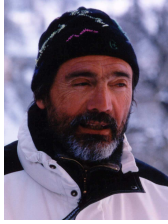


Perceptions et mécanique : le modèle du skieur alpin



Il nous a semblé utile de proposer aux lecteurs de la revue de l'AFESA une réflexion sur le fonctionnement mécanique de système skieur-skis que nous avons modélisé. Notre but est d'élucider certaines énigmes que nous posent les relations existant entre les actions motrices des skieurs définies par les douze observables que nous avons codifiés dans le manuel technologique¹ et leurs conséquences sur la dynamique de ce système en interaction avec son environnement.

Pour aborder la physique, nous avons choisi de réfléchir à partir de nos perceptions de skieur. Nous voulons montrer les relations qu'elles entretiennent avec les concepts de la mécanique² permettant d'explicitier le fonctionnement du système skieur-skis. Du moins les relations que nous sommes capables de comprendre aujourd'hui.

Il s'agit d'un prolongement de l'étude initiée à l'aide de l'analyse des mouvements des onze athlètes de coupe du Monde dont les résultats ont été publiés dans cette revue³.

par François ROUX⁴

La relation entre le contact pied→chaussure et l'effet directionnel

Première partie : du contact pied→chaussure au contact neige→ski.

Lorsque nous effectuons un saut, pendant le temps de suspension, si nous sommes attentifs aux sensations en provenance des plantes de nos pieds, nous ne ressentons aucune *pression* et nous tombons. Si nous sommes en contact avec la neige, "skis à plat" nous ressentons sous la plante de chacun de nos pieds une *pression* : le manteau neigeux exerce alors un effort neige→ski qui repousse chacun de nos skis notre corps et nos équipements. Lorsque la neige est damée nous restons en surface. Si elle est poudreuse, nos skis s'enfoncent tant que le damage produit ne transforme ses caractéristiques jusqu'à ce qu'elles soient capables de repousser l'ensemble skieur-skis.

L'action ski→neige a pour origine le champ de gravité qu'exerce la terre sur chaque particule de matière composant notre corps et nos matériels. Il résulte de cette attraction une force s'appliquant sur le *centre de gravité* CG de l'ensemble, dont la direction est orientée à peu près vers le centre de la terre. Son sens étant de la surface vers le centre. La réaction neige→ski est donc une conséquence de l'attraction terrestre.

Isaac Newton a élucidé ce phénomène en formalisant le constat suivant : dans la nature, la *somme vectorielle* de l'action qu'exerce le corps 1 sur le corps 2 et de la réaction que ce corps 2 exerce sur le corps 1 est nulle (troisième loi). Cela se traduit en langage mathématique par le modèle suivant : $\vec{F}_{1\rightarrow 2} + \vec{F}_{2\rightarrow 1} = 0$. Lire, la *somme vectorielle* des forces de contact est nulle. Il est donc possible d'écrire $\vec{F}_{1\rightarrow 2} = -\vec{F}_{2\rightarrow 1}$.

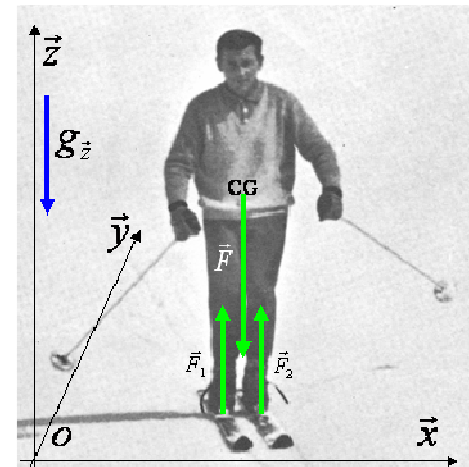


Fig.1 : la force d'appui et les réactions

De la troisième loi de Newton il ne faut pas déduire hâtivement que la *somme vectorielle* des forces extérieures s'appliquant sur le système skieur-skis est toujours nulle. En fonction du principe d'inertie

¹ Le nombre des observables nécessaires pour décrire et évaluer les techniques corporelles des skieurs est passé de dix huit à douze parce que certains d'entre eux, identifiés à l'origine comme des actions, se sont révélés être des conséquences d'actions. Une nouvelle édition du manuel technologique formalisera l'évolution de notre grille de lecture.

² Voir bibliographie.

³ Numéros 37 à 43.

⁴ tchoua.roux@wanadoo.fr

imaginé par Galilée et de la première loi de Newton, cela n'est vrai que pour deux situations précises : le skieur est à l'arrêt ; son déplacement est rectiligne et sa vitesse est constante.

Traduction pour l'étude mécanique du skieur. Uniquement dans les deux cas mentionnés ci-dessus, la *somme vectorielle* de l'action de la gravité sur l'ensemble skieur-matériels et de la réaction neige→ski est nulle. Strictement dans ces deux cas, pour l'exemple présenté à la figure 1 où il y a deux contacts neige→ski, nous pouvons écrire : dans le repère $R(o, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, $\vec{F}_{\text{pesanteur} \rightarrow \text{skieur}} + \vec{F}_{1 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}} + \vec{F}_{2 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}} = \vec{0}$ d'où $-\vec{F}_{\text{pesanteur} \rightarrow \text{skieur}} = \vec{F}_{1 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}} + \vec{F}_{2 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}}$ ($\vec{F}_{\text{pesanteur} \rightarrow \text{skieur}}$ est de sens opposé à \vec{z}). Lire, la *somme vectorielle* des réactions d'appui à la même grandeur et la même direction que l'action de la pesanteur sur le système skieur-skis mais son sens est opposé. Restriction supplémentaire. Nous ne pouvons écrire $-\vec{F}_{\text{pesanteur} \rightarrow \text{skieur}} = -m \cdot g_{\vec{z}} = -\overline{\text{poids}}$, avec m la masse du skieur et de ses équipements et $g_{\vec{z}}$ l'accélération due à la gravité ($g_{\vec{z}}$ à un sens opposé à \vec{z} , figure 1), seulement si le skieur est à l'arrêt, sur le plat, avec une vitesse et une posture constante.

Dans tous les autres cas la *somme vectorielle* de l'action et de la réaction n'est pas nulle et l'action de la pesanteur sur le système n'est pas égale au poids. Alors, sans tenir compte pour l'instant des frottements neige→ski et aérodynamique : $\vec{F}_{1 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}} + \vec{F}_{2 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}} + \vec{F}_{\text{pesanteur} \rightarrow \text{skieur}} = \vec{R}$, avec \vec{R} la force résultante. En vertu de la relation fondamentale de la dynamique (RFD) $\vec{R} = m \cdot \vec{a}$ (deuxième loi de Newton). \vec{R} produit une accélération \vec{a} dont la grandeur est $a = \frac{R}{m}$. La vitesse n'étant pas uniforme, il faut alors prendre en compte les phénomènes inertiels dus aux accélérations. Nous verrons cela plus loin.

Que veut dire somme vectorielle ? En mécanique, une force se représente par un vecteur. Un vecteur est une grandeur mathématique symbolisée par un segment de droite orienté, situé dans un espace défini par un repère dont le mouvement est lui-même déterminé par rapport à un référentiel (fixe ou galiléen pour nous). La figure 2 montre la représentation graphique en trois dimensions du vecteur \vec{F} dans le repère $R(o, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$. Un vecteur a une direction et un sens.

Dans l'espace défini par son repère les composantes du vecteur, sur les axes \vec{ox} , \vec{oy} et \vec{oz} , sont respectivement $F_x \cdot \vec{x}$, $F_y \cdot \vec{y}$ et $F_z \cdot \vec{z}$. Avec \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} les unités sur chaque axe. La grandeur de son intensité ou module est $\|\vec{F}\| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$. Le signe $\|\ \|$ veut dire module. La somme vectorielle de deux vecteurs est représentée à la figure 3. Lorsque la somme de deux vecteurs est nulle, leurs directions et leurs modules sont identiques mais leurs sens sont opposés (figure 4).

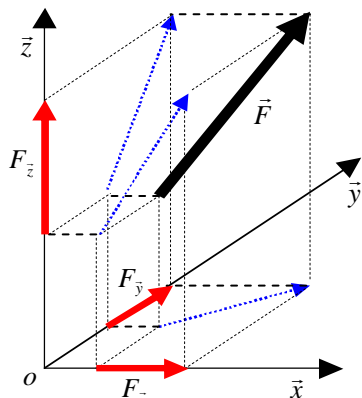


fig.2 : représentation graphique d'un vecteur et d'un repère

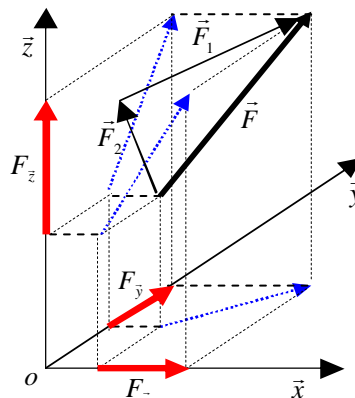


fig.3 : $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

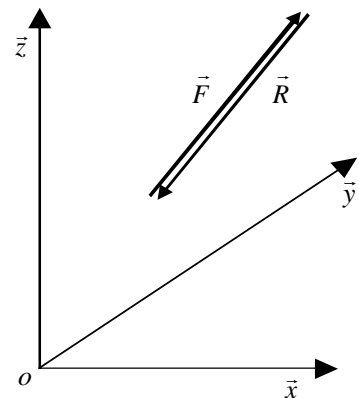


fig.4 : $\vec{F} + \vec{R} = 0$

Sur les figures 2 et 3, les vecteurs représentés par des traits bleus interrompus représentent les projections en deux dimensions sur les plans o, \vec{x}, \vec{y} ; o, \vec{y}, \vec{z} ; o, \vec{x}, \vec{z} du vecteur \vec{F} .

Conséquence pour l'étude mécanique du skieur. Nous devons donc toujours imaginer qu'entre le système skieur-skis et son environnement, le corps du skieur et un de ses équipements ou entre deux segments corporels (articulation) il existe une interaction mécanique dont la *somme vectorielle* est nulle.

Le centre d'inertie G se trouve sur l'axe de symétrie du cône. Sa position est donnée par la relation :

$$\vec{OG} = \frac{1}{V} \int_{PE1} \vec{OP} dV \quad \text{avec :} \quad V = \frac{1}{3} \pi R^2 H$$

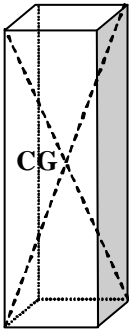


fig. : 5

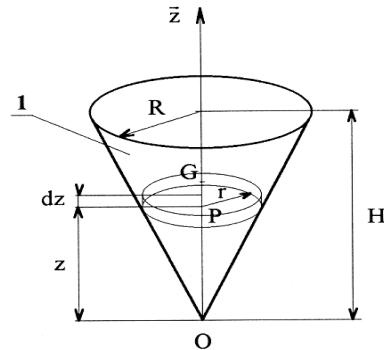


fig. : 6

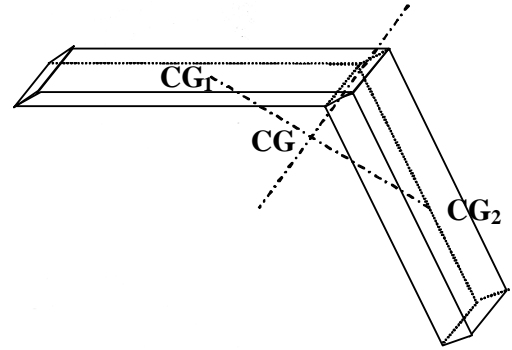


fig. : 7

Précisons la notion de centre de gravité. La position du centre de gravité (ou centre d'inertie) des solides indéformables dont la géométrie est simple comme le parallélépipède de la figure 5 est connue. Celle des solides dont la forme est plus complexe se détermine par des approches géométriques (figure 6) ou des modèles mathématiques (figure 7). Il peut être interne ou externe au solide.

Le corps du skieur n'est pas un solide indéformable mais un système articulé. Le système articulé skieur-skis est composé des segments corporels du skieur et de ses équipements. Chaque élément de ce système est en interaction mécanique, par ses zones de contact avec son ou ses voisins et avec les autres, de proche en proche, en fonction des caractéristiques mécaniques des liaisons.

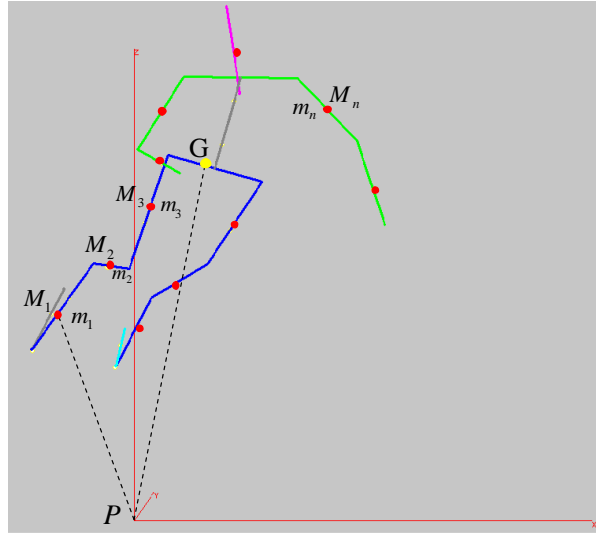


fig.8 : le calcul du centre de gravité du skieur

Pour définir la position du centre de gravité d'un tel système, il faut d'abord calculer la masse $m_1, m_2, m_3 \dots m_n$ de chaque segment du skieur⁵ et de chacun de ses matériels, puis déterminer la position du centre de gravité $M_1, M_2, M_3 \dots M_n$ de chacun d'eux dans l'espace défini par un repère. La position du centre de gravité du système skieur-skis dans ce repère se calcule ensuite en fonction des positions $\overline{PM_1}, \overline{PM_2}, \overline{PM_3} \dots \overline{PM_n}$ de chaque centre de gravité segmentaire et matériel (figure 8).

Dans le repère $P(0, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, $m_1 \overline{PM_1} + m_2 \overline{PM_2} + m_3 \overline{PM_3} + \dots + m_n \overline{PM_n} = (m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n) \overline{PG}$ (figure 8). Cela donne en positions relatives : $m_1 \overline{GM_1} + m_2 \overline{GM_2} + m_3 \overline{GM_3} + \dots + m_n \overline{GM_n} = \vec{0}$.

⁵ Le centre de gravité segmentaire se détermine avec les mensurations du skieur et d'après un modèle statistique du corps humain (nous avons choisi le modèle Hanavan). Les positions relatives de chaque centre de gravité sont des données cinématiques issues de l'analyse des mouvements des skieurs en trois dimensions. Nous réduisons la complexité en décidant que chaque segment est un solide indéformable.

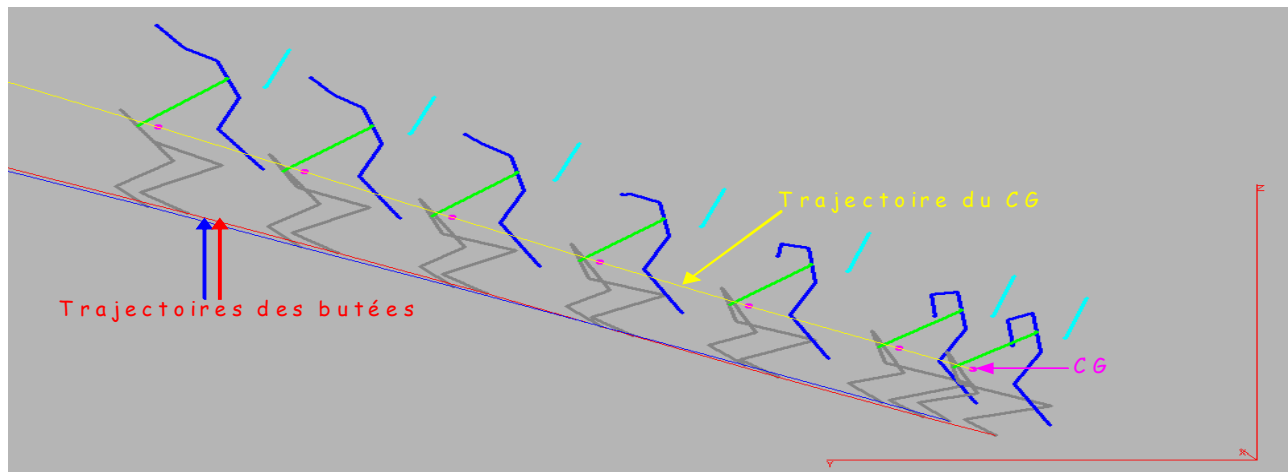


Fig. 9 : le système poly-articulé skieur-skis, la position de son CG et sa trajectoire

La position du CG varie donc sans cesse, dans les trois dimensions de l'espace, en fonction de l'évolution de la posture du skieur. Le CG peut être interne ou externe au corps (figure 9). Il ne s'agit pas d'un lieu anatomique.

Étudions maintenant la notion de pression. Au contact entre deux solides nous distinguons (figure 10) une

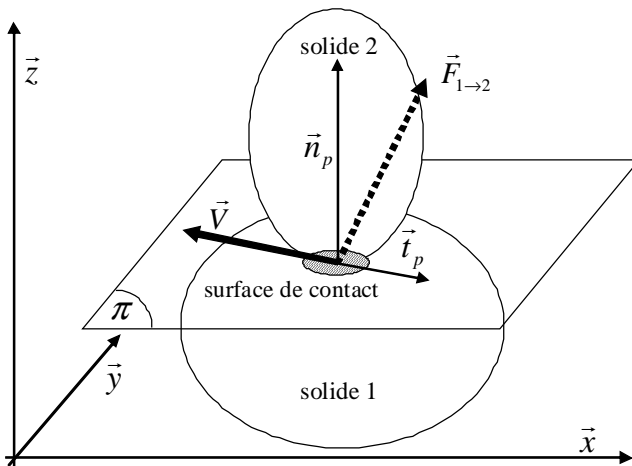


fig.10 : le contact, la pression et le frottement

action normale \vec{n}_p (perpendiculaire au plan de contact) ou *densité surfacique de pression* et une action tangentielle \vec{t}_p (parallèle au plan de contact) ou *action mécanique de contact* (frottement). La pression est le quotient (résultat de la division) de l'action normale par la grandeur de la surface de contact. S'il y a mouvement relatif, la grandeur de la force de frottement \vec{t}_p est le produit (résultat de la multiplication) de \vec{n}_p par f le coefficient de frottement qui dépend de la nature des matériaux en contact et de leur déformation. L'équation qui traduit la relation entre \vec{t}_p et \vec{n}_p est :

$$\|\vec{t}_p(\text{neige} \rightarrow \text{ski})\| = f \|\vec{n}_p(\text{neige} \rightarrow \text{ski})\|.$$

La résultante $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ s'applique au centre de pression de la surface de contact. Elle n'est pas perpendiculaire à la surface de glissement.

Le centre de pression d'une zone de contact est le barycentre des forces élémentaire \vec{F}_i qui s'applique sur chaque surface élémentaire de contact entre les matériaux. Il existe donc un centre de pression neige→ski, un centre de pression jambe→chaussure, un centre de pression air→skieur...

Conséquences pour l'étude mécanique du skieur. La réaction d'appui neige→ski s'applique au centre de pression de la surface de contact neige-ski. Dès qu'il y a glissement, elle est orientée vers l'arrière.

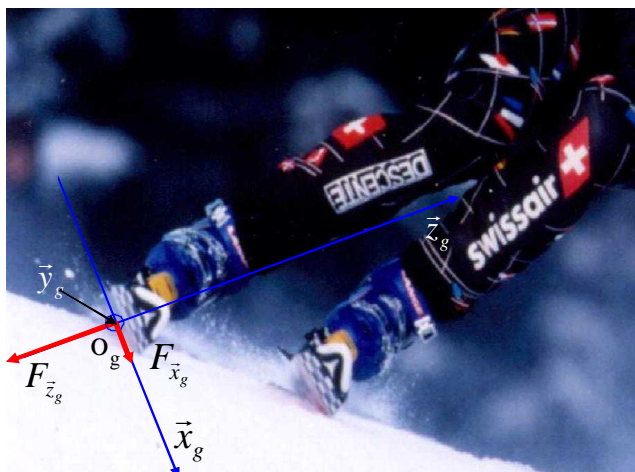


Fig. 11 : en vue de face, en 2 dimensions, la composante verticale F_{z_g} et la composante transverse F_{x_g} de l'action mécanique ski→neige

Poursuivons notre analyse du contact pied→chaussure. Pour l’instant, nous n’avons réfléchi qu’à propos de la perception plantaire, c’est-à-dire de la composante verticale du contact neige→ski. C’est logique puisque nous étions “ski à plat”.

L’étude mécanique ci-dessus est donc partielle, parce qu’en course les coureurs manœuvrent constamment leurs skis pour produire des angles de carres afin de passer d’une trajectoire courbe à une autre⁶ et nous faisons de même. Mettons encore en rapport notre expérience sensible avec la mécanique pour étudier la pratique réelle.

Première observation. Si le ski laisse une trace sur la neige après son passage c’est qu’il pénètre dans le manteau neigeux. En plus de la composante verticale d’appui F_{z_g} il existe donc, dans le repère du centre de la semelle de glissement du ski $R(o_g, \vec{x}_g, \vec{y}_g, \vec{z}_g)$, une composante ski→neige F_{x_g} (figure 11) que nous avons appelé transverse parce qu’elle est orientée suivant l’axe transversal de la semelle de glissement et dont le sens est du ski vers la neige.

Première conséquence de la prise de carre. \vec{R} est orientée non seulement vers l’arrière à cause de la

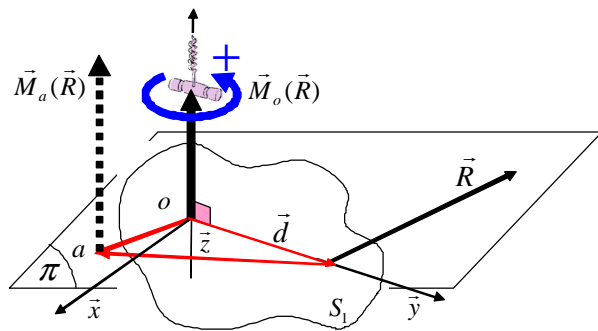


fig.14 : le moment par rapport au point o ou a

La deuxième conséquence de la manœuvre de l’angle de prise de carre est le déplacement, vers la carre d’appui, du centre de pression neige→ski qui se situait en o_g , sur l’axe longitudinal (symétrie) de la semelle de glissement lorsque nous étions “ski à plat”. Il existe maintenant une distance \vec{d} entre le centre de pression CP où s’applique la réaction d’appui \vec{R} et o_g (figure 12).

En mécanique, l’action qui s’applique sur un solide S_1 à une certaine distance de son point o ou de son axe \vec{z} de rotation, comme par exemple celle qu’on exerce sur la poignée d’une porte que l’on pousse et qui tourne autour de ses gonds, se nomme un moment.

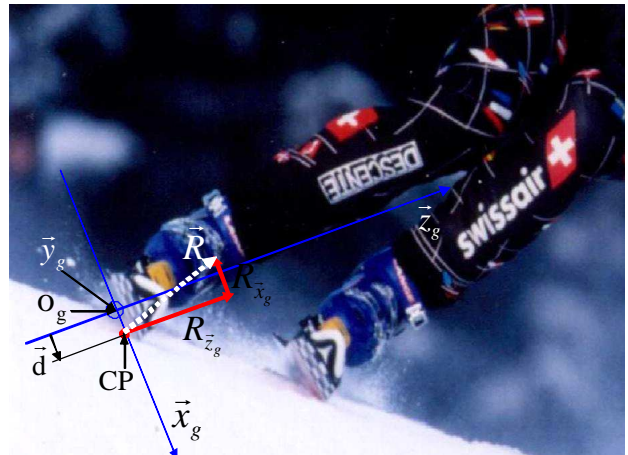


Fig. 12 : en vue de face, en 2 dimensions, la réaction d’appui neige→ski \vec{R} s’applique au centre de pression CP, à une distance \vec{d} de o_g

force de frottement mais aussi vers l’extérieur du virage (figure 12).

Deuxième observation. Lorsque nous inclinons notre jambe pour faire varier l’angle de prise de carre (inclinaison du tibia), nous ressentons une augmentation de pression vers le gros orteil du pied extérieur (pronation) ou vers le petit orteil du pied intérieur (supination). Nous ressentons aussi une variation de pression, à l’intérieur ou à l’extérieur de la jambe, au contact jambe→chaussure. Donnons un sens mécanique à cette perception.



Fig. 13 : moment d’action et moment d’inclinaison

⁶ Un ski ne peut pas produire de traversée rectiligne sans dérapage.

On calcule la grandeur d'un moment en effectuant une opération dont le produit est un autre vecteur perpendiculaire au plan π défini par \vec{d} et \vec{R} (figure 13). En langage mathématique cette opération s'écrit $\vec{M}_o(\vec{R}) = \vec{d} \wedge \vec{R}$. Traduction. Le signe \wedge veut dire produit vectoriel. Le moment par rapport au point o du vecteur \vec{R} est égal au produit vectoriel de \vec{R} par \vec{d} . Son sens est déterminé par la loi du tire-bouchon et lorsqu'il tourne dans le sens anti-horaire (sens inverse des aiguilles d'une montre) il est positif. Le moment peut être calculer par rapport à tout autre point défini dans le même repère. Exemple : par rapport à a il devient $\vec{M}_a(\vec{R}) = \vec{M}_o(\vec{R}) + \vec{R} \wedge \vec{oa}$ (figure 13).

Conséquence pour l'étude mécanique du skieur. Lorsque nous prenons un angle de carre, nous créons, par rapport au point o_g , un moment que nous avons appelé d'inclinaison parce qu'il est la conséquence des trois inclinaisons dissociables que nous avons défini dans le manuel technologique. Ce moment tend à remettre le ski à plat. En deux dimensions, sa grandeur est le résultat du produit vectoriel $\vec{d} \wedge \vec{R}$ par rapport à o_g :

$$\vec{M}_{o_g}(\vec{R}) = \vec{d} \wedge \vec{R}.$$

Pour maintenir l'angle de carre, il faut donc produire, avec une action musculaire inclinant le tibia et la tige de la chaussure, un moment antagoniste (de sens inverse) $\vec{M}_{o_g} = \vec{D} \wedge \text{effort jambe} \rightarrow \text{chaussure}$, par rapport à ce même point o_g (figure 14).

Les perceptions que nous captons entre notre corps et la chaussure nous indiquent aussi des variations de pressions lorsque nous modifions notre posture en avancée ou en recul. La notion d'action et de réaction d'appui est là aussi insuffisante pour donner un sens mécanique aux variations de pression que nous ressentons. Après avoir étudié le contact pied \rightarrow chaussure lors de la prise de carre (plan frontal), complétons l'analyse en l'examinant dans le plan avant-arrière (plan sagittal).

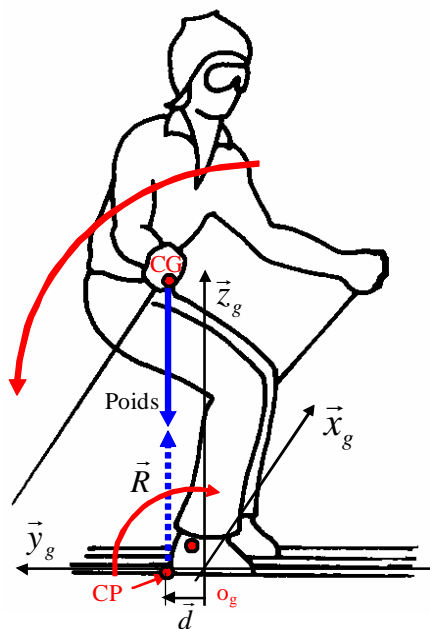


fig. 16 : le moment avant-arrière, cheville "gainée" et étayée, le CP est déplacé

parallèle à \vec{x}_g , dont la grandeur est : $\vec{M}_c(\vec{P}) = (\vec{D} - \overline{o_g \text{ cheville}}) \wedge \vec{P}$ (figure 15).

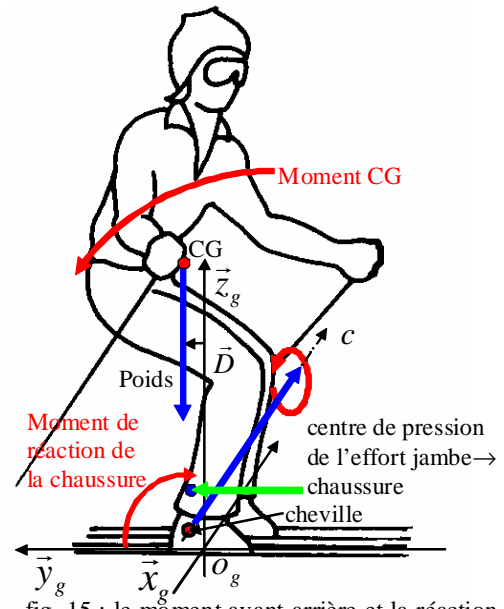


fig. 15 : le moment avant-arrière et la réaction de la chaussure sur la jambe, en 2 dimensions

Reprenons le premier exemple en simplifiant la réflexion. Considérons une situation en deux dimensions où je suis arrêté sur le plat avec une posture constante. Dans ce cas, la force d'appui est égale à mon poids. Elle est constante donc la réaction d'appui $\vec{R} = \vec{F}_{1 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}} + \vec{F}_{2 \text{ neige} \rightarrow \text{ski}}$ qui s'applique sous mes pieds l'est aussi. Si je suis attentif, je perçois sous chacun de mes pieds une augmentation de pression vers mes orteils ou vers mon talon et/ou, sur ma jambe, l'appui sur la languette ou sur le spoiler, lorsque j'oscille vers l'avant ou vers l'arrière.

En oscillant, je déplace mon centre de gravité dans la même direction en faisant varier la distance \vec{D} que mon CG fait avec l'axe verticale \vec{z}_g du repère de la semelle de glissement. Si \vec{D} est inférieure à la distance $\overline{o_g \text{ cheville}}$ je bascule vers l'avant. Si elle est supérieure vers l'arrière. Je crée donc avec mon poids \vec{P} un moment qui fait tourner mon corps, à posture constante, autour d'un axe c passant par l'articulation de mes chevilles,

Pour ne pas basculer, par exemple vers l'arrière, je peux, lorsque les oscillations sont faibles, fournir uniquement un effort musculaire pour "gagner" la cheville afin de m'appuyer vers mon talon. Si elles sont plus amples, je suis obligé, en plus, de prendre appui avec ma jambe sur la chaussure pour renforcer mon action. Ces actions musculaire et/ou mécanique exercées par la chaussure, produisent un moment $-\vec{M}_c$ (sens horaire) de sens inverse au moment produit par mon poids. Je limite ainsi ma bascule autour de l'articulation de mes chevilles (inclinaison de hanche).

Notre expérience nous apprend qu'il n'est pas sans conséquence pour la trajectoire produite par le ski de se piloter en avancée ou en recul. Cette conséquence est due au déplacement du centre de pression neige→ski engendré par les variations de posture lorsque la cheville est "gainée" musculairement et étayée par la chaussure. Le centre de pression du contact neige→ski se déplace, par exemple vers l'arrière, d'une distance \vec{d} (figure 16) transformant les caractéristiques du contact neige→ski. Pour l'exemple ci-dessus où, pour simplifier la réflexion nous considérons en deux dimensions la situation où je suis arrêté sur le plat avec une posture constante, le moment par rapport à o_g est $\vec{M}_{o_g}(\text{poids}) = \vec{d} \wedge \overline{\text{poids}}$.

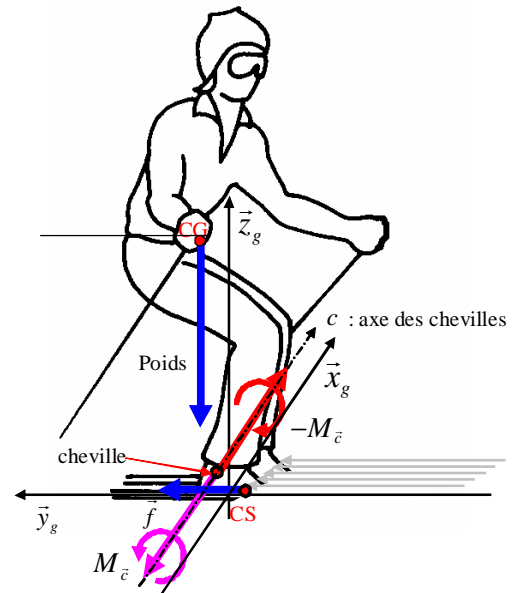


fig.17 : le moment avant-arrière pour anticiper les variations de frottement neige→ski

Les oscillations de notre corps vers l'avant ou vers l'arrière peuvent être des conséquences et non le résultat d'actions motrices. Observation. Nous avons appris qu'en passant de la piste à la poudreuse nous basculons en avant. Sans entrer dans l'analyse précise, nous pouvons expliquer mécaniquement cette conséquence. La bascule est due à l'augmentation de la force de frottement \vec{f} au contact de la neige avec l'ensemble skis-chaussures. \vec{f} est orientée en sens inverse du déplacement (vers l'arrière) et s'applique au centre de pression du contact neige→système CS, situé à une distance \vec{d}_c de l'axe des chevilles c , parallèle à \vec{x}_g . Cette force produit le moment $\vec{d}_c \wedge \vec{f} = -\vec{M}_c(\vec{f})$ (sens horaire) qui fait pivoter les pieds autour de c : en fonction du relâchement des chevilles les talons se lèvent. L'effort est transmis par les pieds aux chevilles qui sont entraînées vers l'arrière, faisant tourner le corps vers l'avant, autour de son centre de gravité.

Contrairement au débutant qui découvre cette conséquence dans l'action, nous l'avons mémorisé (expérience) : elle est devenue prévisible. Pour ne pas culbuter, sans y penser le plus souvent (non-conscience), nous reculons notre corps pour déplacer notre CG vers l'arrière d'une distance \overline{cCG} afin de créer avec notre poids, avant d'entrer dans la poudreuse (anticipation), un moment antagoniste $\vec{M}_c(\text{poids}) = \overline{cCG} \wedge \overline{\text{poids}}$ (sens anti-horaire) de telle sorte à ce que le moment résultant (somme vectorielle des deux moments) soit nul : $\overline{cCG} \wedge \overline{\text{poids}} + \vec{d}_c \wedge \vec{f} = \vec{0}$ (figure 17).

Chaque fois que la force de frottement neige→skis varie le corps oscille vers l'avant ou vers l'arrière. Cette cause entraîne de la part du skieur des ajustements posturaux non conscients et subtils qu'un observateur non averti peut prendre pour une attitude de recul ou d'avancée alors qu'il s'agit d'une manœuvre anticipée (fluidité) d'équilibration. Notons que la force de frottement s'applique au centre de pression du contact neige→ski, c'est-à-dire vers la carre d'appui, en arrière ou en avant de \vec{x}_g .

Pour achever cette étude simplifiée des composantes du moment résultant au contact neige→ski, il faut encore prendre en compte le moment de pivotement engendré autour de \vec{z}_g par la distance $\overline{CP o_g}$ et la composante de frottement \vec{f} (figure 18), plus l'effet directionnel du ski que nous étudierons plus loin.

Ces exemples rendent évidente la complexité des interactions qui ont lieu au contact neige→ski et certaines des possibilités dont dispose l'athlète pour les modifier par ses actions motrices. Pour les évaluer et en parler, il ne s'agit pas d'en rester aux seules conséquences de l'action d'une force d'appui et de sa réaction, toutes deux verticales, engendrant une sensation de pression sous la plante du pied. Il faut tenir compte de la pression latérale engendrée par le moment résultant afin de ne pas confondre, par exemple, cette conséquence avec l'effort au contact chaussure→jambe causé par une flexion de cheville.

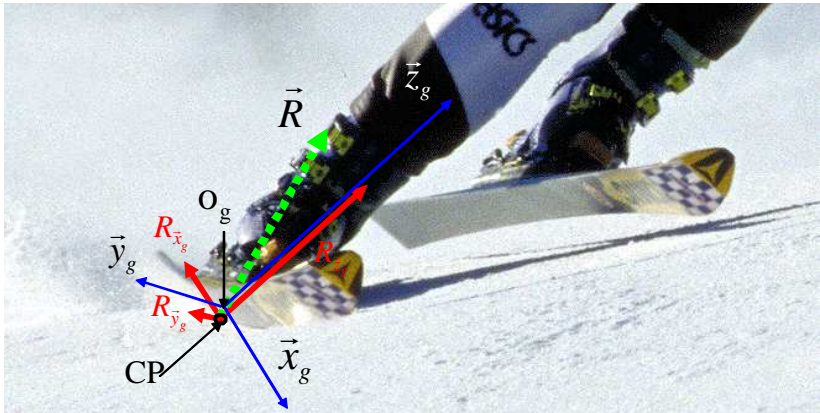


fig. 18 : la force résultante et ses trois composantes

En trois dimensions. Dans le repère de la semelle de glissement o_g , la réaction d'appui $\vec{R} = Fx_g.\vec{x} + Fy_g.\vec{y} + Fz_g.\vec{z}$ est orientée vers l'extérieur du virage et le plus souvent vers l'arrière (figure 18). Le moment résultant $\vec{M}_{o_g}(\vec{R})$ est la somme vectorielle des trois moments que nous venons d'analyser succinctement : le moment avant-arrière autour de l'axe \vec{x}_g ; le moment d'inclinaison autour de l'axe \vec{y}_g et le moment de pivotement autour de l'axe \vec{z}_g (figure 19).

Le mot désignant le concept mécanique intégrant la résultante et le moment de l'action mécanique qu'exerce entre eux, au centre de pression de la zone de contact, deux solides, deux systèmes, un solide ou un système avec son environnement est "torseur" que l'on écrit $\{T\}$.

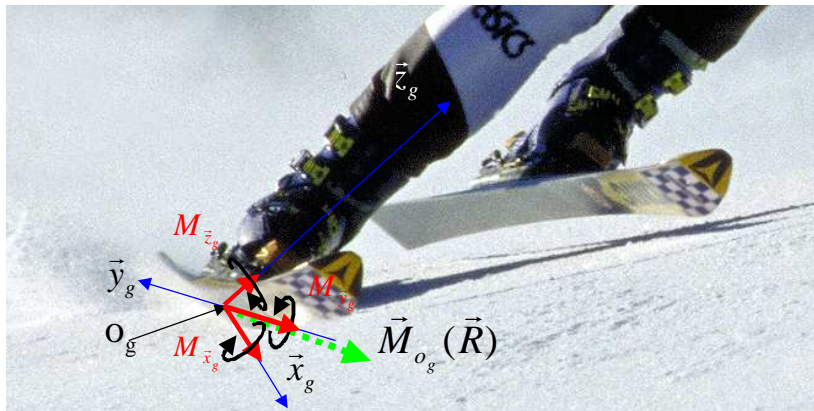


fig. 19 : le moment résultant et les trois moments composants

Traduction pour l'étude du skieur : à chaque contact neige→ski le manteau neigeux applique sur le

système skieur-skis un torseur que nous pouvons écrire $\{T_{neige \rightarrow ski}\} = \begin{Bmatrix} \vec{R} \\ \vec{M}_{o_g} \end{Bmatrix}$

Du point de vue perceptif, un torseur est une action mécanique qui en même temps pousse et fait tourner.

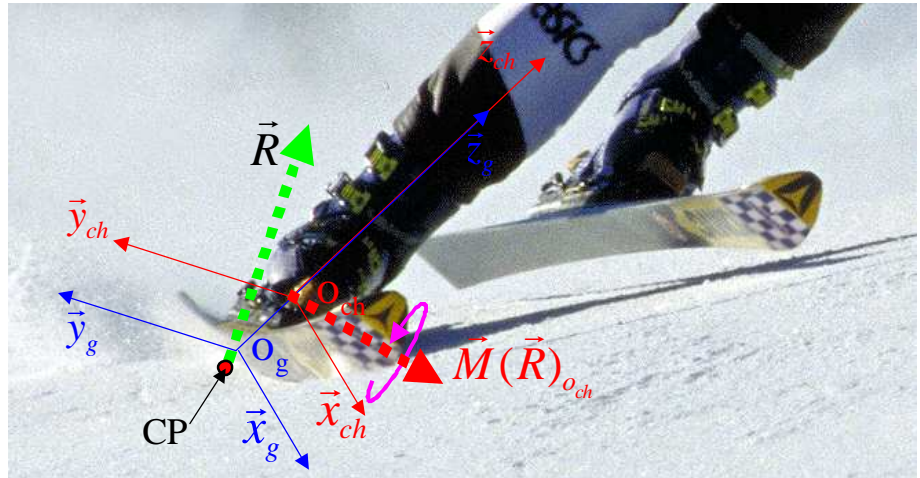
C'est à l'aide de la notion de torseur que nous pouvons généraliser la troisième loi de Newton : au contact entre deux solides, entre deux systèmes ou entre un solide, un système et son environnement la somme vectorielle des torseurs est nulle : $\{T_{1 \rightarrow 2}\} + \{T_{2 \rightarrow 1}\} = 0$.

Revenons à la relation contact pied→chaussure / contact neige→ski. Nous savons que la hauteur de la semelle de la chaussure par rapport à la semelle de glissement du ski est réglementée. Examinons les conséquences de cette distance sur les contraintes imposées par la neige au ski donc à la jambe et au genou via la plaque, la fixation et la chaussure.

Étudions la géométrie du ski et de l'ensemble plaque, fixation, chaussure. Nous avons situé le repère $R(o_g, \vec{x}_g, \vec{y}_g, \vec{z}_g)$ de la semelle de glissement de telle sorte que l'axe vertical \vec{z}_g de ce repère passe par l'axe de symétrie du repère de montage du ski o_s gravé par le fabricant. Le repère $R(o_s, \vec{x}_s, \vec{y}_s, \vec{z}_s)$ est

l'origine à partir de laquelle le ski est conçu. \vec{z}_g passe aussi par l'axe de symétrie du milieu de la chaussure o_{ch} gravé sur la coque de celle-ci parce que le repère de montage du ski et l'axe du milieu de la chaussure sont positionnés en vis à vis lors du vissage de la fixation. L'axe vertical \vec{z}_{ch} du repère du milieu de la semelle intérieure de la chaussure $R_{ch}(o_{ch}, \vec{x}_{ch}, \vec{y}_{ch}, \vec{z}_{ch})$ se confond donc avec l'axe vertical \vec{z}_g du repère, les plans $\vec{x}_g, o_g, \vec{y}_g$ et $\vec{x}_{ch}, o_{ch}, \vec{y}_{ch}$ sont parallèles (figure 20). La hauteur existant entre la semelle de glissement et la semelle intérieure de la chaussure, là où repose le pied, est donc le vecteur $\overline{o_g o_{ch}}$ porté uniquement par l'axe \vec{z}_g .

Calculons, en trois o_g dimensions, le moment résultant neige→ski par rapport à o_g puis par rapport o_{ch} . Comparons les pour voir l'influence de cette hauteur sur les contraintes transmises de la neige vers le genou. Avec \vec{d} la distance $\overline{o_g CP}$ et $\overline{o_g o_{ch}}$ la hauteur \vec{h} .



Nous avons vu (page 6) qu'il est possible de calculer les caractéristiques d'un moment par rapport à deux points différents de l'espace défini par un repère.

Par rapport à o_g : $\vec{M}_{o_g}(\vec{R}) = \vec{d} \wedge \vec{R}$.

Par rapport à o_{ch} : $\vec{M}_{o_{ch}}(\vec{R}) = \vec{M}_{o_g}(\vec{R}) + \vec{R} \wedge \overline{o_g o_{ch}}$

$$= \vec{M}_{o_{ch}}(\vec{R}) = (dy.Rz + Ry.h)\vec{x} - (dx.Rz + Rx.h)\vec{y} + (dx.Ry - dy.Rx)\vec{z}.$$

Nous voyons que lorsque \vec{h} augmente les composantes du moment résultant autour de l'axe \vec{x}_{ch} et de l'axe \vec{y}_{ch} augmentent. Le moment résultant $\vec{M}_{o_{ch}}(\vec{R}) = \sqrt{Mx + My + Mz}$ augmente aussi, contraignant plus fortement la chaussure et la jambe et donc les ligaments du genou. La composante \vec{y}_{ch} est négative, elle est dirigée vers l'avant (figure 13).

Le torseur est donc : $\left\{ T_{neige \rightarrow chaussure} \right\}_{o_{ch}} = \begin{Bmatrix} \vec{R} \\ \vec{M}_{o_{ch}}(\vec{R}) \end{Bmatrix}$

Bibliographie : Du plus abordable au plus complexe :

Durey A (1997). Physique pour les sciences du sport. Paris, Masson.

Allard P et Blanchi JP (1996). Analyse du mouvement humain par la biomécanique. Québec, Décarie éditeur.

Duboy J, Junqua A et Lacouture P (1994). Mécanique humaine. Paris, Revue EPS.

Brémont Y et Réocreux P (1996). La "Mécanique du solide indéformable", cinématique, statique et dynamique. Paris, éditions ellipses.