



HAL
open science

Expertise en patinage en hockey sur glace : effet des contraintes de tâche

Florian Mell

► **To cite this version:**

Florian Mell. Expertise en patinage en hockey sur glace : effet des contraintes de tâche. Education. Normandie Université, 2017. Français. NNT : 2017NORMR108 . tel-01745970

HAL Id: tel-01745970

<https://theses.hal.science/tel-01745970>

Submitted on 28 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

**Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives
74^{ème} section**

Préparée au sein du laboratoire CETAPS

**Expertise en patinage en hockey sur glace :
effet des contraintes de tâche**

**Présentée et soutenue par
Florian MELL**

Thèse soutenue publiquement le 20 octobre 2017 devant le jury composé de

Monsieur Jérôme BOURBOUSSON	Professeur, associé, Université de Nantes	Rapporteur
Monsieur Gérard GUENNELON	Directeur Technique National, FFHG	Membre invité
Monsieur Denis HAUW	Professeur, associé, Université de Lausanne, Suisse	Rapporteur
Monsieur Ludovic SEIFERT	Professeur, Université de Rouen	Directeur de thèse
Monsieur Régis THOUVARECQ	Professeur, Université de Rouen	Examineur

Thèse dirigée par Ludovic SEIFERT, laboratoire CETAPS



Remerciements

Ce travail n'aurait pu voir le jour et aboutir sans la direction de Ludovic Seifert. Ces quelques mots ne suffiront pas à exprimer ma gratitude quant à la patience, l'optimisme, la confiance, le soutien et la persévérance qu'il a manifestés pour ce travail de son début à sa fin. Merci d'avoir considéré que le chemin était aussi important que la destination finale et de m'avoir donné l'opportunité d'apprendre. Merci également à Maxime L'Hermette de m'avoir accompagné dans ce parcours universitaire de la première année de licence jusqu'à la conclusion de ce travail de doctorat.

Je tiens également à remercier les membres du jury, Profs. Jérôme Bourbousson, Denis Hauw et Régis Thouwarecq pour le temps consacré à l'expertise de ce travail. J'espère sincèrement que vous y aurez trouvé un intérêt.

J'exprime également ma reconnaissance au Prof. Jacques Saury ainsi qu'à François Féliu pour leurs contributions dans la recherche qualitative que nous avons menée.

Travailler sur la locomotion du hockeyeur n'aurait pu se faire sans le soutien de Mr Gérard Guennelon actuel D.T.N. de la FFHG. Merci de nous avoir fait confiance, d'avoir contribué à la réalisation de ce projet.

Merci également à Mr Brouillard Gaëtan qui m'a ouvert les portes du hockey sur glace professionnel et a soutenu ce projet de recherche. Merci de m'avoir accueilli au CEOPS, d'avoir contribué à ma formation professionnelle et de m'avoir fait confiance. J'espère que ce travail servira de levier à de futures collaborations.

Il a toujours été agréable de travailler au CETAPS, de discuter avec l'ensemble des personnes faisant vivre cet établissement. Merci de m'avoir accueilli, soutenu, offert des possibilités de découvrir, de progresser, de comprendre. Il est impensable d'oublier de remercier particulièrement plusieurs acteurs et amis qui ont eu un impact fort dans la réalisation de ce travail : John, Brice, Jérémie, Fred. J'ai une pensée pour Héloïse, Romain, Omar, Karim, Hugo qui se sont levés tôt pour braver le froid des patinoires lors des campagnes de mesure. Sans vous ce projet n'aurait pas été possible.

Merci à l'ensemble des entraîneurs qui ont pris le temps de répondre aux entretiens. Merci à ceux qui ont trouvé des créneaux rarissimes de glace pour permettre la réalisation de la seconde étude parce qu'ils aiment leur sport et souhaitent encourager la manifestation

d'intérêts extérieurs pour leur discipline. Je pense en particulier à Mrs Chauvel, Mariette, Salo, Jean, Lhenry, Guimard. Merci à tous les joueurs qui se sont impliqués pleinement lors de la collecte des données.

Je remercie également la patience de mes amis et de ma famille qui, pendant plusieurs années, ont toléré mes absences, mes indisponibilités parce qu'il fallait travailler. Merci pour tout.

Constatant au quotidien le poids important de l'éducation parentale, je ne peux qu'être éternellement reconnaissant envers mes parents pour tout ce qu'ils m'ont apporté et m'offrent encore. Ce n'est pas le fruit du hasard si les deux enfants de la famille possèdent le goût des études : merci d'avoir fait naître le plaisir de la découverte et de nous avoir donné les conditions pour l'entretenir.

Enfin, je tiens à remercier ma compagne qui a vécu la rédaction du manuscrit de l'intérieur et qui s'est donnée beaucoup de mal pour faciliter mon travail. Merci pour ton soutien quotidien, ton abnégation, ta confiance sans faille, source d'énergie quand la fatigue du marathon se faisait sentir. Vivre à côté de quelqu'un qui rédige n'est pas une chose facile, je te serai toujours reconnaissant d'avoir été présente et de t'être impliquée totalement pour garantir que ce projet aille jusqu'à son terme. Merci infiniment.

Tables des matières

INTRODUCTION.....	6
Positionnement ontologique	11
CADRE THEORIQUE.....	18
Chapitre 1. Approche Ecological Dynamics & Contrôle moteur	18
<i>Mouvement et coordination de mouvement en patinage sur glace.....</i>	<i>21</i>
<i>Percevoir dans un environnement changeant.....</i>	<i>24</i>
<i>La représentativité d'une tâche</i>	<i>31</i>
<i>Coordonner les degrés de liberté.....</i>	<i>34</i>
<i>Emergence, stabilité et flexibilité des coordinations sous l'effet des contraintes</i>	<i>36</i>
<i>Rôle fonctionnel de la variabilité du mouvement</i>	<i>48</i>
Chapitre 2. Approche Ecological Dynamics et expertise.....	53
<i>Le monde expert : une perception singulière</i>	<i>56</i>
<i>Réussir à générer des patterns moteurs experts en coordonnant des degrés de liberté.....</i>	<i>62</i>
<i>Envisager le comportement expert comme une réponse inimitable.....</i>	<i>65</i>
<i>La variabilité du comportement au service de l'adaptation</i>	<i>70</i>
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES	77
APPROCHE EXPERIMENTALE	81
Chapitre 3. Comment appréhender la complexité du patinage avant au regard des connaissances mobilisées par les entraîneurs ?.....	81
<i>Introduction.....</i>	<i>82</i>
<i>Méthode.....</i>	<i>92</i>
<i>Résultats.....</i>	<i>94</i>
<i>Discussion</i>	<i>100</i>
<i>Perspectives</i>	<i>109</i>
Chapitre 4. Effet de la manipulation des contraintes de tâche sur la locomotion des hockeyeurs	112
<i>Introduction.....</i>	<i>113</i>
<i>Méthode.....</i>	<i>127</i>

Etude 1 : Effets des contraintes de tâche en fonction de l'expertise et du poste	134
<i>Traitements des données</i>	<i>134</i>
<i>Résultats</i>	<i>139</i>
<i>Discussion</i>	<i>154</i>
Etude 2 : Fluidité du mouvement sous l'effet de manipulation de contrainte de tâche ...	162
<i>Méthode</i>	<i>163</i>
<i>Résultats</i>	<i>168</i>
<i>Discussion</i>	<i>170</i>
DISCUSSION GENERALE	174
CONCLUSION.....	184
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	187
ANNEXES.....	213

INTRODUCTION

« Il existe un écosystème en chacun de nous, composé de milliards de petits animaux microscopiques : nos cellules. Celles-ci n'obéissent pas à un prétendu programme qui nous représente, mais à la sélection naturelle, qui ne prévoit rien et construit le présent ici et maintenant.

Dans un écosystème, il n'y a pas d'objectif collectif des animaux et des plantes. La structure globale émerge des interactions individuelles. De la même façon, nos cellules s'organisent autour de « chaînes alimentaires », pour elles et non pour nous. Le globule blanc n'est pas dévoué à la survie de sa collectivité. Il dévore les microbes parce qu'ils constituent la « nourriture » la plus accessible là où il se trouve. La cellule du foie est à côté de celle de l'intestin. Elle se spécialise pour exploiter les ressources qui lui arrivent du tube digestif, non pour s'assurer que nous aurons bien un foie. Les grandes fonctions de notre corps (respiration, digestion, reproduction, etc.) résultent des interactions cellulaires, sans en être la cause.»

Pierre Sonigo, mai 2002, Cité des Sciences de Paris

A différents niveaux, 360 articulations, plus de 600 muscles squelettiques, 100 milliards de neurones et des centaines de milliards de cellules génèrent un nombre incommensurable d'interactions au sein du corps humain, révélant ainsi sa complexité. Pourtant, en observant Bolt battre le record du monde du 100 m, Phelps nager ou encore Crosby jouer au hockey, une illusoire facilité, une évidente simplicité camouflent cette complexité à organiser dans le temps et l'espace des mouvements au service d'un objectif : réaliser la meilleure performance possible. Comment un système aussi complexe que le corps humain arrive-t-il à s'organiser avec autant de stabilité et d'efficacité ?

Cette gestion de la complexité motrice puise son origine dans le contrôle et l'apprentissage moteur. C'est à l'issue de changements stables du comportement de l'individu dans le temps, que des performances (i.e., résultat visible favorisant l'inférence concernant l'apprentissage) évolueront vers l'atteinte de l'expertise. Comprendre la production d'une performance experte nous a amené à porter notre attention sur « comment l'individu perçoit, agit et organise ses mouvements dans un environnement changeant de part le but de la tâche ? ». Plusieurs éclairages théoriques pour répondre à cette question sont proposés dans la littérature scientifique. Tout d'abord, les approches cognitivistes proposent un cadre d'analyse issu du déterminisme cartésien dans lequel l'individu fonctionne avec une cognition assimilée au fonctionnement d'un ordinateur : prélever des informations, les traiter en mobilisant des connaissances et représentations du réel stockées en mémoire pour ensuite produire une réponse motrice.

Dès 1967, Neisser envisage de s'affranchir de l'idée du contrôle des actions par l'homonculus faisant appel à des représentations. Le problème se situe notamment dans la

dépendance aux représentations du monde assimilées à des symboles significatifs de la réalité codés en mémoire qui représentent les propriétés de l'environnement. Ces représentations sont utilisées par le système neurobiologique pour agir. Cela suppose que pour agir, le système neurobiologique peut seulement fonctionner en utilisant ce qui est en mémoire. Connaître en avance les circonstances que nous allons rencontrer dans notre environnement est incompatible avec l'idée de détection d'information. Idée qui devrait être la base pour la compréhension de comment l'organisme s'adapte à de nouvelles situations. Il ne s'agit plus de considérer que la cognition est un processus uniquement interne à l'individu résidant dans le cerveau. Neisser (1976) envisage la cognition comme une activité, ce qui implique de poursuivre la réflexion autour de la nature de l'activité et du lieu où elle se fait. Il est difficile de s'intéresser à l'activité cognitive sans prendre en considération l'environnement dans laquelle elle s'inscrit : comment un organisme entretient-il une relation fonctionnelle avec le monde ? (Araújo & Davids, 2009).

Malgré la contribution importante des approches cognitivistes (e.g., Shea & Wulf, (2005) dénombrent 782 citations du travail de Schmidt (1975) entre 1975 et 2004 au sein de domaines de recherche variés tels que le contrôle moteur, les neurosciences, la perception de la musique, les sciences du management) une alternative s'est construite à travers l'approche Ecological Dynamics (Araujo, Davids, & Hristovski, 2006; Davids, Button, & Bennett, 2008; Davids, Araújo, Hristovski, Passos, & Chow, 2012; Vilar, Araujo, Davids, & Button, 2012). Il s'agit d'envisager différemment la relation entre l'organisme et son environnement, en contestant l'attribution de la régulation du comportement aux structures et processus organiques et la négligence de l'influence de l'environnement dans la formation des caractéristiques du comportement (Davids & Araújo, 2010). L'individu et l'environnement constituent un tout indissociable duquel émerge l'adaptation du système neurobiologique humain (Araújo & Davids, 2009; Davids, Bennett, & Newell, 2006). C'est en s'ancrant dans l'approche théorique Ecological Dynamics, issue des sciences de la complexité, que nous conduirons une réflexion concernant l'adaptation de l'être humain à une nouvelle forme de locomotion : la locomotion sur glace. Se déplacer sur la glace nécessite une adaptation aux contraintes imposées par la surface glissante qui induit l'apprentissage d'un comportement fortement différent de la locomotion terrestre. À ce titre, l'expertise dans le patinage avant sur glace reflète la forme la plus aboutie d'adaptation à ce nouveau mode de locomotion complexe.

Adapté au contexte du hockey sur glace, l'expertise passe par la capacité à produire un patinage efficace, efficient mais également adaptable à l'évolution de la tâche. Le patinage avant de l'expert étant fortement contraint par la possession du palet, la position de ses adversaires ou partenaires, nous ne pouvons pas imaginer qu'être expert passe par une succession de répétitions de cycles de patinage sans placer le joueur dans des situations imposant l'adaptation (e.g., accélérer sur deux foulées pour prendre de vitesse son adversaire, changer brusquement de direction suite à une reprise imprévue de la possession de palet). Dès lors, analyser le comportement expert constitue une source pertinente d'informations pour questionner le parcours de l'individu l'ayant conduit à son statut d'expert dans un domaine et/ou discriminer les paramètres clés des modes d'adaptations efficaces à une situation. Dans notre travail, il s'agira des facteurs clés spécifiant un patinage avant expert.

Devenir expert sous-entend développer des compétences, des capacités perceptivo-motrices dans un contexte spécifique au domaine d'expertise. Par exemple, un hockeyeur expert se trouve en capacité de produire une performance exceptionnelle dans un contexte de match de hockey qu'après avoir étayé sa perception de l'environnement et enrichi la motricité favorisant la réalisation d'une action pertinente à un instant précis. La pratique du hockey suffit-elle à atteindre le plus haut-niveau de performance ? À titre d'exemple, une étude a été conduite sur une population de 30000 hommes nés en 1975 et enregistrés par l'Ontario Minor Hockey Association : 48 ont été draftés en NHL (10,15%), 32 ont joué un match en NHL (0,09 %), 15 plus d'une saison (0,04%) et 6 plus de 400 matches permettant d'accéder à une pension de retraite (0,01%) (Parcels, 2002). Ainsi, pratiquer, au moins 10 ans ou plus de 10000h, comme le suggèrent Ericsson & Lehmann (1996), ne semble pas être la seule explication possible à l'acquisition de comportements experts se manifestant dans le plus haut-niveau de pratique. Pour décrire, évaluer, étudier un mouvement et tenter de le comprendre dans sa globalité, il semble pertinent de s'interroger sur le cheminement pour atteindre le niveau de compétence qualifié d'expert. C'est pourquoi, une partie de ce travail s'est attachée à appréhender le concept d'expertise dans sa globalité et non uniquement comme le résultat d'une performance exceptionnelle. Il s'agit d'appréhender la « macro-structure », c'est-à-dire l'ensemble des contraintes ayant amené à l'expertise et pesant sur lui. Les contraintes favorisent l'émergence de comportements fonctionnels au détriment d'autres. Elles constituent des ressources qui encadrent ou délimitent l'émergence du comportement moteur humain (Seifert et al., 2013). Il faut comprendre que les contraintes donnent une direction et restreignent l'étendue des possibles. Sur cette base, les contraintes sont en

perpétuelle évolution et de nature variable (e.g., taille de la patinoire, les capacités physiques de l'individu, expérience dans la pratique). Envisager la performance experte comme le résultat d'une organisation motrice du sportif en réponse aux contraintes qui pèsent sur lui, nous conduit à penser que le modèle expert correspond à une réponse unique donc non reproductible à l'identique et innimitable par d'autres.

Si nous considérons un expert comme un individu capable de réaliser une tâche donnée avec une haute précision spatio-temporelle, capable de produire des mouvements avec vitesse, économie et adaptabilité (Johnson, 1961) alors nous pouvons nous questionner sur la réalisation de l'action : est-elle le fruit d'un apprentissage qui a conduit à l'automatisation du mouvement (stable, reproductible, identique) ou est-elle en mesure de s'adapter pour répondre avec justesse aux évolutions de la situation de pratique (flexible) ? Quelles sont les propriétés incontournables du comportement expert ? Nous présenterons à travers ce travail, en quoi l'approche Ecological Dynamics offre un cadre d'analyse pertinent, défendant la spécificité du mouvement expert inimitable puisqu'il émerge de multiples interactions entre des contraintes clés au sein de la relation sujet-environnement. Cette approche nous permettra également de présenter le rôle fonctionnel de la variabilité de l'organisation du mouvement, et non de la performance, nécessaire à l'adaptation du comportement expert à la dynamique des contraintes.

Afin d'envisager des réponses à ces interrogations, nous exposerons en avant-propos les grands principes ontologiques relatifs aux sciences de la complexité qui orientent notre réflexion. Nous organiserons ensuite ce travail de thèse autour d'une présentation des fondements de l'approche Ecological Dynamics du contrôle moteur, afin de comprendre comment l'individu perçoit et agit en relation avec son environnement sous l'influence de contraintes (Araujo et al., 2006; Davids et al., 2008). Dans le second chapitre du cadre théorique, nous présenterons comment le concept d'expertise est envisagé dans l'approche Ecological Dynamics et pourrait permettre de répondre à notre question de recherche.

A partir de cette présentation, la contribution personnelle se déclinera en deux chapitres. Le premier poursuit l'objectif de déterminer les indicateurs de performances de patinage avant sur la base de « connaissances opératives » (Falzon, 1991) des entraîneurs experts de hockey sur glace. Recourir aux connaissances expertes des entraîneurs permet de mettre en avant de futures recherches quantitatives et de concevoir des protocoles de recherche respectant le plus fidèlement la validité écologique de pratique (e.g. pour garantir un couplage individu-environnement révélateur du contexte habituel de pratique) tel que le

promeut l'approche Ecological Dynamics (Araújo, Davids, & Passos, 2007; Brunswik, 1956). Il s'agit dans un premier temps, de détailler les processus d'élaboration des savoirs experts des entraîneurs. Nous démontrerons en quoi convoquer ces savoirs experts constitue une source importante de connaissances complémentaires aux connaissances scientifiques pour la compréhension de l'expertise et la conception de protocoles expérimentaux représentatifs du contexte écologique de pratique. Dans un second temps, nous analyserons les paramètres superficiels (eg., durée du cycle, durée de la poussée) et profonds (coordination, symétrie) du comportement du hockeyeur afin d'en dégager des critères d'expertise.

Le second chapitre s'appuie sur les savoirs experts des entraîneurs pour proposer un protocole d'analyse du mouvement *in situ* afin de comprendre les mécanismes de l'adaptation motrice chez les hockeyeurs experts ; et plus particulièrement, il sera examiné le rôle fonctionnel de la variabilité intra et inter-individuelle pour s'adapter aux contraintes de tâche en patinage sur glace. Pour ce faire, ce second chapitre analysera le comportement expert en se focalisant sur les paramètres cinétique et cinématique du patinage avant sous l'effet de manipulations de contraintes représentatives de la tâche en patinage sur glace telles que l'usage de la crosse, du palet et des modalités de départ (e.g., arrêté, en course). L'objectif est de savoir si la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques (i.e., la capacité du hockeyeur à mobiliser différents éléments pour produire le même comportement ou obtenir le même résultat) (Edelman & Gally, 2001) favorise le maintien d'un patinage performant en fonction de l'expertise, du poste, de la tâche à réaliser. Un second objectif de ce chapitre sera de répondre à un besoin de recherche formulé par les entraîneurs de l'étude qualitative.

Positionnement ontologique

« *Quand je parle de complexité, je me réfère au sens latin élémentaire du mot "complexus", "ce qui est tissé ensemble". Les constituants sont différents, mais il faut voir comme dans une tapisserie la figure d'ensemble* »

Edgar Morin, 1982

Dans cet avant-propos, nous introduisons les concepts principaux des sciences de la complexité comme une alternative aux approches traditionnelles jugées réductionnistes (Morin, 1990). Il s'agit de présenter en quoi l'ontologie de la complexité a guidé notre réflexion concernant la coordination des mouvements et le contrôle de l'action de l'être humain, par extension du hockeyeur sur glace. Dans le cadre de l'analyse et de la compréhension de l'organisation et du contrôle du mouvement humain, les sciences de la complexité (Beek, Peper, & Stegeman, 1995) recourent la « physique naturelle » (Kugler, Kelso, & Turvey, 1982; Kugler, Kelso, & Turvey, 1980), la synergetique (Haken, 1983), l'approche complexe de la neuro-anatomie (Edelman & Gally, 2001; Price & Friston, 2002), la psychologie écologique (Gibson, 1979), la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires appliquée aux coordinations motrices (Kelso, 1995; Kugler & Turvey, 1987; Newell, 1986) et convoquent des concepts tels que l'auto-organisation et l'émergence des comportements sous l'effet des contraintes. À ce titre, la coordination motrice réside en une exploitation des contraintes permettant de produire un mouvement sans l'intervention d'un système supérieur (i.e., le système nerveux central) contrôlant et dirigeant l'organisme.

Dans cette approche, l'individu est perçu comme un système neurobiologique et mécanique complexe composé de nombreux sous-systèmes en interaction (Davids et al., 2008). Etymologiquement le mot système vient du grec « *sustêma* » qui signifie « ensemble cohérent » et le mot complexe du latin « *complexus* » qui signifie « tissé ensemble ». Un système complexe peut se définir comme « un ensemble d'unités en interrelations mutuelles » (Von Bertalanffy, 1968) ou avec un peu plus de précision comme « un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisé *en fonction d'un but* » (De Rosnay, 1975). L'évolution des interactions entre les composants du système engendre une modification de l'organisation intrinsèque du système. Il existe deux formes de systèmes : les systèmes fermés et les systèmes ouverts (Kugler & Turvey, 1987). Le système fermé correspond à un système dont la régulation est liée à lui-même. Chez l'humain, seuls les besoins primaires tels que le sommeil, la faim seront centrés sur l'individu uniquement. A contrario, le système ouvert est en relation avec l'environnement, lié à des échanges entre l'environnement et le système. Le

hockeyeur sur glace sera considéré comme un système ouvert sous l'effet de contraintes telles qu'avancer sur la glace en fonction de partenaires et adversaires en mouvement.

Remise en question des approches cognitivistes. Partons du principe que toute organisation de contractions musculaires est dirigée pour satisfaire un objectif (Komar, Seifert, & Thouvarecq, 2015). En convoquant une approche cognitive, cette production motrice trouve son origine dans la mise en œuvre d'un Programme Moteur Généralisé (PMG) généré par le système nerveux central (SNC). Le PMG est conçu dans sa partie invariante sous forme de plan et de paramètres qui favoriseront l'adaptation de l'individu à un contexte donné (Schmidt, 1975). Dès lors, agir dans le monde réel suppose d'établir une représentation interne sur la base de la perception de différents stimuli (visuel, auditif, haptique, olfactif) qui sont transférés via le Système Nerveux Périphérique (SNP) au SNC qui traite l'information et commande ensuite l'action. En ce qui concerne la motricité, cette approche reprend l'idée qu'à l'issue du traitement de l'information un PMG sera généré en activant le schéma de rappel (règles générales permettant l'initiation du mouvement telles que les contractions et relâchements musculaires, la vitesse et direction du mouvement). Une fois le mouvement initié, le schéma de reconnaissance, contenant les informations relatives aux rétroactions proprioceptives et extéroceptives attendues, sera comparé avec les informations perçues par les récepteurs proprioceptifs et extéroceptifs. Cette comparaison permettra la correction du mouvement en cours de réalisation (Salmoni, Schmidt, & Walter, 1984; Schmidt, 1975). Sur cette base, un expert ressort comme un individu capable de sélectionner les informations pertinentes dans l'environnement, d'adapter son programme moteur à l'évolution de la tâche grâce à un système très efficace de feedbacks (i.e., boucles de rétroaction contenant des informations provenant des organes sensoriels) (Schmidt, 1975; Schmidt & Lee, 2011). En se référant à cette approche du contrôle moteur, un expert dispose de représentations mentales (Ericsson, 2006, 2008) permettant d'atteindre un haut niveau de contrôle de ses performances sans être pour autant considéré comme de l'automatisme. En effet, les experts recherchant l'excellence au cours d'une pratique délibérée vont maintenir une activité cognitive qui va favoriser l'amélioration de leurs performances. Si la pratique redevient simple et perd cette dimension cognitive alors l'activité de l'expert va basculer dans l'automatisation ce qui engendrera une stabilisation des performances mais stoppera tout progrès possible (Ericsson, 2008). En résumé, les experts sont caractérisés par une meilleure connaissance de la tâche (Hambrick & Meinz, 2011), une capacité à donner un meilleur sens aux informations pertinentes, une capacité à stocker et accéder plus efficacement à l'information ainsi qu'une

meilleure détection et reconnaissance des patterns du jeu (Abernethy, 2007). Ils réalisent également de meilleures prédictions sur le terrain et prennent des décisions plus rapides et plus précises que les autres sportifs (Baker, 2003; Singer & Janelle, 1999). En effet, les experts, comparativement aux non-experts, ont l'avantage de reconnaître spécifiquement des patterns d'actions grâce à une utilisation spécifique de la mémoire. En dehors de ce contexte sportif particulier, les experts ne se distinguent pas des autres (Abernethy, 2007).

Cette approche qualifiée d'« internaliste et computationaliste en sciences cognitives » attribue aux représentations et aux mécanismes de reconstruction de la réalité la responsabilité de l'adaptation humaine (Bardy & Mantel, 2006, p. 1). Selon ces auteurs, estimer que les représentations motrices et/ou perceptives spécifiques à l'humain sont les fondements de la perception humaine réduit l'importance de l'effet des lois de la physique et de la biologie sur cette dernière. Davids & Araújo (2010) évoquent à travers le concept d'« organismic asymmetry » une subversion dans l'explication de la relation organisme-environnement à travers l'importance accordée aux mécanismes de représentation du réel. L'existence d'une « agency » (i.e., un système de représentation, de programmes qui régulent les intentions, les prises de décisions et les actions) suppose l'existence de règles d'actions préétablies pour réaliser une action. Davids & Araújo (2010) illustrent le concept d'« agency » à travers l'algorithme décisionnel fréquemment employé dans les sports collectifs pour expliquer au sportif les possibilités d'actions qu'il pourra exploiter (« s'[il se passe tel événement] alors [il faut agir ainsi] »). Ce système de représentation aurait pour fonction d'assurer : i) la prospectivité (anticiper, diriger l'action et les intentions vers les caractéristiques émergent de la situation de performance, ii) la rétrospectivité (prendre du recul sur ce qui vient de se passer, coordonner les expériences passées avec le système de contrôle moteur, et iii) la flexibilité (régulation de l'action en cours d'exécution) (Davids & Araújo, 2010). Cependant, l'existence de cette « agency », responsable de la production de patterns obéissant à des règles d'actions organisées, leurs paraît discutable. Les auteurs prennent l'exemple des patterns spontanés humains mis en place avant de pouvoir parler et expliquent qu'ils sont issus d'un large panel d'actions auto-organisées, coordonnées. Ces patterns fondamentaux (e.g., permettant la succion, la saisie d'un pouce) apparaissent spontanément sous l'influence des contraintes génétiques et environnementales et participent à l'élaboration de la dynamique intrinsèque de l'individu durant toute sa vie (Davids & Araújo, 2010). Ils avancent l'idée que les systèmes neurobiologiques exploitent les processus d'auto-organisation pour façonner la dynamique intrinsèque et satisfaire les contraintes spécifiques de la situation (Davids &

Araújo, 2010). C'est pourquoi envisager la perception puis l'action de façon univoque et hiérarchisée sur la base d'une perception uniquement indirecte (i.e., médiée par un système de représentation du réel) demeure insatisfaisant pour ces auteurs, et concourt à notre positionnement ontologique.

Emergence. La complexité se situe dans l'importance des interactions entre les éléments d'un système plutôt que dans leur nombre (Davids et al., 2008). Le système se compose d'un nombre important de degrés de liberté (D.D.L.). En sciences physiques, ces D.D.L. sont utilisés pour faire référence aux composants indépendants d'un système qui peut s'assembler de différentes manières (Davids et al., 2008). L'agencement de ces D.D.L., à une échelle macroscopique, révèle une organisation cohérente permettant d'entretenir une relation avec l'environnement. Ainsi, la prise en compte de ces D.D.L. séparément ne permet pas la compréhension du fonctionnement du système, puisqu'il émerge lors de la mise en relation de l'ensemble des éléments qui le compose. Selon Delignières (2004), l'objet d'étude de cette approche est lié à l'idée centrale que « le tout est plus que la somme des parties ». Cette remarque mérite toutefois une nuance « l'étude d'un système complexe nécessite [...] à la fois une vision holiste, macroscopique, qui étudierait le « tout », accompagnée d'une vision plus microscopique, qui étudierait les parties, à savoir que l'une ne peut seule renseigner l'autre » (Komar, 2013, p. 10). En ce qui concerne la production de mouvement, notons que l'individu ne s'organise pas aléatoirement en créant à chaque instant de nouveaux patterns, mais il s'organise à travers une partie « d'un paysage des états possibles » dans lequel toutes les organisations potentielles qu'un individu peut adopter figurent (Davids et al., 2008). La coordination finale réalisée dépendra des conditions environnementales et des contraintes façonnant le comportement de l'individu. Dans le cadre de notre travail, nous questionnerons l'effet de manipulation de contraintes de tâches (e.g., avancer avec ou sans palet) sur la capacité d'adaptation des experts. Nous défendons l'idée que la manipulation des contraintes peut influencer l'émergence du comportement et engendrer une variabilité dans la coordination mise en place par l'individu pour patiner. L'émergence d'un pattern modifié par l'effet des contraintes contribuera à la production d'un mouvement performant (e.g., réduction de la durée de retour du patin, asymétrie entre les deux bras lorsqu'il y a une crosse à transporter pour aller le plus vite possible).

Auto-organisation. Le comportement s'auto-organise suivant les propriétés du système, des paramètres environnementaux et du temps. L'auto-organisation reflète la capacité d'un système à utiliser l'énergie environnementale pour spontanément atteindre un

état stable et fonctionnel d'organisation (Davids et al., 2008). Les éléments sont liés entre eux et l'interaction de ces derniers dans des systèmes non-équilibrés qui sont ouverts aux échanges d'énergies, de matières et d'informations avec leur environnement fait émerger le comportement sous la forme de pattern spatio-temporel (Kelso, 2012). Il n'y a pas besoin d'une planification, de programmation, de prescription par une structure interne ou externe supérieure au système. D'après Beek et al. (1995), les mouvements coordonnés sont le produit d'une auto-organisation dont il faut décrire les variables. Différents exemples dans le monde animal mettent en avant l'absence de méta-structure organisant l'ensemble du comportement du groupe (voir par exemple les études de Niwa (1994), concernant l'organisation des bancs de poissons, de Deneubourg, Aron, Goss, & Pasteels (1990), à propos des comportements exploratoires des fourmis argentines ou, plus largement, l'analyse des comportements des insectes sociaux effectuée par Bonabeau, Theraulaz, Deneubourg, Aron, & Camazine (1997)). Concernant la construction d'une termitière, Kugler & Turvey (1987) expliquent qu'une lecture prescriptive du déroulement de la construction ferait apparaître une termite d'une intelligence supérieure jouant le rôle d'architecte. Ils proposent une lecture différente du comportement : la construction de la termitière est le résultat d'une interaction entre différents comportements spontanés (dépôts de phéromones) qui incitent l'ensemble des termites à superposer la boue pour construire la structure. En définitive, cet exemple illustre bien le fait qu'il est possible de produire une structure très organisée sans aucune planification. L'auto-organisation est donc une notion clef basée sur l'idée que le produit et son évolution sont influencés par les contraintes pesant sur le système. Dans ce cas, le dépôt de phéromones constitue une contrainte qui va guider la construction de la termitière. Cette propriété d'auto-organisation du comportement peut se retrouver au niveau du patinage lorsque spontanément après quelques poussées, une vitesse est générée et favorise l'utilisation de temps de glisse qui s'intégrera progressivement dans la coordination du patineur au fur et à mesure qu'il gagnera en vitesse passant d'un pattern de course à celui de glisse (De Koning, Thomas, Berger, De Groot, & van Ingen Schenau, 1995).

Stabilité dynamique et transitions.

Le corps humain est un système que nous qualifierons majoritairement d'ouvert. En effet, il doit se confronter à un flux énergétique, du dedans vers le dehors et inversement pour vivre. Ses constituants se modifient (e.g., ses cellules) et cette dynamique maintient paradoxalement le système cohérent et stable. C'est pourquoi il semble intéressant d'étudier un système vivant en lien avec son écosystème et non comme une entité isolée. Les échanges

que nous avons avec l'environnement sont de deux types. Ils sont soit déterministes, c'est-à-dire que les mêmes sources d'informations entraînent les mêmes réponses, soit stochastiques ou chaotiques dans ce cas la prévision des événements est impossible. En raison d'une relative ouverture du système humain, différents états structuraux peuvent être adoptés et peuvent exploiter les sources d'énergies environnantes pour former des patterns stables d'organisation (Davids et al., 2008; Haken, 1983). Les phases de transition correspondent à des mouvements de microcomposants du système qui conduisent à des fluctuations affectant la stabilité du système. Dans un système non-linéaire, un changement microscopique peut générer une modification qualitative au niveau macroscopique (Seifert, Button, & Davids, 2013). Ainsi des changements critiques, dans les énergies avoisinant le système, altèrent la stabilité du système et conduisent à des changements macroscopiques de ce dernier en se réorganisant dans un nouvel état stable (Davids et al., 2008). On retrouve par exemple ce type de changement lorsqu'un prédateur s'approche d'un banc de poissons : il se sépare brusquement à proximité de ce dernier et se déplace en adoptant de nouvelles organisations pour limiter la capture de poisson puis se reconstitue une fois la traversée du prédateur effectuée. Le joueur de hockey sur glace lorsqu'il reçoit un palet et le conduit jusqu'à faire une passe ou tirer doit s'organiser pour gérer cette nouvelle contrainte qui impacte l'organisation de son mouvement. Une asymétrie liée à la position des mains sur la crosse, la tenue de la crosse en avant devrait entraîner une réorganisation de la coordination de patinage sans palet.

Sensibilité aux conditions initiales. Une modification de l'activité d'un élément du système peut déclencher une avalanche de changements qui vont se propager sur la plus grande partie du système (Kauffman, 1990). La diffusion de ces changements s'illustre à travers le célèbre effet papillon de Lorenz : « un battement d'aile de papillon au Brésil peut provoquer une tornade au Texas »(Gleick, 1987). Par exemple, le fait d'avoir remplacé le cheval par la voiture dans les modes de déplacement humain a engendré une réorganisation du système : l'apparition des autoroutes, des lumières et panneaux de circulation, des stations essences, de l'exploitation du pétrole, de guerres pour gérer les stocks pétroliers, etc. (Kauffman, 1990). Si nous considérons un hockeyeur qui patine en compétition, un changement dans les conditions initiales (e.g., rupture du ligament croisé, déchirure des adducteurs, match de final du championnat) peut générer une modification de son comportement sous l'effet de contraintes engendrant des douleurs d'un côté du corps ou du

stress limitant la prise d'initiative (e.g., n'utilise pas sa puissance pour battre son adversaire en patinant plus vite parce qu'il a peur de devoir tirer ensuite).

Non-linéarité et non-proportionnalité. Cette théorie rompt avec l'idée que les causes et les conséquences sont proportionnelles. La non-linéarité des comportements des systèmes complexes va être un élément fondamental pour décrire la dynamique du système. Manifestant un premier état stable, le système peut, sous l'influence de modifications d'éléments le constituant, subitement transiter vers un autre état stable très différent. Dès lors modéliser les comportements du système ne s'envisage qu'en considérant que la prédiction peut être en décalage avec la réalité, au regard des possibilités de changement soudain. Ainsi, Lorenz en 1963 estimait que les prévisions météorologiques ne pourraient être fiables à plus de 4-5 jours en dépit des progrès technologiques (Gleick, 1987). En effet, une modification imprévue des conditions initiales climatiques peut radicalement perturber la situation climatique (e.g., déclencher une tornade). Notre étude du patinage avant impose la réflexion concernant l'affûtage de la lame, contrainte importante à prendre en compte lors de l'analyse de la locomotion sur glace. Nous avons fait le choix de ne pas imposer un affûtage standardisé à l'ensemble des participants, afin d'éviter de perturber subitement la coordination stabilisée lors du patinage. Cet affûtage aurait pu avoir comme conséquence un petit changement au niveau de la friction entre la lame et la glace, qui peut induire une difficulté à changer de direction ou à rester stable dans les virages.

Dans le cadre de ce travail de thèse, l'individu qui patine sur la glace est assimilé à un système complexe composé d'un nombre important d'éléments (cellules, fibres musculaires, os, articulations, groupes musculaires, etc.) en interaction. L'ensemble de ces interactions va, à partir du principe d'auto-organisation, se coordonner pour permettre l'émergence d'un déplacement sur la glace. C'est à la lumière des concepts développés par l'approche Ecological Dynamics que nous poursuivrons la réflexion, qui attrait à la locomotion sur glace, l'expertise et au contrôle moteur.

CADRE THEORIQUE

Chapitre 1. Approche Ecological Dynamics & Contrôle moteur

'If we do not postulate some agent who selects and uses stored information, we must think of every thought and every response as just the momentary result of an interacting system, governed essentially by laissez-faire economics'.

Neisser, 1967

Imaginons un hockeyeur se déplaçant durant un match de hockey : patiner sur la glace rend les changements de direction plus difficiles, les propulsions de type marche ou course (i.e., pieds poussent vers l'arrière dans la direction de l'axe de déplacement) deviennent inefficaces au regard du caractère glissant de la surface de support. Dans ce contexte, le hockeyeur va devoir trouver une nouvelle façon de s'organiser pour se déplacer et s'adapter aux évolutions du jeu pendant les 60 minutes d'opposition. Il semble impossible que le joueur, sous l'effet d'une fatigue grandissante, puisse prédire, anticiper ce que seront chacun des mouvements du palet, des partenaires ou adversaires durant la rencontre, et prévoir l'ensemble de ses déplacements à l'avance. Ces premières contraintes énoncées, en perpétuel renouvellement, imposent au joueur une adaptation aux conditions de jeu pour optimiser ses déplacements. En effet, ce qui rend chaque match unique, c'est la façon dont les joueurs s'adaptent aux évolutions des conditions au fur et à mesure du match. Dans un environnement en perpétuel changement, composé de multiples contraintes, nous pouvons soulever un intéressant problème : prendre des décisions et agir, relève-t-il d'une prescription anticipée construite en sollicitant les connaissances représentant la réalité stockées en mémoire, ou serait-il le fruit d'un ajustement permanent reposant sur la perception des modifications de circonstances émergeant lors du match ? En inscrivant notre recherche dans l'approche Ecological Dynamics, nous considérons que l'individu et l'environnement de performance constituent un système complexe qui évolue continuellement en fonction des interactions entre les contraintes clés des composants du système (Davids, Araújo, Seifert, & Orth, 2015). Dans la continuité de cette réflexion, la plus petite unité d'analyse pertinente pour comprendre la coordination et le contrôle du comportement humain se situe dans la relation environnement-individu qui ne peut s'étudier qu'à travers l'exercice d'une tâche particulière poursuivant un but (Araujo et al., 2006; Davids & Araújo, 2010; Guignard et al., 2017; Seifert, Araujo, Komar, & Davids, 2017; Vilar et al., 2012). Dans le cadre d'une pratique

sportive compétitive, la complexité d'un système se situe, par exemple, dans les problèmes d'occupation des espaces, le couplage de sous-systèmes, l'incertitude et les perturbations du système (Araújo, Davids, & Serpa, 2005). Ainsi, la performance sportive est le produit, le résultat de la mise en place d'un processus de contrôle moteur se traduisant par une coordination auto-organisée de degrés de liberté (Glazier, 2015). Les comportements fonctionnels émergent au sein d'un processus qui met en relation, de façon auto-organisée, des contraintes relatives à l'individu, une tâche spécifique et l'environnement de performance (Araujo et al., 2006; Vilar et al., 2012)..

Si nous considérons que la performance sportive est le résultat d'interactions complexes entre un ensemble d'éléments (psychologiques, physiologiques, culturels, génétiques, biomécaniques, etc.), alors nous pouvons regretter que la recherche en sport soit fréquemment menée de manière segmentée par discipline, ce qui limite la compréhension globale du comportement humain (Button & Croft, 2017; Glazier, 2015; Seifert et al., 2017). Afin d'approfondir l'étude du comportement, un cadre théorique englobant l'ensemble de ces disciplines semble pertinent. « The term 'ecological dynamics' signifies an approach using concepts and tools of dynamical systems to understand phenomena that occur at an ecological scale—the scale where the relationship between individuals and their environments is defined » (Araujo, Davids, & Hristovski, 2006, p. 656). L'approche Ecological Dynamics constitue un cadre théorique inter-disciplinaire mettant l'accent sur la nécessité de rassembler les différentes connaissances issues de disciplines telles que la physique, la biologie, les mathématiques, les sciences humaines, la psychologie, liste non exhaustive, pour comprendre le comportement humain dans son ensemble (Seifert et al., 2017). Il ne s'agit pas dans cette approche de donner le primat à une discipline plutôt qu'à une autre, mais de considérer que l'ensemble offre un panel de connaissances riches pour comprendre entre autres comment un humain agit en relation avec l'environnement (Glazier, 2015, pour une démonstration de son utilité en sauvetage aquatique voir Button & Croft, 2017). Il s'agit de décloisonner les frontières entre les disciplines, pour promouvoir une approche holiste permettant la compréhension de la performance à différents niveaux d'analyse. C'est pourquoi en recoupant diverses approches (e.g., psychologie écologique, auto-organisation et émergence du comportement sous l'effet des contraintes), le cadre théorique Ecological Dynamics considère que le comportement d'un individu émerge de l'interaction de trois types de contraintes en perpétuelle évolution, impliquant une variabilité du comportement pour s'adapter aux modifications de ces contraintes. La coordination émerge grâce à un couplage fonctionnel

entre information-mouvement (perception-action) tributaire des interactions réciproques entre l'activité de l'individu et l'environnement de pratique (Figure 1) (Davids et al., 2008; Davids, Glazier, Araujo, & Bartlett, 2003).

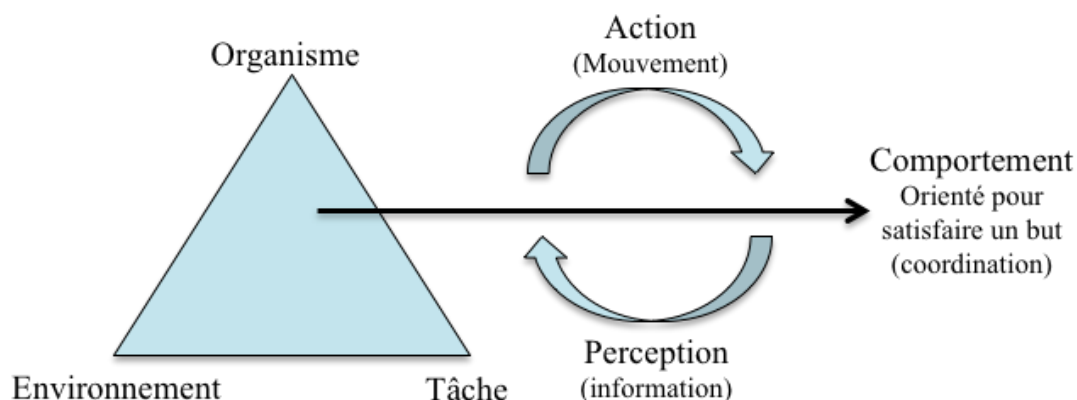


Figure 1. Représentation de l'émergence du comportement sous l'influence des contraintes modulant le couplage perception-action (Davids et al., 2008).

À ce titre, étudier le couplage individu-environnement peut se faire suivant deux niveaux d'analyse : low-order et high-order (Guignard et al., 2017; Haddad, van Emmerik, Whittlesey, & Hamill, 2006). Le premier niveau, dit 'low-order', correspond à l'analyse de paramètres superficiels (e.g., la durée d'une poussée, la vitesse de déplacement, la position angulaire) permettant de renseigner sur l'organisation du mouvement à un niveau microscopique. Le second, dit 'high-order', correspond à l'analyse de paramètres profonds (e.g, coordination, symétrie du mouvement) qui renseigne sur la complexité à contrôler le système à un niveau plus macroscopique. Enfin, il est également envisageable d'étudier le résultat de l'action à travers les mesures de son efficacité et de son efficacité (e.g., calcul du coût énergétique en marche en relation avec la fluidité du mouvement (Hreljac & Martin, 1993)). Dans le cadre de ce travail de recherche, nous allons porter notre attention sur une locomotion particulière : le patinage sur glace des hockeyeurs. À ce titre, cette forme originale de locomotion humaine a traditionnellement fait l'objet de recherches biomécaniques segmentées en fonction des types d'analyse : utilisation de la cinématique (Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh, 2008) , de la cinétique (Turcotte et al., 2004), de l'électromyographie (Buckeridge, LeVangie, Stetter, Nigg, & Nigg, 2015; Chang, Turcotte, & Pearsall, 2009)). Envisager l'étude du patinage à travers le cadre théorique de l'Ecological Dynamics permettrait de dépasser une analyse intéressante, mais réduite à la quantification de

paramètres biomécaniques à un niveau microscopique ne permettant pas de comprendre la dynamique du système. À ce titre, nous étudierons les mesures cinématiques du patinage en tant que paramètres superficiels permettant de nous renseigner sur l'organisation du mouvement (e.g., décomposition du cycle de patinage sur la base d'identification de points clés, calcul de durées de phases). Dans un second temps, nous étudierons deux paramètres profonds permettant de rendre compte de la complexité à contrôler les coordinations lorsque les contraintes de tâche sont manipulées (e.g., calcul de l'Index de Coordination, de la symétrie d'un mouvement). Enfin, l'utilisation du coefficient moyen de jerk nous sera utile pour évaluer la fluidité du mouvement, considérée comme le résultat du contrôle moteur, révélatrice de l'efficacité de la production motrice.

Mouvement et coordination de mouvement en patinage sur glace

Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh (2008) décrivent le patinage du membre ipsilatéral suivant trois phases : la glisse, la poussée et le retour aérien. Lors de la glisse aucune propulsion n'a lieu et la lame du patin est orientée dans la direction du déplacement souhaité (Pearsall et al. 2000). Puis, vient la phase de *push-off* ou poussée avec la lame du patin orientée perpendiculairement à la direction du déplacement, la lame du patin se tourne vers l'extérieur. La propulsion est créée par une extension rapide de hanche, genou et une flexion plantaire de la cheville (Pearsall et al., 2000). La poussée est terminée quand la jambe est en extension complète et la lame du patin n'est plus en contact avec la glace. Enfin la phase dite *recovery* correspond au retour aérien (sans contact avec la glace) du patin. La flexion de la jambe, qui n'est pas en appui, permet de se projeter vers l'avant afin de pouvoir initier une nouvelle foulée. L'ensemble de ces trois phases constitue un cycle de patinage en avant d'un membre inférieur.

Pearsall et al. (2000) ont décrit le patinage à vitesse constante comme une coordination motrice bi-phasique qu'ils ont séquencé en trois temps : la glisse, la poussée et le retour (Figure 2). Le mouvement de patin débute avec le contact du pied sur la glace, puis il se poursuit par la glisse du patin, ensuite, vient la phase de poussée et la phase de retour aérien du patin du membre ipsilatéral (Upjohn et al., 2008).

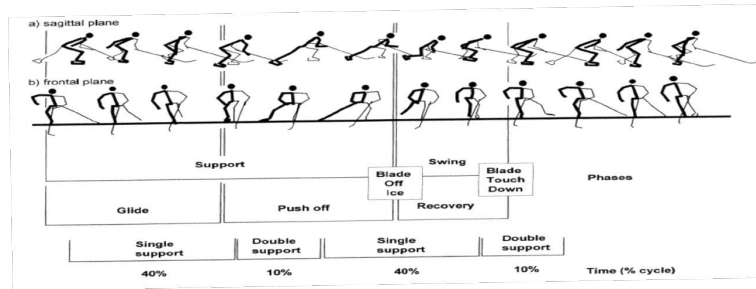


Figure 2. Patinage avant dans le plan sagittal (A) et frontal (B). Le patinage peut être divisé en phase de ice-contact (« support ») et d'oscillation (« swing ») (Pearsall et al., 2000).

L'analyse cinématique du patinage avant révèle qu'à vitesse constante le patinage est majoritairement biphasique (Dewan, Pearsall, & Turcotte, 2004; Marino, 1979, 1983). Il y a une alternance de phases d'appui avec des phases d'oscillation. L'appui peut être différencié suivant le fait que l'individu utilise un ou deux pieds. La propulsion débute, en général, au milieu de la phase d'appui unipodal. Cela correspond à la fin de la rotation externe de la cuisse, à ce moment débute l'extension de la hanche et du genou. Le patin, qui effectuait son retour, se retrouve à ce moment en contact avec la glace. Le membre propulsif va alors réaliser une poussée en combinant extension du genou, extension et abduction de la hanche ainsi qu'une flexion plantaire de la cheville (tableau 1).

Tableau 1. Résumé des mouvements du membre inférieur lors du patinage avant (Pearsall et al., 2000)

Phases	Glisse			
	Début appui Contact de la lame	Appui moyen	Fin appui Poussée	Retour patin
Angles articulaires				
Hanche	45°	100° et rotation externe	180° et rotation externe	180° à 40° et rotation interne
Genou	90°	160°	180°	180° à 90°
Cheville et pied	Dorsiflexion et pronation	Neutre et pronation	Flexion plantaire et pronation	Dorsiflexion Et supination

Pour se propulser vers l'avant, il est nécessaire de produire une force perpendiculaire à la lame du patin (Bartlett, 2007; Pearsall et al., 2014). En effet, si les patins restent parallèles lors de la poussée, le coefficient de friction entre la glace et la lame est très faible, ce qui ne

permet pas une poussée efficace. Durant le patinage rapide, la hanche est plus fléchie que lors de la course ou la marche : 50° durant la glisse et extension tardive durant la propulsion (à 70% de la poussée tandis que pour la marche l'extension débute à 40%) (Pearsall et al., 2014). Durant le patinage, la hanche est rapidement verrouillée en adduction jusqu'à la moitié du retour. Le patinage, contrairement à la course, nécessite au départ une rotation externe (10°) de la hanche, puis progressivement effectue une rotation interne (jusqu'à 50% du cycle) et reprend ensuite une rotation externe. En général, la hanche se déplace latéralement de 50 cm tandis qu'en courant cela s'effectue sur moins de 10cm (Pearsall et al., 2014). Le mouvement alternatif de hanche (flexion latérale du tronc au-dessus de la jambe de glisse (rotation interne et abduction)) puis rotation opposée (rotation externe de hanche) décale le tronc sur la jambe opposée qui démarre la phase de glisse et permet la régulation de l'orientation des patins (Pearsall et al., 2014).

Lors du patinage avant, cette rotation externe de hanche permet une pronation du pied et donc une poussée latérale. La lame du patin, pour une poussée optimale, est orientée en moyenne à 45° par rapport au plan de la glace et l'amplitude du genou varie entre 5° et 85° de flexion (Pearsall et al., 2014; Pearsall et al., 2000). La majeure partie du mouvement se fait dans le plan frontal, ce qui implique un déplacement du centre de masse de type sinusoïdal. Lors du patinage avant, son amplitude de déplacement varie aux alentours de 25 cm en fonction de la durée de la glisse (Pearsall et al., 2000). Quand le joueur effectue une poussée : le centre de masse se déplace perpendiculairement à l'axe longitudinal de la lame du patin. Pour permettre le déplacement vers l'avant, le centre de masse doit se trouver en avant du membre « porteur ». La figure 3 illustre la notion de « transfert de poids » d'un membre à l'autre (ce qui revient à un déplacement du centre de masse). Un déplacement du centre de masse sur le membre en phase d'appui (glisse puis poussée) ressort comme une variable permettant la compréhension de la locomotion sur glace.

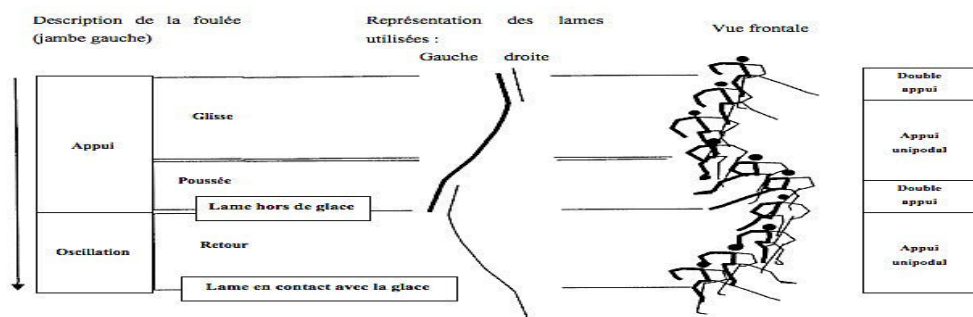


Figure 3. Représentation du transfert de poids et du découpage du cycle de patinage (Pearsall and al. 2000).

A notre connaissance, aucune étude scientifique n'a concerné l'analyse de paramètre dit profond (i.e., analyse de la coordination inter-segmentaire pouvant caractériser, par exemple, la réalisation de la propulsion d'un patin par rapport à l'autre, la symétrie du mouvement, l'évolution des amplitudes articulaires des genoux au fur et à mesure des cycles de patinage).

Percevoir dans un environnement changeant

L'approche écologique de la perception dépasse le dualisme esprit-corps ou plus généralement environnement-organisme (Araújo & Davids, 2009). La perception est comprise comme un phénomène fondé sur une causalité circulaire entre environnement et individu, plutôt qu'une causalité linéaire entre perception et action (Richardson, Shockley, Fajen, Riley, & Turvey, 2008), basée sur l'existence d'états mentaux représentant la réalité et servant de support à la programmation du mouvement. Autrement dit, l'individu dans son environnement entretient un couplage perceptif direct sans médiation de symboles. C'est pourquoi l'objet d'étude concerne les informations issues d'un changement de comportement de l'individu, des échanges entre l'individu et les propriétés centrales de l'environnement de performance (objet, surface, niches écologiques¹) (Davids et al., 2015). L'approche écologique de la cognition et de l'action attribue une importance aux interrelations entre sujet-environnement et sur l'environnement lui-même, ce qui n'est pas commun à toutes les approches en psychologie du sport (Araújo & Davids, 2009).

Au cours de ces interactions entre l'individu et l'environnement, l'individu acquiert des connaissances de l'environnement et à propos de l'environnement (Gibson, 1966). Tout d'abord, les connaissances de l'environnement (*'knowledge of the environment'*) sont directement utilisables et spécifiques à l'action.

Ces connaissances de l'environnement sont des informations disponibles dans l'environnement et pouvant être relevées par tout un chacun. Elles reposent sur les caractéristiques physiques et physiologiques de l'individu (e.g., la sensation de glisse quand la lame du patin entre en contact avec la glace, la vitesse de dépassement de l'adversaire). Cela implique que la perception des affordances régule le comportement directement sans faire

¹ « Une niche réfère plus à comment vit l'animal qu'à où vit l'animal. Je suggère qu'une niche est un ensemble d'affordances » Gibson (1979, p.213).

appel à des représentations symboliques, des connaissances internes mais plutôt en identifiant des invariants concernant l'environnement (Araujo & Davids, 2009; Gibson, 1966; Seifert et al., 2013). Par exemple, en hockey sur glace, les connaissances de l'environnement impliquent la capacité à percevoir les propriétés spécifiques conditionnant la trajectoire d'un palet lancé sur une glace avec des reliefs non-uniformes. Ces connaissances de l'environnement favoriseront l'émergence d'un comportement fonctionnel qui se manifestera, par exemple, dans la coordination entre les articulations du membre supérieur lanceur afin d'ajuster la vitesse, l'effet, la force de frappe pour réussir une passe ou un tir. L'acquisition de mouvements spécifiques dans une activité sportive est le résultat d'une amélioration de connaissances de l'environnement de performance perçue comme une affordance tout au long de l'apprentissage et de la réalisation de l'action en lien avec cette affordance (Carvalho et al., 2013). Par exemple, en transposant l'étude de Carvalho et al. (2013), nous pouvons imaginer qu'avec la pratique, le développement de connaissances sur le vol d'un palet (e.g., vitesse, rotation, distance entre le tireur et le gardien) constitue un ensemble d'affordances pouvant amener le gardien de but à réaliser une parade de plus en plus adaptée et empêcher la marque, sans avoir eu au préalable recours à la verbalisation de la réalisation d'une parade idéale d'un point de vue biomécanique. Ainsi une affordance spécifique émergera en situation de performance, en fonction des contraintes de chaque individu et favorisera la réalisation de comportement expert.

A contrario, les connaissances à propos de l'environnement (*'knowledge about the environment'*) aident à comprendre un mouvement sans être directement utilisables (e.g., dimension de la patinoire, nombre d'adversaires, partenaires, connaissance de la stratégie) (Davids et al., 2015). Gibson n'a jamais nié l'existence de la perception indirecte, c'est-à-dire médiée par le langage, les symboles, les images, les consignes du coach, etc. (Araujo & Davids, 2009). Ces éléments assemblés avec des connaissances et des prévisions à propos de l'environnement peuvent être utilisés pour inférer sur les propriétés du monde (Davids, Button, & Bennett, 2008). Les humains sont capables d'agir et de rendre les autres humains plus « conscients » des caractéristiques environnementaux pertinents. C'est pourquoi, les informations sur lesquelles se base la perception directe peuvent être verbalisées ou démontrées à l'issue d'un processus sélectif fait par le sujet, l'entraîneur, le partenaire d'entraînement, etc. La valeur de ces connaissances réside dans ce qu'elles représentent ou ce à quoi elles font référence (Araujo & Davids, 2009). Elles n'affordent pas comme des objets

le font, elles favorisent la construction de références qui permettent la prise de conscience et le partage de connaissances, plutôt que la sélection de stimuli pour produire une réponse.

Perception directe.

Dans sa théorie de la perception directe, Gibson avance le fait qu'un animal (ou un être humain) perçoit et agit sur des substances (e.g., de la glace), des surfaces (balustrades d'une patinoire), des lieux (une patinoire). Selon Gibson, la perception se définit comme le fait d'« être conscient des surfaces de l'environnement et de soi-même dans l'environnement » (Gibson, 1979, p. 387). L'essentiel de l'approche réside dans le fait que l'information est spécifique aux propriétés environnementales (disposition des surfaces, objets, événements) et la perception spécifique de ces informations pouvant être « fournies par les champs auditifs, olfactifs et par dessus tout par l'illumination » (i.e., « état constant d'énergie radiante en réverbération dans lequel la lumière est ambiante à tous les points du milieu ») (Gibson, 1979, p. 457). La perception ressort comme spécifique et imbriquée à l'environnement.

Les affordances

Quelles perceptions de l'environnement permettent à un athlète de coordonner ses mouvements? Une réponse possible à cette question se retrouve dans le concept d'affordance : 'a specific combination of the properties of its substance and its surfaces taken with reference to an animal' (Gibson, 1977, p. 67). Les affordances sont des opportunités pour agir, qui invitent (ou n'invitent pas) l'individu à adopter un comportement spécifique à l'environnement de performance (Gibson, 1979; Jones, 2003; Withagen & Chemero, 2011). Nous retrouvons la notion d'affordances dans les situations amenant à : marcher dessus, traverser, s'asseoir, atteindre une cible dans le plan horizontal ou vertical, passer au travers. Il y a des opportunités, dans l'environnement, pour éviter des obstacles, intercepter des objets, éviter des collisions avec des adversaires, sauter par dessus des barrières, etc (Turvey & Kugler, 1984). Ces opportunités apparaissent et disparaissent en fonction des capacités d'actions du sportif ou de changement dans ses conditions de jeu (Fajen, Riley, & Turvey, 2009). Par exemple, un palet de hockey lancé à 130 km/h est saisissable pour le gardien de but en début de match et peut être plus difficilement saisissable dans le dernier tiers-temps, après être entré en collision avec un adversaire. Les sportifs doivent être conscients de ces possibilités de changement d'affordances dans l'environnement de performance.

Les affordances sont une façon de décrire l'environnement indépendamment de la pertinence de la stimulation du système perceptif. La description de l'environnement sous la forme de caractéristiques physiques (e.g., poids, vitesse, temps), mais aussi de fonctionnalité (i.e., permettent d'atteindre un but fixé par l'individu dans son environnement) (Araujo & Davids, 2009). Ce qui est perçu par l'individu n'est pas un cumul d'informations objectives permettant au système nerveux d'établir une représentation de la réalité mais un ensemble de caractéristiques du monde faisant directement sens pour l'individu, qui agira sans user de représentations. Par exemple, l'étude de (Warren, 1984) a révélé qu'un individu monte sur une marche en fonction du rapport entre la hauteur de la marche et la longueur de sa jambe. Ainsi, si la marche dépasse 88% de la longueur de la jambe l'individu ne franchit pas l'obstacle sans avoir eu recours à un comparateur précis entre la longueur de sa jambe et la hauteur de la marche (Jones, 2003). En hockey sur glace, un adversaire en mouvement avec une vitesse importante en suivant une trajectoire rectiligne pour mettre en échec l'attaquant constitue une affordance qui va s'avérer pertinente dans la gestion du duel : l'activité de l'attaquant a généré un comportement du défenseur offrant de nouvelles possibilités d'actions (e.g., modifier brusquement la direction de son déplacement pour prendre le défenseur à contre-pieds et remporter son duel).

Il s'agit de percevoir comment quelqu'un peut agir quand il est confronté à un ensemble particulier de conditions environnementales (Fajen et al., 2009). Percevoir la « reachability » d'une affordance peut influencer la prise de décision et l'action du sportif. Par exemple en boxe, percevoir la distance séparant les deux boxeurs et, la possibilité d'atteindre sa cible favorisera l'émergence du coup ou non (Hristovski, Davids, & Button, 2006). Par exemple, dans le cadre de la pratique du hockey, la glace de la patinoire semble « glide-on-able » (i.e., on peut potentiellement se déplacer dessus) à condition que l'individu ait les capacités nécessaires pour glisser sans tomber, se déplacer en avant, tourner, un affûtage de lame satisfaisant, etc. Un débutant, dans ce contexte là, n'ira peut-être pas poser le patin sur la surface glacée. Les principales relations entre les propriétés physiques de l'environnement et les possibilités d'actions de l'individu constituent le paysage des affordances ou « landscape of affordances » (Bruineberg & Rietveld, 2014; Rietveld & Kiverstein, 2014). Ce paysage des affordances est connecté avec les intentions de l'individu, qui évoluent en fonction de l'expérience, de l'apprentissage (Davids et al., 2012). Par exemple, en hockey sur glace, les intentions d'un débutant seront liées à la possibilité de se déplacer sans tomber, éviter de se faire mal, s'éloigner de la balustrade. Une surface très lisse après le passage de la Zamboni™

(machine de surfacage) ne constituera pas une affordance adéquate avec la préoccupation de l'individu. A l'inverse, le joueur expert en hockey trouvera cette surface adéquate pour se déplacer le plus rapidement possible, en prenant des risques pour protéger son but ou attaquer la cible adverse. Il va jusqu'à percuter l'adversaire au risque de chuter (i.e., mise en échec) pour atteindre son objectif. En somme, plus le niveau de compétence augmente et plus les intentions et les objectifs de performances changent radicalement et se spécifient, rendant certaines affordances accessibles à un moment de la progression. C'est pourquoi un nageur débutant cherchera à flotter, respirer et se stabiliser à la surface, quand un expert s'organisera pour se propulser le plus rapidement possible. Ou encore un débutant en cascade de glace cherche à maintenir une posture stable et sécuritaire, alors qu'un expert produit des mouvements efficaces pour se déplacer rapidement (Seifert & Davids, 2012).

Les affordances exhibent différentes propriétés. Tout d'abord, *les affordances sont réelles et « animal-specific »* (Fajen et al., 2009). Elles ne sont pas dans les objets ou l'environnement lui-même. Elles se définissent à travers la capacité d'action d'un individu au sein de la relation entre l'individu et son environnement. Ensuite, *les affordances capturent la réciprocité de la perception et de l'action* (Fajen et al., 2009). Elles décrivent l'environnement en fonction de comment l'individu peut agir. *Les affordances permettent un contrôle prospectif* (Fajen et al., 2009): percevoir les affordances permet à l'individu de contrôler son comportement. Par exemple, pour attraper une balle il faut guider les mouvements sur la base des informations à propos des événements à venir (e.g., s'informer de l'endroit où la balle pourrait ou ne pourrait pas être attrapée si les conditions persistent (même vitesse de déplacement)). Il s'agit donc des moyens dont dispose l'individu pour adapter à l'avance son comportement aux contraintes et aux opportunités dans l'environnement. *Les affordances sont significatives* (Fajen et al., 2009): les individus perçoivent dans l'environnement des possibilités d'action plus que des propriétés neutres (forme, couleur, etc.). C'est pourquoi, en se référant à la perception animale, Gibson explique que l'affordance est significative dans sa description de ce qu'un animal peut ou ne peut pas faire dans un environnement. *Les affordances sont dynamiques* (Fajen et al., 2009): les affordances apparaissent et disparaissent avec le mouvement de l'individu même si les surfaces ou les substances dans l'environnement de l'individu restent immobiles ou si les changements dans l'environnement se font tandis que l'individu reste statique. Les possibilités d'actions évoluent et disparaissent rapidement en fonction de différents facteurs, tels que la fatigue dans un match. C'est la raison pour laquelle, au cours d'un match, la probabilité pour un joueur

d'attraper une balle change en fonction de l'augmentation de la fatigue (Fajen et al., 2009). Enfin, *les affordances ont une dimension sociale* (Fajen et al., 2009): la dimension socio-culturelle inhérente aux activités physiques et sportives induit des opportunités de percevoir des affordances pour et grâce à un tiers. En effet, la médiatisation des exploits sportifs, l'utilisation d'outils numériques pour analyser la performance (vidéo, Youtube, site de partage de données d'entraînement, forum de discussions, etc.) amène des possibilités d'apprentissage par observation de comportements d'une autre personne. L'apprentissage par observation (i.e., l'individu peut prélever des affordances venant d'une autre personne) est envisageable sous réserve que l'apprenant ait des dimensions corporelles et des possibilités d'action co-calibrées avec celles de l'autre individu (e.g., longueur de segments similaires, capacités physiques proches) (Araújo & Davids, 2009; Fajen et al., 2009).

Dans le cadre de l'approche Ecological Dynamics, les affordances seront assimilées à des contraintes sélectives, ayant une part importante dans le processus d'apprentissage et l'accès à l'expertise (Davids et al., 2015).

Couplage perception-action

Comment l'athlète perçoit-il des informations et s'adapte-t-il à un contexte qui change ? Afin d'appréhender la problématique de la complexité de coordination des actions humaines, la psychologie écologique insiste sur l'importance des influences mutuelles entre les sous-systèmes perceptifs et moteurs humains (Gibson, 1979). Par exemple, durant la phase d'élan en saut de cheval, en triple saut ou au cricket, les athlètes sont sensibles à la réflexion de la lumière sur les objets présents autour de la zone d'impulsion (Greenwood, Davids, & Renshaw, 2013). Il peut s'agir de marques au sol ou de points de référence verticale (e.g., piquet, position d'un juge ou d'un arbitre, table de saut). Durant la phase d'élan, la visée de la zone d'impulsion s'effectue au cours d'un processus continu de perception (i.e., lumière réfléchi différemment en fonction de la position de l'individu) et d'actions (enchaînement des foulées qui augmente la vitesse de déplacement et fait varier la position de l'individu) qui assurent l'ajustement de la coordination garantissant l'accomplissement de la tâche. L'organisation d'un comportement fonctionnel est rendue possible par un enchevêtrement de relations entre intentions, perceptions et actions. En pleine action, l'individu qui bouge génère des informations perceptives qui en retour contraignent l'émergence de nouveaux comportements moteurs (Davids et al., 2015). Par exemple, l'émergence d'une coordination permettant de tirer dans un but de hockey sur glace est le fruit d'interactions entre

informations perceptives (e.g., position des adversaires, du gardien de but, des partenaires et sa propre position), intentions (prendre des risques en tentant un shoot non-maîtrisé, tirer fort pour prendre le gardien de vitesse, feinter pour tirer dans un espace libéré) et d'actions spécifiques (e.g., utiliser le wrist shot assurant un tir précis reposant sur une libération des D.D.L. du poignet ou utiliser le slap shot caractérisé par un élan important, avec un mouvement d'arrière vers l'avant permettant une frappe forte à la suite d'un contact très bref entre palet et crosse). Cette idée se résume idéalement à travers les propos de Gibson : «*Nous devons percevoir pour bouger, mais nous devons aussi bouger pour percevoir* » (1979, p. 223, trad.)

Il existe une réciprocité, une influence mutuelle, entre la perception et l'action (Gibson, 1979). Ainsi, l'individu bénéficie d'une relation étroite entre les forces internes qu'il produit et les flux d'informations. Cette dépendance réciproque est à la fois conséquence (i.e., le déplacement de l'individu génère une transformation de la configuration optique) et cause (i.e., les forces à produire sont souvent calibrées en fonction de ce flux optique) (Bardy & Mantel, 2006). C'est pourquoi, la relation perception-action est représentée sous forme cyclique (Seifert et al., 2013). Pendant que nous percevons, nos mains, nos oreilles ou nos yeux peuvent explorer des stimulations disponibles dans l'environnement de performance. Ces informations constituent la base pour établir un contact, une relation avec l'environnement parce qu'elles sont spécifiques aux sources de ce dernier.

C'est la raison pour laquelle, la théorie écologique place le concept de couplage action-perception au centre et s'écarte du concept de représentation du réel (objets ou événements), pour considérer que les informations potentielles pour la perception se retrouvent dans l'interaction entre le sujet et son environnement. Il s'agit de considérer la co-existence de l'ensemble des structures des énergies ambiantes qu'elles soient de dimensions visuelles, mais aussi tactiles, proprioceptives ou autres. Ainsi, différentes sources d'informations perceptives offrent des opportunités d'actions spécifiques variables suivant la sensibilité des pratiquants à ces informations. C'est pourquoi, un débutant qui percevra le caractère glissant de la surface à l'aide d'informations proprioceptives, visuelles (mouvement du patin différent de celui de la chaussure), tactiles (pas de sensation de frottements au niveau du sol) éprouvera probablement le besoin de s'agripper à la balustrade et, produira un patinage guidé par une main tenant la rambarde, afin d'éviter la chute. Ce comportement se distingue fortement de celui de l'expert, qui utilise la propriété glissante de la surface pour se déplacer le plus efficacement possible, sans craindre la chute sur la base des informations

perceptives qui s'offrent à lui (glace lisse ou avec des creux, patins bien affûtés ou non). Ces actions en retour créent des informations qui orientent les futurs comportements, il s'agit d'un processus cyclique (Davids et al., 2015). C'est pour cette raison que la conception des tâches d'entraînement doit reproduire les contraintes écologiques de l'environnement de performance. Ainsi, les environnements d'apprentissage et de performance coïncideront et contribueront à l'acquisition de nouveaux comportements (Pinder, Davids, Renshaw, & Araújo, 2011).

La représentativité d'une tâche

En référence aux idées de Gibson (1979), il semble primordial de maintenir une relation entre les sources d'informations et d'actions en structurant les stratégies d'intervention, lors du développement de l'expertise, de la conduite de recherche en lien avec les contraintes clés de l'environnement de compétition (Davids et al., 2015; Farrow, Reid, Buszard, & Kovalchika, 2017; Greenwood et al., 2013). Les recherches conduites sur l'effet de l'entraînement ont montré qu'il y avait une forte influence de la spécificité de la tâche, conduisant la réorganisation fonctionnelle des connexions au niveau du cerveau, afin de modifier le contrôle moteur et la sensibilité aux informations spécifiques du domaine de pratique (Ullén, Hambrick, & Mosing, 2015).

Les psychologues du sport s'intéressent à comment apprendre, percevoir et agir dans un *contexte spécifique* (Araújo & Davids, 2009). Au regard de l'importance accordée à la perspective fonctionnelle du comportement émergeant de la relation entre un organisme et son environnement, la prise en compte des caractéristiques spécifiques de l'environnement semble inéluctable. Il est important que les chercheurs en psychologie écologique décrivent et mesurent l'environnement d'un individu afin de pouvoir s'interroger ensuite sur les relations qu'ils entretiennent (Araújo & Davids, 2009; Damian Farrow et al., 2017). Les travaux de Brunswik ont permis de dépasser le cadre classique de la psychologie focalisée sur le « stimulus-réponse », accompagné par une méthodologie connue sous « la règle de la variable » (faire varier un facteur expérimental et contrôler les autres) (Araújo & Davids, 2009; Hammond & Bateman, 2009). En incorporant le but de la tâche et la flexibilité du comportement d'un organisme vivant, Brunswik (1956) établit les principes de ce qu'il appelle le « *representative design of experiments* ». Il oriente sa théorie en fonction des « *probabilistic functionalism* » pour souligner qu'il prend en considération l'incertitude dans le rapport individu-environnement et, qu'il s'intéresse au comportement de l'individu en

réponse à son objectif dans la tâche plutôt qu'à la stimulation initiale de ce dernier. Pour pouvoir étudier un comportement, Brunswik propose de s'intéresser aux circonstances ayant favorisées l'apparition de ce comportement afin d'incorporer ces dernières dans la conception des protocoles de recherche et, par extension dans une situation d'entraînement (Hammond & Bateman, 2009).

Pour illustrer la différence entre les deux approches, prenons l'exemple des instructions en hockey sur glace. Dans une approche centrée sur le « *proximal stimulus* » (le grip de la crosse, le trajet pour armer le tir, l'angle ajusté pour frapper le palet et l'envoyer dans le but), les entraîneurs se concentreront sur les paramètres permettant une forte prédiction « *close-to-the-body* », en reproduisant ce qui est proposé dans la recherche expérimentale en psychologie (Hammond & Bateman, 2009). A l'inverse, en s'appuyant sur la théorie de Brunswik, s'intéresser au « *distal* » (i.e., ce qui sort du corps, le comportement), aux caractéristiques de l'environnement du joueur (sa position, celle du gardien, celle de ses adversaires) et aux incertitudes inhérentes aux interactions entre ces éléments constitue une approche innovante et séduisante à la compréhension de l'analyse du comportement du sportif.

Le terme « *ecological validity* » fait référence à la corrélation entre stimuli proximaux disponible pour un individu et les propriétés distales du comportement humain étudiées par les scientifiques (Araújo & Davids, 2009). Le terme « *representative design* » fait quant à lui référence au fait que les variables indépendantes de l'expérimentation (ou par extension de la situation d'entraînement) reproduisent les circonstances dans lesquelles le résultat est attendu (Brunswik, 1956). Cela implique alors que les scientifiques, entraîneurs ou professeurs, accordent une attention particulière aux caractéristiques du « monde réel ». La difficulté la plus importante à dépasser réside dans la capacité du concepteur de situation à capturer les paramètres les plus pertinents dans la situation réelle au regard de la question de recherche posée ou de l'apprentissage souhaité. Dans le cas contraire, généraliser des résultats obtenus en laboratoire à des situations extérieures à celui-ci (ou de la situation d'apprentissage à la compétition) semble difficile si le chercheur (ou l'entraîneur) n'a pas pris la peine de cibler les circonstances représentatives du contexte d'obtention des résultats. C'est pourquoi dans le cadre de l'analyse des réponses au stress subit par des tennismen Hammond & Bateman (2009) envisagent le recueil de données en situation de match.

Les auteurs ne recommandent pas la mise en place de situations d'apprentissage avec répétitions de mouvements spécifiques à corriger accompagnées de feedbacks constants du

coach, un saut de balle remplaçant un adversaire, l'utilisation d'un environnement très stable et confortable. Ils conseillent par exemple de développer, dans les situations d'apprentissage, la capacité de l'individu à s'auto-évaluer pour modifier ses comportements plutôt que de recevoir en permanence des feedbacks d'entraîneurs qui ne seront pas à ses côtés pendant le match. Ils recommandent que les joueurs choisissent par eux-mêmes les trajectoires et effets de balle pour qu'ils progressent dans leurs prises de décisions, la mise en place de situations faisant appel aux ressources perceptuelles, cognitives, émotionnelles et physiques sollicitées en match. En inventant de nouvelles façons de marquer des points les coaches doivent reproduire des situations de stress émotionnel pour aider le sportif à performer sous la pression de la compétition. L'idée première est de confronter l'individu à une situation qu'il pourrait avoir en match.

Un manque de « representative design » signifie que les processus comportementaux étudiés ont pu être malencontreusement altérés par la conception d'un environnement d'étude ne favorisant pas l'émergence de comportements fonctionnels des participants (Araújo & Davids, 2009). En effet, si les résultats obtenus sont spécifiques à l'expérimentation conduite ou à la situation d'apprentissage alors, en cas de non représentativité, la compréhension d'un phénomène ou le transfert de compétences se trouvent limités. Par exemple, il a été suggéré que l'apprentissage du mouvement de frappe de balle en cricket était plus pertinent lorsque la balle était envoyée par un lanceur « vivant », plutôt que par un lance-balle automatique. La première situation favorise le couplage perception-action représentatif des situations naturelles de cricket (Pinder, Renshaw, & Davids, 2009). Les réponses comportementales des joueurs étaient significativement différentes en fonction de la nature artificielle ou humaine du lanceur : les batteurs sont capables d'ajuster la hauteur de la batte de manière prospective en fonction des informations perçues avant le vol de la balle. Cette étude souligne le besoin de proposer des situations d'entraînement dont les contraintes spécifiques de tâche (e.g., un lanceur humain) et environnementales sont représentatives de l'activité en situation de compétition, et symétriquement, de concevoir des protocoles de recherche préservant également cette représentativité. L'enjeu pour l'intervenant passe par la capacité à comprendre l'évolution de la nature des affordances qui contraignent la conception et la mise en place des environnements de pratique pour chaque individu. Il s'agit également de reconnaître le caractère temporaire de nombreuses contraintes affectant la perception des affordances (e.g., fatigue, blessure, maturation de l'organisme, etc.) (Araújo & Davids, 2009). L'évolution importante de la nature des affordances dans un contexte sportif (accompagnée

d'une modification des contraintes de tâche et personnelles au cours du temps) renforce la nécessité de mettre le pratiquant dans un environnement qui le confrontera à résoudre des problèmes, à s'adapter en percevant les affordances à sa disposition et, en prenant en considération les limites de ses capacités pour organiser ses actions (Fajen et al., 2009)

L'environnement de pratique ne doit pas être considéré comme « neutre », mais doit offrir des opportunités d'actions invitant chaque apprenant à explorer de nouvelles solutions (Davids & Araújo, 2010; Withagen, De Poel, Araújo, & Pepping, 2012). En effet, la performance est facilitée ou contrainte par les interactions entre les processus perceptivo-cognitif et perceptivo- moteur (Farrow et al., 2017). Cette démarche implique de pouvoir répondre à des questions telles que : quels aspects de la performance doivent être renforcés ? Comment créer un couplage information-mouvement en situation d'entraînement qui sera retrouvé en compétition ?

Coordonner les degrés de liberté

Afin d'appréhender au mieux le système complexe, l'approche Ecological Dynamics du contrôle moteur fait le choix d'utiliser une variable macroscopique : la coordination. Beek, Peper, & Stegeman (1995) caractérisent la coordination humaine comme le produit d'une organisation biologique très complexe regroupant le système vasculaire, neuronal, musculaire, squelettique. Ils défendent le fait que l'interaction entre les composants de la structure est à la base de la coordination et non pas une somme des propriétés matérielles du système. Il s'agit donc de l'agencement spatio-temporel des différents éléments du système (Seifert et al., 2013). Cette approche offre un cadre intéressant pour comprendre à un niveau macroscopique comment les contraintes liées à l'organisme, la tâche et l'environnement agissent sur la formation auto-organisée des patterns de coordination et de contrôle qui déterminent la réalisation de la performance sportive. La dynamique du comportement (i.e., son émergence, sa persistance, son changement en fonction des contraintes) se traduit par un contrôle des degrés de liberté (D.D.L.) en un tout organisé appelé coordination influencée par l'évolution des contraintes au sein du couple individu-environnement. Ce sont les éléments capables de varier indépendamment des autres au cours de l'action afin de répondre aux objectifs de la tâche. Il s'agit de composants indépendant d'un système qui peuvent s'assembler de façon très différentes (Davids et al., 2008). Nous pouvons considérer que les degrés de liberté font référence à « la possibilité pour un système d'évoluer dans une direction en partie contrainte par ses propres évolutions spontanées » (Gréhaigne & Godbout, 2014, p. 102). En référence

aux réflexions de Bernstein (1967), une attention particulière est accordée à l'abondance des degrés de liberté présents dans le système moteur. Leurs exploitations résident dans la réorganisation permanente des D.D.L. en fonction du but de la tâche (Bernstein, 1967). La réorganisation continue des D.D.L. n'est pas dirigée par l'environnement, elle émerge de la coadaptation des comportements de l'individu et l'environnement sans intervention d'un agent prescripteur (Davids et al., 2012, 2015; Kelso, 1995).

Dans cette approche, la majorité des degrés de liberté sont exploitables pour modifier le mouvement, expérimenter un large panel d'options motrices. L'abondance des D.D.L. est à la fois une opportunité incroyable pour un athlète d'exploiter différentes solutions motrices mais aussi un challenge au niveau de l'organisation du système nerveux central, lors de l'acquisition de nouvelles compétences (Davids & Glazier, 2010). C'est en coordonnant l'agencement de ses D.D.L. que l'individu pourra s'adapter à la dynamique des contraintes. Bernstein définit la coordination comme : *'the process of mastering redundant degrees of freedom of the moving organ, in other words its conversion to a controllable system'* (1967, p. 127). Il pointe l'existence de formation de liens spécifiques entre articulations et muscles (plus tardivement appelées « coordinative structures ») pour répondre à une fonction, un objectif. Ainsi, les nombreux groupes de muscles sont contraints pour agir en unité fonctionnelle (Kugler, Kelso, & Turvey, 1980). Les structures coordinatrices agissent comme des contraintes physiques régulant la biomécanique des degrés de liberté en fonction des systèmes moteurs impliqués, de la nature de la tâche. La coordination et le contrôle du mouvement impliquent deux dimensions : i) coordonner les segments dans l'espace et le temps pour réaliser une action et ii) coordonner les éléments responsables du mouvement en fonction des objets, surfaces ou événements impliqués dans l'environnement. Pour clarifier les notions autour de la production du mouvement : i) la coordination correspond à la fonction permettant de manipuler les degrés de liberté dans un comportement unique, ii) le contrôle correspond à la définition ou élaboration de cette coordination et iii) la compétence correspond au contrôle le plus adapté (Kugler, Kelso, & Turvey, 1980). Pour connaître l'étendue du répertoire d'un expert, une 'scanning task' est employée. Il s'agit de la mise en place d'une tâche particulière dont l'objectif est de révéler les comportements préférés, le répertoire préexistant contraignant ce qui peut être appris et la manière d'apprendre (Kelso, 2012). Cette évaluation du répertoire moteur fait office de première discrimination entre le comportement expert et débutant. Delignières (2004) précise que dans le cadre de l'analyse du mouvement humain c'est « la formation des patterns et des structures, dans les systèmes

complexes » qui va être capturée au cours du temps. Cette approche ne s'intéresse pas aux mécanismes sous-tendant l'évolution du système mais au fonctionnement global du système (i.e., à la dynamique du système). L'étude de la dynamique du système amène à étudier la possible non-linéarité, non-proportionnalité et auto-organisation des coordinations motrices, comme étant des processus naturels d'organisation et de réorganisation du répertoire moteur sous l'effet d'un ensemble de contraintes en interaction (Seifert et al., 2013). In fine, les modélisations mathématiques propres à la théorie des systèmes dynamiques visent à expliquer et prédire comment les patterns de coordinations émergent, s'adaptent, persistent et changent au sein d'un système complexe intégratif (Kelso, 1995), ce qui ne sera pas l'objet de ce travail de thèse.

Emergence, stabilité et flexibilité des coordinations sous l'effet des contraintes

Rappelons que le comportement du système individu-environnement émerge, persiste et change sous l'effet d'interactions entre de multiples contraintes.

L'approche par les contraintes

Nous comprendrons le terme de contrainte ainsi : '*Constraints may be viewed as boundaries or features that limit motion of the entity under consideration. [...] Constraints reduce the number of possible configurations of a system. Constraints exist at various levels of analysis of the organism and its interactions with the environment (e.g., biochemical, biomechanical, morphological, neurological)*' Newell (1986, p. 347). Les contraintes favorisent l'émergence de comportements fonctionnels au détriment d'autres. Elles constituent des ressources qui encadrent ou délimitent l'émergence du comportement moteur humain (Seifert et al., 2013). Il faut comprendre que les contraintes donnent une direction et restreignent l'étendue des possibles. Pour être en lien avec le précédent paragraphe concernant la coordination, les contraintes correspondent aux '*numerous variables that influence the region of phase space that a dynamical system visits. Constraints both limit and enable the different behavioural trajectories that a neurobiological system, for example, can adopt*' (Davids et al., 2008, p. 223). Ainsi, l'acquisition de compétences expertes passe par la recherche de solutions de coordinations fonctionnelles qui émergent de l'individu, et sont orientées en fonction de la tâche et des contraintes de l'environnement (Newell, 1986). Être compétent revient à s'adapter aux contraintes imposées par l'environnement. Newell (1986)

discrimine trois types de contraintes orientées soit : i) par l'objectif de la tâche, ii) par les règles spécifiques restreignant l'activité et iii) la mise en œuvre de la réponse.

La nature des contraintes. Les contraintes peuvent être physiques ou informationnelles. Les contraintes physiques regroupent : i) les contraintes structurelles telles que la taille et la force de saisie d'une main de hockeyeur manipulant une crosse et ii) les contraintes fonctionnelles qui correspondent aux capacités de réactions ou de perception d'un individu (Davids et al., 2008). Les contraintes informationnelles se retrouvent à travers les différentes formes d'énergies circulant autour du système (e.g., phéromones pour les insectes, ondes sonores, adversaires, etc.). Il est également possible de distinguer les contraintes en fonction de leurs caractéristiques externes à l'individu ou interne, de l'influence de leur action sur l'espace, le temps ou les deux, du niveau d'analyse où elles se trouvent (au niveau de la cellule ou celui de la coordination) et de l'échelle temporelle sur laquelle dure leur influence (millisecondes ou années). Les contraintes agissent de concert pour faire émerger le pattern de coordination et le contrôle produit pour évoluer dans un contexte spécifique. Cette coordination et ce contrôle dépendent à la fois de la perception de l'individu, de comment l'environnement 'afforde', mais aussi de la dynamique du système individu-environnement (Glazier, 2015; Seifert et al., 2017). Précisons qu'un petit changement dans ces contraintes peut entraîner de grands impacts sur le contrôle ou la production du mouvement, l'inverse étant également possible (les contraintes peuvent s'annuler ou n'avoir aucun impact sur le pattern moteur après modification) (Newell, 1986). À ce titre, une modification de l'affûtage de la lame d'un patin de quelques millimètres peut diminuer totalement les possibilités d'action d'un joueur qui se trouvera en difficulté pour réaliser des changements brusques de direction en fonction de l'évolution du jeu.

Newell (1986) propose de classifier les contraintes à travers trois types de contraintes liées à : l'environnement, l'organisme, la tâche. Nous illustrerons des contraintes spécifiques au patinage en hockey sur glace en précisant avant tout que cette présentation n'est pas exhaustive, dans la mesure où les contraintes mentionnées par la suite interagissent avec d'autres non présentées. Par ailleurs, la stabilité et le changement de la coordination motrice sous l'effet de ces contraintes sont liés à un ensemble de facteurs, comme le niveau d'expertise des joueurs, qui nous intéressera particulièrement dans le cadre du prochain chapitre.

Contraintes liées à l'environnement en hockey sur glace. c. La difficulté est de distinguer les contraintes environnementales générales et les contraintes spécifiques à la

tâche. Les contraintes environnementales ne peuvent pas être manipulées par l'expérimentateur et sont relativement indépendante de la durée de l'action. Par exemple, la gravité, la température naturelle ambiante et l'éclairage naturel de la scène sont des contraintes environnementales. Cependant nous pouvons quand même jouer sur ces contraintes en réalisant des expérimentations sur différents endroits sur Terre (e.g. à 2000m d'altitude, au Pôle Nord ou dans le Sahara) ce qui impactera les contraintes environnementales.

L'originalité du patinage sur glace vient du fait que les joueurs progressent sur un milieu peu commun qui est la glace. Ce milieu va remettre en cause l'équilibre de terrien puisque nous passons d'un déplacement caractérisé par la marche à un déplacement de glisse, accompagné d'une réduction du polygone de sustentation. La pratique sur la glace est une contrainte prégnante en hockey et impose au pratiquant de dépasser les patterns habituels de marche ou de course pour se déplacer, résister aux mises en échec, perturber le jeu de l'adversaire, prendre l'avantage en possédant le palet, etc (Alpini, Hahn, & Riva, 2008). Autant d'occasions de perdre l'équilibre mettent le système vestibulaire en situation stressante (Alpini et al., 2008). La difficulté à progresser sur la glace, sans tomber, provient également de la friction entre la lame et la glace tributaire en partie de la température de l'eau et de la pellicule d'eau recouvrant la surface entre chaque passage de Zamboni™ (De Koning, De Groot, & Van Ingen Schenau, 1992; Kobayashi, 1973). La température de la glace et les frictions qui s'opèrent impactent la fatigue, la vitesse de déplacement, la fluidité de la conduite du palet (Montebell, 1992; Pearsall, Turcotte, Levangie, & Forget, 2014; Pearsall, Turcotte, & Murphy, 2000) .

Enfin, la modification de la friction engendrée par le contact patins-glace par rapport à pieds-sol perturbe le maintien d'une posture de terrien (De Koning et al., 1992; Jobse, Schuurhof, Cserep, Schreurs, & De Koning, 1990; Pearsall et al., 2000). Des études conduites sur l'analyse de la régulation de l'équilibre postural ont mis en avant :

i) le maintien de la posture pour elle-même est quasi inexistant, le maintien de la posture sert à réaliser une autre tâche qualifiée de tâche supra-posturale dans notre cas satisfait les intentions des joueurs (Bardy, Marin, Bootsma, & Stoffregen, 1999; Stoffregen, Hove, Bardy, Riley, & Bonnet, 2007),

ii) le maintien de la posture est contrainte-dépendante (e.g., tributaire de la surface de support (Bardy et al., 2007; Marin et al., 1999) qui dans le cadre de la pratique du hockey se trouve glissante et perturbe l'équilibre) ,

iii) l'expertise dans une tâche influence la régulation posturale de l'individu en situation d'équilibre perturbé (consulter à titre illustratif les études réalisées sur la régulation posturale d'une population composée en partie de gymnastes experts : (Alpini et al., 2008; Gautier, Marin, Leroy, & Thouvarecq, 2009; Gautier, Thouvarecq, & Larue, 2008; Gautier, Thouvarecq, & Vuillerme, 2008).

Contraintes liées à l'organisme. Les contraintes liées à l'individu dites 'organismic' ou personnelles sont fonctionnelles (connexions synaptiques) ou structurelles (poids, taille, IMC, etc.). Cela rassemble les caractéristiques génétiques, psychologiques, motivationnelles, émotionnelles, cognitives, morphologiques en relation avec le sexe, l'âge, l'expérience dans l'activité de l'individu (Davids et al., 2008). Parmi ces contraintes nous retrouvons, par exemple, les gènes de l'expert comme une des contraintes importantes, responsable de l'expression d'un phénotype particulier à cette population (Baker & Horton, 2004; Hambrick et al., 2014; Rankinen et al., 2006; Sternberg, 2000). Précisons que les prédispositions génétiques facilitent la réalisation et la répétition des entraînements et des compétitions (e.g., sensibilité à la blessure) qui auront eux-mêmes des effets sur les expressions génétiques et les synthèses protéiques qui succèderont aux entraînements (Baker & Horton, 2004). A l'échelle du génome humain, nous retrouvons cette interaction fondamentale entre l'expression des gènes et l'environnement dans lequel l'individu évolue (Baker & Davids, 2006; Davids et al., 2003). Nous pouvons imaginer qu'un individu avec un génotype avantageux, mais n'ayant pas la volonté de s'entraîner à des intensités suffisantes, n'atteigne pas le plus haut-niveau de pratique tandis qu'un individu avec des prédispositions légèrement moins avantageuses, mais s'entraînant de façon beaucoup plus intense atteigne ce niveau de performance (Simonton, 2005). En adoptant ce point de vue, l'expression des gènes est liée à des contraintes environnementales qui favoriseront ou inhiberont cette dernière. En ce faisant, cette expression ou non-expression génique prend part à la constitution de ce qui est nommé les « contraintes génétiques », jouant un rôle dans la variabilité de la performance de l'individu (Baker & Davids, 2006).

D'autres contraintes, liées à l'organisme telles que l'utilisation de la mémoire, jouent un rôle important en contraignant le comportement humain et en l'ajustant à l'évolution de la dynamique intrinsèque de chaque athlète, suivant l'exposition à des expériences spécifiques, à l'entraînement ou à la pratique (Davids & Araújo, 2010). Au niveau du hockey sur glace, en plus de la prise en compte des facteurs influençant l'accès à l'expertise, détaillés dans le

prochain chapitre, nous pouvons illustrer les contraintes liées à l'organisme à travers l'évolution des morphologies des professionnels. En effet, les études de Montgomery (2006) et Quinney et al. (2008) révèlent un gain important de taille, de masse (figure 4 pour l'illustration), d'Indice de Masse Corporelle, de force, de Vitesse Maximale Aérobie (Agre et al., 1988).

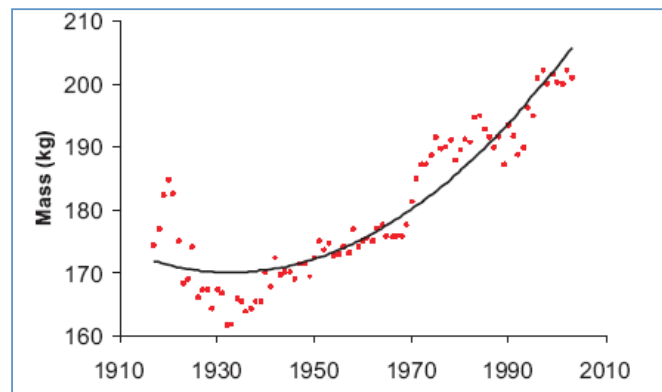


Figure 4. Evolution du poids (kg) des Montreal Canadiens hockeyeurs de 1917 à 2003 (d'après Montgomery (2006)).

En somme, ces études pointent une modification des contraintes morphologiques, conséquence de la mise en place de programmes spécifiques de préparation physique, visant à prévenir des blessures et à améliorer des paramètres comme la vitesse ou la résistance à l'effort. Différents facteurs expliquent ce changement de gabarit des joueurs : le recrutement plus spécifique des clubs, basé sur le gabarit, le temps d'entraînement, l'embauche de préparateurs physiques, la surveillance de la nutrition, l'évolution du matériel et des techniques d'entraînement des capacités physiques (Behm, Wahl, Button, Power, & Anderson, 2005; Fergenza & Marino, 2004). Il faut noter que cette évolution des contraintes morphologiques se fait au détriment de la santé des joueurs, dont la fréquence des blessures est en augmentation à l'image du nombre croissant de commotion cérébrale (Azuelos, Pearsall, Turcotte, & Montgomery, 2004; Goodman, Gall, & Miller, 2004; LaPrade, Dick, Kiff, & Wentorf, 2004).

Contraintes liées à la tâche. Il s'agit des contraintes plus spécifiques à un contexte particulier de performance. Ces contraintes de tâche correspondent à l'ensemble des règles, au but de la tâche, aux dimensions du lieu de pratique, aux instructions ou à l'équipement particulier pour produire une performance (Davids et al., 2008). Une modification des

contraintes de tâche (e.g. dimension d'un obstacle, localisation de la cible) peut générer un changement d'organisation motrice chez les sportifs confirmés ou experts, que nous ne retrouverons pas chez les novices adoptant un comportement moins flexible (Seifert et al., 2013).

L'équipement du joueur. Une des particularités de l'activité hockey sur glace se trouve dans l'important équipement qui protège les joueurs (plastron, jambière, casque, etc. pour une surcharge totale de 10 à 15 kg) et leur donne un sentiment de confiance et de sécurité pour faire face à la violence du jeu (Janski & Meyer, 2004). Des éléments responsables de la performance ont fait l'objet de recherches scientifiques (e.g., la crosse (Hannon, Michaud-Paquette, Pearsall, & Turcotte, 2011; Villaseñor, Turcotte, & Pearsall, 2006), les patins (Pearsall, Paquette, Baig, Albrecht, & Turcotte, 2012; Pearsall, Turcotte, Lefebvre, & H, 2001; Robert-Lachaine, Turcotte, Dixon, & Pearsall, 2012), l'influence de l'équipement de match sur la température corporelle, la déshydratation, l'accumulation de lactate lors d'un effort intermittent simulant l'effort en match de hockey sur glace (Noonan, Mack, & Stachenfeld, 2007)). Pour illustrer l'importance de l'équipement dans cette activité, nous présenterons brièvement le poids de l'affûtage dans la relation que peut entretenir le hockeyeur avec son environnement. L'affûtage des lames a un impact sur le rayon creux ou 'hollow'. Dans le cas où le rayon creux est important, l'affûtage favorise l'adhérence à la glace et facilite les arrêts et changements de direction, à contrario, la réduction du rayon creux réduit les frictions et facilite la glisse (Federolf, Mills, & Nigg, 2008). Maintenir un aiguisage optimal des bords de la lame assure un meilleur contrôle du patinage : il faut trouver un compromis afin que le patin soit suffisamment aiguisé pour accrocher la glace lors de la poussée, mais en faisant attention à ce qu'il ne le soit pas trop afin de pouvoir assurer le freinage. Si le bord est plat alors la lame a plus de difficulté à creuser dans la glace : le joueur produit une poussée moins importante. Lors de la poussée, la lame est orientée pour que le bord intérieur soit le premier à creuser la glace. Lors des pivots, croisements et arrêts se sont les lames extérieures qui permettent l'application de la force sur la glace (Pearsall et al., 2000). À cette configuration du rayon creux s'ajoute l'angle de la lame (figure 5) comme paramètre pouvant améliorer les performances de patinage (Federolf & Nigg, 2012).

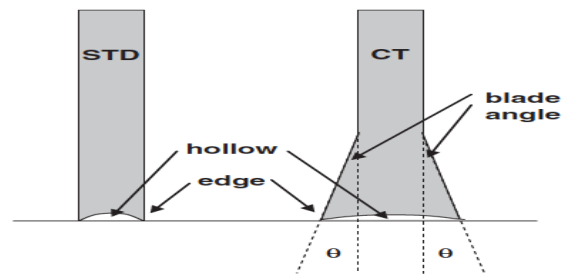


Figure 5. Illustration des différences observables concernant l'angle de la lame, l'espace entre la surface et la courbure de la lame (d'après Federolf & Nigg, 2012).

Une différenciation par poste. Bompa (1999) définissait le hockey sur glace comme un sport nécessitant de : « la puissance d'accélération, puissance de décélération et de l'endurance-puissance ». Pearsall et al., (2000) complètent cette énumération des qualités physiques en détaillant la liste des qualités attendues chez un expert : l'anticipation, les bons timing et direction du mouvement, l'équilibre, la précision, la polyvalence, l'agilité, un faible temps de réaction. Une rencontre de hockey sur glace se décompose en trois tiers temps de 20 minutes, entrecoupés de périodes de repos de 15 minutes. Précisons que six joueurs évoluent sur la glace, et qu'en règle générale une équipe est constituée de 22 joueurs (2 gardiens et 20 joueurs). Trois postes se différencient : gardien de but, défenseur et attaquant. Des « lignes offensives ou défensives » sont déterminées afin que l'entraîneur puisse programmer des rotations de lignes toutes les 30 à 90 secondes. En effet, Vescovi, Murray, Fiala, & VanHeest (2006) estiment que le temps moyen de présence d'un joueur est de 30 à 90 secondes (le temps moyen de jeu pour un professionnel par présence est de 43-48s, 58-62s pour des juniors, 95s pour des jeunes, 139s pour des vétérans (Montgomery, Nobes, Pearsall, & Turcotte, 2004)). L'effort en hockey sur glace est qualifié d'intermittent, ce qui sous-entend une capacité cardiorespiratoire à maintenir un effort intense, de façon répétée, malgré la fatigue et une importance de la filière anaérobie (Cox, Miles, Verde, & Rhodes, 1995; Green & Daub, 1978; Montgomery, 2006). C'est pour cela que peu de joueurs en NHL sont capables de jouer plus de 20 minutes par match et parcourent 3 à 5 km par rencontre (Montgomery, Nobes, Pearsall, & Turcotte, 2004). La fatigue est alors très rapidement présente, donc des rotations fréquentes sont nécessaires. Selon Vescovi et al. (2006), la filière aérobie intervient pendant la récupération, entre ces efforts intermittents de haute intensité. Il est normal d'observer des changements par blocs de trois attaquants ou deux défenseurs, au cours de l'action ou durant un arrêt de jeu. Une équipe est en général constituée de quatre lignes

offensives, de trois lignes défensives. Il existe également des lignes spécifiques aux situations d'infériorité numérique ou de supériorité numérique. Ainsi, les attaquants ont trois temps de récupération pour un temps de jeu (1 : 3) tandis que les défenseurs n'en ont que deux (1 : 2) (Vescovi et al., 2006). L'étude de Montgomery, Nobes, Pearsall, & Turcotte (2004) corrobore ce constat avec une précision plus fine : les joueurs au centre jouent en moyenne 16 minutes par match (44,7 secondes par présence), patinent 4,8% du temps en arrière, participent au powerplay et au penalty killing. Les ailiers jouent 13 minutes 47 secondes (43,1 secondes par présence), patinent 5,7% du temps en arrière. Enfin les défenseurs jouent 18 minutes et 40 secondes (47,6 secondes par présence) et patinent 19,2% du temps en arrière. En somme, les qualités physiques à développer et l'effort à fournir sur l'ensemble d'un match diffèrent en fonction du poste du joueur. Les attentes en terme de qualités physiques, de compétences en patinage, de manipulation de la crosse et du palet, d'agressivité dans le jeu diffèrent suivant les postes des joueurs qui sont détectés et recrutés lors des drafts en fonction de ces attendus par poste (Renger, 1994).

Quinney et al. (2008) ont porté leur attention sur le profil physique des joueurs de NHL. Leur étude a été réalisée sur 26 années, le but étant d'analyser l'évolution du profil physiologique d'une équipe de Ligue Nationale de Hockey (NHL). Au niveau des postes : les attaquants sont plus jeunes que les défenseurs et les gardiens de but. Les défenseurs sont plus lourds et plus grands que les attaquants, qui sont eux-mêmes plus lourds et grands que les gardiens de but. Les gardiens ont un IMC plus petit ainsi qu'un VO₂max plus faible que les défenseurs. Il y a une différence significative entre les trois catégories, au niveau du pic de VO₂ max. Les avants ont les pics les plus élevés et les gardiens de but les pics les plus bas. Cette étude a révélé qu'il existait des profils physiologiques en fonction des postes occupés sur le terrain. L'étude d'Agre et al. (1988) fait le même constat sur l'évolution du gabarit des joueurs et montre que la puissance aérobie des hockeyeurs est similaire entre les attaquants, les défenseurs et les gardiens de but.

Enfin, il est entendu que la formation du jeune joueur passe par une différenciation de l'apprentissage du patinage en lien avec son poste : travailler en priorité sa vitesse et son accélération vers l'avant pour un attaquant ou, sa mobilité et son patinage arrière s'il est défenseur (Renger, 1994). Cette différenciation se justifie au regard des résultats des analyses vidéos de matches de NHL : les formes de patinage varient en fonction des postes des joueurs (Montgomery et al., 2004). Comme l'indique le tableau 2, les défenseurs cumulent plus de temps de patinage par matches, une différence significative est remarquée sur un ensemble de

mouvement de patinage (e.g., au niveau du patinage arrière, des pivots pour passer de patinage avant à arrière), ce qui incite les auteurs à suggérer la confection de patins différenciés en fonction du poste. Cette variabilité inter-sujet au niveau de l'activité de patinage en match est corroborée par l'étude de Lafontaine, Lamontagne, & Lockwood (1998). Leurs résultats démontrent qu'il existe des différences significatives au niveau des mouvements de patinage suivant les postes : les défenseurs patinent plus en arrière que les autres joueurs et réalisent plus de pivots. Les attaquants patinent souvent en avant et réalisent plus de « body-check » (mise en échec). Pour conclure, les défenseurs patinent en plus grande proportion en arrière et changent de direction plus souvent que les attaquants. Ces résultats permettent d'envisager une différenciation dans les niveaux de compétences de patinage au sein d'une population de hockeyeurs évoluant dans le même niveau de compétition. Nous pourrions ainsi supposer qu'un hockeyeur n'est pas obligatoirement expert en patinage et, qu'en fonction de son poste, ses compétences de patineur diffèrent significativement. La contrainte liée à la tâche (ici le poste occupé par le joueur et le rôle qu'il doit respecter lors du match) va justifier l'intérêt de questionner son importance lors du patinage avant.

Tableau 2. Répartition des formes de patinage avant lors d'un match de NHL (repris du travail de Montgomery et al., 2004)

Mouvements	Centres	Ailiers	Défenseurs
Patinage (s)	915.4	779.4	904.1
Départs	61.4	56.1	64.7
Arrêts	39.6	35.3	43.4
Pas croisés	73.1	62.2	54.6
Virage brusque	60.4	49.7	46.2
Pivot Avant-Arrière	23.5	23.8	60.8
Mouvement patinage	258	227	270

La nature des tâches lors d'un match de hockey sur glace. 'one of the fastest chase-and-pursuit games in the world' (Pearsall et al., 2014). Les compétences en Hockey sur glace ont été décrites par Pearsall et ses collaborateurs (2000), et sont présentées sur la figure 6. Trois compétences sont nécessaires pour être un bon hockeyeur : maîtriser le patinage (départ, arrêt, linéaire ou non-linéaire (rotation)), manier la crosse en fonction des exigences de la situation (dépend du déplacement ou de l'immobilité du joueur, de la possession ou non du palet, de sa proximité avec le gardien) et réaliser des mises en échec efficaces (conserver le palet, arrêter les attaquants).

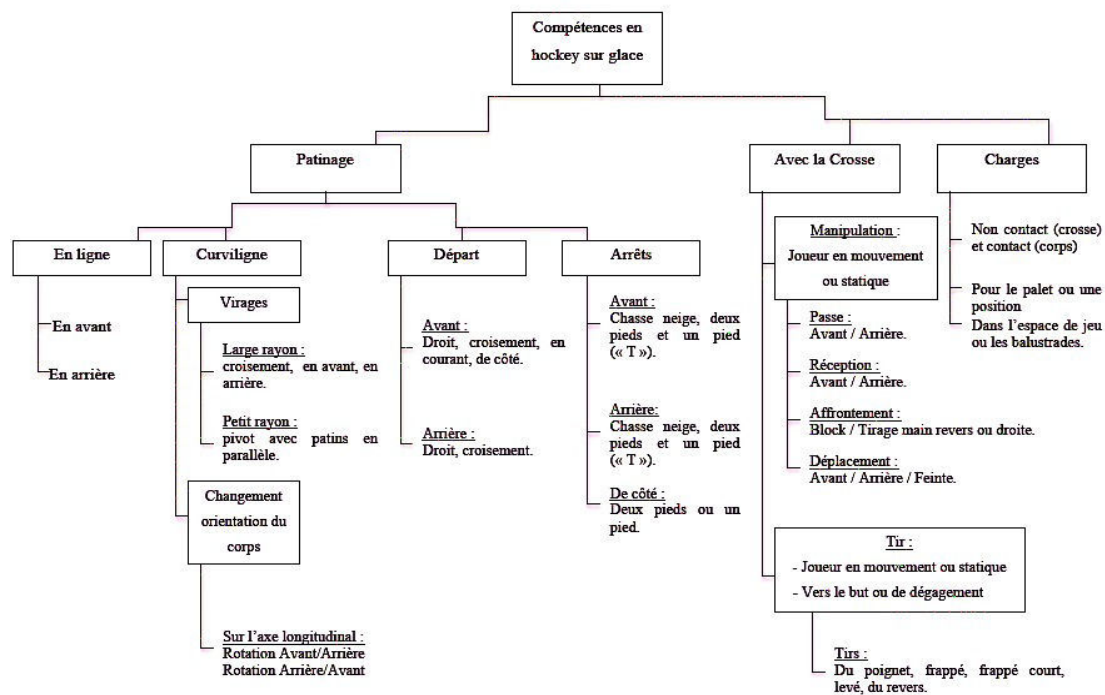


Figure 6. Classification des compétences en hockey sur glace (adaptée de Pearsall et al. (2000)).

Certaines études ont porté leur attention sur l'activité de joueurs avants de NHL en séquençant des vidéos de match (Bracko, 2004), les formes de patinage de joueur de NHL dans les 30 secondes après un engagement de palet (figure 7), la répartition et la composition des tâches de patinage (Bracko, 2004; Bracko, Fellingham, Hall, Fisher, & Cryer, 1998; Montgomery et al., 2004), les mises en échec et les tirs en NHL en fonction des postes ou des âges de pratique (Montelpare & McPherson, 2004; Montgomery et al., 2004). À titre indicatif, un joueur reçoit en moyenne entre 8-9 mises en échec par match, les joueurs les plus actifs subissent ou exécutent 25 à 28 mises en échec par match (Montgomery et al., 2004).

Concernant les tirs, les défenseurs utilisent beaucoup le slap shot et les avants le wrist shot. Le revers est le tir le moins utilisé.

SKATING CHARACTERISTIC	TIME ON ICE (SECONDS)
Struggle for puck/position	2
Two-foot glide (gliding left turn - right turn)	2
Cruise stride (left cross-over turn)	1
Two-foot glide (gliding left turn)	2.5
Cruise stride (left cross-over turn)	1
Two-foot glide (gliding left turn)	2.5
Cruise strides (right cross-over turn)	1
Two-foot glide (gliding left turn, right turn)	2
Struggle for puck/position	2
Medium-intensity skating (left cross-over turn)	2.5
Two-foot glide (gliding right turn)	1.5
Medium-intensity skating (right cross-over turn)	1
Two-foot glide (gliding left turn, right turn)	1.5
Cruise strides	1.5
Low-intensity skating (left cross-over turn)	3.5
Two-foot glide (gliding left turn)	2.5
Two-foot stationary with puck	0.4

Forme de tirs	Centre	Ailiers	Défenseurs
Slap (%)	25	26	54
Wrist (%)	29	37	23
Backhand (%)	18	15	4
Snap (%)	29	23	20

Figure 7. Caractéristique du patinage dans les 30 secondes après la mise en jeu du palet à gauche (Bracko, 2004) et séquençage des tirs en fonction du poste à droite (tiré de Montgomery et al., 2004).

Pour conclure sur cette partie concernant les contraintes identifiées comme spécifiques à l'activité hockey sur glace, nous avons résumé le paragraphe à travers la figure 8.

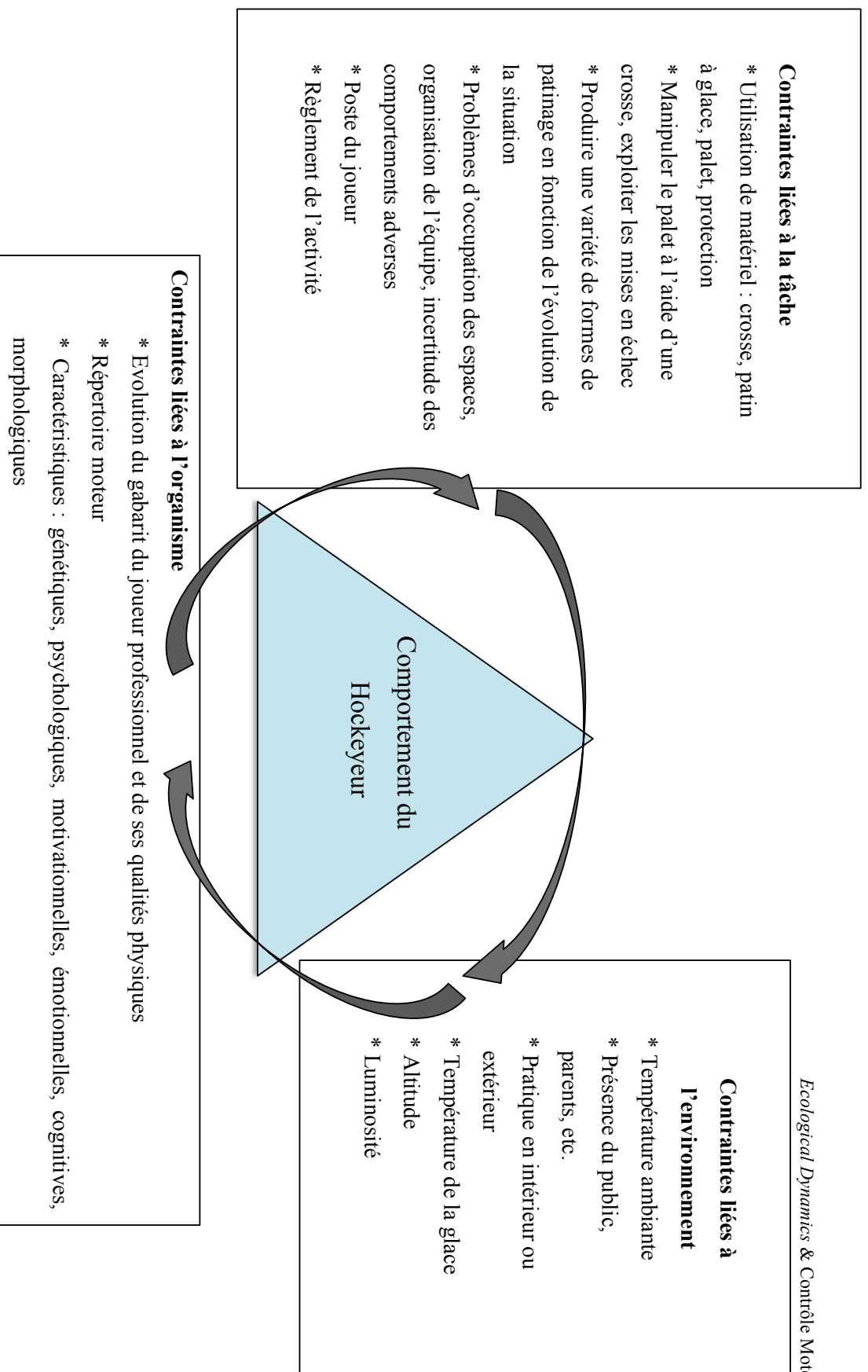


Figure 8. Représentation des contraintes incontournables en hockey sur glace.

Rôle fonctionnel de la variabilité du mouvement

La variété des contraintes amène une variété des réponses comportementales pour l'atteinte d'un même but. Dans notre travail, nous considérons que manipuler les contraintes pesant sur le patinage (e.g., utiliser ou non une crosse, conduire un palet) peut engendrer une modification du comportement en apparence stable : reproduire un cycle de patinage avant. Se déplacer tout en contrôlant en même temps la trajectoire d'un palet demande une adaptation de sa motricité pour répondre à la contrainte suivante : entrer en contact avec le palet, dont la trajectoire évolue en fonction de la qualité de la glace, à l'aide d'une crosse dont la pause des mains (une en haut et une en bas) suppose une modification de la coordination des membres supérieurs. A la lumière du chapitre précédent, les contraintes liées à l'organisme (e.g., latéralité, dissociation segmentaire) étant variables entre les individus, nous rejetons la possibilité de produire une coordination identique et reproductible par tous. À ce titre, nous considérons que le caractère unique de chaque couplage individu-environnement fait émerger des comportements variables entre les individus. Cette variabilité inter-individuelle se retrouve, par exemple, dans le fait que les défenseurs, ayant développé une coordination plus efficiente que les attaquants pour patiner en arrière (Montgomery et al., 2004), puissent manifester un comportement plus stable lorsqu'ils patinent en arrière en conduisant un palet, au regard de leur plus importante expérience dans la réalisation de cette tâche. Si nous portons notre attention sur la trajectoire du palet, nous supportons l'idée que cette trajectoire se trouve sous l'effet de contraintes en perpétuel changement (e.g., position de l'adversaire, fatigue du porteur du palet, qualité de la glace). Dès lors, le joueur, pour assurer le même niveau de performance, doit constamment faire évoluer son comportement en réponse à la dynamique des contraintes (ici, la trajectoire variable du palet). Dans ce cas, sur la base d'un pattern moteur à priori stable (e.g., reproduire le cycle de patinage avant), le joueur va devoir mobiliser différemment ses degrés de liberté, pour maintenir un niveau de performance lorsque les contraintes évoluent (e.g., modification de l'amplitude du coude, augmentation de la durée de la glisse). Cette variabilité intra-individuelle du comportement de l'individu à la dynamique des contraintes de tâche révèle la part flexible du comportement. Sur cette base nous sommes convaincus du rôle fonctionnel de la variabilité résultant de la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques.

En référence aux approches complexes de la neuro-anatomie, la dégénérescence se définit comme : « the ability of elements that are structurally different to perform the same function or yield the same output » (Edelman & Gally, 2001, p. 13763) ou “where structurally different components perform a similar, but not necessarily identical, function with respect to context” (Mason, 2010, p. 277). La dégénérescence d’un système se manifeste dans la capacité des éléments d’un système structuré différemment à assurer une fonction similaire ou à produire un comportement identique (Edelman & Gally, 2001). La dégénérescence permet une évolution en conformité avec une diversité génétique, assurant une adaptation fonctionnelle aux contraintes environnementales. La relation de dégénérescence entre les composants du système et ses réponses impliquent qu’il y a différentes façons d’atteindre l’expertise (Phillips, Davids, Renshaw, & Portus, 2010). Cela implique de sortir du carcan du « geste modèle », pour réaliser une action adaptée propre à chaque individu (notion abordée dans le prochain chapitre). La dégénérescence est une propriété fonctionnelle du système neurobiologique puisqu’elle rend possible la flexibilité, la variabilité du comportement pour favoriser l’adaptation, c’est-à-dire l’amélioration des réponses aux perturbations internes ou externes (Davids et al., 2015). La dégénérescence à l’échelle du système moteur humain explique comment la même fonction peut être assurée par différentes architectures biomécaniques, impliquant différentes articulations, synergies musculaires, coordinations d’articulations pour réaliser le mouvement (Mason, 2010; Seifert et al., 2013). Par exemple, pour se déplacer, le hockeyeur est en mesure de modifier l’angle d’extension du genou (en impliquant à différentes intensités les contractions musculaires des quadriceps et ischio-jambiers) pour limiter ou améliorer la poussée et, donc gagner ou réduire sa vitesse de déplacement. La dégénérescence assure la robustesse et la résistance du système neurobiologique aux perturbations, en somme son adaptabilité (Mason, Domínguez, Winter, & Grignolio, 2015). La dégénérescence du comportement humain offre une possibilité de compromis entre la spécificité de la performance et la diversité du comportement, quand les contraintes de tâche évoluent, influençant l’émergence de nouveaux procédés de décisions et d’actions (Davids & Araújo, 2010). Avoir à disposition différentes structures, pour assurer les mêmes fonctions permet au système vivant de maintenir sa stabilité au fur et à mesure du temps mais aussi de changer, s’adapter et évoluer (Mason, Domínguez, Winter, & Grignolio, 2015).

Mason (2010) propose quatre propriétés du système vivant qui expliquent en partie comment l’adaptation fonctionnelle des experts peut être envisagée : i) la redondance :

opportunité d'assurer la même fonction par l'intermédiaire de copie de la structure originale, aucune autre copie n'assume de rôle différent (« *redundancy refers to multiple copies of identical structures that perform the same function* » (Mason, Domínguez, Winter, & Grignolio, 2015, p. 2)), ii) la division : une structure initiale se subdivise en plus petites unités qui assurent la même fonction et peuvent également être redéployées, iii) la coordination de plusieurs structures (*synergistic structures*) permet d'assurer une fonction grâce à un phénomène de combinaison, iv) deux ou plusieurs structures indépendantes convergent pour assurer la même fonction (pour générer du mouvement, plusieurs muscles différents peuvent s'organiser pour générer le même résultat final). Ces quatre possibilités soulignent le potentiel du système moteur humain pour s'adapter, en cherchant une production de nombreuses réponses motrices, pour répondre aux contraintes liées à la tâche, l'organisme et l'environnement. La figure ci-dessous synthétise les propriétés des systèmes neurobiologiques pouvant éclairer la compréhension du comportement humain à savoir : la redondance exprime le fait que plusieurs structures identiques (crosses) assurent la même tâche (e.g., déplacer un palet), la dégénérescence se réfère au fait que différentes structures (crosse, gants, patins) peuvent réaliser la même tâche (déplacer un palet) et la pluripotentiaité (Mason et al., 2015) ou la « multifunctionality » (Kelso, 2012) fait référence à la possibilité d'employer la même structure (une crosse) pour réaliser différentes tâches, allant jusqu'à détourner l'utilisation de des éléments de leur fonction première (tirer, retenir un adversaire ou s'équilibrer en se maintenant debout, se gratter la tête).

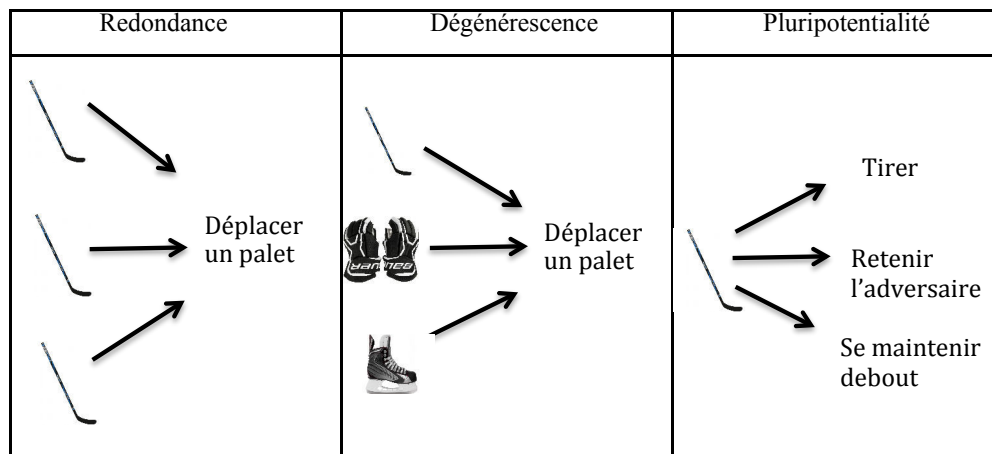


Figure 9. Illustration des concepts de dégénérescence, redondance et pluripotentiaité ((Inspiration du travail de Mason, Domínguez, Winter, & Grignolio, 2015).

Pour exploiter cette propriété du système perceptivo-moteur, les athlètes doivent constamment réajuster les relations entre les membres, les articulations, les surfaces de l'environnement, les objets ou les événements présents lors de la réalisation de la performance (Davids et al., 2015). En hockey sur glace, l'utilité de la dégénérescence s'illustre à travers divers exemples : à l'échelle du joueur, la récupération du palet peut se faire en interceptant une passe, en mettant l'attaquant en échec, en utilisant sa main ou son pied pour dévier une trajectoire de passe sur un partenaire ; à l'échelle du comportement de l'équipe, en mettant en place des coordinations multiples de joueurs en attaque ou en défense, sous l'influence de l'aspect tactique (points faibles de l'adversaire, points forts de l'équipe) ou d'une modification dans l'environnement, comme un changement de densité de joueur nécessitant une nouvelle organisation pour occuper le terrain en Powerplay ou, à l'inverse en infériorité numérique. Ces comportements variés aspireront aux mêmes objectifs : la recherche de la marque ou de la protection de sa cible. En somme, la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques explique la capacité d'un individu à modifier la structure de son comportement, sans compromettre la fonction qu'il souhaitait assurer ou, la partie importante de la compétence mobilisée pour produire une performance (pour illustrer ces propos en prenant l'exemple de l'apprentissage de la brasse voir Komar, Chow, Chollet, & Seifert (2014)). La dégénérescence souligne la solidité et l'adaptabilité du système moteur humain et contribue à la compréhension de la nécessité de faire varier les comportements perceptivo-moteurs pour garantir une adaptation individuelle, spécifique en adéquation avec les objectifs de la tâche.

Résumé du chapitre :

Le cadre théorique Ecological Dynamics s'inscrit dans les sciences de la complexité, et plus particulièrement concernant l'étude du comportement humain de la théorie des systèmes dynamiques, de l'approche complexe de la neuro-anatomie et de la psychologie écologique.

Ce cadre théorique rassemble des travaux scientifiques menés dans une variété de disciplines (physique, psychologie, biologie, etc.) qui permettent de comprendre la complexité du système humain (en tant que système de système), et notamment la production et le contrôle du mouvement.

Selon ce cadre théorique, la production et le contrôle du mouvement sont étudiés au niveau macroscopique, en faisant appel à des paramètres superficiels (e.g., phase du cycle de patinage en hockey sur glace) et profonds (e.g., coordination motrice, symétrie de mouvement), traduisant le couplage individu-environnement ; ce couplage étant considéré comme la plus petite unité d'analyse du comportement.

L'émergence du comportement (paramètres profonds et superficiels) résulte de l'interaction avec un ensemble de contraintes (de tâche, de l'environnement et individuelles).

La manipulation des contraintes permet d'étudier la persistance et le changement de ce comportement en relation avec la performance réalisée dans la tâche afin de mieux comprendre l'aspect fonctionnel de la variabilité de mouvement, tant au niveau intra- et inter-individuel, et plus largement de saisir comment la propriété de dégénérescence est mise en œuvre dans le système perceptivo-moteur.

Le cadre théorique Ecological Dynamics permet de comprendre l'expertise, et plus particulièrement l'adaptation du système perceptivo-moteur dans les habiletés multi-articulaires complexes, comme le patinage avant en hockey sur glace à travers la mise place de protocoles expérimentaux, dont la manipulation des contraintes se veut représentative de l'activité.

Chapitre 2. Approche Ecological Dynamics et expertise

'A fluid configuration of knowledge, information and situated experience, all of which are apt to change in response to questions arising in highly specific and localized contexts'

Nowotny, 2000

Selon le cadre théorique Ecological Dynamics du contrôle moteur, présenté dans le chapitre précédent, il semble difficile d'envisager l'expertise sportive à travers le prisme d'un modèle expert à imiter puisqu'un nombre important et varié de contraintes influence le développement de l'expertise. C'est pourquoi, concevoir la réponse experte comme étant une réponse unique faisant appel à des principes biomécaniques, physiologiques et plus largement à un modèle expert préétabli, ne fait pas consensus (Bergeron et al., 2015; Seifert, Button, & Davids, 2013).

Le cadre théorique Ecological Dynamics réfute cette approche et suggère que l'expertise se manifeste au sein de la relation spécifique entre l'athlète et les propriétés spécifiques de l'environnement de performance (Davids et al., 2015; Seifert et al., 2013). En suivant ce raisonnement, le comportement expert est en constante régulation pour exploiter au mieux les interactions entre les contraintes et réaliser la performance la plus adaptée aux objectifs spécifiques à atteindre (Seifert et al., 2013). Les propriétés pertinentes de l'environnement s'ajoutent aux caractéristiques physiques, psychologiques, émotionnelles et sociales, qui influencent perpétuellement la relation expert-environnement (Davids et al., 2015; Phillips et al., 2010; Seifert et al., 2013). L'expertise apparaît comme le résultat d'une pratique et d'une expérience spécifique à la pratique du sport (Phillips et al., 2010). De facto, le comportement expert est envisagé comme individuel, propre à chaque individu.

L'expertise sportive, selon l'approche Ecological Dynamics, s'exprime à travers l'assemblage d'éléments du système faisant émerger une coordination fonctionnelle en réponse à l'ensemble des contraintes interagissant avec l'athlète (Davids et al., 2008). Dès lors, il faut envisager la réponse motrice d'un athlète comme la résultante de l'interaction simultanée des caractéristiques physiques de l'environnement de performance, de la morphologie de l'individu, de la variété des sources d'informations, de la spécificité des contraintes de tâche dans le but de réussir la tâche (Warren, 2006). En raison de ces perpétuelles interactions, l'explication du comportement expert sur la base uniquement de caractéristiques personnelles (prédispositions génétiques, traits de caractère) ou de contraintes de tâches (telles que la quantité de pratique délibérée) semble insuffisante (Baker & Davids, 2006). Au sein de l'approche Ecological Dynamics, l'expertise n'est pas synonyme de modèle

idéal mais plutôt d'une solution individuelle en réponse à un ensemble de contraintes spécifiques influençant son comportement (Seifert et al., 2013). Être expert, ce n'est pas uniquement réaliser des coordinations complexes, mais aussi le fait qu'elles soient adaptées à une situation, c'est-à-dire qu'elles répondent à des contraintes (de l'environnement, de l'organisme ou de la tâche) en interaction, qui évoluent dans le temps. Cette notion d'adaptabilité a déjà été abordée par (Bernstein, 1996) quand il parle de l'ingéniosité (*i.e.*, adresse et initiative) comme propriété décisive de la « dextérité ». La dextérité selon Bernstein (1967, p. 398) est : “the capacity to solve a motor problem – correctly, quickly, rationally, and resourcefully. Dexterity is finding a motor solution for any situation and in any condition”. Au-delà de l'automatisation, de la standardisation et de la stabilisation du mouvement, Biryukova & Bril (2002) soulignent qu'un haut niveau d'expertise motrice est caractérisé par une grande dextérité ; cette dernière étant la capacité à résoudre un problème rapidement et dans toutes les situations. Autrement dit, la dextérité renverrait à la capacité d'un expert à réaliser le but de la tâche correctement (avec efficacité), rapidement, raisonnablement (avec efficacité) et avec ingéniosité (Bernstein, 1996) : « *la dextérité ne relève pas des mouvements en eux-mêmes, mais de leur capacité d'adaptation aux conditions extérieures* » (Biryukova & Bril, 2002, p. 65). Dans ce cadre, il n'existerait pas de coordination « experte », mais une expertise dans le couplage « sujet-contraintes », c'est-à-dire une expertise à adapter son comportement au niveau de contraintes demandé ou perçu, et à l'actualiser au fur et à mesure que ces contraintes changent. Ainsi, la coordination est « contraintes-dépendant » (*i.e.*, tâche-dépendant, organisme-dépendant, environnement-dépendant) ; l'expertise étant la capacité à exploiter ce couplage « sujet-contraintes » de façon circulaire (Turvey, 2007). En hockey sur glace, la dextérité du joueur expert passe par sa capacité à adopter en fonction de la situation, des changements de directions, des pivots, des modifications de sa vitesse de déplacement, sur la glace, en jouant sur la durée ou l'intensité de la poussée pour remporter un duel face à un adversaire en mouvement et dont les déplacements sont incertains. Cette approche contribue à la remise en question de la croyance en un pattern idéal obtenu à la suite de répétitions de mouvements conduisant à un « mouvement optimal commun » (Brisson & Alain, 1996; Schöllhorn et al., 2006). Cependant, cette idée que la performance experte est atteinte après d'innombrables répétitions identiques et qu'elle se traduit par un mouvement idéalisé domine dans le monde sportif (Seifert et al., 2013).

L'expertise peut être définie comme la capacité à adapter des mouvements à l'évolution (i.e., la dynamique) des contraintes présentes dans l'environnement de performance, à la spécificité des intentions et aux prises de décision à réaliser pour réussir dans la tâche sportive (Davids et al., 2015). En d'autres termes, il s'agit de la capacité d'un individu à adapter son comportement pour qu'il satisfasse les contraintes clés de l'environnement de pratique dans le but de réussir la performance espérée (Seifert & Davids, 2012). Il faut comprendre l'adaptation comme « a process of change to enable adjustment to a condition or an environment » (Colman, 2014). Dans le dictionnaire médical de l'académie de Médecine (2016), le terme adaptation est défini comme suit : « ensemble des phénomènes qui permettent la mise en accord et l'interaction harmonieuse d'un organisme et, plus généralement, d'un individu avec de nouvelles conditions d'environnement ». Un expert est considéré comme un système complexe doté de nombreux degrés de liberté et observable à de nombreuses échelles d'analyse. L'adaptation de l'expert résulte d'un compromis entre stabilité et flexibilité du comportement exprimé au sein du couplage individu-environnement.

En se référant à la *Constraints-Led Approach* (i.e., l'approche par les contraintes), l'acquisition de compétences expertes passe par la recherche de solutions de coordinations fonctionnelles, qui émergent de l'individu, qui sont orientées en fonction de la tâche et des contraintes de l'environnement (Newell, 1986). Cet aspect fonctionnel d'une coordination peut se comprendre par opposition à un aspect structurel (i.e., correspond à un plan de ce qui doit être fait pour réussir l'action). La caractéristique fonctionnelle de la coordination signifie que les propriétés de cette dernière ne peuvent exister que dans le contexte de réalisation de l'action. Être expert ne revient pas à produire un mouvement mais à adapter ce mouvement à l'évolution des différentes contraintes présentes dans le contexte de pratique. In fine, produire une performance experte, c'est développer une relation de plus en plus fonctionnelle entre l'athlète et son environnement, c'est le résultat d'une pratique de la tâche sportive (Davids et al., 2008). Cette vision de l'expertise revêt une dimension plus fonctionnelle que celle préconisant une répétition de mouvements particuliers (e.g., Ericsson & Lehmann, 1996). Elle met en avant le besoin pour chaque individu d'apprendre à s'adapter, à répondre à l'unique organisation des contraintes interagissant lors de l'action sportive qui évolue au fur et à mesure du développement et du niveau de pratique (Davids et al., 2015). Il apparaît comme très important d'individualiser l'entraînement : deux athlètes n'apprendront pas exactement de la même façon, ce qui implique de connaître son athlète (goûts, mode de vie, ses objectifs, etc.), permettre à l'athlète de comprendre ce qu'il fait et le confronter à des environnements

incertains, dans lesquels il devra expérimenter ses propres solutions (meilleure rétention et transfert des apprentissages) (Abraham & Collins, 2011).

D'après l'approche Ecological Dynamics, le développement de l'expertise requiert une constante réorganisation et une adaptation des actions, perceptions, intentions afin de réussir à atteindre les objectifs spécifiques de tâches (Davids et al., 2015). En hockey sur glace, ces objectifs pourraient, par exemple, inclure : chercher à marquer, protéger son but en utilisant son corps comme obstacle, s'organiser pour élargir l'espace entre les défenseurs quand mon équipe a le palet, aider le porteur de palet en se démarquant, se déplacer le plus rapidement possible vers l'avant pour accéder à la cible, etc. Dans cette configuration, il existe différents comportements possibles pour remplir ces objectifs de tâche. Par exemple, si le joueur cherche à protéger son but il peut mettre en échec son adversaire (i.e., accélérer en augmentant la fréquence de patinage pour percuter son adversaire) ou se mettre en opposition entre l'attaquant et le but (utiliser la phase de glisse en patinant en arrière pour maintenir l'alignement). Pour la même fonction (protéger le but), le joueur expert mobilise selon les contextes (proximité avec la cible ou l'adversaire, sa vitesse de déplacement et celle de son adversaire) différents comportements. Cette capacité à varier les comportements illustre la propriété de dégénérescence de systèmes neurobiologiques.

À travers ce chapitre, nous chercherons à comprendre pourquoi, au sein d'un même environnement de pratique, un expert ne perçoit pas les mêmes affordances qu'un autre individu. Il s'agira ensuite de présenter, en quoi, le comportement expert résulte d'une incroyable capacité à coordonner les degrés de liberté du corps humain. Puis, nous défendrons l'idée que le comportement expert ne peut être copié. En effet, il résulte du développement d'un répertoire moteur unique qui se forge en relation avec la dynamique des contraintes dans le contexte de pratique (Phillips et al., 2010). Il s'enrichit par l'opportunité de réussir la tâche en utilisant différents comportements (grâce à la propriété de dégénérescence) au fur et à mesure de l'expérience dans l'activité. Enfin, nous présenterons la variabilité du comportement expert comme fonctionnelle, essentielle à l'adaptation en rapport avec la dynamique des contraintes de tâches, notamment.

Le monde expert : une perception singulière

Il s'agit de comprendre comment fonctionne la relation entre les affordances et l'adaptation du sportif aux variables perceptives en vue d'atteindre un objectif. Quand l'individu est en mouvement, des opportunités d'actions apparaissent, persistent, disparaissent

autour de lui (Araújo, 2007). Un brusque changement d'action peut modifier complètement ces opportunités pour les actions futures. L'athlète ressort comme capable de détecter et exploiter les affordances permettant de s'adapter aux invariants pertinents présents à l'intérieur du paysage des affordances (i.e., l'ensemble des affordances existantes dans la situation sans impliquer une sensibilité de l'individu à chacune d'entre elles) d'une situation (Araújo, 2007). Les experts peuvent réajuster le couplage information et mouvement afin d'affiner l'utilisation des informations clés dans un contexte spécifique. L'expertise passe par l'attribution d'une valeur fonctionnelle et contextualisée à l'interaction avec un environnement spécifique (Araújo, 2007). Les experts réajustent continuellement le couplage qu'ils forment avec l'environnement pour actualiser le comportement qu'ils manifestent en lien avec les évolutions d'intentions, de perceptions et d'actions (Seifert & Davids, 2012). Différents comportements peuvent émerger chez plusieurs individus ou le même individu en fonction des affordances perçues d'un objet, d'un événement, d'une surface. L'expertise se retrouve dans la capacité d'un individu à être sensible aux affordances présentes dans l'environnement afin de répondre aux exigences de la tâche. Les experts sont plus sensibles aux affordances permettant l'action et se focalisent moins sur des informations structurelles spécifiant l'exploration (et donc moins efficaces). Plus la pratique augmente, plus l'individu est sensible aux affordances permettant l'action. En effet, dans chaque situation, les régularités des propriétés des structures des énergies ambiantes (e.g., disposition des surfaces, mouvement de l'individu, etc.) sont progressivement mieux différenciées par l'observateur, ce qui améliore sa capacité à percevoir les affordances (Araujo & Davids, 2009; Gibson, 1979). Nous pouvons imaginer qu'en début de pratique du hockey un joueur ne soit pas sensible aux directions potentielles que son adversaire est en mesure de prendre lorsqu'il conduit un palet. Au fur et à mesure de la pratique, le défenseur deviendra plus sensible à l'orientation de la lame du patin assurant la glisse lorsque l'autre propulse, au bras qui tient la crosse conduisant le palet (cela n'induit pas la même aisance dans la manipulation du palet du côté droit ou gauche), etc. La modification de cette sensibilité aux affordances favorisera l'adoption d'une orientation dans une direction pertinente pour remporter son duel générant moins d'incertitudes.

Sensibilité au paysage des affordances.

Le paysage des affordances correspond à l'ensemble des affordances présentes dans la niche écologique, soit l'intégralité des possibilités d'actions dans nos pratiques socio-

culturelles (Bruineberg & Rietveld, 2014). Au fur et à mesure de l'acquisition de compétences expertes, l'individu devient de plus en plus sensible aux affordances qui permettent de réussir la tâche. La capacité à percevoir les affordances est basée sur l'habileté de l'individu à détecter les informations dans un environnement en relation avec ses possibilités d'actions. Le même objet, événement ou surface, peut successivement inviter le même individu à produire des comportements différents ou peut inviter différents individus à agir différemment (Withagen & Chemero, 2011). Par exemple, dans l'étude menée par Seifert et al. (2014), il a été démontré qu'en fonction du niveau d'expertise, les grimpeurs n'entretenaient pas la même relation avec la surface glacée : les débutants pour réaliser l'ascension se focalisaient sur des caractéristiques visuelles (taille et profondeur des points d'ancrage sur la glace), tandis que les mêmes points d'ancrage étaient exploités par les experts à l'aide d'informations spécifiques acoustiques (e.g., bruit lors de la frappe de la glace), haptiques (e.g., perception de la dureté de la glace lors de la pose du piolet) et visuelles. Ainsi, en fonction des individus, l'interaction avec l'environnement varie, le paysage des affordances se modifie au fur et à mesure des apprentissages et les possibilités d'actions pour chaque individu se transforment.

La notion de 'perceptual attunement' (i.e., la sensibilité perceptive) caractérise la capacité de l'individu à distinguer quand et quelles sources d'informations il faut exploiter pour réussir la tâche (i.e., il s'agit à la fois d'être sensible à son environnement et d'agir rapidement dessus) : 'changes over a period of practice in the informational variables upon which actors rely' (Fajen et al., 2009, p. 96). Par exemple, les joueurs de cricket développent une sensibilité à un plus grand nombre de sources informationnelles en fonction de leur niveau de compétence (Pinder et al., 2011). En effet, cette étude démontre que les débutants se focalisent sur la trajectoire de la balle en vol, tandis que les experts utilisent des informations sur l'orientation du poignet du lanceur et la cinématique de son bras lanceur. Plus l'expertise est importante, plus l'individu est sensible à une multitude de sources spatiales et temporelles d'informations, et plus il a une perception fine des conséquences de ses actions (Araujo et al., 2006). Plus généralement, les débutants privilégient les sources d'informations visuelles lorsqu'un expert privilégie un panel plus important de sources d'informations. En s'inspirant de l'étude de Seifert, Wattebled, et al. (2014), qui démontre le fait qu'un expert est sensible à plusieurs sources d'informations (sonores, visuelles, tactiles) pour évaluer la qualité de la glace lorsque le piolet entre en contact avec elle ; nous pouvons supposer qu'un hockeyeur expérimenté évalue cette qualité en la regardant mais aussi en étant sensible aux vibrations au niveau du patin et au bruit émis lors de la friction entre la lame et la

glace.

En fonction de ses capacités, un individu percevra les affordances d'un objet, d'un événement, d'un lieu comme des possibilités d'action (ou d'inaction) (Gibson, 1979). Ces affordances sont des contraintes impliquées dans la définition du but de la tâche (Vicente & Wang, 1998). Les contraintes perceptives (i.e., les paramètres de contrôle perceptifs du mouvement), avec la plus haute validité écologique, sont perçues directement comme des affordances. Ces variables font référence à des propriétés objectives de l'environnement qui interagissent avec les capacités de l'individu. La perception directe s'opère quand un organisme est activement 'attuned' : c'est à dire sensible à des propriétés de l'environnement qui spécifient l'action à réaliser et les moyens pour la réaliser.

Les humains sont flexibles (i.e., adoptent des comportements variables) par opposition à stables (i.e., persistants au fur et à mesure du temps et des perturbations) (Warren, 2006) concernant leurs capacités à s'adapter aux changements de contraintes de tâche et à la validité des informations. Ces degrés de flexibilité sont rendus possible par la sensibilité perceptive de l'individu aux différentes variables informationnelles lorsque les conditions changent (Fajen et al., 2009). Cette notion implique que des différences entre les experts et novices reflètent des différences sur la prise en compte d'informations fiables dans l'environnement. Il est suggéré par Fajen et al. (2009), que les novices se fient à des variables informationnelles non reliées aux propriétés appropriées de la tâche et qu'avec la pratique ils convergent vers des variables spécifiant des actions efficaces. Il s'agit de repérer les facteurs invariants (d'origine multisensorielle) dans la tâche, pour apprendre à agir avec flexibilité lorsque des paramètres dans la situation changent (e.g., vitesse de déplacement d'une crosse avant la frappe du palet, variation de la taille de l'objet dans le flux optique). Un individu plus sensible aux sources d'informations spécifiant l'objectif à atteindre sera plus sensible aux possibilités d'actions et aux solutions potentielles (Davids & Araújo, 2010).

Calibration du système perceptif

Au fur et à mesure de l'apprentissage, des calibrations (anglicisme signifiant qu'un étalonnage des informations s'opère) constantes sont nécessaires pour établir et réajuster la relation entre les propriétés importantes perçues dans l'environnement de performance et les actions qui ont été réalisées. Les calibrations et recalibrations se font pendant une longue période de pratique et génèrent un rapport unique, intrinsèque entre l'individu (avec ses caractéristiques morphologiques, sa quantité d'entraînement, ses possibilités d'actions) et

l'environnement d'évolution (Davids et al., 2015). Par exemple, sauter par dessus un adversaire sur la glace convoque à la fois des affordances liées à notre échelle corporelle (notre taille et longueur de nos bras) mais aussi notre capacité à générer des forces verticales pour franchir l'obstacle et retomber sur la glace (perception de notre détente, stabilité sur les patins). Dans une étude concernant le comportement de boxeurs, il a été démontré que les experts ont réalisés un véritable calibrage particulier du corps, de la distance entre le boxeur et le punching ball, qui est responsable de l'émergence d'actions telles que l'uppercut, le crochet ou le direct (Hristovski et al., 2006). Un individu dit « calibrated performer » met en lien directement deux éléments (Fajen et al., 2009) :

i) la calibration de son corps : « body-scaled affordances » ou relations entre les dimensions mesurables du corps d'un individu en lien avec les propriétés réciproques de l'environnement déterminées par la possibilité d'agir (e.g., la longueur de nos jambes relative à la hauteur d'une haie). Elles sont mesurées avec une échelle intrinsèque à l'individu et ne font pas appel à un système de mesure externe (pouces ou mètres). L'individu va alors percevoir l'environnement en « body-scaled units » afin de relier directement l'environnement à ses possibilités d'actions (Lee, 1980). Par exemple, entre deux haies, les athlètes sont capables de percevoir combien de pas ils vont effectuer sans en connaître la distance en mètres.

ii) la calibration de son action « action-scaled affordances » : comment l'individu peut se comporter en relation avec cet environnement déterminant, peut-il agir ? (e.g., à quelle vitesse cette personne peut arriver à ce lieu, quelle force peut elle produire pour soulever cet objet). La perception de ces affordances est importante pour le succès de la performance. En général, les bons athlètes savent ce qu'ils peuvent ou ne peuvent pas faire, et tentent rarement des choses au-dessus de leurs limites. Cette perception est importante dans le guidage de l'action. Les limites des capacités de l'individu à courir, tourner, sauter, tirer, etc. imposent des contraintes fortes sur le succès de la performance. Les sportifs doivent être sensibles à ces contraintes.

La calibration des actions et du corps n'est pas fixe, et varie sur de courtes périodes (fatigue, blessure,) ou longues périodes (développement morphologique et entraînement). Dans le domaine sportif, l'ajout de matériel (gants, patins à glace, plastron, crosse, etc.) altère l'échelonnage du corps. Quand les dimensions du corps et les capacités d'action changent, de nouvelles possibilités apparaissent (e.g., glisser pour avancer) et d'autres deviennent impossibles (sprinter avec un équipement de gardien de but). L'apprentissage passe par la

possibilité de recalibrer les systèmes perceptivo-moteurs. Sans cette capacité à ajuster la calibration, nous ne pourrions pas choisir quel vélo emprunter pour se balader (figure n°10).



Figure 10. En fonction de notre calibration corporelle et de l'évaluation de nos capacités pour accomplir un déplacement en vélo (équilibre sur 3 roues, ou 2 avec plus ou moins de déséquilibre), les objets ne nous inviteront pas à agir de la même façon que nous soyons un enfant de 3 ans, un adolescent équilibriste ou un adulte de 60 ans.

La calibration permet à chaque individu de percevoir le monde en termes d'unité intrinsèque malgré l'évolution des dimensions du corps et des capacités d'action. En boxe, par exemple, la calibration de l'action est propre à chaque individu puisqu'elle se construit lors d'interactions au sein de la dyade qu'il forme avec l'adversaire, l'environnement (Hristovski et al., 2006). L'individu évalue intrinsèquement les mesures intéressantes pour déterminer si le paramètre d'ordre (e.g. uppercut ou direct) doit changer en relation avec l'évolution du paramètre de contrôle (e.g., distance séparant les deux boxeurs). L'évaluation constante de cette distance constituera sa calibration dynamique de l'action.

En somme, la calibration consiste en un constant réajustement des affordances sur la base de références liées à la projection des dimensions corporelles individuelles dans l'environnement, ainsi que de la perception de ses possibilités d'actions dans ce même environnement. Un comportement expert se manifeste à travers une excellente capacité à estimer correctement ses possibilités d'agir et de calibrer son environnement en unité corporelle pour s'adapter à la dynamique des contraintes. C'est la raison pour laquelle, un expert doit être en mesure d'effectuer continuellement de nouvelles calibrations et de nouvelles sensibilisations à l'environnement, pour garantir un contrôle réussi des actions qui changent avec les capacités d'actions, l'entraînement, l'expérience, etc. (Fajen et al., 2009).

Réussir à générer des patterns moteurs experts en coordonnant des degrés de liberté

Geler (freezing) et libérer (freeing) des degrés de liberté utiles à la tâche.

Bernstein (1967) a pointé le fait que les degrés de liberté du système moteur se coordonnaient temporairement en relation avec l'environnement de performance et la tâche à accomplir. La notion de gel des degrés de liberté (D.D.L.) des novices et la libération des D.D.L. des experts est bien documentée (e.g., en volley-ball (Temprado, Della-Grasta, Farrell, & Laurent, 1997), sur simulateur de ski (Vereijken, Van Emmerik, Whiting, & Newell, 1992)). Geler les D.D.L. apparaît comme une solution trouvée par les débutants pour éviter les problèmes rencontrés lors de la pratique. À l'inverse, les experts ont des intentions et des actions différentes, expliquant une réorganisation différente des patterns de coordination en relâchant les D.D.L. Les athlètes experts disposent d'un répertoire conséquent de coordinations préférentielles émergeant en fonction des tâches spécifiques à effectuer.

En ce qui concerne la coordination débutante, Bernstein (1967) décrit le phénomène de « freezing ». Il correspond à un « gel » des degrés de liberté. Les membres vont se mouvoir en phase, nous assistons à des mouvements en monobloc, rigides qui caractérisent le débutant. Temprado & Laurent (1997) s'intéressent aux coordinations complexes dans le service en volley-ball. Six joueurs experts (de niveau N1B) sont comparés à huit débutants (moins de 12 heures de pratique). Ils devaient réaliser un service type tennis en visant une cible. Il en ressort que les débutants et experts se différencient au niveau de la coordination du membre supérieur (épaule, coude, poignet). En effet, ils observent un « couplage en phase élevé entre les articulations ». Le couplage entre la main et le coude est identique à celui entre le coude et l'épaule. C'est en accord avec le concept de « gel » énoncé par Bernstein. En effet, ces résultats suggèrent que les degrés de liberté des trois articulations sont fixes et gérés comme une unité.

A contrario, Bernstein (1967) qualifie la coordination experte de « freeing ». Les experts ont une capacité à relâcher les degrés de liberté non utiles, nous parlons de dissociation articulaire. En reprenant l'exemple du volley-ball, les experts adoptent une coordination en antiphase lors du service (Temprado et al., 1997). Ils constatent une différence significative entre les apparitions de pics d'amplitude de l'épaule et du coude, de l'épaule et de la main, ainsi que du coude et de la main. Ce qui démontre bien, qu'il n'y a pas une coordination en monobloc des différentes articulations mais une succession de coordinations articulaires. Les experts sont donc capables de contrôler l'amplitude de chaque articulation pour réaliser des services. En hockey, par exemple, la coordination d'un débutant

se manifeste à travers un comportement en monobloc, c'est-à-dire que l'ensemble des D.D.L. sont gelés. Le débutant avance en adoptant une posture droite, les genoux en extension complète et il réalise de légers balanciers des membres l'un après l'autre pour marcher sur la glace. En revanche, un expert en utilisant la flexion et l'extension du genou est capable d'alterner entre phase de poussée avec une jambe et phase de glisse avec l'autre. Pour le moment, aucune étude ne fait référence à l'organisation de cette coordination experte sur laquelle nous porterons une attention particulière dans le chapitre 4.

Que ce soit l'expert ou le débutant, le mode de coordination utilisé aura un objectif : l'efficacité. L'individu tend vers un état stable, économique ou encore rassurant. Cependant, l'expert a accès à un panel plus grand de modes de coordinations et c'est cela qui marquera la différence expert/débutant. En effet, au départ il est plus simple de réaliser un mouvement puis un second, etc. Si nous cherchons à combiner deux mouvements, à modifier la temporalité de l'action à travers des alternances irrégulières d'accélération-décélération, alors nous pouvons rapidement nous rendre compte que la tâche devient difficile à exécuter. La différence expert/débutant est alors marquée : le débutant s'organise autour de coordination simple en phase ou en antiphase, tandis que l'expert va s'organiser autour d'une coordination complexe, qualifiée d'« experte ».

Newell & Vaillancourt (2001) décrivent l'expertise comme la capacité à explorer au maximum les possibilités offertes par le système moteur (i.e., manipuler les degrés de liberté). Les experts peuvent « geler » ou « libérer » les degrés de liberté dans la chaîne du mouvement en fonction des contraintes. A contrario, Newell & Vaillancourt (2001) défendent l'idée que les individus les moins compétents fixent les degrés de liberté et montrent une variabilité non fonctionnelle, ne permettant qu'une faible adaptation aux contraintes. Ces propos peuvent être illustrés par une étude menée en natation, qui appréhende l'effet de l'expertise sur la coordination du brasseur débutant et expert (Seifert, Leblanc, Chollet, & Delignières, 2010). Il a été montré que la coordination des nageurs experts est influencée par la vitesse. En effet, lors d'une nage lente, 40% du cycle est consacré à une coordination en phase, alors que lors d'une nage à vitesse élevée, 33% du cycle est consacré à ce type de coordination. De plus, la phase de glisse, qui correspondait à 40% du cycle lors d'une nage lente, est également réduite à 20% sous l'effet de la vitesse. Cette stratégie de modulation de la coordination en fonction de la tâche à réaliser, permet l'augmentation de la vitesse de nage. À l'inverse, le nageur débutant a une plus petite capacité à varier son couplage articulaire à l'intérieur d'un cycle de brasse à faible vitesse de nage. Celui-ci nage en phase : il alterne flexion simultanée des bras

et des jambes avec l'extension simultanée des bras et jambes. Le nageur expert va, quant à lui, utiliser différents modes de coordination au cours du cycle. La réponse de l'expert sera plus complexe : il va fléchir les bras pendant que les jambes restent en extension, faire une extension des jambes quand les bras sont en flexion et glisser pendant 20 à 40% du cycle en position hydrodynamique (bras et jambes sont en extension maximale). La différence observée entre les groupes est expliquée par une différence de gestion des contraintes. En effet, les débutants sont orientés sur les contraintes liées à l'environnement (nager nécessite la capacité à s'équilibrer en prenant en compte les effets de la poussée d'Archimède), alors que les nageurs experts sont orientés sur des contraintes liées à la tâche (nager le plus rapidement, en se fatiguant le moins possible, et en minimisant la résistance de l'eau). D'après Bernstein, le souci d'efficacité, c'est-à-dire la volonté de produire un effort le plus efficace en étant le moins coûteux, conduit à l'affinement de la coordination pour atteindre la coordination experte. L'expertise selon Delignières (2004) est la « capacité à opter pour la configuration motrice la plus efficiente, en fonction de l'évolution des contraintes de la tâche ».

Dans le cadre de l'étude de l'expertise en hockey sur glace, Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh (2008) démontrent que l'expert adopte une coordination différente de celle d'un individu moins compétent lors de la réalisation d'une tâche similaire (patiner sur un tapis d'entraînement). Cette étude met en avant le fait que les joueurs de haut niveau atteignent des vitesses de déplacement plus importantes que les joueurs de niveau inférieur, alors que leurs fréquences de foulées étaient identiques. Upjohn et al. (2008) notent que la différence de vitesse de patinage peut être expliquée par : i) des foulées de longueurs différentes (les patineurs rapides réalisent des foulées de 5,2 m contre 4,4 m pour les plus lents) et ii) des différences cinématiques observées durant la phase « recovery ». En effet, une plus importante flexion de hanche et une plus grande amplitude de mouvements de cheville et du genou, pourraient être des facteurs à prendre en compte. Cette meilleure amplitude de flexion de hanche indique une contraction excentrique de la cuisse et une extension des muscles de la hanche plus importante avant leur contraction pendant la phase de poussée. Cette recherche a également prouvé que les patineurs de haut niveau ont une meilleure extension du genou ainsi qu'une flexion plantaire plus efficace au cours de la propulsion. Ceci est en accord avec les connaissances antérieures à cette étude reliant la vitesse de patinage et la force produite pendant la propulsion. L'expertise en hockey sur glace dans la tâche de patinage passe par un dégel progressif des degrés de liberté, se manifestant par une évolution de l'amplitude

articulaire (notamment hanche, genou, cheville) en partie à l'origine d'une augmentation de la production de force donc d'une poussée plus efficiente.

Envisager le comportement expert comme une réponse inimitable

Phillips et al. (2010) assimilent l'expert à un système complexe composé de nombreux degrés de liberté fonctionnant à différents niveaux du système. Système complexe ayant la capacité de s'adapter à différentes contraintes de tâche et d'environnement en ayant une variété d'alternatives pour performer (Davids & Baker, 2007).

Le répertoire moteur et la dynamique des contraintes : un compromis nécessaire

Le système va devoir faire un compromis entre la stabilité et la flexibilité des comportements dont il dispose, pour conserver un même niveau de performance. L'expert doit être en mesure de maintenir un comportement lorsque les contraintes n'évoluent pas et de modifier son comportement lorsqu'il y a une évolution. Par exemple, deux études en boxe ont démontré que lorsque le boxeur se trouve proche du sac de frappe un pattern de type « uppercut » ou crochet est le plus fréquemment observé. A contrario, lorsque le boxeur est éloigné, c'est un pattern de type « direct » qui émerge (Hristovski, Davids, & Araújo, 2009; Hristovski et al., 2006). Lorsque la distance entre le sac et le boxeur est comprise entre 45 et 65 cm, l'ensemble des patterns émerge. Ainsi, le comportement de l'expert est stable dans les situations où le sac est proche ou éloigné de lui, et flexible lorsque le sac se trouve dans une zone intermédiaire (permettant de s'adapter en employant des patterns divers adaptés à l'évolution des postures du boxeur adverse par exemple).

Le compromis se fera à partir de l'interaction entre la palette des différents patterns du comportement qu'il possède et les changements de l'environnement au cours de l'action. Phillips et al. (2010) montrent que l'expression de l'expertise est limitée et formée par l'interaction entre les différentes contraintes en rapport avec la tâche. Ces contraintes sont perçues comme des variables qui orientent le comportement de l'individu. Dès lors, la performance va émerger en suivant une « dynamique intrinsèque » propre au sujet, qui va lui permettre de tendre vers un choix de comportements en fonction de la tâche, de l'environnement, de l'organisme de l'individu (Newell, 1986). La dynamique intrinsèque se définit comme une tendance de coordinations préférées et stables qui existent à un moment donné (Kelso, 1991), en d'autres termes, il s'agit du paysage ou répertoire des patterns de coordinations valables pour une situation donnée (Wagenaar & Van Emmerik, 1994). Elle est

unique et façonnée par de nombreuses contraintes telles que l'expérience, l'apprentissage, le développement, la morphologie, l'expression génétique qui interagissent pour moduler la performance et l'acquisition de l'expertise (Davids et al., 2008). Parce que cette dynamique est individuelle, les experts peuvent générer différentes réponses adaptées à une même situation, et d'autres individus ne peuvent pas copier les comportements experts (Phillips et al., 2010; Seifert et al., 2013). En s'inspirant des études d'Hristovski et al. (2006, 2009), nous pouvons supposer que la distance séparant le défenseur de l'attaquant (que nous pourrions qualifier de distance de combat) implique une variabilité du comportement. Le hockeyeur expert sera en mesure de produire différentes formes de patinage en fonction de l'évolution de ses ressources au fil du match, du déplacement de son adversaire pour le prendre de vitesse, pour le feinter et aller dans un nouvel espace créé par son activité. L'expression de cette dynamique intrinsèque (ici, le changement brusque de direction, l'accélération soudaine dans un espace libre) est conditionnée par l'évolution de la dynamique de la tâche : la distance séparant le joueur de son adversaire qui n'est jamais fixe. À travers la pratique, le joueur aura expérimenté diverses distances de combat et formes de patinage pour remporter son duel et construira un répertoire unique (non reproductible par d'autres) lui permettant de remporter son duel dans la majeure partie des situations de ce type.

Phillips et al. (2010) montrent que l'interaction entre les dynamiques intrinsèques individuelles (i.e., le répertoire initial de l'individu) et l'ensemble des tâches à réaliser va faire émerger un système de réponses variables propre à chaque athlète. À cause d'une diversité de relations entre dynamique intrinsèque et tâches à réaliser, chaque individu doit exploiter une variété de comportements en suivant différents chemins. Cela implique que l'expertise développe une voie tout à fait singulière. Si la tâche est « familière » au pratiquant, son influence se manifesterait dans la dynamique intrinsèque de l'individu : plus l'individu progresse et plus il a exploré différentes solutions, plus sa dynamique intrinsèque se modifie et se diversifie. Si les prérequis comportementaux pour réussir une tâche sont proches de ceux préexistants chez l'apprenant, alors le taux d'acquisition d'expertise est probablement renforcé (Phillips et al., 2010). La correspondance entre la dynamique intrinsèque et la dynamique de la tâche peut expliquer la précocité de certains athlètes et les bases de transfert du talent. En revanche, acquérir un pattern du mouvement différent de celui appris précédemment (e.g., un cadrage/débordement en rugby après avoir pratiqué le duel au handball) peut allonger le processus d'apprentissage qui nécessite une reformation de la dynamique intrinsèque (Phillips et al., 2010).

Ainsi l'accès à l'expertise passe par : i) une dynamique intrinsèque propre à chaque expert en interaction avec la dynamique de la tâche et ii) un transfert d'expertise défini par le rapport (coopératif ou compétitif) entre la dynamique intrinsèque et la dynamique de la tâche (Seifert et al., 2013). Quand l'écart entre les deux ou la demande de la tâche sont faibles, le transfert entre dynamique intrinsèque et dynamique de la tâche peut être espéré. Sur cette base, la progression ne peut pas être considérée comme linéaire. En effet, la dynamique intrinsèque étant individuelle, l'acquisition des compétences se fait dans une temporalité non régulière. Cette progression doit tenir compte de l'apprentissage, de la croissance, de la maturation, des expérimentations des individus, de facteurs limitant (e.g., capacité anaérobie absente à l'enfance) pour permettre d'atteindre un niveau expert (Phillips et al., 2010).

En somme, être expert ne se limite pas à posséder un large répertoire moteur (une variété de processus de contrôle des D.D.L.), mais à utiliser ce panel moteur important à bon escient. Ceci étant dit, plus le répertoire de l'individu est important plus il est en mesure de réaliser une variété de mouvements facilitant son adaptation à une situation.

Propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques : enrichissement du répertoire moteur

À travers la perspective Ecological Dynamics, nous pouvons envisager l'acquisition de compétences expertes par une recherche d'états stables et fonctionnels de coordination (i.e. de nouveaux pattern moteurs) en réponse à un objectif de tâche (Davids et al., 2008). L'apprentissage correspond à la création d'état stable de coordination pouvant pendant une certaine durée résister à la perturbation de la stabilité du système (Davids et al., 2008). Le perceptual-motor landscape (traduit par paysage perceptivo-moteur) correspond alors au répertoire des états stables de coordination (i.e., les attracteurs) à disposition du sujet lorsqu'il entretient une relation avec l'environnement. Les contraintes interagissant au sein du couplage sujet-environnement étant en perpétuelle évolution, nous pouvons avancer l'idée que le *paysage perceptivo-moteur* revêt également un caractère dynamique sous l'influence de : l'expression des gènes, l'expérience passée, l'apprentissage, les influences sociales, les intentions, la perception de l'individu (Davids et al., 2008). Pour illustrer cette notion de dynamique du répertoire des coordinations préférentielles, prenons l'exemple d'un combat de boxe. Chacun des boxeurs peut réaliser des actions dont leurs probabilités d'émergence et leur stabilité de coordination diffèrent (Davids, Araújo, Shuttleworth, & Button, 2004). Ainsi, le direct émerge à une distance spécifique de la cible qui n'est pas la même que celle de

l'uppercut ou du crochet (Hristovski et al., 2006). En faisant référence au concept des affordances, il semble difficile de prévoir « en avance » une décision optimale pour performer. En effet, les affordances sont dynamiques et diffèrent en stabilité (i.e., elles apparaissent et disparaissent momentanément dans l'environnement de performance), et elles dépendent des interactions entre individu, tâche et environnement (Davids & Araújo, 2010). Dans cet exemple les affordances en lien avec la distance séparant les deux boxeurs peuvent être considérées comme des contraintes de nature perceptive dont la dynamique modifie les possibilités d'agir et la mise en place de coordinations préférentielles au sein du *paysage perceptivo-moteur*. Contrairement à la dynamique intrinsèque, qui correspond au perpétuel compromis entre les coordinations émergentes et la dynamique de la situation dans la relation individu-environnement, le *perceptual-motor-landscape* correspond aux possibilités de coordination que la dynamique des contraintes de tâche fait émerger. Reprenons l'exemple du duel du paragraphe précédent, lorsque le hockeyeur se trouve face au défenseur, il peut adopter différentes formes de patinage pour remporter son duel (réaliser une coordination adaptée dans son répertoire). Le paysage perceptivo-moteur revient dans ce cas à imaginer en quoi les contraintes de tâche impactent la perception et l'action du hockeyeur pour battre son adversaire. C'est pourquoi, remporter un duel en possession du palet pour tirer, sans palet pour se démarquer, au centre du terrain ou collé à la balustrade n'offre pas les mêmes possibilités de coordination. Par exemple, s'il s'agit de tirer à la suite du duel, le joueur devra s'organiser pour qu'à l'issue du duel il se retrouve orienté pour tirer confortablement, et donc dépasser son adversaire dans un espace préférentiel déterminé par la position de ses mains sur la crosse pour tirer. Feinter la direction de déplacement suppose de pouvoir aller dans plusieurs directions. Lorsque le hockeyeur se trouve entre le défenseur et la balustrade les possibilités d'agir sont plus restreintes qu'en situation de duel dégagée au centre du terrain.

Nous pouvons faire un lien avec la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques, qui rend l'atteinte d'une production de performance intéressante puisqu'elle ne nécessite pas de reproduction à l'identique d'un pattern « optimal ». À la place, le mouvement peut être continuellement adapté et varié s'il contribue à la réussite des productions de performances souhaitées (Barris, Farrow, & Davids, 2014). La propriété de dégénérescence des composantes d'un système augmente la complexité et la résistance du système (Mason, 2010). La possibilité d'avoir deux ou plusieurs structures pour accomplir la même fonction, détermine la possibilité d'évolution d'un système neurobiologique (Mason, 2010). L'entraînement d'un hockeyeur expert doit tendre vers la capacité à multiplier les

coordinations adaptées dans une situation dont les contraintes de tâches sont proches. C'est pourquoi, l'environnement de pratique doit reproduire des contraintes représentatives de la tâche en incluant, par exemple, un palet à transporter lorsque le joueur travail son patinage, un adversaire à poursuivre, des obstacles à éviter plutôt qu'une succession de traversées en patinant sans crosse. Il s'agit de créer des environnements de pratique dans lequel l'expert mobilise plusieurs états stables pour réussir la tâche. Cet état multistable de la coordination apparaît comme un élément d'une série de phénomènes dans lequel le couplage entre les composants d'un individu peuvent bifurquer d'un comportement invariant vers une création nouvelle (Kelso, 2012). Pouvoir passer d'un état d'équilibre à un autre, en relation avec l'évolution des conditions d'exposition à l'environnement, offre une possibilité plus efficiente d'agir que de chercher à créer de nouveaux états stables (Kelso, 2012). La multi-stabilité des patterns de mouvements peut refléter la créativité émergeant d'une nouvelle fonctionnalité motrice qui répond à l'interaction de contraintes (Hristovski, Davids, Araújo, & Passos, 2011). La présence de plusieurs solutions motrices, liées à la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques explique que différentes composantes d'un système neurobiologique, peuvent être exploitées pour atteindre un même résultat (Seifert et al., 2013). Lorsqu'il y a un écart faible entre la dynamique intrinsèque d'un individu et les demandes de la tâche, la multi-stabilité de l'organisation des modes de coordination permet une grande exploration de la dégénérescence du système révélant le caractère flexible du comportement expert (Seifert et al., 2013).

La capacité de l'individu à explorer des possibilités pour s'adapter à une situation favorise le perfectionnement des processus de contrôle et de coordination du mouvement. La modification des contraintes principales et l'évolution des relations spatio-temporelles entre l'individu et l'environnement contribuent à l'atteinte de cet aspect de l'expertise. La métastabilité implique la capacité d'un individu à passer d'un mode de coordination fonctionnel à un autre, afin de réussir la tâche (Davids et al., 2015). Concrètement, dans une même situation sportive, les experts sont capables de réaliser différents modes de coordination tout autant efficaces (en suivant une logique d'efficacité défensive, offensive ou d'opposition). Par exemple, en cricket, il a été démontré qu'il existait une zone de multi-stabilité dans laquelle un batteur expert pouvait adopter un mode de coordination en back foot shot ou en front foot shot, et réussir la tâche (Pinder, Davids, & Renshaw, 2012). De la même manière, en boxe il a été démontré qu'en fonction de la distance séparant le boxeur expert du

punching-ball plusieurs modes de coordination (crochet, uppercut ou direct) émergeaient pour réussir la même tâche (Hristovski et al., 2006, 2009).

La richesse du répertoire moteur exprimée avec efficacité, et efficience, favorise la génération d'incertitudes auprès de l'adversaire. Elle favorise la résistance aux perturbations engendrée par une variété de comportements des adversaires ou partenaires. C'est pourquoi, l'expertise se définit notamment par la capacité des athlètes à se ré-inventer (Davids et al., 2015), créer et innover (Coté & Hay, 2002) en fonction de la modification des contraintes clés agissant lors de la réalisation de l'action (e.g., nouveaux adversaires, nouvelles règles, nouveau matériel, modifications corporelles liées à l'âge et la maturation). Au regard de la spécificité des interactions entre les contraintes au sein du couplage individu-environnement, il semble difficile de considérer le comportement expert comme généralisable, reproductible. Il apparaît que l'expertise revêt un caractère hautement individuel et se retrouve dans l'émergence de comportements au carrefour des interactions continues entre perception et action.

La variabilité du comportement au service de l'adaptation

Variabilité de la performance & variabilité de la coordination

Ne considérant pas la possibilité de réaliser exactement deux fois la même action, nous n'envisageons pas la variabilité comme une faiblesse ou une détérioration de la production motrice (Davids et al., 2003; Van Emmerik & Van Wegen, 2000). Cela reviendrait à confondre la variabilité du mouvement avec la variabilité de la performance. Nous précisons bien ici que, nous aborderons le rôle fonctionnel de la variabilité en considérant la capacité d'un individu à contrôler et à faire évoluer la gestion des D.D.L. pour garantir le maintien d'une performance similaire voire supérieure.

En général, l'augmentation de la variabilité d'un pattern indique une perte de stabilité et à l'inverse une réduction de la variabilité indique un comportement avec une plus grande stabilité (Stergiou, Yu, & Kyvelidou, 2013). Lorsque la variabilité du mouvement augmente et atteint un point critique le système devient sensible et la coordination préférentielle peut basculer dans un nouvel et plus stable pattern avec moins de variabilité : c'est un moyen pour développer de nouvelles coordinations. Le manque de variabilité dans le mouvement peut indiquer une rigidité et inflexibilité du système qui peut limiter l'adaptation de l'individu lorsque les contraintes changent (Stergiou et al., 2013). La variabilité « optimale » d'un système neurobiologique se retrouve quand le système démontre stabilité mais aussi une

capacité à changer quand cela est nécessaire (Stergiou et al., 2013). À travers l'entraînement et la pratique, l'individu peut améliorer son adaptation grâce à la variabilité de son comportement autorisant l'exploration de plusieurs dynamiques de performance, en mobilisant plusieurs patterns moteurs dans des régions instables (Davids & Araújo, 2010).

Selon la perspective Ecological Dynamics les comportements émergent sous l'interaction de contraintes, qui ont pour conséquence de faire varier l'organisation de la réponse motrice et non le résultat de la performance. La variabilité de l'organisation motrice ressort comme une propriété importante responsable, en partie, de l'adaptation de l'individu dans son environnement de pratique (Chow, Davids, Button, & Koh, 2007; Davids et al., 2006; Seifert et al., 2013; Stergiou et al., 2013). La variabilité peut se définir comme « the variance of movements generated by an individual under the same task conditions » (Newell & Slifkin, 1998, p. 143). La variabilité du comportement fournit un cadre de recherche adéquate pour interpréter les données relatives à l'analyse du comportement expert (Baker & Davids, 2006).

Variabilité du comportement expert : reflet d'une adaptation à la dynamique d'une tâche

La réponse de l'expert n'est donc plus envisagée comme reproductible et unique mais variable suivant le couplage sujet-environnement (Davids & Araújo, 2010; Seifert & Davids, 2012). La variabilité dans le mouvement du système est omniprésente et inévitable en raison de l'effet des différentes contraintes faisant émerger le comportement de l'individu. Selon (Davids et al., 2003), cette variabilité est dirigée par l'interaction des différentes sources de contraintes de l'action. Ces auteurs voient la variabilité comme fonctionnelle, c'est-à-dire qu'elle permet d'adapter en continu la technique en fonction des changements de la tâche. L'approche Ecological Dynamics défend l'idée, selon laquelle, la variabilité des mouvements garantit une adaptabilité permettant le maintien d'un résultat similaire tout en répondant à des perturbations s'opérant dans l'environnement de performance (e.g., en fonction de l'affûtage de la lame ou de la dureté de la glace, les hockeyeurs sont capables de modifier la force appliquée sur la glace pour changer de direction subitement). Pour réaliser de telles adaptations, il faut que l'individu ait développé une sensibilité fine dans un espace perceptivo-moteur construit sur la pratique, afin de chercher des solutions motrices fonctionnelles plutôt qu'un mouvement idéal (Davids et al., 2015). L'adaptation fonctionnelle du mouvement se traduit alors par des différences intra-individuelles en fonction de la tâche à réaliser (Chow, Davids, Button, Shuttleworth, et al., 2007).

Selon l'approche Ecological Dynamics, la variabilité du comportement est une propriété essentielle assurant l'adaptation de l'individu à l'évolution des contraintes présentes lors de l'action (Davids et al., 2006, 2003; Komar et al., 2015). En d'autres termes, la variabilité du pattern moteur est considérée comme fonctionnelle quand elle permet aux sportifs de manifester une flexibilité permettant d'adapter ses actions aux buts de la tâche et aux modifications des contraintes de performance (Barris et al., 2014). C'est pourquoi, dans leur étude, Barris et al. (2014) ont entraîné les plongeurs élités à s'adapter aux variations de l'oscillation de la planche du plongeur sans pouvoir refuser le plongeur. Ainsi, ils ont modifié leurs pratiques d'entraînement (refus de plonger quand la perception de l'impulsion n'était pas « idéale ») pour apprendre à s'adapter aux différentes conditions d'impulsions liées à l'oscillation de la planche. À l'issue de la période de douze semaines d'entraînement, les plongeurs ont été capables d'adapter leurs patterns moteurs pour plonger et stabiliser leurs performances sans refuser le plongeur. Leurs performances ont affiché une meilleure stabilité en compétition, le nombre de refus de plonger a diminué et la variabilité dans la phase d'impulsion sur la planche a augmenté. Dans cette étude, la capacité à résoudre le même problème moteur, en exploitant différents paramètres d'exécution, devient très important lorsque l'environnement est dynamique et des compétences émergent de l'interaction entre le plongeur, l'environnement et la tâche. La diversité des patterns aide les athlètes à gérer la partie imprévisible de l'environnement. Cette étude montre l'importance de la flexibilité du comportement pour développer une capacité à s'adapter en explorant et en exploitant les comportements les plus fonctionnels (Barris et al., 2014).

En fonction des interactions entre les contraintes environnementales, liées à la tâche et organisationnelles, le système peut adopter différentes formes de variabilité de comportement. En effet, il existe différents types de variabilités permettant de rendre compte de l'activité de l'expert et du débutant: i) variabilité intra-essai (e.g., examen de l'amplitude de mouvement d'une articulation lors de l'action), ii) variabilité inter-essai ou intra-sujet (e.g., mesure de la variabilité d'un essai à l'autre durant une même série de tests) et iii) variabilité inter-sujet (e.g., comparer la quantité de variations entre les patterns de coordination d'un groupe afin d'identifier plusieurs profils d'experts ou distinguer des groupes au sein d'une population d'experts/novices) (Komar et al., 2015). Dans notre travail de recherche, nous considérons qu'il est possible de manifester différentes réponses motrices pour atteindre le même but (i.e., patiner le plus vite possible) lorsque la tâche varie : patiner sans crosse, avec une crosse, en conduisant un palet. Nous supposons également que l'expertise dans l'activité influence la

variabilité dans le comportement de patinage. En effet, nous nous attendons à ce que l'analyse des paramètres superficiels et profonds des caractéristiques du patinage sur glace révèle la capacité d'un expert à produire un pattern moteur stable et reproductible dans des conditions sans incertitude (e.g. patiner sans crosse ou avec une crosse), et plus variable lorsqu'il s'agit de réceptionner un palet et de le conduire sans avoir été prévenu de son lancer. Dans les deux configurations, nous supposons que la performance dans chaque tâche de sprint reste similaire, tandis que l'organisation motrice change pour maintenir un niveau de performance malgré la modification des contraintes de tâche.

La variabilité revêt une dimension plus ou moins importante dans la pratique des sportifs experts en fonction de l'activité qu'ils pratiquent. En effet, les tâches faisant appel à des habiletés ouvertes ou fermées ne soumettent pas l'individu au même degré de contraintes de tâche. En ce qui concerne les habiletés fermées, le sujet produit une action dans un contexte fixe, prévisible. Les sujets (par extension les experts) présentent alors une capacité à reproduire les patterns moteurs d'un essai à l'autre. Plus le niveau de contraintes est élevé, plus le comportement va être orienté vers une solution stable. Pour autant, Button, MacLeod, Sanders, & Coleman (2003) ont réalisé une étude sur le lancer franc en basket-ball avec des experts et non-experts. Ils ont examiné la variabilité intra et inter essai des articulations du bras lanceur. Ils se sont focalisés sur la variabilité de trajectoire (cinématique du déplacement du coude) et sur la variabilité de coordination concernant le couplage coude/poignet. Les résultats montrent qu'il y a un effet expertise se manifestant par une diminution de la variabilité du couplage entre coude et poignet. Les experts vont imposer plus de contraintes sur la coordination de l'articulation du bras. En effet, la variabilité de coordination inter-essai diminue pour stabiliser la relation de couplage coude/poignet, ce qui se traduit par une stabilisation du comportement. La variabilité de la trajectoire des articulations est maintenue sans tenir compte du niveau de pratique.

Subtil mélange entre stabilité et flexibilité du comportement : l'adaptabilité

L'approche Ecological Dynamics de l'expertise promeut l'importance de la stabilité et de la flexibilité du comportement. Les experts ou non-experts réalisent des modes de coordinations stables, parfois identiques, mais la particularité des experts réside dans leur capacité à s'adapter, c'est à dire être stables quand il le faut et flexibles quand il y a nécessité (Seifert et al., 2013). L'être humain tend naturellement à adopter l'organisation la plus économique, c'est pourquoi la balance entre stabilité et flexibilité du comportement ne doit

pas être perçue comme un écart entre coûteux et moins coûteux au niveau énergétique, mais plutôt comme un signe d'adaptation afin de trouver une coordination la plus économique possible (Warren, 2006). La variabilité, dans l'organisation du mouvement et son impact sur l'adaptation de l'individu, doit se distinguer de la variation de la production de performance qui peut ne être assimilée à l'irrégularité ou la réduction du niveau (Davids et al., 2006).

Ainsi, comme le suggèrent Seifert et al. (2013), remplacer le terme « variability » par « adaptability » soulignerait l'importance attribuée à la variabilité dite fonctionnelle. L'adaptabilité serait entendue comme un ratio entre stabilité (constance d'un comportement sous l'influence de perturbations externes) et flexibilité (modification comportementale en réponse à l'évolution de l'environnement) (Barris et al., 2014; Davids et al., 2003; Komar et al., 2015; Warren, 2006). La flexibilité pourrait s'envisager comme la capacité d'un individu à réaliser deux ou plusieurs patterns moteurs dans la même situation avec un but de tâche identique. Par exemple, un hockeyeur capable à 4m du but de tirer pour marquer en utilisant le slap shot, le wrist shot est capable de générer de l'incertitude auprès du gardien de but quant à la force de lancer du palet ou à la précision du shoot. La flexibilité du comportement expert entretient un lien étroit avec la multi-stabilité du comportement (i.e., la capacité à transiter par de multiples états d'organisation sous l'influence des contraintes). Cette flexibilité se fonde sur le caractère multistable de l'organisation des patterns de coordination dans une même tâche, avec les mêmes objectifs, et dans la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques évoquée dans le chapitre précédent.

Pour conclure, les athlètes développent leurs compétences afin de satisfaire les contraintes de la tâche à l'entraînement ou en compétition. C'est pourquoi, les objectifs des situations doivent montrer des structures régulières et similaires, mais les sportifs élités ne doivent pas se cantonner à répéter un mouvement rigide, stable pendant l'entraînement. Le comportement expert se manifeste à travers l'expression de patterns stables du mouvement. Ils sont durables, reproductibles, à l'épreuve de perturbations extérieures mais à l'intérieure de ce pattern similaire, des petits changements peuvent s'opérer sous l'effet des contraintes de tâche ou de l'environnement (Seifert et al., 2013). Même si le pattern dans sa globalité montre des aspects réguliers et similaires, il ne faut pas néanmoins considérer qu'il est verrouillé dans une solution figée, rigide. Il est nécessaire de chercher à perturber la stabilité du pattern expert en le confrontant à un environnement représentatif de la tâche pour entretenir sa capacité à rechercher de nouvelles réponses. Ces dernières, grâce à la propriété de dégénérescence du

système complexe qu'est l'organisme humain, peuvent être modifiées dans un souci fonctionnel (Edelman & Gally, 2001).

Résumé du chapitre :

L'expertise n'est pas uniquement la réalisation de coordinations et mouvements complexes, mais aussi le fait qu'ils soient adaptés à une situation, c'est-à-dire qu'ils répondent à des contraintes (environnementales, de l'organisme ou de tâche) en interaction, qui évoluent dans le temps.

Selon Bernstein (1996), la capacité d'un expert est de réaliser le but de la tâche correctement (efficacement), rapidement, raisonnablement (avec efficacité) et avec ingéniosité (*i.e.*, adresse et initiative). L'expertise ne relève pas des mouvements en eux-mêmes, mais de leur capacité d'adaptation aux conditions extérieures.

Il n'existerait pas de coordinations et mouvements « expert », mais une expertise dans le couplage « individu-contrainte », c'est-à-dire une expertise à adapter son comportement au niveau de contraintes demandé ou perçu, et à l'actualiser au fur et à mesure que ces contraintes changent. Ainsi, envisager le comportement expert comme un modèle idéal à copier serait discutable.

La réponse experte est le résultat d'un mélange unique et propre à chaque individu, intégrant : i) perception d'affordances spécifiques sur la base de la calibration de l'espace en fonction de ses dimensions corporelles, et la perception de ses propres possibilités d'agir, ii) *coordination* des degrés de liberté pour produire un mouvement adapté à la dynamique de la tâche, iii) construction d'un riche *répertoire moteur* mobilisable en fonction des contraintes pour *satisfaire un but*, iv) compromis entre stabilité du comportement dans un souci de réduction du coût énergétique et flexibilité, afin de réguler la production du mouvement en fonction de la dynamique des contraintes de tâche.

L'expert ressort comme un individu capable de tirer parti des propriétés de l'environnement et de ses ressources pour adopter un comportement stable et pourtant flexible quand la situation l'impose. La variabilité du comportement peut s'avérer fonctionnelle et s'exprimer au niveau intra- et inter-individuel. Cette variabilité reflète la capacité des experts à réaliser une même fonction (*i.e.*, une même action ou un même but) en utilisant des structures coordinatives ou des mouvements différents sans altérer l'efficacité, ce qui illustre la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques.

Problématique et hypothèses

'Any uncertainty [in a complex system] ... no matter how small, will lead to rapidly growing errors in any effort to predict the future behavior'

Gollub and Solomon, 1996

Sur la base des chapitres précédents, nous défendons l'idée que le comportement d'un individu expert ou non, émerge en fonction de l'effet des contraintes en interaction lors de la réalisation de la performance (Newell, 1986). Dans le cadre de notre recherche, se déplacer sur la glace avec deux lames métalliques et une crosse, comme uniques supports en contact avec le sol, offre une intéressante opportunité d'étudier l'adaptation humaine à un milieu inhabituel (i.e., le maintien de l'équilibre est précaire puisque l'aire du polygone de sustentation est réduite, le centre de gravité surélevé, le poids de l'individu augmenté par l'équipement et la surface de support glissante) (De Koning, Thomas, Berger, De Groot, & Van Ingen Schenau, 1995; Pearsall et al., 2000; Upjohn et al., 2008). Se déplacer sur la glace apparaît comme une tâche sous l'effet d'un haut niveau de contraintes environnementales, qui supposent une organisation motrice inhabituelle pour s'adapter à la faible friction entre les patins et la glace (e.g., instaurer une poussée latérale et non plus dans l'axe comme en course à pieds (Pearsall, Turcotte, & Murphy, 2000), mobiliser plus spécifiquement les adducteurs lors du mouvement (Chang, Turcotte, & Pearsall, 2009)). Envisager la locomotion sur glace, a fortiori lors de matchs de hockey sur glace, dépasse la simple tâche de patinage comme en patinage de vitesse, et suggère l'expression de différentes formes de patinage en fonction de l'évolution du jeu et du niveau de compétence du pratiquant (e.g., patiner en avant, en arrière, en virage ou en ligne droite ; enchaîner des arrêts et des départs ; se déplacer avec ou sans le palet, à intensités différentes, pour conserver ou récupérer le palet ; pour plus de précision voir Bracko, Fellingham, Hall, Fisher, & Cryer (1998) ou Pearsall, Turcotte, & Murphy (2000)). Patiner est mis en avant par les entraîneurs et les chercheurs comme la compétence la plus importante en hockey sur glace (Bracko, 2004; Pearsall, Turcotte, & Murphy, 2000). Dans le cadre de notre travail de recherche, nous avons fait le choix de réduire l'analyse du patinage à celle du patinage avant pour trois raisons : i) le patinage vers l'avant est l'habileté la plus fréquemment utilisée en match donc nous supposons l'existence d'un fort effet de l'expertise lors de la réalisation de cette tâche (Bracko, 2004; Montgomery et al., 2004), ii) les analyses cinématiques et cinétiques du patinage avant sont les plus documentées scientifiquement ce qui a permis de guider les recherches, collecter des données *in situ* en

pouvant interpréter les résultats comparativement à des études menées en laboratoire et iii) une collaboration avec la Fédération Française de Hockey sur Glace (FFHG) financée par l'INSEP et le MJS a permis une recherche sur la thématique du patinage avant, compétence dans laquelle les joueurs français apparaissent fréquemment en difficulté comparativement à leurs adversaires étrangers.

Sur cette base, nous avons conduit nos recherches afin de caractériser le pattern expert spécifique à la tâche de patinage avant en veillant :

i) à la conception d'un protocole de recherche expérimental représentatif du contexte écologique de pratique afin que les résultats obtenus révèlent l'expertise du couplage individu-environnement.

ii) à la manipulation de contraintes de tâche faisant émerger l'expertise en patinage avant révélant la stabilité d'un pattern moteur efficace, mais aussi la flexibilité comportementale reflétant l'adaptation à la dynamique de la situation.

Le premier objectif a été de prendre en compte les demandes, les besoins, et la difficulté, inhérents à la tâche que nous souhaitons voir représentée dans la mise en place d'un protocole de recherche expérimental pour l'analyse du mouvement humain (Davids, 1988). La représentativité est présentée par Brunswik (1956) comme la correspondance entre les contraintes caractérisant la tâche expérimentale et les paramètres comportementaux entourant l'action en dehors du laboratoire. La conception d'un protocole de recherche représentatif de l'activité en situation « naturelle » pose donc le problème de l'identification des éléments clés de l'environnement et des indices perceptifs qui contraignent l'action des sportifs, afin d'assurer leur mise en correspondance avec les contraintes des tâches expérimentales de recherche. Araújo, Davids, & Passos (2007) ont souligné la difficulté de quantifier cette correspondance. La mise en place de recherches qualitatives pour cerner la cohérence entre la conception d'un protocole de recherche et la réalité de l'activité du sportif apparaît comme une alternative pertinente. L'intérêt que nous portons à la notion de « representativ learning and training design », nous invite à appréhender différemment la conception des protocoles expérimentaux pour l'analyse du mouvement humain. En effet, nous souhaitons comprendre le contrôle du mouvement humain, en l'occurrence l'expertise du patinage en hockey sur glace. À cet objectif s'ajoute la volonté d'assurer une cohérence entre les mesures du comportement observé dans la tâche expérimentale et celui observé en situation d'apprentissage, d'évaluation ou de compétition.

C'est la raison pour laquelle lors de notre première étude nous avons questionné le savoir des entraîneurs experts de hockey sur glace. Leur expertise d'entraîneur se fonde sur une expérience importante permettant une adaptation pertinente aux problèmes spécifiquement rencontrés par chacun de leurs entraînés dans une diversité de contextes (Côté & Gilbert, 2009; Nash, Sproule, & Horton, 2011). L'ensemble des connaissances employées pour s'adapter, certifie d'une compréhension précise de l'activité pouvant aider à l'élaboration d'un protocole de recherche représentatif. Notre étude repose sur l'idée que les entraîneurs experts évaluent les habiletés de leurs athlètes sur la base de connaissances fortement contextualisées et étroitement liées à leurs expériences pratiques, mais qui intègrent également des concepts scientifiques, en particulier des connaissances biomécaniques, de façon explicite ou implicite. Or dans certains cas, ces dernières peuvent être utilisées d'une façon erronée ou inadéquate au regard de leur définition scientifique (Rolland & Cizeron, 2011). Dans d'autres cas, en revanche, les connaissances des coaches ne trouvent pas d'équivalents scientifiques pour être corroborées ou validées. Il y a donc un véritable enjeu à mieux articuler les connaissances pratiques des coaches experts et les connaissances scientifiques, afin de favoriser des relations plus étroites entre ces professionnels. Nous émettons l'hypothèse que le questionnement des connaissances des entraîneurs constitue une opportunité de guider de nouvelles expérimentations scientifiques en garantissant leur « validité écologique », correspondant à un réel besoin de connaissances scientifiques (Greenwood et al., 2013).

Le second objectif de ce travail a été d'analyser l'adaptabilité de joueurs de hockey experts et non-experts dans une tâche de patinage avant dont les contraintes étaient manipulées. En référence à l'étude 1 et à la suite d'une analyse de la littérature scientifique, nous avons identifié les paramètres profonds (e.g., coordination et symétrie de mouvement) et superficiels (e.g., durée des phases du cycle, force exercée lors de la poussée, vitesse de déplacement, jerk) du mouvement expert en patinage avant à analyser.

En situation de compétition, le joueur doit se projeter très rapidement vers l'avant pour attaquer la cible. Il peut le faire de plusieurs façons : avec ou sans palet, en se lançant par l'intermédiaire de pas croisés dans un virage ou directement en ligne droite. Fort de ce constat, nous analyserons la cinématique, la cinétique et la coordination des membres inférieurs des hockeyeurs en réponse à des modifications de plusieurs contraintes : la tenue ou non de la crosse, le type de départ (arrêté ou lancé), la conduite du palet, le poste du joueur

(attaquant ou défenseur). Le port de la crosse interroge les entraîneurs comme les joueurs : un joueur moderne est dans la culture du hockey sur glace un joueur qui ne se sert pas de sa crosse pour se déplacer et qui patine sans modification de sa performance avec ou sans crosse. Au regard du caractère dégénéré du système neurobiologique (Edelman & Gally, 2001), les hockeyeurs experts sont capables d'utiliser différents patterns de mouvement et de coordination (i.e. multi-stabilité) avec une performance similaire, reflétant une variabilité fonctionnelle du comportement. Pour résumer, il s'agit de démontrer en quoi la modification des contraintes de tâche peut influencer l'organisation motrice du joueur en fonction de son expertise et de son poste de jeu, tout en garantissant une performance similaire, signe d'adaptation aux contraintes. Dans ce contexte, nous émettons deux hypothèses :

i) le comportement expert analysé à travers l'étude de paramètres superficiels (vitesse de déplacement, longueur et nombre de pas, fréquence des pas, force de poussée, temps d'appui et d'oscillation) et profonds (coordination entre les membres inférieurs) révélera une stabilité lorsque les conditions de sprint sont sans palet. En revanche, nous supposons que la conduite du palet consécutive à une transmission incertaine générera un comportement flexible, permettant de réceptionner l'éventuelle transmission et de faire coïncider la trajectoire du palet avec celle du joueur en mouvement. En répétant les conditions trois fois, nous nous intéressons à la variabilité intra-individuelle afin d'étudier la flexibilité du comportement expert. Cette dernière, analysée au sein de chaque condition, est perçue comme favorisant l'adaptation à la modification des contraintes de tâche.

ii) en dépit du fait que le patinage soit la compétence à maîtriser prioritairement, nous supposons que le poste constitue une contrainte importante. En effet, nous émettons l'hypothèse qu'une différence dans le ratio stabilité/flexibilité du comportement différencie les attaquants des défenseurs. Le poste d'avant nécessite une capacité à rapidement se projeter vers l'avant, dribbler, éviter des défenseurs qui impose une capacité à réguler la part de flexibilité et de stabilité du comportement plus fréquemment qu'un défenseur (à qui il est demandé de maîtriser le patinage arrière plus spécifiquement). Nous supposons que des différences se retrouvent dans la variabilité inter-individuelle entre les comportements des arrières et des avants : les avants démontrant une stabilité plus robuste aux perturbations liées aux manipulations des contraintes de tâche. Ces dernières ne sont pas interprétées comme des erreurs à réduire mais plutôt comme des comportements fonctionnels mis en place pour répondre à des contraintes différentes en situation de match.

APPROCHE EXPERIMENTALE

Chapitre 3. Comment appréhender la complexité du patinage avant au regard des connaissances mobilisées par les entraîneurs ?

« La connaissance technique, pratique, expérientielle est symboliquement dominée par la connaissance théorique, scientifique, livresque. Ceci est sans doute renforcé par le fait que la connaissance pour l'action, ou connaissance pratique, est par définition largement implicite »

Roland & Cizeron, 2011

Ce chapitre a servi de support à la publication de l'article suivant :

Mell, F., Saury, J., Féliu, F., L'Hermette, M., & Seifert, L. (2017). What does the questioning of expert coaches reveal about the biomechanical knowledge of forward ice hockey skating? *International Journal of Sports Science & Coaching*, 12, 4, 461-469.

Il a également fait l'objet d'une communication affichée en congrès international :

Mell, F., Saury, J., Féliu, F., L'Hermette, M., & Seifert, L. (2015). Forward ice hockey: Which kinematics parameters are relevant for coaches? 14th European Congress of Sport Psychology. Berne, Switzerland.

Introduction

Le sport de haut-niveau est un domaine dans lequel la caractérisation et l'amélioration de la performance captivent les coaches comme les chercheurs. Ces derniers développent des connaissances dont la complémentarité enrichit la compréhension de la complexité des situations sportives (Côté, Salmela, Trudel, & Baria, 1995; Gilbert & Trudel, 2004; Greenwood, Davids, & Renshaw, 2012; Saury & Durand, 1998). L'expérience considérable des entraîneurs experts alimente une base conséquente de connaissances spécifiques mobilisées pour observer, décrire, décrypter la complexité des situations sportives (Côté, Salmela, Trudel & Baria, 1995 ; Gilbert & Trudel, 2004). Analyser le mouvement, corriger des déplacements, mettre en place des solutions pour améliorer ou maintenir une performance sont des exemples de compétences mobilisées quotidiennement par les entraîneurs. Comptés parmi les premiers acteurs de la réussite d'un athlète, les entraîneurs font appel à un ensemble de connaissances permettant de s'adapter à la dynamique des situations sportives. Saury & Durand (1998) décrivent deux types de connaissances : implicites (e.g. répétitions de tâches de façon automatique) et explicites (descriptives, déclaratives) relatives à leurs connaissances scientifiques (psychologiques, biomécaniques, physiologiques et sociologiques) et techniques de l'activité. Les entraîneurs recourent à l'utilisation de ces connaissances, en permanence, pour s'adapter à la dynamique des situations. L'expertise d'un coach transparaît ainsi à travers sa capacité à mobiliser ses savoirs pour résoudre un problème inattendu, à ajuster son comportement à des éléments nouveaux (Saury & Durand, 1998).

Construction de l'expertise des entraîneurs. L'expertise d'un coach réside dans sa connaissance des principes de l'entraînement (e.g. planification), son organisation, sa gestion des compétitions et ses capacités d'adaptation aux particularités des contextes d'intervention. D'après Côté & Gilbert (2009), l'expertise d'un entraîneur se manifeste à travers son aptitude à réguler sa conduite dans différents contextes (compétitif ou récréatif) et avec des publics variés (enfants, adolescents et adultes). Un entraîneur mobilise trois types de connaissances : professionnelles relatives à la pédagogie, à la discipline pratiquée et au curriculum du sportif ; intra-personnelles (éthique, tempérament, réflexivité) et interpersonnelles, liées à ses compétences de communicant et ses relations avec les athlètes, parents, dirigeants ou autres acteurs (Bergeron et al., 2015). Cela implique, par exemple, qu'un entraîneur soit en mesure de dépasser l'encadrement sportif pour déceler des environnements familiaux favorables à l'émergence d'un nouveau talent (Côté, 1999). La mobilisation de ces connaissances, jumelée avec une faculté à adapter ses contenus à la singularité de l'athlète, déterminera l'efficacité

de l'entraîneur (« effective coach »). Un parcours entier dans le cursus de formation des entraîneurs et une activité d'entraîneur sur une longue période distingueront l'« expert coach » de l'« effective coach ». L'expertise de l'entraîneur dépend de la richesse de son expérience, permettant une adaptation pertinente aux problèmes spécifiquement rencontrés par chacun de ses entraînés dans une diversité de contextes (Côté & Gilbert, 2009; Nash et al., 2011).

L'expertise d'un entraîneur se situe au carrefour de plusieurs composantes telles que : son expérience, ses interventions, le niveau de ses athlètes (i.e. national ou international (Côté et al., 1995; Lemyre, Trudel, & Durand-Bush, 2007)) et sa reconnaissance par ses pairs (Abraham, Collins, & Martindale, 2006). Un nombre important de victoires (Lemyre et al., 2007) et une expérience supérieure à 10 ans de pratique, sont fréquemment mis en avant pour caractériser l'expertise d'un coach (Abraham et al., 2006; Côté et al., 1995). Mais, l'expérience ne se suffit pas pour atteindre ce niveau de compétence. En effet, pour devenir un coach expert, l'individu va devoir développer des compétences qui auront de multiples origines. Tout d'abord, son parcours en tant que sportif, l'apprentissage par observation, ainsi que l'assistance d'un coach plus expérimenté participeront au processus d'enculturation (Cushion, Armour, & Jones, 2003; Erickson, Bruner, MacDonald, & Côté, 2008; Lemyre et al., 2007; Wright, Trudel, & Culver, 2007). Puis, sa formation dans les programmes de certification des entraîneurs, sous la tutelle d'un mentor qui l'accompagne tout au long de son évolution (Bloom & Durand-Bush, 1998; Cushion et al., 2003; Erickson et al., 2008; Mallett, Trudel, Lyle, & Rynne, 2009; Wright et al., 2007). Enfin, ses échanges avec d'autres entraîneurs plus expérimentés perfectionneront les savoirs de l'entraîneur et contribueront à la constitution d'une communauté de pratique au service du développement de l'activité (Cushion et al., 2003; Erickson et al., 2008; Lemyre et al., 2007; Thompson, Bezodis, & Jones, 2009; Trudel & Gilbert, 2004), permettant de devenir à son tour un mentor qui entraîne des athlètes élités et en devenir (Abraham et al., 2006). A titre d'exemple, Schinke, Bloom, & Salmela (1995) ont schématisé la progression d'un entraîneur expert en basket suivant sept étapes présentées chronologiquement : participation jeune à des activités sportives récréatives, puis engagement compétitif dans un championnat de niveau national élite, engagement dans des compétitions internationales, coach débutant, coach en formation, coach de niveau national, coach international. L'expertise d'un entraîneur apparaît comme une appropriation progressive et chronologique de savoirs théoriques et pratiques de joueurs puis d'entraîneurs. Cependant, une vision linéaire du « comment apprendre à entraîner » peut s'avérer trop

réductrice. En effet, « coaching is both an individual and a social process [...] inextricably linked to both constraints and opportunities of human interaction » (Cushion et al., 2003, p. 216). Le coaching est une activité complexe regroupant de nombreuses variables liées aux interactions entre l'environnement (humain ou non) et l'entraîneur, aux caractéristiques de l'individu lui-même donnant une dimension unique et idiosyncratique au processus d'apprentissage. Une conception collective et chronologique de la progression de l'entraîneur n'intègre pas la particularité des contextes dans lesquels chaque individu se trouve. La vision linéaire, donnant l'illusion que chaque individu en suivant ce parcours accèdera à l'expertise, est discutable (Werthner & Trudel, 2006). Entraîner est une pratique contextualisée, personnelle, propre à chaque individu, ce qui rend la perspective de la progression linéaire critiquable mais n'empêchant pas l'identification de paramètres favorisant cet apprentissage. In fine, à l'issue de sa progression, l'entraîneur expert se sera bâti un ensemble hautement spécialisé de connaissances déclaratives et procédurales (Greenwood et al., 2013), résultant de son expérience et de ses réflexions.

Un entraîneur expert tient compte en permanence de l'évolution des savoirs relatifs à son domaine d'activité de façon *formelle* (i.e., en passant par des parcours institutionnels diplômants), *non formelle* (e.g., en participant à des congrès, des séminaires avec un rapport avec des entraîneurs « connaisseurs ») et *informelle* (e.g., suite à l'atteinte d'un objectif, interactions entre les personnes, expérimentation par essais-erreurs) (Cushion et al., 2003; Erickson et al., 2008; Mallett et al., 2009; Werthner & Trudel, 2006). Il actualise constamment ces connaissances dont les utilisations seront soumises à l'autocritique : il prend l'initiative de créer son propre savoir (Werthner & Trudel, 2006). Ces connaissances se forment en puisant dans différentes sources comme l'illustre la figure ci-dessous.

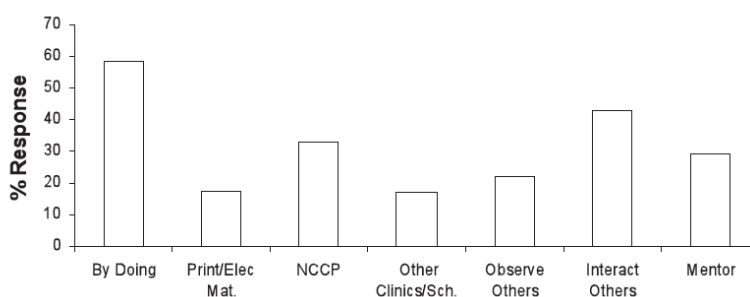


Figure 11. Sources de connaissances identifiées comme les plus importantes par les entraîneurs en intervenant, se documentant sur des supports dactylographiés, suivant un parcours de certification (NCCP), participant à des séminaires ou conférences d'entraîneurs, regardant les autres coaches, partageant les points de vue avec d'autres et en se formant au côté d'un mentor (repris de Erickson et al., 2008, p. 532).

Accumuler des savoirs, multiplier les interventions auprès de différents publics, sont des variables qui vont guider la progression de l'entraîneur. Les expériences d'apprentissage des entraîneurs sont étroitement liées à leur motivation intrinsèque, au degré d'autonomie dans leur recherche de progression, à leur engagement dans la pratique permettant d'apprendre en faisant, à l'étendue des possibilités de l'entraîneur à donner du sens à son apprentissage (Mallett et al., 2009). À ces compétences, s'ajoute l'aptitude du technicien à analyser sa pratique avec détachement (i.e., sa réflexivité ou « critical thinking »). En effet, un des paramètres essentiels au bon cheminement de l'entraîneur est sa capacité à employer l'analyse réflexive à propos de sa pratique au cours de son « internal learning » (Erickson et al., 2008; Werthner & Trudel, 2006). Cette qualité s'avère indispensable afin de remettre en cause ce qui a été fait, de perfectionner les actions futures, afin de modifier ses méthodes de travail (Abraham et al., 2006; Cushion et al., 2003) et de se créer de nouveaux savoirs (Werthner & Trudel, 2006). La réflexivité garantit une pratique en cohérence avec l'évolution de sa discipline et une planification optimale de ses entraînements.

Les recherches ont mis en évidence le fait que l'expertise des coaches était essentiellement liée à la mobilisation de connaissances tacites, issues de leurs expériences de terrain (Côté et al., 1995; Nash & Collins, 2006), et de l'histoire de collaborations avec des athlètes (Saury & Durand, 1998). Ces connaissances étaient également fortement contextualisées et indexées aux circonstances des situations (Nash & Collins, 2006; Saury & Durand, 1998; Werthner & Trudel, 2006). Au fur et à mesure de son expérience et de son introspection, un entraîneur expert se bâtit un ensemble hautement spécialisé de connaissances déclaratives et procédurales, et de modèles mentaux (mental models) (Côté et al., 1995), dont la richesse peut aider le scientifique à appréhender la complexité de la situation sportive (Greenwood, Davids, & Renshaw, 2012).

Interroger des savoirs experts. C'est dans une logique de développement des connaissances autour de la problématique de l'entraînement, que l'intérêt porté par les chercheurs au sujet des savoirs mobilisés par les entraîneurs croît : Gilbert & Trudel (2004) recensent 610 articles publiés au cours de la période 1970-2001. Ils mettent en avant une hausse des publications : 7 articles paraissent entre 1970-1973, quand 131 sont imprimés entre 1998 et 2001. Gilbert & Trudel (2004) synthétisent les études relatives à la « coaching science » autour de 4 items : les comportements des entraîneurs, leurs réflexions, leurs caractéristiques et le développement de leur carrière. Les méthodes employées en science du coaching sont diverses : quantitative (de type questionnaire), qualitative (interview,

observation systématique), participative (implication du chercheur dans son champ d'étude). L'utilisation de la méthodologie quantitative demeure dominante (employée dans 80% des recherches de 1970 à 2001), mais Gilbert & Trudel (2004) présentent une augmentation de l'usage de l'interview. En effet, les premières interviews ont été menées entre 1978 et 1981 et représentaient 17,6% des méthodologies employées en science de l'entraînement. Entre 1998 et 2001, 42 articles ont présenté des études basées sur des recueils d'informations à la suite d'interviews, soit 49,4% des publications de cette période.

Le recours progressif à l'interview aura permis de mettre en avant des problématiques de recherches en sciences du coaching. Certaines études se sont focalisées sur les préoccupations de l'entraîneur en situation de compétition (Hagemann, Strauss, & Büsch, 2008; Smith & Cushion, 2006) ; la modélisation du coaching process (Abraham et al., 2006) ; l'apprentissage du métier d'entraîneur à travers la participation aux formations fédérales ou d'État (Lemyre et al., 2007; Wright et al., 2007) ; l'analyse du contexte de l'entraînement (Côté & Gilbert, 2009). D'autres se concentrent sur les savoirs des entraîneurs relatifs à l'observation de leurs attitudes durant l'entraînement des joueurs de rugby et de football (Oliver, Hardy, & Markland, 2010), à la prise en compte de l'ensemble des éléments permettant à l'athlète de s'accomplir en tant que sportif, mais aussi en tant que citoyen (Nash et al., 2011) ou encore à l'analyse du mouvement du sportif (Rolland & Cizeron, 2011; Sherman, Sparrow, Jolley, & Eldering, 2001; Thompson et al., 2009).

Questionner le savoir expert permet de nourrir de réelles problématiques de recherches. Par exemple, Sherman et al. (2001) se posent la question de l'influence de l'expertise des entraîneurs sur la perception des éléments biomécaniques identifiés comme clés dans la cinématique du swing d'un golfeur. Dans un premier temps, trois coaches experts établissent une liste de 17 angles caractéristiques du mouvement. Ces derniers sont repérés durant les six phases du mouvement de swing (de la mise en place à la position finale après impact). Dans un second temps, les entraîneurs professionnels et amateurs, participant à l'étude, ont observé des vidéos de golfeurs de niveaux variés et ont estimé leur handicap. Au regard des résultats, les auteurs estiment qu'il existe une conception commune du mouvement entre les deux groupes, dont la seule différence se trouve dans la considération de l'angle du poignet droit lors du swing. De la même manière, l'estimation des handicaps des golfeurs est en moyenne la même : les deux groupes ont une tendance à estimer avec précision les handicaps des pratiquants de faible niveau et se trompent dans l'appréciation du niveau des golfeurs de handicap zéro. La campagne d'interviews a mis en exergue le fait que les

entraîneurs experts ne se distinguent statistiquement pas des amateurs à travers leurs capacités à observer le swing (contrairement à l'hypothèse de départ). Cette étude démontre que l'intérêt porté par les scientifiques à propos des connaissances des entraîneurs alimente une pertinente problématique de recherche. Cette étude révèle les limites que peut atteindre l'analyse experte, mais subjective du mouvement : les entraîneurs n'ont pas nécessairement à disposition les outils d'analyse du mouvement qu'utilisent les chercheurs en sciences du sport (e.g., Vicon©, plateforme de force). Confronter les résultats des études biomécaniques (pour le golf, par exemple celle de Nesbit (2005)) avec le savoir des entraîneurs, permet d'observer la concordance ou la divergence des points de vue au sujet de l'analyse du mouvement sportif. Dans le cadre de recherches appliquées, estimer en quoi ce qu'observe un entraîneur est différent ou similaire de ce que mesure un scientifique, ajouterait une plus-value à la compréhension de l'expertise sportive. En somme, l'interrogation du savoir expert constitue une source complémentaire de connaissances pouvant être utiles à la compréhension de l'activité d'un sportif, notamment des contraintes clés dans l'interaction sujet-environnement (Greenwood et al., 2013).

C'est pourquoi, analyser l'écart potentiel entre les connaissances expertes des coaches et les connaissances scientifiques existantes nous semble pertinent. En effet, le métier de coach ne nécessite pas le développement de compétences propres à l'utilisation d'outils d'analyse du mouvement. En pratique, les coaches réinvestissent dans leurs séances des savoirs basés sur leurs connaissances théoriques, mais ne consacrent pas de temps à mesurer des variables, vérifier des hypothèses scientifiques à partir d'expérimentations. Leurs connaissances de l'activité et leurs facultés à analyser ce qu'ils voient certifient une compétence indispensable de l'entraîneur (Rolland & Cizeron, 2011). L'apport de connaissances scientifiques, en complément de ce savoir faire professionnel, contribuerait à perfectionner la conception de séances d'entraînement ou d'apprentissage, leurs interventions et régulations pendant l'entraînement. Il y a donc un véritable enjeu à opérationnaliser ce lien entre scientifiques et coaches, pour mettre en relation des savoirs pratiques et scientifiques. En l'occurrence, afin d'améliorer la compréhension du scientifique au sujet de l'activité globale du joueur, il est intéressant de questionner les connaissances employées par les entraîneurs (Greenwood et al., 2012). Par exemple, Greenwood et al (2013) ont expliqué, à travers l'analyse des propos des entraîneurs (de cricket, gymnastique et d'athlétisme), que la perception de la ligne au sol ou du butoir lors de la course d'élan était en lien avec trois facteurs. Tout d'abord, la perception de la position de la délimitation à ne pas dépasser

constituait le premier élément mis en avant par les entraîneurs. Les entraîneurs considéraient qu'au moment de sauter, les athlètes ne devaient pas regarder la cible. En effet, la position avec la tête fléchie, le regard fixé au sol desservait la performance. C'est pourquoi, les entraîneurs estimaient que l'athlète faisait appel à sa vision périphérique et repérait une référence verticale perpendiculaire au déplacement (arbitre, juge par exemple) qui lui permettait de prédire le temps de pré-contact. Des repères au sol, lors de la course d'élan, apparaissaient également comme d'autres indices perceptifs pouvant contraindre la course d'élan de l'athlète. À travers leurs analyses, les auteurs défendaient l'idée que le savoir expert constitue une richesse permettant de guider des recherches appliquées ou des pratiques pédagogiques, en envisageant la manipulation de contraintes influençant la vision périphérique.

Interroger le savoir expert nous semble constituer un levier fort intéressant pour générer de nouvelles connaissances issues de la mise en relation entre savoirs contextualisés experts d'entraîneurs et savoirs scientifiques. Le travail, effectué par Thompson, Bezodis, & Jones (2009), illustre nos propos. Ils ont mené une recherche qualitative portant sur la perception qu'avaient les coaches experts des paramètres influençant la performance en sprint en athlétisme. Après analyse, des entretiens par comparaison constante et atteinte de la saturation théorique, les auteurs ont catégorisé les savoirs des coaches autour de quatre rubriques : « posture », « hip position », « ground contact » et « arm action ». Ils ont détaillé chacun de ces éléments à la lumière des propos des coaches, pour ensuite retrouver ou non des échos dans la littérature concernant les aspects techniques du sprint en athlétisme. En revanche, Thompson et al. (2009) ont mis en avant un réel besoin de recherches supplémentaires concernant l'utilisation des bras dans le sprint en athlétisme. En effet, le rôle des bras dans le sprint faisait l'objet de connaissances divergentes chez les coaches : certains estimaient qu'ils avaient un rôle équilibrateur subordonné au mouvement des jambes, tandis que d'autres considéraient que les bras influençaient directement la vitesse des jambes. De telles divergences pointent la nécessité d'un approfondissement scientifique permettant de répondre aux besoins pratiques des entraîneurs. Ces études révèlent également que les entraîneurs se réfèrent parfois à des « *connaissances approximatives ou fausses d'un point de vue scientifique, épurées et directement utilisables sur le terrain* » (Rolland & Cizeron, 2011, page 54). Les auteurs s'appuient sur la compréhension de concepts mécaniques qu'ont les intervenants, et sur la façon dont ils la retranscrivent. Ainsi, les entraîneurs utilisent des images métaphoriques pour exprimer ce qu'est le concept d'énergie : « une substance fluide

susceptible de circuler dans le corps » ou le « bâton articulé » permettant de faire circuler cette énergie grâce au gainage du corps. Dans cette étude, les auteurs montrent que les entraîneurs utilisent des « working knowledge » ou connaissances ouvragées (concept développé en premier par Kennedy en 1983). Ces connaissances sont directement en lien avec le métier de l'individu, elles « *portent les marques du travail (...) sont façonnées par l'expérience de travail, et se transforment au fil des modifications des contraintes de situations de travail* » » (Rolland & Cizeron, 2011, page 54). Il y a donc un double intérêt à analyser les connaissances des entraîneurs experts : (a) formuler des savoirs professionnels impliqués dans la réalisation adaptée d'une tâche, et (b) concevoir des dispositifs de formation basés sur la rencontre des savoirs pratiques et des savoirs scientifiques issus de protocoles parfois éloignés de la pratique (Rolland & Cizeron, 2011).

En outre, les coaches réinvestissent dans leurs séances des savoirs basés sur leurs connaissances théoriques, qu'il est intéressant de questionner pour améliorer la compréhension globale de l'activité du joueur (Greenwood et al., 2012). Etudier le fondement des connaissances des entraîneurs, la manière dont elles sont entretenues et utilisées, paraît profitable aux scientifiques comme aux entraîneurs. Cette analyse réflexive permet d'appréhender le rapport entre les entraîneurs et les savoirs scientifiques. Prenons l'exemple de la biomécanique : cette discipline permet d'apprécier l'action d'un sportif en analysant des variables mécaniques telles que des mesures électromyographiques, cinématiques ou cinétiques (Gal-Petitfaux, Adé, Poizat, & Seifert, 2013). Les résultats obtenus sont communiqués, exploités par les scientifiques et contribuent à la construction des savoirs. Toutefois, porter son attention sur la manière dont les entraîneurs utilisent ces connaissances permettrait d'éclaircir le rapport entre la subjectivité de l'empirisme et l'objectivité de la mesure. Cette remarque soulève deux réflexions. La première est relative aux connaissances des entraîneurs : quelle attention portent-ils aux savoirs scientifiques, quelles connaissances biomécaniques spécifiques à leur activité ont-ils, comment peuvent-ils formuler des critères d'expertise liés à la performance (longueur de déplacement, fréquence des foulées, mouvement angulaire articulaire, vitesse de déplacement, etc.)?

Le second point de réflexion concerne la représentativité de la mesure biomécanique. En effet, pour que les mesures biomécaniques soient utilisées par les entraîneurs, il faut qu'elles fassent sens dans la réalité de la pratique. Cela suppose de s'assurer d'une « représentativité » de la conception des protocoles de recherche au regard des spécificités techniques et environnementales de la production de performances sportives en compétition

ou à l'entraînement (Araujo, Davids, & Passos, 2007). Araújo et al. (2007) estiment que la représentativité de la conception d'un protocole reflète la pertinence des mesures. Ne pas tenir compte de la dimension environnementale, lors de la production d'une performance sportive en compétition ou d'un apprentissage, peut engendrer des biais dans l'utilisation des résultats obtenus. Effectivement, si la mesure, et par extension, les connaissances apportées par la discussion des résultats sont uniquement spécifiques à la conception de l'expérimentation, nous pouvons en questionner l'intérêt. En effet, les résultats obtenus peuvent être uniquement liés à la particularité du protocole et altérer la compréhension d'une performance ou d'un apprentissage visé. En d'autres termes, l'athlète peut adopter un comportement lui permettant de réussir la tâche expérimentale, mais n'étant pas pour autant fonctionnel en situation de compétition ou d'apprentissage (Araújo et al., 2007). Par exemple, en natation, le MAD-system (Measurement of Active Drag, Toussaint, Van der Meer, De Niet, & Truijens (2006)) est employé pour évaluer, en crawl, les forces propulsives produites par le nageur sous l'eau. À chaque mouvement de bras, le nageur prend appui sur une cale. Une distance fixe sépare chaque cale, et la mesure enregistrée correspond à la force enregistrée par les capteurs de pression en contact avec la main. Le fait d'imposer une distance séparant chaque pad semble, de prime abord, une contrainte suffisamment importante pour modifier la coordination du nageur. Gal-Petitfaux et al. (2013) ont montré que le Mad-system influence la coordination des nageurs à vitesse lente. C'est en couplant des paramètres objectifs (forces enregistrées) et subjectifs (entretiens avec les nageurs) que le MAD-system apparaît comme inadapté à la mesure de forces propulsives à vitesse lente. En effet, les témoignages des nageurs révèlent une modification de la coordination des bras lors de la nage. Ainsi, à vitesse lente, le MAD-system mesure l'application de forces liées au protocole d'évaluation et donc non représentatives de la réalité. Cependant, à vitesse élevée, Gal-Petitfaux et al. (2013) notent des points de division entre la mesure mécanique et la perception subjective du sujet. En effet, les nageurs ont l'impression d'avoir une poussée faible, tandis que le MAD system relève des forces de poussées importantes. Il y a un décalage entre la mesure objective et le ressenti subjectif de l'individu. Concernant l'influence du MAD-system sur la coordination du nageur, Schreven, Toussaint, Smeets, & Beek (2013) affirment, qu'à vitesse sous-maximale, la distance entre les pad n'affecte pas la mesure de la poussée. Faire appel à la subjectivité du pratiquant aide à la compréhension de la complexité de l'activité. La difficulté, pour concevoir un protocole de recherche se voulant représentatif de l'activité, se trouve dans l'identification des éléments clés de l'environnement et des indices perceptifs utilisés par

l'individu qui contraignent fortement l'action. Greenwood et al. (2013) intègrent, lors d'une expérimentation, des éléments évoqués par les entraîneurs pour conserver le « representative design training » de la situation. En somme, étudier le fondement des connaissances des coaches, la manière dont elles sont entretenues et utilisées paraît profitable aux scientifiques comme aux coaches. Nous inscrivons notre recherche dans cette logique, puisque nous souhaitons, sur la base des propos d'entraîneurs recueillis, déterminer les paramètres identifiés comme clés de l'expertise en patinage avant et concevoir un protocole de recherche avec le souci de représentativité de la tâche.

Après plusieurs discussions informelles avec des professionnels du hockey sur glace français, le constat empirique fut le suivant : le niveau de patinage des joueurs de hockey sur glace français ressort comme une variable explicative de l'écart de niveau de cette nation avec les autres. Le manque de connaissances scientifiques sur les caractéristiques des hockeyeurs français pourrait peut-être expliquer cet écart. Aussi se pose la question des connaissances scientifiques dont disposent les coaches pour faire progresser et pour analyser le patinage des joueurs français. En effet, la majeure partie de la littérature concernant le hockey sur glace est nord-américaine ou scandinave. Il paraît donc intéressant d'analyser dans quelles mesures le savoir des coaches experts français est en accord avec les connaissances scientifiques existantes dans la littérature. L'écart de niveau de patinage entre les joueurs français et les meilleurs joueurs mondiaux étant présenté par les coaches français comme la première variable explicative, notre étude a pour objectif de faire état du degré de concordance entre les connaissances des coaches français et les études biomécaniques relatives à la cinématique du patinage avant. Cette étude est intéressante à double titre : elle permet de mettre en perspective la relation entre les savoirs d'entraîneurs et de scientifiques, et de questionner la représentativité écologique des connaissances biomécaniques. Cette comparaison de connaissances peut permettre de déboucher à la fois sur des perspectives de formation scientifique des entraîneurs et sur des perspectives de collaborations plus fécondes entre entraîneurs et chercheurs (e.g., conception de protocoles d'analyse biomécanique représentatifs de l'activité et répondant à de réelles problématiques scientifiques et pratiques).

Nous supposons que l'analyse des connaissances ouvragées des entraîneurs de hockey sur glace offrira une précieuse aide pour comprendre les indicateurs de performance en patinage. Considérons les indicateurs de performance comme « une sélection, ou une combinaison, de variables d'actions dont l'objectif est de définir une partie ou l'ensemble de la performance » (Hughes & Bartlett, 2002). En mettant en relation les indicateurs de

performance avec les études menées en recherche appliquée, nous cherchons à comprendre comment cela peut aider à concevoir un protocole de recherche représentatif de la tâche garantissant une validité écologique et offrant la possibilité de généraliser les résultats à la communauté des entraîneurs.

Méthode

Participants

Dix entraîneurs masculins professionnels français ont été volontaires pour participer à cette étude. Ils étaient âgés de 28 à 55 ans (MD=35,1, SD=7,9). Ces entraîneurs ont été recommandés par la Fédération Française de Hockey sur Glace (FFHG) et invités par e-mail à participer à l'étude anonymement. Il s'agissait de coaches de niveau national ou international ayant suivi une formation professionnelle validée par le Ministère de la Jeunesse et des Sports en collaboration avec la FFHG. Ils occupaient soit un poste d'entraîneur professionnel d'une section sport étude ou d'équipe professionnelle, soit un poste de cadre au sein de la FFHG (entraîneurs des équipes nationales par exemple). Ils exerçaient depuis plus de 10 ans et avaient auparavant pratiqué le hockey sur glace en tant que joueur avec un niveau allant d'une participation aux compétitions jeunes internationales à un engagement compétitif en ligue professionnelle française. Ils répondaient enfin aux critères les qualifiant d'experts, à savoir : a) s'investir de façon délibérée dans l'entraînement, depuis au moins dix ans, b) entraîner des athlètes de haut-niveau (i.e., niveau national ou international), c) être reconnu par ses pairs comme compétent pour développer la pratique élite du hockey, d) participer aux formations fédérales et témoigner d'un recul sur sa pratique (Côté, 1999; Côté et al., 1995; Smith & Cushion, 2006; Thompson et al., 2009).

Collecte des données

Les verbalisations des entraîneurs ont été recueillies lors d'entretiens semi-directifs. Les entretiens ont été conduits par l'auteur principal qui avait une expérience de préparateur physique avec des hockeyeurs en équipe juniors élite championne de France. Cette expérience a été utile pour entretenir des relations privilégiées avec les interviewés, discuter avec un vocabulaire commun et interpréter les réponses d'entraîneurs. Les entretiens se sont déroulés sur la base d'un guide d'entretien, conçu à la suite de la réalisation de trois entretiens exploratoires avec des entraîneurs professionnels. Ces entretiens exploratoires ont permis d'ajuster le guide d'entretien et de construire les premières suppositions théoriques (Birks & Mills, 2011). Le guide d'entretien a ensuite été utilisé durant les dix entretiens conduits pour cette étude.

Les entretiens se sont déroulés, conformément au guide d'entretien, suivant trois étapes englobant quatorze questions. Dans un premier temps, nous avons questionné les entraîneurs sur leur conception globale du hockey sur glace. Dans un deuxième temps, les questions concernaient la place du patinage dans la formation et la performance du hockeyeur. La troisième partie de l'entretien était consacrée à la description de la cinématique du patinage avant. Au cours des entretiens, les questions étaient ouvertes et les relances s'inscrivaient dans la continuité du discours de l'interviewé, permettant d'approfondir les points abordés par les entraîneurs (Côté, 1999). Ce mode de questionnement donnait à ces entretiens une certaine souplesse, permettant de les adapter au contexte et à la singularité des personnes interviewées.

Les entretiens ont duré entre 40 minutes et 75 minutes. Selon l'intérêt porté ou non à l'aspect technique du patinage, les réponses des entraîneurs étaient plus ou moins longues. Tous les entretiens ont permis d'aborder l'ensemble des questions préalablement définies.

Analyse des données

Le logiciel NVivo (QSR NVivo 10) fut utilisé pour organiser les données dans des catégories principales et pour ajuster au fur et à mesure du codage la pertinence de la construction de ces catégories. Le codage a consisté en une décomposition du discours des entraîneurs en unités de sens (« meaning units »). Dans le cadre de recherches qualitatives, notamment celui des théories ancrées, ce concept clé est défini par Tesch (1990, p. 116) comme : « a segment of text that is comprehensible by itself and contains one idea, episode, or piece of information ». C'est en analysant les retranscriptions d'interviews que nous avons identifié les unités de sens (Saury & Durand, 1998; Sève & Poizat, 2006). La comparaison et l'examen systématique des similarités et des différences entre les éléments retenus ont permis progressivement de construire des catégories de différents rangs (Corbin & Strauss, 1990; Côté, 1999; Thompson et al., 2009). Une catégorie n'était cependant établie que lorsqu'au moins deux coaches partageaient des unités de sens renvoyant à une même idée (Phillips et al., 2010). Par exemple, en réponse à la question : « Comment décrivez-vous un joueur qui patine ? », le coach J a exprimé au cours de l'entretien le fait que « le tibia touche la languette du patin ». Le coach D a expliqué qu'il décrivait ainsi la position à ses joueurs : « t'es en position debout, tu as les jambes droites, et comme si tu allais tomber à genoux devant, tu retiens (la chute) on va dire à 70°-65°, tu vois ? ». Les deux coaches ont souligné l'importance d'une inclinaison du joueur vers l'avant. En parcourant les autres interviews, nous avons isolé les segments de propos en lien avec cette inclinaison du joueur vers l'avant et constitué une

sous-catégorie « Inclinaison du buste vers l'avant » qui a elle-même pris part dans une catégorie de rang supérieur : la position du joueur. Au fur et à mesure de cette analyse, la catégorisation des unités de sens a conduit à la formation de trois catégories de rang supérieur, reflétant les grandes catégories de connaissance des coaches, relatives à l'analyse du mouvement de patinage avant des hockeyeurs. La progression dans l'analyse des entretiens a mis en exergue une redondance des connaissances apportées dans les réponses et l'absence d'apports théoriques supplémentaires, nous autorisant à conclure que le stade de saturation théorique était atteint (Holt & Tamminen, 2010; Weed, 2009). Enfin, après l'analyse des entretiens, une synthèse a été envoyée à chaque entraîneur leur offrant la possibilité de discuter le bilan. Chacun a validé la présentation des résultats ainsi que la discussion. Pour garantir la fiabilité des résultats, après une catégorisation initialement réalisée par le premier auteur, deux co-auteurs ont relu les données brutes et validé l'élaboration des unités de sens. Ils ont ensuite comparé leurs analyses et vérifié l'organisation correcte des unités de sens dans chaque catégorie et sous-catégorie. Un consensus entre tous les auteurs a été trouvé afin de certifier de la bonne position des unités de sens de la catégorie principale aux indicateurs de performance (Greenwood et al., 2012, 2013).

Résultats

D'après les entraîneurs, les joueurs doivent être en mesure d'observer le jeu, gagner de la vitesse et maintenir leur équilibre pendant qu'ils avancent. Se déplacer vers l'avant est une composante d'une tâche complexe « être performant en jouant au hockey ». Comme énoncé par les coaches, patiner vers l'avant est une tâche qui dépasse le fait d'aller d'un point A vers un point B. Patiner doit permettre une constante adaptation à la dynamique du jeu.

Coach B : « Patiner vite et droit est une bonne chose, mais il faut être capable de faire de petits virages pour repartir dans un sens opposé suivant l'évolution du jeu ».

L'expertise des entraîneurs réside dans leur habilité à détecter, analyser, améliorer, corriger toutes les compétences des joueurs qui émergent simultanément pendant un match. Ils ont besoin d'indicateurs de performance permettant de gérer la complexité de la tâche. Trois grandes catégories de connaissances à propos du patinage avant ont émergé : (a) la posture du hockeyeur, (b) l'action des bras, et (c) la cinématique des membres inférieurs. Le tableau 3 en fait la synthèse.

Tableau 3. Catégorisation des propos des entraîneurs en fonction des paramètres techniques clés du patinage avant

	Catégories principales	Sous-catégories	Indicateurs de performance
Cinématique du patinage avant	Posture du hockeyeur	La recherche de stabilité Inclinaison du buste vers l'avant	- Flexion hanches/genoux/chevilles entre le 1/2 et 1/4 de squat - Répartition du « poids du corps » - Sur un pied pendant le patinage - Projection du CdG en avant - Alignement Epaule/genou/orteils - Les fesses au-dessus des talons
	Action des bras	Optimiser la propulsion, S'équilibrer et Orienter le mouvement Timing de synchronisation avec le mouvement des membres inférieurs. Influence de la crosse et du palet	- Les bras légèrement en oblique vers l'avant / pas de balancier gauche/droite - Les bras bougent d'avant en arrière - Coordination spécifique bras/jambes : quand la propulsion se termine à droite le coude droit est en extension en direction du déplacement, le coude gauche est en flexion vers l'arrière - Maintenir la crosse en contact avec la glace autant que possible - Coordination Bras/jambes modifiée par la conduite du palet
	Cinématique des membres inférieurs	Démarrage Glisse Propulsion latérale Recouvrement	- Concerne les 3 premières foulées - Ouverture des pieds « en canard » (90°) se réduit progressivement - Fréquence importante de mouvement - Ne pas perdre de vitesse - Influence de l'affûtage - Le pied support guide / Cheville stable - Un membre glisse / l'autre propulse ou assure le retour - Ouverture de pied à environ 45° lors de la propulsion - Extension complète : Alignement hanche/genou/cheville/pointe de pied - Ouverture de hanche - Le plus rapide possible - En ligne droite ou semi-circulaire - Désaccord sur l'utilisation de la carre en fin de recouvrement

La posture du hockeyeur

La posture du joueur a particulièrement retenu l'attention des coaches. Celle-ci associe la recherche de stabilité et la flexion avant du buste.

La recherche de stabilité. Les entraîneurs ont estimé que pour être performant, le joueur devait se placer dans une position dite « position de base ». Ils identifiaient cette position sur la base, (a) de la position des hanches, genoux et chevilles du hockeyeur, (b) de la flexion du tronc, (c) de la projection du centre de gravité (CdG), et (d) du redressement de la tête. Tout d'abord, les coaches considéraient que les bons patineurs devaient se trouver dans une position comprise entre le 1/4 et le 1/2 squat (i.e., flexion de genou comprise entre 140° et 80°). Selon eux, cette position assure au joueur la possibilité de réguler les déséquilibres rencontrés en patinant. Le fait de fléchir les genoux et les chevilles permettrait également de développer une force importante lors de l'extension complète du membre inférieur propulseur. Les coaches considéraient que le joueur devait conserver cette position tout au long du mouvement : les hanches, chevilles et genoux non propulseurs restent fléchis pendant que le buste est droit, gainé. Selon les entraîneurs, cette position devait permettre la prise

d'informations, c'est pourquoi ils ont insisté sur la nécessité de redresser la tête, ainsi que l'illustre l'extrait suivant:

Coach J : « Les indices d'observation de la position de base sont : les patins écartés à la largeur des épaules, les jambes fléchies à 90°, la crosse est tenue à une ou deux mains, la tête haute qui regarde devant ».

Les entraîneurs considéraient également que les hockeyeurs devaient préserver leur équilibre en opérant une « balance » ou un « transfert du poids du corps » sur la jambe d'appui à chaque pas de patinage. Les coaches ont dit corriger les jeunes joueurs, moins expérimentés, effectuant des mouvements qualifiés « de piston », c'est-à-dire, manifestant une tendance à se redresser verticalement avant de fléchir à nouveau la hanche et le genou. Ils ont identifié ce comportement comme non fonctionnel et ne favorisant pas la prise de vitesse, car la poussée suivante se fait avec une extension du genou moins importante que celle de la poussée précédente. Cette préoccupation s'illustre à travers les propos du Coach F :

« Il faudrait peut-être l'observer plus précisément avec une analyse vidéo (...), je me concentrais sur l'aspect vertical (dans la description) : il faut supprimer ce défaut qui est d'avoir ce mouvement de piston de haut en bas ».

En somme, du point de vue des entraîneurs, la « position de base » permettrait d'assurer une propulsion efficace et un maintien optimal de l'équilibre. Dans le cadre du patinage avant, cette position se retrouverait majoritairement sur un pied. L'idée est alors de conserver cette position à chaque retour de patin. Pour les entraîneurs, la difficulté de la tâche est de synchroniser le transfert d'appui d'une jambe vers l'autre au moment où le patin terminant son retour touche la glace.

Une position penchée vers l'avant. Les coaches ont décrit la « position de base » optimale ainsi : les pieds sont écartés d'une largeur comprise entre celle des hanches et celle des épaules, la projection du Centre de Gravité se fait légèrement en avant à l'intérieur de la zone entre les deux lames de patins. Les indicateurs donnés par les entraîneurs étaient : « les fesses au-dessus des talons » ou les « épaules, genoux et orteils sont alignés ». Pour eux, le « buste penché vers l'avant » provoquerait un déséquilibre avant favorable à la mise en mouvement et à la prise de vitesse comme l'a déclaré le coach D :

« La position fléchie vers l'avant, [...] l'objectif est de mieux se propulser vers l'avant. Le poids du corps ne doit pas être dans le dos. Les fesses sont au-dessus des talons des patins, le dos penché vers l'avant ».

L'action des bras

Selon les coaches, l'action des bras est associée à: (a) l'optimisation de la propulsion, le maintien de l'équilibre et l'orientation du déplacement, et (b) la manipulation de la crosse et la conduite du palet lors du déplacement.

L'optimisation de la propulsion, le maintien de l'équilibre et l'orientation du déplacement. Les entraîneurs ont attribué au mouvement des bras les fonctions précédemment citées. Ils ont longtemps enseigné à leurs joueurs de balancer leurs bras de gauche à droite lors du patinage avant. Actuellement, la majorité des coaches ont déclaré enseigner le patinage avec un mouvement de balancier des bras d'avant en arrière, dans l'axe de déplacement du joueur, comme l'a souligné le coach F :

« Les bras vont d'avant en arrière et non de gauche à droite. La coordination se fait dans le sens du mouvement. Le bras libre est en extension lorsque la jambe opposée est en extension, une légère rotation du bras tenant la crosse permet de maintenir la crosse dans l'axe antéro-postérieur ».

Cependant, deux coaches ont précisé que le mouvement des bras devait se faire d'avant en arrière légèrement oblique :

« Le positionnement des bras en marche avant se fait par l'intermédiaire d'un mouvement de balancier d'avant en arrière avec les bras tendus en diagonale. La poussée étant latérale, le mouvement des bras va légèrement en dehors de l'axe antéro-postérieur mais le mouvement doit quand même se faire vers l'avant », Coach D.

Nous remarquons que les coaches ont des opinions différentes, ce qui soulève une intéressante question de recherche : comment traduire le mouvement en terme de coordination des membres inférieurs et supérieurs ? En suivant la description du coach D, l'efficacité du patinage serait liée à un mouvement du bras devant aller dans la même direction que celle de la poussée. Autrement dit, quand la poussée se termine à droite : le bras droit devrait être en extension et la main droite pointe dans la direction du déplacement de la jambe gauche. Le bras gauche devrait quant à lui être fléchi et en arrière pour augmenter la force de propulsion. En somme, l'ensemble des coaches se sont accordés à dire que le balancier de gauche à droite (technique usuelle dans le passé) n'était plus enseigné. Néanmoins, une minorité d'entraîneurs ont considéré la particularité de la poussée latérale en hockey sur glace comme contrainte guidant le mouvement des bras en diagonale.

La manipulation de la crosse et la conduite du palet lors du déplacement. Du point de vue des entraîneurs, l'action des bras est également dépendante de la conduite du palet avec la crosse. Ils ont déclaré demander à leurs joueurs de patiner en saisissant la crosse à une main, afin d'être en contact quasi-permanent avec la glace, lorsqu'ils ne possèdent pas le palet. Dans cette situation, les coaches ont admis que la crosse réduisait l'amplitude du mouvement du bras porteur, mais que cela libérait les mouvements de l'autre bras. En revanche, lorsqu'ils conduisent le palet, les joueurs doivent, selon les entraîneurs, manipuler leur crosse à deux mains :

« Lors du patinage sans le palet, on retrouve cette position de base mais la crosse est tenue à une main pour ne pas (trop) limiter l'amplitude du mouvement. Avec le palet, la crosse devra être tenue à deux mains pour contrôler le palet, le conduire vers l'avant », Coach B.

Les coaches ont constaté que la possession du palet rendait la coordination du mouvement des bras avec les membres inférieurs plus compliquée.

La cinématique des membres inférieurs

La cinématique des membres inférieurs est la catégorie la plus détaillée par les entraîneurs. Ils distinguent quatre phases permettant d'analyser la technique de patinage avant : (a) le démarrage, (b) la phase de glisse, (c) la phase de propulsion, et (d) le recouvrement.

Le démarrage. Selon les coaches, le démarrage est constitué des trois premières foulées. À ce moment, le joueur génère des poussées importantes afin d'accélérer le plus possible. Pour cela, l'ouverture des patins qui est jugée optimale par les coaches, est d'environ 90° (les coaches parlent métaphoriquement de « pieds en canard »). Pour eux, dans cette phase, le hockeyeur doit chercher à réduire les temps de retour et de glisse pour augmenter au maximum la fréquence du mouvement. Son buste est penché fortement en avant, pour générer un déséquilibre propice à la prise de vitesse comme le souligne le coach H:

« Il faut un démarrage rapide : la position de base débute avec les pieds à 90° par rapport à l'axe de déplacement. Progressivement cette ouverture se resserre pendant que la longueur des foulées augmente afin de gagner de la vitesse ».

D'après les entraîneurs, à la suite de ces trois premiers appuis, l'ouverture du pied se réduit et le joueur adopte progressivement la cinématique du patinage avant, respectant les deux phases caractéristiques réitérées à chaque pas : la phase d'appui (composée de la phase de glisse et de la phase de propulsion) et la phase d'oscillation (recouvrement).

La phase de glisse. Pour les entraîneurs, durant la phase de glisse, le joueur ne devrait pas perdre de vitesse, la jambe d'appui étant dans la configuration de la « position de base ». Cette position devrait permettre le maintien de l'équilibre ainsi que la conservation de la vitesse créée en « évitant les frottements ». Selon les entraîneurs, la stabilité de la cheville déterminerait l'orientation de la lame du patin de la jambe d'appui, donc la direction du mouvement du joueur pendant la phase de glisse. Pour les entraîneurs, cette orientation est importante car elle influence la capacité du joueur à changer de direction :

« La glisse sert le jeu. Elle intervient beaucoup dans les changements de directions (virages ou pivots) permettant de ne pas perdre de vitesse. La glisse ne crée pas de la vitesse mais est utilisée pour ne pas en perdre », Coach J.

La phase de propulsion. La propulsion succède à la glisse lorsque le patin termine son recouvrement et touche le sol. Pour les coaches, le transfert de poids à ce moment permet à la jambe d'appui, qui assurait la glisse, de devenir la jambe de propulsion. Les entraîneurs soulignent que, contrairement à un sprinteur, il est impossible pour un hockeyeur d'avancer en exerçant une poussée dans l'axe de déplacement, ce qui lui impose une ouverture de pied. Ils jugeaient, à cet égard, qu'un angle de 45° entre l'axe de déplacement et la direction de la lame du patin garantissait une poussée latérale optimale. Toutefois, ils ont précisé que des différences pouvaient être remarquées en fonction des caractéristiques singulières des joueurs. Pour évaluer une poussée efficace, les coaches se focalisent sur l'extension « complète » du membre inférieur, et l'alignement des différentes articulations (hanche, genou, cheville), ainsi qu'en témoigne l'extrait d'entretien suivant avec le coach I :

« La poussée est latérale ce qui nécessite une ouverture de pied suffisante d'environ 45°. Il faut vérifier que le joueur réalise bien une extension complète hanche-genou-cheville sur des poussées longues ».

Le recouvrement. Cette dernière phase concerne le moment où, lorsque l'extension complète a été réalisée, le joueur ramène son patin vers l'avant afin de transférer son poids sur ce patin. Pour les entraîneurs le retour du patin semble pouvoir se faire en ligne droite le plus près du sol ou en dessinant un arc de cercle :

« Le trajet du pied se fait suivant l'axe du corps, dessine un léger arc de cercle entre la poussée et le recouvrement. Lorsqu'on repose le pied, il est dans l'axe de la glisse. La lame orientée vers la direction souhaitée », Coach B.

La recherche du trajet le plus court, du temps de retour minimum était une priorité pour les entraîneurs dans cette phase. Ceux-ci ont noté que la fermeture de la hanche durant le retour contribuait au placement du patin en avant.

Deux points de vue émergent dans les entretiens concernant le touch down (i.e., le premier contact entre la lame et la glace). Pour une partie d'entre eux, le joueur devrait placer son patin légèrement en avant de l'autre appui et utiliser sa carre externe puis interne afin de créer une « deuxième poussée » grâce au changement de carres (technique utilisée en patinage de vitesse) :

« Le retour se fait sous le CdG à l'intérieur de la largeur des épaules, afin de pouvoir réaliser une deuxième poussée. L'amplitude du ramené de jambe influence la vitesse de déplacement », Coach G.

Pour une autre partie des entraîneurs, ce changement de carres engendrerait un risque de déséquilibre trop important. Ils préconisent que le joueur place son patin « sous le centre de gravité » en appui sur la carre interne, retrouvant la « position de base ». Nonobstant ces différences d'opinions, les entraîneurs étaient unanimes sur le fait que le retour du patin doive être le plus bref possible :

« Après l'extension complète, il faut amener le plus vite possible le pied dans une position de base pour pouvoir faire un transfert de poids et amorcer une nouvelle phase de poussée », Coach C.

Discussion

L'objectif de cette étude était d'analyser les indicateurs de performance des entraîneurs afin de les mettre en relation avec les résultats avancés en recherche appliquée, dans le but d'améliorer la conception des protocoles de recherche et d'ouvrir de nouveaux champs d'investigations. L'analyse des entretiens et la comparaison avec la littérature scientifique montrent que les coaches et les scientifiques s'intéressent aux mêmes paramètres du mouvement de patinage (cf. figure 12). Nous pouvons cependant catégoriser deux types de connaissances : (a) des connaissances opératives convergentes avec les connaissances issues des sciences du mouvement améliorant la compréhension de la tâche de patinage ; (b) des réflexions intuitives d'entraîneurs qui ouvrent de nouvelles perspectives de recherche.

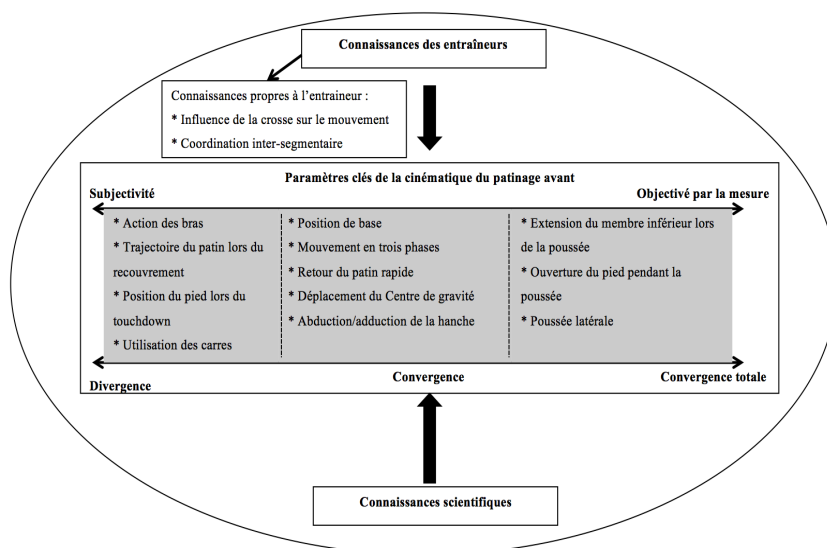


Figure 12. *Savoirs scientifiques et savoirs d'entraîneurs : complémentarité pour une meilleure compréhension de la tâche de patinage.*

Des connaissances opératives convergentes avec les connaissances issues des sciences du mouvement : enrichissement de la compréhension de la tâche

Pour détailler les paramètres clés de la cinématique du patinage, les coaches ont rarement employé de valeurs chiffrées, seulement quand nous leur avons directement demandé d'estimer l'angle d'ouverture du patin durant la poussée. En effet, c'est l'observation d'amplitudes articulaires ou des estimations de durée d'un mouvement qui guident leurs analyses. Ces éléments sont plus pertinents pour analyser l'activité du joueur dans un contexte de constante adaptation. Ils sont, par exemple, sensibles à « l'extension complète du membre inférieur lors de la poussée » sans fournir la valeur de l'angle du genou en fin de poussée, ou à un « bref retour de patin » sans précision sur le temps séparant le décollage du patin jusqu'au premier contact avec la glace. Les connaissances des entraîneurs transparaissent sous forme de métaphores (e.g., les « pieds en canard ») ou de formes gestuelles globales (e.g., une bonne poussée s'accompagne d'un alignement des segments). À l'instar des connaissances des entraîneurs de gymnastique (Rolland & Cizeron, 2011), les connaissances des entraîneurs de hockey sur glace, à propos du patinage avant, sont en lien direct avec la pratique et la formation des coaches, « bricolées » en « modèles mentaux » (Côté et al., 1995), exploitables dans l'instantanéité de la situation et fortement contextualisés. Dans leur activité, les entraîneurs emploient ce que Falzon (1991) appelle des « connaissances

opératives ». Ces savoirs sont propres à un domaine particulier et ont été développés à travers la pratique et l'expérience.

Une partie de ces connaissances opératives, ou modèles mentaux à propos de la cinématique de patinage, est en cohérence avec les connaissances scientifiques. Dans la littérature, un cycle de patinage démarre lorsque la lame initie son contact avec la glace jusqu'au prochain contact avec la glace (Upjohn et al., 2008). Le patinage est issu d'une alternance de phases d'appui (support phase) et de phases d'oscillation (swing phase). Les phases d'appui peuvent être réalisées sur un ou deux patins (Marino, 1977, 1983; Pearsall, Turcotte, Levangie, & Forget, 2014; Pearsall et al., 2000). Les coaches décrivent le mouvement de patinage comme très rapide et leurs connaissances opératives démontrent une cohérence avec le travail d'analyse cinématique développé en recherche appliquée. En effet, Marino and Drouin (2002) analysent l'évolution de la foulée (longueur et fréquence), de la vitesse, du temps de support en fonction de la fatigue. Ils mettent en avant une diminution de la vitesse de patinage (9,2 m/s puis 7,71 m/s et 6,97 m/s). Cette diminution s'accompagne d'une réduction de la fréquence de patinage (2,57 strides/s pour ensuite passer à 2,03 st/s et 1,97 st/s). Marino & Drouin (2002) affirment que l'effort musculaire nécessaire au maintien de la fréquence de patinage est trop dur à soutenir. Le patineur met plus de temps à ramener son patin. Ces résultats corroborent l'indicateur « temps de retour du patin le plus bref possible » énoncé par les coaches.

Fréquemment, les mesures objectives valident et ajoutent une plus-value aux propos des coaches, aux métaphores employées. Les paramètres identifiés comme explicatifs de la performance par les coaches convergent avec les analyses des chercheurs. La phase de propulsion est la phase du mouvement rassemblant le plus de concordance entre les descriptions de coaches et les études scientifiques. Cela témoigne d'un intérêt commun porté prioritairement sur la compréhension de la génération de force pour se propulser. Soulignons à cet égard, que c'est uniquement durant la description de la propulsion que les coaches ont fourni une valeur angulaire précise du mouvement.

Quand il est demandé aux coaches d'identifier une poussée performante, ils mettent en avant des « modèles mentaux » (Côté et al., 1995) du type : « une extension complète du membre inférieur » et une « poussée latérale ». Pearsall et al. (2000) considèrent que la propulsion débute en général au milieu de la phase d'appui unipodal. À l'instant où la cuisse termine sa rotation externe, les extensions de hanche et du genou débutent. Le patin qui effectuait son retour entre en contact avec la glace, ce qui permet au membre propulsif

d'exercer une poussée sur la glace en combinant extension du genou, extension et abduction de la hanche ainsi qu'une flexion plantaire de la cheville (Pearsall et al., 2000). Selon Bracko (2004), la poussée se caractérise à la fin par un alignement genou, hanche et épaule. La comparaison de la cinématique de patinage de joueurs de différents niveaux, réalisée par Upjohn et al. (2008), confirme l'idée que l'amplitude de mouvement des membres inférieurs détermine la performance. L'efficacité d'une « extension complète des membres inférieurs » est donc largement corroborée par les mesures biomécaniques (voir Marino, 1983; McPherson, Wrigley, & Montelpare, 2004; Pearsall et al., 2000). Entraîneurs et chercheurs se focalisent sur les mêmes facteurs pour exprimer l'efficacité de la poussée. À travers cet exemple, nous constatons que les connaissances opératives des coaches sont généralisées par les recherches appliquées et illustrent le lien étroit entre ces différents acteurs.

Dans leurs descriptions du mouvement, les entraîneurs n'ont pas évoqué les groupes musculaires impliqués dans la génération de force. Ils n'ont pas abordé l'alternance des contractions musculaires au cours du mouvement, non pas par méconnaissance, mais par ce que cela ne leur a pas été demandé, et qu'ils n'ont spontanément pas évoqué cette thématique. Cependant, la connaissance de l'activité musculaire au cours de la poussée permet d'appuyer la pertinence des indicateurs de performance des coaches. En effet, le premier muscle responsable de la génération de force lors de la poussée est le grand fessier (Pearsall et al., 2000). Ce muscle est responsable de l'extension et de la rotation interne de la hanche (Pearsall et al., 2014; Upjohn et al., 2008). C'est ensuite une contraction du quadriceps et du triceps sural qui provoque une rapide extension du genou et une flexion plantaire de la cheville (Pearsall et al., 2014; Pearsall et al., 2000). Les mesures électromyographiques certifient l'implication des fessiers, quadriceps et muscles du triceps sural dans la génération de la poussée. Dans ce cas, les mesures électromyographiques certifient l'importance de l'extension du membre inférieur dans la locomotion sur glace et offrent aux coaches un appui scientifique supplémentaire à la compréhension de la production d'une poussée permettant d'orienter un travail de préparation physique, par exemple.

Les entraîneurs insistent sur la dimension latérale du patinage, Upjohn et al. (2008) démontrent que le mouvement ne se réalise pas uniquement dans le plan sagittal et que sa latéralité est fondamentale. Ces auteurs démontrent que les joueurs les plus compétents ont un mouvement latéral plus important : la largeur des foulées est plus grande, la foulée est orientée obliquement. De leur côté, les coaches estiment que deux éléments garantissent une poussée performante : un appui sur la carre interne et un angle avoisinant 45° entre la

direction du déplacement et la lame. Marino (1983) remarque que l'angle propulsif moyen de ses patineurs est de $40,5^\circ$. Pearsall et al. (2000) proposent un angle de propulsion de 45° , tandis que McPherson et al. (2004) relèvent un angle de 70° chez des jeunes patineurs. La variété des outils de mesure et des caractéristiques des participants expliquent des résultats différents concernant cet angle. Toutefois, l'obligation d'appliquer une force de poussée ne suivant pas l'axe de déplacement fait l'objet d'un consensus entre les biomécaniciens et les coaches.

Le mouvement du patin ne se limite pas à l'ouverture du pied. Pendant la propulsion, les coaches considèrent que le joueur utilise progressivement sa carre interne, en parallèle avec une flexion plantaire de cheville. Les recherches montrent que l'éversion du patin augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale au cours de la poussée (Lafontaine, 2007; Pearsall et al., 2014; Pearsall & Turcotte, 2001). Upjohn et al. (2008) montrent que la cheville est en constante éversion : au maximum à 15° lors de la poussée et descend ensuite jusqu'à 10° dans les derniers instants de retour du patin. Ces résultats diffèrent avec ceux obtenus par Pearsall et al. (2001). Upjohn et al. (2008) expliquent l'écart entre les mesures par l'emploi d'outils différents (analyse vidéo et électrogoniomètres). Malgré les différents résultats, la forte conviction des coaches, vis-à-vis de l'intérêt de l'utilisation du bord interne de la lame lors de la propulsion, concorde avec les recherches actuelles et encourage la poursuite de ces dernières.

Les autres phases du mouvement (i.e., le retour du patin et la glisse) sont décrites par les coaches à l'aide d'indicateurs visuels globaux de forme corporelle. Cependant, les résultats d'études biomécaniques corroborent et donnent une crédibilité à ces indicateurs subjectifs. En effet, les coaches caractérisent, par exemple, la phase de glisse par une position penchée vers l'avant assurant un équilibre et un maintien de la vitesse de déplacement orienté par le membre support. Cette position, qu'ils qualifient de « position de base » est crédibilisée dans la littérature, à travers les mesures de flexion du tronc, de hanche, de genou et de cheville. En effet, Pearsall et al. (2014) expliquent que durant le patinage rapide la hanche est plus fléchie que lors de la course ou de la marche. L'angle de flexion est d'environ 50° pendant la phase de glisse. Au cours de cette phase de glisse, la « position de base » décrite par les coaches est caractérisée de façon similaire par Bracko (2004) : l'écart entre les pieds est légèrement supérieur à la largeur des épaules, les chevilles sont en flexion dorsale, les genoux fléchis, le tronc fléchi, la crosse proche de la glace sans être obligatoirement en

contact avec. La position recherchée par les coaches et présentée par Bracko (2004), est une position fléchie. Les coaches utilisent des indicateurs tels que « les fesses au-dessus des talons » ou les « épaules, genoux et orteils sont alignés » pour évaluer la position fléchie du joueur. Ces indicateurs, et plus largement les connaissances ouvragées des coaches, offrent une aide importante aux chercheurs pour distinguer les variables directement impliquées dans la performance de patinage.

Les analyses biomécaniques ont fourni des valeurs objectives caractérisant cette position. Pearsall & Turcotte (2001) indiquent que l'angle de flexion dorsale de la cheville durant la phase de glisse évolue de $7,1^\circ$ (phase de single support) à $11,8^\circ$ (double support). Une légère éversion de la cheville (maximum $7,1^\circ$) s'ajoute au mouvement de flexion dorsale. À l'exception de la phase de poussée, la cheville se trouve majoritairement en dorsiflexion dans le mouvement de patinage (Pearsall et al., 2014; Pearsall et al., 2000). Les coaches recherchent également « un buste penché vers l'avant ». Pearsall et al. (2000) synthétisent la position du joueur au début de la phase de support à travers les mesures angulaires de la hanche (45°), du genou (90°) et de la cheville (en flexion dorsale et pronation).

Les coaches ont également insisté sur la « répartition du poids du corps ». À l'instar de la « position de base », les coaches se focalisent sur le mouvement du bassin. Ils ont une représentation visuelle du mouvement de balancier des hanches qui est estimé dans le plan frontal entre 25 et 50 cm en fonction de la fréquence de la foulée (Pearsall et al., 2000). Ce mouvement simultané des hanches est constitué d'une flexion latérale du tronc au-dessus de la jambe de glisse pendant que la hanche propulsive en rotation externe décale le tronc sur la jambe de glisse, permettant le transfert de poids. Les coaches ainsi que Bracko (2004), affirment que cette habileté à maintenir l'équilibre en plaçant le CdG en dehors du polygone de sustentation est une base déterminant la performance. Une coordination précise doit s'opérer entre le transfert du poids et l'ouverture de la hanche de poussée succédant à l'adduction de la hanche effectuant le retour.

Par ailleurs, la phase de recouvrement ou retour du patin dans une position initiale, s'opère une fois « l'extension complète du membre inférieur réalisée ». Les coaches jugent la compétence d'un patineur sur la base de la brièveté du retour et de la phase d'oscillation. Les analyses biomécaniques confirment cette appréciation (Marino, 1983; Pearsall et al., 2000; Upjohn et al., 2008). Bracko (2004) avance l'idée que la phase de single support est une phase de glisse accompagnée d'une légère décélération. Les meilleurs patineurs ont un retour de patins plus court (0,37ms) que les moins performants (0,48s). Stidwill, Pearsall, and Turcotte

(2010) enregistrent un temps moyen de foulée de 0,585s, un temps de contact de la lame sur la glace 0,354s et par déduction un temps de retour de 0,231s. Par ailleurs, l'observation de la cinématique du retour par les coaches et l'étude de Pearsall et al. (2000), s'accordent sur l'importance de la flexion et de l'adduction de la hanche (de 180° à 40° avec rotation interne), d'une flexion du genou (de 180° à 90°) et d'une dorsiflexion de la cheville couplée à une supination de cheville. Ainsi, sans qu'ils ne se réfèrent à des durées ou à des amplitudes de mouvement précises, les coaches font preuve d'une connaissance opérative pertinente de la cinématique du retour, au regard de la littérature scientifique.

Les indicateurs évoqués par les entraîneurs constituent un ensemble de connaissances « bricolées » (Roland & Cizeron, 2011). En effet, elles sont basées sur une relation étroite entre savoirs théoriques biomécaniques parfois approximatifs, connaissances de l'activité, « modèles mentaux » (Coté et al., 1995), sensations ou métaphores synthétisant un savoir utilisable directement dans l'entraînement du patinage et caractérisant les « practical knowledge » des entraîneurs experts (Saury & Durand, 1998).

Plusieurs réflexions spontanées ouvrant de nouvelles perspectives de recherches

Si une partie des connaissances opératives des entraîneurs sont convergentes avec les connaissances scientifiques, d'autres en revanche relèvent de réflexions spontanées reposant sur des connaissances biomécaniques parfois approximatives (Roland & Cizeron, 2011). Par exemple, le raisonnement d'une majorité de coaches se fonde sur le sens du déplacement du joueur pour justifier le mouvement des bras sans tenir compte de la latéralité de la poussée. Les entraîneurs ont identifié le mouvement des bras comme un paramètre clé du patinage sur glace mais éprouvent des difficultés pour décrire la coordination entre les bras et les jambes. En effet, le mouvement des bras et des jambes est rapide et difficile à fractionner. Cela doit pouvoir expliquer pourquoi la plupart des entraîneurs ont identifié le mouvement d'avant en arrière comme un indicateur de performance. L'analyse du mouvement des épaules, réalisée par Bracko (2004), utilise la troisième Loi de Newton (Bartlett, 2007) et suggère que la poussée exercée au niveau du contact lame-glace entraîne en retour une force de résistance du sol de même intensité, de même direction mais de sens opposé. Cette force permet au joueur d'avancer. Contrairement à la locomotion terrestre, le déplacement sur la glace fait appel à une motricité singulière, liée à la glisse sur une surface peu adhérente. De ce point de vue, exercer une poussée semblable à celle d'un sprinteur (i.e., d'avant vers l'arrière) est

inefficace. Au contraire, pour se propulser, il faut générer une poussée latérale vers l'arrière. En appliquant la troisième loi de Newton, il semble que le mouvement des bras contribue à l'augmentation de la Ground Reaction Force (GRF) quand il est réalisé d'avant en arrière mais également obliquement. La réflexion de Bracko (2004), à propos du mouvement des épaules, se base sur la troisième loi de Newton, et ne semble pas rejoindre les intuitions des coaches. En effet, il suggère que les épaules effectuent un mouvement alternatif d'adduction et d'abduction pour maintenir l'équilibre et augmenter la vitesse. Il présente ce mouvement « side to side » comme naturel. Autrement dit, lorsque le joueur pousse : le bras côté poussée est en avant (légèrement du côté controlatéral) pour équilibrer et guider, et le bras à l'opposé de la poussée va vers l'arrière pour augmenter la force de poussée. Une autre explication pourrait s'orienter sur un mouvement compensatoire des bras à la suite de l'évolution du moment angulaire pendant le patinage. En effet, la force de poussée génère une rotation des membres inférieurs, qui est compensée par le haut du corps, et un mouvement de contre-rotation sur le plan horizontal. Le manque d'études spécifiques à la cinématique du mouvement des bras peut justifier qu'il n'y ait pas de consensus concernant l'action des bras la plus appropriée pour améliorer la vitesse de déplacement au sein de la communauté des coaches. Les indicateurs de performance des entraîneurs sont formulés autour de la même variable (i.e., le mouvement des bras), mais ils avancent différentes opinions concernant la cinématique de ce mouvement. La confrontation de ces différentes opinions pointe le besoin d'un approfondissement des recherches concernant la coordination inter-segmentaire.

Les propos des coaches mettent également en avant la problématique d'utilisation de la crosse lors du patinage : prise à une ou deux mains, en contact permanent ou non avec la glace. Les entraîneurs ont conscience de l'importance de la contrainte de l'utilisation de la crosse dans le patinage. Les protocoles de recherches, comme celui de Upjohn et al. (2008), tiennent également compte de l'impact de cet objet sur l'organisation du mouvement de patinage puisque les participants se déplacent avec une crosse. Entraîneurs et chercheurs souhaitent conserver la validité écologique de l'activité en faisant patiner le joueur avec une crosse, mais à notre connaissance aucune étude n'a fait état de l'impact de l'utilisation de la crosse sur la coordination inter-segmentaire durant le patinage. C'est pourquoi, le manque d'études concernant la cinématique des bras et son rapport avec celle des membres inférieurs justifie le problème rencontré par les coaches pour décrire le mouvement. Scientifiques et coaches sont d'accord sur les rôles fonctionnels du mouvement des bras, mais un approfondissement scientifique et empirique des connaissances relatives à l'action des bras

dans la manipulation de la crosse est à envisager. Cet exemple démontre comment le fait de questionner des connaissances pratiques peut contribuer à améliorer la conception des protocoles de recherche, en poursuivant l'objectif de renforcer une base de connaissances visant à explorer l'influence que peut avoir le matériel sur le maintien de l'équilibre ou le déplacement sur glace.

Les résultats de notre étude pointent également des divergences entre coaches à propos de quelques éléments du mouvement : la trajectoire du patin, l'emplacement du touchdown, l'utilisation du bord interne ou externe de la lame. Concernant le trajet du patin, un manque de connaissances sur la cinématique du recouvrement restreint sa discussion. Il semblerait que la direction du trajet du patin soit oblique (Upjohn et al., 2008) et proche du sol (0,137m au-dessus de la glace d'après Marino (1983)). Ensuite, deux opinions s'opposent à propos de l'utilisation des carres et la position du patin lors du touchdown. Une partie des professionnels estime que le patin est posé « en avant du centre de gravité et en appui sur la carre externe », tandis que l'autre se représente la position du patin « sous le centre de gravité en appui sur la carre interne ». Quand les premiers argumentent en faveur d'une technique favorisant une propulsion plus importante à l'instar de la technique de patinage de vitesse, les seconds soutiennent qu'un appui sur la carre externe est impossible à réaliser au regard de la rapidité du mouvement, et qu'en revanche l'appui sur la carre interne garantit le maintien de l'équilibre. Ces réflexions sont uniquement fondées sur les expériences des entraîneurs, car aucune étude de biomécanique ne permet actuellement de répondre à cette question. En effet, Pearsall et al. (2000) préconisent un retour rapide du patin sous le corps. Marino (1983) évalue la distance horizontale entre l'orteil du touchdown et la projection verticale de la hanche à 0,26m. Il démontre en outre que l'effet de la fatigue amène un rapprochement du patin sous le corps lors du touchdown. De plus, McPherson et al. (2004) observent également chez les jeunes une rotation médiale de la jambe permettant de créer un angle propulsif entre la lame et la glace. Les protocoles mis en place semblent valider l'hypothèse d'une pose du pied « sous le centre de gravité en appui sur la carre interne ». Néanmoins, l'étude menée par Pearsall et Turcotte (2001) identifie une légère inversion de la cheville la faisant dépasser sa position neutre juste avant le touchdown. Cette observation irait dans le sens d'un appui léger sur la carre externe du patin. Upjohn et al. (2008) constatent que les joueurs de bon niveau ont un écart entre les patins plus important et orientent obliquement la lame durant le touchdown. Ainsi, les joueurs de meilleur niveau prennent appui sur une lame plus stable renforçant l'efficacité de la poussée. Toutefois, il n'est pas précisé si le joueur est en appui

majoritairement sur le bord interne ou externe de sa lame. L'argument de l'appui sur la carre externe couplé à un touchdown avancé est donc tout aussi pertinent, ce qui témoigne du besoin d'approfondissement des connaissances. La variété des outils de mesure employés dans ces études, qui produisent des résultats peu comparables entre eux, ne permet pas aujourd'hui aux entraîneurs d'avoir une idée précise des caractéristiques de la pose du patin lors du touchdown. La sollicitation des connaissances pratiques des entraîneurs confirme ici le besoin d'harmonisation des résultats de recherches à propos de la cinématique du mouvement de patin afin d'améliorer la performance sportive.

Finalement, deux perspectives de recherche ont émergé à l'issue de cette étude: (a) les entraîneurs experts sont intéressés par la mise en place de futurs programmes de recherches qui exploreraient les aspects inconnus de la biomécanique et alimenteraient en connaissances scientifiques d'actuelles intuitions, et (b) les chercheurs en sport ont besoin de concevoir des protocoles de recherche plus écologiques afin d'apporter de nouvelles connaissances à propos des caractéristiques de l'expertise, pour le moment encore inexplorées répondant à un besoin des entraîneurs.

Perspectives

Cette étude met en lumière la complémentarité entre les connaissances pratiques des entraîneurs experts et les résultats en recherche appliquée. Elle montre comment cette complémentarité peut construire une base plus importante de connaissances améliorant la compréhension du patinage avant en hockey sur glace. L'analyse des discussions avec les entraîneurs experts démontre que la majorité des indicateurs de performance sont supportés par la recherche en sport. Cette étude témoigne de la nécessité d'accorder du crédit aux entraîneurs pour améliorer la compréhension du mouvement expert en sollicitant et en regroupant un ensemble important de connaissances pratiques. Bien que les connaissances pratiques des entraîneurs ne respectent pas les critères de précision et de fiabilité requis dans le monde scientifique, cette étude montre clairement que les entraîneurs et chercheurs ont énormément à s'apporter. La biomécanique offre manifestement la possibilité de préciser et d'enrichir les connaissances des coaches, tout en leur permettant d'établir des connexions pertinentes entre leurs « modèles mentaux », essentiellement issus de leur expérience pratique, et les mesures objectives issues des recherches scientifiques. La mise en œuvre de recherches visant conjointement à produire des connaissances scientifiques valides, tout en étant pertinentes du point de vue de leur appropriation par les entraîneurs, est un enjeu crucial dans le domaine des « Sciences du Sport ». Celle-ci pose toutefois deux sortes de problèmes

étroitement liés. Le premier concerne la difficulté à faire en sorte que les entraîneurs donnent du sens aux connaissances scientifiques et aux mesures réalisées dans des conditions contrôlées, souvent éloignées des conditions écologiques de l'entraînement ou de la compétition. Le deuxième concerne la difficulté à assurer une représentativité des protocoles de recherche, pourtant fondamentale pour faire en sorte que les coaches et chercheurs en Sciences du Sport se retrouvent 'on the same page'. Ces réflexions ouvrent des perspectives de développement d'une articulation féconde et bidirectionnelle entre l'entraînement et la recherche, et d'une réelle collaboration entre chercheurs et praticiens.

Principaux résultats du chapitre :

L'analyse qualitative des « connaissances opératives » des entraîneurs a révélé qu'ils discriminent le patinage avant suivant trois catégories principales : la posture, la cinématique des membres inférieurs et les mouvements des bras. Ils font appel à des indicateurs de performances spécifiques à leurs connaissances pratiques.

Sur cette base, les entraîneurs évaluent l'expertise du patinage à travers : une posture stable (flexion importante de la jambe qui glisse pendant que l'autre pousse ou exécute le retour du patin) et inclinée vers l'avant. Concernant le mouvement des bras, les entraîneurs attribuent un rôle équilibrateur, d'orientation du mouvement et d'optimisation de la propulsion. Toutefois, la description de la coordination entre membres supérieurs et inférieurs ne fait pas consensus. Enfin, en ce qui concerne la cinématique des membres inférieurs, les entraîneurs font la distinction entre les trois premières foulées (servant à créer de la vitesse) et les suivantes (entretien de la vitesse avec l'utilisation progressive de la glisse). Ils confirment la spécificité de la propulsion sur glace qui implique une ouverture latérale de la hanche et du patin afin de générer une meilleure friction avec la glace pour avancer. Ils ajoutent la nécessité de retrouver une « extension complète » des membres inférieurs lors de la phase de poussée.

Enfin, d'après les entraîneurs, le patinage des joueurs les plus performants se caractérise par : une fréquence importante du mouvement, un temps de retour bref, la capacité à produire la même performance avec une crosse et sans crosse

Pour conclure, ces indicateurs de performance sont généralement en accord avec les recherches en biomécanique récentes. Lorsque ce n'est pas le cas, les entraîneurs expriment intuitivement des idées suggérant de nouvelles perspectives de recherche.

Chapitre 4. Effet de la manipulation des contraintes de tâche sur la locomotion des hockeyeurs

'Brunswick did not intend 'representative design to be restricted to a demand for representation of the « real world» (a meaningless concept) but intended it to refer to the extent to which the statistical properties of the laboratory task represent the statistical properties of the situation to which the results are to be generalized.'

K.R. Hammond. 1999.

L'introduction de ce chapitre présente l'effet de contraintes de tâche (crosse ou pas, palet ou pas, départ arrêté ou lancé) sur une locomotion cyclique et instrumentalisée : le patinage avant. Notre premier objectif est d'analyser l'effet de ces contraintes de tâche sur l'adaptation (entre stabilité et flexibilité) du comportement de l'individu et la performance (vitesse de déplacement). La stabilité et flexibilité du comportement seront appréhendées au niveau des paramètres superficiels (vitesse de déplacement, durée du cycle, fréquence des pas, force de poussée, temps d'appui et d'oscillation) et profonds (coordination entre les poussées des deux patins, place de la symétrie dans le patinage). Le second objectif portera sur l'effet de ces contraintes de tâche sur l'efficacité du patinage, évalué par la fluidité du déplacement du bassin (en particulier le jerk qui correspond à la dérivée troisième de la position). Nous présenterons une introduction commune aux deux études puis le traitement des données, les résultats et des éléments de discussion seront séparés dans la mesure où nous proposerons des contributions tant épistémiques que méthodologiques.

Introduction

En dépit de son apparente simplicité, la locomotion humaine demeure extrêmement complexe. Elle est le fruit d'une série d'interactions entre de nombreux facteurs qui visent notamment à réduire la dépense énergétique et le stress mécanique, à s'organiser en fonction des limites mécaniques d'un mode de coordination, à adopter un mode de coordination préférentiel plus pertinent au regard des interactions avec l'environnement (Byrne et al., 2002; Diedrich & Warren, 1995; Van Emmerik & Wagenaar, 1996; Wall, Nottrodt, & Charteris, 1981). Lorsqu'il s'agit par exemple de marcher, nous mettons en activité près de 50 muscles et plusieurs milliers d'unités motrices. La complexité de la marche réside notamment dans la capacité de l'humain à coordonner les deux membres inférieurs entre eux (i.e., coordination inter-segmentaire) tout en coordonnant les éléments d'un même membre entre eux (e.g., coordination intra-segmentaire entre la jambe et la cuisse) pour réussir à maintenir un équilibre vertical et une progression vers l'avant (Barela, Whittall, Black, & Clark, 2000; Clark & Phillips, 1993). Dans le cadre de cette étude, le patinage souvent présenté comme *'the most important skill for an ice hockey player'* (Pearsall et al., 2000; Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh, 2008) par les entraîneurs ou les scientifiques a suscité notre intérêt.

Une locomotion cyclique

Etudier le comportement du hockeyeur expert, dans une tâche de patinage sur glace, implique de s'intéresser à l'évolution du contrôle des paramètres profonds et superficiels sous l'effet des contraintes afin de réaliser la meilleure performance possible. Patiner en avant correspond à une habileté cyclique dans le sens où : « le mouvement d'un corps d'une place à une autre est causé par une répétition de séquences basiques (ou cycles) de mouvements du corps » (Hay, 2002, p. 258). Sur cette base, nous avons porté notre attention sur le contrôle du mouvement dans des habiletés cycliques (la marche, la course). Notre hypothèse est la suivante : le contrôle de certains paramètres profonds (coordinations émergentes en fonction des conditions) ou superficiels (fréquence, durée du temps d'appui, durée de l'oscillation) est variable sous l'effet des contraintes et transférable à l'étude du contrôle du mouvement en patinage. À ce titre, l'analyse des paramètres constitutifs d'un cycle de marche ou de course (i.e., les paramètres superficiels du comportement tels que la durée d'un appui, l'amplitude du mouvement) ou la mise en place d'une coordination sous l'effet de la dynamique des contraintes, rend intéressante notre approche de l'analyse du comportement expert : stable (i.e., résistant aux perturbations, présentant une importante reproductibilité sous l'effet de

contraintes proches) et flexible (capable de varier pour s'adapter à la dynamique des contraintes et garantir un même niveau de performance) (Warren, 2006). Précisons que nous considérons le comportement expert comme prioritairement orienté pour maintenir un haut-niveau de performance (ou d'efficacité, de précision suivant les domaines d'expertise) nécessitant une adaptation des paramètres du contrôle du mouvement pour répondre à l'évolution des contraintes. L'expert ne cherche pas à tout prix à être stable, mais lorsque les contraintes l'imposent, il modifie les D.D.L. pour maintenir une performance optimale.

Les études réalisées sur la marche se focalisant sur des paramètres superficiels du contrôle moteur (la fréquence (« le nombre de cycles mesurés par seconde (ou Hz), soit le nombre de cycles réalisés en un temps donné » (Hay, 2002, p. 258) et l'amplitude (la distance parcourue par le centre de gravité d'un individu durant un cycle)) révèlent une influence de la vitesse de déplacement sur le contrôle de ces paramètres. Analyser l'évolution des paramètres superficiels du comportement suppose de définir un cycle. Il se définit temporellement, sur la base de récurrences de points clés au fur et à mesure du mouvement. Grâce à l'utilisation de ces repères, il est possible de discriminer le début et la fin de chaque cycle et les différentes phases le caractérisant. Le cycle de marche est défini comme le temps s'écoulant entre deux contacts du talon du même pied (Kang et al., 2002; Li, Van Den Bogert, Caldwell, Van Emmerik, & Hamill, 1999). Il peut également être repéré entre deux décollages d'orteils du même pied (Clark & Phillips, 1993) ou encore comme le temps entre le premier amorti et le second de la même jambe (Barela et al., 2000). Une fois les points clés du mouvement déterminés, il est possible de segmenter le cycle en différentes phases. Par exemple, lors de la marche, nous pouvons diviser un cycle en phase d'appui (segmentée en trois parties : phase de double appui, phase de simple appui et phase de poussée) et d'oscillation (i.e., entre le décollage des orteils et l'amortissement du talon : le pied n'est plus en contact avec le sol) (Barela et al., 2000). Dès lors, il est possible d'étudier l'évolution de ces paramètres superficiels sous l'effet de contraintes différentes.

De nombreuses études réalisées en laboratoire sur tapis roulant ont examiné l'évolution des paramètres superficiels sous l'effet de diverses contraintes telles que : la fréquence du mouvement, la vitesse du mouvement, la longueur des foulées ainsi que le pourcentage de cycle dédié au double ou au simple appui, l'amplitude articulaire du genou (e.g., (Clark & Phillips, 1993; Kang, Chaloupka, Mastrangelo, & Hoffman, 2002; Van Emmerik & Wagenaar, 1996; Wall et al., 1981). À titre d'exemple, Wall et al. (1981) ont analysé l'évolution de la longueur et de l'amplitude des foulées sur un tapis incliné.

Concernant l'étude de Van Emmerik & Wagenaar (1996), elle s'intéresse à l'évolution de ces paramètres lorsque les allures de marche sont modifiées. Leurs résultats mettent en avant une augmentation de la longueur et de la fréquence des pas quand la vitesse augmente (e.g., une longueur de foulée de 0.6m à une vitesse de $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et 1.4m à une vitesse de $1.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; une fréquence de mouvement de 0.5 Hz et 1Hz pour des vitesses de $0.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $1.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectivement). D'autres auteurs, partageant l'approche par les contraintes défendue entre autre par Newel (1986) (pour plus de détails se référer au chapitre 1), ont manipulé les contraintes de tâches pour analyser l'effet de ces dernières sur les paramètres profonds et superficiels du contrôle moteur. C'est pourquoi, certaines études ont été conduites pour comprendre le poids de l'évolution de contraintes liées à l'organisme sur le pattern de coordination permettant la marche (e.g., effet de l'âge chez les patientes femmes Byrne et al., (2002), développement du système moteur et acquisition progressive de la marche (Clark & Phillips, 1993)). Clark & Phillips (1993) ont comparé la coordination jambe-cuisse lors de la marche d'enfants apprenant à marcher et d'adultes. Ils ont démontré que, dès trois mois d'expérience de la marche, une transition progressive s'opère d'une période d'instabilité vers un comportement stable similaire à celui d'un adulte. Les contraintes favorisant l'émergence de la marche bipède identifiées par les auteurs sont : le maintien de la posture érigée, l'augmentation de la force (en particulier concernant les muscles des membres inférieurs de l'enfant pour lui permettre de rester debout et d'avancer), la modification des relations entre les phases relatives des deux membres lors des trois premiers mois, le développement des muscles fléchisseurs de la cuisse.

Suivant la même logique, certains auteurs ont cherché à modifier les conditions dans lesquelles les sujets devaient marcher (i.e., les contraintes de tâche) afin d'analyser la dynamique des coordinations. Il fut, par exemple, envisagé d'étudier l'influence de l'inclinaison de la pente ($\pm 20\%$) sur la rotation du pelvis, dans le but de réduire les coûts énergétiques, quand la vitesse de marche augmente jusqu'à une vitesse de confort (Wall et al., 1981). Kang et al., (2002) se sont focalisés sur l'effet de l'augmentation de la vitesse de déplacement sur les paramètres cinématiques (i.e., longueur de foulée, fréquence du mouvement, les amplitudes articulaires des épaules, hanches et genoux, le coût énergétique) en fonction des genres des participants. Ils ont démontré que la longueur des foulées était plus importante chez les hommes quand la vitesse augmentait tandis que les femmes avaient une fréquence de mouvement supérieure à celle des hommes. C'est pourquoi, les résultats obtenus mettent en avant, pour une vitesse de $1.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, une longueur de foulée de 1.4m pour les

femmes et 1.5m pour les hommes et une fréquence moyenne de 60 cycles.min⁻¹ pour les femmes et 50 cycles.min⁻¹ pour les hommes (Kang et al., 2002). D'autres auteurs ont souhaité contraindre la marche en lestant une cheville du sujet pour perturber la marche (Barela et al., 2000; Byrne et al., 2002), en positionnant des obstacles sur le trajet (Stergiou, Jensen, Bates, Scholten, & Tzetzis, 2001), en réduisant la vitesse de déplacement et en reproduisant les conditions d'une hémiparésie (Barela et al., 2000), en augmentant la vitesse de déplacement du tapis roulant chez des marcheurs en bonne santé ou en situation de handicap pour observer les rapports de fréquence entre la coordination des bras et des jambes (Donker et al., 2001; Van Emmerik & Wagenaar, 1996; Wagenaar & Van Emmerik, 2000). Enfin, augmenter la vitesse de déplacement d'un individu conduit à une transition d'un pattern de coordination de marche vers celui de la course et réciproquement (Diedrich & Warren, 1995). C'est en analysant le paramètre profond du comportement de marche et en faisant varier la vitesse de déplacement que Diedrich & Warren (1995) ont démontré l'existence d'un intervalle de vitesse (compris entre 7,13 km/h et 7,88 km/h) à l'intérieur duquel tous les individus adoptent à la fois une coordination de type marche et de type course. Cette étude démontre le rôle fonctionnel de la flexibilité du comportement qui, sous l'effet de la dynamique des contraintes, assure le changement de coordination pour favoriser l'adaptation du comportement de l'individu à l'évolution de la tâche.

De nombreuses études ont été conduites sur l'analyse de la course à pieds en utilisant la modification des contraintes de tâches pour observer les différents modes de coordination. Par exemple, sur une surface ascendante Takano (1995) rapporte que la durée d'un cycle de course atteint en moyenne 0.69s ± 0.04s et en descente 0.70s ± 0.04s. Lorsque la vitesse de déplacement est modifiée par l'utilisation d'un tapis roulant, Diedrich & Warren (1995) rapportent une fréquence du mouvement de 1.25 Hz en moyenne à une allure de course de 2.17 m.s⁻¹. Pour conclure, concernant l'analyse de différentes formes de locomotions terrestres, il ressort que la vitesse de déplacement est un paramètre de contrôle important contraignant la coordination inter-segmentaire et la fréquence de cycle de marche ou de course. Cela ne se traduit pas par une fixation de longueur ou une fréquence de cycle en fonction d'une vitesse de déplacement spécifique mais, par le suivi du phénomène d'hystérésis (i.e., coexistence de deux patterns stables impliquant par exemple qu'il n'existe pas de passage instantané de la marche à la course (Bardy et al., 2007; Diedrich & Warren, 1995; Li et al., 1999; Van Emmerik & Wagenaar, 1996).

Selon Hay (2002), il est pertinent de s'inspirer de cette analyse de la locomotion cyclique (e.g., terrestre comme nous le retrouvons dans des activités type marche, course, cyclisme, patinage de vitesse, ski de fond ou des formes aquatiques telles qu'en natation, canoë, aviron) pour concevoir l'analyse du patinage avant. D'après cet auteur, quand un humain multiplie les essais d'une forme de locomotion cyclique avec une variété de vitesses et sans contrainte sur la fréquence du cycle ou la longueur de la foulée, la relation entre vitesse-fréquence et vitesse-amplitude a les mêmes caractéristiques que pour les autres formes de locomotions cycliques. Précisons cependant qu'envisager l'analyse à travers le prisme unique de l'évolution des paramètres profonds et superficiels des comportements permettant la locomotion sur terre est insuffisant. En effet, l'utilisation du matériel (e.g., le patin) en relation avec les propriétés de l'environnement (surface glissante) font émerger un paramètre n'existant pas dans la marche ou la course : la glisse. Ce paramètre superficiel du comportement permet au joueur (à l'issue d'un gain de vitesse) de poursuivre son déplacement sans générer de force à l'instar du nageur ou du kayakiste qui cessent de générer des actions propulsives et poursuivent leur déplacement sur l'eau. L'inertie plus importante dans ce type de locomotion nous conduit à porter notre attention sur l'effet de la vitesse sur ce paramètre superficiel propre au comportement du hockeyeur.

Se déplacer en respectant différentes vitesses de déplacement ressort comme une contrainte de tâche décisive dans le contrôle des paramètres superficiels et profonds du comportement de marche ou de course. Nous faisons l'hypothèse que cette contrainte de tâche a un effet transférable sur le contrôle du déplacement sur glace. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi de différencier les conditions de sprint. Les joueurs devront se déplacer le plus rapidement possible sur une distance de 20m, soit en démarrant arrêté derrière la ligne des 20m, soit après une prise d'élan en exécutant un virage. La locomotion sur glace se différenciant de la locomotion terrienne par l'exploitation d'une phase de glisse, nous supposons que les deux tâches nécessitent un contrôle différent de ce paramètre superficiel. Ce contrôle se manifestera au niveau de la variabilité des durées de phases de glisse exploitées par les hockeyeurs dans ces deux conditions (faible importance dans le départ arrêté et part conséquente dans la durée d'un cycle à la suite d'un départ lancé).

Une locomotion instrumentalisée

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1, l'activité du hockeyeur est fortement contrainte par l'équipement (patins, crosse, plastron, casque, etc.) et par l'ensemble des tâches

à réaliser (e.g., conduire un palet vers l'avant en résistant à la charge d'un adversaire). La locomotion, a priori cyclique du hockeyeur, nous semble alors sous l'effet d'importantes contraintes pouvant modifier les paramètres superficiels ou profonds mentionnés dans le précédent paragraphe. Sur cette base, nous avons porté notre attention sur l'effet produit par le matériel sur une locomotion terrienne cyclique : le cycle de ski de fond. Il s'agit ici de présenter l'effet du matériel sur les paramètres profonds et superficiels du contrôle moteur en gardant à l'esprit que la crosse de hockey contrairement aux bâtons du skieur ne constitue pas un appui supplémentaire propulsif. En revanche, tout comme les bâtons, nous supposons que l'utilisation de la crosse réduit la mobilité des bras et contraint la symétrie du mouvement se traduisant par un contrôle des paramètres superficiels (amplitude ou fréquence de mouvement du bras porteur) et profonds (coordination entre les bras, ou entre les bras et les membres inférieurs permettant d'assurer l'équilibre et l'optimisation de la propulsion comme en course) différent de la course ou de la marche. En effet, dans le cadre du ski de fond, l'utilisation des bâtons en plus des skis ajoute une dimension propulsive importante aux bras, qui ne sont pas habituellement autant impliqués dans la locomotion type marche ou course. Le cycle de ski de fond, tout comme celui de patinage avant, présente une phase de glisse durant la période de contact au sol directement inhérente aux contacts entre le matériel et la surface de déplacement. En ski de fond, trois techniques existent : le pas alternatif, la double poussée et le pas de un. Ces dernières sont mobilisées en fonction du niveau d'expertise, de la pente, de la vitesse de déplacement, de la fatigue et des qualités de glisse du matériel (Cignetti, Schena, & Rouard, 2009; Cignetti, Schena, Zanone, & Rouard, 2009; Smith, 2003). La technique du pas alternatif repose sur l'utilisation alternée des bâtons mobilisés par les bras et des skis déplacés par les mouvements de jambe. Celle de la double poussée repose sur l'utilisation simultanée et symétrique des propulsions des bras (en descente ou sur du plat uniquement). Enfin, la technique du pas de un est caractérisée par l'utilisation d'une poussée simultanée des deux bras accompagnée d'une poussée d'une jambe pour avancer lorsque les conditions de glisse sont mauvaises ou le skieur avance sur des faux plats ascendants. Dans son travail de doctorat Cignetti (2009, p. 9) propose un tableau synthétique (voir tableau 4) résumant les paramètres superficiels (fréquence, amplitude et vitesse) du pattern de marche, de course et pas alternatif sous l'effet de différents paramètres de contrôle (vitesse de déplacement, inclinaison de la pente). À travers cet exemple, nous observons bien l'importance de l'utilisation du matériel qui permet au skieur expert de se déplacer suivant trois patterns stables en fonction ici de l'inclinaison de la pente. En relation avec la vitesse de

déplacement, les experts n'utilisent pas les bras à la même fréquence (paramètre superficiel) et peuvent faire varier les paramètres profonds (i.e., les trois modes de coordination) pour répondre à la dynamique des contraintes de tâche. En compétition, l'inclinaison de la pente n'est pas régulière, ce qui implique qu'un expert doit disposer d'un répertoire moteur diversifié pour adopter un pattern moteur stable (assurant vitesse, précision, efficacité) adapté à l'évolution des contraintes de tâche garantissant une stabilité et un haut-niveau de performance. Si nous transférons cette idée à l'analyse du patinage expert, nous pouvons supposer que la tenue de la crosse contraint la fréquence gestuelle des bras (paramètre superficiel) qui va impacter la symétrie du mouvement des bras (paramètre profond). Si nous ajoutons à la tenue de la crosse la nécessité de transporter un palet, nous pouvons supposer que le comportement de l'expert se caractérisera par une stabilité des paramètres profonds (i.e., la coordination entre les membres inférieurs ne sera pas impactée par la tenue de la crosse) et une flexibilité de certains paramètres superficiels (e.g., le contrôle du palet réduit l'amplitude du mouvement nécessitant d'augmenter la fréquence de patinage pour maintenir une vitesse suffisante).

Tableau 4. Analyse cinématique de cycle de marche, course et pas alternatif (reprise du travail de Cignetti (2009, p. 9)).

	Conditions expérimentales	Vitesse de cycle (m·s ⁻¹)	Amplitude de cycle (m)	Fréquence de cycle (Hz)	Références
Pas alternatif (Plat)					
	15 km	4.70 à 4.92	5.38 à 5.92	0.81 à 0.87	Komi et al. (1982) Norman & Komi (1985, 1987)
	3 km	4.22	-	-	Bilodeau et al. (1991)
Allure libre	Allure faible	3.1 à 4.47	5.08 à 7.90	0.57 à 0.70	Gagnon (1981) Nilsson et al. (2004) Roy & Barbeau (1990)
	Allure moyenne	3.8 à 5.38	5.7 à 7.14	0.70 à 0.75	Gagnon (1981) Nilsson et al. (2004)
	Allure rapide	4.75 à 5	5.95 à 6.1	0.80 à 0.81	Bilodeau et al. (1992) Nilsson et al. (2004) Roy et Barbeau (1990)
	Allure maximale	5.64 à 6.79	5.9 à 7.90	0.90 à 1	Gagnon (1981) Karvonen et al. (1989) Nilsson et al. (2004)
Pas alternatif (Montée)					
Allure de course	50 km (7°)	3.5	3.7	0.96	Bilodeau et al. (1996)
	30 km (12°)	2.58	2.36	1.09	Norman et al. (1989)
	15 km (9°)	3.9	3.03	1.29	Norman & Komi (1987)
Marche (Plat)					
	Allure lente à rapide	1.45 à 2.5	1.5 à 2	0.92 à 1.3	Murray (1967) Hay (2003)
Marche (Montée)					
	Allure moyenne (9°)	1.15 à 1.4	1.28 à 1.5	0.9 à 0.95	Wall et al. (1981) Sun et al. (1996) Kang et al. (2002)
Course (Plat)					
	Allure lente à rapide	2 à 9.2	1.4 à 4.6	1.35 à 2.6	Luthanen et al. (1978) Williams (1985)

À l'image de la proposition faite dans le précédent paragraphe pour définir un cycle, les auteurs repèrent un point clé dans l'organisation du mouvement et bornent dans la locomotion la récurrence de l'événement (e.g., mouvement entre le planté du bâton d'un côté et le second planté de ce même bâton ou entre le premier arrêt du contact entre le ski et la neige et le second, pour plus de détails voir les travaux de doctorat de Cignetti (2009, p. 8)). Dès lors, deux paramètres sont mesurés : la fréquence du cycle de ski de fond et la longueur de ce dernier. Cignetti (2009) en fait la synthèse et établit une fréquence de cycle comprise entre 0.6 et 1Hz pour une amplitude de 5 à 6m sur du plat. Les auteurs affirment que les différences entre la cinématique du cycle de ski de fond et celui de marche ou de course s'expliquent par l'utilisation d'un avancement « passif » en dehors des phases de propulsion (i.e., par le biais de la glisse) rendu possible par le matériel (Cignetti, 2009).

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la friction entre la lame des patins et la surface glacée ressort comme étant à l'origine de la phase de glisse qui différencie incontestablement le patinage sur glace de la marche et de la course. L'impact de l'utilisation des patins ne se limite pas à la modification du cycle de locomotion terrienne (e.g., remise en cause de l'équilibre, cf. chapitre 1). Il a par exemple été montré en patinage artistique que l'amplitude du mouvement de la cheville est limitée par le port des patins, ce qui limite à son tour l'amplitude de mouvement du genou et réduit le travail produit lorsque des patineurs sur glace réalisent des sauts sur glace ou sur terre, avec ou sans équipement (Haguenauer, Legreuer, & Monteil, 2006). Le port du patin s'avère être une forte contrainte en partie responsable de la réorganisation de la coordination entre les articulations pour permettre le saut sur glace (Haguenauer et al., 2006). De la même manière, une modification de la languette et de la hauteur des œillets pour les lacets dans la partie supérieure permet l'augmentation de la dorsiflexion de la cheville qui favoriserait l'utilisation d'une plus grande amplitude de mouvement de la cheville (Robert-Lachaine et al., 2012).

En poursuivant la réflexion sur l'impact du matériel sur la locomotion cyclique, nous nous sommes questionnés sur le rôle de la crosse dans l'organisation de la locomotion vers l'avant : la crosse est-elle utilisée pour faciliter la régulation posturale dans une tâche qui contraint fortement l'équilibre du joueur ? La crosse impacte-t-elle la propulsion en facilitant ou en rendant la propulsion plus difficile, conséquence d'une modification de la mobilisation des bras ? L'utilisation de la crosse détériore-t-elle la performance de sprint ? A notre connaissance, la majorité des études concernant l'utilisation de la crosse sont en lien avec la cinématique du shoot ou la rigidité du matériel (e.g., les études conduites par Hannon et

al.(2011), Michaud-Paquette, Pearsall, & Turcotte (2008), Villaseñor et al. (2006)). Par exemple, des travaux réalisés en hockey sur gazon ont montré l'effet de l'expertise sur différentes formes de shoot chez des joueuses expertes (Brétigny, Seifert, Leroy, & Chollet, 2008), et l'effet du poste de jeu comme contrainte modifiant la coordination des joueuses expertes lors de l'exécution du shoot (Brétigny, Leroy, Button, Chollet, & Seifert, 2011). Ces travaux ont permis de montrer qu'un expert en hockey sur gazon n'est pas un expert d'une compétence isolée (e.g., le shoot) de cette même activité (Brétigny, 2013). Cependant, si l'analyse de la réalisation du tir ou d'une passe n'est pas la préoccupation des chercheurs, la crosse apparaît dans les protocoles comme un moyen de reproduire un élément présent en situation de match sans étudier l'impact de cette dernière sur la coordination du joueur (e.g., l'étude de Robert-Lachaine, Turcotte, Dixon, & Pearsall, (2012) ou celle de Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh (2008)). Il nous semble intéressant de se poser la question de l'effet de la contrainte liée à l'utilisation de la crosse (et a fortiori lorsque la crosse conduit un palet) sur la locomotion sur glace. En plus de contraindre le déplacement, la crosse est-elle une aide pour réguler le déséquilibre ? Ce questionnement sur le rôle de la crosse provient de la lecture de recherches menées dans un contexte différent (i.e., étude de la régulation posturale comparant l'équilibre de patients vestibulo-lésés et des sujets sains dans des environnements lumineux ou noirs avec ou sans contact de l'index avec une surface stable). Il a été démontré qu'un contact léger (de l'ordre d'1N) avec une surface présente autour du sujet ou l'utilisation d'une canne contribuent à maintenir l'équilibre debout en réduisant les oscillations du corps (Jeka, 1997; Lackner et al., 1999). Dès lors, nous projetons de considérer la crosse comme un éventuel troisième point d'appui avec le sol impactant l'organisation de la posture du joueur lorsqu'il patine. Le patinage en hockey implique de faire face à une forte contrainte de tâche : se déplacer en s'équilibrant tout en étant en interaction avec des objets, des joueurs. Que sous-entend la tâche en termes d'organisation motrice ?

Le cycle de patinage avant du hockeyeur : paramètres superficiels du mouvement

Sans revenir sur les contraintes influençant le patinage avant (voir le chapitre 1, la discussion du chapitre 3 et les paragraphes précédents), nous concevons le comportement expert comme le compromis entre stabilité et flexibilité des paramètres profonds et superficiels impliqués dans cette locomotion en relation avec la dynamique des contraintes. Pour garantir une réussite dans l'atteinte du but de la tâche et réaliser une performance de haut-niveau, un expert doit trouver le compromis entre reproduire un pattern stable et varier

des paramètres à l'intérieur de ce pattern, pour garantir un niveau de performance satisfaisant lorsque les contraintes évoluent. Marino (1977) suggère que l'amélioration de la vitesse de déplacement passe par un contrôle des paramètres superficiels plutôt que des paramètres profonds. Ainsi, il met en avant le fait que pour aller plus vite, un expert réduit les durées des phases de glisse, de propulsion et de retour du patin, ce qui a pour conséquence d'augmenter la fréquence de patinage. Par exemple, ces résultats montrent que les valeurs de fréquence de foulées (2.68, 2.09 et 1.29 cycle/s) diminuent avec la baisse de performance (vitesses de déplacement de 6.9 m.s^{-1} , 6.13 m.s^{-1} et 3.75 m.s^{-1} respectivement). Plus largement la performance experte du hockeyeur patinant en avant sur la glace dépend de la réunion de différents facteurs tels qu'une haute fréquence de mouvement, un faible angle de retour du patin, le placement du patin sous le corps dès la fin de la phase d'appui unipodal, une extension complète du genou durant la poussée, l'angle (patin-glace) de démarrage de la poussée, l'angle d'abduction de la hanche lors de la poussée, l'angle moyen de flexion du buste et la masse du joueur (Marino, 1977, 1983; McPherson et al., 2004). Sur cette base, nous sommes confrontés au problème suivant : comment l'expert réalise-t-il le compromis entre stabilité et flexibilité de son comportement lorsque nous modifions la tâche dans laquelle il doit réaliser la meilleure performance possible ? C'est pourquoi, analyser le patinage avant comme une locomotion reproductible sur un tapis roulant nous semble insuffisant au regard des contraintes importantes impliquant des changements dans l'organisation motrice lors des matches (e.g., présence de partenaires et d'adversaires, logique offensive ou défensive, conduite du palet, changements brusques de direction, phase d'accélération ou d'entretien de la vitesse pour observer le jeu ou récupérer, fatigue, etc.). Nous supposons que la manipulation de la crosse et du palet révéleront l'adaptabilité de l'expert se déclinant sous la forme d'une stabilité des paramètres profonds (stabilité de la coordination malgré la manipulation des contraintes) et flexibilité au niveau des paramètres superficiels (e.g., la conduite du palet va induire une forte perturbation nécessitant une modification de la durée des phases du cycle ou de la fréquence du mouvement). À l'inverse, les juniors exprimeront une variabilité plus grande au niveau des paramètres profonds et superficiels, reflétant une adaptation de moins bonne qualité si la performance diminue.

Dans la continuité de cette réflexion, nous supposons également qu'un effet poste se traduira au niveau du contrôle de la locomotion. En effet, comme évoqué dans le chapitre 1, les attaquants dans le rôle qu'ils occupent sur le terrain doivent se projeter rapidement vers l'avant en conduisant le palet. Les défenseurs, quant à eux, se déplacent en avant mais doivent

également multiplier les formes de patinage (Bracko et al., 1998; Lafontaine et al., 1998; Montgomery et al., 2004). Ces résultats permettent d'envisager une différenciation dans les niveaux de compétences de patinage, au sein d'une population de hockeyeurs experts, qui pourrait supposer qu'un hockeyeur expert n'est pas obligatoirement expert en patinage et qu'en fonction de son poste, ses compétences de patineur diffèrent significativement. La contrainte liée à la tâche (ici le poste occupé par le joueur et le rôle qu'il doit respecter) va justifier l'intérêt de questionner son importance lors du patinage avant. La tâche expérimentale que nous proposons (i.e., déplacement le plus rapidement possible vers l'avant en manipulant des objets) devrait révéler une plus grande stabilité du comportement des attaquants en raison d'une plus grande habitude à faire face à ce type de contraintes de tâche comparativement aux défenseurs. Nous supposons que les défenseurs auront un comportement plus variable que les attaquants en particulier dans la situation fortement contraignante de patinage avec le palet.

Analyse du patinage à l'aide de paramètres profonds du comportement

Considérant qu'il est plus complexe de contrôler une coordination de mouvements plutôt qu'un mouvement lui-même, nous avons utilisé deux outils employés dans l'analyse de la locomotion cyclique pour étudier le patinage avant : l'Index de Coordination (IdC) et l'Index de Symétrie (SI). La coordination du cycle de patinage des deux segments inférieurs peut s'envisager suivant trois modèles principaux inspirés par les analyses cinématiques des mouvements de bras en natation : l'opposition, le rattrapé et la superposition des actions propulsives (Chollet, Chabies, & Chatard, 2000, voir aussi Alberty, Sidney, Huot-Marchand, Hespel, & Pelayo, 2005; Chollet, Seifert, & Carter, 2008; Millet, Chollet, Chabies, & Chatard, 2002; Potdevin, Bril, Sidney, & Pelayo, 2006; Seifert, Chehensse, Tourny-Chollet, Lemaitre, & Chollet, 2008; Sidney, Paillette, Hespel, Chollet, & Pelayo, 2001; Telles, Barbosa, Campos, & Júnior, 2011). Le modèle d'opposition correspond à une série d'actions propulsives : le premier patin termine sa poussée lorsque le second la démarre. Le modèle de rattrapé est caractérisé par l'existence d'un décalage temporel entre les phases propulsives des deux jambes. Enfin, le modèle de superposition décrit un chevauchement des phases propulsives des deux jambes.

À travers cette étude, nous poursuivons l'objectif de décrire la coordination entre les deux segments propulsifs à l'aide d'un outil quantifiant le décalage temporel entre le début de la propulsion d'une jambe et la fin de la propulsion de l'autre (Chollet et al., 2000). Nous

souhaitons clarifier l'existence (ou l'absence) de variations de coordinations motrices en patinage avant (en utilisant cet index de coordination) sous l'effet des manipulations des contraintes de tâche, des postes et des niveaux d'expertise des joueurs. L'objectif, in fine, est de caractériser la coordination entre les deux membres inférieurs afin de déterminer si le hockeyeur expert possède un répertoire moteur regroupant ces trois modes de coordinations, à l'image d'un nageur, permettant de maintenir une performance supérieure au junior en fonction des conditions. Nous pouvons envisager que, dans la situation départ lancé avec crosse, le hockeyeur soit en capacité de produire une coordination proche de l'opposition tandis qu'avec un palet à conduire le mode rattrapé soit plus prononcé.

Enfin, sur la base de plusieurs études portant sur l'analyse de la symétrie du mouvement (lors de la marche (Cigali et al., 2004; Herzog, Nigg, Read, & Olsson, 1989; Robinson et al., 1987; Vanzant, Mcpoil, & Cornwall, 2001), en natation (Seifert et al., 2008; Seifert et al., 2005), en course à pied (Bennell, Crossley, Wrigley, & Nitschke, 1999; Brown et al., 2017; Carpes, Mota, & Faria, 2010; Karamanidis, Arampatzis, & Brüggemann, 2002, 2003; Seminati et al., 2013)), nous nous questionnons sur la part de la symétrie dans le mouvement de patinage avant et sa place dans la performance sous l'effet de contraintes manipulées. Nous souhaitons vérifier la validité de l'hypothèse considérant une symétrie parfaite entre les deux jambes, et autorisant l'extrapolation de résultats obtenus d'un membre à son homologue non étudié (e.g., étude cinématique du mouvement de la jambe droite lors des trois premières poussées de Lafontaine (2007)). La symétrie en patinage est-elle liée à l'expertise en hockey sur glace ? Si tel est le cas, est-ce que la symétrie entre les cycles des deux jambes définit un comportement expert ? Si ce n'est pas le cas, un comportement asymétrique émerge-t-il de propriétés internes (dominance d'une jambe, pathologies) ou en réponse à des contraintes extérieures (port de la crosse avec une main préférentielle, conduite d'un palet, poste du joueur) ?

Envisager l'analyse de l'efficacité du mouvement à l'aide de mesure de la fluidité

Nous proposons d'intégrer l'utilisation des centrales inertielles pour évaluer la fluidité du mouvement suivant un ensemble de conditions manipulées par l'expérimentateur. Le coefficient de jerk (il s'agit de la dérivée 3^{ème} de la position ou la variation d'accélération au cours du temps) a été révélé dans plusieurs études comme un indicateur valide pour évaluer la fluidité de la trajectoire des mouvements. La fluidité du mouvement des segments a été mise en relation avec la problématique du coût énergétique lors de la marche (Hreljac & Martin,

1993) ou de la grimpe en escalade (Seifert et al., 2014). Ces travaux avancent l'idée que la mesure du coefficient moyen de jerk favorise l'identification d'un mouvement fluide qui réduirait les coûts énergétiques. Cette capacité à être efficient dans le mouvement renvoie à une caractéristique de l'expertise énoncée par Johnson (1961). Dans le cadre de notre étude (i.e., déplacement en sprint du hockeyeur en ligne droite), nous nous sommes intéressés au calcul du coefficient de jerk moyen pour évaluer la fluidité du mouvement de translation en 3D en utilisant une centrale inertielle placée au niveau du bassin. Nous supposons que la fluidité du mouvement (se traduisant par une plus faible valeur de jerk) sera plus importante dans les conditions où la vitesse sera déjà importante suite au départ lancé. En supposant qu'il soit plus facile d'entretenir de la vitesse (faible variation de vitesse) que de la créer, nous pouvons supposer que les conditions avec un départ lancé révéleront un plus petit coefficient de jerk.

Les centrales inertielles (également appelées dans la littérature scientifique WMS (wearable motion sensor), IMU (inertial measurement unit) ou MEMS (microelectromechanical system)) se composent de trois accéléromètres (mesurent les accélérations linéaires qui, après intégration, donnent les changements de vitesse et double intégration donnent les changements de position), de trois gyroscopes (renseignent sur les positions dans l'espace, l'évolution des changements de direction et les vitesses angulaires) et d'un magnétomètre (permettant de retrouver l'orientation de la centrale inertielle dans un référentiel terrestre²) (El-diasty & Pagiatakis, 2008). Les centrales inertielles offrent l'avantage d'être légères, de petite taille, et de pouvoir enregistrer un volume important de données (e.g., un total de 5981 cycles de bras en crawl ont été enregistrés dans l'étude de (Dadashi et al., 2015)) en ne nécessitant pas de procédures de digitalisation (Magalhaes, Vannozzi, Gatta, & Fantozzi, 2014). Ce système embarqué offre de nombreux avantages pour analyser la variabilité du mouvement à travers une approche macroscopique du contrôle moteur (Guignard et al., 2017; Seifert et al., 2011). Ces outils légers, et transportables, amènent une nouvelle perspective de recherche in situ en enregistrant sur de longues périodes des paramètres du comportement tels que la fluidité du déplacement, la variation de vitesse de cycle, la longueur ou la fréquence du mouvement (Dadashi et al., 2015; Magalhaes et al., 2014; Seifert et al., 2015). Les centrales inertielles permettent d'analyser des comportements en dehors d'une zone de capture du mouvement limitée par la calibration des caméras, l'effet

² Le référentiel se définit à partir du nord magnétique, de l'est magnétique et de la direction de la gravité (pour plus de détails, voir (Boulangier, Seifert, Hérault, & Coeurjolly, 2016; Madgwick, 2010; Madgwick et al., 2011; Seifert, Orth, et al., 2014)).

de parallaxe, les procédures de digitalisation (Guignard et al., 2017; Kenneally-dabrowski et al., 2017; Magalhaes et al., 2014; Seifert, Hermette, et al., 2014) ce qui restreint l'analyse du mouvement dans ce contexte à 3 cycles de patinage (e.g., Lafontaine (2007)). Inscrit dans cette démarche d'investigation, notre travail a été conduit en employant une centrale inertielle placée sur le bassin. À notre connaissance, l'utilisation de centrales inertielles n'a été réalisée que dans deux études concernant le hockey sur glace : celles de Buckeridge, LeVangie, Stetter, Nigg, & Nigg (2015) et Stetter, Buckeridge, Von Tscherner, Nigg, & Nigg (2016). Dans l'étude de Stetter et al. (2016), l'objectif était de trouver un outil permettant une analyse embarquée capable de détecter les phases de contact ou de non-contact avec la glace.

L'objectif de l'étude 1 est d'analyser l'effet de l'expertise et du poste en termes d'adaptabilité comportementale face à des contraintes de tâches manipulées. L'adaptabilité sera évaluée à la fois au niveau de la performance (maintenir une vitesse de déplacement maximale supérieure à celle des juniors) mais aussi en matière de ratio entre stabilité et flexibilité du comportement révélé par l'étude des paramètres profonds et superficiels de ce dernier. Nous supposons que l'adaptabilité de l'expert comparativement aux juniors ou de l'attaquant comparativement aux défenseurs se situe dans sa capacité à faire un compromis entre la flexibilité des paramètres superficiels (i.e., variabilité fonctionnelle dans le sens où elle maintient le niveau de performance en dépit des modifications de contraintes) et la stabilité des paramètres profonds (la coordination étant plus complexe à contrôler). Tandis que pour les défenseurs ou les juniors, nous supposons que la variabilité inter-individuelle entre les groupes (respectivement avec les attaquants et les experts) sera plus importante au niveau des paramètres superficiels et profonds démontrant ainsi la difficulté à stabiliser une coordination lorsque les contraintes deviennent plus fortes (en particulier la conduite du palet). Cette plus faible résistance aux perturbations engendrera une détérioration de la performance.

L'étude 2 poursuit un objectif épistémique : analyser la fluidité du mouvement de patinage lorsque les contraintes sont manipulées à l'aide du calcul du jerk. Elle poursuit également un objectif méthodologique : valider l'utilisation de centrales inertielles par comparaison avec le système de mesure foot plantar pressure sensors de Tekscan TM.

Méthode

Participants

Dix-huit joueurs de hockey sur glace se sont portés volontaires pour participer à cette étude. Tous les joueurs étaient en capacité de réaliser le protocole d'analyse du patinage avant et aucune blessure à l'issue de la campagne de mesure n'est à signaler. Deux groupes de joueurs ont été réalisés en fonction de leur expertise et de leurs postes (cf. tableau 5). Dans le premier groupe comportant les joueurs les plus expérimentés, dix joueurs évoluaient en Ligue Magnus (21.8 ± 2.49 ans ; 82.04 ± 12.4 kg ; 1.80 ± 0.09 m ; 16.8 ± 3.5 années de pratique). Sept de ces joueurs ont remporté le championnat de France élite la saison suivant l'expérimentation, cinq ont participé aux championnats du monde avec l'équipe de France adulte, sept avec l'équipe de France U20 et huit avec l'équipe de France U18. Le second groupe était composé de joueurs évoluant à des niveaux de championnats inférieurs (Junior Elite, U18 Elite, Cadet Elite). Les participants de ce deuxième groupe étaient âgés de 16.7 ± 1.49 ans, pesaient 71.59 ± 9.29 kg, mesuraient 1.78 ± 0.03 m et pratiquaient le hockey sur glace depuis 11.1 ± 2.5 années. Au sein de la population de hockeyeurs, nous pouvons distinguer 11 joueurs qui tenaient la crosse avec la main droite en haut et 9 avec la main gauche. A l'intérieur des deux groupes, 5 joueurs évoluent sur les postes avant (ailier ou centre) et 5 joueurs évoluent sur les postes arrière.

Tableau 5. Caractéristiques de la population

Groupes	Nombre	Age (année)		Poids (kg)		Taille (m)		Expérience dans le hockey (années)		Hockey (h.sem ⁻¹)		Hors glace (h.sem ⁻¹)	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
		G1-A : Attaquants experts	5	21.2	±2.3	75.58	±8.6	1.76	±0.05	17	±3.4	10	±0.89
G1-D : Défenseurs experts	5	22.4	±2.8	88.5	±12.90	1.85	±0.10	16.6	±3.97	10	±0.89	8.08	±1.09
G2-A : Attaquants juniors	5	16.8	±1.6	74.98	±9.75	1.79	±0.016	11	±2	7.6	±3.71	5.6	±2.50
G2-D : Défenseurs juniors	5	16.6	±1.5	68.2	±8.38	1.77	±0.04	11.2	±3.27	5	0	5	0

Le protocole, approuvé par le comité d'éthique de l'Université de Rouen, a été expliqué verbalement aux participants qui, conformément à la déclaration d'Helsinki, ont donné leur consentement écrit à la réalisation de cette étude.

Protocole

Préalablement à la session d'enregistrement, l'athlète bénéficie d'une période d'échauffement hors glace et sur glace de 20 minutes. Cet échauffement standardisé a été conçu en partenariat avec les préparateurs physique des équipes professionnelles. Le protocole correspond en une analyse du patinage avant en déplacement rectiligne de type sprint. Tous les joueurs, intégralement équipés, ont parcouru une distance de 20 m suivant différentes conditions d'expérimentation randomisées après un passage de la Zamboni™ pour garantir une surface glacée adéquate (cf. figure 13). Quatre conditions de sprint ont été effectuées par les joueurs de façon randomisée : un sprint avec un départ en ligne droite à 1 m de la zone des 20m accompagné ou non d'une crosse et un sprint à la sortie d'un virage en conduisant ou non un palet réceptionné avant de sprinter dans la zone des 20m sans avoir été averti que le palet allait être lancé (incertitude pendant la prise d'élan puis réception ou non du palet transmis par un lance-palet conçu pour standardiser la passe). La session d'enregistrement s'étend sur 120 minutes par participant (échauffement, équipement du sujet, mise en place du protocole et retrait de l'équipement).

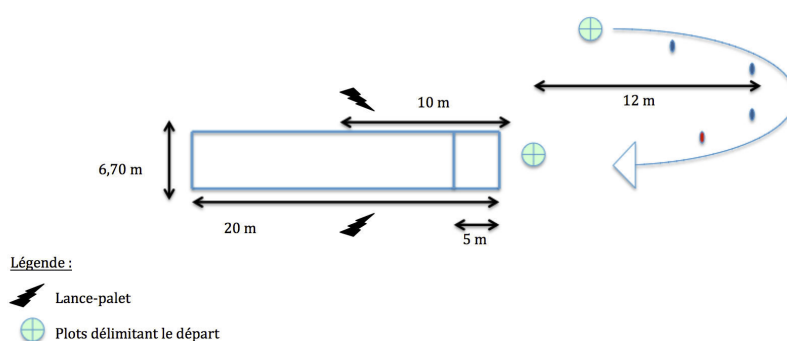


Figure 13. Représentation des conditions expérimentales : i) départ en ligne droite sans crosse : Condition 1, ii) départ en ligne droite avec crosse : Condition 2, iii) virage lancé avec crosse : Condition 3 et iv) virage lancé avec crosse et palet : Condition 4.

Le joueur réalise trois passages par condition, soit un total de douze essais. Entre chaque essai, les joueurs ont une période de repos de 5 minutes (hydratation, mise en train et calibration des centrales inertielles) nécessaire à une récupération optimale pour répéter les sprints.

Matériel et enregistrement des données

Lors de l'enregistrement des données, nous avons eu recours à trois barrières Microgates™ (cellules photo-électriques) relevant le temps total que les joueurs ont mis pour parcourir 20m ainsi que le temps intermédiaire à 5m du départ.

Nous avons ensuite utilisé : i) une paire de semelles *foot plantar pressure sensors F-Scan® System* disposées dans chaque patin, ii) une centrale inertielle *Hikob®* placée au niveau du bassin et iii) deux caméras de contrôle placées dans l'alignement des cellules photo-électriques symbolisant le démarrage des 20m (figure n°14) et dans les gradins de la patinoire pour avoir une vue d'ensemble afin de contrôler le déroulement des essais.



Figure 14. Alignement cellules photo-électriques et caméra sur la ligne de départ des 20m.

Foot plantar pressure sensors F-Scan® System. C'est un « in-shoe system » (par opposition aux systèmes de plateformes) qui offre la possibilité de sortir du laboratoire pour réaliser les mesures sur la glace (Hadi, Razak, Zayegh, Begg, & Wahab, 2012). Ces semelles (modèle 3000^E, <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system?tab=sensors>) fonctionnent avec des 'Force-Sensing Resistor' : quand la pression s'applique sur le capteur, il mesure la résistance d'une couche conductrice entre deux électrodes. Plus la pression augmente et plus la résistance de la couche conductrice diminue provoquant une augmentation du passage du courant entre les électrodes comme l'illustre la figure suivante tirée du travail d'Hadi et al. (2012) :

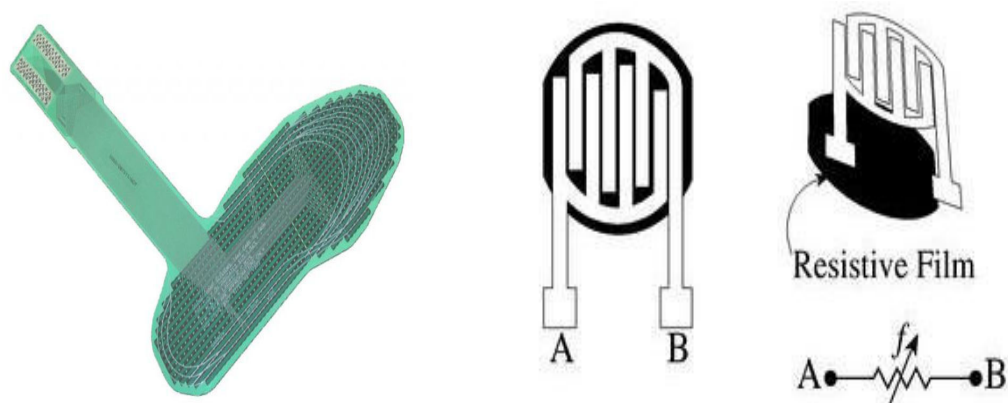


Figure 15. Illustration du fonctionnement des semelles (reproduit de (Hadi et al., 2012)).

Les semelles ont une épaisseur de 0.406 mm, sont légères (moins de 300g) et adaptées aux patins afin de ne pas déranger le mouvement du sujet. Elles ne nécessitent que deux câbles reliant en arrière le datalogger (300g avec la ceinture) avec les cuffs et une batterie permettant l'analyse de trois sujets sans interruption (trois heures d'enregistrement discontinues). Le système est totalement embarqué et ne nécessite pas de connexion avec un ordinateur durant la collecte des mesures. Une semelle a été placée dans chaque patin. Des scotches assuraient la fixation sur le bord du patin afin de limiter les mouvements de la semelle à l'intérieur du patin. Le reste du dispositif a été placé comme suit :



Figure 16. Photographie du positionnement du système embarqué Tekscan® (à gauche les câbles et cuff, à droite le datalogger).

Une fois placé sur le sujet, le dispositif a suivi une procédure de calibration via l'utilisation du système d'exploitation F-Scan. Il s'agit de la calibration du 'pas' qui consiste

en une alternance d'appuis sur un patin pour étalonner les mesures en fonction du poids du sujet équipé.

Centrale inertielle Hikob®. Les centrales inertielles correspondent à la combinaison d'un accéléromètre triaxial, d'un magnétomètre triaxial et d'un gyroscope triaxial (figure n°17). Les centrales inertielles Hikob® sont dotées d'une plage d'acquisition pour l'accéléromètre allant de ± 2 à 24 g , de ± 250 à $2000^\circ.\text{s}^{-1}$, pour le gyroscope et $\pm 8.1 \text{ Gauss}$ pour le magnétomètre. Lors de notre expérimentation, les centrales ont été ajustées à une fréquence d'acquisition de 100 Hz pour l'accéléromètre et le gyroscope et une fréquence de 110 Hz pour le magnétomètre.



Figure 17. Comparaison entre centrale inertielle Hikob avec une pièce de 50 centimes de 2,4 cm de diamètre. L'axe z ne figure pas sur ce plan, il lui est transversal.

Nous avons veillé à placer la centrale inertielle au contact de la peau du joueur protégée par une mousse pour limiter les douleurs lors du retrait des bandes. Le placement était réalisé pour ne pas influencer l'action du hockeyeur ou limiter ses mouvements (Magalhaes et al., 2014).

Analyse vidéo. Deux caméras dotées d'une fréquence d'acquisition de 100 Hz ont filmé l'ensemble des essais. La première possédait un grand angle et était disposée dans les gradins afin d'offrir un point de vue sur le déroulement de la situation. La seconde était placée au niveau de la ligne de départ des 20m et avait en permanence le joueur dans son champ de vision lors de la synchronisation des systèmes. Cette dernière a été utilisée pour déterminer la durée s'écoulant entre le moment où la lame du patin à la réception touchait le sol et le moment où le joueur franchissait la ligne de départ des 20m. Ces durées ont été relevées à l'aide du logiciel d'analyse vidéo Kinovéa version 0.8.7. Couplées avec les temps obtenus par

les cellules photo-électriques, nous avons pu isoler l'enregistrement des 20m connaissant la durée du sprint et le temps s'écoulant entre le saut et le franchissement de la ligne de départ.

Synchronisation des systèmes. Afin de faire coïncider les enregistrements des trois systèmes sur une échelle temporelle identique, nous avons demandé au sujet de sauter sur place avant chaque essai. Lors de la réception, nous avons pu détecter : i) le contact entre la lame du patin et le sol sur la vidéo, ii) un pic d'accélération vertical sur les centrales inertielles (Seifert, L'Hermette, et al., 2014) et iii) un pic de force sur les semelles placées dans les patins. Dès lors, nous avons pu aligner les enregistrements sur la même échelle temporelle (cf. figure n°18). Après avoir réalisé la synchronisation des systèmes, nous avons intégré les durées entre le saut et le franchissement de la ligne, le temps pour parcourir 20m dans le script utilisé sous le logiciel Matlab® R2014a (1994–2014. The MathWorks. Inc.) pour isoler la portion d'enregistrement intéressante.

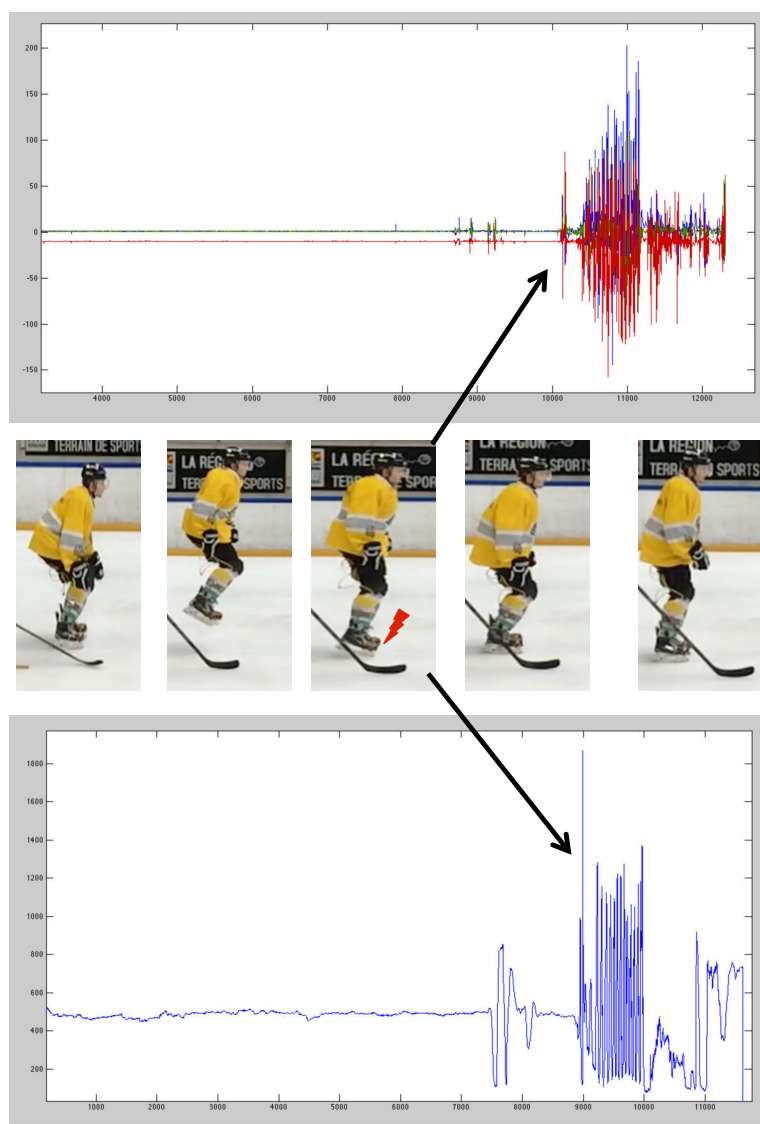


Figure 18. Utilisation du saut pour synchroniser l'enregistrement vidéo avec les centrales inertielles et les semelles : en haut sont représentées les données issues des centrales inertielles et en bas les mesures obtenues par les foot plantar pressure sensors F-Scan[®] sur le patin droit dans les deux cas.

La suite du chapitre sera distinguée en deux parties : i) une étude relative à l'effet des manipulations des contraintes de tâches sur les variables profondes et superficielles et ii) une seconde étude visant à analyser la fluidité du déplacement en validant l'utilisation d'une centrale inertielle placée sur le sacrum afin de détecter automatiquement les phases de poussées de chacun des cycles de patinage.

Etude 1 : Effets des contraintes de tâche en fonction de l'expertise et du poste

Cette étude repose sur l'utilisation des données issues des semelles *foot plantar pressure sensors F-Scan® System*. En enregistrant les données traitées par le logiciel *F-Scan® System* (cf. figure 19) sous format ASCII, nous avons pu réaliser l'analyse des données en utilisant Matlab® R2014a (1994–2014. The MathWorks. Inc.).

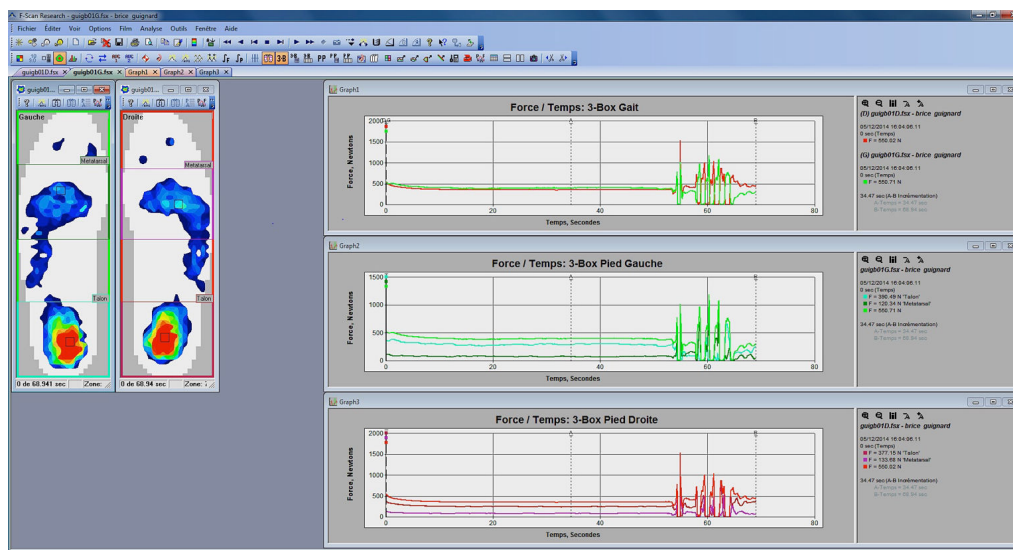


Figure 19. Capture d'écran de l'interface *F-Scan® System* par Tekscan sur un enregistrement de hockeyeur départ arrêté avec 60 secondes d'immobilisation au préalable (en rouge l'enregistrement des forces exercées au niveau du pied droit et en vert celles au niveau du pied gauche).

Traitements des données

Tout d'abord, nous avons découpé l'ensemble des signaux afin d'isoler la portion intéressante de l'enregistrement comme l'indique la figure ci-après. Sur cette base, nous avons travaillé en analysant le plus de cycles entiers possibles sur le patin droit et gauche (figure 20).

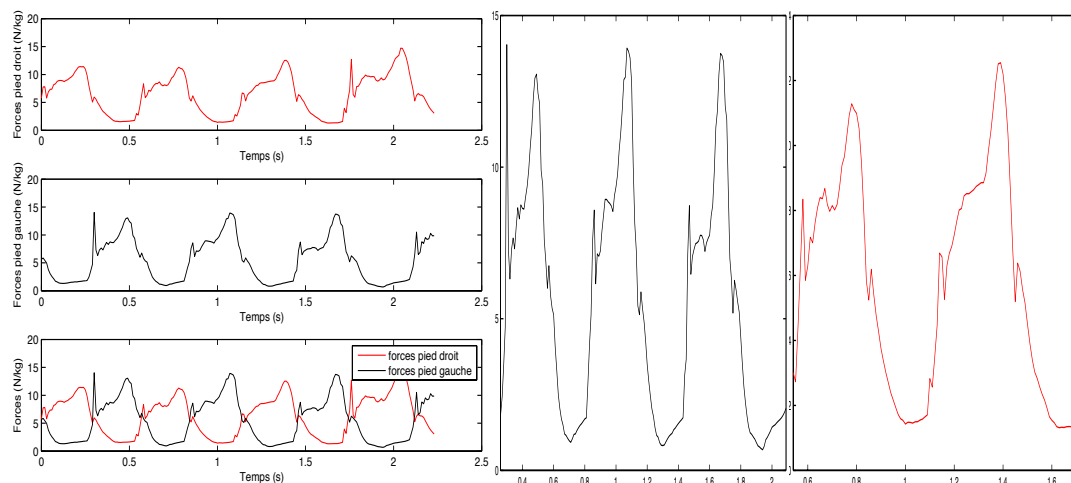


Figure 20. Enregistrement des foot plantar pressure sensors F-Scan® découpé pour correspondre avec les 20m de sprint en condition lancé avec crosse à gauche et sélection des cycles entiers à droite.

Calculs des paramètres superficiels

En parcourant la littérature relevant de l'analyse du cycle de patinage avant, nous constatons différentes définitions à son égard. Ainsi, si nous nous intéressons à l'individu dans son ensemble, il est possible de caractériser le cycle de patinage en périodes de simple et double support (Marino, 1977, 1983; Pearsall, Turcotte, Levangie, & Forget, 2014; Pearsall, Turcotte, & Murphy, 2000). Si nous nous rapportons au mouvement d'une jambe, nous pouvons considérer le cycle de patinage comme l'alternance entre une phase d'appui et une phase d'oscillation (i.e., le temps qui s'écoule entre la pose du patin et le décollage du talon puis entre le décollage du talon et décollage des orteils (Robert-Lachaine et al., 2012)). Dans ce contexte le temps de contact se calcule comme la quantité de temps durant laquelle la force est appliquée sur la glace et l'alternance entre temps de contact et temps de non-contact permet de déterminer la durée d'un cycle et d'en calculer ensuite la fréquence (Robert-Lachaine et al., 2012).

Il est également possible de considérer qu'un cycle débute à la poussée du patin droit jusqu'à la nouvelle poussée de celui-ci (Nobes et al., 2003) ou se déroule entre le décollage du patin droit et le décollage du patin gauche (Marino, 1977). Au regard du matériel que nous utilisons dans le cadre de cette étude (i.e., les *foot plantar pressure sensors F-Scan® System*), nous considérons le cycle de patinage comme étant la durée entre deux contacts initiaux avec la glace pour le même pied (Stetter, Buckeridge, Von Tschärner, Nigg, & Nigg (2016) ou Upjohn et al., (2008)). À l'intérieur de ce cycle de patinage, nous repérons les points clés

délimitant les phases essentielles du cycle : la poussée, le retour aérien, la glisse.

Pour découper un cycle de patinage, nous avons appliqué la méthode développée par Buckeridge, LeVangie, Stetter, Nigg, & Nigg (2015). Ainsi, nous avons identifié quatre points clés dans le cycle de patinage : le premier contact avec la glace (i.e., ‘Initial Ice Contact’ ou IIC), le pic de l’impact entre la lame et la glace (‘Impact Peak’ ou IP), le pic de poussée (‘Push-off Peak’ ou PP) et le décollage des orteils (‘Toe-off’ ou TO). Ces différents repères permettent de définir les trois phases de patinage à savoir : i) la phase de glisse comprenant l’Initial Ice Contact, l’Impact Peak jusqu’au Push-off Peak, ii) la phase de poussée comprise entre le Push-off Peak et le Toe-off et iii) la phase de retour du patin entre le Toe-off et l’IIC. L’ensemble des paramètres décrits précédemment est repris dans la figure 21. En déterminant ces points clés, nous avons pu calculer pour chaque cycle les paramètres superficiels suivants : la durée de la phase de poussée, de glisse et de retour du patin, la durée et la fréquence du cycle, la valeur maximale de la force de poussée rapportée à la masse du sujet équipé.

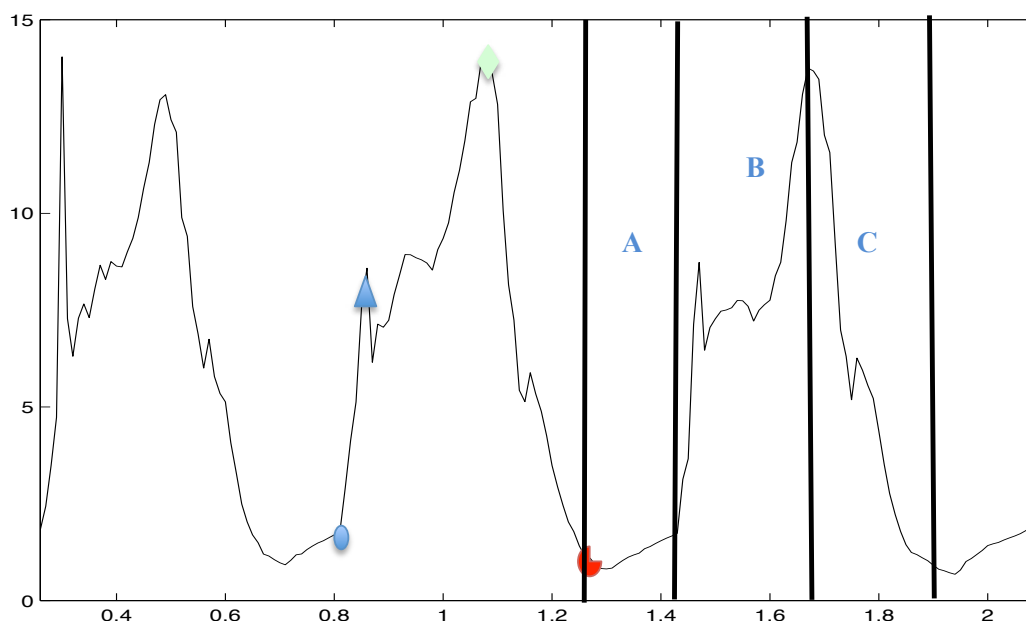


Figure 21. Détermination des différentes phases du cycle de patinage à l'aide des repères suivants : de TO (●) à IIC (●) a lieu la phase de retour du patin (A), de IIC à IP (▲) et PP (●) se passe la phase de glisse (B), de PP à TO se déroule la phase de poussée (C).

Détermination des Indices de Symétrie (SI) et de coordination (IdC)

Tout d'abord, en ce qui concerne le calcul de l'IdC, nous avons utilisé les repères précédemment énoncés pour découper le cycle en trois phases. Nous avons quantifié la durée de chacune d'entre elles et exprimé ces dernières en pourcentage de durée du cycle. Nous

avons également déterminé le décalage temporel (DT) entre les mouvements propulsifs des jambes droite et gauche. DT1 correspond au décalage temporel entre le début de la propulsion du premier mouvement de la jambe droite et la fin de propulsion du premier mouvement de la jambe gauche. DT2 correspond au décalage temporel entre le mouvement de début de propulsion du deuxième mouvement de la jambe gauche et la fin de propulsion du premier mouvement de la jambe droite. Une fois DT1 et DT2 déterminés, ils sont exprimés en pourcentage par rapport à la durée du cycle correspondant respectivement au calcul des deux DT. Enfin, l'Index de Coordination (IdC) correspond à la moyenne de ces deux indices soit $IdC = (DT1 + DT2) / 2$ (figure 22).

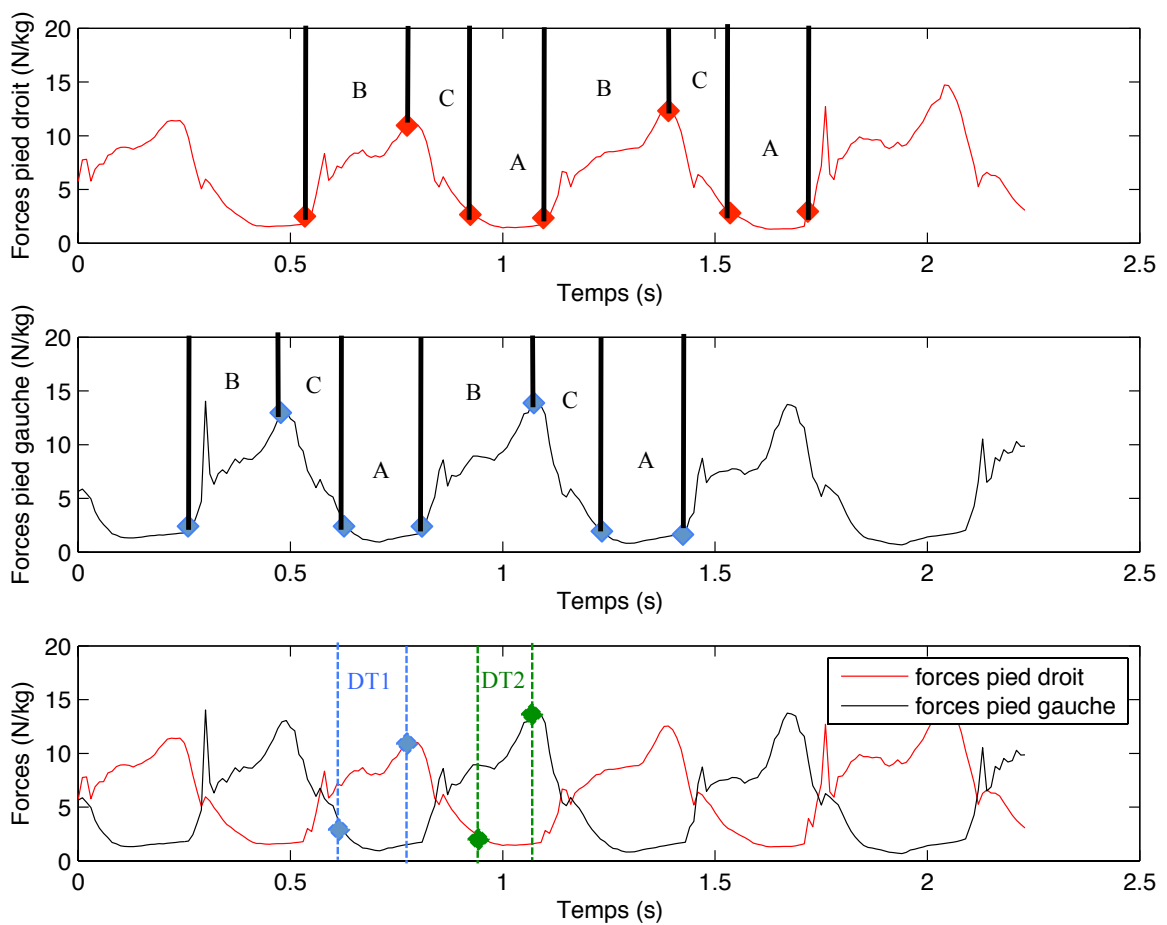


Figure 22. Représentation du calcul des Décalages Temporels (DT1 et DT2) caractérisant une coordination de type rattrapée (avec A : phase de retour du patin, B : phase de glisse et C : phase de poussée).

Lorsque l'IdC est nul, la coordination est dite « en opposition », c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'interruption des phases propulsives entre les deux jambes. Dans cette configuration, les durées des phases propulsives sont égales aux durées des phases non propulsives, il y a une

continuité des actions propulsives. L'IdC est positif quand la coordination est dite « en superposition » : les phases propulsives des deux jambes se chevauchent, il n'y a aucune rupture de propulsion. Enfin, l'IdC est négatif quand la coordination est dite « en rattrapé » : un décalage temporel entre les propulsions successives caractérise ce mode de coordination (Chollet et al., 2000; Seifert et al., 2008; Seifert, Chollet, & Allard, 2005).

Ensuite, le calcul du SI a été déterminé en utilisant la formule initialement proposée par Robinson, Herzog, & Nigg (1987) :

$$SI = \frac{2(x_n - x_i)}{x_n + x_i} \times 100$$

avec x_n = variable obtenue pour le patin droit et x_i = variable obtenue pour le patin gauche.

Nous avons fait le choix d'identifier en premier les variables issues des mesures du patin droit, ce qui impose d'exprimer les résultats en fonction du côté droit comme référence. Nous avons appliqué cette formule aux paramètres suivants : durée du cycle, fréquence du patinage, IdC, durée de la glisse, durée du retour, durée de la propulsion, pic de force lors de la poussée. Ces résultats sont exprimés en pourcentage. Une valeur de 0 indique une parfaite symétrie, c'est à dire qu'il n'y a pas de différence entre la variable du patin droit et du patin gauche. Une valeur positive indique une dominance du patin droit sur le gauche, dans le cas inverse la valeur est négative (Cigali et al., 2004; Herzog et al., 1989). Dans notre cas, nous considérerons que l'asymétrie est révélée lorsque la valeur de SI est <10% ou >10%, lorsque $-10\% < SI < +10\%$ nous considérerons que la symétrie est révélée (Herzog et al., 1989; Seifert et al., 2008).

Analyse statistique des données

Pour l'ensemble des variables mesurées, couplées aux calculs des coefficients de variations de ces dernières (CV), après avoir vérifié la normalité des distributions (test de Kolmogorov-Smirnov) et d'homogénéité des variances (test de Levene), des ANOVA à trois-voies (niveau d'expertise [experts, juniors] poste [attaquant, défenseurs] : mesures répétées [4 conditions]) ont été réalisées sous SPSS Statistics 20.0. La sphéricité a été vérifiée en appliquant le test de Mauchly pour les mesures répétées. Quand la sphéricité a été rencontrée, nous avons ajusté le niveau de significativité des F-ratios en suivant la procédure de Greenhouse-Geisser. Des tests post-hoc de Bonferroni ont été utilisés afin de spécifier les différences lorsqu'une interaction conditions X niveau d'expertise, conditions X poste ou

conditions X niveau d'expertise X poste étaient observées. L'éta-carré partiel (η^2_p) a été calculé comme un indicateur de la taille de l'effet, en considérant que $\eta^2_p=0.02$ représente un effet faible, $\eta^2_p=0.13$ représente un effet moyen et $\eta^2_p=0.26$ représente un effet fort (Cohen, 1988). Le seuil de significativité est placé à $p = .05$ pour les effets principaux, alors que pour les tests des effets simples, une correction de Bonferroni a été appliquée afin de rapporter le seuil alpha à $p = .0125$.

Résultats

Concernant l'ensemble des analyses, l'ANOVA à trois-voies (conditions X expertise X poste) n'a révélé aucun effet d'interaction des facteurs. Elle a en revanche mis en avant l'effet de l'expertise ou l'effet condition concernant certains paramètres analysés.

Paramètres superficiels

Analyse du cycle de patinage. L'ANOVA à trois-voies a montré qu'en considérant la moyenne des valeurs obtenues à partir des mesures réalisées séparément sur les deux patins, la vitesse moyenne sur 20m, la durée et la fréquence du cycle, la durée de la glisse, la durée du retour changeaient en fonction de l'expertise (respectivement, $F(1,14) = 13.408$, $p=.003$, $\eta^2_p=.489$; $F(1,14) = 11.567$, $p=0.004$, $\eta^2_p=.452$, $F(1,14)=11.070$, $p=.005$, $\eta^2_p=.442$, $F(1,14) = 13.134$, $p=0.03$, $\eta^2_p=.484$, $F(1,14)= 5.346$, $p=0.037$, $\eta^2_p=.276$) tandis que la durée de propulsion et le pic de force n'affichaient pas de différence significative entre le groupe experts et juniors, comme le résume la figure 23. En revanche, aucun effet lié au poste n'a été démontré.

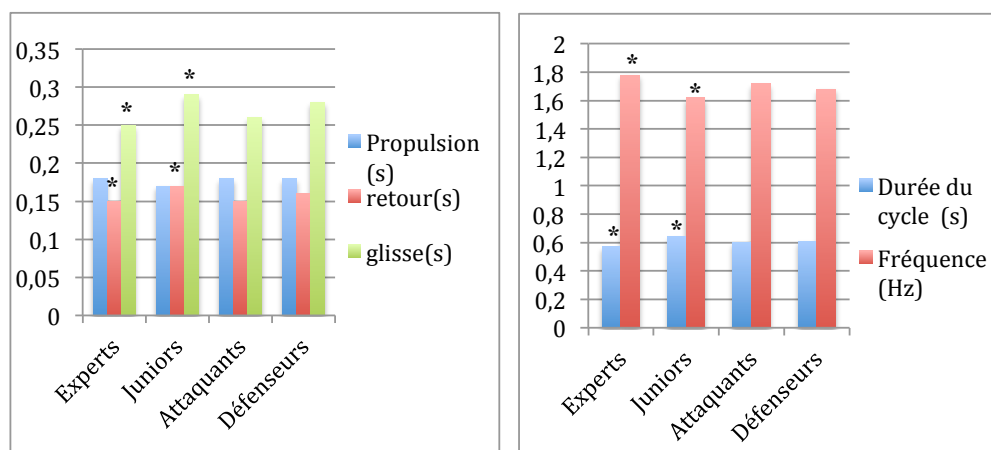


Figure 23. Effet de l'expertise sur les paramètres cinématiques du patinage (* indique une différence significative entre experts et juniors, $p < .05$).

Aucune différence significative n'est remarquée concernant les effets poste ou expertise sur les coefficients de variations. En revanche, nous pouvons préciser que les CV concernant la durée de la phase de glisse et de retour sont supérieurs à 15% ce qui indique une dispersion importante par rapport à la moyenne.

Nous relevons un effet des conditions sur la vitesse moyenne sur 20m ($F(1,854, 25.954) = 829.421, p=0.00, \eta^2_p = .983$), la durée du cycle ($F(3,12) = 20.428, p=0.000, \eta^2_p = .836$), la fréquence du cycle, la durée de la propulsion, la durée de la glisse, la durée du retour, le pic de force (respectivement $F(3,12)=27.573, p=0.000, \eta^2_p = .873, F(3,12) = 20.519, p=0.00, \eta^2_p = .837, F(1,657, 23.195) = 22.116, p=0.00, \eta^2_p = .612, F(3,12) = 5.11, p=0.017, \eta^2_p = .561, F(2,207, 30.901) = 3.746, p=0.031, \eta^2_p = .211$). La figure suivante illustre les résultats mentionnés précédemment concernant les paramètres cinématiques :

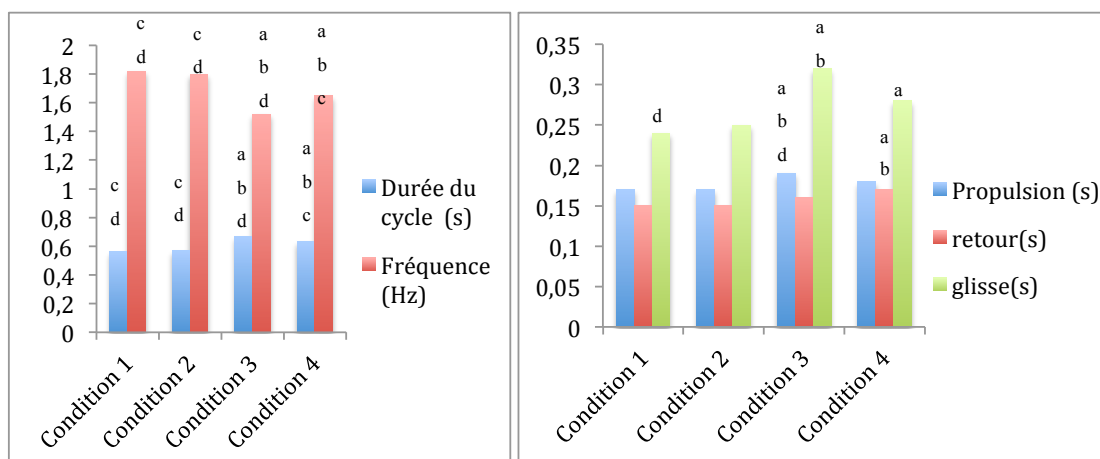


Figure 24. Représentation des paramètres cinématiques en fonction des conditions (^a différence significative avec la condition 1 (départ arrêté sans crosse), ^b différence significative avec la condition 2 (départ arrêté avec crosse), ^c différence significative avec la condition 3 (départ lancé avec crosse), ^d différence significative avec la condition 4 (départ lancé avec palet à conduire), $p < .05$).

En ce qui concerne les valeurs de pic de force, il existe une différence significative entre les conditions 1 et 2, sinon aucun effet condition supplémentaire n'est à rapporter (cf. figure 25).

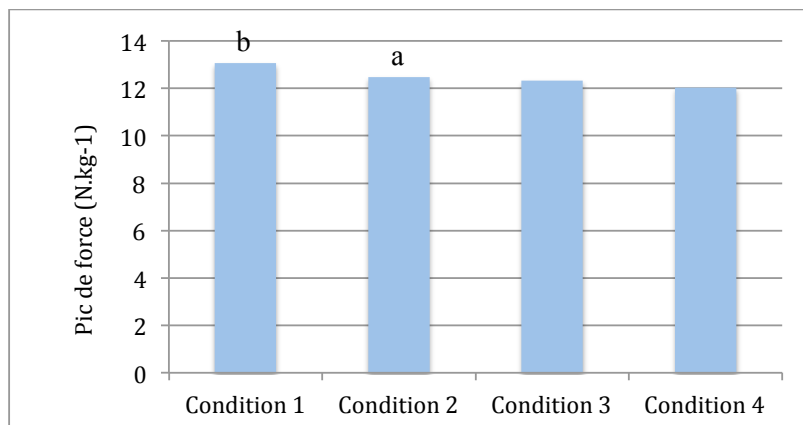


Figure 25. Représentation graphique des pics de force à l'initiation de la poussée (^a différence significative avec la condition 1, ^b différence significative avec la condition 2, $p < .05$).

L'analyse des coefficients de variation n'a révélé aucun effet significatif des conditions. Concernant les durées de glisse et de retour, les coefficients de variation sont supérieurs à 0.15 pour les conditions 1, 2 et 4 dans le cas de la glisse et pour l'ensemble des conditions dans le cadre du retour du patin.

L'ensemble des résultats concernant l'analyse cinématique et cinétique du patinage avant, sur la moyenne des valeurs obtenues, est présenté dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6. Différences cinématiques et cinétiques en fonction de l'expertise, du poste et des conditions d'expérimentation.

	Vitesse		Durée du cycle		Fréquence cycle		Durée Propulsion (s)		Durée Glisse (s)		Durée Retour (s)		Pic de force (N.kg ⁻¹)	
	Moyenne	(m.s ⁻¹)	Moyenne	(s)	Moyenne	(Hz)	Moyenne	(s)	Moyenne	(s)	Moyenne	(s)	Moyenne	(N.kg ⁻¹)
	M	CV	M	CV	M	CV	M	CV	M	CV	M	CV	M	CV
Experts	7.61*	0.016	0.57*	0.11	1.78*	0.10	0.18	0.12	0.25*	0.20	0.15*	0.17	12.9	0.10
Juniors	7.04*	0.024	0.64*	0.12	1.62*	0.12	0.17	0.15	0.29*	0.21	0.17*	0.19	12.2	0.12
Attaquants	7.39	0.020	0.60	0.11	1.72	0.10	0.18	0.14	0.26	0.20	0.15	0.19	12.7	0.10
Défenseurs	7.26	0.019	0.61	0.12	1.68	0.12	0.18	0.13	0.28	0.21	0.16	0.17	12.3	0.12
Condition 1	6.29^{cd}	0.019	0.56^{cd}	0.11	1.82^{cd}	0.11	0.17^c	0.13	0.24^{cd}	0.23	0.15^d	0.16	13.1^b	0.11
Condition 2	6.31^{cd}	0.020	0.57^{cd}	0.13	1.80^{cd}	0.12	0.17^c	0.14	0.25^c	0.23	0.15^d	0.16	12.5^a	0.11
Condition 3	8.50^{abcd}	0.022	0.67^{ab}	0.08	1.52^{abcd}	0.07	0.19^{abcd}	0.13	0.32^{ab}	0.09	0.16	0.19	12.3	0.08
Condition 4	8.18^{abc}	0.017	0.63^{ab}	0.13	1.65^{abc}	0.14	0.18^c	0.14	0.28^a	0.26	0.17^{ab}	0.20	12.0	0.14

* différence significative entre experts et juniors, ^a différence significative avec la condition 1, ^b différence significative avec la condition 2, ^c différence significative avec la condition 3, ^d différence significative avec la condition 4, p < .05.

Analyse différenciée des cycles de patinage. Il s'agit dans ce paragraphe de présenter les résultats obtenus en différenciant les mesures des patins gauche et droit.

Tout d'abord, nous avons cherché à identifier la part de poussée, glisse et retour du patin dans un cycle de patinage pour ensuite évaluer si l'expertise, le poste et les conditions exercent un effet sur cette dernière. À l'issue de l'ANOVA à trois-voies, il en ressort qu'une différence significative existe au niveau de la poussée à gauche et de la glisse (à gauche et à droite) entre experts et juniors (respectivement, $F(1,14) = 6.770$, $p=0.021$, $\eta^2_p = .326$, $F(1,14)=5.803$, $p=0.030$, $\eta^2_p = .293$, $F(1,14) = 6.844$, $p=0.020$, $\eta^2_p = .328$). En ce qui concerne l'effet des conditions, il existe une différence significative concernant la glisse du patin droit entre la condition 3 et les conditions 1 et 2 ($F(1.450, 20.304) = 10.697$, $p=0.002$, $\eta^2_p = .433$) que nous retrouvons également à gauche ($F(1.191, 16.676) = 4.808$, $p=0.037$, $\eta^2_p = .256$). Il y a également un effet condition sur le retour du patin à droite ($F(3,12) = 6.726$, $p=0.007$, $\eta^2_p = .627$) et à gauche ($F(1.860, 26.035) = 7.970$, $p=0.002$, $\eta^2_p = .363$).

Ensuite, concernant les CV, nous précisons qu'il existe un effet expertise sur le patin gauche lors de la poussée avec les experts qui ont un CV inférieur à celui des juniors ($F(1,14) = 9.257$, $p=0.009$, $\eta^2_p = .398$). Un effet condition ressort de l'analyse au niveau de la propulsion du patin gauche pour la condition 4 ($F(3,12) = 10.293$, $p=0.01$, $\eta^2_p = .720$) et de la condition 3 pour la glisse concernant le patin gauche et droit (respectivement, $F(1.754, 24.559) = 12.824$, $p=0.000$, $\eta^2_p = .478$ et $F(1.650, 23.104) = 10.758$, $p=0.001$, $\eta^2_p = .435$).

Le CV concernant la durée de retour du patin est >15% pour chaque condition, niveau d'expertise ou poste. Les paramètres poussée et glisse affichent des CV >15% à l'exception de la condition 1 patin droit et de l'ensemble des CV pour la condition 4. La condition 4 révèle des CV supérieurs à 15% au niveau de la poussée, de la glisse et du retour aérien ce qui sous-entend une plus grande variabilité inter-individuelle dans cette condition. L'ensemble des données est résumé dans le tableau 7.

Tableau 7. Effet expertise, poste et condition sur la part de chaque phase dans un cycle.

Groupes	Pieds	Durée propulsion (% du cycle)		Durée glisse (% du cycle)		Durée retour patin (% du cycle)	
		M	CV	M	CV	M	CV
Expert	Gauche	32.0*	0.12*	42.8*	0.12	25.3	0.15
	Droite	31.9	0.13	42.3*	0.13	25.8	0.15
Junior	Gauche	27.6*	0.16*	45.8*	0.12	26.7	0.18
	Droite	28.2	0.17	45.1*	0.13	26.7	0.19
Attaquant	Gauche	30.3	0.13	44.0	0.12	25.7	0.17
	Droite	30.1	0.15	43.0	0.13	26.2	0.19
Défenseur	Gauche	29.3	0.15	44.4	0.12	26.3	0.16
	Droite	29.3	0.15	44.3	0.13	26.4	0.16
Condition 1	Gauche	30.4	0.14	42.7*	0.13*	26.8*	0.17
	Droite	30.8	0.17	41.1*	0.16*	28.1*	0.17
Condition 2	Gauche	30.7	0.13^d	43.2*	0.13*	26.1*	0.16
	Droite	31.0	0.15	42.2*	0.13*	26.8	0.17
Condition 3	Gauche	28.8	0.12^d	47.3^{ab}	0.06^{abhd}	23.9^{abhd}	0.15
	Droite	29.2	0.13	46.9^{ab}	0.07^{abhd}	23.9^a	0.16
Condition 4	Gauche	29.1	0.18^{bc}	43.8	0.16*	27.0*	0.19
	Droite	29.3	0.17	44.4	0.16*	26.3	0.18

* différence significative entre experts et juniors, ^a différence significative avec la condition 1, ^b différence significative avec la condition 2, ^c différence significative avec la condition 3, ^d différence significative avec la condition 4, p < .05.

Pour illustrer ces résultats, nous avons représenté les effets principaux dans la figure suivante :

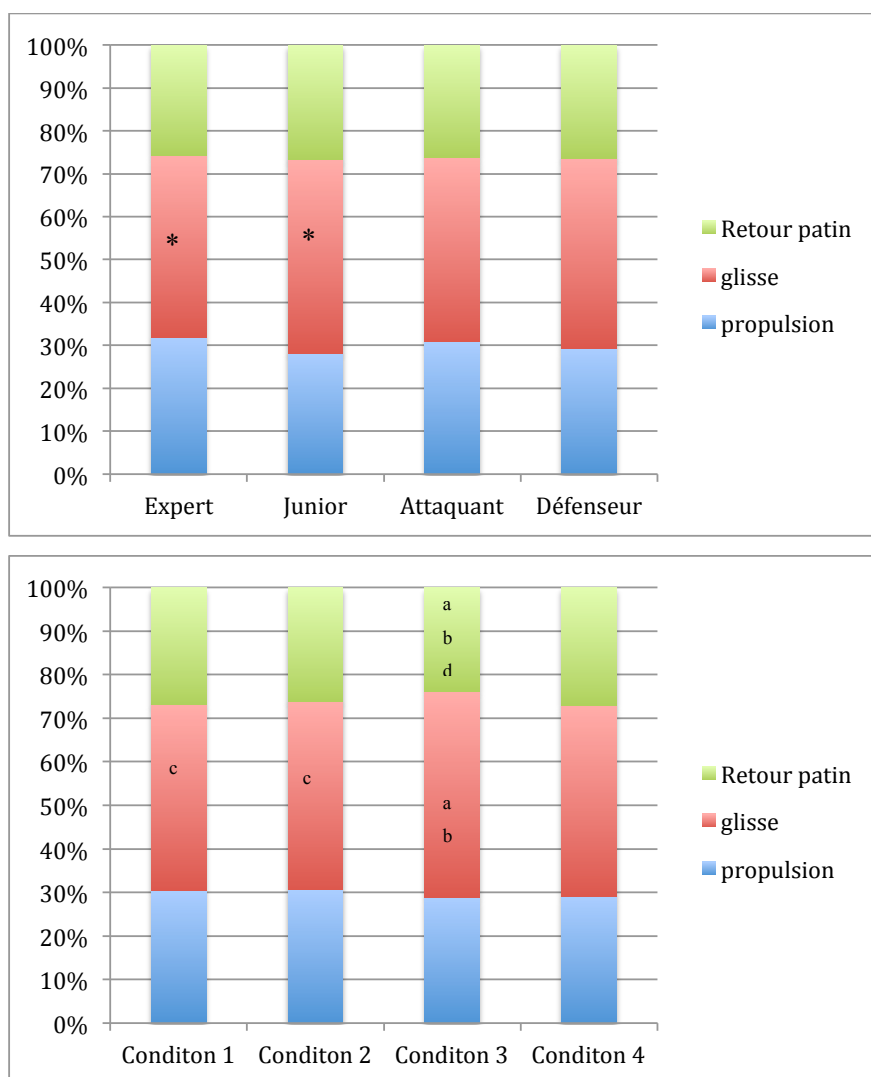


Figure 26. En haut : effet expertise et poste sur les répartitions des phases dans un cycle (patin droit) et en bas : influence des contraintes sur la répartition des phases dans un cycle (patin gauche) (* indique une différence significative entre expert et juniors, ^a différence significative avec la condition 1, ^b différence significative avec la condition 2, ^c différence significative avec la condition 3, ^d différence significative avec la condition 4, $p < .05$).

Paramètres superficiels par patin. Les résultats indiquent un effet expertise pour la durée du cycle ($F(1,14) = 11,901, p = 0.004, \eta^2_p = .459$ et $F(1,14) = 10.923, p = 0.005, \eta^2_p = .438$), la fréquence du mouvement (à droite : $F(1,14) = 11.238, p = 0.005, \eta^2_p = .445$ et à gauche : $F(1,14) = 10.541, p = 0.006, \eta^2_p = .430$), la durée de la glisse (à droite : $F(1,14) = 12.009,$

$p=0.004$, $\eta^2_p=.462$ et à gauche : $F(1,14) = 12.322$, $p= 0.003$, $\eta^2_p = .468$) et *la durée de retour* du patin (à droite : $F(1,14) = 6.544$, $p= 0.023$, $\eta^2_p = .319$ et à gauche : $F(3,12) = 5.233$, $p= 0.015$, $\eta^2_p = .567$). Aucun effet du poste n'est à signaler.

L'ANOVA a également mis en avant des effets conditions pour les paramètres suivants : *la durée de cycle* (à droite : $F(3,12)= 18.135$, $p= 0.000$, $\eta^2_p = .819$ et à gauche $F(3,12)= 19.898$, $p= 0.000$, $\eta^2_p = .833$), *la fréquence de cycle* (à droite : $F(3,12)= 23.014$, $p= 0.000$, $\eta^2_p = .852$ et à gauche : $F(3,12) = 28.655$, $p= 0.000$, $\eta^2_p = .878$), *la force de poussée* (à droite : $F(2.037, 28.524)= 4.346$, $p= 0.022$, $\eta^2_p = .237$), *la durée de la glisse* (à droite : $F(1.859, 26.031) = 24.698$, $p= 0.000$, $\eta^2_p = .638$ et à gauche : $F(1.589,22.242)= 17.989$, $p = 0.000$, $\eta^2_p = .562$), *la durée de la propulsion* (à droite : $F(2.062, 28.870)= 11.565$, $p= 0.000$, $\eta^2_p = .452$ et à gauche : $F(1.928, 26.993)=7.273$, $p=0.003$, $\eta^2_p =.342$)

Enfin, l'analyse des CV indiquent un effet expertise concernant la durée de propulsion sur le patin gauche ($F(1,14)=14.807$, $p=0.002$, $\eta^2_p=.514$) et aucun effet poste. Concernant les conditions, il y a des effets significatifs à propos des paramètres suivants : *durée cycle à gauche* ($F(3,12) = 10.472$, $p=0.001$, $\eta^2_p =.724$), *fréquence de cycle* (à droite : $F(3,12)= 5.624$, $p=0.012$, $\eta^2_p =.584$ et à gauche : $F(2.089, 29.249) = 3.749$, $p=0.000$, $\eta^2_p =.468$), *pic de force à la poussée* (à droite : $F(3,12) = 10.011$ $p=0.001$, $\eta^2_p =.715$ et à gauche : $F(3,12) = 5.508$, $p=0.013$, $\eta^2_p =.579$), *durée de glisse* (à droite : $F(1.995, 27.933)=9.805$, $p=0.001$, $\eta^2_p =.412$ et à gauche : $F(1.604, 22.451) = 15.868$, $p=0.000$, $\eta^2_p =.531$). La durée de glisse et de retour du patin sont les deux paramètres dans lesquels le CV est supérieur à 15%, indiquant une forte dispersion par rapport à la moyenne.

Les résultats sont résumés dans le tableau 8.

Tableau 8. Statistiques descriptives du cycle de patinage du patin gauche et du patin droit.

Groupes	Pieds	Durée du cycle (s)	Fréquence mouvement (Hz)		Durée propulsion (s)		Durée glisse (s)		Durée retour patin (s)		Pic de force en poussée (N.kg ⁻¹)		
			M	CV	M	CV	M	CV	M	CV	M	CV	
Expert	Gauche	0.58 [*]	0.10	1.77 [*]	0.10	0.18	0.11 [*]	0.24 [*]	0.19	0.14	0.17	13.02	0.09
	Droite	0.57 [*]	0.11	1.79 [*]	0.10	0.18	0.13	0.25 [*]	0.20	0.15 [*]	0.16	12.76	0.10
Junior	Gauche	0.64 [*]	0.12	1.61 [*]	0.12	0.17	0.14 [*]	0.26 [*]	0.20	0.17	0.20	12.15	0.11
	Droite	0.63 [*]	0.12	1.62 [*]	0.12	0.18	0.16	0.29 [*]	0.21	0.17 [*]	0.19	12.18	0.13
Attaquant	Gauche	0.60	0.10	1.71	0.10	0.18	0.12	0.27	0.18	0.15	0.19	12.41	0.09
	Droite	0.60	0.11	1.72	0.10	0.18	0.16	0.26	0.21	0.15	0.19	13.01	0.10
Défenseur	Gauche	0.61	0.12	1.68	0.12	0.18	0.13	0.28	0.21	0.16	0.18	12.76	0.11
	Droite	0.61	0.11	1.68	0.11	0.18	0.14	0.28	0.21	0.16	0.16	11.93	0.13
Condition 1	Gauche	0.56 ^{cd}	0.11 ^c	1.81 ^{cd}	0.11 ^c	0.17 ^c	0.13	0.24 ^c	0.21 ^c	0.15 ^d	0.18	13.06	0.09
	Droite	0.56 ^{cd}	0.11	1.82 ^{cd}	0.11	0.17 ^c	0.14	0.23 ^{cd}	0.24 ^c	0.15	0.15	13.06 ^{bd}	0.12 ^c
Condition 2	Gauche	0.57 ^{cd}	0.13 ^c	1.80 ^{cd}	0.12 ^c	0.17 ^c	0.11	0.25 ^c	0.21 ^c	0.15 ^d	0.17	12.48	0.10
	Droite	0.56 ^{cd}	0.13	1.81 ^{cd}	0.11	0.17 ^c	0.16	0.24 ^{cd}	0.24 ^c	0.15	0.15	12.48 ^b	0.12 ^c
Condition 3	Gauche	0.67 ^{ab}	0.07 ^{abd}	1.52 ^{acd}	0.07 ^{abd}	0.19 ^{ab}	0.12	0.32 ^{ab}	0.09 ^{abd}	0.16	0.18	12.33	0.07 ^d
	Droite	0.67 ^{ab}	0.08	1.53 ^{abd}	0.08 ^d	0.19 ^{ab}	0.14	0.31 ^{ab}	0.10 ^{abd}	0.16	0.20	12.33	0.08 ^{abd}
Condition 4	Gauche	0.62 ^{ab}	0.14 ^c	1.65 ^{abc}	0.15 ^c	0.18	0.14	0.28	0.27 ^c	0.17 ^{ab}	0.21	12.03	0.13 ^c
	Droite	0.63 ^{ab}	0.13	1.64 ^{abc}	0.13 ^c	0.18	0.15	0.28 ^{ab}	0.25 ^c	0.16	0.20	12.03 ^a	0.14 ^c

* différence significative entre experts et juniors, ^a différence significative avec la condition 1, ^b différence significative avec la condition 2, ^c différence significative avec la condition 3, ^d différence significative avec la condition 4, p < .05.

Nous avons représenté ces résultats à l'aide de la figure 27.

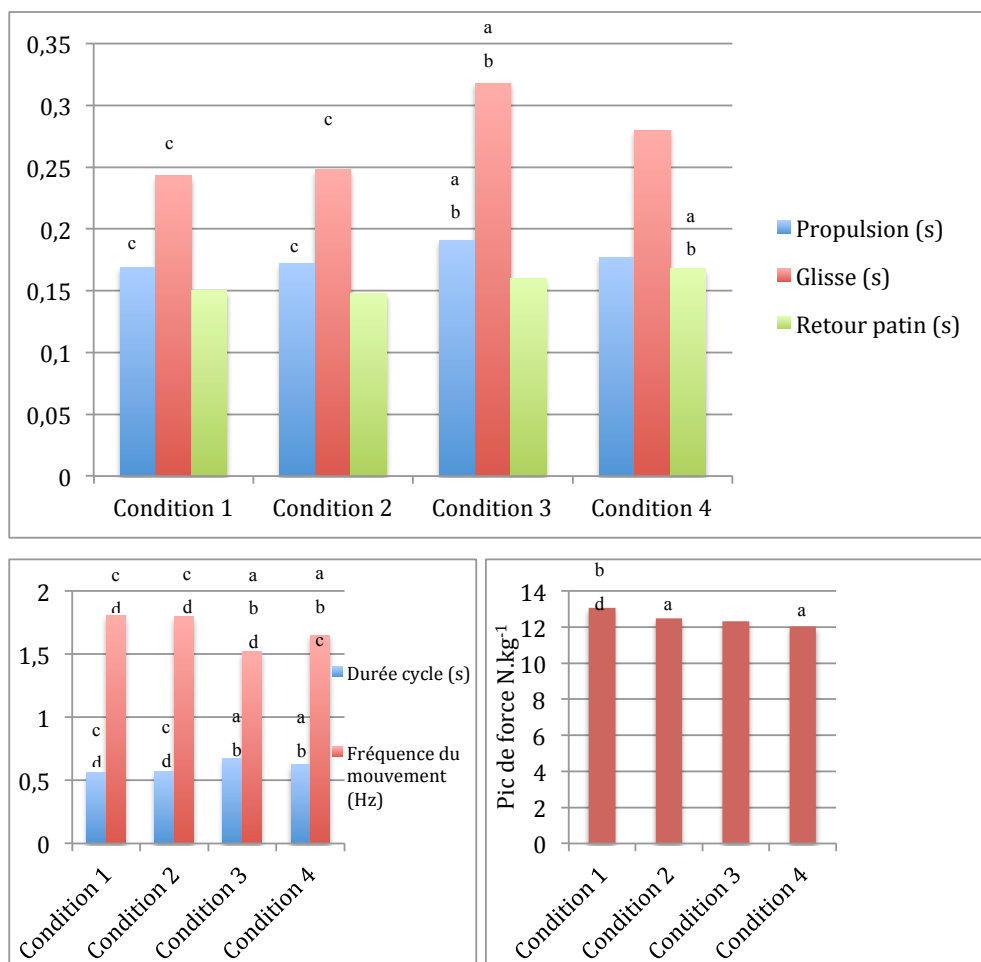


Figure 27. Représentation des variables cinématiques du patin gauche et du pic de force pour le patin droit dans les 4 conditions d'expérimentation (^a différence significative avec la condition 1, ^b différence significative avec la condition 2, ^c différence significative avec la condition 3, ^d différence significative avec la condition 4, $p < .05$).

Paramètres profonds

L'ANOVA a révélé un effet significatif de l'expertise ($F(1,14) = 4,698$, $p = 0.048$, $\eta^2_p = .251$) et aucun effet significatif du poste ou des conditions. Le tableau suivant résume les valeurs d'IdC par groupe et par condition.

Tableau 9. Résultat IdC par niveau d'expertise, poste et condition.

	IDC (%)	
	<i>M</i>	<i>CV</i>
Experts	-19.64 *	-0.18
Juniors	-23.69 *	-0.17
Attaquants	-21.04	-0.19
Défenseurs	-22.29	-0.16
Condition 1	-21.53	-0.15
Condition 2	-21.22	-0.16
Condition 3	-21.84	-0.14
Condition 4	-22.07	-0.26

* différence significative entre experts et juniors, $p < 0.05$.

Symétrie de comportement

Les ANOVA à trois-voies sur les index de symétrie (SI) n'ont révélé aucun effet significatif des conditions, du poste ou de l'expertise comme l'indique le tableau 10. Au regard des importantes valeurs d'écart-types, nous avons recensé le degré d'asymétrie pour chaque joueur dans chaque condition (en considérant $-10\% < SI < +10\%$ comme symétrique et $SI > 10\%$ ou $SI < -10\%$ comme asymétrique, selon Robinson et al., 1987 ; Annexes 4). A titre d'illustration, le tableau 11 présente les sept joueurs les plus asymétriques, tandis que le tableau 12 présente le degré d'asymétrie pour les sept paramètres comportementaux mesurés.

Tableau 10. Statistiques descriptives des Index de Symétrie (SI) déterminés sur la base de paramètres cinématiques et cinétiques du patinage avant

	SI_Durée du cycle (%)		SI_Fréquence (%)		SI_IDC (%)		SI_Glisse (%)		SI_Propulsion (%)		SI_Retour (%)		SI_Poussée (%)	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Expert	-1.01	± 7.35	1.01	± 7.49	-4.26	± 33.09	-1.23	± 13.06	0.18	± 14.95	2.76	± 16.32	-3.14	± 10.08
Junior	-0.69	± 8.13	0.69	± 8.13	-3.75	± 37.68	-1.59	± 14.72	1.43	± 19.31	0.03	± 21.47	-1.24	± 14.59
Attaquant	-1.36	± 7.99	1.36	± 8.12	-10.10	± 37.35	-2.22	± 13.55	1.22	± 16.99	2.12	± 19.82	3.50	± 10.91
Défenseur	-0.34	± 7.50	0.34	± 7.50	2.09	± 33.41	-0.59	± 14.23	0.39	± 17.28	0.69	± 18.04	-7.88	± 13.76
Condition 1	-1.02	± 6.49	1.02	± 6.49	-2.27	± 26.92	-4.47	± 13.94	0.58	± 18.23	4.78	± 18.40	-0.14	± 11.98
Condition 2	-0.42	± 7.38	0.42	± 7.65	-7.33	± 26.60	-2.74	± 12.41	1.41	± 15.94	2.71	± 18.69	-0.65	± 11.46
Condition 3	-0.91	± 5.00	0.91	± 5.00	0.59	± 23.83	-1.74	± 8.00	0.21	± 12.07	2.83	± 14.74	-4.33	± 9.27
Condition 4	-1.06	± 12.10	1.06	± 12.10	-7.02	± 64.19	3.31	± 21.22	1.03	± 22.30	-4.67	± 23.90	-3.63	± 16.63

Tableau 11. Paramètres superficiels et profonds concernés par l'asymétrie pour les sujets asymétriques : P (durée de la phase de propulsion), G (durée de la glisse), R (durée du retour), F (Pic de Force de Poussée), IdC, Dur (durée du cycle) et Fréq (fréquence du cycle).

Sujet	Expertise	Poste	COND 1	COND 2	COND 3	COND 4
8	Junior	Attaquant	G/P/R/F	X	F/R/P/IdC	X
10	Expert	Attaquant	P/R/G/IdC	F/R/P/IdC	F/R/P/IdC	IdC/R/P/F
14	Expert	Attaquant	X	F/R/G/IdC	X	X
7	Junior	Défenseur	X	F/R/P/IdC	F/R/P/IdC	F/R/G/IdC
6	Junior	Défenseur	X	F/R/P/IdC	F/R/P/IdC	F/R/P/IdC/G
9	Junior	Défenseur	X	X	X	F/R/P/IdC/G
18	Expert	Attaquant	X	X	X	F/R/G/IdC/Dur/Fréq

Le tableau 11 montre que parmi les joueurs les plus asymétriques (au moins 4 paramètres asymétriques sur 7), le degré d'asymétrie de chaque joueur fluctue avec les conditions de patinage : les joueurs peuvent être asymétriques pour une, deux, trois ou quatre conditions, suggérant que la symétrie n'est pas une propriété stable mais influencée par les conditions de pratique. La tendance qui émerge du tableau 11, confirmée par le tableau 12, est que la coordination motrice (IdC) apparaît comme le paramètre le plus sensible à l'effet des contraintes engendrant une asymétrie. La durée du retour et de la propulsion ainsi que la force de poussée sont les trois autres paramètres les plus influencés par l'effet des contraintes. La condition 4 ressort comme légèrement plus génératrice d'asymétrie.

Concernant les trois joueurs ayant une seule condition, dans laquelle l'asymétrie est révélée, il ressort que pour le joueur 14, cette asymétrie se traduit par un maintien de la performance sur 20m (différence de 0.06 s entre les conditions 1 et 2). En revanche pour les joueurs 9 et 18, l'asymétrie révèle une détérioration de la performance (augmentations respectives de 0.22s et 0.26s entre la condition 3 et la condition 4 dans laquelle ils sont asymétriques).

Tableau 12. Répartition des asymétries en fonction des conditions et des paramètres

	SI_Durée du cycle	SI_fréquence	SI_IdC	SI_Glisse	SI_Propulsion	SI_Retour	SI_Poussée	Total asymétrie	% asymétrie
COND 1	0	0	10	6	8	7	9	40	32%
COND 2	0	0	12	7	7	6	9	41	33%
COND 3	0	0	13	1	8	10	8	40	32%
COND 4	1	1	12	8	7	7	8	44	35%
Total Asymétrie	1	1	47	22	30	30	34		
Proportion de sujets asymétriques	1%	1%	65%	31%	42%	42%	47%		

Synthèse des résultats

Effet de l'expertise. L'ensemble des résultats indique que pour une performance significativement supérieure (vitesse de déplacement de 7.61 m.s^{-1} contre 7.04 m.s^{-1} pour les juniors), les experts présentent au niveau des paramètres superficiels : une durée de cycle plus courte, une fréquence supérieure, une durée de glisse inférieure, une durée de retour du patin inférieure (effet significatif pour l'ensemble de ces variables). Les experts ont également une durée de propulsion plus importante et produisent une force supérieure à celle des juniors mais les différences ne sont pas significatives. En terme de variabilité intra-individuelle, les experts présentent une stabilité au niveau de la production de la force de poussée ($CV < 10\%$) et deux paramètres ressortent comme très variables : la durée du retour ($CV 17\%$) et la durée de glisse ($CV 19\%$). Les juniors présentent des niveaux de variabilité intra-individuelle similaires aux experts. La variabilité inter-individuelle montre que les experts sur l'ensemble des paramètres ont un CV inférieur à celui des juniors.

Au niveau de l'IdC, les deux groupes manifestent un pattern en rattrapé mais les experts ont un plus petit IdC suggérant un écart plus court entre deux propulsions. Le coefficient de variation supérieur à 17% pour les deux groupes indique que ce paramètre profond du comportement est sujet à variabilité.

Effet du poste. Les résultats ne montrent pas de différences significatives entre les défenseurs et les attaquants.

Effet des conditions. Sur l'ensemble des conditions, les performances sont maintenues au fur et à mesure des essais (CV inférieurs à 2,5%). Les performances sont similaires pour tous les essais dans une même condition.

Les conditions départs arrêtés contraignent le joueur à réduire la durée des cycles et à augmenter la fréquence de patinage. Ces conditions amènent également le joueur à réduire la durée de la poussée et de la glisse. Le paramètre le plus variable dans ces conditions est la durée du cycle (CV entre 11 et 13%). La condition 1 révèle le pic de force le plus important.

La condition départ lancé avec crosse est caractérisée par la durée de cycle la plus longue, la fréquence de mouvement la plus faible, la durée de propulsion la plus longue, la durée de glisse la plus longue, la durée de retour du patin la plus courte. Il s'agit également de la condition pour laquelle les contraintes sont les moins perturbantes : l'ensemble des CV sont inférieurs aux autres conditions.

La condition 4 ressort comme étant la plus perturbante : les CV sont supérieurs à toutes les autres conditions pour l'ensemble des paramètres mesurés avec des valeurs importantes comme 19% concernant la durée du retour du patin contrairement à 15-17% pour les trois autres conditions. Dans cette condition, la durée du retour du patin est la plus élevée tout comme le CV de ce paramètre superficiel. La condition 4 met en avant la plus importante valeur d'IdC (-22.07) et surtout une forte influence de la conduite du palet sur l'IdC (CV de 26%). Enfin, la condition 4 génère un peu plus d'asymétrie (35%).

Les paramètres les plus perturbés par les contraintes sont : la durée de la glisse (CV supérieurs à 20% à l'exception de la condition 3), le retour du patin (CV compris entre 16 et 20%). Le paramètre le moins affecté par la manipulation des contraintes est le pic de production de force à la poussée (CV toujours inférieurs à 15% même pour la condition 4).

Discussion

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'effet de la manipulation de contraintes de tâches représentatives de l'activité (i.e., départ lancé ou arrêté, utilisation de la crosse, conduite du palet) sur des paramètres profonds et superficiels lors d'un sprint sur 20m. Les effets d'interactions entre les facteurs condition X expertise X poste étant inexistant, nous analyserons les résultats à la lumière des effets isolés.

Effet Poste.

Contrairement à l'hypothèse avancée, nous n'obtenons aucun résultat en faveur de l'idée que le poste influence le pattern moteur de patinage en avant. Cela pourrait s'expliquer par le fait que patiner vers l'avant lors d'un match est une tâche quasiment autant répandue entre les défenseurs que les attaquants. En effet, Montgomery et al. (2004) relèvent que les mouvements de patinage sont différents en fonction des postes. Cependant, si nous nous concentrons uniquement sur le temps à patiner vers l'avant par match, il n'y a pas de différence importante entre les défenseurs et les attaquants (entre 847s de moyenne par match pour les attaquants et 904s pour les défenseurs). Pour autant, le fait de consacrer autant de temps par match à patiner ne garantit en rien la même efficacité dans le patinage. Cela pourrait expliquer l'absence de différence significative entre les résultats analysés en fonction des postes des joueurs. Une tâche de patinage arrière pourrait être plus discriminante si nous suivons cette logique. La tâche de conduite du palet n'était peut-être pas assez perturbante pour associer différentes compétences telles que le dribble en patinant qui ajouterait de la difficulté à la réalisation de la tâche et la rendrait plus discriminante.

Effet Expertise.

Nous avons présenté l'expertise comme la capacité à réaliser une performance avec vitesse, précision, économie et adaptabilité (Johnson, 1961). L'adaptabilité se définissant comme le compromis entre stabilité et flexibilité du comportement lorsque les perturbations des contraintes l'imposent (Warren, 2006). Dans l'ensemble des conditions, les experts sont les plus rapides et réalisent des performances avec une importante stabilité (CV inférieurs à 15%) garantissant la stabilité de la performance. Dès lors, la variabilité du comportement pourra être comprise comme fonctionnelle, c'est-à-dire assurant le maintien du niveau de performance en réponse aux perturbations des contraintes.

L'analyse des variables superficielles a révélé une différence significative entre experts et juniors concernant de nombreux paramètres superficiels. Les experts contrôlent différemment le mouvement : une durée de cycle plus courte (0.57s contre 0.64s), une fréquence de cycle supérieure (1.78 Hz contre 1.62 Hz), une durée de glisse inférieure (0.25s contre 0.29s), une durée de retour du patin inférieure (0.15s contre 0.17s). Ils produisent une force supérieure à celle des juniors (12.89 N.kg⁻¹ pour les experts et 12.18 N.kg⁻¹ pour les juniors) mais les différences ne sont pas significatives. Ces mesures de force sont en cohérence avec des mesures présentées dans la littérature, c'est-à-dire comprises entre 1 à 2 fois le poids du corps lors de la poussée (Fortier, Turcotte, & Pearsall, 2014; Jobse et al., 1990; Robert-Lachaine et al., 2012; Sim & Chao, 1978; Stidwill, Turcotte, Dixon, & Pearsall, 2010). Enfin, lorsque nous rapportons la durée de propulsion à la durée du cycle, une différence significative ressort : la propulsion est plus longue chez les experts. Ainsi, les experts et juniors contrôlent différemment les paramètres superficiels pour se déplacer plus rapidement.

Sur cette base, les paramètres qui ressortent comme caractérisant la locomotion de l'expert comparativement à celle des juniors sont : une plus faible durée de glisse et une plus faible durée de retour du patin induisant une réduction de la durée du cycle et par extension une augmentation de la fréquence de ce dernier. C'est pourquoi, lors d'un cycle de patinage, l'expert passe 32% du cycle dans la phase de poussée, 43% en glisse et 25% en retour du patin alors qu'un junior passe 28% du cycle en poussée, 45% en glisse et 27% en retour. Ces paramètres ressortent comme privilégiés lorsqu'il s'agit de générer de la vitesse. Nos résultats sont en accord avec de précédentes études qui expliquaient que la vitesse du joueur dépend plus du nombre de foulées que de la longueur de ces dernières (Houdijk, De Koning, De Groot, Bobbert, & Van Ingen Schenau, 2000; Marino, 1977; Pearsall et al., 2000; Upjohn et al., 2008). Cette part plus importante de la fréquence de mouvement dans l'explication du gain de vitesse s'accompagne d'une réduction du temps de contact entre la lame et la glace à l'image de ce que nous retrouvons en course à pied (Marino, 1977, 1983).

Au niveau de la variabilité inter-individuelle, les experts ont pour l'ensemble des paramètres un comportement plus stable que les juniors (les CV sont inférieurs). Ce comportement plus stable ne signifie pas qu'il n'y a pas de variabilité du mouvement. En effet, les coefficients de variation concernant la durée de la glisse et le retour du patin sont compris entre 12 et 19%, suggérant que ces deux paramètres superficiels sont flexibles et varient pour répondre aux perturbations engendrées par la modification des tâches. Au regard

du maintien de la performance (pas de détérioration de la vitesse de patinage), cette variabilité comportementale apparaît donc fonctionnelle.

Enfin, concernant l'évaluation de la coordination entre les membres propulsifs, les deux groupes patinent en rattrapé suggérant une part importante d'activité non propulsive dans le patinage avant. Les joueurs ne semblent pas pouvoir adopter d'autres modes de coordination puisque la part importante de la phase de glisse du membre non-propulsif contribue au transfert de poids (difficile d'initier la poussée tant que le patin controlatéral n'a pas touché le sol) et à l'ouverture du patin pour initier la poussée, ce qui impose un décalage temporel entre les poussées. Ces résultats confirment l'affirmation de Pearsall et al. (2000) à savoir que la propulsion débute entre la moitié de la phase d'appui unipodal et le contact avec la glace du patin controlatéral. Ces résultats valident le constat de Bracko (2004) : la phase de simple support est une phase de glisse accompagnée d'une légère décélération (i.e., $IdC < 0$ caractérisant une phase non propulsive dans la coordination entre les deux segments).

L' IdC est inférieur chez les experts mais le CV associé ne l'est pas en revanche. En effet, le CV des experts est supérieur à celui des juniors et met en avant une forte variabilité intra-individuelle (CV=17%). Ces résultats suggèrent qu'en relation avec la variabilité des durées de glisse et de retour du patin, l'expert soit capable d'adapter le décalage entre deux phases propulsives en réduisant la durée de la glisse et du retour en fonction de l'interaction avec les contraintes. Ainsi, en contrôlant deux paramètres superficiels (i.e., réduction de la durée de glisse et du retour du patin), l'expert peut contrôler son mode de coordination entre les deux segments propulsifs et réduire la part d'actions non propulsives dans le cycle de patinage pour maintenir une stabilité de la performance.

Effet de la manipulation des contraintes de tâches.

L'analyse statistique sur la vitesse moyenne révèle que la manipulation de la contrainte de tâche, départ arrêté et départ lancé, engendre une différence de vitesse sur le parcours. Ainsi la vitesse dans les conditions 1 et 2 (respectivement 6.29 m.s^{-1} et 6.31 m.s^{-1}) est significativement plus faible que dans la condition 3 (8.50 m.s^{-1}) et la condition 4 (8.18 m.s^{-1}). Il y a bien une différence dans la vitesse de déplacement entre les conditions départ arrêté ou lancé ainsi qu'entre les conditions lancées avec palet ou sans palet. Ces résultats font ressortir le caractère fortement contraignant de la conduite du palet lors du déplacement en sprint. Elle se manifeste par une réduction de la vitesse de déplacement tandis que la manipulation de la crosse n'impacte pas la performance (pas de différence significative entre les conditions 1 et 2). Précisons que dans l'ensemble des conditions, les participants

démontrent une stabilité dans leur performance puisque les coefficients de variations calculés sont inférieurs à 2.5%. La variabilité du comportement expert durant cette expérimentation ne se manifeste pas au niveau de la performance mais du mouvement à travers l'expression d'une variabilité fonctionnelle puisqu'elle maintient la performance à un haut-niveau de vitesse en dépit des perturbations des contraintes (Davids et al., 2003).

Dans cette étude, nous souhaitons manipuler des contraintes les plus représentatives de la tâche de patinage avant afin d'identifier si la création de vitesse, la tenue de la crosse, la conduite du palet influencent la locomotion. À travers ces résultats, la durée et la fréquence du cycle apparaissent tributaires du départ lancé ou arrêté. En effet, lors de la création d'accélération (i.e., départ arrêté), nous retrouvons des résultats en cohérence avec la littérature, à savoir une fréquence du mouvement plus importante (e.g., 1.80 Hz) rappelant la caractéristique des trois premières foulées différenciées des suivantes énoncée d'abord par De Koning et al., (1995) en patinage de vitesse puis repris par Lafontaine (2007) : « *from running to gliding* ». Effectivement, quand le joueur dépasse la troisième foulée, l'amplitude de flexion du genou est plus grande, ce qui fait basculer le joueur dans un mode de coordination de glisse (Lafontaine, 2007) et corrobore le travail mené en patinage de vitesse qui avançait une différence substantielle entre la cinématique des premières foulées du sprint et celles des dernières foulées (De Koning et al., 1995). En comparant les conditions 1 et 2 avec les conditions 3 et 4, nous constatons que la diminution de la fréquence de foulée (e.g., 1.52 Hz pour la condition 3) et l'augmentation de la durée du cycle (0.56 s en condition 1 contre 0.67s en condition 3) met en exergue l'utilisation progressive de la glisse (0.24s en condition 1 contre 0.32s en condition 3). Ceci corrobore le fait que lors de la création de vitesse les hockeyeurs réalisent d'abord de courtes foulées avec une fréquence gestuelle plus importante. Lorsqu'ils exploitent une vitesse déjà créée par un virage, l'utilisation de la lame du patin dure plus longtemps, séparant bien le pattern de course de celui de patinage.

Nous nous sommes demandés si patiner avec une crosse pouvait perturber le patinage avant en constituant un point d'équilibre facilitant la propulsion ou en limitant le mouvement des bras (ce qui réduit leur utilisation pour optimiser la performance). Lorsque nous portons notre attention sur les paramètres analysés dans les conditions 1 et 2, il se trouve qu'aucune différence significative n'est observée. Pour l'ensemble des joueurs de l'expérimentation, sans distinction de poste ou de niveau d'expertise, il n'y a aucune différence significative dans les paramètres analysés. Nous pouvons en conclure, que le port de la crosse n'impacte pas la performance du joueur lorsqu'il patine vers l'avant.

La condition départ lancé sans palet à conduire ressort comme étant la condition impliquant le moins de variabilité ($CV < 10\%$ sauf pour la durée de propulsion : $CV = 13\%$, et la durée du retour du patin : $CV = 19\%$). Cette condition sans contrainte expérimentale particulière à l'exception de l'entretien de la vitesse pour aller le plus vite possible, révèle la plus grande stabilité du pattern. Il s'agit d'un pattern que nous retrouvons sur le tapis roulant (vitesse relativement stable, pas de contraintes de tâche supplémentaire au port de la crosse) (Marino, 1977; Upjohn et al., 2008). Cette condition correspond à la condition dans laquelle les joueurs vont le plus vite ($8.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), glissent le plus longtemps (0.32s), ont le cycle le plus long (0.67s) et la fréquence de mouvement la plus basse (1.52 Hz). Dans cette condition d'entretien de la vitesse, les indicateurs de performance sont : une augmentation de la durée de la glisse (47% du cycle) et une réduction du retour du patin (24% du cycle). Pour contrôler la vitesse de déplacement Marino & Drouin (2002) utilisent un tapis roulant et rapportent des constats communs à la course ou à la marche en situation de fatigue : lorsque la vitesse de patinage diminue ($9,2 \text{ m/s}$; $7,71 \text{ m/s}$ et $6,97 \text{ m/s}$), elle s'accompagne d'une réduction de la fréquence de patinage ($2,57 \text{ Hz}$ pour ensuite passer à $2,03 \text{ Hz}$ et $1,97 \text{ Hz}$). La durée d'un cycle augmente, se traduisant par une réduction du temps passé sur deux appuis (de $83,5\%$ à 78% du cycle) et une augmentation de la durée du retour de patin. Cependant, la longueur de la foulée (respectivement $3,61\text{m}$; $3,79\text{m}$ et $3,63\text{m}$) ne diffère pas significativement en fonction de la fatigue suggérant que la composante « glisse » du mouvement assurerait le maintien de cette valeur et prendrait une part plus importante avec l'augmentation de la fatigue. Nos résultats dépassent cet effet fatigue et démontrent qu'en cas de vitesse déjà générée avant un sprint la composante glisse joue un rôle primordial pour entretenir la vitesse sans être la conséquence de la fatigue. Dans les deux configurations (joueur lancé ou arrêté avant un sprint), la réduction de la durée du retour du patin est à privilégier pour aller plus vite, ce qui est en accord avec d'autres travaux relatifs à la cinématique du patinage (Stidwill et al., 2010; Upjohn et al., 2008). Cependant, la durée de la glisse peut être un facteur de performance lorsqu'il s'agit d'exploiter une vitesse déjà créée.

En comparant la condition 3 avec la 4, il apparaît que le palet induit une plus grande variabilité du comportement. En effet, si nous prenons l'exemple d'un facteur important dans la performance lancée, la durée de la glisse, la condition 3 révèle le pattern le plus stable ($CV = 9\%$) tandis qu'avec le palet le CV de glisse est de 26% . Sur l'ensemble des paramètres mesurés, la condition 4 présente le CV le plus grand, ce qui la fait apparaître comme étant la condition la plus génératrice de variabilité. Quand les joueurs doivent conduire un palet, dans un environnement sans incertitude (pas de défenseurs, de partenaires, sprinter sur une ligne

droite), le CV demeure important (compris entre 13 et 26% suivant les paramètres). Cela révèle bien l'importance qu'une contrainte peut jouer dans la génération d'un comportement, qui a priori était stable et reproductible. La conduite du palet induit une réorganisation de la cinématique de patinage (e.g., réduction de la durée de la glisse, augmentation de la durée du retour) pour patiner vers l'avant.

Enfin, les paramètres superficiels les plus perturbés par les modifications des contraintes de tâche sont : la durée de la glisse (CV supérieurs à 20% à l'exception de la condition 3), le retour du patin (CV compris entre 16 et 20%). Le paramètre le plus résistant à l'ensemble des perturbations est le pic de production de force à la poussée (CV toujours inférieurs à 15% même pour la condition 4).

Effet des contraintes sur la symétrie des paramètres de contrôle du mouvement.

Nous avons envisagé la possibilité que le contrôle du mouvement de patinage soit influencé par de fortes contraintes (e.g., conduire un palet) impliquant une adaptation de la symétrie du pattern pour produire une performance optimale. L'analyse statistique pour les Index de Symétrie n'indique aucun effet significatif des conditions, du poste ou de l'expertise. Pour autant, une analyse qualitative des valeurs d'Index de Symétrie montre entre 32 à 37% d'asymétrie pour les paramètres mesurés dans les quatre conditions de patinage, avec une asymétrie légèrement plus importante pour la condition avec palet ; ceci ne permet pas de conclure que le port de la crosse influence la symétrie du pattern de patinage au niveau des membres inférieurs mais suggère simplement un léger effet de la conduite du palet.

Si nous focalisons notre attention sur les joueurs les plus asymétriques (Tableau 11), nous pouvons remarquer que l'asymétrie porte essentiellement sur la coordination, la durée du retour de patin, la durée de poussée et la force de poussée. En spécifiant l'analyse au joueur 10 qui est asymétrique dans l'ensemble des conditions, la durée du retour, de la propulsion, la force de poussée et la coordination sont toujours asymétriques, indiquant une persistance de cette asymétrie aux effets des contraintes. Ce joueur là a donc un comportement asymétrique stable. À l'inverse, pour les trois joueurs (9, 14, 18) n'étant asymétriques que dans une condition de patinage, nous constatons que les joueurs 9 et 18 sont asymétriques dans la condition 4 (condition avec palet). Dans cette condition avec palet, ces deux joueurs ont une performance (vitesse de déplacement sur 20) qui régresse. Nous pouvons alors supposer que la contrainte de la conduite du palet est importante et génère une déstabilisation du comportement se traduisant par une asymétrie dans l'organisation des paramètres profonds et superficiels. Dans ce cas, la variabilité du comportement s'accompagne d'une diminution de

la performance et apparaît peu fonctionnelle, révélant les limites de la capacité d'adaptation de ces deux joueurs. À l'inverse, le troisième participant qui montre une asymétrie en condition 2 maintient le même niveau de performance. Dès lors, l'asymétrie des paramètres profonds et superficiels apparaît comme une manifestation de la flexibilité du comportement favorisant l'adaptation à la tenue de la crosse.

Enfin, comme l'avait déjà mentionné Seifert et al. (2005) dans une autre activité cyclique (la coordination des bras en crawl en natation), la coordination des propulsions des membres inférieurs (IdC) est le paramètre qui est le plus asymétrique indépendamment de la condition de patinage, puisque 65% des hockeyeurs ont une coordination asymétrique. Ce paramètre profond du mouvement est le plus affecté par l'asymétrie, ce qui suggère que la coordination des propulsions est plus complexe à contrôler qu'une propulsion d'une jambe isolée. À l'inverse, la fréquence de patinage montre une faible asymétrie (1%) et varie peu avec les conditions de patinage.

Conclusion et perspectives

En considérant que le comportement émerge sous l'effet d'interactions de contraintes, nous avons examiné la stabilité du comportement expert et non expert dans des situations censées être représentatives du contexte écologique de pratique, dont les contraintes de tâche étaient manipulées. Les résultats montrent au niveau des paramètres superficiels que la création de vitesse passe par une réduction de la durée du cycle (de la phase de glisse, de retour du patin), une augmentation de la fréquence de patinage. En revanche, l'exploitation d'une vitesse créée à partir d'un virage repose sur une durée de retour du patin brève et une augmentation de la glisse. Nous avons pu montrer que la glisse, occupant une part très importante dans le cycle de patinage, contraint les hockeyeurs à patiner en rattrapé sans aucun autre mode de coordination possible entre les deux patins. L'analyse de la symétrie a permis de révéler le caractère stable pour certains hockeyeurs et flexible pour d'autres hockeyeurs, pouvant être pour certains joueurs un moyen de s'adapter à la modification des contraintes et pour d'autres l'expression d'une perturbation trop importante des conditions conduisant à la détérioration de la performance. L'asymétrie de coordination des propulsions des membres inférieurs (IdC) quelles que soient les conditions de patinage, reflète la complexité à contrôler une coordination de mouvement plutôt qu'un mouvement lui-même, et suggère d'évaluer l'impact de cette asymétrie sur la performance, ainsi que sa stabilité quand les contraintes de pratique sont modifiées.

Ajoutons, qu'au regard des résultats obtenus, nous n'observons pas de différence entre les variables mesurées pour les attaquants et les défenseurs. Autrement dit, le poste de jeu n'influence pas la cinématique du patinage avant. Enfin, la manipulation des contraintes a révélé la stabilité du comportement du joueur lorsqu'il s'agit de tenir la crosse en avançant mais sa flexibilité lorsqu'il fallait adapter sa trajectoire au transport du palet. C'est pour cette raison qu'il nous semble important de travailler à l'entraînement avec un environnement qui reproduise ces incertitudes liées dans notre cas au transport du palet. De façon isolée, la durée du retour du patin étant un critère de performance, il nous semble pertinent de travailler l'amélioration de la fréquence gestuelle ainsi que l'explosivité des muscles impliqués dans ce mouvement (en particulier les ischio-jambiers et les adducteurs).

Enfin, une perspective pour l'analyse de la locomotion cyclique telle que le patinage, serait d'étudier le rapport de fréquence entre les bras et les jambes en s'inspirant d'études en ski de fond (Cignetti, Schena, Zanone, et al., 2009) ou concernant la marche (Donker et al., 2001; Van Emmerik & Wagenaar. 1996; Wagenaar & Van Emmerik. 2000).

Etude 2 : Fluidité du mouvement sous l'effet de manipulation de contrainte de tâche

Ce travail n'a pas fait l'objet d'une publication, cependant des travaux annexes en lien avec la problématique de l'utilisation des centrales inertielle ont été réalisés :

Seifert, L., L'Hermette, M., Komar, J., Orth, D., Mell, F., Merriaux, P., . . . Davids, K. (2014). Pattern recognition in cyclic and discrete skills performance from inertial measurement units. In D. James (Ed.), *The 2014 conference of the International Sports Engineering Association (ISEA 2014)* (pp. 196-201). *Procedia Engineering* (72). Elsevier BV. doi:10.1016/j.proeng.2014.06.033

Seifert, L., L'Hermette, M., Wattebled, L., Komar, J., Mell, F., Gomez, D., Caritu, Y. (2011). Use of Inertial Central to Analyse Skill of Inter- Limb Coordination in Sport Activities. In B. Bardy (Ed.), *The International Conference SKILLS 2011*. *BIO Web of Conferences* 1. EDP Sciences. doi : 10.1051/bioconf/201101000

Mell, F., L'Hermette M., Caritu Y., & Seifert, L. (2012). Use of Inertial Central to Analyse Movement. *XXXII World Congress of Sports Medicine*. Rome, Italy.

Méthode

Protocole et population

Identique à ce qui a été énoncé dans l'étude précédente.

Matériel

Nous avons utilisé les foot plantar pressure sensors F-Scan[®] et la centrale inertielle Hikob[®] placée sur le sacrum en suivant la recommandation de Kenneally-Dabrowski et al. (2017) afin d'obtenir un enregistrement relativement sensible aux impacts au sol et évaluer la fluidité du mouvement en calculant le coefficient de jerk moyen sur 20m. Ce type de calcul n'ayant jamais été réalisé, nous avons dans un premier temps comparé les mesures obtenues par les foot plantar pressure sensors F-Scan[®] considérés comme l'outil de référence (the 'gold standard') (Bland & Altman, 2007) avec celles obtenues par la centrale inertielle placée au niveau du sacrum. Une fois la comparaison effectuée, nous avons exploré en quoi les centrales inertielles pouvaient être un outil nouveau pour évaluer la fluidité du mouvement à l'aide du calcul du jerk.

Les centrales inertielles ont été calibrées pour éviter les problèmes de décalages temporels, d'échelle et de non-orthogonalité en utilisant une méthode in situ de calibration (Dadashi et al., 2015; El-diasty & Pagiatakis, 2008). Les auteurs préconisent deux calibrations statiques des accéléromètres et deux calibrations dynamiques de gyroscopes afin de détecter et corriger les erreurs de non-orthogonalités (être en mesure de positionner les centrales inertielles sur les trois axes orthogonaux lors de l'enregistrement en référence à l'axe gravitaire g). El-diasty & Pagiatakis (2008) préconisent un minimum de 30 secondes d'enregistrement à 100Hz pour réaliser cette calibration.

Procédure de calibration de la centrale inertielle. Avant chaque campagne de mesure, nous avons réalisé une calibration dynamique des capteurs dans la zone de sprint (rotation sur eux-mêmes) et une calibration statique dans l'axe de déplacement (figure n°28).



Figure 28. Calibration statique de la centrale inertielle dans l'axe de déplacement 30 secondes dans l'axe de déplacement du joueur.

Nous avons, en plus de cette procédure, respecté les préconisations énoncées. C'est pourquoi, en début et en fin de session, un enregistrement dynamique par membre inférieur et un enregistrement statique de 60 secondes avant chaque nouvel essai dans deux positions statiques ont été effectués (figure n° 29).



Figure 29. 60 secondes d'immobilité bras le long du corps puis 20 secondes bras en croix posés sur un niveau.

La synchronisation des systèmes via le saut avant de sprinter a été présentée dans l'étude précédente.

Traitement des données.

L'ensemble du traitement des données a été réalisé sous le logiciel Matlab® R2014a (1994–2014, The MathWorks, Inc.).

Nous avons utilisé un filtre de Butterworth passe-bas d'ordre 3 et une fréquence de coupure de 8 Hz pour filtrer les signaux issus des centrales inertielle. Les signaux issus du système *foot plantar pressure sensors F-Scan®* n'ont pas été filtrés afin de préserver l'ensemble des fréquences enregistrées et ne pas perdre la localisation de l'impact pic notamment. En annexe figurent la représentation graphique permettant de justifier l'ordre et la fréquence de coupure de 8 Hz (procédure d'analyse des résidus développée par Winter (1990) et Winter, Sidwall, & Hobson (1974)) ainsi que notre choix de ne pas filtrer les données issues des *foot plantar pressure sensors F-Scan® System*.

Nous avons eu recours à des filtres complémentaires, compensant notamment la distorsion magnétique causée par des éléments métalliques présents dans l'environnement et la dérive des mesures des gyroscopes au fur et à mesure du mouvement pour retrouver l'orientation de la centrale inertielle et corriger d'éventuelles dérives dans le signal accélérométrique brut (pour plus de détails, voir Madgwick (2010); Madgwick, Harrison, & Vaidyanathan (2011)). Ce traitement des signaux accélérométriques en 3D combiné avec

celui des signaux issus du gyroscope et du magnétomètre permet de réduire la dérive du signal du gyroscope et d'exprimer la valeur moyenne du jerk dans un mouvement en 3D de translation dans un cadre terrestre de référence.

Procédure d'exclusion des cycles. Lors de l'analyse comparative des deux systèmes, nous avons analysé un total de 1418 cycles indépendamment des conditions et des sujets. La sélection des cycles a été réalisée suivant une règle : si la projection du pic de push-off ou de Toe-off apparaît sur un enregistrement non cyclique ou lorsqu'il y a un écart supérieur à la moitié du temps écoulé entre le pic maximum et le minimum (ou inversement) de la suite de la série, alors nous l'excluons. Au total, sur les 1418 cycles, nous avons conservé 705 cycles pour la comparaison avec le système de semelle TekscanTM.

Dans la seconde partie de l'étude, nous avons calculé le jerk (i.e., afin de connaître la variation d'accélération lors du 20m) ce qui impliquait de conserver les essais affichant un caractère cyclique sur l'ensemble de l'essai, sans dérive (illustration figure n°30). Nous avons conservé 79 essais (21 en condition 1, 23 en condition 2, 24 en condition 3 et 11 en condition 4), soient 44 en condition départ arrêté et 35 en condition départ lancé.

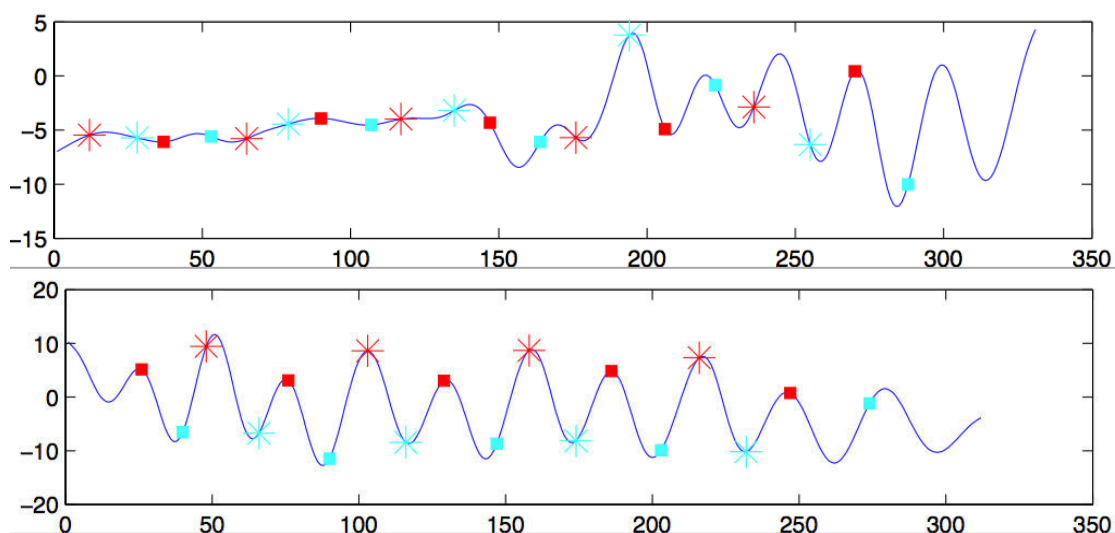


Figure 30. Exemple d'enregistrement d'accéléromètres au niveau du sacrum rejeté en haut et accepté en bas. La couleur rouge correspond au Pic de force lors de la poussée et la couleur bleue au Toe-off. Les carrés représentent l'enregistrement du patin droit et les étoiles celui du patin gauche obtenus par les foot sensors et calqués sur le signal d'accélérométrie.

Calcul du jerk. Le calcul du jerk repose sur la méthode développée par (Seifert et al., 2014) à savoir : le jerk est la mesure de la fluidité de la trajectoire du bassin lors du patinage.

Pour une trajectoire fluide, $x^{GF} \in \mathbb{C}^3 ([0, T])$, le jerk J_x^{GF} est défini comme :

$$Jx^{GF}(T) = C \int_0^T \|X_S^{\ddot{GF}}\|^2 ds,$$

où C est une constante normalisée sans dimension. En pratique, au lieu de combiner x_t^{GF} (position sur la glace) à partir de a_t^{GF} avec des intégrations successives, le terme $X_S^{\ddot{GF}}$ a été remplacé par $a_t^{\dot{GF}}$. Par dérivation d' $a_t^{\dot{GF}}$, la constante d'accélération gravitaire a été retirée, laissant la composante d'accélération du sacrum. Il faut préciser que le jerk est minimisé quand x_t^{GF} est un polynôme de degré cinq, correspondant à la trajectoire du sacrum la plus fine possible. L'intégrale est combinée entre un temps 0 et un temps T qui correspond à la position finale x_t^{GF} . La constante C est déterminée ainsi :

$$C = \frac{T^5}{(\Delta x^{GF})^2},$$

avec Δx^{GF} étant la longueur de déplacement et T le temps mis pour la parcourir. Notons que la position x_t^{GF} n'est pas déterminée par les données des centrales inertielles, le jerk est calculé en fonction d'intervalles déterminés arbitrairement. L'information sur la longueur de déplacement que nous possédons correspond à la longueur du sprint, c'est pourquoi le jerk peut être calculé sur la base d'une moyenne sur le déplacement total et non sur une portion précise de celui-ci (Seifert et al., 2014).

Analyse statistique

Validation du système de mesure. Les valeurs temporelles des maximums et minimums d'accélération au niveau du bassin et de force appliquées au niveau des pieds ont été comparées en suivant certaines étapes évoquées dans les travaux de Dadashi, Crettenand, Millet, & Aminian (2012). Après avoir vérifié la non-normalité de la distribution des données à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk, nous avons vérifié l'association entre les mesures des deux systèmes à l'aide du calcul de la corrélation par rang de Spearman (avec un niveau de significativité établi à $p < .05$) (Kenneally-Dabrowski et al., 2017; Seifert, Hermette, et al., 2014). Pour interpréter les résultats, il faut savoir que le coefficient de corrélation entre les mesures obtenues peut être considéré comme : trivial (moins de 0.1), petit (de 0.1 à 0.3), modéré (de 0.3 à 0.5), important (de 0.5 à 0.7), très important (de 0.7 à 0.9), presque parfait (de 0.9 à 1) ou parfait (1) (Cohen., 1988; Hopkins, 2016). Ensuite, nous avons analysé la concordance entre les deux systèmes en utilisant la méthode graphique de Bland-Altman, en particulier le pourcentage de valeurs en dehors de l'intervalle de confiance (Bland & Altman, 2007). Enfin, nous avons analysé la précision des mesures entre les deux systèmes en utilisant la root mean squared measure (RMSE). Cette mesure évalue la précision moyenne des

données obtenues par la centrale inertielle dont la formule est énoncée dans les travaux de Mullineaux, Bartlett, & Bennett (2001) à savoir :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_c - x_i)^2 / n}$$

où x_c la mesure réalisée par le système de référence (i.e. les semelles Tekscan TM), x_i la mesure réalisée, au même instant, par le système que nous cherchons à valider (i.e. les centrales inertielles) et n le nombre total de données à comparer entre les deux systèmes.

Analyse du jerk en fonction des 4 conditions d'expérimentation. Nous avons utilisé une analyse de classification pour regrouper les valeurs de jerk en paquet sans avoir d'a priori sur les données, c'est à dire sans leur donner un label correspondant à niveau d'expertise et de condition. Les analyses de classification (cluster analysis) comparent la similarité entre les données pour regrouper les valeurs en groupes par un processus itératif. Au départ, chaque valeur de jerk constitue un groupe différent qui sous l'effet de l'algorithme se rassemble progressivement pour former des clusters de plus en plus grand jusqu'à éventuellement grouper toutes les valeurs en un seul cluster (Rein, Button, Davids, & Summers, 2010). Cette technique d'analyse statistique non-supervisée offre l'avantage de ne pas déterminer a priori une hiérarchie quant à la structure des données pour identifier des similarités entre les groupes (Rein et al., 2010). Par cette analyse, notre objectif était de comprendre si les valeurs de jerk semblables et donc regroupées dans le même cluster respectaient l'effet de l'expertise, du poste ou des conditions de patinage. Pour cette analyse, nous avons utilisé l'algorithme de K-means, dont la similarité entre les valeurs était testée à l'aide de la comparaison de distance euclidienne. Nous avons réalisé 10 itérations en testant la possibilité de regrouper les valeurs dans 2 à 10 clusters. L'index Dunn a été calculé afin de déterminer le meilleur nombre de cluster pour regrouper les données de jerk. L'index de Dunn fait un rapport entre similarité intra-cluster et dissimilarité inter-cluster, autrement dit, il se base sur la similarité entre les valeurs du même groupe et l'écart séparant les groupes (une valeur importante indique la présence d'une forte séparation entre les groupes et une bonne similarité au sein du groupe) (Wang, Wang, & Liuing, 2009).

Résultats

Comparaison des deux systèmes

L'ensemble des résultats concernant la comparaison des deux systèmes est présenté dans le tableau 13 et la méthode graphique de Bland & Altman (2007) dans la figure 31.

Tableau 13. Comparaison des mesures obtenues par les semelles F-Scan et les centrales inertielles Hikob.

Coefficient de corrélation de Spearman (r_s)	0.998
Bland & Altman	96.1% des valeurs dans l'intervalle ± 1.96 SD
RMSE	0.03

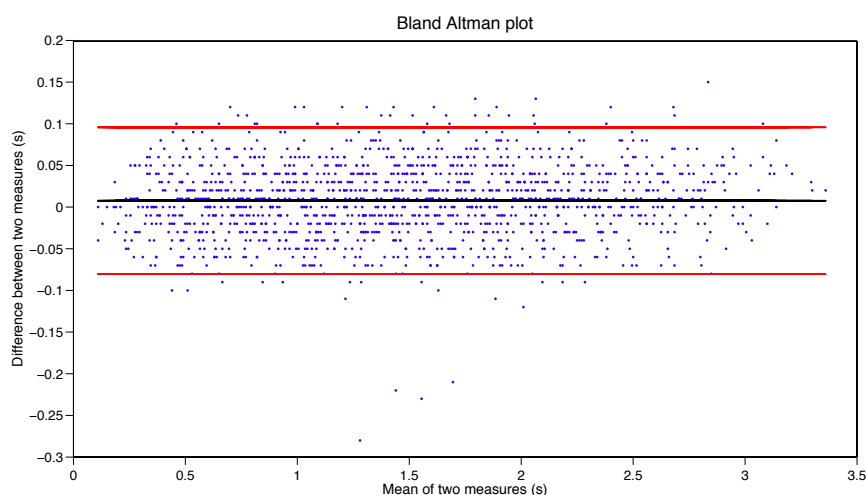


Figure 31. Représentation graphique de l'analyse Bland-Altman entre les deux systèmes de mesure.

À la lecture de ces résultats, nous constatons : i) une corrélation significative, presque parfaite, entre les deux systèmes (le r de Spearman = 0.998 ; $p = 0.0001$), ii) une précision similaire entre les deux mesures (RMSE = 0.003) et iii) une concordance forte entre les deux systèmes (96.10% des valeurs dans l'intervalle de confiance ± 1.96 SD). Il n'y a donc pas de différence significative entre les deux systèmes.

Les résultats, en comparant les mesures obtenues par les deux systèmes, démontrent que la centrale inertielle est capable de repérer temporellement la phase de propulsion lors du

cycle de patinage (se traduisant par un pic d'accélération au niveau du bassin). Cependant, au regard de l'importante sélection que nous avons dû opérer pour sélectionner les cycles dans l'optique de comparer les différences entre les mesures des deux systèmes, nous devons pour le moment émettre des réserves quant à l'utilisation de centrales inertielles sans autre possibilité d'analyser le cycle de patinage. En effet, même s'il est envisageable de repérer à l'aide des maximums (pic de poussées) et des minimums (décollage des patins) d'accélération certaines phases du mouvement, il est impossible de discriminer quel patin pousse au moment du pic d'accélération du bassin. Il n'est pour le moment pas encore possible d'automatiser le traitement des données à cause d'une trop grande disparité dans les mesures (e.g., données acycliques, dérive des signaux sans raison apparente). Ces résultats encouragent la poursuite de la recherche et du développement de l'analyse du mouvement en hockey sur glace à l'aide de centrales inertielles. Ils confirment la nécessité d'une certaine prudence en utilisant les centrales inertielles sans autre possibilité de contrôle des mesures (i.e., supervision, calibration, étalonnage).

Analyse de la fluidité du mouvement en fonction des conditions de pratique

L'analyse de classification, pour lequel l'index de Dunn est maximum pour deux clusters, révèle donc l'existence de deux groupes :

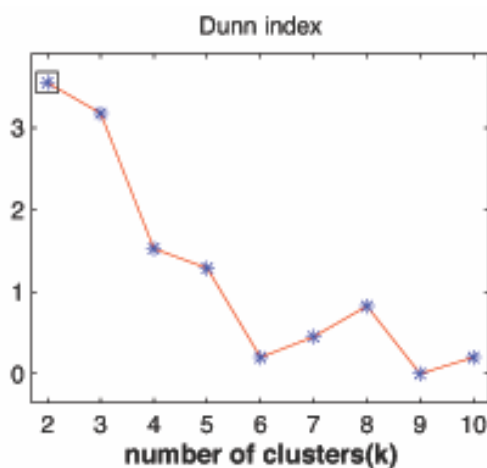


Figure 32. La plus haute valeur de l'index de Dunn révèle un regroupement par paquet en deux groupes.

Un premier cluster constitué de 35 valeurs de jerk ($M = 6373.013091$ et $SD \pm 1865,655931$) et un second constitué de 44 valeurs ($M = 56369,57256$ et $SD \pm 21083,93823$). Les deux groupes constitués correspondent soit aux valeurs de jerk obtenues dans les

conditions départ lancé (valeurs les plus petites), soit aux valeurs de jerk obtenues dans les conditions départ arrêté (valeurs les plus grandes). L'analyse du cluster regroupe les coefficients moyens de jerk calculés dans les conditions départ lancé et les distingue fortement des valeurs obtenues dans les conditions départ arrêté. La fluidité du mouvement (i.e., plus petite valeur de jerk) se retrouve dans les valeurs du groupe « départ lancé ».

Discussion

La valeur du coefficient moyen de jerk, mesure révélant l'efficacité du mouvement sur l'ensemble des 20m (Hreljac & Martin, 1993; Seifert et al., 2014), est regroupée en paquet suivant les conditions arrêtées ou lancées des sprints. Le clustering révèle le fait que créer de la vitesse en utilisant un pattern proche de la course avec une phase de glisse quasi inexistante (De Koning et al., 1995; Lafontaine, 2007) est moins efficace que d'utiliser une vitesse déjà créée et exploitable en alternant phase de glisse et de propulsion. Cependant, au regard des résultats, la précision des mesures ne nous permet pas d'observer des clusters différents en fonction des tâches (il n'y a, par exemple, pas de séparation entre le départ lancé avec ou sans palet à conduire). En somme, la fluidité du mouvement est évaluable à partir du calcul du jerk (dérivée troisième de la position renseignant sur les variations d'accélération) sur la base du traitement du signal de centrales inertielles et non des mesures issues des foot plantar sensors Tekscan™.

Pour réaliser l'analyse de la fluidité du mouvement, nous avons réalisé une étape préalable afin de garantir la validité des mesures de la centrale inertielle. En dépit d'une validation satisfaisante concernant les essais retenus, nous constatons également qu'un nombre très important d'essais a dû être retiré de l'analyse. En effet, la forme de la courbe était acyclique sans raison valable, une dérive s'instaurait progressivement et cela de façon totalement aléatoire. Nous avons également placé des centrales inertielles au niveau des patins (en s'inspirant du travail de Stetter et al. (2016)) mais les signaux étaient plus bruités et chaotiques ce qui nous a conduit à présenter uniquement le travail concernant l'analyse du signal de la centrale placée au niveau du bassin.

En dépit d'une validation satisfaisante de la centrale concernant les essais retenus, et d'une analyse de cluster révélant la fluidité du mouvement en discriminant les patterns correspondant aux premières foulées de création de vitesse des autres foulées ; nous pouvons envisager qu'avec une poursuite du développement de l'ingénierie du traitement des signaux accélérométriques, et sous réserve d'avoir résolu les problèmes liés à la dérive du signal,

l'emploi des centrales inertielles puisse à terme être utile pour évaluer la fluidité du déplacement et les variations de vitesse instantanée. Une des caractéristiques des experts en patinage étant la capacité à utiliser la phase de glisse, cet outil léger et peu contraignant dans la réalisation du mouvement pourra s'avérer intéressant pour évaluer ce critère dans des conditions expérimentales plus représentatives de l'activité qu'une répétition de cycle sur un tapis roulant. Pour le moment, nous ne sommes pas en mesure d'employer les centrales inertielles comme seul outil d'analyse, c'est pourquoi nous recommandons l'utilisation des centrales inertielles couplées avec d'autres outils d'analyse du mouvement (e.g., les études en hockey sur glace utilisant centrales inertielles avec semelles à capteur de pression, EMG, goniomètres (Buckeridge et al., 2015; Stetter et al., 2016)).

Principaux résultats du chapitre :

L'étude 1 avait pour but d'investiguer l'influence des contraintes de tâche sur la stabilité et la flexibilité d'une locomotion cyclique et instrumentée : le patinage avant. Cette locomotion a été analysée à partir de paramètres superficiels (cinématique et cinétique du cycle de patinage) et de paramètres profonds (Index de coordination et de symétrie) dans quatre contraintes de tâches représentatives de l'activité du hockeyeur : départ lancé ou arrêté, patiner avec ou sans crosse et en conduisant un palet.

Au niveau des paramètres superficiels, les résultats montrent que la création de vitesse passe par une réduction de la durée du cycle (de la phase de glisse, du retour du patin), une augmentation de la fréquence de patinage. En revanche, l'exploitation d'une vitesse créée à partir d'un virage repose sur une durée de retour du patin brève et une augmentation de la glisse. Nous avons pu montrer que la glisse, occupant une part très importante dans le cycle de patinage, contraint les hockeyeurs à patiner en rattrapé sans aucun autre mode de coordination possible entre les deux patins. Le contrôle de cette coordination repose sur l'exploitation de paramètres superficiels ayant une forte variabilité intra-individuelle : la durée de la glisse et le retour du patin. Ces deux paramètres, fortement variables, révèlent la capacité d'adaptation de l'expert qui adopte un comportement stable (ce groupe a toujours les CV les plus petits) et flexible (en faisant varier la durée du retour, de la glisse et l'IdC) pour répondre à la manipulation des contraintes de tâches et maintenir un haut niveau de performance. En l'occurrence, la manipulation des contraintes a révélé la stabilité du comportement du joueur notamment expert, lorsqu'il s'agit de tenir la crosse en avançant mais aussi sa capacité à être flexible lorsqu'il fallait adapter sa trajectoire au transport du palet.

Il a également été montré que la coordination des propulsions des membres inférieurs est le paramètre le plus asymétrique puisque 65% des joueurs sont concernés, tandis que les paramètres superficiels (durée et fréquence de cycles) sont les plus symétriques. Bien que seulement 32 à 37% d'asymétrie n'aient été observés dans les paramètres mesurés, et ceci quelles que soient les conditions, l'analyse des joueurs les plus asymétriques a montré des adaptations variées en fonction des conditions de patinage.

Principaux résultats du chapitre (suite) :

Enfin, l'étude 2 visait à analyser l'effet de contraintes de tâche sur la fluidité du patinage. L'analyse de classification des coefficients de jerk a révélé une plus grande fluidité du comportement dans les conditions départs lancés par rapport aux départs arrêtés, sans pour autant montrer de différences entre la condition lancée avec palet et sans palet.

L'utilisation de centrale inertielle nécessite pour le moment des approfondissements méthodologiques, nous conduisant à émettre des réserves quant à leur utilisation sans autre outil pour contrôler ou calibrer les mesures.

DISCUSSION GENERALE

Notre ambition a été de comprendre le contrôle moteur et plus particulièrement la locomotion experte en hockey sur glace en ancrant notre travail dans le cadre théorique Ecological Dynamics, qui considère le couplage individu-environnement comme la plus petite unité d'analyse du comportement, et à ce titre s'attache à concevoir des protocoles expérimentaux représentatifs du contexte écologique de pratique (Button & Croft, 2017; Glazier, 2015; Seifert et al., 2017). Ainsi, notre travail a consisté en une recherche qualitative analysant les « connaissances opératives » (Falzon, 1991) d'entraîneurs experts révélant les indicateurs de performance qu'ils utilisent pour évaluer in situ l'expertise du patinage des joueurs. Cette première étude nous a permis de collecter les paramètres considérés comme importants dans le patinage (et donc de focaliser notre analyse sur ces paramètres) mais aussi de concevoir un protocole expérimental dont les contraintes de tâches étaient représentatives du contexte écologique de pratique (d'entraînement, de formation et de compétition). Sur cette base, la seconde étude a tenté de comprendre l'adaptabilité comportementale de joueurs experts seniors professionnels et moins experts juniors face à quatre contraintes de tâches, en analysant des paramètres superficiels et profonds du comportement (Davids et al., 2008; Guignard et al., 2017; Haddad et al., 2006). L'originalité de ce travail se trouve dans le fait de convoquer différentes méthodologies de recherches qualitatives et quantitatives, tout en respectant le cadre théorique Ecological Dynamics, pour mieux comprendre le mécanisme de l'adaptabilité, caractéristique importante de l'expertise, qui allie stabilité et flexibilité du comportement.

Concevoir une tâche représentative favorisant l'émergence du patinage avant expert en questionnant des experts de l'activité

À travers la première étude, nous souhaitons défendre l'intérêt d'avoir recours aux entretiens semi-directifs d'entraîneurs experts pour :

- i) mettre en relation des connaissances relatives à l'analyse du mouvement de patinage directement contextualisées, c'est-à-dire dans le « monde réel », avec des connaissances souvent décontextualisées provenant de recherches biomécaniques effectuées en laboratoire,
- ii) nourrir de nouvelles perspectives de recherches scientifiques répondant à des problématiques d'entraînement issues de ces entretiens et mobilisant des contraintes représentatives de la tâche de patinage avant.

À l'issue de cette étude, nous avons montré que l'analyse du patinage avant expert en hockey sur glace se déclinait autour de trois catégories principales pour les entraîneurs : la posture du joueur, la cinématique des membres inférieurs et les mouvements des bras. Ces catégories englobent des indicateurs de performance (e.g., extension complète du genou) directement exploitable (i.e., sous forme d'affordances) en situation de pratique.

En considérant les réponses des entraîneurs comme de réels outils pour comprendre le mouvement et réfléchir à une évaluation in situ du mouvement, nous avons, à l'issue de ce travail, ouvert deux perspectives : i) concevoir un protocole de recherche représentatif de la tâche, et ii) orienter notre travail pour répondre à des problématiques de contrôle moteur liées à la problématique de l'expertise : comment sur la base de la propriété de dégénérescence de tous systèmes neurobiologiques la variabilité du comportement expert peut elle garantir une adaptation permanente à la dynamique des contraintes pesant sur le couple individu-environnement ? Quels paramètres, profonds ou superficiels, sont stables et assurent la réalisation d'une performance de haut-niveau en patinage et quels paramètres sont susceptibles d'être contrôlés différemment pour répondre à la dynamique des contraintes ? La variabilité sera considérée comme fonctionnelle lorsque, sous l'effet de contraintes, la modification du comportement permettra le maintien d'une performance stable en dépit des perturbations en présence.

Une tâche représentative du patinage avant en hockey sur glace signifie que les variables indépendantes de l'expérimentation (ou par extension de la situation d'entraînement) reproduisent les circonstances dans lesquelles le résultat est attendu (Brunswik, 1956). En s'appuyant sur la théorie de Brunswik, s'intéresser au « distal » (i.e., le comportement expert), aux caractéristiques de l'environnement du joueur (sa position, la tenue de la crosse, la conduite du palet) et aux incertitudes inhérentes aux interactions entre ces éléments (e.g., la friction entre le palet et la glace suite à un contact avec la crosse donnant une trajectoire non rectiligne, légèrement imprévisible à l'objet lorsque le joueur patine en avant) constitue une approche innovante à la compréhension de l'analyse du comportement du sportif (Hammond & Bateman, 2009). Notre objectif, en interrogeant les entraîneurs puis en concevant le protocole de la seconde étude, était de manipuler des contraintes de tâches pour faire émerger un comportement de patinage avant représentatif de la tâche, dans le sens où les résultats obtenus pouvaient être généralisés à un contexte de pratique. Nous ne cherchions pas à reproduire l'analyse du mouvement cyclique, très bien documentée mais limitée à la

généralisation dans la pratique en raison de la nature de la tâche expérimentale (Marino, 1977). Par exemple, patiner sur un tapis roulant pendant une durée supérieure à 1 minute à allure régulière ne correspond pas à l'activité intermittente de déplacement du hockeyeur. Toutefois, l'étude d'Upjohn et al. (2008) apporte de nombreuses connaissances pertinentes pour comprendre l'organisation du joueur dans une situation de pratique sans contraintes représentatives de l'activité sur la patinoire, à l'exception du port de patin sur une surface glissante ne permettant pas la reproduction exacte du mouvement de patinage sur glace (Stidwill et al., 2010). C'est avec le souci d'utiliser des contraintes favorisant l'émergence du comportement réel que nous avons fait le choix de manipuler les contraintes de tâches rendant la généralisation des résultats possible (patiner avec ou sans crosse, patiner avec un départ lancé ou non, conduire un palet ou non).

Variabilité des paramètres superficiels et profonds au service de l'adaptabilité

En croisant les résultats obtenus dans les deux études, nous souhaitons mettre en avant la complémentarité des approches pour enrichir la compréhension du patinage avant expert en hockey sur glace. Ainsi, les entraîneurs considèrent qu'un hockeyeur expert doit être en mesure de gérer son équilibre en adoptant une posture stable (flexion des genoux et des hanches), tout en se projetant vers l'avant (générer un déséquilibre favorable à l'avancement). Le joueur doit également utiliser ses bras pour optimiser la propulsion, s'équilibrer et orienter le mouvement. Ils estiment que la crosse modifie la coordination bras-jambes mais qu'elle ne doit pas avoir d'impact sur la performance du joueur expert qui se déplace vers l'avant. Enfin, concernant la cinématique des membres inférieurs lors du patinage, ils observent qu'un joueur expert produit de la vitesse grâce à une fréquence importante du mouvement dans les trois premières foulées (i.e., de la course à la glisse (De Koning et al., 1995)), un retour le plus bref possible, une ouverture de hanche et de patin dans la phase de propulsion qui se termine par une extension complète de la hanche, du genou et de la cheville. Ils constatent que le pied support glisse pendant que le second propulse puis fait son retour aérien et n'envisagent pas de perte de vitesse lors de la glisse (mode de coordination en opposition). Les résultats obtenus, lors de la seconde étude, montrent au niveau des paramètres superficiels que la création de vitesse passe par une réduction de la durée du cycle (de la phase de glisse, de retour du patin), une augmentation de la fréquence de patinage, et sont en accord avec la littérature (Lafontaine, 2007; Marino, 1977; Pearsall et al., 2014; Upjohn et al., 2008). En

complément, l'exploitation d'une vitesse créée à partir d'un virage repose sur une durée de retour du patin brève et une augmentation de la durée de glisse (qui demeure cependant inférieure chez les experts). Ces deux paramètres superficiels se révèlent être les supports de la flexibilité du comportement favorisant la réduction du décalage entre les phases propulsives (i.e., réduction de la valeur de l'IdC en rattrapé), qu'il s'agisse de créer de la vitesse ou de l'exploiter. Nous avons pu démontrer que la glisse, qui occupe une part très importante dans le cycle de patinage après les trois premières foulées, contraint les hockeyeurs à patiner en rattrapé sans aucun autre mode de coordination possible entre les deux patins. Ce mode de coordination ne permet pas d'enchaîner de façon continue des actions propulsives et caractérise le pattern moteur expert : cette coordination implique donc une perte de vitesse. L'utilisation de l'IdC et du SI auront eu le mérite de contribuer à l'ouverture de nouvelles perspectives de recherche : l'analyse de coordinations inter-segmentaires expertes. Enfin, cette étude n'a révélé aucune influence significative du poste sur le contrôle des paramètres profonds et superficiels. Ces résultats vont à l'encontre des présupposés des entraîneurs et des hypothèses que nous avons formulées sur la base de recherches scientifiques (Bracko et al., 1998; Montgomery et al., 2004; Renger, 1994). Nous pouvons supposer que l'évolution du jeu, qui conduit les défenseurs à se projeter plus vers l'avant pour attaquer, couplée à une quantité de temps de patinage vers l'avant sur un match relativement identique entre les postes (Montgomery et al., 2004), conduisent les joueurs à stabiliser des patterns proches.

Hockeyeur expert : l'unique réplique d'un modèle adapté à la dynamique des contraintes

En s'inscrivant dans le cadre Ecological Dynamics, nous avons considéré que le comportement émerge des interactions entre l'individu et un ensemble de contraintes (liées à la tâche, l'environnement et l'organisme (Newell, 1986). En partageant cette théorie du contrôle moteur, nous avons manipulé les contraintes identifiées comme représentatives pour étudier la part de stabilité et de flexibilité du comportement expert. L'étude 2 confirme la part stable du pattern du joueur expert lorsque ce dernier n'est pas perturbé par une contrainte de tâche telle que conduire un palet. C'est pourquoi, à travers cette étude, nous avons montré que la manipulation de la crosse n'impactait pas la performance de patinage ni la dynamique du pattern moteur de patinage. Une faible variabilité, dans la cinématique et la cinétique du mouvement des patins, valide ce caractère stable du comportement non perturbé par la tenue de la crosse. En revanche, la condition imposant au joueur de se déplacer en conduisant le

palet a généré des variations dans l'ensemble des paramètres significatifs, preuve de la flexibilité du pattern de patinage expert. Ce résultat valide l'idée du caractère dégénéscent du comportement expert (Edelman & Gally, 2001; Price & Friston, 2002) lui permettant de geler ou dégeler ses D.D.L. (Bernstein, 1967; Temprado et al., 1997) afin de s'adapter à de nouvelles contraintes de tâche à partir d'un pattern stable dans son répertoire moteur. Développer l'adaptabilité d'un joueur de hockey revient alors à manipuler des contraintes de tâches représentatives afin de perturber le contrôle moteur de l'individu et de l'inciter à développer de nouveaux patterns, en cherchant à satisfaire un but similaire et en maintenant un niveau de performance satisfaisant.

Sur cette base, évaluer le pattern expert offre une opportunité de comprendre comment un être humain est capable de s'adapter avec vitesse, précision, économie et adaptabilité (Johnson, 1961), mais ne constitue pas un modèle à reproduire avec des apprenants. En effet, l'accès à l'expertise réside dans une multitude de paramètres (physiques, psychologiques, cognitifs, traits de caractère, physiologiques) qui facilitent la manifestation d'un niveau supérieur de compétence. Cette manifestation se fait au fur et à mesure du temps, en fonction d'une dynamique individuelle qui dépend des paramètres neurologiques, musculaires, culturels, squelettiques, sociaux, physiologiques, psychologiques et environnementaux (Phillips, Davids, Renshaw, & Portus, 2010). Elle émerge graduellement en fonction des interactions à long terme entre les contraintes internes liées au développement de l'organisme, les contraintes de l'environnement et de la tâche (Newell, 1986). Il est très difficile de prédire qui atteindra un niveau élite à l'âge adulte, notamment dans les sports collectifs dont les performances dépendent d'une multitude de sous-performances du joueur et de ses partenaires (Elferink-Gemser, Visscher, Lemmink, & Mulder, 2007).

Au regard de l'ensemble des facteurs impliqués dans l'accès à l'expertise et du caractère stable et flexible quand il le faut du pattern moteur expert, copier un comportement expert ne semble pas être une approche pédagogique pertinente. La 'Constraints-led approach' propose une pédagogie différenciée, spécifique à chaque individu, orientée sur la manipulation de contraintes clés pour faire émerger de nouveaux patterns moteurs : proscrire plutôt que prescrire.

'Constraints-led approach' : Apprendre en explorant sous l'effet de la manipulation des contraintes

Envisager la réponse experte comme individuelle, variable sous plusieurs aspects, inimitable, influencée par de nombreuses contraintes en interaction et en évolution, offre une perspective nouvelle d'intervention. Il s'agit de comprendre comment encourager la progression des individus pour développer la capacité à trouver un compromis entre flexibilité et stabilité de paramètres profonds et superficiels.

En somme, l'intervenant, pour favoriser l'acquisition de comportements experts, manipule les contraintes représentatives de l'environnement notamment pour créer un paysage perceptivo-moteur dans lequel les actions spécifiques ont plus de chance d'émerger (Davids et al., 2015).

L'approche Ecological Dynamics nous invite à penser que pour l'acquisition de nouveaux patterns moteurs, il faut aider les individus à gagner de l'expérience afin de satisfaire les performances spécifiques au domaine de compétences affecté par des contraintes uniques. Il faut identifier les variables clés qui influencent le comportement et faciliter l'apprentissage en manipulant les contraintes pour encourager l'exploration d'une solution par le mouvement. Manipuler les contraintes peut conduire l'intervenant à simplifier la tâche, c'est-à-dire à maintenir une relation mouvement-information au cours de la pratique sans isoler l'individu des contraintes écologiques de l'environnement de performance. Il est également possible d'accentuer, d'amplifier ou d'ajouter des informations pour modifier le couplage perception-action (exposer le pratiquant à un nombre plus élevé d'affordances). En faisant appel à une pédagogie de contraste, l'intervenant trouvera un levier intéressant pour laisser explorer l'apprenant en mettant l'accent sur une dimension ciblée du couplage perception-action (e.g., utiliser une plaquette pour corriger la position de la main en crawl, courir avec ou sans chaussures pour ressentir l'amorti du pied et ajuster la pose du pied, modifier la taille d'une raquette ou d'une balle de tennis). L'essentiel étant que le pratiquant puisse exploiter l'interaction des contraintes qui forment la dynamique intrinsèque du système complexe, et améliorer l'intégration des fonctions cognitives, psychologiques, perceptives, motrices (Phillips et al., 2010; Seifert et al., 2013). La difficulté pour l'intervenant se situe dans sa capacité à manipuler des contraintes clés pour placer l'individu dans une région d'inconfort (au niveau de l'activité perceptivo-motrice) afin de renforcer son comportement créatif plutôt que de reproduire un comportement faisant déjà partie de son répertoire moteur

(Durand-Bush & Salmela, 2002). Dans cette situation, plus la flexibilité d'un pattern est grande, et plus il y a de multi-stabilité. Plus le comportement de l'individu est multistable, plus ce dernier est en mesure de trouver comment répondre au but de la tâche sans détériorer la performance, signe de dégénérescence (i.e., réussir à remplir la même fonction en mobilisant des patterns différents). Être expert revient alors à augmenter l'ampleur de son répertoire moteur afin d'être en mesure d'adopter plusieurs modes de coordination (au minimum deux) pour assurer une stabilité de la performance lorsque les contraintes évoluent.

Dans le développement de l'expertise, l'entraînement des athlètes doit reposer sur : i) la présence d'opportunités d'exploration (i.e., mettre en place un ensemble pertinent de contraintes qui pourrait guider l'individu dans l'espace d'entraînement plutôt que de générer l'apparition du comportement expert en prescrivant l'action à réaliser), et ii) l'utilisation d'informations importantes dont les sources sont présentes dans la situation de performance (e.g. présence d'autres joueurs en sports collectifs (Orth, Davids, Araújo, Renshaw, & Passos, 2014)) plutôt que des répétitions de mouvements décontextualisés.

Encourager l'exploration. L'expertise ressort comme la capacité à explorer de nouvelles solutions qui prennent en compte l'évolution de la tâche. Par exemple, il a fallu être créatif dans la modification de la technique de saut pour profiter de l'évolution de la rigidité de la perche. Cette créativité émerge quand : i) l'équipement change, ii) les surfaces de jeu changent (e.g. surface du terrain de tennis), iii) les règles changent (distance de la ligne des trois points en basketball). Dans le sport élite, pour atteindre le succès, il faut constamment s'adapter à l'évolution du jeu, se réinventer pour répondre à de nouvelles problématiques (Durand-Bush & Salmela, 2002; Phillips et al., 2010). Par exemple, dans les prochaines années, une interdiction d'utilisation de la résine en handball pourrait modifier la capacité des joueurs à réaliser des tirs avec effets ce qui créerait une nouvelle dynamique dans le duel entre tireur et gardien.

Offrir au pratiquant l'opportunité d'expérimenter de nouvelles solutions motrices passe par la manipulation de contraintes clés dans la relation individu-environnement. La structure de l'environnement aide à contraindre et à localiser les influences de l'environnement sur le comportement de l'individu (Krebs, 2009). C'est pourquoi, il semble intéressant d'inviter les coaches à comprendre la nature des contraintes qui agissent sur chaque individu et comment les manipuler, pour faciliter l'émergence de comportements fonctionnels enrichissant le répertoire moteur (Chow et al., 2006). Dans la même veine, Bril (2002, p. 258) évoque le concept « d'espace d'actions encouragées » qui se caractérise par : i)

une action plus ou moins encouragée ou prohibée, ii) la disponibilité et l'expansion dans l'environnement d'entraînement de l'individu d'artefacts ou d'affordances, iii) les règles sur les conduites à tenir et objets à manipuler suivant les situations, iv) l'organisation de l'espace en fonction de l'âge, du niveau de développement et de compétence de l'individu à un instant donné. Il s'agit d'amener l'individu à augmenter son potentiel d'action (et à plus long terme ses capacités d'action) en utilisant dans l'environnement d'entraînement un ensemble d'activités, d'objets ou de lieux favorisant notamment l'exploration (Bril, 2002; Reed & Bril, 1996). Par exemple, il peut être intéressant d'organiser des affrontements à l'entraînement avec des équipes numériquement déséquilibrées (du type PowerPlay au hockey) pour préparer les joueurs à évoluer dans un espace plus restreint avec des pressions temporelles accrues pouvant être retrouvées lors de la compétition. Dans cette optique, les entraîneurs ou les enseignants ne cherchent pas à informer les pratiquants sur le mouvement idéal à copier. Il s'agit de proposer, au fur et à mesure de l'apprentissage de l'individu, des situations favorisant l'émergence de comportements fonctionnels pour chaque individu (i.e., les comportements qui émergent pour être stabilisés doivent assurer le maintien de la performance ou son amélioration). Il s'agit de manipuler des contraintes pour amener l'apprenant à explorer de nouvelles relations avec son environnement (e.g., changer le type de piolets pour modifier l'organisation du mouvement (Seifert & Davids, 2012)).

L'objectif de cette approche est d'inviter les individus à explorer, découvrir et interagir avec les contraintes de tâches et environnementales, sans faire référence à une mémoire de mouvement ; à changer les contraintes de tâches et d'environnement pour encourager l'émergence d'interactions exploratoires visant à s'adapter (Seifert & Davids, 2012). Afin de stimuler la dégénérescence du système perceptivo-moteur, il est important de souligner le rôle de l'entraîneur. En effet, en modifiant les contraintes présentes dans la situation de performance, l'entraîneur favorise la recherche de nouvelles solutions motrices, l'adaptation à de nouvelles opportunités d'actions et donc le développement de compétences. À contrario, proposer des tâches statiques, qui ne stimulent pas l'adaptation à un environnement changeant, ne permettra pas le développement de la dextérité de l'athlète (Davids et al., 2015). Ici, les informations concernent l'objectif de la tâche et non les processus pour l'atteindre. L'apprenant est autonome dans sa recherche de solutions. L'intervenant laisse à l'apprenant un problème de performance à résoudre plutôt qu'une solution motrice prescriptive à imiter (Seifert & Davids, 2012).

Manipuler les contraintes clés. Il s'agit de concevoir l'apprentissage comme un système dynamique non-linéaire dans lequel la manipulation de contraintes clés sur l'apprenant favoriserait l'apprentissage (Davids et al., 2008). La manipulation des contraintes par un intervenant peut amener à la production de comportements pertinents, de prises de décisions satisfaisantes, de compréhension des intentions guidant la réussite de la tâche (Chow et al., 2007; Davids et al., 2008). En adoptant cette approche par les contraintes, travailler sur l'amélioration de la propulsion en patinage avant pourrait passer par l'utilisation de résistance lorsque l'individu avance (figure 33)



Figure 33. Modifier la tâche de patinage avant en ajoutant une contrainte de résistance (tracter un partenaire attaché par un élastique) pour rendre la propulsion plus difficile, imposer un angle de propulsion qui favorise au maximum la production de force.

Les contraintes, que l'intervenant peut manipuler, concernent essentiellement les contraintes de tâches. En tennis par exemple, faire varier la hauteur du filet pour travailler la volée à une hauteur confortable, transformer les règles pour cumuler toujours des points, modifier la taille du court, la compression des balles, sont des exemples de manipulation de contraintes de tâches (Farrow et al., 2017). Dans les possibilités pour l'intervenant, nous retrouvons : i) l'utilisation de règles pour varier les contextes compétitifs, adapter les rapports de force, ii) modifier les espaces pour mettre le porteur de palet sous contrainte temporelle plus ou moins forte en fonction de la proximité des défenseurs et des espaces qu'ils ont à couvrir, iii) modifier l'équipement pour encourager l'individu à se focaliser sur certaines variables perceptives par exemple (figure 34).



Figure 34. Augmenter les résistances à l'avancement sur glace à l'aide d'un parachute pour allonger la durée de la phase de poussée et amplifier la sensation de glisse sur le pied opposé.

CONCLUSION

En inscrivant notre travail dans le cadre théorique Ecological Dynamics, notre problématique de recherche visait à comprendre le rôle fonctionnel de la variabilité de mouvement et de coordination comme témoin de la capacité d'adaptabilité des experts en patinage avant sur glace. Nous insistons sur le fait que cette adaptabilité reflète le couplage individu-environnement dans le sens où les hockeyeurs exploitent au mieux les contraintes de tâches, de l'environnement et de l'organisme pour atteindre le but de la tâche avec un haut niveau de performance. Afin d'étudier ce couplage individu-environnement, nous avons employé deux méthodologies de recherche différentes pour nous assurer que le protocole expérimental soit représentatif d'un contexte écologique de pratique. Ainsi, il ferait émerger les caractéristiques de l'expertise : entre stabilité et flexibilité du comportement pour s'adapter aux contraintes. La première étude investigate les connaissances des entraîneurs experts et la seconde consiste en une analyse des paramètres superficiels et profonds, sous l'effet de manipulation de contraintes de tâche. En confrontant les résultats, nous avons pu montrer l'intérêt de combiner différentes approches pour enrichir les connaissances relatives aux indicateurs de performance caractérisant un patinage avant expert.

Nous avons pour objectif de conduire une recherche in situ représentative de l'activité hockey sur glace dans le sens énoncé par Brunswick, à savoir, étudier le comportement de l'individu en veillant à le placer dans un environnement dont le but et la tâche reproduisent les contraintes clés favorisant l'émergence du comportement que nous retrouvons dans la situation réelle de pratique. L'objectif final était de pouvoir généraliser les résultats sur une tâche non plus de laboratoire (comme nous l'observons dans de nombreuses études en hockey sur glace) mais dans un protocole expérimental plus proche de la réalité du terrain. C'est pourquoi, à l'aide de la première étude nous avons déterminé les contraintes qu'il fallait manipuler (utilisation d'un virage avant le sprint, manipulation de la crosse et du palet) et les paramètres du mouvement à analyser pour ensuite réaliser les mesures in situ.

À l'issue de ce travail, nous avons montré l'intérêt d'interroger des professionnels experts de l'activité pour nourrir de nouvelles perspectives de recherches en mettant en lumière des zones de méconnaissances, en améliorant la compréhension des contraintes clés de la tâche, permettant de répondre à un besoin de nouvelles connaissances.

Le caractère innovant de la seconde étude provient de : i) l'utilisation de l'approche par les contraintes pour analyser la stabilité et la flexibilité du pattern expert ou l'effet du poste sur les paramètres superficiels, analysés habituellement dans une tâche de patinage sur

tapis roulant ; ii) l'analyse de l'effet d'artefacts sur la locomotion du hockeyeur (crosse et patin) ; iii) la détermination de la coordination inter-segmentaire pour évaluer la continuité des actions propulsives ; iv) la réalisation d'une campagne de mesure in situ, à l'aide de systèmes embarqués (foot plantar pressure sensors de Tekscan TM et centrales inertielles Hikob [®]) dans un objectif de développement de nouveaux outils de recherche en hockey sur glace.

Les résultats montrent comment les experts exploitent la propriété de dégénérescence des systèmes neurobiologiques qui offre la possibilité à tout organisme d'utiliser des structures différentes (ou de les organiser différemment) pour accomplir la même fonction ou atteindre le même but. Cette propriété de dégénérescence révélée par la manipulation de contraintes de tâche plaide en faveur de la capacité des experts à adopter un comportement stable (rapide, économe, précis comme l'énonce Johnson (1961)) mais aussi flexible quand il le faut afin de s'adapter à la dynamique des contraintes. Dans le cadre de notre étude, la production de force apparaît comme le paramètre superficiel le plus stable. Les durées de la glisse et de retour du patin sont les plus flexibles. Elles contribuent à la modification de la coordination des membres inférieurs (i.e., IdC) afin de réduire les décalages de propulsion, la durée de la phase non propulsive et de maintenir une performance stable malgré la manipulation d'une crosse et d'un palet.

Notre travail n'a pas pu répondre à l'ensemble des interrogations soulevées par les entraîneurs experts concernant la coordination entre les bras et les jambes. Malheureusement limités par des problèmes techniques, nous n'avons pu poursuivre notre investigation sur la coordination inter-segmentaire. Des difficultés rencontrées dans le traitement du signal des centrales inertielles placées sur les patins et les mains nous ont empêchés d'analyser la symétrie du mouvement des bras lors de la manipulation de la crosse et du palet, d'évaluer la coordination inter-segmentaire experte. Nous projetions d'examiner le couplage entre la cuisse et la jambe (à l'image de l'étude réalisée en marche par Stergiou et al., 2001), d'investiguer le rapport de fréquence entre les membres supérieurs et inférieurs pour contribuer à l'enrichissement des connaissances relatives à l'utilisation des bras (inspiré du travail en ski de fond de Cignetti, Schena, Zanone, et al., 2009). Enfin, nous n'avons pas pu atteindre un degré suffisant de précision des mesures permettant l'analyse du mouvement du patin (ouverture lors de la poussée, utilisation des carres internes et externes). Des problèmes de traitement du signal nous ont contraints à ne pas exploiter les enregistrements des centrales inertielles placés sur les mains, patins, tibias, cuisses, crosse. Nous avons dû nous limiter à

une première recherche concernant l'évaluation de la fluidité du mouvement à l'aide du coefficient de jerk. L'analyse de classification a montré que ce coefficient de jerk était sensible au phénomène de glisse et laisse entrevoir de nouvelles possibilités d'investigation sous réserve de résoudre les problèmes de dérive des données enregistrées par les centrales inertielles. Nous conservons à l'esprit le besoin d'approfondissement des recherches concernant les coordinations mises en jeu lors du patinage avant. Nous avons également constaté qu'en ce qui concerne le patinage avant, nous n'avons pas pu discriminer de différences au sein des groupes attaquants et défenseurs. La proportion de patinage vers l'avant et l'évolution du jeu contraignant les défenseurs à se projeter rapidement vers l'avant pourraient expliquer cette tendance à la similarité des patterns. Nous pourrions envisager d'analyser cet effet du poste de jeu dans des tâches plus spécifiques au poste en manipulant d'autres contraintes de tâche (e.g., dribbler avec des obstacles et un palet à conduire, pivoter d'avant en arrière pour suivre la trajectoire d'un adversaire qui avance en possession du palet et lui interdire l'accès au but). C'est pourquoi, orienter de nouvelles recherches sur l'effet du poste de jeu dans des tâches plus spécifiques au poste pourrait être un moyen de confirmer ou non l'intérêt porté par de nombreux entraîneurs de spécifier l'entraînement par poste ou de recruter des joueurs en fonction de compétences spécifiques au poste (e.g., un défenseur doit absolument savoir patiner vers l'arrière comme il patine vers l'avant). Patiner étant une compétence intégrée dans une activité plus globale lors d'un match : il pourrait être intéressant d'analyser comment la présence ou l'absence d'adversaire modifie l'organisation du cycle de patinage. Autrement dit, comment l'organisation du cycle est-elle modifiée quand le joueur doit poursuivre un adversaire, se placer entre l'adversaire et le but pour empêcher le tir ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abernethy, B. (2007). Developing expertise in sport-how research can inform practice. In D. Farrow, J. Baker, & C. MacMahon (Eds.), *Developing sport expertise* (Routledge, pp. 1–14). London: Taylor & Francis.
- Abraham, A., & Collins, D. (2011). Effective skill development: How should athletes' skills be developed. In D. Collins, A. Button, & H. Richards (Eds.), *Performance Psychology: A practitioner's guide* (pp. 207–229). Oxford: Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-443-06734-1.00015-8>
- Abraham, A., Collins, D., & Martindale, R. (2006). The coaching schematic: validation through expert coach consensus. *Journal of Sports Sciences*, *24*, 549–564. <http://doi.org/10.1080/02640410500189173>
- Agre, J. C., Casal, D. C., Leon, A. S., McNally, C., Baxter, T. L., & Serfass, R. C. (1988). Professional ice hockey players: physiologic, anthropometric, and musculoskeletal characteristics. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *69*, 188–192.
- Alberty, M., Sidney, M., Huot-Marchand, F., Hespel, J. M., & Pelayo, P. (2005). Intracyclic Velocity Variations and Arm Coordination During Exhaustive Exercise in Front Crawl Stroke. *International Journal of Sports Medicine*, *26*, 471–475. <http://doi.org/10.1055/s-2004-821110>
- Alpini, D., Hahn, A., & Riva, D. (2008). Static and dynamic postural control adaptations induced by playing ice hockey. *Sport Science Health*, *2*, 85–92. <http://doi.org/10.1007/s11332-008-0045-7>
- Araújo, D. (2007). Promoting ecologies where performers exhibit expert interactions. *International Journal of Sport Psychology*, *38*(1), 73–77.
- Araújo, D., & Davids, K. (2009). Ecological approaches to cognition and action in sport and exercise: Ask not what you do, but where you do it. *International Journal of Sport Psychology*, *40*(1), 5–37.
- Araujo, D., Davids, K., & Hristovski, R. (2006). The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychology of Sport and Exercise*, *7*(6), 653–676. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2006.07.002>
- Araújo, D., Davids, K., & Passos, P. (2007). Ecological Validity, Representative Design, and Correspondence Between Experimental Task Constraints and Behavioral Setting: Comment on Rogers, Kadar, and Costall (2005). *Ecological Psychology*, *19*(1), 69–78. <http://doi.org/10.1080/10407410709336951>

- Araújo, D., Davids, K., & Serpa, S. (2005). An ecological approach to expertise effects in decision-making in a simulated sailing regatta. *Psychology of Sport and Exercise*, 6(6), 671–692. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2004.12.003>
- Azuélos, Y. H., Pearsall, D. J., Turcotte, R., & Montgomery, D. L. (2004). A Review of Ice Hockey Injuries: Location, Diagnosis, Mechanism. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 59–67). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Baker, J. (2003). Early Specialization in Youth Sport: A requirement for adult expertise? *High Ability Studies*, 14(1), 85–94. <http://doi.org/10.1080/13598130304091>
- Baker, J., & Davids, K. (2006). Genetic and environmental constraints on variability in sport performance. In K. Davids, S. Bennett, & K. M. Newell (Eds.), *Movement system variability* (pp. 109–130). Champaign (IL): Human Kinetics.
- Baker, J., & Horton, S. (2004). A review of primary and secondary influences on sport expertise. *High Ability Studies*, 15(2), 211–228. <http://doi.org/10.1080/1359813042000314781>
- Bardy, B. G., & Mantel, B. (2006). Ask not what's inside your head, but what your head is inside of (Mace, 1977). *Intellectica*, 43(0), 53–58.
- Bardy, B. G., Marin, L., Bootsma, R. J., & Stoffregen, T. A. (1999). Postural coordination modes considered as emergent phenomena. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 25(5), 1284–1301.
- Bardy, B. G., Oullier, O., Lagarde, J., & Stoffregen, T. A. (2007). On perturbation and pattern coexistence in postural coordination dynamics. *Journal of Motor Behavior*, 39(4), 326–336. <http://doi.org/10.3200/JMBR.39.4.326-336>
- Barela, J. A., Whittall, J., Black, P., & Clark, J. E. (2000). An examination of constraints affecting the intralimb coordination of hemiparetic gait. *Human Movement Science*, 19, 251–273.
- Barris, S., Farrow, D., & Davids, K. (2014). Increasing Functional Variability in the Preparatory Phase of the Takeoff Improves Elite Springboard Diving Performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 85(1), 97–106. <http://doi.org/10.1080/02701367.2013.872220>
- Bartlett, R. (2007). *Introduction to Sports Biomechanics: Analysing Human Movement Patterns* (2nd ed.). book, New York: Routledge.
- Beek, P., Peper, C., & Stegeman, D. (1995). dynamical models of movement coordination.

- Human Movement Science*, 14(4–5), 573–608.
- Behm, D. G., Wahl, M. J., Button, D. C., Power, K. E., & Anderson, K. G. (2005). Relationship between hockey skating speed and selected performance measures. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(2), 326–331. <http://doi.org/10.1519/R-14043.1>
- Bennell, K., Crossley, K., Wrigley, T., & Nitschke, J. (1999). Test-Retest Reliability of Selected Ground Reaction Force Parameters and Their Symmetry During Running. *Journal of Applied Biomechanics*, 15, 330–336.
- Bergeron, M. F., Mountjoy, M., Armstrong, N., Chia, M., Côté, J., Emery, C. A., ... Sanchez, A. (2015). International Olympic Committee consensus statement on youth athletic development. *British Journal of Sports Medicine*, 49, 843–851. <http://doi.org/10.1136/bjsports-2015-094962>
- Bernstein, N. (1967). *The coordination and regulation of movement*. New York: Pergamon.
- Bernstein, N. A. (1996). On dexterity and its development. In M. Latash & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development* (pp. 3–244). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Birks, M., & Mills, J. (2011). *Grounded theory: A practical guide*. (M. Birks & J. Mills, Eds.). London: Sage Publications Ltd.
- Biryukova, E. V., & Bril, B. (2002). Bernstein et le geste technique. In V. Roux & B. Bril (Eds.), *Le geste technique: Réflexions méthodologiques et anthropologiques* (Erès, pp. 49–68).
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (2007). Agreement Between Methods of Measurement with Multiple Observations Per Individual. *Journal of Biopharmaceutical Statistics*, 17(4), 571–582. <http://doi.org/10.1080/10543400701329422>
- Bloom, G., & Durand-Bush, N. (1998). The importance of mentoring in the development of coaches and athletes. *International Journal of Sport Psychology*, 29, 267–281.
- Bompa, T. O. (1999). *Periodization training for sports- Programs for peak strength in 35 sports*. Champaign (IL): Human Kinetics.
- Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J. L., Aron, S., & Camazine, S. (1997). Self-organization in social insects. *Trends in Ecology and Evolution*, 12(5), 188–193. [http://doi.org/10.1016/S0169-5347\(97\)01048-3](http://doi.org/10.1016/S0169-5347(97)01048-3)
- Boulanger, J., Seifert, L., Héroult, R., & Coeurjolly, J. F. (2016). Automatic Sensor-Based Detection and Classification of Climbing Activities. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 16(3),

742–749.

- Bracko, M. R. (2004). Biomechanics powers ice hockey performance. *BioMechanics*, *11*(9), 1–7.
- Bracko, M. R., Fellingham, G. W., Hall, L. T., Fisher, a. G., & Cryer, W. (1998). Performance skating characteristics of professional ice hockey forwards. *Sports Medicine, Training and Rehabilitation*, *8*(3), 251–263. <http://doi.org/10.1080/15438629809512531>
- Brétigny-vincent, P. (2013). *L'adaptabilité comme critère d'expertise d'une habileté motrice face aux contraintes: le shoot en hockey sur gazon*. Rouen.
- Brétigny, P., Leroy, D., Button, C., Chollet, D., & Seifert, L. (2011). Coordination profiles of the expert field hockey drive according to field roles. *Sports Biomechanics*, *10*(4), 339–350. <http://doi.org/10.1080/14763141.2011.629675>
- Brétigny, P., Seifert, L., Leroy, D., & Chollet, D. (2008). Upper-Limb Kinematics and Coordination of Short Grip and Classic Drives in Field Hockey. *Journal of Applied Biomechanics*, *24*, 215–223.
- Bril, B. (2002). Apprentissage et contexte. *Intellectica*, (1979), 251–268.
- Brisson, T. A., & Alain, C. (1996). Should Common Optimal Movement Patterns Be Identified as the Criterion to Be Achieved? *Journal of Motor Behavior*, *28*(3), 211–223. <http://doi.org/10.1080/00222895.1996.9941746>
- Brown, S. R., Cross, M. R., Girard, O., Brocherie, F., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2017). Kinetic sprint asymmetries on a non- motorised treadmill in rugby union athletes. *International Journal of Sports Medicine*.
- Bruineberg, J., & Rietveld, E. (2014). Self-organization, free energy minimization, and optimal grip on a field of affordances. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*(August), 1–14. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00599>
- Brunswik, E. (1956). *Perception and the representative design of psychological experiments (2nd ed.)*. Berkeley: University of California Press.
- Buckeridge, E., LeVangie, M. C., Stetter, B., Nigg, S. R., & Nigg, B. M. (2015). An on-ice measurement approach to analyse the biomechanics of ice hockey skating. *PLoS ONE*, *10*(5), 1–16. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0127324>
- Button, C., & Croft, J. L. (2017). Sports science needs more interdisciplinary , constraints-led research programmes : The case of water safety in New Zealand. *Human Movement Science*, (April). <http://doi.org/10.1016/j.humov.2017.04.017>

- Button, C., MacLeod, M., Sanders, R., & Coleman, S. (2003). Examining movement variability in the basketball free-throw action at different skill levels. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(3), 257–269. <http://doi.org/10.1080/02701367.2003.10609090>
- Byrne, J. E., Stergiou, N., Blanke, D., Houser, J. J., Kurz, M. J., & Hageman, P. A. (2002). Comparaison of gait patterns between young and elderly women: an examination of coordination. *Perceptual and Motor Skills*, 94, 265–280.
- Carpes, F. P., Mota, C. B., & Faria, I. E. (2010). On the bilateral asymmetry during running and cycling - A review considering leg preference. *Physical Therapy in Sport*, 11, 136–142. <http://doi.org/10.1016/j.ptsp.2010.06.005>
- Carvalho, J., Araújo, D., Travassos, B., Esteves, P. T., Pessanha, L., Pereira, F., & Davids, K. (2013). Dynamics of players' relative positioning during baseline rallies in tennis. *Journal of Sports Sciences*, 31(14), 1596–605. <http://doi.org/10.1080/02640414.2013.792944>
- Chang, R., Turcotte, R., & Pearsall, D. (2009). Hip adductor muscle function in forward skating. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports*, 8, 212–222. <http://doi.org/10.1080/14763140903229534>
- Chollet, D., Chabies, S., & Chatard, J. C. (2000). A New Index of Coordination for the Crawl : Description and Usefulness. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1), 54–59.
- Chollet, D., Seifert, L., & Carter, M. (2008). Arm coordination in elite backstroke swimmers. *Journal of Sports Sciences*, 26(7), 675–682. <http://doi.org/10.1080/02640410701787791>
- Chow, J. Y., Davids, K., Button, C., & Koh, M. (2007). Variation in coordination of a discrete multiarticular action as a function of skill level. *Journal of Motor Behavior*, 39(6), 463–479.
- Chow, J. Y., Davids, K., Button, C., Shuttleworth, R., Renshaw, I., & Araujo, D. (2007). The Role of Nonlinear Pedagogy in Physical Education. *Review of Educational Research*, 77(3), 251–278. <http://doi.org/10.3102/003465430305615>
- Chow, J. Y., Davids, K., Button, C., Shuttleworth, R., Renshaw, I., & Araújo, D. (2006). Nonlinear pedagogy: a constraints-led framework for understanding emergence of game play and movement skills. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 10(1), 71–103. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16393504>
- Cigali, B. S., Ulucam, E., Yilmaz, A., & Cakiroglu, M. (2004). Comparison of asymmetries in ground reaction force patterns between normal human gait and football players. *Biology of Sport*, 21(3), 241–248.

- Cignetti, F. (2009). *Analyse dynamique de la locomotion ski de fond*. (Thèse de doctorat). Université de Savoie Mont Blanc. Retrieved from <http://www.theses.fr/2009CHAMS051>
- Cignetti, F., Schena, F., & Rouard, A. (2009). Effects of fatigue on inter-cycle variability in cross-country skiing. *Journal of Biomechanics*, *42*, 1452–1459. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.04.012>
- Cignetti, F., Schena, F., Zanone, P. G., & Rouard, A. (2009). Dynamics of coordination in cross-country skiing. *Human Movement Science*, *28*, 204–217. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2008.11.002>
- Clark, J. E., & Phillips, S. J. (1993). A Longitudinal Study of Intralimb Coordination in the First Year of Independent Walking: A Dynamical Systems Analysis. *Child Development*, *64*(4), 1143–1157.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Colman, A. M. (2014). *A dictionary of Psychology*. Oxford University Press. <http://doi.org/10.1093/acref/9780199534067.001.0001>
- Corbin, J., & Strauss, A. (1990). Grounded theory research: Procedures, canons, and evaluative criteria. *Qualitative Sociology*, *13*(1), 3–21. <http://doi.org/10.1007/BF00988593>
- Côté, J. (1999). The Influence of the Family in the development of talent in sport. *The Sport Psychologist*, *13*, 395–417.
- Côté, J., & Gilbert, W. (2009). An Integrative Definition of Coaching Effectiveness and Expertise. *International Journal of Sports Science and Coaching*. <http://doi.org/10.1260/174795409789623892>
- Coté, J., & Hay, J. (2002). Children's involvement in sport: A developmental perspective. In J. M. Silva & D. E. Stevens (Eds.), *Psychological Foundations of Sport* (pp. 484–502). Boston, MA: Allyn & Bacon.
- Côté, J., Salmela, J., Trudel, P., & Baria, A. (1995). The coaching model: A grounded assessment of expert gymnastic coaches' knowledge. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *17*, 1–17. <http://doi.org/10.1080/02640410500189173>
- Cox, M., Miles, D., Verde, T., & Rhodes, E. (1995). Applied physiology of ice-hockey. *Sports Medicine*, *19*(3), 184–201.
- Cushion, C. J., Armour, K. M., & Jones, R. L. (2003). Coach Education and Continuing Professional Development: Experience and Learning to Coach. *Quest*, *55*(3), 215–230.

- <http://doi.org/10.1080/00336297.2003.10491800>
- Dadashi, F., Crettenand, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2012). Front-Crawl Instantaneous Velocity Estimation Using a Wearable Inertial Measurement Unit. *Sensors*, *12*, 12927–12939. <http://doi.org/10.3390/s121012927>
- Dadashi, F., Millet, G. P., & Aminian, K. (2015). Front-crawl stroke descriptors variability assessment for skill characterisation. *Journal of Sports Sciences*, 1–8. <http://doi.org/10.1080/02640414.2015.1114134>
- Davids, K. (1988). Ecological Validity in Understanding Sport Performance: Some Problems of Definition. *Quest*, *40*(2), 126–136. article. <http://doi.org/10.1080/00336297.1988.10483894>
- Davids, K., & Araújo, D. (2010). The concept of “Organismic Asymmetry” in sport science. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *13*(6), 633–640. <http://doi.org/10.1016/j.jsams.2010.05.002>
- Davids, K., Araújo, D., Hristovski, R., Passos, P., & Chow, J. Y. (2012). Ecological dynamics and motor learning design in sport. In N. J. Hodges & A. M. Williams (Eds.), *Skill Acquisition in Sport: Research, Theory and Practice* (2nd ed., pp. 112–130). London: Routledge. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2297.0089>
- Davids, K., Araújo, D., Seifert, L., & Orth, D. (2015). Expert Performance in sport: An ecological dynamics perspective. In *Routledge Handbook of Sport Expertise* (pp. 130–144). London: Routledge.
- Davids, K., Araújo, D., Shuttleworth, R., & Button, C. (2004). Acquiring skill in sport: a constraints-led perspective. *International Journal of Computer Science in Sport*, *2*(2), 31–39.
- Davids, K., & Baker, J. (2007). Genes, environment and sport performance: Why the nature-nurture dualism is no longer relevant. *Sports Medicine*, *37*(11), 961–980. <http://doi.org/10.2165/00007256-200737110-00004>
- Davids, K., Bennett, S., & Newell, K. M. (2006). *Movement systems variability*. Champaign (IL): Human Kinetics.
- Davids, K., Button, C., & Bennett, S. (2008). *Dynamics of skill acquisition: a constraints-led approach*. Champaign (IL): Human Kinetics.
- Davids, K., & Glazier, P. (2010). Deconstructing neurobiological coordination: the role of the biomechanics-motor control nexus. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *38*(2), 86–90. <http://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181d4968b>

- Davids, K., Glazier, P., Araujo, D., & Bartlett, R. (2003). Movement systems as dynamical systems: the functional role of variability and its implications for sport medicine. *Sports Medicine*, 33(4), 245–260.
- De Koning, J. J., De Groot, G., & Van Ingen Schenau, G. J. (1992). Ice friction during speed skating. *Journal of Biomechanics*, 25(6), 565–571. [http://doi.org/10.1016/0021-9290\(92\)90099-M](http://doi.org/10.1016/0021-9290(92)90099-M)
- De Koning, J. J., Thomas, R., Berger, M., De Groot, G., & Van Ingen Schenau, G. J. (1995). The start in speed skating: from running to gliding. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1703–1708.
- De Rosnay, J. (1975). *Le microscope, vers une vision globale*. Paris, Seuil.
- Delignières, D. (2004). L'approche dynamique du comportement moteur. In J. La Rue & H. Ripoll (Eds.), *Manuel de Psychologie du Sport tome 1, Les déterminants de la performance sportive*. (pp. 65–80). Paris: Revue EPS.
- Deneubourg, J. L., Aron, S., Goss, S., & Pasteels, J. M. (1990). The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3(2), 159–168. <http://doi.org/10.1007/BF01417909>
- Dewan, C., Pearsall, D. J., & Turcotte, R. A. (2004). Ankle kinematics during forward hockey skating: Acceleration to constant velocity. In M. Lamontagne, D. Gordon, E. Robertson, & H. Sveistrup (Eds.), *The XXIIInd International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 387–390). Ottawa, Canada: Human Kinetics Publishers, INC.
- Diedrich, F. J., & Warren, W. H. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 21(1), 183–202. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.21.1.183>
- Donker, S., Beek, P., Wagenaar, R., & Mulder, T. (2001). Coordination between arm and leg movements during locomotion. *Journal of Motor Behavior*, 33, 86–103. <http://doi.org/10.1080/00222890109601905>
- Durand-Bush, N., & Salmela, J. H. (2002). The Development and Maintenance of Expert Athletic Performance: Perceptions of World and Olympic Champions. *Journal of Applied Sport Psychology*, 14(3), 154–171. <http://doi.org/10.1080/10413200290103473>
- Edelman, G. M., & Gally, J. a. (2001). Degeneracy and complexity in biological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(24), 13763–13768. <http://doi.org/10.1073/pnas.231499798>
- El-diasty, M., & Pagiatakis, S. (2008). Calibration and Stochastic Modelling of Inertial

- Navigation Sensor Errors. *Journal of Global Positioning Systems*, 7(2), 170–182. <http://doi.org/10.5081/jgps.7.2.170>
- Elferink-Gemser, M. T., Visscher, C., Lemmink, K. a P. M., & Mulder, T. (2007). Multidimensional performance characteristics and standard of performance in talented youth field hockey players: a longitudinal study. *Journal of Sports Sciences*, 25(4), 481–489. <http://doi.org/10.1080/02640410600719945>
- Erickson, K., Bruner, M. W., MacDonald, D. J., & Côté, J. (2008). Gaining Insight into Actual and Preferred Sources of Coaching Knowledge. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 3(4), 527–538. <http://doi.org/10.1260/174795408787186468>
- Ericsson, K. (2006). The Influence of Experience and Deliberate Practice on the Development of Superior Expert Performance. In K. Ericsson, N. Charness, P. Feltovich, & R. Hoffman (Eds.), *The Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance* (Cambridge, pp. 685–705). New York. <http://doi.org/10.1017/CBO9780511816796.038>
- Ericsson, K. (2008). Deliberate practice and acquisition of expert performance: a general overview. *Academic Emergency Medicine : Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, 15(11), 988–94. <http://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2008.00227.x>
- Ericsson, K., & Lehmann, A. (1996). Expert and exceptional performance: Evidence of maximal adaptation to task constraints. *Annual Review of Psychology*, 47(1), 273–305. <http://doi.org/10.1146/annurev.psych.47.1.273>
- Fajen, B. R., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2009). Information, affordances, and the control of action in sport. *International Journal of Sport Psychology*, 40(1), 79–107.
- Falzon, P. (1991). Les activités verbales dans le travail [verbal activitie at work]. In R. Amalberti, M. De Montmollin, & J. Theureau (Eds.), *Modèles en analyse du travail*. (pp. 229–252). Bruxelles : Mardaga.
- Farrow, D., Reid, M., Buszard, T., & Kovalchika, S. (2017). Charting the development of sport expertise: challenges and opportunities. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 1–20. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/1750984X.2017.1290817>
- Federolf, P. A., Mills, R., & Nigg, B. (2008). Ice friction of flared ice hockey skate blades. *Journal of Sports Sciences*, 26(11), 1201–1208. <http://doi.org/10.1080/02640410802027360>
- Federolf, P., & Nigg, B. (2012). Skating performance in ice hockey when using a flared skate blade design. *Cold Regions Science and Technology*, 70, 12–18. <http://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.08.009>

- Federolf, P., & Redmond, A. (2010). Does skate sharpening affect individual skating performance in an agility course in ice hockey? *Sports Engineering*, *13*(1), 39–46. <http://doi.org/10.1007/s12283-010-0050-3>
- Fergenbaum, M. A., & Marino, G. W. (2004). The Effects of an Upper-Body Plyometrics Program on Male University Hockey Players. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 209–219). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Fortier, A., Turcotte, R. A., & Pearsall, D. J. (2014). Skating mechanics of change-of-direction manoeuvres in ice hockey players. *Sports Biomechanics*, *13*(4), 341–350. <http://doi.org/10.1080/14763141.2014.981852>
- Gal-Petitfaux, N., Adé, D., Poizat, G., & Seifert, L. (2013). L'intégration de données biomécaniques et d'expérience pour comprendre l'activité et concevoir un dispositif technologique : étude d'une situation d'évaluation avec des nageurs de haut niveau. *Le Travail Humain*, *76*(3), 257–282.
- Gautier, G., Marin, L., Leroy, D., & Thouwarecq, R. (2009). Dynamics of expertise level: Coordination in handstand. *Human Movement Science*, *28*(1), 129–40. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2008.05.003>
- Gautier, G., Thouwarecq, R., & Larue, J. (2008). Influence of experience on postural control: effect of expertise in gymnastics. *Journal of Motor Behavior*, *40*(5), 400–8. <http://doi.org/10.3200/JMBR.40.5.400-408>
- Gautier, G., Thouwarecq, R., & Vuillerme, N. (2008). Postural control and perceptive configuration: influence of expertise in gymnastics. *Gait & Posture*, *28*(1), 46–51. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.09.007>
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gibson, J. J. (1977). The Theory of Affordances. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving acting and knowing: Toward an ecological psychology* (pp. 67–82). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin, Boston: Routledge, Taylor & Francis Group LLC.
- Gilbert, W. D., & Trudel, P. (2004). Analysis of Coaching Science Research Published from 1970–2001. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *75*(4), 388–399. <http://doi.org/10.1080/02701367.2004.10609172>
- Glazier, P. S. (2015). Towards a Gran Unified Theory of sports performance. *Human*

- Movement Science*. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2017.04.017>
- Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a New Science*. Viking Penguin.
- Goodman, D., Gall, B., & Miller, A. (2004). Adherence to Return-to-Play Guidelines Following a Sport-Induced Concussion. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 87–97). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Green, H. J., & Daub, B. D. (1978). glycogen depletion patterns during ice hockey performance. *Medicine & Science in Sports*, *10*(4), 289–293.
- Greenwood, D., Davids, K., & Renshaw, I. (2012). How Elite Coaches' Experiential Knowledge Might Enhance Empirical Research on Sport Performance. *International Journal of Sports Science and Coaching*, *7*, 427–429. <http://doi.org/10.1260/1747-9541.7.2.427>
- Greenwood, D., Davids, K., & Renshaw, I. (2012). How Elite Coaches' Experiential Knowledge Might Enhance Empirical Research on Sport Performance: A Response to Commentary. *International Journal of Sports Science and Coaching*, *7*(2).
- Greenwood, D., Davids, K., & Renshaw, I. (2013). Experiential knowledge of expert coaches can help identify informational constraints on performance of dynamic interceptive actions. *Journal of Sports Sciences*, *32*(4), 328–35. <http://doi.org/10.1080/02640414.2013.824599>
- Gréhaigne, J.-F., & Godbout, P. (2014). Dynamic Systems Theory and Team Sport Coaching. *Quest*, *66*(1), 96–116. <http://doi.org/10.1080/00336297.2013.814577>
- Guignard, B., Rouard, A., Chollet, D., Hart, J., Davids, K., & Seifert, L. (2017). Individual–Environment Interactions in Swimming: The Smallest Unit for Analysing the Emergence of Coordination Dynamics in Performance? *Sports Medicine*, (February). <http://doi.org/10.1007/s40279-017-0684-4>
- Guignard, B., Rouard, A., Chollet, D., & Seifert, L. (2017). Behavioral Dynamics in Swimming: The Appropriate Use of Inertial Measurement Units. *Frontiers in Psychology*, *8*(383), 1–16. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00383>
- Haddad, J. M., Van Emmerik, R. E. A., Whittlesey, S. N., & Hamill, J. (2006). Adaptations in interlimb and intralimb coordination to asymmetrical loading in human walking. *Gait & Posture*, *23*(4), 429–434. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.05.006>
- Hadi, A., Razak, A., Zayegh, A., Begg, R. K., & Wahab, Y. (2012). Foot Plantar Pressure Measurement System: A Review. *Sensors*, *12*, 9884–9912.

<http://doi.org/10.3390/s120709884>

- Hagemann, N., Strauss, B., & Büsch, D. (2008). The complex problem-solving competence of team coaches. *Psychology of Sport and Exercise*, 9(3), 301–317. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2007.04.003>
- Haguenauer, M., Legreneur, P., & Monteil, K. M. (2006). Influence of figure skating skates on vertical jumping performance. *Journal of Biomechanics*, 39(2006), 699–707. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.01.005>
- Haken, H. (1983). *Synergetics: an introduction: nonequilibrium phase transition and selforganization in physics, chemistry, and biology*. Springer.
- Hambrick, D. Z., & Meinz, E. J. (2011). Limits on the Predictive Power of Domain-Specific Experience and Knowledge in Skilled Performance. *Current Directions in Psychological Science*, 20(5), 275–279. <http://doi.org/10.1177/0963721411422061>
- Hambrick, D. Z., Oswald, F. L., Altmann, E. M., Meinz, E. J., Gobet, F., & Campitelli, G. (2014). Deliberate practice: Is that all it takes to become an expert? *Intelligence*, 45(1), 34–45. <http://doi.org/10.1016/j.intell.2013.04.001>
- Hammond, K. R., & Bateman, R. A. (2009). Sport psychology as an instance of ecological psychology. *International Journal of Sport Psychology*, 40(1), 38–49.
- Hannon, A., Michaud-Paquette, Y., Pearsall, D. J., & Turcotte, R. A. (2011). Dynamic strain profile of the ice hockey stick: Comparisons of player calibre and stick shaft stiffness. *Sports Engineering*, 14(2–4), 57–65. <http://doi.org/10.1007/s12283-011-0072-5>
- Hay, J. G. (2002). Cycle Rate , Length , and Speed of Progression in Human Locomotion. *Journal of Applied Biomechanics*, 18, 257–270.
- Herzog, W., Nigg, B. M., Read, L. J., & Olsson, E. (1989). Asymmetries in ground reaction force patterns in normal human gait. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 21(1), 110–114.
- Holt, N., & Tamminen, K. (2010). Improving grounded theory research in sport and exercise psychology: further reflections as a response to Mike Weed. *Psychology of Sport and Exercise*, 11(6), 405–413. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2009.12.002>
- Hopkins, W. G. (2016). A new view of statistics. Retrieved July 24, 2017, from <http://www.sportsci.org/resource/stats/index.html>
- Houdijk, H., De Koning, J. J., De Groot, G., Bobbert, M. F., & Van Ingen Schenau, G. J. (2000). Push-off mechanics in speed skating with conventional skates and klapskates. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(3), 635–41.

- Hreljac, A., & Martin, P. E. (1993). The relationship between smoothness and economy during walking. *Biological Cybernetics*, *69*, 213–218.
- Hristovski, R., Davids, K., & Araújo, D. (2009). Information for Regulating Action in Sport : Metastability and Emergence of Tactical Solutions. *Perspectives on Cognition and Action in Sport*, (APRIL), 43–57.
- Hristovski, R., Davids, K., Araújo, D., & Passos, P. (2011). Constraints-induced emergence of functional novelty in complex neurobiological systems: a basis for creativity in sport. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, *15*(2), 175–206.
- Hristovski, R., Davids, K., & Button, C. (2006). How boxers decide to punch a target : emergent behaviour in nonlinear dynamical movement systems. *Journal of Sports Science and Medicine*, 60–73.
- Hughes, M. D., & Bartlett, R. M. (2002). The use of Performance Indicators in Performance Analysis. *Journal of Sports Sciences*, *20*(10), 739–754. <http://doi.org/10.1080/026404102320675602>
- Janski, R. A., & Meyer, B. . (2004). Perceptions of Equipement on On-Ice Attitudes and Performances of Hockey Players. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 117–127). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Jeka, J. J. (1997). Light touch contact as a balance aid. *Physical Therapy*, *77*(5), 476–87. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9149759>
- Jobse, H., Schuurhof, R., Cserep, F., Schreurs, a W., & De Koning, J. J. (1990). Measurement of Push-Off Force and Ice Friction During Speed Skating. *International Journal of Sports Biomechanics*, *6*, 92–100.
- Johnson, H. W. (1961). Skill=Speed X Accuracy X Form X Adaptability. *Perceptual and Motor Skills*, *13*, 163–170.
- Jones, K. S. (2003). What is an affordance? *Ecological Psychology*, *15*(2), 107–114. <http://doi.org/10.1207/S15326969ECO1502>
- Kang, J., Chaloupka, E. C., Mastrangelo, M. A., & Hoffman, J. R. (2002). Physiological and biomechanical analysis of treadmill walking up various gradients in men and women. *European Journal of Applied Physiology*, *86*, 503–508. <http://doi.org/10.1007/s00421-002-0583-7>
- Karamanidis, K., Arampatzis, A., & Brüggemann, G. P. (2002). Symmetry and reproducibility of kinematic parameters during various running techniques. In K. E.

- Gianikellis (Ed.), *20 International Symposium on Biomechanics in Sports* (Vol. July 1-5, pp. 511–514). Caceres : Spain.
- Karamanidis, K., Arampatzis, A., & Brüggemann, G. P. (2003). Symmetry and Reproducibility of Kinematic Parameters during various Running Techniques. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *35*(6), 1009–1016. <http://doi.org/10.1249/01.MSS.0000069337.49567.F0>
- Kauffman, S. a. (1990). The Sciences of Complexity and “Origins of Order.” *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association, 1990*, 299–322. <http://doi.org/10.2307/193076>
- Kelso, J. A. S. (1991). Anticipatory dynamical systems, intrinsic pattern dynamics and skill learning. Reaction to Bullock and Grossberg, 1991. *Human Movement Science*, *10*(1), 93–111. [http://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90034-U](http://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90034-U)
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge: MA : MIT.
- Kelso, J. A. S. (2012). Multistability and metastability: Understanding dynamic coordination in the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *367*(1591), 906–918. <http://doi.org/10.1098/rstb.2011.0351>
- Kenneally-Dabrowski, C. J. B., Serpell, B. G., & Spratford, W. (2017). Are accelerometers a valid tool for measuring overground sprinting symmetry? *International Journal of Sports Science and Coaching*, *0*(0), 1–8. <http://doi.org/10.1177/1747954117716790>
- Kobayashi, T. (1973). Studies of the properties of ice speed skating rinks. *ASHRAE Journal*, *73*, 51–56.
- Komar, J. (2013). *Dynamique de l'apprentissage moteur : apprendre loin de l'équilibre*. Rouen.
- Komar, J., Chow, J. Y., Chollet, D., & Seifert, L. (2014). Effect of analogy instructions with an internal focus on learning a complex motor skill. *Journal of Applied Sport Psychology*, *26*(1), 17–32. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/10413200.2013.771386>
- Komar, J., Seifert, L., & Thouwarecq, R. (2015). What variability tells us about motor expertise: measurements and perspectives from a complex system approach. *Movement & Sport Sciences*, *89*, 65–77. <http://doi.org/10.1051/sm/2015020>
- Krebs, R. J. (2009). Bronfenbrenner’s Bioecological Theory of Human Development and the process of development of sports talent. *International Journal of Sport Psychology*,

40(1), 108–135.

- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures: I. Theoretical Lines of Convergence. *Advances in Psychology*, 1(C), 3–47. [http://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61936-6](http://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61936-6)
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1982). on the control and co-ordination of naturally developing systems. *The Development of Movement Control and Coordination*, 5–78.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Routledge.
- Lackner, J. R., DiZio, P., Jeka, J., Horak, F., Krebs, D., & Rabin, E. (1999). Precision contact of the fingertip reduces postural sway of individuals with bilateral vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 126(4), 459–66.
- Lafontaine, D. (2007). Three-dimensional kinematics of the knee and ankle joints for three consecutive push-offs during ice hockey skating starts. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports*, 6, 391–406. <http://doi.org/10.1080/14763140701491427>
- Lafontaine, D., Lamontagne, M., & Lockwood, K. (1998). Time motion analysis of ice-hockey skills during games. In H. J. Riehle & M. M. Vieten (Eds.), *ISBS 98: XVI International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 481–484). Konstanz, Germany: International Society for Biomechanics of Sports.
- LaPrade, R. F., Dick, R. N., Kiff, T. A., & Wentorf, F. A. (2004). Epidemiology of NCAA Men's Ice Hockey Injuries. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 40–51). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Lee, D. N. (1980). The optic flow field: the foundation of vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 290(1038), 169–179. <http://doi.org/10.1098/rstb.1980.0089>
- Lemyre, F., Trudel, P., & Durand-Bush, N. (2007). How Youth-Sport Coaches Learn to Coach. *The Sport Psychologist*, 21, 191–209.
- Li, L., Van Den Bogert, E. C. H., Caldwell, G. E., Van Emmerik, R. E. A., & Hamill, J. (1999). Coordination patterns of walking and running at similar speed and stride frequency. *Human Movement Science*, 18, 67–85.
- Madgwick, S. O. H. (2010). An efficient orientation filter for inertial and inertial / magnetic

- sensor arrays. *Bristol, UK: University of Bristol*. Retrieved from http://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf
- Madgwick, S. O. H., Harrison, A. J. L., & Vaidyanathan, R. (2011). Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. In *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.* (pp. 179–185). <http://doi.org/10.1109/icorr.2011.5975346>
- Magalhaes, F. A. De, Vannozzi, G., Gatta, G., & Fantozzi, S. (2014). Wearable inertial sensors in swimming motion analysis : a systematic review. *Journal of Sports Science*, *33*, 731–745. <http://doi.org/10.1080/02640414.2014.962574>
- Mallett, C. J., Trudel, P., Lyle, J., & Rynne, S. B. (2009). Formal vs. Informal Coach Education. *International Journal of Sports Science and Coaching*, *4*(3), 325–364. <http://doi.org/10.1260/174795409789623883>
- Marin, L., Bardy, B. B. G., Baumberger, B., Flückiger, M., & Stoffregen, T. a. (1999). Interaction between task demands and surface properties in the control of goal-oriented stance. *Human Movement Science*, *18*(1), 31–47. [http://doi.org/10.1016/S0167-9457\(98\)00032-3](http://doi.org/10.1016/S0167-9457(98)00032-3)
- Marino, G. W. (1977). Kinematics of Ice Skating at different velocities. *Research Quarterly*, *48*(1), 93–97.
- Marino, G. W. (1979). biomechanics of power skating : past research, future trends. *Biomechanics*, (1978), 246–252.
- Marino, G. W. (1983). Selected Mechanical Factors Associated with Acceleration in Ice Skating. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *54*(3), 234–238. <http://doi.org/10.1080/02701367.1983.10605301>
- Marino, G. W., & Drouin, D. (2002). Forward skating mechanics of ice hockey players under fatigued conditions. In Youlian Hong (Ed.), *International Research in Sports Biomechanics* (pp. 266–270). London and New York: Routledge.
- Mason, P. H. (2010). Degeneracy at Multiple Levels of Complexity. *Biological Theory*, *5*(3), 277–288. http://doi.org/10.1162/BIOT_a_00041
- Mason, P. H., Domínguez D., J. F., Winter, B., & Grignolio, A. (2015). Hidden in plain view: Degeneracy in complex systems. *BioSystems*, *128*, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.biosystems.2014.12.003>
- McPherson, M. N., Wrigley, A., & Montelpare, W. J. (2004). The biomechanical characteristics of development-age hockey players: Determining the effects of body size on the assessment of skating technique. In D. Pearsall & A. Ashare (Eds.), *Safety in Ice*

- Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 272–287). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Michaud-Paquette, Y., Pearsall, D. J., & Turcotte, R. A. (2008). Predictors of scoring accuracy: Ice hockey wrist shot mechanics. *Sports Engineering, 11*(2), 75–84. <http://doi.org/10.1007/s12283-008-0009-9>
- Millet, G. P., Chollet, D., Chalies, S., & Chatard, J. C. (2002). Coordination in Front Crawl in Elite Triathletes and Elite Swimmers. *International Journal of Sports Medicine, 23*, 99–104.
- Montebell, G. M. (1992). Ice skating surfaces. In *ASTM Standardization News* (pp. 54–59).
- Montelpare, W. J., & McPherson, M. N. (2004). Measuring the Effects of Initiating Body Checking at the Atom Age Level. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 71–83). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Montgomery, D. L. (2006). Physiological profile of professional hockey players—a longitudinal comparison. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 31*(3), 181–185. <http://doi.org/10.1139/H06-012>
- Montgomery, D. L., Nobes, K., Pearsall, D. J., & Turcotte, R. A. (2004). Task Analysis (Hitting, Shooting, Passing, and Skating) of Professional Hockey Players. In D. Pearsall & A. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 288–296). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Morin, E. (1990). *Introduction à la pensée complexe*. Paris: ESF.
- Mullineaux, D. R., Bartlett, R. M., & Bennett, S. (2001). Research design and statistics in biomechanics and motor control. *Journal of Sports Sciences, 19*(10), 739–760.
- Nash, C., & Collins, D. (2006). Tacit Knowledge in Expert Coaching: Science or Art? *Quest, 58*(4), 465–477. <http://doi.org/10.1080/00336297.2006.10491894>
- Nash, C. S., Sproule, J., & Horton, P. (2011). Excellence in coaching: the art and skill of elite practitioners. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 82*(2), 229–38.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*. W.H. Freeman & Co Ltd.
- Nesbit, S. M. (2005). A three dimensional kinematic and kinetic study of the golf swing. *Journal of Sports Science and Medicine, 4*(4), 499–519.
- Newell, K. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. Wade & H.

- Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination* (pp. 341–361). Amsterdam: Martinus Nijhoff Publishers.
- Newell, K. M., & Slifkin, A. B. (1998). The nature of movement variability. In J. P. Piek (Ed.), *Motor Behavior and Human Skill: A multidisciplinary approach*. New York: Human Kinetics.
- Newell, K. M., & Vaillancourt, D. E. E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science, 20*(4–5), 695–715.
- Niwa, H. S. (1994). Self-organizing dynamic model of fish schooling. *Journal of Theoretical Biology, 171*(2), 123–136. <http://doi.org/10.1006/jtbi.1994.1218>
- Nobes, K. ., Montgomery, D., Pearsall, D. J., Turcotte, R., Lefebvre, R., & F., W. (2003). A comparison of skating economy on ice and on the skating treadmill. *Journal of Applied Physiology, 28*, 1–11.
- Noonan, B., Mack, G., & Stachenfeld, N. (2007). The effects of hockey protective equipment on high-intensity intermittent exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise, 39*(8), 1327–1335. <http://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180619644>
- Nowotny, H. (2000). Transgressive Competence The Narrative of Expertise. *European Journal of Social Theory, 3*(1), 5–21.
- Oliver, E. J., Hardy, J., & Markland, D. (2010). Identifying important practice behaviors for the development of high-level youth athletes: Exploring the perspectives of elite coaches. *Psychology of Sport and Exercise, 11*(6), 433–443. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2010.05.004>
- Orth, D., Davids, K., Araújo, D., Renshaw, I., & Passos, P. (2014). Effects of a defender on run-up velocity and ball speed when crossing a football. *European Journal of Sport Science, 14*(sup1), S316–S323. <http://doi.org/10.1080/17461391.2012.696712>
- Parcels, J. (2002). Chances of making it in pro hockey. Retrieved April 7, 2017, from <http://www.nepeanhockey.on.ca/Docs/General/MakingIt.pdf>
- Pearsall, D. J., Paquette, Y. M., Baig, Z., Albrecht, J., & Turcotte, R. A. (2012). Ice hockey skate boot mechanics: Direct torque and contact pressure measures. *Procedia Engineering, 34*, 295–300. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.051>
- Pearsall, D. J., Turcotte, R. A., Lefebvre, R., & Bateni, H. (2001). Kinematics of the foot and ankle in forward ice hockey skating. In J. R. Blackwell & R. H. Sanders (Eds.), *XIX th International Symposium on Biomechanics in Sports* (pp. 78–81). San Francisco, USA: ISBS.

- Pearsall, D. J., Turcotte, R. A., Levangie, M. C., & Forget, S. (2014). Biomechanical adaptation in ice hockey skating. In Y. Hong (Ed.), *Routledge handbook of Ergonomics in Sport and Exercise* (pp. 37–45). London and New York: Routledge Taylor & Francis Group.
- Pearsall, D. J., Turcotte, R. A., & Murphy, S. D. (2000). Biomechanics of ice hockey. In W. E. Garret & D. T. Kirkendall (Eds.), *Exercise and sport science* (Vol. 1, pp. 675–692). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Phillips, E., Davids, K., Renshaw, I., & Portus, M. (2010). Expert performance in sport and the dynamics of talent development. *Sports Medicine*, *40*(4), 271–283.
- Pinder, R. A., Davids, K., & Renshaw, I. (2012). Metastability and emergent performance of dynamic interceptive actions. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *15*(5), 437–443. <http://doi.org/10.1016/j.jsams.2012.01.002>
- Pinder, R. A., Davids, K., Renshaw, I., & Araújo, D. (2011). Representative learning design and functionality of research and practice in sport. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *33*, 146–155.
- Pinder, R. A., Renshaw, I., & Davids, K. (2009). Information-movement coupling in developing cricketers under changing ecological practice constraints. *Human Movement Science*, *28*, 468–479. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2009.02.003>
- Potdevin, F., Bril, B., Sidney, M., & Pelayo, P. (2006). Stroke Frequency and Arm Coordination in front crawl swimming. *International Journal of Sports Medicine*, *27*, 193–198. <http://doi.org/10.1055/s-2005-837545>
- Price, C. J., & Friston, K. J. (2002). Degeneracy and cognitive anatomy. *TRENDS in Cognitive Sciences*, *6*(10), 416–421.
- Quinney, H. A., Dewart, R., Game, A., Snydermiller, G., Warburton, D., & Bell, G. (2008). A 26 year physiological description of a National Hockey League team. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *33*(4), 753–60. <http://doi.org/10.1139/H08-051>
- Rankinen, T., Bray, M. S., Hagberg, J. M., Perusse, L., Roth, S. M., Wolfarth, B., & Bouchard, C. (2006). The Human Gene Map for Performance and Health-Related Fitness Phenotypes : the 2005 update. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *11*(38), 1863–1888. <http://doi.org/10.1249/01.mss.0000233789.01164.4f>
- Reed, E., & Bril, B. (1996). The primacy of action in development. A commentary of N. Bernstein. In M. Latash & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development* (pp. 431–451). Hillsdale, NJ: Erlbaum Associates.

- Rein, R., Button, C., Davids, K., & Summers, J. (2010). Cluster Analysis of Movement Patterns in Multiarticular Actions : A Tutorial. *Motor Control*, *14*, 211–239.
- Renger, R. (1994). Identifying the Task Requirements Essential to the Success of a Professional Ice Hockey Player : A Scout ' s Perspective. *Journal of Teaching in Physical Education*, *13*, 180–195.
- Richardson, M. J., Shockley, K., Fajen, B. R., Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2008). Ecological Psychology : Six Principles for an Embodied-Embedded Approach to Behavior. In P. Calvo & T. Gomila (Eds.), *Handbook of Cognitive Science: An Embodied Approach* (pp. 161–187). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-046616-3.00009-8>
- Rietveld, E., & Kiverstein, J. (2014). A Rich Landscape of Affordances. *Ecological Psychology*, *26*(4), 325–352. <http://doi.org/10.1080/10407413.2014.958035>
- Robert-Lachaine, X., Turcotte, R. A., Dixon, P. C., & Pearsall, D. J. (2012). Impact of hockey skate design on ankle motion and force production. *Sports Engineering*, *15*(4), 197–206. <http://doi.org/10.1007/s12283-012-0103-x>
- Robinson, R. O., Herzog, W., & Nigg, B. M. (1987). Use of Force Platform Variables to Quantify the Effects of Chiropractic Manipulation on Gait Symmetry. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, *10*(4), 172–176.
- Rolland, C., & Cizeron, M. (2011). Comprendre et intervenir : les connaissances des entraîneurs experts en gymnastique [Understand and act : gymnastics coaches' expert knowledge]. *Activités*, *8*, 53–76.
- Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: a review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, *95*(3), 355–386. <http://doi.org/10.1037/0033-2909.95.3.355>
- Saury, J., & Durand, M. (1998). Practical knowledge in expert coaches: on-site study of coaching in sailing. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *69*, 254–266. <http://doi.org/10.1080/02701367.1998.10607692>
- Schinke, R. J., Bloom, G. A., & Salmela, J. H. (1995). The Career Stages of Elite Basketball Coaches. *Avante*, *1*(1), 48–62.
- Schmidt, R. (1975). A Schema Theory of Discrete Motor Skill Learning. *Psychological Review*, *82*(4), 225–260. <http://doi.org/10.1037/h0076770>
- Schmidt, R., & Lee, T. (2011). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. *Human Kinetics*. [http://doi.org/10.1016/0021-9290\(88\)90286-2](http://doi.org/10.1016/0021-9290(88)90286-2)

- Schöllhorn, W. I., Beckmann, H., Michelbrink, M., Sechelmann, M., Trockel, M., & Davids, K. (2006). Does noise provide a basis for the unification of motor learning theories? *International Journal of Sport Psychology*, *37*(2–3), 186–206.
- Schreven, S., Toussaint, H. M., Smeets, J. B. J., & Beek, P. J. (2013). The effect of different inter-pad distances on the determination of active drag using the Measuring Active Drag system. *Journal of Biomechanics*, *46*(11), 1933–7. <http://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.05.020>
- Seifert, L., Araujo, D., Komar, J., & Davids, K. (2017). Understanding constraints on sport performance from the complexity sciences paradigm: An ecological dynamics framework. *Human Movement Science*. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2017.05.001>
- Seifert, L., Boulanger, J., Orth, D., & Davids, K. (2015). Environmental Design Shapes Perceptual-motor Exploration, Learning, and Transfer in Climbing. *Front. Psychol.*, *25*(6). <http://doi.org/doi:10.3389/fpsyg.2015.01819>.
- Seifert, L., Button, C., & Davids, K. (2013). Key properties of expert movement systems in sport: An ecological dynamics perspective. *Sports Medicine*, *43*(3), 167–178. <http://doi.org/10.1007/s40279-012-0011-z>
- Seifert, L., Chehense, A., Tourny-Chollet, C., Lemaitre, F., & Chollet, D. (2008). Effect of Breathing Pattern on Arm Coordination Symmetry in Front Crawl. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *22*(5), 1670–1676.
- Seifert, L., Chollet, D., & Allard, P. (2005). Arm coordination symmetry and breathing effect in front crawl. *Human Movement Science*, *24*, 234–256. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2005.05.003>
- Seifert, L., & Davids, K. (2012). Intentions, Perceptions and Actions Constrain Functional Intra-and Inter-Individual Variability in the Acquisition of Expertise in Individual Sports. *The Open Sports Sciences Journal*, *5*(1), 68–75.
- Seifert, L., L'Hermette, M., Komar, J., Orth, D., Mell, F., Merriaux, P., ... Davids, K. (2014). Pattern recognition in cyclic and discrete skills performance from inertial measurement units. In D. James (Ed.), *The 2014 conference of the International Sports Engineering Association (ISEA 2014). Procedia Engineering* (Vol. 72, pp. 196–201). Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.033>
- Seifert, L., L'Hermette, M., Wattedled, L., Komar, J., Mell, F., Gomez, D., & Caritu, Y. (2011). Use of Inertial Central to Analyse Skill of Inter- Limb Coordination in Sport

- Activities. In B. G. Bardy (Ed.), *The International Conference SKILLS 2011*. Montpellier: EDP Sciences. <http://doi.org/10.1051/bioconf/201101000>
- Seifert, L., Leblanc, H., Chollet, D., & Delignières, D. (2010). Inter-limb coordination in swimming: Effect of speed and skill level. *Human Movement Science*, *29*(1), 103–113. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2009.05.003>
- Seifert, L., Orth, D., Boulanger, J., Dovgalecs, V., Héroult, R., & Davids, K. (2014). Climbing Skill and Complexity of Climbing Wall Design : Assessment of Jerk as a Novel Indicator of Performance Fluency. *Journal of Applied Biomechanics*, *30*, 619–625.
- Seifert, L., Wattebled, L., Héroult, R., Poizat, G., Adé, D., Gal-Petitfaux, N., & Davids, K. (2014). Neurobiological degeneracy and affordance perception support functional intra-individual variability of inter-limb coordination during ice climbing. *PLoS ONE*, *9*(2). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0089865>
- Seminati, E., Nardello, F., Zamparo, P., Ardigo, L. P., Faccioli, N., & Minetti, A. E. (2013). Anatomically Asymmetrical Runners Move More Asymmetrically at the Same Metabolic Cost. *PLoS ONE*, *8*(9), 1–8. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0074134>
- Sève, C., & Poizat, G. (2006). A Grounded Theory of Elite Male Table Tennis Players' Activity During Matches. *The Sport Psychologist*, *20*, 58–73.
- Shea, C. H., & Wulf, G. (2005). Schema theory: A critical appraisal and reevaluation. *Journal of Motor Behavior*, *37*(2), 85–101. <http://doi.org/10.3200/JMBR.37.2.85-102>
- Sherman, C. A., Sparrow, W. A., Jolley, D., & Eldering, J. (2001). Coaches' perceptions of golf swing kinematics. *International Journal of Sport Psychology*, *32*, 257–270.
- Sidney, M., Paillette, S., Hespel, J. M., Chollet, D., & Pelayo, P. (2001). Effect of swim paddles on the intra-cyclic velocity variations and on the arm coordination of front crawl stroke. In J. R. Blackwell & R. H. Sanders (Eds.), *Proceedings of Swim Sessions of XIX Symposium International on Biomechanics in Sports* (pp. 39–42). San Francisco, USA: Human Kinetics.
- Sim, F. H., & Chao, E. Y. (1978). Injury potential hockey in modern ice. *The American Journal of Sports Medicine*, *6*(6), 378–384. <http://doi.org/10.1177/036354657800600612>
- Simonton, D. K. (2005). Giftedness and Genetics : The Emergent- Epigenetic Model and Its Implications. *Journal for the Education of the Gifted*, *28*(3), 270–286. <http://doi.org/10.4219/jeg-2005-338>
- Singer, R. N., & Janelle, C. M. (1999). Determining sport expertise: From genes to supremes. *International Journal of Sport Psychology*, *30*(2), 117–150.

- Smith, G. A. (2003). Biomechanics of cross country skiing. In H. Rusko (Ed.), *Handbook of Sports Medicine and Science: Cross Country Skiing* (pp. 32–61). Oxford: Blackwell Science.
- Smith, M., & Cushion, C. J. (2006). An investigation of the in-game behaviours of professional, top-level youth soccer coaches. *Journal of Sports Sciences*, *24*, 355–366. <http://doi.org/10.1080/02640410500131944>
- Stergiou, N., Jensen, J. L., Bates, B. T., Scholten, S. D., & Tzetzis, G. (2001). A dynamical systems investigation of lower extremity coordination during running over obstacles. *Clinical Biomechanics*, *16*, 213–221.
- Stergiou, N., Yu, Y., & Kyvelidou, A. (2013). A Perspective on Human Movement Variability With Applications in Infancy Motor Development. *Kinesiology Review*, *2*, 93–102. <http://doi.org/10.1123/krj.2.1.93>
- Sternberg, R. J. (2000). Giftedness as developing expertise. In K. A. Heller, F. J. Mönks, R. F. Subotnik, & R. J. Sternberg (Eds.), *International Handbook of giftedness and Talent. 2nd Edition* (Elsevier, pp. 55–66). Pergamon.
- Stetter, B. J., Buckeridge, E., Von Tscharnner, V., Nigg, S. R., & Nigg, B. M. (2016). A novel approach to determine strides, ice contact, and swing phases during ice hockey skating using a single accelerometer. *Journal of Applied Biomechanics*, *32*(1), 101–106. <http://doi.org/10.1123/jab.2014-0245>
- Stidwill, T. J., Pearsall, D. J., & Turcotte, R. (2010). Comparison of skating kinetics and kinematics on ice and on a synthetic surface. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports*, *9*(1), 57–64. <http://doi.org/10.1080/14763141003690237>
- Stidwill, T. J., Turcotte, R. A., Dixon, P., & Pearsall, D. J. (2010). Force transducer system for measurement of ice hockey skating force. *Sports Engineering*, *12*(2), 63–68. <http://doi.org/10.1007/s12283-009-0033-4>
- Stoffregen, T. A., Hove, P., Bardy, B. G., Riley, M., & Bonnet, C. T. (2007). Postural Stabilization of Perceptual But Not Cognitive Performance. *Journal of Motor Behavior*, *39*(2), 126–138. article. <http://doi.org/10.3200/JMBR.39.2.126-138>
- Takano, N. (1995). Phase Relation and Breathing Pattern during Locomotor/Respiratory Coupling in Uphill and Downhill Running. *Japanese Journal of Physiology*, *45*, 47–58.
- Telles, T., Barbosa, A. C., Campos, M. H., & Júnior, O. A. (2011). Effect of hand paddles and parachute on the index of coordination of competitive crawl-strokers. *Journal of Sports Sciences*, *29*(4), 431–438. <http://doi.org/10.1080/02640414.2010.523086>

- Temprado, J. J., Della-Grasta, M., Farrell, M., & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volleyball serve. *Human Movement Science, 16*, 653–676. [http://doi.org/10.1016/S0167-9457\(97\)00014-6](http://doi.org/10.1016/S0167-9457(97)00014-6)
- Temprado, J. J., & Laurent, M. (1997). Vers une approche dynamique des coordinations complexes : comparaison des niveaux d'expertise dans le service en volley-ball. *Science & Sports, 12*, 32–33.
- Tesch, R. (1990). *Qualitative research analysis types and software tools*. New York: Farmer Press.
- Thompson, A., Bezodis, I. N., & Jones, R. L. (2009). An in-depth assessment of expert sprint coaches' technical knowledge. *Journal of Sports Sciences, 27*(8), 855–61. <http://doi.org/10.1080/02640410902895476>
- Toussaint, H. M., Van der Meer, S., De Niet, M., & Truijens, M. (2006). Propelling efficiency in sprint front crawl swimming. *Revista Portuguesa de Ciências Do Desporto, 6*(2 Suppl), 279–282.
- Trudel, P., & Gilbert, W. D. (2004). Communities of Practice as an Approach to Foster Ice Hockey Coach Development. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 167–177). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Turcotte, R. A., Pearsall, D. J., Montgomery, D. L., Lefebvre, R., Ofir, D., & Loh, J. J. (2004). Comparison of Ice Versus Treadmill Skating-Plantar Force Distribution Patterns. In D. J. Pearsall & A. B. Ashare (Eds.), *Safety in Ice Hockey: Fourth Volume, ASTM STP 1446* (pp. 265–271). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Turvey, M. (2007). action and perception at the level of synergies. *Human Movement Science, 657–697*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167945707000292>
- Turvey, M., & Kugler, P. N. (1984). an ecological approach to perception and action. *Human Motor Actions: Bernstein Reassessed, 373–410*.
- Ullén, F., Hambrick, D. Z., & Mosing, M. A. (2015). Rethinking Expertise: A Multifactorial Gene–Environment Interaction Model of Expert Performance. *Psychological Bulletin, 142*(December), 427–446. <http://doi.org/10.1037/bul0000033>
- Upjohn, T., Turcotte, R. A., Pearsall, D. J., & Loh, J. (2008). Three-dimensional kinematics of the lower limbs during forward ice hockey skating. *Sports Biomechanics, 7*(2), 206–221. <http://doi.org/10.1080/14763140701841621>

- Van Emmerik, R. E. A., & Van Wegen, E. E. H. (2000). On Variability and Stability in Human Movement. *Journal of Applied Biomechanics*, *16*, 394–406.
- Van Emmerik, R. E. A., & Wagenaar, R. C. (1996). Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking. *Journal of Biomechanics*, *29*(9), 1175–1184.
- Vanzant, R. S., Mcpoil, T. G., & Cornwall, M. W. (2001). Symmetry of Plantar Pressures and Vertical Forces in Healthy Subjects During Walking. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, *91*(7), 337–342.
- Vereijken, B., Van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T., & Newell, K. M. (1992). Freezing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, *24*, 133–142. Retrieved from <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1992-41729-001>
- Vescovi, J. D., Murray, T. M., Fiala, K. A., & VanHeest, J. L. (2006). Off-ice performance and draft status of elite ice hockey players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *1*(3), 207–21.
- Vicente, K. J., & Wang, J. A. H. (1998). An ecological theory of expertise effects in memory recall. *Psychological Review*, *105*(1), 33–57.
- Vilar, L., Araujo, D., Davids, K., & Button, C. (2012). The Role of Ecological Dynamics in Analysing Performance in Team Sports. *Sports Med*, *42*(1), 1–10.
- Villaseñor, A., Turcotte, R. A., & Pearsall, D. J. (2006). Recoil effect of the ice hockey stick during a slap shot. *Journal of Applied Biomechanics*, *22*(3), 202–11.
- Von Bertalanffy, L. (1968). *General System Theory*. George Braziller New York.
- Wagenaar, C., & Van Emmerik, R. E. A. (1994). Dynamics of pathological. *Human Movement Science*, *13*, 441–471.
- Wagenaar, R. C., & Van Emmerik, R. E. A. (2000). Resonant frequencies of arms and legs identify different walking patterns. *Journal of Biomechanics*, *33*, 853–861.
- Wall, J. C., Nottrodt, J. W., & Charteris, J. (1981). The effects of uphill and downhill walking on pelvic oscillations in the transverse plane. *Ergonomics*, *24*(10), 807–816. <http://doi.org/10.1080/00140138108924901>
- Wang, K., Wang, B., & Liuing, P. (2009). CVAP: Validation for Cluster Analyses. *Data Science Journal*, *8*, 88–93.
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *10*(5), 683–703. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.10.5.683>

- Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological Review*, *113*(2), 358–389. <http://doi.org/10.1037/0033-295X.113.2.358>
- Weed, M. (2009). Research quality considerations for grounded theory research in sport & exercise psychology. *Psychology of Sport and Exercise*, *10*(5), 502–510. <http://doi.org/10.1016/j.psychsport.2009.02.007>
- Werthner, P., & Trudel, P. (2006). A new theoretical perspective for understanding how coaches learn to coach. *Sport Psychologist*, *20*, 198–212.
- Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Winter, D. A., Sidwall, H. G., & Hobson, D. A. (1974). Measurement and reduction of noise in kinematics of locomotion. *Journal of Biomechanics*, *7*, 157–159.
- Withagen, R., & Chemero, A. (2011). Affordances and classification: On the significance of a sidebar in James Gibson's last book. *Philosophical Psychology*, *iFirst*, 1–17. <http://doi.org/10.1080/09515089.2011.579424>
- Withagen, R., De Poel, H. J., Araújo, D., & Pepping, G. J. (2012). Affordances can invite behavior: Reconsidering the relationship between affordances and agency. *New Ideas in Psychology*, *30*(2), 250–258. <http://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2011.12.003>
- Wright, T., Trudel, P., & Culver, D. (2007). Learning how to coach: the different learning situations reported by youth ice hockey coaches. *Physical Education and Sport Pedagogy*, *12*(2), 127–144. <http://doi.org/10.1080/17408980701282019>

ANNEXES

<i>Annexe 1. Guide d'entretien de l'étude 1</i>	<i>214</i>
<i>Annexe 2. Retranscription intégrale des connaissances de l'entraîneur D relatives au patinage</i>	<i>216</i>
<i>Annexe 3. Extraits d'unités de sens utilisées pour déterminer des indicateurs de performance.....</i>	<i>223</i>
<i>Annexe 4. Analyse des résidus concernant le signal des accéléromètres de la centrale inertielle en haut puis des foot plantar pressure sensors en bas.....</i>	<i>230</i>
<i>Annexe 5. Effet du filtre sur le signal des semelles Tekscan.....</i>	<i>231</i>
<i>Annexe 6. Tableaux récapitulatifs des Index de Symétrie par sujets et conditions.....</i>	<i>232</i>

Annexe 1. Guide d'entretien de l'étude 1

Partie 1 : l'activité hockey sur glace

1. Comment présenteriez-vous l'activité hockey sur glace ?
2. Quels éléments vous semblent fondamentaux pour décrire ce qu'est un joueur de hockey ?
3. Quel est votre point de vue concernant le plan de développement du joueur ? Autrement dit comment imaginez-vous la progression de l'Ecole de hockey au niveau élite, quelles sont les étapes qui vous semblent importantes pendant la progression du joueur ?
4. Quelles habiletés allez-vous chercher à développer : de l'Ecole de Hockey aux – 9 ans, des U11 aux U13, des U15 aux U18 ?

Partie 2 : le patinage

1. Selon votre expérience d'entraîneur, quelle importance accordez-vous au travail du patinage en fonction des catégories d'âge des pratiquants ? Quelle est la place de ce travail dans une séance d'entraînement, dans vos interventions d'entraîneurs ?
2. Pouvez-vous présenter l'organisation (e.g., consignes, matériels, nombre de participants, les objectifs à atteindre, l'utilisation ou non de la crosse) d'une séance d'entraînement comprenant du patinage avec les enfants des différentes catégories précédemment citées ?
3. Quelle place accordez-vous au patinage dans votre planification ? Organisez-vous des séances uniquement « patinage » avec des exercices spécifiques aux postes de vos joueurs (du power skating à thème) ? Pouvez-vous donner quelques exemples ?
4. Quand vous entraînez ou analysez le patinage de vos joueurs, quels indices vous permettent de savoir s'ils sont ou ne sont pas de bons patineurs ?
5. Sur quelles habiletés de patinage (e.g., avant, arrière, croisés, stop and go, changement de direction, pivot, manipulation de la crosse et palet en mouvement) mettez-vous l'accent dans vos séances d'entraînement ? Vos choix dépendent-ils des catégories d'âge ?
6. Attendez-vous des qualités de patinage différentes selon les postes de vos joueurs ?
7. Si vous aviez trois indices importants pour caractériser un excellent patinage vers l'avant, que choisiriez-vous ?

Partie 3 : la propulsion vers l'avant

1. Comment caractériser la propulsion vers l'avant ? Quel(s) rôle(s) attribuez-vous aux bras ?
2. Selon vous, comment faire pour aller le plus vite possible ?

3. Comment présentez-vous le rôle de la glisse à vos joueurs : comment reconnaissez-vous un joueur qui a une bonne glisse ? Quelle durée y consacre-t-il dans un cycle?

Avez-vous des remarques complémentaires concernant des éléments de réponse qui auraient été oubliés ou non traités dans ce questionnaire ?

Annexe 2. Retranscription intégrale des connaissances de l'entraîneur D relatives au patinage

Interviewer :

Quels sont vos indices pour repérer un bon patineur ?

Entraîneur D :

Alors..euh...Son centre de gravité déjà, ce qu'on appelle « la balance », c'est à dire le retour de sa jambe. Tu vois un peu quand on patine ? Il y a la jambe qui pousse et la jambe qui est en appui. Cette jambe là quand on l'appelle la balance, c'est-à-dire que le centre de gravité doit être sous cette jambe là en fait. C'est des éléments qui au premier coup d'œil nous permettent de voir si le gamin quand il monte sur la glace, il a ça ou pas.

Interviewer :

Donc c'est le balancier du centre de gravité ?

Entraîneur D :

Voilà c'est ça, ce qu'on appelle la balance c'est cette espèce de ligne droite entre le poids du corps sur la jambe d'appui, c'est vraiment important.

L'ouverture des pieds aussi, c'est quelque chose d'important. Par exemple un enfant qui va avoir les patins qui rentrent vers l'intérieur ou qui penchent vers l'extérieur bien on sait que cela va être compliqué pour lui.

Interviewer :

Une ouverture des pieds à peu près de 45°, est-ce quelque chose que vous partagez ?

Entraîneur D :

Oui, oui, il faut une ouverture de pieds parce qu'on ne patine pas avec les pieds droits. Pour pouvoir exercer sa poussée il faut une ouverture de pieds. Moi je ne suis pas un scientifique de tout ça, tu vois ? Quand je donne l'apprentissage aux gamins je leurs dis pas, je leurs montre les choses. Je n'ai pas théorisé, voilà c'est ça, je n'ai pas théorisé. Mais oui, oui, il faut une ouverture de pieds. Une bonne ouverture de pieds c'est vraiment...

L'autre point aussi qui est important, c'est la stabilité de la cheville. Chez les tout-petits on le voit tout de suite, un garçon qui va mettre ses patins, boom ses pieds sont droits. C'est vraiment important. Ce gamin là va mettre moins de temps à apprendre que les autres. Si on voit que l'enfant a la cheville qui rentre vraiment vers l'intérieur, qui déforme ses patins tout de suite. Et bien pour l'apprentissage des techniques ce n'est pas forcément super facile.

Interviewer :

C'est une cheville assez souple ou c'est une cheville très gainée ?

Entraîneur D :

Généralement, ça vient, c'est là où je fais attention, c'est qu'il y a deux choses : on sait que les enfants sont laxes tout petit, il y en a certains qui sont déjà bien toniques mais la majorité sont quand même assez laxes. Et du coup, il faut faire attention aux patins, il ne faut pas prendre des patins, euh voilà, la plus haute qualité possible, faut juste faire attention que la cheville soit bien maintenue. Voilà, que la cheville soit bien maintenue parce que dans l'apprentissage des techniques, si le patin est droit on va pouvoir lui apprendre plus facilement à utiliser ses deux carres, c'est-à-dire, de passer... Alors tu vois comment elle est faite la lame ?

Interviewer :

Oui

Entraîneur D :

Alors tu vois, c'est affûté, on passe une meule qui passe au milieu de la lame, d'accord ? Et qui fait deux bords. Donc le bord, quand on parle de carre intérieure, c'est la carre qui est à l'intérieur du patin et extérieure, bah c'est la carre qui est à l'extérieur du patin. D'accord ?

Et ces deux carres là par exemple chez le hockeyeur, celui qui n'a pas eu de base, d'apprentissage du patin, il va très bien utiliser sa carre intérieure. Mais il est incapable ou c'est plus compliqué pour lui d'utiliser sans réfléchir sa carre extérieure. Donc du coup, ça fait partie de ces choses là tu vois ?

Un garçon qui va avoir une posture avec, quand il se met debout, il a les patins droits tout ça. Bien, il va pouvoir utiliser plus facilement sa carre intérieure et sa carre extérieure.

Il y a ça et puis après c'est l'équilibre aussi. Chez un tout petit, tu mets, on va prendre l'exemple, tu fais une séance d'essai et tu vas avoir 10 gamins de 4 ans avec toi et les 10 gamins on va dire qu'ils ne sont jamais montés sur la glace. Bah là au premier coup d'œil tu te dis : « lui il a déjà de la coordination, lui il a pas de coordination ». Et tu les vois, en 2 secondes qu'ils ne vont pas avoir besoin d'appui (chaise ou quelque chose comme ça), ils vont partir tout seul et il y en a d'autres cela va mettre beaucoup plus de temps. Soit, ils, naturellement ils n'ont pas la coordination, soit ils ont de l'appréhension...

Interviewer :

De la chute ?

Entraîneur D :

De la chute exactement, donc voilà il y a tout ce travail là à mettre en place puisque ça ne veut pas dire que le gamin qui appréhende et qui n'arrive pas à se déplacer au début ne sera pas un

bon patineur plus tard. C'est juste qu'il va mettre un tout petit plus de temps pour se rassurer et se mettre dans une situation de confort.

Interviewer :

Dans ces cas là, vous utilisez des chaises, des objets qui permettent un point d'appui ?

Entraîneur D :

Exactement, moi je pars du principe que le gamin qui vient doit repartir avec le sourire, c'est-à-dire que c'est la première accroche que l'on peut avoir. Sur les premières séances, c'est sûr et certain qu'on ne va pas parler de technique de patinage. On va juste leurs apprendre à se relever, tomber, se relever seul, avec une chaise, voilà c'est des choses comme ça, se déplacer avec une chaise, sans chaise. Voilà c'est des choses toutes simples. Déjà il y a un travail sur l'appréhension parce qu'on n'est pas tous égaux devant ça et sur le fait que voilà on ne va pas se faire mal, si on se fait mal il n'y a rien de grave. C'est sur cela qu'il faut faire attention chez les tout-petits.

Interviewer :

Pour les plus grands, parlez-vous aussi de position assise sur les patins avec des genoux fléchis ?

Entraîneur D :

Alors moi je suis, il faut – il faut pas, le problème c'est que la position assise j'ai un avis un petit peu différent de certains. C'est-à-dire que je demande aux joueurs : « t'es en position debout, tu as les jambes droites, et comme si tu allais tomber à genoux devant et tu retiens aller on va dire à 70°-65° » tu vois ? Du coup, tu as une position plus fléchie vers l'avant. Parce que la position assise, le problème de la position assise est que le centre de gravité va reculer, être vers l'arrière. Or moi je veux que l'on se propulse. Alors on va parler de biomécanique, l'objectif vers lequel on tend c'est que les joueurs puissent se propulser le mieux possible vers l'avant ou vers l'arrière. Or si ton poids du corps est dans le dos, derrière, en position avec le cul en arrière, et bien biomécaniquement, ce n'est pas l'idéal pour pouvoir patiner. Alors que si tu as ton poids du corps qui est vers l'avant, dans une position fléchie mais avec les genoux plus vers l'avant et avec une souplesse de cheville un peu plus importante. Bien ta propulsion, le fait d'aller vers l'avant va être beaucoup plus simple.

Interviewer :

Alors vous avez un centre de gravité qui est orienté vers l'avant et est sur un point d'appui ?

Entraîneur D :

Alors en fait moi l'idéal, je vais reprendre, je me lève [de sa chaise pour effectuer le mouvement]. L'idéal c'est que, quand tu fais une ligne droite, tes fesses doivent arriver dans les talons de tes patins. Le centre de gravité, tout ce qui est ton dos, doit être droit et penché vers l'avant, tes fesses doivent être à peu près sous tes talons et ce qui fait tu as un angle pieds-tibia qui doit être à peu près de 40° tu vois?

Sur la position de base on est sur les 2 jambes quand on démarre. Et après du coup, quand tu pousses à chaque fois tu restes dans cette position là sur ta jambe d'appui et tu ramènes sous tes fesses aussi. Du coup, tu pars. L'objectif qu'on essaie de mettre en place, c'est que très souvent nos gars quand ils poussent n'optimisent pas leurs poussées. Ils font ce que l'on appelle des « tombées de carres », c'est-à-dire qu'ils tombent sur leur jambe d'appui alors que nous ce que l'on veut c'est qu'ils puissent optimiser leurs poussées. C'est-à-dire qu'à chaque fois, ils partent comme un élastique, c'est-à-dire qu'à chaque fois on tend l'élastique et quand on le lâche l'élastique revient à sa position initiale et on retire l'élastique et c'est comme cela que l'on va drainer de la vitesse, de la glisse...

Interviewer :

Donc l'objectif c'est : on a cette position là, une jambe qui est en extension complète avec une extension de la cheville puis un retour qui ramène le patin et on alterne ?

Entraîneur D :

Qui revient sous les appuis.

Interviewer :

À la rigueur, à la hauteur de la jambe qui a servi de jambe d'appui et qui glisse ?

Entraîneur D :

Voilà, maintenant il y a différentes techniques notamment Julie Robitaille. Elle est allée de façon plus poussée dans cette technique là. Elle a développé sa technique. Mais si déjà on peut développer le fait de faire revenir sa jambe libre (celle qui n'est plus en contact avec la glace) le plus rapidement sous son centre de gravité, pliée : on a gagné un grand truc.

Interviewer :

Donc la jambe arrive un peu pliée à la hauteur de la première jambe d'appui. Il a les deux pieds en contact avec la glace et il transfère le poids du corps pour changer de jambe d'appui ?

Entraîneur D :

Exactement, avec une ouverture de hanche pour pouvoir se propulser dans la direction où il veut se déplacer.

Interviewer :

Donc il ouvre sa hanche, ça lui permet d'étendre sa jambe gauche si par exemple la jambe droite effectue le retour, il ouvre sa hanche pour décaler un peu le centre de gravité, passer sur l'autre jambe et pousser jambe gauche ?

Entraîneur D :

Exactement, on pourrait en parler des heures puisque je te dis, je suis trouve cela vraiment très intéressant.

Interviewer :

Du coup, après la glisse, vous la voyez comment ? Elle arrive à quel moment ? Elle est sur un pied, sur deux pieds ?

Entraîneur D :

Alors, en fait, l'idée c'est toujours de générer de la glisse. Nous ce que l'on n'utilise pas vraiment au hockey, parce que c'est 35-40 secondes d'effort. Du coup, on ne génère pas forcément la glisse, on n'utilise pas forcément la glisse puisqu'on y met beaucoup de fréquence. Mais on va dire dans le patinage pur, il faut utiliser la glisse que l'on crée. Cela nous permet de mettre une accélération. Donc l'objectif c'est quand même de pouvoir avoir toujours son pied d'appui en glisse.

Interviewer :

Donc la glisse se trouve sur le pied d'appui sur lequel on a posé le centre de gravité qui maintient la génération de la vitesse que l'on est en train de produire ? Il évite de freiner ?

Entraîneur D :

Voilà, exactement. Les patineurs de vitesse par exemple pour générer de la glisse, poussent (donc se propulsent avec leur jambe). La jambe qui revient sous les appuis va se poser carre extérieure pour revenir sur la carre intérieure pour repousser. C'est comme cela qu'ils génèrent de la glisse. Ils passent d'une carre à l'autre et ils repoussent sur la carre intérieure. Mais quand ils ramènent leurs jambes ils passent, ils arrivent, ils posent leur carre extérieure, cela génère de la glisse. Ce qui permet de repositionner leur hanche dans la bonne direction puis repassent sur la carre intérieure pour repousser derrière.

Interviewer :

La glisse n'est donc pas un phénomène passif ? C'est quelque chose d'actif ?

Entraîneur D :

Ouais, je pense que c'est actif et surtout encore plus au hockey puisque comme je t'ai dit on y met de la fréquence donc du coup les jambes sont quoi, aller je ne sais pas je n'ai pas les détails, mais c'est vraiment très court le moment où on garde l'appui sur notre jambe libre,

c'est vraiment très court. On va mettre beaucoup de fréquence. Du coup, on est toujours en activité.

Interviewer :

Que faites-vous des bras ?

Entraîneur D :

Alors, on ne s'était pas vraiment bien posé la question sur notre positionnement de bras. Alors, en marche avant, du coup j'en avais conscience avant mais le fait d'avoir vu Julie Robitaille nous expliquer sa technique de patinage. Elle dit qu'avec le travail des bras, c'est-à-dire un balancier de bras d'arrière vers l'avant en bras tendus, pas droits mais en diagonale : c'est-à-dire que quand tu pousses, tu as ton bras à l'opposé qui vient en arrière. Quand tu pousses, ta jambe droite pousse en arrière ton bras gauche est en arrière. Hop tu repousses et ton bras droit vient devant etc. Ton bras opposé à la poussée en fait est tendu. Elle dit que cela fait gagner entre 20 et 30% de vitesse.

Interviewer :

Par opposition à l'autre technique qui vise à avoir les bras qui balancent de gauche à droite quand on pousse ?

Entraîneur D :

Euh, en fait ce qu'il ne faut pas, et ce que l'on voit très souvent, ce sont des patineurs, tu vois on va prendre l'exemple des arbitres. Les arbitres ont un balancier de gauche à droite, ça, biomécaniquement ce n'est pas le plus pas le mieux pour se propulser vers l'avant. Et du coup ce balancier en avant et en diagonale dans la direction où l'on veut aller. Bien cela, ça crée de l'accélération.

Interviewer :

Dans le même esprit que le mouvement du sprinteur mais adapté au hockey ?

Entraîneur D :

Exactement. Sauf que le sprinteur travaille dans l'axe, nous on a notre poussée qui est latérale donc notre bras est un petit peu plus latéral mais vers l'avant quand même. Tu vois ? Ce n'est vraiment pas un truc perpendiculaire à notre déplacement. C'est vraiment, comment dire...

Interviewer :

Une ligne un peu décalée ?

Entraîneur D :

Exactement, et du coup ça c'est pour la marche avant. Nous ce que l'on peut voir c'est que nos garçons sont hypertendus. C'est-à-dire qu'ils vont avoir les bras pliés et près du corps.

Les poings vont monter vers le haut en direction de leur tête plutôt que vers l'avant. Dans cette technique là on recherche vraiment des bras tendus pour générer de la vitesse.

Interviewer :

Où va la crosse ?

Entraîneur D :

La crosse à une main, et toujours sur la glace. Il y a un bras qui est libre. Moi par exemple, je tiens ma crosse avec la main droite quand je joue à une main. Ma main droite par exemple va faire le même geste avec ma crosse sur la glace. Ma main gauche va travailler un peu plus et pour le coup qui va...

Interviewer :

Et du coup après il y a un changement de main sur la crosse?

Entraîneur D :

Après on passe à deux mains et après la main. Quand on passe à deux mains, c'est-à-dire, qu'on va recevoir un palet, recevoir une passe, mettre un shoot ou dribler, ma main libre vient se mettre en bas de la crosse.

Interviewer :

Et pendant cette phase, où on imagine que le hockeyeur est en train de démarrer pour aller vers l'avant, s'il tient sa crosse de la main droite, il l'a plutôt vers l'avant ?

Entraîneur D :

Voilà et l'idéal pour eux (Julie Robitaille et collègues), ils sont allés plus loin dans ce travail là : tant qu'il n'y a personne ou pas d'obstacle, il faut travailler à une main. Cela génère plus de vitesse. Alors que si on a deux mains, on va quand même avoir de la vitesse mais on va générer moins de vitesse en ayant sa crosse à deux mains qu'à une main.

Annexe 3. Extraits d'unités de sens utilisées pour déterminer des indicateurs de performance

Il s'agit ici de présenter des unités de sens retenues lors du codage des entretiens des entraîneurs. Ces dernières ont alimenté trois catégories principales (i.e., posture du hockeyeur, action des bras, cinématique des membres inférieurs). Nous précisons à l'intérieur de la dernière catégorie, plusieurs exemples spécifiques aux sous-catégories : démarrage, glisse, propulsion latérale et recouvrement.

Posture du hockeyeur :

Entraîneur A : « flexion des genoux »

Entraîneur B : « une flexion de jambe comprise entre 60° et 90° » ; « en fonction du profil des joueurs et leur morphologie » ; « assis sur les toilettes » ; « le buste en avant » ; « patins écartés à la largeur des épaules, jambes fléchies à 90°, position statique » ; « la crosse est tenue à deux mains avec les coudes décollés vers l'avant » ; « la tête haute qui regarde devant ».

Entraîneur C : « bonne flexion du genou pour utiliser au maximum la capacité propulsive des cuisses » ; « position du buste : le plus droit possible, légèrement penché vers l'avant avec une tête haute (pour un meilleur contrôle visuel) » ; « recherche de stabilité en abaissant le centre de gravité le plus bas possible : flexion de la jambe support ».

Entraîneur D : « le centre de gravité doit être sous la jambe qui est en appui » ; « une position plus fléchie vers l'avant » ; « poids du corps qui est vers l'avant » ; « les fesses doivent arriver dans les talons des patins ».

La « position de base » : « écartement des patins égal à celui des épaules » ; « flexion des genoux : le bout des pieds au même niveau que les genoux, entre le ½ et ¼ de squat » ; « deux mains sur la crosse » ; « le centre de gravité est plutôt vers l'avant pour favoriser le départ vers l'avant mais progressivement la projection du centre de gravité revient vers le centre » ; « projection des épaules au niveau de l'avant du patin et des fesses au niveau de l'arrière » ; « les points les plus importants à corriger : flexion des genoux, position de la tête ».

Entraîneur E : « le patin, le genou et l'épaule doivent être alignés dans le même axe ».

Entraîneur F : « flexion des genoux : abaisser le centre de gravité en évitant un mouvement de type piston » ; « tronc fixe » ; « position de base ou assise : genoux fléchis entre le ½ et ¼ squat, crosse à la bonne hauteur permettant de trouver cette position » ; « les épaules

légèrement en avant cherchant l'alignement avec les genoux et pointes de pieds » ; « buste gainé ».

Entraîneur G : « la jambe de support est fléchie à 90° » ; « la position de base : les genoux sont fléchis entre 45° et 90° entre ½ et ¼ squat » ; « les fesses sont au-dessus des talons » ; « les pieds sont écartés entre la largeur des épaules et celle du bassin ».

Entraîneur H : « genoux fléchis ».

Entraîneur I : « un bon patineur doit être bas ».

Entraîneur J : « la position de base au départ : les pieds sont écartés à la largeur des hanches, position à conserver au cours du patinage » ; « la position de départ : projeté en avant, flexion de chevilles, genoux, hanches » ; « la cheville vient toucher la languette du patin », « si on projette verticalement les genoux ils sont au niveau des orteils » ; « une position confortable au niveau des hanches » ; « le tronc, droit, est légèrement penché vers l'avant » ; « le tronc doit être gainé ».

Action des bras :

Entraîneur A : « les bras sont utilisés pour s'équilibrer » et « générateurs d'élan ».

Entraîneur B : « sans la possession du palet : les bras doivent accompagner d'avant en arrière et non latéral » ; « la crosse doit rester sur la glace et être tenue à une main pour ne pas limiter l'amplitude du mouvement » ; « avec le palet, la crosse devra être tenue à deux mains pour contrôler le palet, le conduire vers l'avant » ; « le coude légèrement fléchi » ; « l'extension complète du bras rend difficile la réception rapide du palet » ; « si la jambe droite pousse, le bras gauche est tendu » ; « il est également possible d'envisager bras droit tendu quand la jambe droite est tendue » ; « il faudrait vérifier lequel est le plus efficace ».

Entraîneur C : « faire une diagonale, pas devant directement, entre bras et membre inférieur propulseur controlatéral » ; « alignement bras gauche lorsque le membre inférieur droit propulse » ; « mouvement avec un balancier gauche-droite orienté vers l'avant » ; « avec palet : plus compliqué car le maniement ou la conduite de palet mobilise un bras » ; « sans palet : accompagne la propulsion, permet la projection vers l'avant ».

Entraîneur D : « ton bras opposé à la poussée en fait est tendu ».

Entraîneur F : « les bras vont d'avant en arrière et non de gauche à droite » ; « la coordination se fait dans le sens du mouvement » ; « le bras libre est en extension lorsque la jambe opposée est en extension » ; « une légère rotation du bras tenant la crosse permet de maintenir la crosse dans l'axe antéro-postérieur ».

Entraîneur G : « les bras se déplacent à l'amble : le bras droit se tend quand la jambe gauche pousse » ; « les déplacements des bras se font d'avant en arrière et non de gauche à droite ».

Entraîneur I : « les bras ont un rôle dans le maintien de l'équilibre mais la crosse ne doit pas servir de point d'appui ».

Entraîneur J : « les bras sont utilisés pour balancer d'avant-arrière plus que droite-gauche » ; « quand la main gauche est tendue la jambe droite est en extension et ainsi de suite » ; « on recherche l'extension complète des bras uniquement quand il n'y a pas de palets » ; « quand il y a un palet les deux mains tiennent la crosse » ; « quand le joueur n'est pas porteur du palet, on préconise de se déplacer avec la crosse à une main et en contact avec la glace » ; « quand le joueur est possesseur de palet : s'il n'y a pas d'adversaire direct : on peut prendre la crosse avec une main et pousser le palet avec le bras en extension » ; « s'il y a un adversaire : la crosse se tient à deux mains, manier le palet à deux mains pour avancer ou lancer » « la crosse à deux mains ne devrait pas constituer une entrave au maintien de la vitesse » ; « dans la réalité, la manipulation du palet devrait freiner légèrement le déplacement » ; « il est plus difficile de balancer les bras d'avant en arrière avec les deux mains ».

Cinématique des membres inférieurs :

Entraîneur J : « le bon patineur est dans le bon timing entre la pose du pied et la poussée de la deuxième jambe » ; « l'idéal est de pousser dès que le patin arrive ».

Démarrage :

Entraîneur B : « ouverture de patins : 90°, les pieds en canard » ; « trois poussées avec de la fréquence » ; « le joueur se penche vers l'avant » ; « réaliser plusieurs poussées en trois appuis très rapides » ; « la poussée ne peut pas être grande et glissée pour effectuer un démarrage efficace ».

Entraîneur G : « chercher à créer un déséquilibre avant en se penchant vers l'avant ».

Entraîneur H : « un démarrage rapide » ; « la position de base débute avec les pieds à 90° par rapport à l'axe de déplacement » ; « progressivement cette ouverture se ressert pendant que la longueur des foulées augmente ».

Glisse :

Entraîneur A : « le temps de glisse dure au maximum 1/3 du temps de déplacement ».

Entraîneur B : « la glisse est essentiellement sur un pied » ; « la morphologie et la puissance des joueurs vont influencer le temps de glisse » ; « influence de l'affûtage du patin : la lame est rectangulaire et l'affûtage va creuser l'écart entre les carres » ; « pour avoir beaucoup de glisse il faut avoir peu d'écart » [au-dessus de 5 selon l'entraîneur] ; « l'affûtage réduit permet d'affiner la technique de patinage » ; « les affûtages importants sollicitent les adducteurs avec excès ».

Entraîneur C : « difficile à quantifier : plus de 50% du temps de cycle » ; « le joueur ne perd pas de vitesse entre les 2 poussées » ; « conserver la vitesse créée par la phase de poussée » ; « difficulté à évaluer si la glisse la plus performante est sur la carre interne ou la lame complète ».

Entraîneur D : « pouvoir avoir toujours son pied d'appui en glisse ».

Entraîneur E : « pendant qu'une jambe effectue sa propulsion, l'autre reste en contact avec le sol » ; « le patin concerné doit se trouver dans l'axe de son épaule » ; « qualité essentielle » ; « optimiser le déplacement et la vitesse du joueur ».

Entraîneur F : « plus la poussée de la jambe propulsive est longue plus la glisse de l'autre patin est importante » ; « le temps de glisse détermine la vitesse : plus il est important plus on gagne de la vitesse ».

Entraîneur G : « la glisse se fait sur une jambe » ; « le temps passé à glisser ne doit pas entraîner une perte de vitesse » ; « initier la glisse sur la carre externe pour ensuite prendre appui sur la carre interne » ; « le joueur qui glisse correctement a une très grande portion de sa lame en contact avec la glace ».

Entraîneur I : « la glisse est tributaire de la poussée » ; « le patineur qui a une bonne glisse est à l'aise dans son transfert du poids du corps : le transfert est fluide ».

Entraîneur J : « la glisse est observée sur le pied support et sur le deuxième pied lors du recouvrement, quand il se met en place sous le corps » ; « la glisse sur deux patins immobiles servira pour feinter, mais n'interviendra pas dans la prise de vitesse » ; « la glisse ne crée pas de la vitesse mais est utilisée pour ne pas en perdre ».

Propulsion latérale :

Entraîneur A : « une poussée complète ».

Entraîneur B : « après les 3 premiers pas, l'ouverture du pied n'est plus à 90° par rapport à l'axe antéro-postérieur » ; « le pied pousseur va s'ouvrir et le patineur va devoir aller jusqu'à une extension complète de la cheville » ; « la lame pousse jusqu'au fouetté de cheville » ; « en

général les patineurs ne poussent qu'avec leurs cuisses sans finir le mouvement » ; « pour nos hockeyeurs, ils vont pousser et ramener vite le pied au lieu d'aller jusqu'à l'extension complète » ; « extension complète : alignement cheville-hanche-genou ».

Entraîneur C : « dans la ligne droite pour arriver à un angle d'environ 45° » ; « ouvrir les pieds » ; « chaque joueur a son ouverture spécifique » ; « extension finale : ligne droite hanche/genou/cheville/pied et orteils » ; « fin de la poussée sur le devant des orteils et majoritairement sur le gros orteil » ; « poussée vers l'intérieur du patin » ; « l'utilisation de la carre interne est importante ».

Entraîneur E : « la propulsion s'obtient grâce au mouvement alternatif des jambes sur le coté » ; « pour être efficace, la jambe qui effectue une propulsion doit terminer son action de poussée latérale jusqu'à son extension complète » ; « l'amplitude de poussée externe doit se faire jusqu'à la pointe avant du patin avec en finition, un « pincement » du gros orteil » ; « la poussée doit se faire latéralement : éviter une poussée trop arrière, type trotinette ».

Entraîneur F : « extension complète en fin de poussée : hanche/genou/cheville » ; « une bonne extension des orteils se traduit par un craquement des orteils ».

Entraîneur G : « la poussée de la jambe externe doit être complète, ce qui se traduit par un alignement cheville-genou-hanche » ; « l'ouverture des pieds est spécifique à chacun cependant une moyenne de 45° d'angle entre l'axe antéro-postérieur et l'orientation de la lame semble acceptable ».

Entraîneur H : « extension complète des membres inférieurs ».

Entraîneur I : « poussée latérale ce qui nécessite une ouverture de pied suffisante » ; « environ 45° » ; « une extension complète hanche-genou-cheville sur des poussées longues » ; « sur de poussées plus courtes, le mouvement se termine également sur l'avant du pied mais le fouetté avant du pied tend à disparaître » ; « la poussée résulte également d'une extension complète du membre inférieur mais ne va pas jusqu'à l'extension des orteils ».

Entraîneur J : « à la fin de la poussée, on retrouve une extension complète genou-cheville-hanche avec le « craquement des orteils » » ; « la majeure partie des enfants patine sur l'avant du pied et ne se servent que des 3/4 de la lame au lieu de l'ensemble de la lame » ; « la carre intérieure est la carre de poussée » ; « être capable d'utiliser la carre extérieure ou la carre intérieure du patin » ; « on va plus vite sur la carre intérieure ».

Recouvrement :

Entraîneur B : « école canadienne : écartement correspondant à la largeur d'épaule » ; « école finlandaise : ramené au-delà de l'axe du premier patin, le patin passe devant afin d'être sur la carre extérieure permettant une deuxième poussée » ; « le trajet du pied se fait suivant l'axe du corps » ; « dessine un léger arc de cercle entre la poussée et le recouvrement » ; « lorsqu'on repose le pied, il est dans l'axe de la glisse » ; « la lame orientée vers la direction souhaitée ».

Entraîneur C : « amener le plus vite possible le pied dans une « position de base » pour pouvoir faire un transfert de poids et amorcer une nouvelle phase de poussée » ; « le parcours du patin : en ligne droite le plus vite possible ou courbe avec une rotation de la hanche permettant le retour du patin dans l'axe ».

Entraîneur E : « le retour du pied à côté de l'autre s'effectue par un mouvement semi-circulaire vers l'arrière avec la pointe du pied orientée vers le bas » ; « comme si l'on voulait tracer un demi cercle au sol ».

Entraîneur F : « débute en fin de poussée après l'extension » ; « le patin revient 30 à 40 cm au-dessus de la glace » ; « quand le joueur effectue un retour lent, il est amené à faire une faute de carre (« à plat ») au lieu d'être sur la carre interne de son pied de glisse » ; « le pied doit venir chercher sous le poids du corps » ; « réduire la durée des recouvrements de patins ». « un point de discorde sur le retour du patin : les patineurs de vitesse utilisent à la fin du retour la carre externe du patin puis ensuite se mettent sur la carre interne du patin avant d'initier la poussée » ; « une partie des entraîneurs se retrouvent dans cet élément spécifique du retour, mais pour le reste des entraîneurs cette réalisation technique pourrait ne pas convenir à un hockeyeur » ; « ce passage sur la carre externe pourrait réduire la possibilité d'augmenter la fréquence de patinage » ; « cet élément pourrait également modifier la régulation de l'équilibre puisque le joueur en réalisant ce passage sur la carre externe va transférer son poids au-delà de l'axe médian du corps ».

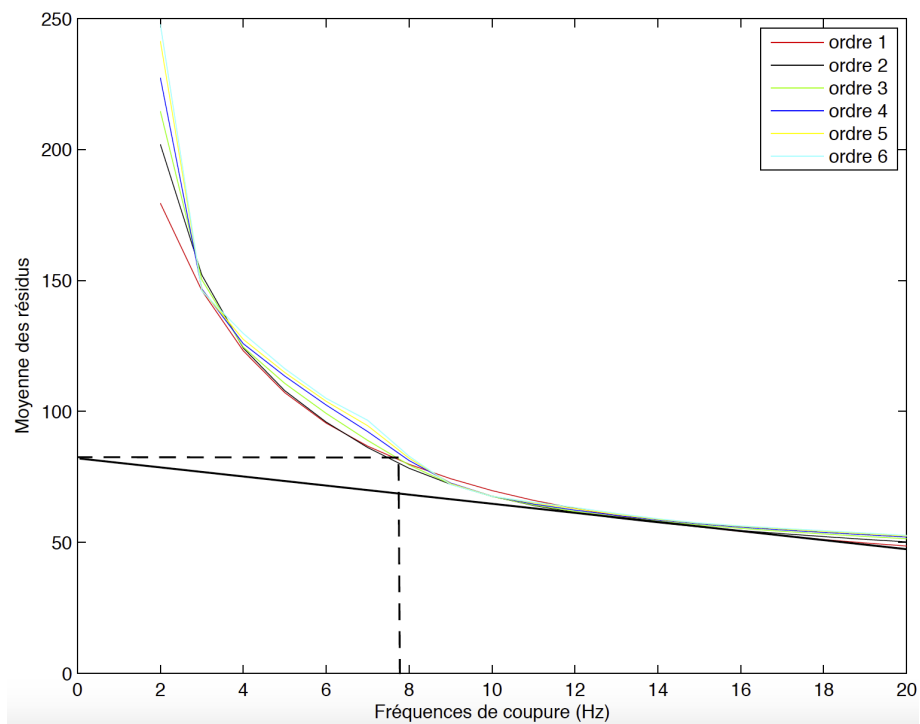
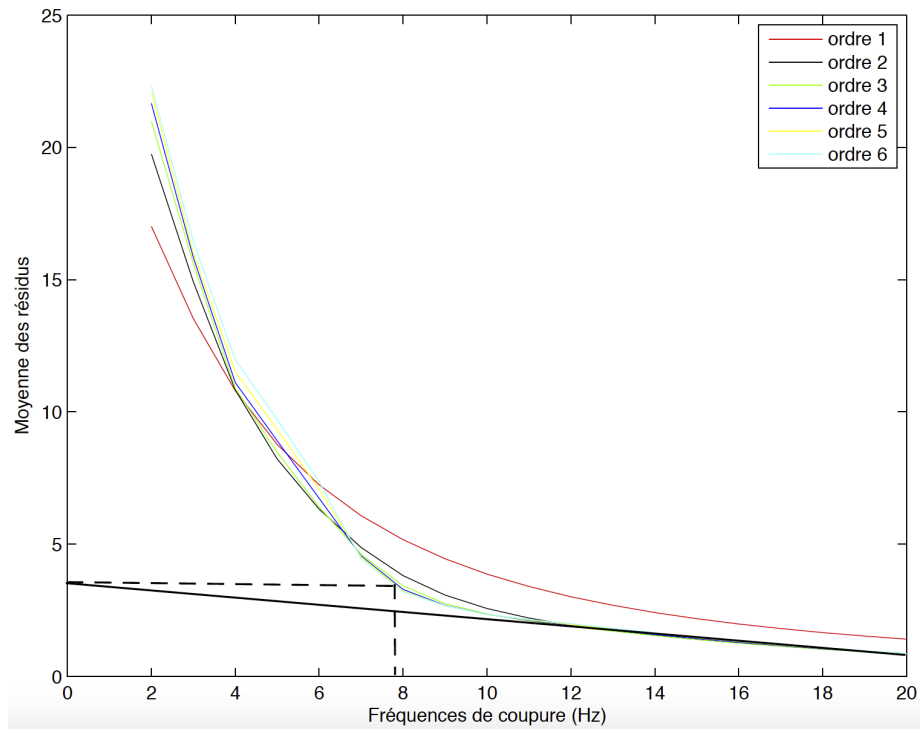
Entraîneur G : « le retour se fait sous le CdG à l'intérieur de la largeur des épaules afin de pouvoir réaliser une deuxième poussée » ; « l'amplitude du ramené de jambe influence la vitesse de déplacement : plus l'amplitude est grande plus le joueur va vite ».

Entraîneur I : « chercher à reposer le patin sous le corps » ; « polémique sur le retour du pied provenant de l'analyse des patineurs de vitesse : ils reviennent très loin mais ont des poussées très longues et font de longues distances » ; « pour le patineur de hockey, il n'est pas si fréquent que le patin revienne sous le poids du corps » ; « par moment le pied est passé en

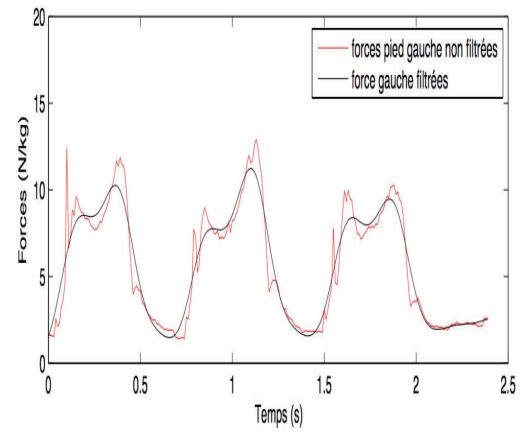
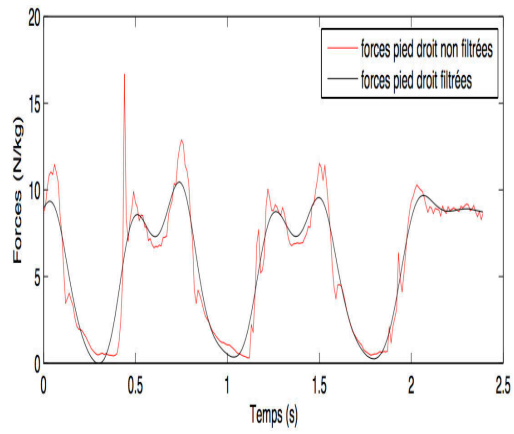
dehors de la projection du CdG » ; « le patin va être placé entre la hanche et l'axe de déplacement si on regarde le mouvement du haut » ; « un retour rapide, pied sous le bassin » ; « ramener le pied au plus près de la surface ».

Entraîneur J : « ramener le patin à la position initiale pour pouvoir pousser de l'autre côté ».

Annexe 4. Analyse des résidus concernant le signal des accéléromètres de la centrale inertielle en haut puis des foot plantar pressure sensors en bas



Annexe 5. Effet du filtre sur le signal des semelles Tekscan



Annexe 6. Tableaux récapitulatifs des Index de Symétrie par sujets et conditions

Tableau récapitulatif des SI par sujet en condition départ arrêté sans crosse

Pratique	Poste	SI_Durée du cycle	SI_Fréquence	SI_IdC	SI_Glisse	SI_Propulsion	SI_Retour	SI_Poussée
Junior	Attaquant	0,29	-0,29	-10,47	14,56	-30,43	2,10	6,21
Junior	Attaquant	-5,27	5,27	-7,64	-10,91	12,47	-0,74	17,32
Junior	Attaquant	-1,90	1,90	13,68	-7,43	-12,59	27,41	4,87
Expert	Attaquant	-0,55	0,55	-17,83	-12,04	8,65	5,01	1,35
Expert	Défenseur	0,70	-0,70	8,61	-4,06	-3,00	5,87	2,00
Junior	Défenseur	-2,29	2,29	12,97	-6,99	-3,53	14,25	16,57
Junior	Défenseur	0,23	-0,23	-18,70	-9,39	20,21	-9,33	-18,69
Junior	Attaquant	-6,49	6,49	-9,33	-18,95	14,90	15,02	25,01
Junior	Défenseur	-3,15	3,15	23,14	-9,36	-8,66	12,56	-34,51
Expert	Attaquant	-0,78	0,78	-26,32	2,42	17,42	-21,42	-12,53
Junior	Défenseur	1,94	-1,94	-4,40	-0,69	11,85	-8,00	-5,15
Expert	Défenseur	3,89	-3,89	12,01	14,88	-10,45	-2,30	-0,74
Expert	Attaquant	-1,57	1,57	5,76	-2,55	-9,59	12,63	-1,83
Expert	Attaquant	-0,91	0,91	-42,31	-11,48	7,85	4,21	10,37
Expert	Défenseur	-1,65	1,65	-2,46	-8,08	4,15	1,69	-36,01
Expert	Défenseur	5,97	-5,97	23,41	7,40	-10,57	4,75	3,56
Expert	Défenseur	-3,57	3,57	-4,00	-8,72	1,12	10,33	1,89
Expert	Attaquant	-1,16	1,16	-1,30	-5,64	0,67	8,33	14,57

Tableau récapitulatif des SI par sujet en condition départ arrêté avec crosse

Sujet	Pratique	Poste	SI_Durée du cycle	SI fréquence	SI IdC	SI_Glisse	SI_Propulsion	SI_Retour	SI_Poussée
1	Junior	Attaquant	3,27	-3,27	-7,30	13,40	-20,62	1,51	-3,68
2	Junior	Attaquant	-0,48	0,48	-9,33	-7,50	8,68	0,20	11,28
3	Junior	Attaquant	-3,86	3,86	-12,57	-15,09	13,22	6,27	2,18
4	Expert	Attaquant	-1,57	1,57	-19,58	-10,92	7,80	3,70	-1,02
5	Expert	Défenseur	4,17	-4,17	5,40	0,18	-5,40	7,32	4,18
6	Junior	Défenseur	0,22	-0,22	27,66	-2,44	-10,30	18,91	26,19
7	Junior	Défenseur	1,01	-1,01	-23,84	-3,16	23,80	-19,73	-23,31
8	Junior	Attaquant	-5,70	5,70	-26,39	-5,86	13,48	-5,46	29,55
9	Junior	Défenseur	-2,33	2,33	18,52	-7,19	-7,04	13,63	-33,33
10	Expert	Attaquant	-1,06	1,06	-23,03	-2,49	15,76	-10,42	-12,44
11	Junior	Défenseur	7,18	-7,18	-4,83	10,98	-13,82	0,34	-5,39
12	Expert	Défenseur	1,84	-1,84	1,22	8,50	-0,71	-8,20	1,83
13	Expert	Attaquant	1,34	-1,34	-12,17	1,29	-7,41	7,06	-3,58
14	Expert	Attaquant	0,00	0,00	-11,29	-11,62	2,54	18,29	10,54
15	Expert	Défenseur	-5,39	5,39	-16,22	-11,23	8,11	-0,17	-41,34
16	Expert	Défenseur	3,31	-3,31	2,78	7,55	-9,37	-3,62	5,75
17	Expert	Défenseur	-3,24	3,24	-10,66	-10,65	-1,62	18,77	4,27
18	Expert	Attaquant	-6,95	6,95	-15,37	-4,29	9,31	1,87	14,39

Tableau récapitulatif des SI par sujet en condition départ lancé avec crosse

Sujet	Pratique	Poste	SI_Durée du cycle	SI fréquence	SI_IdC	SI_Glisse	SI_Propulsion	SI_Retour	SI_Poussée
1	Junior	Attaquant	-1,56	1,56	-46,49	-3,52	34,72	-32,06	3,05
2	Junior	Attaquant	0,28	-0,28	-11,69	3,70	-3,20	-8,09	4,50
3	Junior	Attaquant	-0,34	0,34	27,25	-8,67	-18,20	36,45	-0,79
4	Expert	Attaquant	-5,59	5,59	3,94	-11,20	5,69	11,62	-17,13
5	Expert	Défenseur	1,60	-1,60	2,07	-4,11	-8,37	15,19	5,32
6	Junior	Défenseur	-3,18	3,18	34,51	-6,55	-10,66	25,86	26,47
7	Junior	Défenseur	-2,57	2,57	-14,76	-0,87	18,72	-16,84	-36,15
8	Junior	Attaquant	1,97	-1,97	-14,95	0,80	10,82	-13,94	24,02
9	Junior	Défenseur	-0,37	0,37	15,53	1,16	-9,88	5,71	-66,03
10	Expert	Attaquant	-0,21	0,21	-33,76	7,22	11,01	-25,86	-13,51
11	Junior	Défenseur	1,67	-1,67	16,88	-3,67	-11,68	20,06	-1,21
12	Expert	Défenseur	-1,06	1,06	-1,63	3,15	-4,41	-1,15	7,15
13	Expert	Attaquant	-2,76	2,76	-14,75	2,82	2,86	-9,84	-4,05
14	Expert	Attaquant	0,44	-0,44	8,46	-4,77	-6,05	29,50	-6,77
15	Expert	Défenseur	0,69	-0,69	37,23	-8,70	5,25	6,53	-35,23
16	Expert	Défenseur	-3,79	3,79	20,92	4,48	-13,87	7,19	8,53
17	Expert	Défenseur	-3,19	3,19	-0,98	-6,64	4,92	4,39	2,88
18	Expert	Attaquant	0,71	-0,71	-17,48	5,01	-6,06	-2,46	23,92

Tableau récapitulatif des SI par sujet en condition départ lancé avec palet

Sujet	Pratique	Poste	SI_Durée du cycle	SI fréquence	SI_IdC	SI_Glisse	SI_Propulsion	SI_Retour	SI_Poussée
1	Junior	Attaquant	-4,88	4,88	-3,86	4,88	2,10	5,51	-2,10
2	Junior	Attaquant	-1,39	1,39	17,11	-8,14	-0,74	-8,56	6,73
3	Junior	Attaquant	7,53	-7,53	-52,67	7,20	27,41	-3,69	-8,82
4	Expert	Attaquant	-0,57	0,57	10,35	-13,03	5,01	6,09	-12,17
5	Expert	Défenseur	-5,12	5,12	19,17	-11,47	5,87	-0,26	-3,48
6	Junior	Défenseur	-0,39	0,39	19,51	10,45	14,25	-20,79	19,95
7	Junior	Défenseur	-4,40	4,40	-54,71	-10,38	-9,33	-15,28	-22,88
8	Junior	Attaquant	0,91	-0,91	24,60	2,74	15,02	6,77	12,41
9	Junior	Défenseur	-2,68	2,68	-28,19	13,92	12,56	-40,32	-10,12
10	Expert	Attaquant	2,29	-2,29	-33,09	9,29	-21,42	-28,34	-18,38
11	Junior	Défenseur	4,56	-4,56	-9,21	12,17	-8,00	-8,87	-3,78
12	Expert	Défenseur	-0,95	0,95	-34,84	23,56	-2,30	-14,85	3,06
13	Expert	Attaquant	-1,34	1,34	4,91	-3,73	12,63	0,40	-9,45
14	Expert	Attaquant	-0,76	0,76	6,59	-5,60	4,21	26,54	-7,82
15	Expert	Défenseur	0,41	-0,41	23,48	0,61	1,69	6,75	-27,96
16	Expert	Défenseur	-2,52	2,52	-0,63	-3,10	4,75	7,98	-4,05
17	Expert	Défenseur	-0,17	0,17	-13,92	-2,28	10,33	-3,85	-2,50
18	Expert	Attaquant	-11,46	11,46	-13,05	30,96	8,33	12,08	20,96

**EXPERTISE EN PATINAGE EN HOCKEY SUR GLACE :
EFFET DES CONTRAINTES DE TÂCHE**

Nos recherches s'inscrivent dans le cadre théorique Ecological Dynamics du contrôle moteur, considérant que le comportement moteur, en l'occurrence celui d'un hockeyeur sur glace, émerge, persiste et se réorganise en fonction des interactions de l'individu avec un ensemble de contraintes liées à l'organisme, à la tâche et à l'environnement. À partir de ce cadre théorique, nous explorons les indices permettant de rendre compte de l'adaptation motrice du hockeyeur à diverses contraintes lors du patinage afin d'analyser l'expertise. À ce titre, nous avons conduit nos recherches en deux temps : i) une analyse qualitative d'entretiens semi-directifs, et ii) une analyse des paramètres superficiels (cinématique et cinétique) et profonds (coordination) du mouvement de patinage avant.

À travers l'analyse de dix entretiens d'entraîneurs experts, nous avons observé que les entraîneurs faisaient appel à des connaissances « opératives » (Falzon, 1991) organisées en trois catégories (la posture du hockeyeur, l'action des bras, la cinématique des membres inférieurs). Cette étude nous a permis d'enrichir la connaissance des indicateurs de performance du patinage expert et de guider la conception d'un protocole expérimental représentatif du contexte écologique de pratique.

La seconde partie du travail consiste en une analyse du mouvement (paramètres cinématiques et cinétiques) et de la coordination des membres inférieurs sous l'effet de manipulation de contraintes de tâche lors d'un sprint sur 20m. Les résultats révèlent une forte stabilité du pattern expert au niveau de l'ensemble des paramètres superficiels, ainsi qu'un mode de coordination en rattrapé, et une symétrie entre les deux membres inférieurs lorsque l'activité du joueur n'est pas contrainte par la mobilisation du palet. La conduite du palet induit une flexibilité du comportement caractéristique de l'adaptabilité de l'expert face aux contraintes de tâche.

Mots-clés : Expertise, patinage en hockey sur glace, adaptabilité, variabilité, Ecological Dynamics

**FORWARD ICE-HOCKEY SKATING EXPERTISE :
EFFECT OF TASK CONSTRAINTS MANIPULATION**

Based on the theoretical framework of Ecological Dynamics, the aim of this PhD thesis is to analyse the motor behaviour of expert ice-hockey players in relation to a set of interacting constraints (organismic, task and environment). Based on this theoretical framework, our research investigates the performance indicators in order to understand how ice-hockey expert players' behaviour emerges, persists and is reorganised when the individuals interacts with a set of constraints. We conducted our work in two stages: i) a qualitative research analysing semi-structured interviews of ice-hockey expert coaches and ii) a biomechanics analysis of forward skating.

Analysing 10 ice-hockey expert coaches interviews reveals that coaches used 'operative knowledge' (Falzon, 1991) organized into three main categories (arm movement, lower limb kinematics and posture). This study allowed us to improve our understanding of performance indicators of expert forward skating. It also helped us to design a more representative biomechanics research protocol of forward skating.

The second part of this thesis consists of an analysis of low-order (movement from kinematics and kinetics) and high-order (coordination) parameters under task constraints manipulation during 20m forward sprints. Our results showed a strong stability of forward skating pattern at the low-order parameters scale as well as a stable catch-up coordination between the two feet and a stable symmetry in the lower limbs movement coordination when expert player weren't under puck dribbling situation. When they had to run with the puck, experts' behaviour revealed a significative variability in skating pattern organisation suggesting flexibility of experts' behaviour in order to improve their adaptability to tasks constraints.

Keywords: Expertise, qualitative research, skating biomechanics, variability, Ecological Dynamics