

Modélisation du système skieur-skis et développement d'un simulateur informatique visant à l'amélioration de la performance des skieurs et de leurs équipements

François ROUX
INSEP, Laboratoire d'Informatique
Appliquée au Sport
11 avenue du Tremblay
75012 Paris, FRANCE
+33 492 212 477
lias@insep.fr

Gilles DIETRICH
UFR STAPS
1 rue Lacretelle
75015 Paris, FRANCE
+33 156 561 245
Gilles.dietrich@parisdescartes.fr
r

Aude-Clémence Doix
INSEP, Laboratoire d'Informatique
Appliquée au Sport
11 avenue du Tremblay
75012 Paris, FRANCE
Tel+33 674 711 601
lias@insep.fr

RESUMÉ

Contexte. Par expérience de l'enseignement du ski, de l'entraînement, de la compétition, nous constatons des décalages entre le modèle institutionnel décrivant les techniques corporelles et les actes moteurs produits par les athlètes performants. L'évolution des nouveaux skis paraboliques avec leurs nouvelles caractéristiques mécaniques accroissent encore ces différences. La plupart du temps, les articles scientifiques diffusent des résultats où le skieur alpin est dissocié de ses skis. De plus, les magazines spécialisés, les manuels et articles scientifiques diffusent des articles dont l'épistémologie est similaire. Dans cet article, nous décrivons comment nous avons développé une analyse tridimensionnelle pour modéliser le système skieur-skis. Alors, nous avons utilisé cette modélisation pour proposer aux entraîneurs une grille de lecture composée de huit techniques et trois conséquences observables, dans le but d'objectiver les évaluations qu'ils font des techniques de leurs athlètes. Dès lors que le système est modélisé, nous pouvons viser le développement d'un simulateur informatique sous la forme d'un pantin articulé respectant les degrés de liberté du modèle, dont nous pourrions manipuler le déplacement de chaque segment corporel ou les caractéristiques de ses équipements, pour constater des variations de performance. L'objectif de notre projet est d'élaborer des hypothèses d'amélioration des performances, de donner aux entraîneurs des protocoles expérimentaux qui permettront de les évaluer. De plus, cette simulation informatique dépasse le cadre du ski alpin pour concerner tous les sports de glisse et de roulette.

Méthodes. Onze skieurs alpins de niveau mondial ont participé à cette étude. Des caméras vidéo ont été utilisées pour observer les actions motrices des skieurs lors d'une tâche de virage en slalom géant ou en slalom. Les données cinématiques ont été saisies dans le logiciel 3Dvision. Deux balances embarquées ont été utilisées pour mesurer les six composantes des torseurs chaussures→skis. Les différentes sources de données ont été synchronisées.

Résultats. Nous avons montré des conséquences entre les mesures des forces et des moments, le déplacement des centres de pression et les huit techniques corporelles remarquables (« observables »). De cette vue d'ensemble des données, nous avons créé une modèle technologique du système skieur-skis. Depuis, nous utilisons la grille de lecture et le modèle pour entraîner de jeunes skieurs alpins dans des clubs, et aussi des skieurs de coupe

du monde, nous avons obtenu de bons résultats prouvant l'utilité de nos recherches.

Interprétation. Ces résultats suggèrent qu'il est maintenant possible de créer un simulateur tridimensionnel du skieur pour dépasser la simple comparaison entre les techniques des champions et ceux qui désirent devenir plus performants qu'eux, et aussi pour découvrir de nouvelles techniques corporelles et de nouveaux équipements plus performants.

Catégories et Description des sujets

Termes Généraux

Mesure, Performance, Expérimentation.

Mots Clefs

Système skieur-skis; Modélisation; Simulation Informatique; Techniques corporelles; Grilles d'évaluation; Observables.

INTRODUCTION

Pour enseigner ou entraîner, le moniteur ou l'entraîneur utilise des repères d'observation comme autant de critères d'évaluations et un modèle du fonctionnement mécanique du skieur mettant en relation des causes et des conséquences, avec lequel il formalise les consignes qu'il transmet à l'apprenti skieur ou à l'athlète. L'ensemble de repères ou "observables" constituant la "grille" de lecture qu'il utilise pour l'évaluer et les causalités mettant en rapport chaque geste qui lui paraît pertinent avec les effets mécaniques qu'il lui attribue s'élaborent dans une tension entre ses propres expériences de skieur et des connaissances transmises socialement au cours de séances d'apprentissage ou qu'il glane en observant et en attribuant un but à ses pairs ou dans la littérature technique [1].

De cette autodidactie ponctuée d'apports scientifiques souvent éparses et/ou hétéroclites résulte des savoirs technologiques dont le degré de subjectivité, quelque fois important, explique selon nous le décalage que nous constatons entre un modèle institutionnel décrivant des techniques corporelles jugées efficaces et les actes moteurs mis en œuvre par les athlètes performants que nous observons au cours des compétitions.

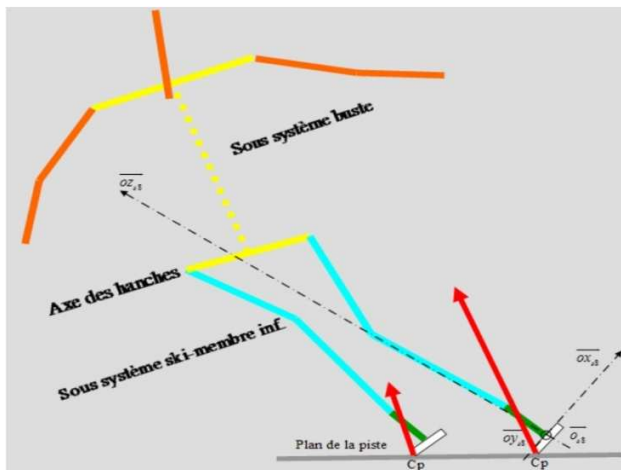
Pour tenter de d'objectiver nos propres conceptions concernant la pratique [2] du ski alpin. Nous nous sommes posé deux questions

de départ : 1) Que font réellement les skieurs alpins experts ? Que faut-il enseigner à un skieur pour l'aider à devenir performant ?

LE SYSTÈME SKIEUR-SKIS

Bien que dans sa grande majorité, la littérature consacrée au ski alpin communique des études dans lesquelles le corps du skieur, souvent considéré comme un monolithe, est dissocié de ses équipements. Nous, nous pensons qu'il n'est possible d'observer et de modéliser scientifiquement cette pratique, comme toutes celles qui dépendent des interactions homme/engin, qu'en considérant les interactions dynamiques entre les segments mobilisés au cours de la pratique et celles qu'il entretient avec ses skis. Leur négation réduit tellement la complexité du système qu'il constitue avec ses skis, que toute étude locale perd la signification du tout. Surtout lorsque l'investigation vise la compréhension et la transmission de savoirs technologiques¹, où l'outil ski joue le rôle « d'intermédiaire entre une pensée et une action » [3]. Pour désigner cet ensemble, nous utilisons l'expression « système skieur-skis ».

De ce parti pris et de ce que nous savons aujourd'hui sur les techniques, il résulte qu'un skieur alpin doté de ses équipements constitue un système composé de deux sous-systèmes agrégeant eux-mêmes plusieurs sous-systèmes. Le premier, sur lequel s'applique les torseurs neige→skis, est lui-même composé des sous-systèmes skis et membres inférieurs. Le second, qui s'articule avec le précédent sur chaque articulation coxo-fémorale, est constitué du buste, de la tête et des membres supérieurs (image ci-dessous).



LA MODELISATION DU SYSTEME SKIEUR-SKIS

La décennie comprise entre 1995 et 2005 fut celle de la transformation des équipements du skieur alpin et notamment des caractéristiques mécaniques des skis, grâce à la mise à disposition de nouveaux matériaux, et de leurs caractéristiques géométriques, sous l'impulsion des snowboarders. Cette évolution de l'engin à rendu caduc certaines routines professionnelles d'observations et bon nombre de modèles explicatifs empiriques de la pratique. Cela a encore renforcé la subjectivité avec laquelle la plupart des pratiquants et des professionnels dissertent sur le ski alpin.

Pour répondre à nos questions de départ, il fallait analyser et mathématiser les gestes qu'effectuent les skieurs alpins de ce niveau de technicité au cours de leur pratique réelle, pour mettre en évidence les éventuelles techniques corporelles qu'ils auraient en

commun et qui seraient susceptibles de constituer un modèle de la pratique, pour organiser nos déductions et objectiver notre propre compréhension des interactions existant entre les techniques du corps, les caractéristiques des équipements et les variations des torseurs neige→skis guidant finalement le skieur sur le manteau neigeux.

MÉTHODOLOGIE

Cette décennie fut aussi celle du perfectionnement des instruments d'investigation des pratiques humaines, par le développement de la microinformatique et des caméras vidéographiques. Dès cette période, pour objectiver ses connaissances sur les techniques, le Laboratoire des Sciences, Techniques, Éducation, Formation (STEF) de l'ENS de Cachan, dirigé à l'époque par Jean-Louis Martinand, dans lequel notre travail de thèse fut effectué sous la Direction d'Alain Durey, s'est doté de l'outil vidéographique d'analyse et de modélisation tridimensionnel des mouvements ID3D, développé par Gilles Dietrich.

Nous avons fait trois expérimentations différentes avec ce dispositif pour capturer les données cinématiques indispensables à notre recherche. La première a eu lieu aux Saisies pendant une course de slalom géant de la Fédération Internationale de Ski (FIS), avec neuf skieurs. La seconde, toujours en slalom géant, s'est déroulée avec une femme sur le glacier de la Grande Motte à Tignes, et la dernière à réunie deux hommes et une femme sur le glacier du Mont de Lans aux Deux-Alpes, sur des parcours de slalom et de slalom géant. Treize skieurs l'équipe de France de ski, titulaires de la coupe du monde ont donc participé à l'étude.

L'expérience des Saisies fut effectuée sous la Direction de Michel Tavernier qui dirigeait la cellule de recherche de la FFS. Michel Vion, Directeur Technique National (DTN), avait obtenu un accord de l'arbitre de la course pour positionner les caméras sur les cotés de la piste. L'objectif était de capturer les données cinématiques des techniques corporelles que les skieurs mettent en œuvre au cours d'une situation réelle de course, pour déclencher leurs virages et se piloter sur une trajectoire la plus performante imposée par le tracé. L'écart vertical entre les deux portes de slalom géant qui faisait partie du volume d'expérimentation était de 20 mètres, leur écart horizontal était de 6 mètres. Nous avons utilisé deux caméras vidéo. L'axe optique de l'une d'elles était orienté suivant la trajectoire probable du skieur pendant la phase de déclenchement, tandis que celui de la seconde caméra formait un angle de 30 degrés avec le premier. Le champ optique commun au deux caméras était orienté vers l'endroit où les skieurs alpins devaient initier le virage suivant. La distance de la première caméra était de 20 mètres, avec un grossissement maximum. La distance de la seconde caméra était de 30 mètres avec un grossissement maximum aussi. De cette façon, nous avons atténué les problèmes liés à la sphéricité des optiques et augmenter la grandeur du skieur sur la cellule de capture de la caméra pour augmenter la précision de nos mesures. Après avoir calibré l'espace de l'expérimentation, nous avons enregistré les images, saisi en 2D les données cinématiques des mires situées sur les articulations du skieur, remarquables pour cette pratique, et reconstruit leurs trajectoires en 3D à l'aide du logiciel 3Dvision conçu par G Dietrich qui intègre l'algorithme DLT [4].

¹ La technologie est la science des techniques.

L'expérience de Tignes, fut effectuée en collaboration avec la cellule de recherche de la FFS et le département R&D du fabricant de skis Rossignol SA, en vue de vérifier s'il était possible de modéliser le système skieur-skis. Le département R&D de Rossignol SA ne possédait alors qu'une plateforme de mesure du torseur skis→chaussure. Nous l'avons fixé entre le ski et la chaussure gauche de la skieuse. Les mesures des actions mécaniques étaient recueillies avec des centrales d'acquisition fixées par un harnais sur le buste de la skieuse, à une fréquence de 936 Hz.

Nous avons utilisé 6 caméras, 3 de chaque côté de la trajectoire présumée de la skieuse. Dix-neuf mires hémisphériques à carrées jaunes fluorescent et noirs ou en ruban adhésif, ont été placées sur le corps du sujet (repères anatomiques) et sur les skis : deux sur chaque chaussure, en regard des malléoles internes et externes de la cheville, une sur chaque genou, une sur chaque hanche, une sur chaque main, une sur chaque coude, une sur chaque épaule et une sur le sommet du casque ; une devant la butée de fixation de chaque ski, une derrière la butée de fixation de chaque ski (images ci-dessus).

Après avoir calibré l'espace de l'expérimentation, les données cinématiques des mires "sujet" et "skis" ont été acquises à 25 Hz et reconstruites en 3D, avec la même procédure et le même logiciel que pour l'expérimentation des Saisies.

Les images des six caméras vidéo, synchronisées entre elles, ont été synchronisées avec le dispositif d'acquisition des six composantes des torseurs skis→chaussure, mesurées par la plateforme de force embarquée. Pour cela, nous avons utilisé une télécommande de type modèle réduit, qui transmettait un signal à la centrale d'acquisition et allumait une diode dans le champ d'une des caméras. En faisant correspondre la valeur du time-code de la première trame de l'image sur laquelle était repéré l'éclairage de la diode avec le front du signal carré enregistré par la centrale d'acquisition, nous synchronisons les données cinématiques avec les données vidéographiques, dans un intervalle de 0,04s (25Hz).

L'expérimentation des Deux-Alpes fut effectuée avec un partenariat différent. L'équipe du STEF de l'ENS de Cachant, composée de Alain Durey, François Roux et Gilles Dietrich s'était déplacée au Laboratoire Aérodynamique et Biomécanique du Mouvement de l'université d'Aix-Marseille II (LABM) et collaborait directement avec Alain Zanco et Jean-Louis Allera du département R&D du fabricant de skis Rossignol SA. Grâce aux expérimentations des Saisies et de Tignes, nous savions désormais capturer et reconstruire les données cinématiques des mires situées sur le corps du skieur et ses skis. À Tignes, nous avons appris à les synchro-

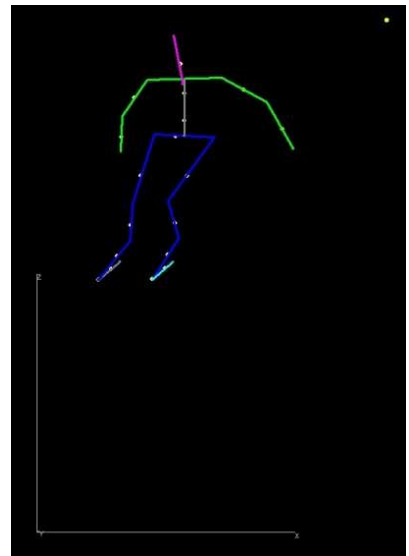


niser avec les mesures provenant d'une plateforme de force embarquée. Le département R&D des skis Rossignol SA fournissait désormais deux plateformes de force Kistler capables de mesurer les torseurs skis→chaussures à 936 Hz. Nous complétions ainsi le dispositif de capture des données indispensables à la modélisation du fonctionnement du système skieur-skis.

L'expérimentation de Tignes avait montré qu'un dispositif à quatre caméras était suffisant. Nous savions aussi que la gerbe de neige soulevée par les skis nuisait à la vision des mires "skis" et "chaussure". Nous avons donc surélevé les caméras sur des échafaudages, afin d'avoir une vue plongeante sur celles-ci et reconstruit par le calcul la position des chevilles, à partir de leurs emplacements par rapport aux mires "skis" (image ci-dessous).



Comme pour les autres expérimentations, nous avons calibré l'espace d'expérimentation en relevant les coordonnées polaires des mires de calibration, faites de balles de tennis noir et jaune empalées sur un bâton en bois planté dans la neige, avec un théodolite et un triple décimètre, l'origine des données sphériques polaires étant le centre optique de ce théodolite. Nous avons relevé aussi les coordonnées des mires que nous avons positionnées au pied des piquets interne des portes des tracés de slalom et de slalom géant, pour faciliter les changements de repère au cours des calculs. Toutes les données ont été saisies et reconstruites en 3D avec le logiciel 3Dvision et synchronisées avec les mesures des torseurs, en utilisant le dispositif mis au point au cours de l'expérimentation de Tignes.



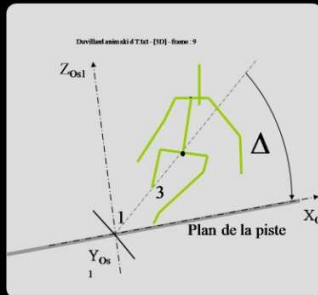
À partir du modèle filaire obtenu (figure ci-dessus), nous avons déterminé la position d'un certain nombre de centres de masse segmentaires, en utilisant le modèle anthropométrique Hanavan [5, 6]. Puis nous avons calculé celle de son centre de masse global. Ces segments ont été choisis parce qu'ils permettent de produire les huit techniques fondamentales que le skieur combine pour se piloter. Celles que nous avons fait émerger de l'analyse

des mouvements effectuée au cours de notre travail de thèse, par les expérimentations des Saisies et de Tignes, pour leurs pertinences, du point de vu des praticiens du plus haut niveau mondial et des théories de la physique.

La définition de la technique "inclinaison latérale du genou"

Le codage logique du physicien

Dans le repère O_{Os1} , l'angle d'inclinaison latérale du genou droit est formé par l'axe O_{Os1} - X_{Os1} , porté par la direction du rayon de la trajectoire du point 1, et l'axe "centre de montage du ski-genou" (point 1-point 3) du côté correspondant, projeté sur le plan Z_{Os1} - O_{Os1} - X_{Os1} .



La définition de l'observable "inclinaison latérale du genou"

Le codage perceptif de l'entraîneur

En vue de face, c'est l'angle formé par l'axe milieu de chaussure-genou et le plan de la piste.



Nous les avons définis de ce double point de vue. Ce qu'illustrent par exemple les images ci-dessus décrivant la technique dite de la « bascule de tibia » dont l'appellation, après consultation des praticiens, est devenue « l'inclinaison latérale du genou » pour des raisons culturelles. La première définition respecte la logique rigoureuse des physiciens. La seconde, la traduit en un observable utile pour enseigner ou entraîner, parce que directement perceptibles par le moniteur ou l'entraîneur sur le terrain et décrits, avec des mots usités dans ce milieu professionnel, les conceptions biomécaniques retenue pour la définition mathématique, en conservant des repères identiques.

Car pour nous, la technologie est une science humaine [7]. Alors, de ce point de vue, l'analyse et la mathématisation des mouvements ne sont utiles aux praticiens que lorsqu'elles révèlent les techniques qu'inventent les experts pour atteindre leurs buts en satisfaisant les lois de la physique [8] et les résultats des recherches biomécaniques ne prennent un sens pour eux qu'en devenant des outils opérationnels pour agir, enseigner ou entraîner dans l'environnement réel de leur pratique, dont ils peuvent constater l'effet sur les performances. Nous avons donc adopté une épistémologie inductive qui s'enracine la une pratique réelle. Nous avons donc élaboré cette méthodologie en nous référant conjointement aux théories permettant d'analyser et de mathématiser les mouvements des athlètes et à la façon dont l'humain perçoit le monde qui l'entoure et partage ses perceptions avec

autrui. Celles que relatent des psychologues [9 à 12] et des neuropsychologues [13 à 18] guidés par des conceptions philosophiques [19 à 26].

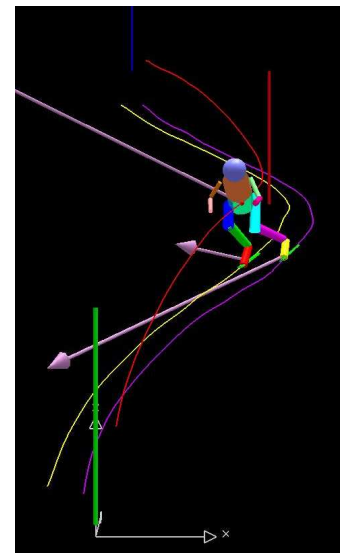
Que déduisent-ils de leurs recherches ? Pour eux, percevoir ce n'est pas traiter des données suivant un raisonnement logique. Percevoir c'est se reconstruire un monde en fonction de ce que l'on connaît et de ce que l'on cherche dans cet environnement dans lequel nous sommes situés ici et maintenant. Le moniteur ou l'entraîneur qui observe un skieur utilise donc des routines subjectives et des raisonnements appris pour apporter des réponses qui satisfont son désir. En l'occurrence, il s'agit ici du désir d'aider le sportif à progresser techniquement. Alors, il l'évalue en portant son attention sur des repères non conscients et/ou conscients situés sur son corps et ses skis et imagine des causalités entre une conséquence perçue et la cause qui l'engendre, pour formaliser ses consignes. Ses critères d'évaluations se sont élaborés au cours de son histoire de vie, d'après ses expériences de skieur, de moniteur et/ou d'entraîneur et sont influencés par des savoir-faire, des savoir-être et des savoirs transmis par les gestes et/ou les mots parlés ou écrits de ceux qui ont attiré son attention.

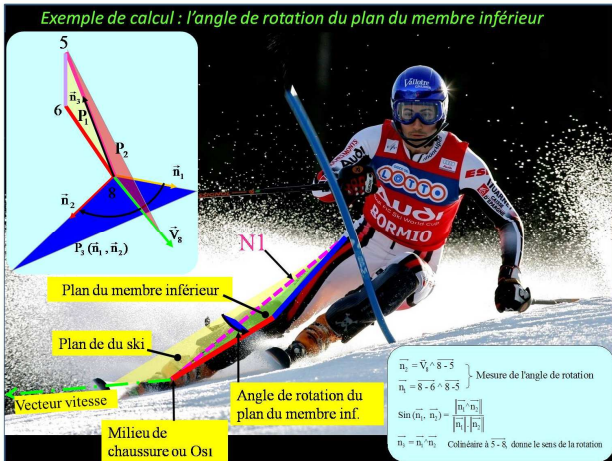
C'est aussi un désir qui nous motive lorsque nous effectuons des recherches. Nous voulons influencer les enseignants sportifs de ski alpin en produisant des connaissances technologiques, dont l'utilité éveille leur intérêt et participent à l'objectivation de leurs deux outils fondamentaux que sont sa grille de lecture des techniques et son modèle explicatif des causalités mises en jeu au cours de la pratique, avec lesquels il démontre, met en mimes ou en mots des consignes plus justes et plus compréhensibles, pour éviter que l'échec d'un jeune coureur n'émane de croyances ou d'illusions technologiques l'induisant en erreur. Le travail du chercheur ne s'arrête donc pas à la production de tableaux de chiffres, fussent-ils traduits en courbes. Mais une fois qu'il fait l'effort didactique de les transposer dans le monde perceptif des praticiens, en les traduisant en savoirs utiles pour agir et intervenir, afin de les inciter à s'intéresser au monde des scientifiques.

QUELQUES RÉSULTATS

Nous avons modélisé le système articulé skieur ski en incorporant au modèle filaire les caractéristiques cinétiques des segments concernés par la pratique et en lui appliquant les torseurs aux contacts ski→chaussure. La figure ci-contre montre le modèle segmentaire avec les résultantes des torseurs ski→chaussure et la direction de l'accélération de centre de masse global.

Nous avons calculé les variations de certains angles articulaires, pour mettre en évidence les techniques que chaque sujet participant à nos expérimentations met en œuvre pour se piloter (exemple de calcul ci-dessus).





Avec ces données, nous avons effectué des comparaisons statistiques qui objectivent notre modèle empirique de la pratique. Les deux graphiques ci-dessous montrent en 2D les variations de l'angle d'inclinaison latérale du genou, ou supplémentaire à l'angle de prise de carre défini précédemment. Il est mesuré dans le repère mobile $o, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ du centre de montage du ski, qui est l'origine à partir de laquelle le fabricant développe les skis qu'il conçoit et qui devient le milieu de la chaussure pour le praticien, au prix d'une approximation négligeable pour l'observateur puisque la chaussure est maintenue par les fixation de manière à ce que son milieu soit en vis à vis avec le centre de montage mais séparé par l'épaisseur de l'interface ski-fixations. Ils font apparaître une certaine dispersion de grandeur et de timing mais aussi une forme semblable qui démontre surtout que l'action est effectuée par tous les coureurs². Il s'agit bien d'une des techniques fondamentales permettant de faire varier l'angle de prise de carre et constitue nos modèles biomécanique et technologique.

Par exemple, nous avons ainsi montré, contre le modèle institutionnel, en confrontant nos résultats aux déterminismes squelettiques³ de notre espèce décrits par les physiologistes [26], que les skieurs les plus performants utilisent la technique de la rotation du plan du membre inférieur formé par l'axe milieu de chaussure-genou et genou-coxo-fémorale, autour de l'axe milieu de chaussure-coxo-fémorale, par une adduction du fémur sur le bassin produisant une inclinaison latérale du genou extérieur. Cela pour faire varier l'angle de carre sans déplacer substantiellement son centre de masse sur le pied intérieur, afin de produire une composante radiale au contact neige→ski déclenchant le changement de direction qu'il désire effectuer.

Nous avons transposé cette conception biomécanique dans le monde perceptif et moteur des praticiens, en complétant la description de l'observable décrit plus haut qui la symbolise, par une causalité qui lui donne un sens pour agir et intervenir : « L'inclinaison latérale du genou extérieur est la seule façon de faire varier, dans les limites des laxités articulaires, l'angle de prise de carre de ce ski tout en restant en appui prédominant sur le ski extérieur, afin de déclencher un effet directionnel. » Et nous

² L'origine de temps est l'instant où le rayon de la trajectoire du ski intérieur change de sens en devenant le ski extérieur du virage suivant.

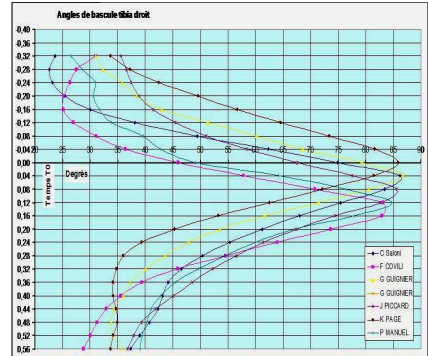
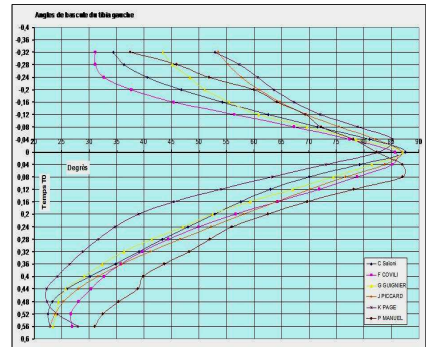
³ Nous n'avons pas évolué pour faire du ski. Pour skier, nous contournerons nos déterminismes squelettiques, ceux qui optimisent notre aptitude à la marche, pour trouver nos moyens de subsistances, un partenaire sexuel... ou encore à courir pour échapper à un prédateur.

ajoutons, pour montrer comment cette technique contourne nos déterminismes squelettiques :

« Cette technique devient possible lorsque le skieur fléchit son genou approximativement à 120 degrés car il libère alors le deuxième degré de liberté de son genou qui permet le vissage de sa jambe. »

Certains résultats provisoires de nos travaux ont été diffusés sous formes d'articles dans les numéros 37 et 38, 40 à 43 et 46, dans la

revue de l'Association Française des Entraîneurs de Ski Alpin (AFESA), entre 2001 à 2002. Le contenu de ces articles sera actualisé par la publication imminente d'un manuel technologique. Car la grille de lecture et le modèle technologique ont été profondément remanié pour tenir compte de leur mise à l'épreuve, au cours d'entraînements réels avec des élèves et des compétiteurs de tous les âges et de tous les niveaux, notamment au club de l'École du Ski Français (ESF) de Montgenèvre, au club des sports des Deux Alpes, au cours de nos interventions dans le cursus du deuxième degré de ski alpin qu'organise l'école nationale de ski et d'Alpinisme (ENSA), à l'université des sciences du sport de Fribourg..., grâce à la coopération pertinentes des moniteurs, des entraîneurs et des professeurs avec lesquels nous avons travaillé pour élaborer une grille de lecture, un modèle technologique et des outils d'intervention utiles pour skier, enseigner et entraîner.



Pour terminer avec l'exposé de nos résultats. L'hiver dernier, nous avons travaillé directement sur le terrain ou théoriquement et

par DVD rom interposé avec Sandrine Aubert du Club Sports des Deux-Alpes, membre des équipes de France, spécialiste du slalom. Nous proposons ci-dessous, deux images synchronisées illustrant le code que nous avons inventé pour transmettre nos évaluations et nos conceptions technologiques, en comparant les techniques utilisées par le vainqueur avec celles de l'athlète que nous conseillons.

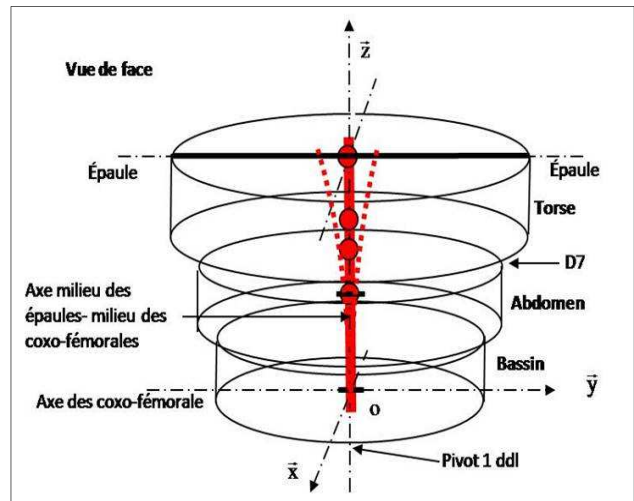


UN SIMULATEUR INFORMATIQUE DU SYSTÈME SKIEUR-SKIS

La modélisation nous permet de proposer actuellement aux entraîneurs et aux moniteurs une grille de lecture composée de onze repères d'observation dont les huit symbolisent les techniques du corps qu'il faut utiliser et doser simultanément pour se piloter suivant la trajectoire la plus performante imposée par le tracé de la course ou le relief sur lequel on skie et de trois conséquences des actes mis en œuvre qu'un modèle technologique permet d'explicitier en formalisant leurs conséquences mécaniques. Mais, l'utilité du modèle biomécanique servant de base à la modélisation technologique se limite à comparer la technicité d'un compétiteur équipé de ses skis visant la plus haute marche d'un podium, à celle du champion qui s'y trouve déjà. Toute recherche d'amélioration de la performance par la transformation des techniques corporelles et matérielles se heurte à une infinité de pistes de recherches et condamne à une méthodologie "darwinienne" d'essais et d'erreurs, enserrée dans un cadre culturel sportif et industriel qu'il est difficile de transgresser.

Nous faisons l'hypothèse qu'en développant un simulateur du système skieur-skis, nous nous doterons d'un outil qui nous permettra de manipuler le modèle, pour mesurer les perturbations qu'engendre sur le système, la modification d'une trajectoire ou d'une commande articulaire ou la transformation de la grandeur d'une composante d'un torseur chaussure→ski correspondant à la modification d'une caractéristique mécanique ou géométrique d'un type de ski. Nous deviendrons alors capables de découvrir, à moindre frais et à plus courts termes, des pistes d'amélioration de la performance visant à proposer à des entraîneurs associés au laboratoire d'Informatique Appliquée au Sport de l'INSEP (LIAS) dirigé par Didier Seyfried, des protocoles expérimentaux destinés à évaluer les hypothèses que l'utilisation du simulateur permettra de formuler.

Dans ce but, nous avons imaginé un pantin électronique⁴ présentant un nombre réduit de degrés de liberté, en prenant garde à ne pas réduire sa complexité à un point tel, que l'étude d'une de ses parties perdrait le sens du tout. Pour cela, nous avons intégré à son fonctionnement un certain nombre de synergies segmentaires, en utilisant des propriétés géométriques et des membres fictifs à masse nulle.



Il nous faut maintenant intégrer au pantin les déterminismes squelettiques de chaque articulation concernée par la production des huit techniques qu'utilise le skieur pour se piloter et son contrôle mécanique par la viscosité et la raideur correspondant à celles produites par les actions musculaires posturales et phasiques qui la commandent, en simplifiant notamment le rachis et l'articulation de la cheville (image ci-dessus, modélisation du buste). Avec le nouveau logiciel ID3D de Gilles Dietrich, nous pouvons piloter la trajectoire de chacune des articulations du pantin avec les cinématiques que nous savons capturer en analysant les mouvements d'un skieur réel, attribuer au pantin ses caractéristiques anthropométriques modélisées par Hanavan et lui appliquer les torseurs avec lesquels le contexte le contraint, dont nous savons mesurer les grandeurs.

Avec ce simulateur, nous visons deux buts : Le premier est didactique, il consiste à montrer à des enseignants sportifs en formation ou à des apprentis skieurs ou compétiteurs, certaines des causalités biomécaniques jouant un rôle prépondérant dans le système skieur-skis, dont la compréhension est utile pour intervenir ou agir ; L'autre est technologique, il consiste à imposer des consignes techniques univoques à notre pantin électronique ou modifier des caractéristiques de ses équipements, pour mesurer leurs conséquences, afin d'élaborer des hypothèses concernant aussi bien l'évolution des techniques corporelles que la modélisation des skis des relations entre une évolution structurelle d'un ski et le torseur qu'il produit dans une situation déterminée.

Sans remplacer les analyses des mouvements en trois dimensions des skieurs dans leurs contextes et les mesures des contraintes externes qui s'appliquent sur eux, le simulateur permettra d'imposer au système skieur-skis des contraintes univoques réduisant les incertitudes expérimentales, d'élaborer des hypothèses en

⁴ Ce pantin a servi d'objet d'étude à des étudiants de l'ENS de Cachant en master de mécanique, dirigé par David Néron, maître de conférence. Son fonctionnement est donc validé.

limitant les errances et en réduisant les coûts de recherche. Celles-ci guideront nos réflexions pour inventer, conjointement avec des praticiens chercheurs et des technologues des matériels, des protocoles expérimentaux qui les évalueront en les soumettant à la pratique réelle ou aux contraintes de fabrication.

Notons que le simulateur n'est pas exclusivement dédié à la pratique du ski alpin mais concerne toutes les pratiques de glisse et de roulette.

Notons aussi qu'au cours des expérimentations complémentaires que nous devons effectuer, nous pourrions diminuer la dispersion de nos mesures par un facteur estimé à 10 par Gilles Dietrich, grâce aux nouvelles technologies qu'il met à notre disposition et qu'à l'occasion, il expérimentera son nouveau dispositif de capture automatique des données cinématiques par reconnaissance de forme qui peut rendre opérationnelles l'analyse des mouvements en 3D pour entraîner.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BACHELARD G., (1938/1993), *La formation de l'esprit scientifique*. VRIN, Paris.
- [2] MARTINAND J.L., (1989), *Pratique de référence, transposition didactique et savoirs professionnels en sciences et techniques*. Les sciences de l'éducation pour une ère nouvelle, 1-2 / 1989.
- [3] COMBARNOUS M., (1984), *Les techniques et la technicité*. Messidor, éditions sociales, Paris.
- [4] ABDEL-AZIZ Y. I., KARARA H. M., (1971), *Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry*. Proceedings of the Symposium on Close Range Photogrammetry.
- [5] HANAVAN, E. P. (1964). *Un modèle mathématique du corps humain*. LAMR-TR-64-102, AD-608-463. Aerospace Medical Research Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- [6] Miller, D. et I. Morrison, W. (1975). Prédiction des paramètres segmentaires en utilisant le modèle. Hanavan corps humain. Med. Sci. Sports 7, 207-212.
- [7] HAUDRICOURT A. G., (1987). *La technologie science humaine*. Édition de la maison des sciences de l'homme, Paris.
- ¹ Marey JE (1873 / 1993) La machine animale. Paris, Éditions "Revue EPS" : p. IX.
- [8] Marey JE (1873 / 1993) La machine animale. Paris, Éditions "Revue EPS" : p. IX.
- [9] WALLON H., (1970), *De l'acte à la pensée*, Flammarion.
- [10] MERLEAU-PONTY M (1933 / 1996) Le primat de la perception. Paris, Éditions Verdier.
- [11] VYGOTSKI L. S., (1985), *Pensée et langage*, traduction de Françoise Sève, Messidor éditions sociales.
- [12] BRUNER J. S., (1983), *Savoir faire savoir dire*, PUF, Paris.
- [13] CLOT Y., (1999), *De VYGOTSKI à LÉONTIEV, via BAKTINE*, in avec VYGOTSKI, la Dispute.
- [14] BERTHOZ A., (1997), *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, Paris.
- [15] CHANGEUX J. P., (2002), *L'homme de vérité*, Odile Jacob, Paris.
- [16] DAMASIO A., (1999), *Le sentiment même de soi*, Odile Jacob, Paris.
- [17] EDELMAN G., (2006), *La science du cerveau et de la connaissance*, Odile Jacob, Paris.
- [18] LEDOUX J., (2005), *Le cerveau des émotions*, Odile Jacob, Paris.
- [19] RIZZOLATTI G. SINIGAGLIA C., (2008), *Les neurones miroirs*, Odile Jacob, Paris.
- [20] BERTHOZ A., JORLAND G., (2004), *L'empathie*, Odile Jacob, Paris.
- [21] Cohen-Tannoudji G., (2002), La notion de modèle en physique théorique, in Enquête sur le concept de modèle, sous la direction de Pascal NOUVEL. Paris, PUF.
- [22] COHEN-TANNOUJJI G., (1998), La dialectique de l'horizon. In SÈVE L., Sciences et dialectique de la nature, La Dispute.
- [23] Livet p., (1997), Modèle de la motricité et théorie de l'action, in Les neurosciences et la philosophie de l'action,
- [24] MERLEAU-PONTY M., (1933-1996), Le primat de la perception, éditions Verdier.
- [25] MORIN E., (1990), Introduction à la pensée complexe, ESF.
- [26] PETIT J. L., Paris, Vrin.
- [27] SÈVE L. (1987) JE sur l'individualité. Paris, Messidor, Éditions sociales.
- [28] Kapanjji I.A., (1982), *Physiologie articulaire*, Maloine S.A. éditeur, Paris.