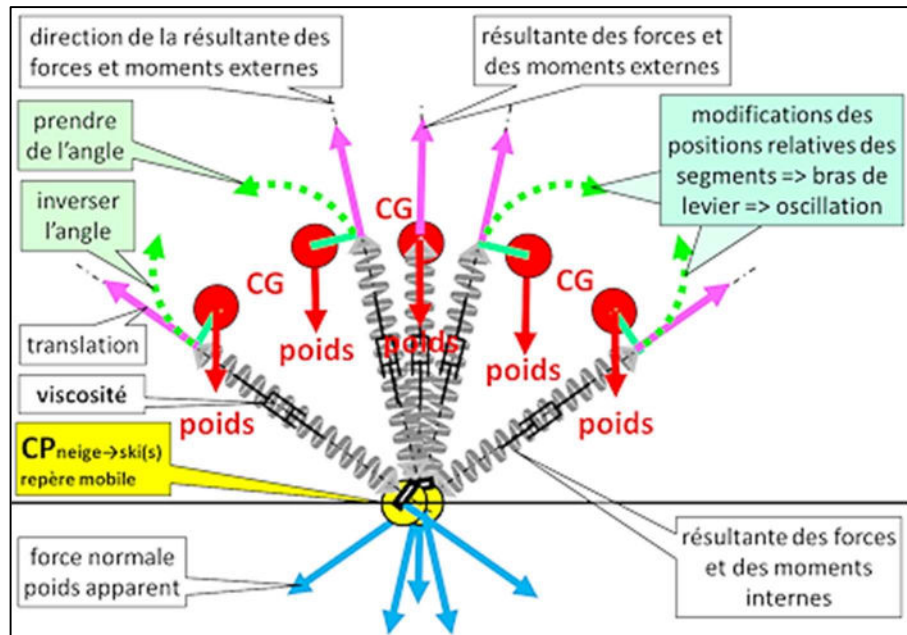
Parmi les conséquences mécaniques de ses techniques corporelles, les concepteur·ice·s des skis actuels ont imaginé·e·s la possibilité de les minimiser leur coût énergétique (chaleur), en substituant aux arrachements des cristaux de neige provoqués par leurs pivotements et leurs dérapages, un effondrement du manteau neigeux engendré par la pression exercée par le ski sur lequel appuie la·le pratiquant·e, afin de former dans celui-ci un ou deux talus courbe(s) sur lequel ou lesquels glisse le système (coupé)¹. De ce fait, la force due au formage de chaque talus dans le manteau neigeux, qui s'ajoute à celle due au fait que chaque semelle de glissement de chaque ski frotte sur chaque talus, oblige la skieuse ou le skieur à faire osciller son corps dans le sens de son déplacement ou inversement, pour resituer le plus constamment possible, le CP du système sur le lieu du ski prévu par saon fabricant·e, afin que sa déformée limite la grandeur de ces



Dessin 42

¹ Nous consacrerons un chapitre au fonctionnement de l'outil ski.

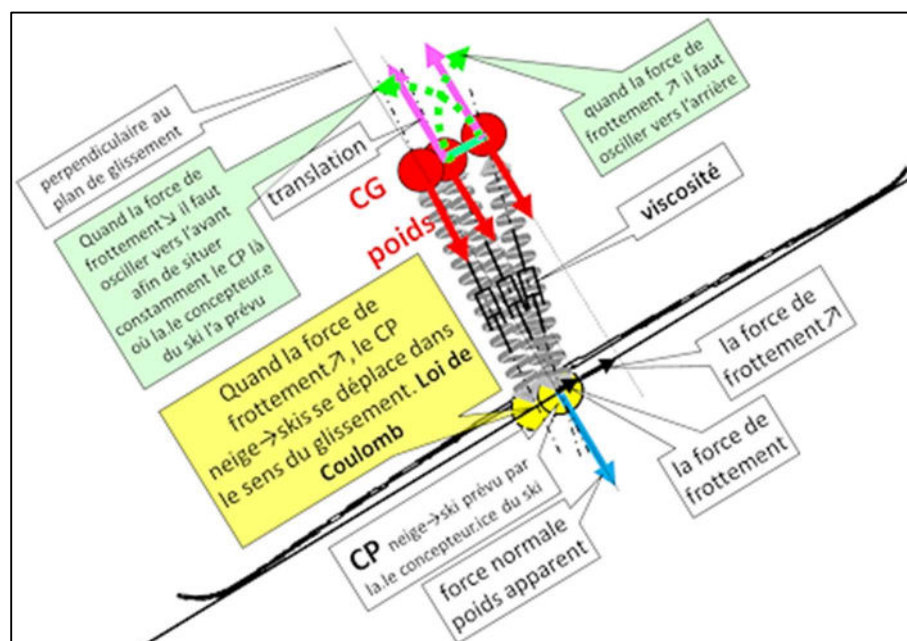
forces freinatrices¹. Le résultat de cette intention étant contrôlé par l'attention portée sur le ressenti perçu sur les "coussinets" des plantes de ses pieds, situés juste en arrière de ses orteils, là où sont concentrés des mécanorécepteurs, dont les connexions neuronales avec des servomoteurs de sa moelle épinière, automatisent la régulation de son glissement bipède avec des temps de réaction très brefs, compris entre 40 à 70 millisecondes.



Dessin 43, dans le plan frontal. Notons que la direction et la longueur du bras de levier sont déterminées par la déformation du corps de la skieuse ou du skieur, donc la direction, le sens et la vitesse de l'oscillation.

2.15 Le modèle du ski alpin est analogue à celui d'un pendule inversé

En synthèse des conceptions mécaniques et physiologiques intriquées étudiées dans ce chapitre, nous proposons de modéliser le système constitué du « corps du skieur ou de la skieuse-skis-contexte physique », similairement au modèle dynamique du pendule inversé (dessin 42²). Parce qu'ils sont tous deux essentiellement instables, du fait que leurs CG sont situés au-dessus de leurs CP, par rapport au centre de la Terre. Le dessin 43



Dessin 44, dans le plan sagittal. Notons que la direction et la longueur du bras de levier sont déterminées par la façon dont la skieuse ou le skieur déforme son corps, spécifiant la direction, le sens et la vitesse de l'oscillation.

¹ On peut se représenter la grandeur de la force de formage, en s'imaginant rouler à vélo sur une route dont le revêtement bitumé s'interrompt brutalement pour laisser place à du sable. On ressent alors l'augmentation de la force à produire sur les pédales pour continuer d'avancer. Si l'on a déjà expérimenté cette situation.

² D'après Manolova A., 2012, Chapitre 2 : Description anatomique du mouvement, Sciences du sport.com.

l'illustre en projection sur le plan frontal (vue de face), semblablement au dessin 37 et le dessin 44 le représente en projection sur le plan sagittal (vue de côté), analogiquement au dessin 38. Cette modélisation¹ vise à faciliter la compréhension des effets mécaniques produits par les combinaisons complexes de techniques corporelles qu'effectuent les champion·ne·s montant habituellement sur les podiums de la coupe du monde et ceux qui dévalent des pentes, descendent des couloirs... C'est-à-dire, ceux qui sont devenu·e·s capables de mobiliser judicieusement les caractéristiques sensorimotrices et viscoélastiques de leur corps, pour interagir par l'intermédiaire de celles de leurs skis, avec les forces et les moments de forces que leurs différents contextes physiques exercent sur leurs segments, pour se faire osciller proactivement dans les trois directions de l'espace quand ils sont prévisibles et rétroactivement s'ils ne le sont pas ou quand la combinaison produite est inadéquate. Afin de se piloter efficacement sur la trajectoire désirée, ou parcourir celle qui leur est prescrite par la·le traceur·e de la compétition à laquelle iels participent, en conservant un glissement bipède. Autrement dit, les athlètes qui font

Ce modèle met en exergue l'impérative nécessité d'optimiser les laxités articulaires de la skieuse ou du skieur. Celles qui l'autorise à faire usage des combinaisons des techniques corporelles excentrant la direction de son interaction neige→ski(s) de son CG ou réciproquement (bras de levier), et de renforcer la puissance et d'adapter la viscoélasticité des complexes musculotendineux qu'iel mobilise pour transformer les synergies segmentaires spécifiques à la pratique du ski alpin qui les produisent. Afin de se piloter sur une trajectoire intentionnelle.

évoluer la pratique de référence, en collaboration avec les fabricant·e·s de leurs équipements et tous les acteurs de la performance².

2.16 C'est quoi l'énergie cinétique d'un système ?

L'énergie cinétique est celle que possède un corps du fait de son mouvement de translation et/ou de rotation, par rapport à un référentiel fixe. Elle correspond au travail des forces ou des moments des forces externes qui, en s'exerçant sur lui, ont transformé son état de repos en cet état de mouvement.

Lorsqu'un objet ou un système est animé d'un mouvement rectiligne par rapport à un référentiel donné. À un instant t , il possède une énergie cinétique linéaire qui dépend de sa masse m et de la vitesse linéaire \vec{v} de son CG. Soit : $E_{c\ lin} = \frac{1}{2} m \times v^2$.

Avec E_c en Joule (J), m sa masse en kg et v la vitesse linéaire de son CG en m/s.

Lorsqu'un objet ou un système est animé d'un mouvement angulaire par rapport à un axe Δ ou un point o ou de son CG quand il devient isolé (temps de suspension). À un instant t , il possède une énergie cinétique de rotation qui dépend de son moment d'inertie I_Δ par rapport à cet axe Δ ou ce point o autour duquel il tourne et de la vitesse angulaire $\vec{\omega}$ de son CG (rotation). Soit : $E_{c\ rot} = \frac{1}{2} I_\Delta \times \omega^2$.

Avec E_c en Joule (J), $I_\Delta = m \times r_\Delta^2$ ou $I_o = m \times r_o^2$ son moment d'inertie et ω la vitesse angulaire de son CG en rad/s.

¹ Georges Joubert avait eu l'intuition de ce fonctionnement pendulaire. Joubert G., *ski français octobre/novembre 1995*, « Ce qui fait gagner Tomba » *Le double pendule*.

² Outre ceux qui sont cités dans le texte. Les acteurs de la performance comprennent les préparateurs physiques et mentaux, les technicien·ne·s des matériels, les traceur·e·s, les préparateurs des pistes...

L'énergie cinétique totale $E_{c\ tot}$ d'un corps animé d'un mouvement curviligne combinant un déplacement linéaire de son CG et un mouvement de rotation autour d'un axe Δ ou d'un point o ou de son CG quand il devient isolé (temps de suspension), est la somme de son énergie cinétique linéaire $E_{c\ lin}$ et de son énergie cinétique de rotation $E_{c\ rot}$. Soit : $E_{c\ tot} = E_{c\ lin} + E_{c\ rot}$ ou $E_{c\ tot} = \frac{1}{2} I_{\Delta} \times \omega^2 + \frac{1}{2} m \times v^2$. Ce qui est cohérent avec la modélisation que nous avons effectuée au paragraphe 2.13.

Ainsi, si l'on néglige les forces extérieures de frottement neige→ski(s) et système →air qui s'exercent sur le système « *corps du skieur ou de la skieuse-skis-contexte physique* » et que l'on tient compte de la loi de conservation de l'énergie (principe d'inertie). Quand l'énergie cinétique de rotation de son CG augmente, parce que sa vitesse angulaire $\vec{\omega}$ s'accroît à cause d'une impulsion et/ou que son moment d'inertie \vec{I}_{Δ} s'amplifie quand r croît si iel écarte ses bras par exemple. Son énergie cinétique de rotation $E_{c\ rot}$ grandit, tandis que son énergie cinétique linéaire $E_{c\ lin}$ diminue. Et avec elle, la vitesse linéaire de son CG qui peut être préjudiciable pour la performance. Notons que cette variation est réciproque.

Notons que ce n'est pas le cas lorsqu'iel utilise des vissages de son tronc fléchi par rapport à son bassin pour déclencher ses virages. Parce qu'alors, la somme des moments cinétiques de la partie haute de son corps et de sa partie haute est nulle (2.11.7).

2.16.1 Comment varie l'énergie cinétique totale d'un objet ou d'un système ?

Entre deux instants t_1 et t_2 tels que $t_1 < t_2$, où l'objet ou le système se situe respectivement aux points P_1 puis P_2 . La grandeur de la variation $\Delta E_{c\ tot}$ de son CG est : $\Delta E_{c\ tot} = E_{c\ tot\ 2} - E_{c\ tot\ 1}$.

Ainsi, comme pour les combinaisons de vitesses linéaire et de rotation (2.13) : $\Delta E_{c\ tot} = \Delta E_{c\ lin} + \Delta E_{c\ rot}$

Donc, pour la partie linéaire du mouvement :

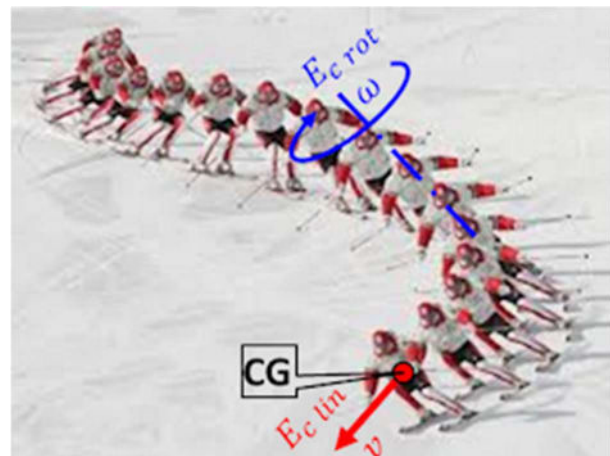
$$\Delta E_{c\ lin} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2)$$

Et pour la partie angulaire du mouvement :

$$\Delta E_{c\ rot} = \frac{1}{2} I_{\Delta} (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

$$\text{Donc : } \Delta E_{c\ tot} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} I_{\Delta} (\omega_2^2 - \omega_1^2).$$

À nouveau, comme au cours d'un temps de suspension, $\Delta E_{c\ tot}$ est constante (principe d'inertie). Si $E_{c\ rot}$ croît, $E_{c\ lin}$ diminue et réciproquement. Les extensions pivotées, en plus de rendre prédominant l'appui sur le pied intérieur, diminuent la vitesse linéaire du CG (dessin 45).



Dessin 45