



HAL
open science

Équilibre entre contraintes biomécaniques et capacités musculaires : exploration innovante en hockey sur glace

Jérôme Perez

► **To cite this version:**

Jérôme Perez. Équilibre entre contraintes biomécaniques et capacités musculaires : exploration innovante en hockey sur glace. Physiologie [q-bio.TO]. Université Paris Cité, 2021. Français. NNT : 2021UNIP5263 . tel-04343260

HAL Id: tel-04343260

<https://theses.hal.science/tel-04343260v1>

Submitted on 13 Dec 2023

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.

École doctorale 566 : Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain
Laboratoire Sport, Expertise et Performance – EA 7370

Équilibre entre contraintes biomécaniques et capacités musculaires : exploration innovante en hockey sur glace

Par Jérôme PEREZ

Thèse de doctorat en Sciences du Sport

Dirigée par Gaël Guilhem et co-encadrée par Franck Brocherie

Présentée et soutenue publiquement le 05 Juillet 2021

Devant un jury composé de :

Rapporteurs

Guillaume Millet, Professeur des universités, Université Jean-Monnet de Saint-Étienne

Frédérique Hintzy, Maître de Conférences HDR, Université Savoie Mont-Blanc

Examineurs

Matthew Ronald Spencer, Professor, University of Agder, Norvège

Pierre Samozino, Maître de Conférences, Université Savoie Mont-Blanc

Pascale Duché, Professeur des universités, Université de Toulon

Directeur de thèse

Gaël Guilhem, Chercheur HDR, Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance

Co-encadrant

Franck Brocherie, Chercheur, Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance

Référent scientifique au sein de l'entreprise

Jacques Vettraino, Directeur de l'Institut National de Formation, Fédération Française de hockey sur glace

« Nous avons besoin d'une méthode de connaissance qui traduise la complexité du réel, reconnaisse l'existence des êtres, approche le mystère des choses »

Edgar Morin

REMERCIEMENTS

L'ensemble des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit a été réalisé au Laboratoire Sport, Expertise et Performance EA 7370, de l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) ainsi qu'au sein de la Fédération Française de hockey sur glace (FFHG). Il était très difficile pour moi d'écrire seul ces remerciements tant cette thèse aura été le fruit d'un travail collectif et collaboratif à différents niveaux. Intégrer alors à ce manuscrit une préface donnant la parole à ceux qui ont œuvré au quotidien pour l'optimisation de la performance de cette thèse était donc pour moi primordial.

Merci bien évidemment à **Gaël Guilhem & Franck Brocherie** qui ont initié ce projet et encadré ce travail de thèse. Qui de mieux que ces deux chercheurs, purs produits du hockey sur glace français, pour mener à bien ce match avec un « hockey spirit ». Deux joueurs à la fois singuliers et complémentaires qui m'ont permis de toujours me dépasser à l'aide d'échanges quelques fois très déroutants mais toujours constructifs. Merci pour votre rigueur sans faille qu'il est toujours bon de garder dans un environnement sans cesse changeant.

Je tiens également à remercier **Dr. Frédérique Hintzy** et **Pr. Guillaume Millet** pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail, ainsi que l'ensemble des examinateurs et invités de mon jury, **Pr. Pascale Duché**, **Pr. Matthew Spencer**, **Dr. Pierre Samozino** et **Jacques Vettraino**, pour m'offrir l'opportunité d'échanger avec chacun d'entre vous. Vos différentes expertises me permettront ainsi d'enrichir mes réflexions.

Un grand merci à la Fédération Française de hockey sur glace par l'intermédiaire de ses DTNs avec tout d'abord **Gérald Guennelon**, à l'initiative de ce projet, puis au relais sans faille de **Christine Duchamp**. Merci Christine de m'avoir très rapidement fait confiance et de m'avoir intégré pleinement dans le projet de performance fédéral au sein de l'encadrement de la DTN. J'ai forcément une pensée particulière envers mes quatre mousquetaires **Emmanuel**, **Grégory**, **Sébastien** et **Jean-Baptiste** avec qui j'ai toujours et encore échangé et débattu afin de mettre à disposition notre passion au service du projet de performance féminin. Ce projet ne serait évidemment pas grand-chose sans l'ensemble des ces **athlètes de haut-niveau**, fantastiques Femmes, qui façonnent leurs vies au grès de leur passion et leur rêve olympique : un grand bravo à vous toutes et surtout un grand merci pour toutes ces émotions vécues. Je n'oublierai pas non plus l'ensemble du **personnel administratif et sportif** de la fédération avec lesquels j'ai partagé (avant ce fichu virus) des repas bien animés mais ô combien rafraichissants. Enfin, je souhaiterais également avoir une pensée pour mes collègues **préparateurs physiques** au sein

des différents clubs ou équipes de France avec lesquels j'ai pu longuement échanger sur l'évolution de notre pratique.

Comment ne pas remercier l'ensemble des **membres du laboratoires SEP**, chercheurs et personnels administratifs, pour votre aide logistique, technique mais également nos nombreux échanges passionnants. Je garderai toujours en mémoire l'ensemble de mes collègues et surtout **amis du rez de jardin**, cet endroit si proluxe où il fait toujours bon prendre un café ou un petit-déjeuner. Mes passages n'étaient que brefs et furtifs mais toujours très agréables auprès de vous tous.

Un message également pour **mes amis plus proches et plus lointains, kinés, nantais ou fougerais**, je suis parti dans mes folies encore une fois mais promis je vais essayer de me calmer afin de pouvoir profiter à nouveau un peu plus de chacun d'entre vous.

Je ne pouvais finir ces remerciements sans une attention particulière à **ma famille** et **ma belle-famille** qui m'ont toujours soutenu, aidé et même hébergé dans ces périodes faites de grandes joies et de quelques moments de doutes. Enfin, tout cela n'aurait pas été possible sans ton aide et ton soutien infailible **Marion**. Les choses n'ont pas toujours été simples pour toi mais j'aimerais que l'on retienne ensemble les grands moments qui ont fortement pimenté cette thèse avec notamment l'arrivée de **Joan**. Pour toi, pour vous, pour nous...

PRÉFACE



« Le hockey sur glace, comme toute discipline, présente de grandes innovations (usage des statistiques, de la vidéo en outrance, un développement technologique du matériel...) mais aussi quelques « certitudes » basés sur des connaissances, des valeurs d'un temps passé. L'œil de maquignon d'un entraîneur est à la fois sa plus grande force mais peut aussi être sa plus grande faiblesse..., puisqu'il pousse à porter un jugement parfois très (et trop) rapide et sûr à propos de la qualité recherchée d'une performance, d'une athlète, sans qu'aucun moyen externe, dédié à objectiver ou fiabiliser le jugement, ne soit utilisé.

En tant que chef d'orchestre de l'ensemble des personnes travaillant au sein du projet du hockey sur glace féminin, mon intention a toujours été de donner du sens, de la valeur mais aussi et surtout de l'objectivité à nos actions, à nos choix. Tel un enfant, nous avons par moment balbutié, tâtonné, fait de nombreuses erreurs. Celles-ci nous ont fait avancer pour que le développement de chaque joueuse, au sein d'une performance collective, soit mis au centre des considérations de l'ensemble des acteurs du projet.

L'accompagnement scientifique de l'INSEP, la présence au quotidien de Jérôme Perez parfait homme caméléon entre la blouse blanche et le survêtement, a été un catalyseur de cette démarche.

En effet, cette thèse nous a collectivement conduit à travailler avec exigence, sur un projet de performance en ciblant chaque domaine, chaque détail qui pouvaient être amélioré pour faire la différence entre les Olympiens et les autres équipes, entre un projet de haute performance et un projet de sport de bon niveau. »

COLLIOT Emmanuel, Manager des équipes de France féminines de hockey sur glace

« Dans le domaine du sport de Haut-Niveau, la performance se veut multifactorielle. Comment les différents acteurs (entraîneurs, staff, athlètes) mettent réellement tout en place, quel est le rôle de chacun, comment s'articulent les inter connexions pour mener à la réussite du projet

En Hockey sur glace, discipline collective et rapide, en compétition la décision individuelle et le mouvement collectif doivent inter agir à haute intensité. Dans l'instant d'un Championnat du Monde et ou des Jeux Olympiques, quels paramètres faut-il observer pour gagner ?

L'entraînement doit être un outil pour l'expérience individuelle et collective.

Le développement des qualités mentales, et sociales est tout aussi important que le technico tactique ou le physique, pour autant le préparateur physique externe ne suffit plus. Cependant le Hockey est dans une genèse concernant cette recherche et concernant la mise en forme (data) et le traitement des indices (outils) permettant d'agir. Rendre objectif les pensées et les sensations des coachs, des joueuses par la suite, voici le défi du Hockey sur glace.

L'arrivée de Jérôme dans le projet Equipe de France Féminine en 2017-18 a permis de faire me réfléchir sur le rôle des différents acteurs sur ces paramètres. Ainsi l'équipe de France va se présenter en 2021 à la qualification olympique avec un niveau de structuration jamais atteint

La gestion des blessures, la préparation, la charge, la récupération, nous avons des données sur des paramètres permettant de prendre ensuite les meilleures décisions

Son professionnalisme, sa motivation et son expertise ont favoriser l'émergence de l'inter connexion entre les acteurs. Il a innové en amenant des données objectives pour améliorer le suivi des joueuses dans la compétition et l'entraînement.

Le hockey sur glace est dans cette phase de progression et le futur passe par une certaine acceptation de tous. La recherche scientifique mené par Jérôme va permettre à notre discipline de progresser à plusieurs niveaux : le développement des jeunes talents (structures Pôle Espoir et Pôle France), le haut niveau (équipes de France) et la formation des entraîneurs »



TARLE Grégory, Entraîneur principal équipe de France féminine de hockey sur glace



« Lorsque nous avons défini le projet du Pôle France, nous souhaitions que les Joueuses soient placées au centre de leur développement. Pour y parvenir, nous devons prendre en compte l'ensemble des champs de la performance et permettre aux joueuses d'intégrer l'ensemble des paramètres qui leurs permettront de grandir et d'atteindre leurs objectifs.

Cette thèse nous a permis d'apporter des données scientifiques, en face de sensations et des observations d'un entraîneur expérimenté. Elle nous a aussi donné l'opportunité de nous ouvrir à diverse sources d'informations, par l'intermédiaire du laboratoire SEP de l'INSEP. Mais elle nous permet aussi de préparer l'avenir, en considérant de nouvelles perspectives de développements de l'athlète et de leurs performances.

Sur un plan plus personnel, je me considère chanceux de pouvoir collaborer au quotidien avec deux personnes passionnées et passionnantes. Aujourd'hui, lorsque je regarde le staff du Pôle France, je trouve qu'il représente la parfaite combinaison de la science, de l'expérience, de la coordination et de la coopération. »

CHAUVIN Jean-Baptiste, Manager du pôle France féminin de hockey sur glace

« Dans un projet de développement de haut niveau, l'athlète doit être au centre des préoccupations.

L'évolution de notre sport rend obligatoire la multiplicité et la spécificité des différents acteurs du projet dans les différents domaines aidant à la performance. Dans un tel projet, l'entraîneur ne peut et ne doit plus être tout seul. L'objectif de cette équipe doit être la volonté de créer un lien entre les différentes spécialités dans le but de rendre les échanges transversaux, adaptés et donc uniques pour chaque athlète.

Ces liens doivent être construits et entretenus en additionnant les expériences de chacun, mais également en mettant en place une méthode d'évaluation objective des principes et des différentes dimensions dans l'entraînement. Cela, dans l'unique but qui est de prioriser les différents axes de développement dans une planification individualisée pour l'athlète tout au long de son développement et de sa progression. Toutefois, cette planification doit être échangée avec l'athlète en le questionnant sur son ressenti et en partageant les différents objectifs, dans le but de le faire adhérer et de le responsabiliser au maximum pour maintenir un niveau de motivation. Cette démarche est d'autant plus difficile et novatrice dans notre sport collectif.

L'expertise, la méthodologie, ainsi que le caractère très humain de Jérôme a permis de contribuer à une grande avancée de notre discipline, aussi bien dans la redéfinition de l'action du préparateur physique dans un projet de haut niveau, que dans l'amélioration des analyses des différentes méthodes d'entraînement dans la planification.

Enfin, les échanges constants et passionnés m'ont permis d'accentuer et de conforter mon savoir-faire dans la méthodologie de l'entraînement et dans l'accompagnement des athlètes dans leurs objectifs.

Ce projet permettra à notre discipline la mise en place de nouveaux outils permettant d'approfondir l'accompagnement et la responsabilisation des athlètes et de rendre plus efficaces les différentes formes d'entraînements. »

ROUJON Sébastien, Entraîneur-adjoint équipe de France féminine sénior & Entraîneur du pôle France féminin de hockey sur glace



CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS SUIVANTES :

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. (2019). Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomechanics*, 1-15.

Perez J., Guilhem G., Hager R. & Brocherie F. (2020). Mechanical determinants of forward skating sprint inferred from off- and on-ice force-velocity evaluations in elite female ice hockey players. *European Journal of Sport Science*, 1-12.

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods. *Journal of Strength and Conditioning Research*. **In revision.**

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. Truncated estimation of skating force-velocity profiling when using high-speed video-based methods compared to radar-derived processing. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Biomechanics*. **Under review.**

Perez J., Brocherie F., Couturier A. & Guilhem G. International matches elicits stable mechanical workload in high-level female ice hockey. *Biology of Sport*. **Under review.**

Communications dans des congrès internationaux avec actes

Perez J., Brocherie F., & Guilhem G. (2020) Mechanical demand using Player Load elicited by a congested schedule in elite female ice hockey. *25th Annual Congress of the European College of Sport Science*. Virtual Congress, October.

Perez J., Brocherie F., Hager R., & Guilhem G. (2019) Mechanical determinants of forward skating sprint and their relationship with off-ice muscular capacities. *24th Annual Congress of the European College of Sport Science*. Prague, Czech Republic, July.

TRAVAUX RÉALISÉS EN DEHORS DU CADRE DE LA THÈSE :

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Brocherie F., Perez J. & Guilhem G. (2020). Effects of a 14-day high-intensity shock microcycle in high-level ice hockey players' fitness. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Published ahead of print.

Le Mansec Y., Perez J., Rouault Q., Doron J. & Jubeau M. (2019). Impaired Performance of the Smash Stroke in Badminton Induced by Muscle Fatigue. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(1), 52-59.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AHL	Ligue Américaine de hockey sur glace ou <i>American Hockey League</i>	F_v	Force de réaction du sol verticale
AR	Accel'Rate	FV	Force-vitesse
AS	Accélération-vitesse ou <i>Acceleration-speed</i>	FV_{imb}	Ratio de déséquilibre du profil force-vitesse ou <i>force-velocity imbalance</i>
ATP	Adénosine tri-phosphate	GPS	Système de positionnement par satellites ou <i>Global positioning system</i>
CC	Composante contractile du muscle	GRF	Force de réaction au sol ou <i>Ground Reaction Force</i>
CEP	Composante élastique parallèle du muscle	HIIT	Entraînement par intervalles à haute intensité ou <i>High-intensity interval training</i>
CES	Composante élastique série du muscle	ICC	Coefficient de corrélation intra-classe
CIO	Comité International Olympique	IFT	Intermittent Fitness Test
CM	Centre de masse	IIHF	Fédération internationale de hockey sur glace ou <i>International Ice Hockey Federation</i>
CMJ	Contre-mouvement jump	IRM	Imagerie par résonance magnétique
CV	Coefficient de variation	KHL	Ligue continentale de hockey sur glace ou <i>Kontinental Hockey League</i>
d	Taille d'effet de Cohen	[La]	Concentration du lactate sanguin
DJ	Drop jump	LOA	Limites de concordance ou <i>limits of agreement</i>
Drf	Diminution du ratio de la force dans la direction horizontale	L_{opt}	Charge optimale pour P _{max} ou <i>optimal load</i>
EMG	Electromyographie	LPS	Système de positionnement radar local ou <i>Local positioning system</i>
ES	Taille d'effet ou <i>Effect Size</i>	m	Masse de l'athlète
F₀	Force maximale théorique	MCS	Système de caméras multiples ou <i>Multiple camera system</i>
F_{aero}	Force de résistance due aux frictions aérodynamiques		
FC	Fréquence cardiaque		
FC_{max}	Fréquence cardiaque maximale		
FC_r	Fréquence cardiaque de réserve		
FFGH	Fédération Française de hockey sur glace		
F_h	Force horizontale antéro-postérieure		
F_{Res}	Résultante totale de la force de réaction du sol		

NHL	Ligue nationale de hockey sur glace ou <i>National Hockey League</i>	RSA	Capacité de répétition de sprints ou <i>Repeated sprint ability</i>
NLA	Ligue nationale Suisse de hockey sur glace	SD	Écart-type
NMES	Système électromécanique nanométrique	SEM	Erreur de mesure standard
NWHL	Ligue nationale féminine de hockey sur glace ou <i>National Women Hockey League</i>	S_{FV}	Pente de la relation force-vitesse ou <i>slope of the force-velocity relationship</i>
OIL	On-ice load	S_{FVopt}	Pente de la relation force-vitesse qui théoriquement optimise la hauteur de saut ou <i>optimal slope of the force-velocity relationship</i>
PA	Potentiel d'action	SIT	Entraînement en intervalle de sprints ou <i>Sprint interval training</i>
PAP	Potentialisation musculaire par post-activation	SJ	Squat jump
PCr	Phosphocréatine	SSC	<i>Stretch-shortening cycle</i>
PCSA	Surface de section transversale physiologique du muscle ou <i>Physiological cross-sectional area</i>	SWC	Plus petit changement significatif ou <i>small worthwhile change</i>
P_h	Puissance horizontale moyenne antéro-postérieure	τ	Constante de temps
PL	Player load	TRIMP	Training impulse
P_{max}	Puissance maximale théorique	UM	Unité motrice
PV	Puissance-vitesse	V₀	Vitesse maximale théorique
r	Coefficient de corrélation de Pearson	V_h	Vitesse horizontale instantanée
RF	Niveau de force dans la direction horizontale ou <i>Ratio of Force</i>	V_{max}	Vitesse maximale atteinte
RFD	Ratio de développement de la force ou <i>Rate of Force Development</i>	V_{opt}	Vitesse optimale pour P _{max}
RHIE	Répétition d'efforts à haute intensité ou <i>Repeated high-intensity effort</i>	VO_{2max}	Consommation maximale d'oxygène
RM	Répétition maximale		
ROF	Évaluation de la fatigue ou <i>Rating of fatigue</i>		
RPE	Perception de l'effort ou <i>Rating of perceived exertion</i>		

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I – COMPRÉHENSION DES EXIGENCES DE L'ACTIVITÉ	6
1. LE HOCKEY SUR GLACE : UN SPORT A HAUTE INTENSITÉ ET HAUTE VITESSE PRATiqué SUR UNE SURFACE RÉDUITE	6
2. DE LA COMPLEXITÉ D'ANALYSER L'ACTIVITÉ POUR COMPRENDRE LE HOCKEY SUR GLACE	8
2.1 ANALYSE TEMPORELLE	8
2.2 ANALYSE NOTATIONNELLE	14
2.3 DECRIRE LA MECANIQUE DES DEPLACEMENTS, UNE NECESSITE POUR L'ENTRAINEMENT	17
2.4 FACTEURS D'INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES DU JEU EN HOCKEY SUR GLACE	21
2.5 DEROULEMENT DU MATCH : UN IMPACT SUR LES ACTIVITES A HAUTE INTENSITE	22
2.6 UNE EVOLUTION DE L'ACTIVITE VERS DES ACTIVITES DE PLUS EN PLUS INTENSES NECESSITANT UN ENTRAINEMENT ET UN SUIVI ADAPTE EN FONCTION DU POSTE ET DU GENRE	25
3. SPÉCIFICITÉ DU HOCKEY SUR GLACE FÉMININ	26
3.1 CONTEXTE ET SPECIFICITES	26
3.2 CARACTERISTIQUES DU JEU FEMININ VS. MASCULIN	28
4. LIMITES ET CONTRAINTES DES ÉVÈNEMENTS MAJEURS	31
4.1 LIMITES METHODOLOGIQUES	31
4.2 CONTRAINTES DES EVENEMENTS MAJEURS : UN CALENDRIER DENSE A PRENDRE EN COMPTE	32
II – PROFIL DE PERFORMANCE D'UN·E JOUEUR·SE DE HOCKEY SUR GLACE	37
1. NÉCESSITÉ D'UN PROFIL MUSCULAIRE COMPLET ALLIANT FORCE, PUISSANCE ET VITESSE POUR RÉPONDRE AUX EFFORTS INTERMITTENTS ET INTENSES	37
1.1 ÉVALUATION DES CAPACITES MUSCULAIRES : ENTRE PROFILAGE ET PREDICTION DE PERFORMANCE	37
1.2 LA FORCE	38
1.3 LA VITESSE	47
1.4 LA PUISSANCE	53
2. LA TECHNIQUE DE PATINAGE, CATALYSEUR D'UNE PERFORMANCE BIOMÉCANIQUE EFFICACE	60
2.1 UNE SPECIFICITE ESSENTIELLE DANS LA PERFORMANCE	60
2.2 ANALYSE BIOMECHANIQUE DU PATINAGE	62
2.3 CONTRAINTES ET LIMITES D'UNE EVALUATION SPECIFIQUE NEUROMUSCULAIRE	67
III – QUEL ENTRAÎNEMENT POUR OPTIMISER LES CAPACITÉS MUSCULAIRES NÉCESSAIRES À LA PERFORMANCE EN HOCKEY SUR GLACE ?	70

1. OPTIMISATION DE L'ENTRAÎNEMENT HORS GLACE : UN OBJECTIF DE DÉVELOPPEMENT MUSCULAIRE ORIENTÉ ET INDIVIDUALISÉ	71
1.1 METHODES UTILISEES EN RELATION PLUS OU MOINS ETROITES AVEC PERFORMANCE SUR LA GLACE	71
1.2 UTILISATION DES PROFILS FORCE-VITESSE POUR UNE MEILLEURE INDIVIDUALISATION DE L'ENTRAINEMENT	75
1.3 NOTION DE TRANSFERT	78
2. QUEL ENTRAÎNEMENT SPÉCIFIQUE SUR LA GLACE POUR DÉVELOPPER LES CAPACITÉS MUSCULAIRES ET SE RAPPROCHER DES EXIGENCES DE COMPÉTITION	81
2.1 ENTRAINEMENT SPECIFIQUE DES CAPACITES MUSCULAIRES	81
2.2 INTERET ET LIMITES DES SITUATIONS DE JEUX REDUITS POUR LE DEVELOPPEMENT DES QUALITES MUSCULAIRES	82
<u>PROBLÉMATIQUE & OBJECTIFS EXPÉRIMENTAUX</u>	87
<u>MÉTHODES EXPÉRIMENTALES</u>	90
1. CARACTÉRISTIQUES DES PARTICIPANTES AUX ÉTUDES	90
2. ÉVALUATION DES CONTRAINTES BIOMÉCANIQUES EN SITUATION ÉCOLOGIQUE DE COMPÉTITION OU D'ENTRAÎNEMENT A L'AIDE DE CENTRALES INERTIELLES	91
3. PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE	94
4. ANALYSES STATISTIQUES	97
<u>PROGRAMME EXPÉRIMENTAL DE LA THÈSE</u>	99
ÉTUDE 1 : L'ENCHAÎNEMENT DE MATCHS INTERNATIONAUX DE HOCKEY SUR GLACE FÉMININ NE SEMBLE PAS INFLUENCER LA CHARGE MÉCANIQUE EXTERNE.	99
1. INTRODUCTION	100
2. MÉTHODES	101
3. RÉSULTATS	104
4. CONCLUSION	110
ÉTUDE 2 : REPRODUCTIBILITÉ DU PROFIL FORCE-VITESSE LORS DU SPRINT EN PATINAGE.	112
1. INTRODUCTION	113
2. MÉTHODES	114
3. RÉSULTATS	115
4. CONCLUSION	120
ÉTUDE 3 : L'UTILISATION DE LA VIDÉO HAUTE-FRÉQUENCE ENTRAÎNE UNE ESTIMATION TRONQUÉE DU PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE COMPARÉE A L'UTILISATION DU RADAR.	121
1. INTRODUCTION	122
2. MÉTHODES	123
3. RÉSULTATS	125
4. CONCLUSION	129

ÉTUDE 4 : UTILISATION DU RADAR VS. APPAREIL DE RÉSISTANCE ROBOTIQUE DANS LA DÉTERMINATION DU PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE. QUELLE MÉTHODE POUR QUEL OBJECTIF ?	130
1. INTRODUCTION	131
2. MÉTHODES	132
3. RÉSULTATS	133
4. CONCLUSION	136
ÉTUDE 5 : QUELLES CAPACITÉS MUSCULAIRES POUR LA PERFORMANCE LORS D'UN SPRINT SUR GLACE ? INTÉRÊT DES PROFILS FORCE-VITESSE EN PATINAGE ET HORS GLACE POUR UNE ÉVALUATION COMPLÈTE DE LA JOUEUSE DE HOCKEY SUR GLACE.	137
1. INTRODUCTION	138
2. MÉTHODES	139
3. RÉSULTATS	141
4. CONCLUSION	147
ÉTUDE 6 : ÉVALUATION DES CONTRAINTES PHYSIOLOGIQUES ET BIOMÉCANIQUES IMPOSÉES PAR DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE JEUX RÉDUITS EN HOCKEY SUR GLACE	148
1. INTRODUCTION	148
2. MÉTHODES	149
3. RÉSULTATS	155
4. CONCLUSION	160
DISCUSSION GÉNÉRALE	162
1. LE HOCKEY SUR GLACE COMME TERRAIN DE COMPRÉHENSION DES ACTIVITÉS INTERMITTENTES À HAUTE INTENSITÉ ?	164
1.1 UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DES CONTRAINTES BIOMÉCANIQUES ET PHYSIOLOGIQUES EN HOCKEY SUR GLACE FEMININ	164
1.2 UN MODÈLE À TRANSPOSER SUR LES ACTIVITÉS INTERMITTENTES À HAUTE INTENSITÉ ?	168
2. DE NOUVELLES PERSPECTIVES D'ACCOMPAGNEMENT DE LA PERFORMANCE	172
3. THÈSE, PLANIFICATION ET ALÉAS (SITUATION SANITAIRE)	178
4. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES	179
APPLICATIONS PRATIQUES	182
1. L'INDIVIDUALISATION EN PÉRIODE DE COMPÉTITION (COURT-TERME) : CLÉ DU MAINTIEN DE LA PERFORMANCE ?	182
2. LA GESTION DE LA PHASE PRÉ-COMPÉTITIVE (MOYEN-TERME) : OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE	183
3. LA GESTION À LONG-TERME : VERS UN DÉVELOPPEMENT INDIVIDUALISÉ ET ORIENTÉ DES CAPACITÉS MUSCULAIRES	184
CONCLUSION	185

RÉFÉRENCES 187

ANNEXES 213

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. COMPOSITION D'UNE LIGNE DE HOCKEY SUR GLACE EN FONCTION DES POSTES OCCUPES SUR LA PATINOIRE.....	7
FIGURE 2. CARACTERISTIQUES TEMPORELLES DES CYCLES DE PRESENCES SUR LA GLACE ET DE RECUPERATION AU BANC DES JOUEURS.....	9
FIGURE 3. RESUME DES CARACTERISTIQUES TEMPORELLES D'UN MATCH DE HOCKEY SUR GLACE.....	11
FIGURE 4. COMPARAISON DE CHARGE EXTERNE LORS DE MATCHS DE HOCKEY SUR GLACE EN FONCTION DU POSTE.....	18
FIGURE 5. VALEURS DE LA CHARGE MECANIQUE (ON-ICE LOAD) RELATIVE AU TEMPS ($0,1L \cdot \text{min}^{-1}$) DE JEU PAR POSTE ET PERIODE SUR L'ENSEMBLE D'UNE SAISON DE LIGUE AMERICAINE DE HOCKEY SUR GLACE.....	23
FIGURE 6. CONTENU DU MUSCLE EN GLYCOGENE EN FONCTION DE LA TYPOLOGIE DES FIBRES MUSCULAIRE AVANT ET APRES UN MATCH SIMULE DE HOCKEY SUR GLACE SUR 6 JOUEURS.....	24
FIGURE 7. EVOLUTION DE LA VITESSE HORIZONTALE SUR UN SPRINT EN PATINAGE DE 34 M SELON LE GENRE.....	29
FIGURE 8. CARACTERISTIQUES (DUREE DE LA SAISON ET NOMBRE DE MATCHS) DES DIFFERENTS SPORTS COLLECTIFS EN FRANCE ET DANS LES DIFFERENTES LIGUES MAJEURES DE HOCKEY SUR GLACE.....	33
FIGURE 9. CALENDRIER DE COMPETITION DE L'EQUIPE DE FRANCE DE HOCKEY SUR GLACE FEMININE LORS DES CHAMPIONNATS DU MONDE ELITE A ESPOO (FINLANDE) EN AVRIL 2019.....	34
FIGURE 10. SYNTHESE DE L'ANALYSE DU HOCKEY SUR GLACE FEMININ.....	36
FIGURE 11. RELATION FORCE-VITESSE-PUISSANCE (PANEL A) ET EVOLUTION DU RATIO DE FORCE HORIZONTALE EN FONCTION DE LA VITESSE (PANEL B) MODELISEES A PARTIR D'UN SPRINT EN COURSE A PIED.....	48
FIGURE 12. COMPARAISON DES CINEMATQUES DE MOUVEMENT AU NIVEAU DES ARTICULATIONS DES MEMBRES INFERIEURS ENTRE LA MARCHÉ, LA COURSE ET LE PATINAGE.....	52
FIGURE 13. COMPETENCES REQUISES DANS LES DIFFERENTES DIMENSIONS SPECIFIQUES DE L'ACTIVITE POUR LE JOUEUR DE HOCKEY SUR GLACE.....	61
FIGURE 14. DECOURS TEMPOREL DES PARAMETRES CINEMATQUES, CINETIQUES ET D'ACTIVITE ELECTROMYOGRAPHIQUES (EMG) DE SURFACE LORS DU PATINAGE AVANT.....	64
FIGURE 15. INSTALLATION DU SYSTEME DE MESURE UTILISANT DES CAMERAS INFRA-ROUGES A HAUTE FREQUENCE AFIN D'ANALYSER LES DEUX PRINCIPALES PHASES DU PATINAGE.....	67
FIGURE 16. SYNTHESE DES DIFFERENTS PARAMETRES DETERMINANTS DANS LA DEFINITION D'UN PROFIL DE PERFORMANCE D'UN-E JOUEUR-SE DE HOCKEY SUR GLACE.....	69
FIGURE 17. UTILISATION DU SKATESIM POUR UN ENTRAINEMENT PLIOMETRIQUE RESISTE HORS GLACE SIMULANT LES APPUIS LORS DU PATINAGE.....	74
FIGURE 18. DIFFERENTS PROFILS FORCE-VITESSE POUR UNE MEME PERFORMANCE.....	76
FIGURE 19. EXEMPLES D'EXERCICE DE PATINAGE CONTRE RESISTANCE.....	81
FIGURE 20. COMPARAISON DE LA CHARGE EXTERNE ET DE LA CHARGE INTERNE RENCONTREES A L'ENTRAINEMENT ET EN COMPETITION PAR DES JOUEUSES ELITES EN FONCTION DU TYPE DE SEANCE ET DU POSTE.....	83
FIGURE 21. EXEMPLES DE JEUX REDUITS PROPOSES PAR LES ENTRAINEURS ET RECOMMANDATIONS EN FONCTION DES OBJECTIFS DEFINIS.....	84
FIGURE 22. SYNTHESE DES DIFFERENTES METHODES UTILISEES POUR LE DEVELOPPEMENT DES CAPACITES MUSCULAIRES DES JOUEUR-EUSE-S DE HOCKEY SUR GLACE.....	86
FIGURE 23. POSITIONNEMENT DES CENTRALES INTERTIELLES ET SIGNAUX EXPERIMENTAUX.....	92

FIGURE 24. CARACTERISTIQUES DE MATCHS LORS D'UN CALENDRIER INCLUANT QUATRE MATCHS EN CINQ JOURS, AVEC UNE DUREE ENTRE LES MATCHS D'ENVIRON 24 H.....	105
FIGURE 25. DIFFERENCE MOYENNE RELATIVE DE CHARGE MECANIQUE (ACCEL'RATE, AR) ENTRE LES MATCHS DANS UN CONTEXTE DE CALENDRIER DENSE.....	109
FIGURE 26. EXEMPLE INDIVIDUEL ILLUSTRANT LA PROCEDURE DE COLLECTE ET D'ANALYSE DE LA VITESSE HORIZONTALE INSTANTANEE DU CENTRE DE MASSE AU COURS DU TEMPS LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE.	115
FIGURE 27. CONCORDANCE DES VARIABLES THEORIQUES MAXIMALES MOYENNES ISSUES DU PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE ENTRE LES DEUX SESSIONS ESTIMEE PAR LA METHODE GRAPHIQUE DE BLAND-ALTMAN.	120
FIGURE 28. VITESSE HORIZONTALE DU CENTRE DE MASSE MESUREE LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE.....	124
FIGURE 29. CONCORDANCE DES VARIABLES THEORIQUES MAXIMALES ENTRE LES METHODES UTILISANT LA VIDEO HAUTE-FREQUENCE ET LE RADARESTIMEE PAR LA METHODE GRAPHIQUE DE BLAND-ALTMAN.	126
FIGURE 30. COMPARAISON DES PROFILS FORCE-VITESSE DETERMINES A L'AIDE D'UN SPRINT UNIQUE OU DE PLUSIEURS SPRINTS RESISTES.....	134
FIGURE 31. VITESSE HORIZONTALE DU CENTRE DE MASSE MESUREE LORS D'UN SPRINT EN COURSE A PIED ET EN PATINAGE.	145
FIGURE 32. ANALYSE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION DE PEARSON ENTRE LES MEMES VARIABLES ISSUES DES PROFILS FORCE-VITESSE OBTENUS EN COURSE A PIED ET EN PATINAGE.....	146
FIGURE 33. SCHEMA DES DIFFERENTES SITUATIONS DE JEUX REDUITS ETUDIEES.	151
FIGURE 34. ÉCHELLE DE PERCEPTION DE L'EFFORT (RPE) UTILISEE POUR EVALUER LES CONTRAINTES MUSCULAIRES, CARDIO-RESPIRATOIRES ET TECHNICO-TACTIQUES LORS DES JEUX REDUITS.....	153
FIGURE 35. GRAPHIQUES DE BLAND-ALTMAN REPRESENTANT LA CONCORDANCE ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES DE CHARGE EXTERNE MECANIQUE.....	156
FIGURE 36. CARACTERISTIQUES PHYSIOLOGIQUES ET BIOMECANIQUES DE CHAQUE JEU REDUIT.....	158
FIGURE 37. REGRESSIONS LINEAIRES TRADUISANT L'EFFICIENCE TECHNIQUE DU PATINAGE.	159
FIGURE 38. ANALYSE DES COEFFICIENTS DE CORRELATION DE PEARSON ENTRE LES QUALITES PHYSIQUES ET L'EFFICIENCE TECHNIQUE DU PATINAGE.....	160
FIGURE 39. EXEMPLE DE L'EVOLUTION DU PROFIL FORCE-VITESSE D'UNE JOUEUSE DU POLE FRANCE FEMININ AU COURS DE SEPT SPRINTS DE 40 M SUR GLACE (PATINAGE).....	173
FIGURE 40. EXEMPLE DE MODELISATION D'UN PROFIL ACCELERATION-VITESSE D'UN JOUEUR DE HOCKEY SUR GLACE PROFESSIONNEL LORS D'UN ENTRAINEMENT.	174

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. ANALYSE TEMPORELLE DE MATCHS DE HOCKEY SUR GLACE.	13
TABLEAU 2. ANALYSE NOTATIONNELLE DE MATCHS DE HOCKEY SUR GLACE.	16
TABLEAU 3. DISTRIBUTION DU TEMPS PASSE A DIFFERENTS NIVEAUX D'INTENSITE DE JEU, BASES SUR UN CRITERE DE VITESSE DE DEPLACEMENT LORS DE MATCHS DE HOCKEY SUR GLACE A DIFFERENTS NIVEAUX DE JEU, ISSUE DE SEPT ETUDES PUBLIEES ENTRE 1972 ET 2020.	20
TABLEAU 4. CRITERES DE RECOMMANDATIONS POUR DEFINIR LE NIVEAU DE PERFORMANCE SUR UNE POPULATION FEMININE.....	27
TABLEAU 5. COEFFICIENTS DE CORRELATION DE PEARSON (R) ENTRE LES TESTS D'EVALUATION HORS GLACE DE LA FORCE MAXIMALE DES EXTENSEURS DES MEMBRES INFERIEURS ET LES PERFORMANCES AUX TESTS SUR GLACE.	46
TABLEAU 6. COEFFICIENTS DE CORRELATION DE PEARSON (R) ENTRE LES TESTS D'EVALUATION HORS GLACE DE LA VITESSE ET LES PERFORMANCES AUX TESTS SUR GLACE.....	50
TABLEAU 7. COEFFICIENTS DE CORRELATION DE PEARSON (R) ENTRE LA PUISSANCE DEVELOPPEE LORS DE DIFFERENTS MOUVEMENTS HORS GLACE ET LES PERFORMANCES MESUREES LORS DE TESTS EFFECTUES SUR GLACE.....	59
TABLEAU 8. CARACTERISTIQUES DES PARTICIPANTES AUX ETUDES.	91
TABLEAU 9. PROGRAMME DU STAGE DE L'EQUIPE DE FRANCE LORS DES OPPOSITIONS STANDARDISEES CONTRE L'EQUIPE NATIONALE SUISSE.....	102
TABLEAU 10. CARACTERISTIQUES DE JEU ET INDICATEURS DE CHARGE MECANIQUE MOYENS OBTENUS A L'ISSUE DE QUATRE MATCHS DE MATCHS DE HOCKEY SUR GLACE FEMININ AU NIVEAU INTERNATIONAL.....	106
TABLEAU 11. CARACTERISTIQUES DE JEU, INDICATEURS DE CHARGE MECANIQUE ET VARIABILITE INTER-MATCH LORS D'UN ENCHAINEMENT DE QUATRE MATCHS DE HOCKEY SUR GLACE FEMININ DE NIVEAU INTERNATIONAL.	107
TABLEAU 12. REPETABILITE RELATIVE ET ABSOLUE DES VARIABLES BIOMECANIQUES DERIVEES DE L'EVALUATION AU RADAR ENTRE LES DEUX ESSAIS DE SPRINTS EN PATINAGE SUR 40 M.....	116
TABLEAU 13. REPETABILITE RELATIVE ET ABSOLUE DES VARIABLES BIOMECANIQUES DERIVEES DE L'EVALUATION AU RADAR ENTRE LES DEUX SESSIONS DU MEILLEUR SPRINT EN PATINAGE SUR 40 M.....	118
TABLEAU 14. REPETABILITE RELATIVE ET ABSOLUE DES VARIABLES BIOMECANIQUES DERIVEES DE L'EVALUATION AU RADAR ENTRE LES DEUX SESSIONS DE LA MOYENNE DES DEUX SPRINTS EN PATINAGE SUR 40 M.....	119
TABLEAU 15. DIFFERENCES ENTRE LES VARIABLES MECANQUES LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE OBTENUES A PARTIR DE LA METHODE UTILISANT LES TEMPS DE PASSAGE DETERMINES A L'AIDE DE LA VIDEO HAUTE FREQUENCE (ST) EN REFERENCE A LA METHODE UTILISANT LE RADAR.	127
TABLEAU 16. DIFFERENCES ENTRE LES VARIABLES MECANQUES LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE OBTENUES A PARTIR DE LA METHODE UTILISANT LES TEMPS DE PASSAGE AVEC UN DELAI DE TEMPS DETERMINES A L'AIDE DE LA VIDEO HAUTE FREQUENCE (ST-TS) EN REFERENCE A LA METHODE UTILISANT LE RADAR.	128
TABLEAU 17. COMPARAISON DES VARIABLES BIOMECANIQUES EXTRAITES DES RELATIONS FORCE-VITESSE DETERMINEES A PARTIR DE LA METHODE DU SPRINT UNIQUE A POIDS DE CORPS ET DE LA METHODE UTILISANT DE MULTIPLES SPRINTS AVEC DES CONDITIONS DE CHARGE DIFFERENTES.....	135
TABLEAU 18. VARIABLES BIOMECANIQUES ET PERFORMANCE OBTENUES LORS DE L'EVALUATION DU SPRINT DE 40 M SUR GLACE.....	142
TABLEAU 19. COEFFICIENTS DE CORRELATION DE PEARSON ENTRE LES PERFORMANCES SUR 5 ET 40 M ET LES VARIABLES DE LA RELATION FORCE-VITESSE OBTENUES LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE SUR 40 M.	143
TABLEAU 20. COMPARAISON ENTRE LES VARIABLES ISSUES DE LA RELATION FORCE-EVALUEE EN COURSE A PIED ET EN SAUT VERTICAL AVEC CELLES OBTENUES LORS DE L'EVALUATION DU SPRINT EN PATINAGE.	145

TABLEAU 21. ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE FATIGUE A L'AIDE DU QUESTIONNAIRE « RATING OF FATIGUE » (ROF) A LA FIN DE CHAQUE SESSION DE JEUX REDUITS.	155
TABLEAU 22. COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES VARIABLES DE CHARGE EXTERNE MECANIQUE.	156

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Reconnu comme le sport collectif induisant des déplacements des joueurs les plus rapides, le hockey sur glace requiert des aptitudes techniques complexes (*i.e.*, patinage), des efforts brefs, répétés et intenses (*i.e.*, accélérations, changements de direction et freinages/démarrages), avec une contribution importante des membres supérieurs (*i.e.*, maniement et protection du palet, lancers et « mises en échec ») (Cox et al., 1995). Qui plus est, ces actions doivent être effectuées en portant un équipement (*i.e.* protections, casque, patins, vêtements) compris entre 7 et 10 kg et sur une surface de lame de l'ordre du centimètre carré. Apparue dans les années 1870 à Montréal (Canada), le hockey sur glace demeure un sport très populaire et développé en Amérique du nord. L'apport et le développement des méthodes de préparation physique dans les équipes Nord-Américaines et en ex-URSS ont permis un développement athlétique plus important à l'aide de méthodes basées sur des preuves scientifiques (Montgomery, 2006). Ce développement athlétique, associé à des modifications de réglementation du jeu (*i.e.*, augmentation de la taille du but, diminution du temps avant les engagements ou augmentation du nombre de joueur·euse·s équipé·e·s par équipe, suppression du hors-jeu de deux lignes, diminution du nombre de joueur·euse·s lors des prolongations) et des évolutions technologiques du matériel (*i.e.*, allègement, augmentation de la rigidité améliorant la restitution d'énergie), a eu pour conséquence de produire un jeu encore plus rapide et plus physique (Quinney et al., 2008). Par exemple, les études récentes rapportent des vitesses maximales atteintes allant de 27 à 30 km.h⁻¹ (Brocherie et al., 2018; Douglas et Kennedy, 2020; Lignell et al., 2018) ce qui est significativement supérieur à celles rapportées dans des études plus anciennes (~20 km.h⁻¹) (Dillman et al., 1984).

Dans le souci d'améliorer et de comprendre la performance en hockey sur glace, l'analyse de l'activité permet de mieux définir les contraintes, notamment physiques, inhérentes à la pratique. Ainsi, des études ont défini, à l'aide de systèmes d'enregistrements vidéos, l'ensemble

des mouvements du-de la joueur·euse de hockey sur glace en les catégorisant selon leur intensité afin de préciser les besoins et les aptitudes physiques associés pour les joueur·euse·s (Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2016, 2017; Lignell et al., 2018). Cette méthode d'analyse demeure cependant très dépendante de l'expertise et la subjectivité de l'observateur, notamment en l'absence de consensus concernant la classification des types de locomotion rendant complexe l'interprétation des résultats rapportés ou encore la comparaison entre les études (Duthie et al., 2003). Plus récemment, le développement de nouvelles technologies [*i.e.*, centrales inertielles, système de positionnement radar local (LPS)] a permis la mise en œuvre d'analyses objectives au plus près des conditions réelles de pratique (*i.e.*, entraînement, compétition) (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a; Douglas et Kennedy, 2020; Douglas et al., 2019b; Douglas et al., 2020). Ces nouvelles données ont permis de mieux définir l'activité selon différents contextes (*i.e.*, niveau de pratique, résultats) et d'évaluer les contraintes supportées par les joueur·euse·s lors des entraînements en comparaison des demandes rencontrées en compétition (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a; 2019b; 2020). Cependant, la majorité des études considère les matchs comme « uniques » et ne prennent pas en compte le contexte spécifique du hockey sur glace et l'enchaînement rapproché de matchs imposé par une programmation dense lors des grands tournois internationaux (*i.e.*, Championnats du monde ou Jeux Olympiques) ou dans les grands championnats nationaux [*i.e.*, Ligue Nationale de Hockey (NHL), Ligue Continentale de Hockey (KHL), Ligue Nationale Suisse (NLA), etc.]. Ces programmations denses peuvent avoir un impact important sur les stratégies de jeu ou de récupération mises en place par les équipes et doivent être évaluées de façon précise et fiable afin de définir les concepts et méthodes d'entraînement adéquats permettant aux joueur·euse·s de répondre aux contraintes de l'activité en situation de compétition (Allard et al., 2020). **La description des contraintes mécaniques spécifiques générées par les situations de match apparaît dès lors comme un objectif prioritaire à la compréhension de l'activité** afin d'éclairer les pratiques en matière de développement des capacités physiques des joueur·euse·s.

Ces dernières années, les concepts et méthodes d'entraînement visant le développement des qualités essentielles à la performance en hockey sur glace ont évolué vers un travail physique spécifique intégré susceptible de reproduire des situations de match en manipulant certains paramètres tels que le nombre de joueur·euse·s impliqué·e·s ou la surface de jeu (*i.e.*, jeux réduits). Plusieurs études dans d'autres sports collectifs (Dellal et al., 2012; Lacombe et al., 2018b; Owen et al., 2012), ont montré que des cycles d'entraînement (> 3 semaines) incluant des jeux réduits induisaient des améliorations techniques et tactiques, mais aussi des progrès physiques (*i.e.*, vitesse, force, endurance). À ce jour, une seule étude (Lachaume et al., 2017) a évalué les réponses physiologiques (*i.e.*, évaluation des contraintes cardiaques) lors de jeux réduits en hockey sur glace. **Une meilleure connaissance des charges internes et externes et donc des réponses physiologiques et mécaniques générées par ces situations** permettraient d'optimiser mieux la programmation et l'individualisation de l'entraînement afin de mieux préparer les joueur·euse·s aux contraintes des compétitions.

Une méthode d'entraînement alternative consiste à développer une composante essentielle dans la performance en hockey sur glace à savoir le patinage (Pearsall et al., 2000). Cependant, les recherches s'intéressant aux déterminants biomécaniques de la performance en patinage sont peu développées à ce jour ou difficiles à mettre en œuvre. Ce constat résulte majoritairement de l'inadéquation souvent constatée entre les méthodologies inhérentes à ce type de mesures d'une part, et les conditions écologiques de pratique d'autre part (Buckeridge et al., 2015; Budarick et al., 2018; Shell et al., 2017). De nombreuses études se sont donc uniquement intéressées à la performance chronométrique lors de différents tests de patinage (*i.e.*, sprint en ligne droite, changements de direction, agilité) ou ont tenté d'identifier les liens potentiels avec certaines performances réalisées lors de tests effectués hors glace (*i.e.*, sprint en course à pied, sauts verticaux ou horizontaux, puissance anaérobie sur ergocycle). Ces performances strictes ne permettent cependant pas d'identifier ou d'objectiver les déterminants biomécaniques de la performance en patinage. Des méthodes macroscopiques simples basées sur l'évaluation de la

cinétique de la vitesse lors d'un sprint permettent aujourd'hui d'extraire la relation entre la force et la vitesse exprimées horizontalement au niveau du centre de masse (CM) de l'individu en course à pied [*i.e.*, profils force-vitesse (FV) du sprint] et d'identifier les liens entre ces profils et la performance *in-situ* (Samozino et al., 2016). **De telles méthodes pourraient être appliquées lors d'un sprint en patinage afin d'identifier les déterminants de la performance** et établir ainsi des programmes de développement des capacités musculaires ciblant spécifiquement ces besoins. Ces programmes individualisés pourraient être mis en place de façon spécifique sur glace avec un travail de patinage ou associé à un travail hors glace en lien avec les profils FV évalués lors de mouvements horizontaux (sprint) ou verticaux (saut).

Le contexte de pratique (*i.e.*, sport pratiqué sur glace dans un contexte couvert) limite les solutions permettant d'affiner notre compréhension des déterminants biomécaniques de la performance en patinage en situation écologique. De plus, les connaissances disponibles sont principalement issues de mesures prélevées auprès de collectifs masculins, ce qui limite leur transfert aux spécificités de la pratique féminine. Ainsi, l'objectif de cette thèse consiste à **(i) décrire les contraintes mécaniques inhérentes à la pratique en contexte de compétition ou d'entraînement, (ii) investiguer l'intérêt d'outils d'évaluation innovants permettant d'extraire des déterminants de la performance spécifiques au hockey sur glace et (iii) caractériser les contraintes biomécaniques et physiologiques liées à la mise en place de situations de jeux réduits fréquemment utilisés à l'entraînement.**

Ce manuscrit de thèse se décline en quatre parties principales visant à répondre à ces principaux objectifs.

La première partie sera dédiée à l'état de l'art relatif à ces questions. Après avoir défini le contexte du hockey sur glace et plus particulièrement au niveau féminin, nous évaluerons les exigences liées à la pratique de cette activité à haute intensité. Cela nous permettra de définir les déterminants musculaires notamment associés à la spécificité du patinage. Dans cette partie, nous présenterons également les différentes méthodes d'entraînements et/ou d'évaluation

utilisées afin de circonscrire leurs limites et les nouvelles approches disponibles. Dans la **deuxième partie, nous définirons les méthodes expérimentales employées** dans le cadre de cette thèse ainsi que l'analyse appliquée aux données collectées. **La troisième partie exposera les six études réalisées** dans le cadre du programme expérimental de la thèse. Enfin, **nous discuterons l'ensemble des résultats issus des expérimentations et les perspectives d'applications pratiques** qu'ils soulèvent dans la quatrième et dernière partie.

1. LE HOCKEY SUR GLACE : UN SPORT A HAUTE INTENSITÉ ET HAUTE VITESSE PRATiqué SUR UNE SURFACE RÉDUITE

Depuis les années 90, le développement du hockey sur glace a mené scientifiques et entraîneurs à questionner les caractéristiques physiologiques et biomécaniques régulant la performance des joueurs (Cox et al., 1995; Montgomery, 1988). Depuis, la discipline a évolué, tant dans les exigences et les spécificités du jeu qu'au niveau de l'accompagnement et l'optimisation de la performance des joueurs (Montgomery, 2006; Quinney et al., 2008).

Le hockey sur glace se joue sur un espace fermé, appelé patinoire, et entouré d'une balustrade d'une hauteur de 107 cm, surmontée de plexiglas, principalement derrière les buts et dans les arrondis de la patinoire, empêchant autant que possible la sortie du palet de l'aire de jeu (IIHF, 2019). La surface est partagée en trois zones, délimitées par 2 lignes bleues (*i.e.*, lignes de hors-jeu) : la zone d'attaque, la zone neutre (au milieu) et la zone de défense. Les dimensions sont comprises entre 56 et 61 m de long pour 26 à 30 m de large (60 × 29 m minimum pour les compétitions internationales et 61 × 26 m pour les matchs de NHL). Les zones d'attaque et de défense ont toujours la même dimension et seule la zone neutre varie. Par exemple, cette zone est minimale en NHL (environ 17,7 m de long) depuis la saison 1990-1991 afin de faciliter la transition vers la zone d'attaque et ainsi augmenter la vitesse du jeu. Les équipes peuvent aligner 5 joueur·euse·s de champs (*i.e.*, 2 défenseurs, 1 attaquant centre et 2 attaquants ailiers ; définis comme une ligne) et 1 gardien de but (Figure 1) qui peut être remplacé à tout moment par un·e joueur·euse de champ. Les équipes peuvent compter jusqu'à 22 joueur·euse·s dont 2 gardiens sur la feuille de match (soit 4 lignes).

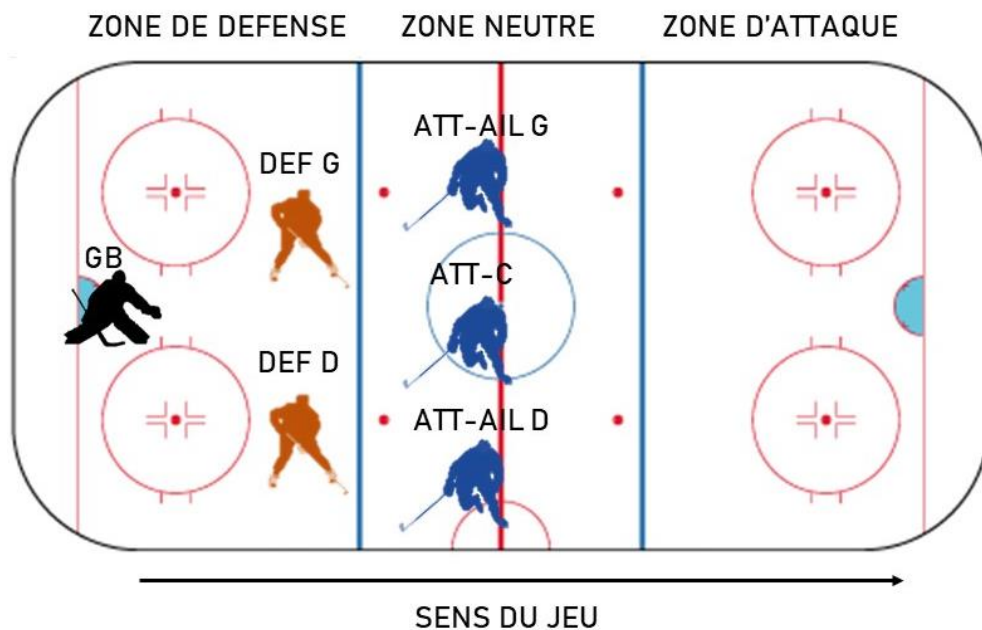


Figure 1. Composition d'une ligne de hockey sur glace en fonction des postes occupés sur la patinoire.

Les changements entre les joueur·euse·s peuvent intervenir à n'importe quel moment et de façon illimitée comme cela est possible en basket-ball, hockey sur gazon ou encore en football Australien. L'une des particularités du hockey sur glace, permise par les règles du jeu, est que l'on retrouve des périodes de temps où un·e ou plusieurs joueur·euse·s d'une même équipe peuvent être pénalis·e·s suite à une faute individuelle ou collective (*i.e.*, pénalité). Cela se traduit par un surnombre de joueur·euse·s pour l'équipe non-pénalisée créant un avantage pour tenter de marquer (*i.e.*, supériorité numérique) alors que l'équipe adverse, auteure de la pénalité se retrouve en désavantage (*i.e.*, infériorité numérique). Un match de hockey sur glace se déroule en trois tiers temps de 20 min entrecoupés de pauses de 15 min durant lesquelles la patinoire est déneigée et re-lissée (*i.e.*, surfaçage) afin d'assurer une qualité de glisse optimale. Si le résultat est nul après le temps réglementaire, le match est prolongé par une prolongation de 5, 10 ou 20 min, en fonction des compétitions, selon le principe de la mort-subite (l'équipe marquant le premier but est déclarée vainqueur) puis des tirs au but décisifs à l'issue de la prolongation si nécessaire afin de définir un vainqueur (IIHF, 2019).

L'ensemble de ces caractéristiques spécifiques, qui en font un sport unique et à part entière, impacte l'activité de hockey sur glace et doit donc être pris en compte dans l'analyse globale de la tâche.

2. DE LA COMPLEXITÉ D'ANALYSER L'ACTIVITÉ POUR COMPRENDRE LE HOCKEY SUR GLACE

2.1 Analyse temporelle



Le hockey sur glace est caractérisé par des efforts brefs et à haute intensité réalisés par le·la joueur·euse lorsqu'il est sur la glace (*i.e.*, présence) et entrecoupés de périodes de récupération effectuées sur le banc. Seliger et al. (1972) ont été les premiers à rapporter une distance totale moyenne parcourue de 5160 m (4860-5620 m) lors d'un match amical de l'équipe nationale de Tchécoslovaquie. Une analyse plus approfondie sur le dernier tiers-temps montrait un nombre moyen de 6 présences par joueur avec un temps moyen de jeu de 1 min pour 3 min de récupération, soit un ratio effort:récupération de 1:3. Ces résultats ont été confirmés par Thoden et Jette (1975) lors de l'analyse de 3 matchs junior et 1 match professionnel (5-6 présences d'une durée moyenne de 70-80 s et entrecoupées d'un temps de récupération au banc de 3-4 min par période). L'analyse de matchs au niveau universitaire ($n = 8$) montrait un temps moyen de présence de 85,4 s. Des résultats similaires ont été rapportés par Leger (1980) concernant le temps moyen d'une présence chez des joueurs juniors canadiens (Figure 2). Cependant, il dénotait un temps actif de seulement 51 s dont 40 s de jeu consécutif pour 34 s de temps d'arrêt

confirmant les données rapportées par Green et al. (1976). Leger (1980) rapportait également un ratio effort:récupération de 1:3.

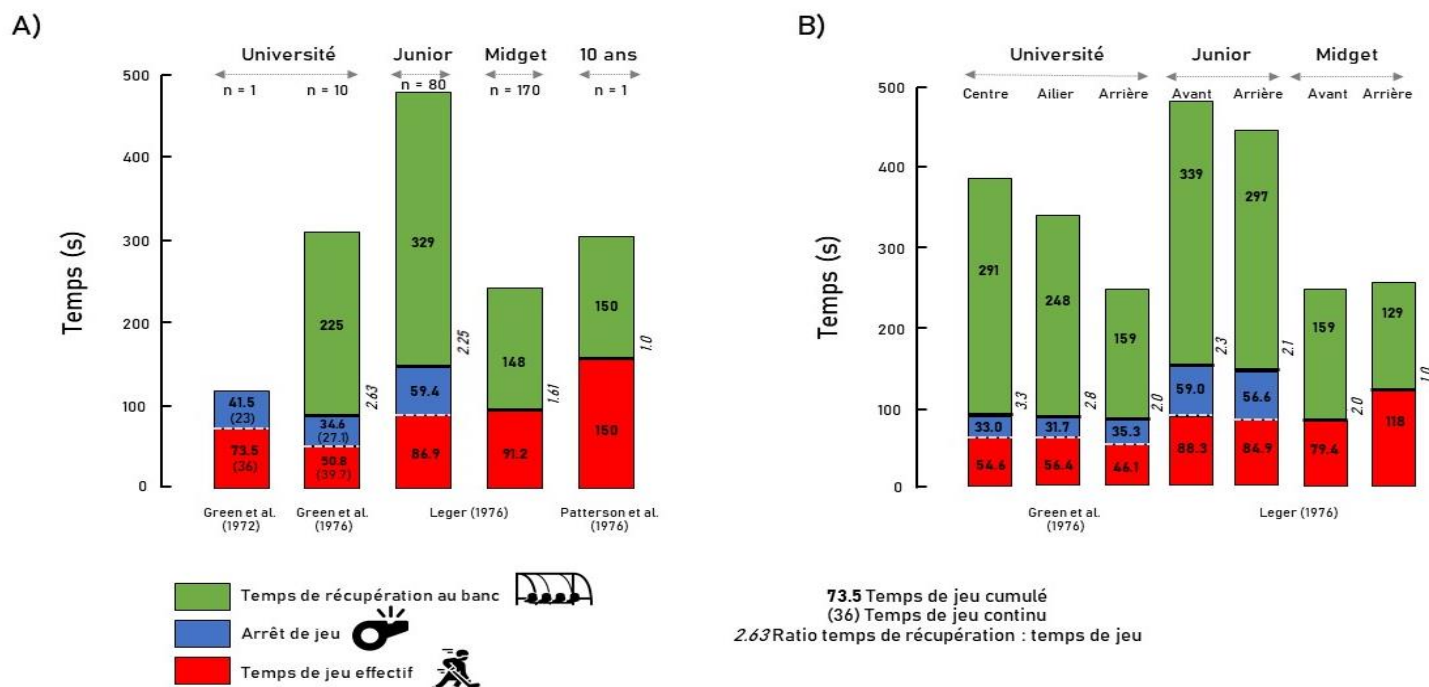


Figure 2. Caractéristiques temporelles des cycles de présences sur la glace et de récupération au banc des joueurs. Analyse selon le niveau de jeu des équipes (panel A) ou le poste occupé (panel B). D'après Leger (1980).

Dans le but d'augmenter l'intensité et la performance lors des matchs, les règles du jeu ont évolué ces dernières années. Par exemple, les faibles scores lors des matchs de NHL ont poussé l'organisation à adopter une multitude de nouvelles règles incluant l'augmentation de la taille du but, créer des zones offensives plus grandes, réduire les endroits où le gardien pouvait s'emparer du palet (et donc arrêter le jeu), diminuer le temps avant les engagements ou encore augmenter le nombre de joueurs équipés par équipe. Cette dernière évolution a notamment eu pour effet d'augmenter le ratio effort:récupération à quasiment 1:4 (Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2016, 2017). Des études plus récentes ont montré des temps de jeu effectifs moyens allant de 15 à 24 min (Akermark et al., 1996; Bell et al., 2011; Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Delisle-Houde et al., 2018; Lignell et al., 2018; Logan-Sprenger et al., 2011) (Tableau 1). Cependant, une large variabilité interindividuelle est reportée (*i.e.*, temps de

jeu effectif allant de 9,5 min à 33,2 min) dépendant notamment des différents postes ou des stratégies mises en place par les entraîneurs (Cox et al., 1995; Delisle-Houde et al., 2018; Lignell et al., 2018; Logan-Sprenger et al., 2011). D'autre part, le temps de jeu effectif en hockey sur glace semblerait être inférieur à ceux rapportés dans d'autres sports collectifs appliquant la même règle concernant les changements volants et illimités [*p. ex.*, handball (32-53 min) (Karcher et Buchheit, 2014), basketball (~33 min) (Fox et al., 2020), lacrosse (36-59 min) (Polley et al., 2015)]. Le basketball semble tout de même se rapprocher en termes de ratio effort:récupération (*i.e.*, 1:3,5) (Scanlan et al., 2015a) bien que les auteurs considèrent les actions de faible intensité (*i.e.*, marche ou jogging) comme de la récupération. L'ensemble de ces données démontre le caractère unique du modèle de haute intensité spécifique au hockey sur glace (Figure 3). Le nombre de présences varie ainsi entre une moyenne de ~15 par match au niveau universitaire (Jackson et al., 2017) et ~22 en 2^{nde} division Suédoise (Akermark et al., 1996) ou durant un match de Championnat du Monde (Brocherie et al., 2018) avec 5 à 8 présences par période en fonction du poste considéré (Akermark et al., 1996; Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2017; Peterson et al., 2015a; Stanula et Rocznio, 2014). Le temps moyen de jeu effectif par présence (en excluant les arrêts de jeu) s'échelonne entre 40 et 65 s (Bell et al., 2011; Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Delisle-Houde et al., 2018; Douglas et Kennedy, 2020; Jackson et al., 2017; Montgomery et al., 2004; Noonan, 2010; Peterson et al., 2015a). Cependant, il apparaît que ce temps de présence sur la glace s'est réduit sur les quatre dernières décennies pour atteindre 40 à 45 s selon les données les plus récentes (Brocherie et al., 2018; Delisle-Houde et al., 2018; Douglas et Kennedy, 2020; Jackson et al., 2017; Montgomery et al., 2004; Peterson et al., 2015a). Ce constat pourrait traduire une évolution vers une intensité plus importante des présences liée à un changement de stratégie de la part des entraîneurs qui disposent d'un nombre plus important de joueurs. En effet, des présences courtes réduisent l'accumulation de lactate musculaire et favorise ainsi la resynthèse partielle (~60-65%) de la phosphocréatine (PCr) et la restauration des stocks d'ATP-PCr lors

des phases de récupération au banc retardant ainsi l'apparition de la fatigue musculaire (Montgomery, 1988).

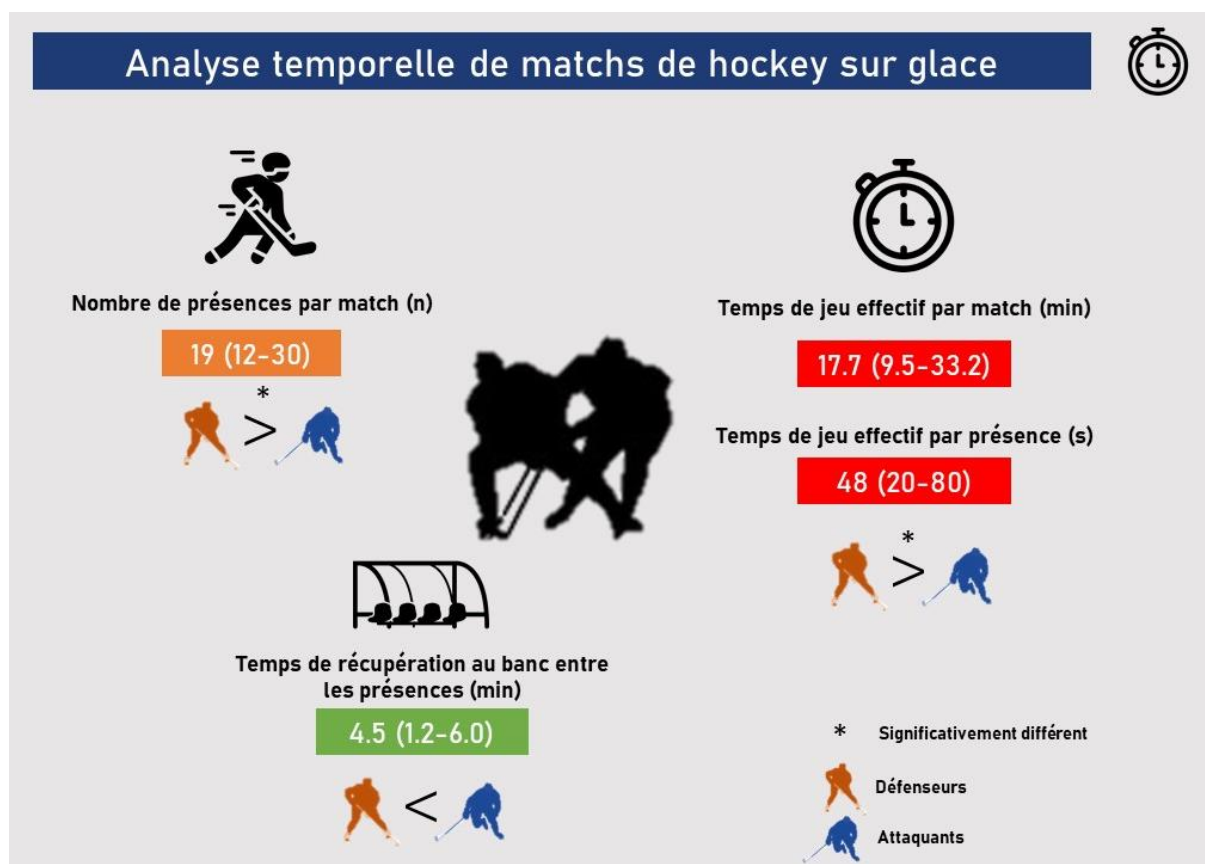


Figure 3. Résumé des caractéristiques temporelles d'un match de hockey sur glace.

Le hockey sur glace est une activité intermittente à dominante anaérobie (69%) (Behm et al., 2005; Cox et al., 1995; Seliger et al., 1972) nécessitant une capacité aérobie importante ($55,9 \pm 5,2 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ pour un niveau élite masculin) (Ferland et al., 2021). L'ensemble des activités explosives et répétées au cours d'un match nécessite une production rapide d'ATP par les filières anaérobies (*i.e.*, système phosphagène et glycolytique) (Cox et al., 1995). En parallèle, le hockey sur glace est également considéré comme une activité d'intensité modérée [*i.e.*, fréquence cardiaque (FC) comprise entre 70% et 80% de la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) sur la totalité d'un match] compte tenu de la prédominance du système oxydatif (*i.e.*, filière aérobie) durant la période entre les présences (Cox et al., 1995; Montgomery, 1988; Stanula et al., 2016). Au cours de cette période, le système oxydatif prédomine par rapport au

système glycolytique pour fournir l'énergie nécessaire sous forme d'ATP régulant ainsi la conversion du pyruvate en lactate, son oxydation locale au sein du muscle et de limiter son accumulation (Peterson et al., 2015a). La sollicitation de cette filière permet alors aux joueur·euse·s de récupérer entre les présences et de limiter l'installation de la fatigue tout au long d'un match (Peterson et al., 2015a; Stanula et al., 2014). Bien que nécessaires, il apparait cependant que la relation entre les capacités physiologiques, et notamment celles concernant la capacité aérobie, et la performance en hockey sur glace reste faible (Carey et al., 2007; Ferland et al., 2021; Peyer et al., 2010).

Tableau 1. Analyse temporelle de matchs de hockey sur glace.

Référence	Poste (n)	Niveau	Conditions expérimentales	Nombre de présences par match	Nombre de présences par période	Temps de jeu effectif total par match (min)	Temps de jeu effectif total par période (min)	Temps de jeu effectif par présence (s)	Temps moyen de récupération au banc entre les présences (min)
Akermark et al. (1996)	Joueurs de champ (14) Attaquants Défenseurs	2 nd division Suédoise	1 match	22,4 ± 1,6 20,9 ± 0,9 26,2 ± 4,0 *	7,5 ± 0,6 7,0 ± 0,3 8,7 ± 1,4 *	20,2 ± 1,1	6,7 ± 0,4		
Bracko et al. (1998b)	Attaquants (10)	Professionnel (NHL)	2 périodes analysées, 2 matchs	10,4 ± 2,1 ^a (8,0–13,0)	5,2 ± 1,0 ^a (3,5–6,5)	10,8 ± 4,1 ^a (6,1–18,2)		60,0 ± 12,4 (43,0–80,0)	
Noonan (2010)	Joueurs de champ (6)	Universitaire	1 match		3-4 ^a			65,0 ± 20,0 ^a	
Bell et al. (2011)	Attaquants (9) Défenseurs (4)	Universitaire	1 match	~19,0 ~19,0		16,9 16,8		~42,0 ~32,0	
Logan-Sprenger et al. (2011)	Attaquants (15) Défenseurs (7)	Universitaire	1 match			18,9 ± 1,2 (11,5–28,3) 24,0 ± 2,5 (12,3-33,2)			
Stanula et Rocznik (2014)	Attaquants (12) Défenseurs (8)	International U18	5 matchs du Championnat du Monde		7,4 ± 1,5 8,3 ± 1,2				
Peterson et al. (2015a)	Attaquants	Professionnel (NHL)	2 saisons (2009-2011)		6,8 ± 1,1			45,5 ± 3,9	1,2 ± 0,3
Jackson et al. (2017)	Joueurs de champ (20)	Universitaire	3 matchs	15,0		20,1		65,0	4,6
Brocherie et al. (2018)	Joueurs de champ (10)	International sénior	1 match du Championnat du Monde	22,3 ± 4,9	7,4 ± 1,8	16,1 ± 3,6	5,4 ± 1,2	44,0 ± 5,7	4,5 ± 1,6
Lignell et al. (2018)	Joueurs de champ (35) Attaquants (24) Défenseurs (11)	Professionnel (NHL)	1match			17,3 ± 1,1 (9,5–25,5) 15,2 ± 0,9 22,3 ± 1,6 *			
Delisle-Houde et al. (2018)	Joueurs de champ (21)	Universitaire	1 saison			15,8 ± 3,9 (6,6–21,5)		42,0 ± 2,3 (39–48)	
Douglas et Kennedy (2020)	Attaquants (13) Défenseurs (7)	International U20	5 matchs du Championnat du Monde					39,4 ± 21,5 40,1 ± 21,8	

^a résultats basés uniquement sur l'analyse de deux périodes, * différence significative entre les postes ($p < 0,05$).

2.2 Analyse notationnelle



En 1982, Dillman et al. (1984) ont analysé les cinétiques du mouvement et la vitesse de 22 joueurs durant le festival national du hockey sur glace américain. La capacité des programmes d'analyse des ordinateurs étant limitée, seules des séquences de 13,5 s ont pu être analysées. Sur ces périodes, les joueurs passaient plus de temps à accélérer (49%) plutôt qu'à décélérer (41%) et peu de variations ont été observées entre les postes (ailiers, centres, défenseurs). Les auteurs dénombreaient environ 3,4 accélérations d'une durée moyenne de 2,1 s pour 3,2 décélérations d'une durée moyenne de 2,0 s se rapprochant des résultats de Thoden et Jette (1975). Ce n'est que plus tard, et avec le développement des technologies (*i.e.*, vidéo et ordinateur), que des analyses descriptives plus détaillées et précises ont permis de mettre à jour les différents types de mouvements et leur fréquence durant les matchs (Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2016, 2017; Lafontaine et al., 1998) (Tableau 2). L'ensemble des études s'accorde sur le fait que les joueurs de hockey sur glace passent la majorité du temps de jeu à patiner vers l'avant (80-90%) peu importe le poste considéré (Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2017; Lafontaine et al., 1998). Ainsi, 5 % (Bracko et al., 1998b; Jackson et al., 2017) à 17% (Brocherie et al., 2018) du temps de jeu est effectué à haute intensité ($> \sim 20 \text{ km.h}^{-1}$). Parmi ces activités à haute intensité, le nombre de sprints varie entre 5 (Jackson et al., 2017) et 20 (Jackson et al., 2016) par match et durent approximativement 3 à 5 s (Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2017). On peut d'ailleurs noter qu'il existe une différence notable entre les joueurs de NHL (Bracko et al., 1998b) et les joueurs universitaires Canadien (Jackson et al., 2017) concernant le pourcentage d'activité passé à lutter pour la possession du palet (10% vs. 2%, respectivement). Cette différence est certainement représentative du style de jeu plus agressif adopté en NHL en lien avec des qualités athlétiques plus importantes entraînant des vitesses supérieures et donc des probabilités de duels plus importantes.

Plus récemment, Lignell et al. (2018) ont utilisé un système de caméras multiples (MCS) afin de capturer les mouvements des joueurs durant un match de NHL. Cette méthode apparaît plus objective qu'une analyse notationnelle classique. Les auteurs ont trouvé des résultats similaires (~22%) pour la distance parcourue sur des activités de haute intensité ($> 21 \text{ km.h}^{-1}$) mais un plus grand nombre de sprints d'une distance d'environ 26 m (19 m en moyenne ; 8-32 m) comparé à un match de Championnat du Monde (~25%) (Brocherie et al., 2018).

Bien que ces analyses qualitatives aient permis une meilleure compréhension des demandes spécifiques de l'activité, des analyses plus objectives au plus près des conditions de pratique sont nécessaires afin d'optimiser la planification et la programmation de l'entraînement.

Tableau 2. Analyse notationnelle de matchs de hockey sur glace.

Référence	Poste (n)	Niveau	Conditions expérimentales	Temps de jeu debout à l'arrêt (%)	Temps de jeu à basse intensité (%)	Temps de jeu à intensité modérée (%)	Temps de jeu à haute intensité (%)	Temps de jeu en marche arrière (%)	Nombre de sprint par match (n)
Bracko et al. (1998b)	Attaquants (10)	Professionnel (NHL)	2 périodes analysées, 2 matchs	3,4	65,5	10,8	5,0	4,9	
Jackson et al. (2017)	Joueurs de champ	Universitaire	3 matchs	9,0	60,0	17,0	1,0	8,0	
	Attaquants (13)			8,0	64,0	20,0	1,0	3,0	4 ± 2
	Défenseurs (7)			13,0*	54,0	13,0*	0,0	17,0*	6 ± 2
Brocherie et al. (2018)	Joueurs de champ (10)	International sénior	1 match du Championnat du Monde	~18,8	~23,0	~33,2	~16,6	~12,1	~14,0
Lignell et al. (2018)	Joueurs de champ Attaquants (24) Défenseurs (11)	Professionnel (NHL)	1 match						19 ± 1 (8-32)

* différence significative entre les postes ($p < 0,05$).



2.3 Décrire la mécanique des déplacements, une nécessité pour l'entraînement

Le développement récent de nouvelles technologies portables (*i.e.*, centrales inertielles ou LPS) permet une meilleure quantification des demandes physiques dans des activités sportives variées. Par exemple, l'utilisation des centrales inertielles, incorporant un accéléromètre tri-axial (quantifiant les déplacements linéaires dans toutes les directions – accélérations et freinages), des gyroscopes (mesurant les déplacements et vitesses angulaires) et des magnétomètres (identifiant la direction et l'orientation de la position de l'objet), offre la possibilité de mesurer le *player load* (PL), indicateur considéré comme reflétant la charge externe. Bien que plusieurs définitions soient utilisées pour définir le PL (Bredt et al., 2020), celui-ci représente le taux de variation instantanée de l'accélération dans les trois plans de l'espace en fonction du temps (Nicolella et al., 2018). Le système LPS fonctionne lui sur la base de signaux de fréquence radio qui permettent de mesurer la position en fonction du temps entre plusieurs stations fixes situées tout autour de l'espace de jeu et un récepteur mobile porté par les joueur·euse·s. À ce jour, aucune étude n'a investigué la fiabilité et la reproductibilité d'un tel système dans les conditions spécifiques du hockey sur glace, générant qui plus est des vitesses supérieures aux sports pour lesquels nous disposons de plus d'expérience et de recul sur ces méthodes d'analyse.

Bien qu'il soit difficile de comparer les différentes études analysant la mécanique des déplacements en raison de différences méthodologiques (analyse notationnelle *vs.* LPS) ou matérielles (MCS *vs.* LPS), ces travaux permettent d'éclairer les caractéristiques spécifiques en fonction du niveau de jeu ou de l'âge. La distance parcourue à très haute intensité (*i.e.*, > 21 km.h⁻¹ ; ~1300 m) semble être supérieure chez les juniors comparée aux séniors, en particulier pour les attaquants (Tableau 3). Douglas et Kennedy (2020) rapportent des distances à intensités moyennes (*i.e.*, vitesse comprise entre 14 et 17 km.h⁻¹) et élevées (*i.e.*, vitesse comprise entre

17 et 21 km.h⁻¹) deux fois supérieures à la distance parcourue à faible intensité (*i.e.*, < 14 km.h⁻¹; ~750 m) (Figure 4). La distance des sprints (~17 m) est inférieure à celle rapporté par Lignell et al. (2018) au cours d'un match NHL (~26 m). Les vitesses maximales lors d'un sprint atteignent 27 à 30 km.h⁻¹ (Brocherie et al., 2018; Douglas et Kennedy, 2020; Lignell et al., 2018) alors que la vitesse moyenne se situe entre 13 km.h⁻¹ chez des juniors (Douglas et Kennedy, 2020) et 17 km.h⁻¹ chez les séniors (Brocherie et al., 2018). Il semblerait que l'évolution du jeu tende à augmenter les actions réalisées à haute intensité représentées par les vitesses maximales atteintes alors que l'intensité globale (*i.e.*, vitesse moyenne lors d'un match) du jeu semble rester constante.

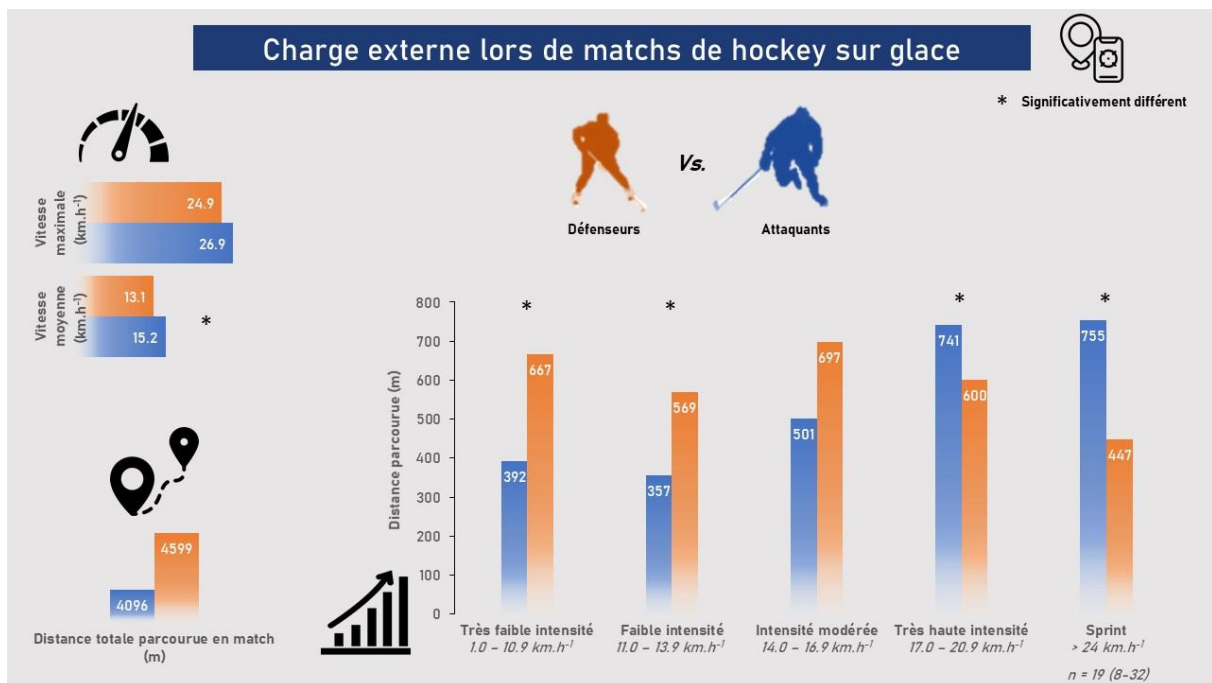


Figure 4. Comparaison de charge externe lors de matchs de hockey sur glace en fonction du poste.

Adapté de Douglas et Kennedy (2020).

D'un point de vue méthodologique, il est important de noter la disparité de définition des seuils d'intensité ou de vitesse dans la littérature scientifique. Les études se basant sur de l'analyse notationnelle en utilisant une caméra simple définissent ces seuils à partir de critères visuels de posture ou de type d'actions. Plus récemment, Douglas et Kennedy (2020) ont défini les seuils de vitesse en se basant sur ceux rapportés par Lignell et al. (2018) (Figure 4). Cependant, il est

important de noter que Lignell et al. (2018) ont utilisé des seuils définis pour le football. D'une part, cette définition des seuils ne peut pas être directement transférée aux spécificités du hockey sur glace impliquant des actions avec de fortes accélérations et freinages sur de courtes distances notamment au vu des problématiques de traitement des données par les systèmes (*i.e.*, filtrage des données produisant des retards ou déviations) (Crang et al., 2020; Link et al., 2018). D'autre part, l'utilisation d'indicateurs basés sur la mesure des variations de vitesse (*i.e.*, PL) semble plus adéquate pour quantifier la demande mécanique en hockey sur glace. Il serait d'ailleurs intéressant de comparer l'analyse de la charge mécanique en utilisant les critères de vitesse à celle utilisant les indicateurs de type PL. Allard et al. (2020) sont les seuls à avoir utilisé les centrales inertielles afin de quantifier les charges externes durant des entraînements et matchs chez des joueurs professionnels [ligue Américaine de hockey (AHL)]. A ce jour, c'est la seule étude qui rapporte la charge externe d'une équipe professionnelle sur une saison entière. Alors que le calendrier AHL exige une fréquence de matchs élevée (3 ± 1 matchs par semaine), les auteurs observent une charge d'entraînement stable tout au long de la saison (28 semaines). En revanche, la charge et l'intensité (*i.e.*, charge relative au temps d'entraînement) des entraînements sont inférieurs à ceux obtenus en match avec une variabilité inter-individuelle importante en raison d'un large groupe de joueurs (permettant une rotation notable dans les alignements) ou des blessures.

Tableau 3. Distribution du temps passé à différents niveaux d'intensité de jeu, basés sur un critère de vitesse de déplacement lors de matchs de hockey sur glace à différents niveaux de jeu, issue de sept études publiées entre 1972 et 2020.

Référence	Méthode utilisée	Poste (n)	Niveau	Conditions expérimentales	Distance totale (m)	Distance à basse intensité (1.0-13.9 km.h ⁻¹) (m)	Distance à intensité modérée à haute (14.0-20.9 km.h ⁻¹) (m)	Distance à très haute intensité (> 21.0 km.h ⁻¹) (m)	Vitesse maximale (et moyenne) (km.h ⁻¹)
Seliger et al. (1972)	Caméra unique	Joueurs de champ (13)	International sénior	1 match	5160 (4860-5620)				
Green et al. (1976)	Caméra unique	Attaquants (7) Défenseurs (3)	Universitaire	1 à 2 matchs	5553				(16,1 ± 3,6) (9,5 ± 2,3)
Dillman et al. (1984)	Caméra unique	Attaquants (18) Défenseurs (4)	International	1 match					18,1 ^b (15,5) ^b 17,5 ^b (13,5) ^b
Akermark et al. (1996)	Caméra unique	Joueurs de champ (14) Attaquants Défenseurs	2 nd division Suédoise	1 match	4349 ± 262 4370 ± 381 4350 ± 464				(13,2 ± 0,8) (13,7 ± 0,9) (11,3 ± 0,9) *
Brocherie et al. (2018)	Caméra unique	Joueurs de champ (10)	International sénior	1 match du Championnat du Monde	4441 ± 972				(16,6 ± 3,6)
Lignell et al. (2018)	Système multiple caméras (MCS)	Joueurs de champ Attaquants (24) Défenseurs (11)	Professionnel (NHL)	1 match	4606 ± 219 4237 ± 248 5445 ± 337 *	~1918	~1659	~1031	28,6 ± 0,1 (25,5 ± 0,1) (17,0 ± 0,4) (14,8 ± 0,5) *
Douglas et Kennedy (2020)	Système de positionnement radar local (LPS)	Attaquants (13) Défenseurs (7)	International U20	5 matchs du Championnat du Monde	3681 ± 1058 4002 ± 787	~749 ~1236*	~1437 ~1719	~1496 ~1047	26,9 ± 5,0 (14,5 ± 3,5) 24,9 ± 5,0 (12,6 ± 3,2)

^b résultats basés uniquement sur l'analyse de séquence d'une durée de 13,5 s, * différence significative entre les postes ($p < 0,05$).

2.4 Facteurs d'influence des caractéristiques du jeu en hockey sur glace

Plusieurs facteurs comme le poste, les situations spécifiques (*i.e.*, pénalités), le niveau de jeu (cf. [section I.2.3](#)) ou encore le genre (cf. [section I.3.2](#)) semblent influencer les caractéristiques du jeu au hockey sur glace. Par exemple, les études ont démontré des différences de temps de jeu (21 min *vs.* 28 min, respectivement) et du nombre de présence (14 *vs.* 21, respectivement) entre les attaquants et les défenseurs (Green et al., 1976; Green et al., 1978). Plus récemment, certaines études (Akermark et al., 1996; Lignell et al., 2018; Logan-Sprenger et al., 2011) constatent également une différence significative entre les postes concernant le temps de jeu effectif (*i.e.*, 23% à 47% de temps de jeu effectif par présence en plus pour les défenseurs comparés aux attaquants) même si Douglas et Kennedy (2020) rapportent que ces différences sont faibles. Ces différences entraînent par conséquent un ratio effort:récupération inférieur pour les défenseurs comparé aux attaquants (Figure 2) (Leger, 1980). Thoden et Jette (1975) montraient quant à eux que les attaquants parcouraient une distance moyenne par présence plus importante que les défenseurs (58,5 m *vs.* 50,8 m, respectivement). Plus récemment, Akermark et al. (1996) ne montrent aucune différence entre les postes sur la distance totale parcourue, contrairement aux résultats rapportés par Lignell et al. (2018) (distance totale parcourue supérieure de 29% pour les défenseurs comparativement aux attaquants). Les vitesses moyennes rapportées au cours d'un match sont inférieures chez les défenseurs comparées à celles obtenues chez les attaquants (~15% ; $14,8 \pm 0,5$ *vs.* $17,0 \pm 0,4$ km.h⁻¹, respectivement) (Akermark et al., 1996; Douglas et Kennedy, 2020; Lignell et al., 2018) et témoignent d'un nombre plus important de périodes « statiques » lors d'actions spécifiques telles que les actions installées en zone offensive (*i.e.*, défenseurs « statiques à la ligne bleue). De plus, les attaquants parcourent 33% et 55% de distance supplémentaire lors d'activités à haute intensité et en sprint comparée aux défenseurs en lien avec des actions majoritaires sur des zones de jeu plus longues (*e.g.*, pressing, repli défensif, débordements).

Selon les études, le nombre de joueur pour lesquels les caractéristiques du jeu ont été analysées varient grandement (10 à 36 joueurs) (Brocherie et al., 2018; Lignell et al., 2018). Or, leur place dans l'alignement (*i.e.*, deux premières lignes *vs.* deux autres lignes) peut avoir un impact important sur les caractéristiques du jeu (Leger, 1980). Par exemple, les joueurs qui se trouvent sur les deux premières lignes sont souvent considérés comme des joueurs clés de l'équipe et ont donc des temps de jeu supérieurs (*i.e.*, nombre et temps de présence notamment lors des situations de pénalité) (Bracko et al., 1998b).

Enfin, les situations spécifiques de pénalités semblent également influencer les caractéristiques temporelles du match. Douglas et Kennedy (2020) ont montré qu'en moyenne, le temps de jeu effectif par présence augmentait pour les défenseurs et les attaquants durant les situations de supériorités (+ ~13 s) alors qu'il y avait une faible augmentation (+ ~4 s) seulement pour les défenseurs en situation d'infériorité.

2.5 Déroulement du match : un impact sur les activités à haute intensité

Des divergences existent dans la littérature scientifique concernant l'effet du déroulement d'un match sur les caractéristiques du jeu. Quelques études montrent des valeurs similaires en termes de vitesse moyenne évaluée de façon perceptive (~3,7 m.s⁻¹) (Akermark et al., 1996) ou d'augmentation de la distance parcourue à haute intensité en utilisant le MCS (Lignell et al., 2018) entre les périodes (+6% pour la période 2 et +22% pour la période 3 en référence à la période 1). Néanmoins, la majorité des études tendent à montrer une diminution significative des activités à haute intensité, du nombre de sprints (-47%) (Brocherie et al., 2018), de la distance parcourue en sprint (-21%) (Brocherie et al., 2018; Douglas et Kennedy, 2020), de la vitesse moyenne de sprint (-8%) (Lignell et al., 2018) ou des indices de charge mécanique [PL et *on-ice load* (OIL)] dérivées des centrales inertielles (-8% à -13%) (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a) (Figure 5). Plusieurs explications sont plausibles dans le contexte particulier du hockey sur glace. Une plus grande exigence en termes d'activité à haute intensité

entraîne l'apparition plus rapide de la fatigue et ainsi un déclin plus important des performances au fil des périodes d'un match (Mohr et al., 2003; Peeters et al., 2019; Sirotic et al., 2009). Cette suggestion est en accord avec les résultats rapportés dans d'autres sports collectifs avec changements illimités et volants (*i.e.*, basketball, football Australien ou lacrosse). Par exemple, les variables relatives aux courses à haute intensité sur une population élite de football Australien diminuent significativement du 1^{er} quart temps au 4^{ème} quart-temps au cours d'un match (Clarke et al., 2018; Coutts et al., 2010; Kempton et al., 2015). Parallèlement, la vitesse des activités à haute intensité sont inférieures durant le 3^{ème} tiers-temps comparé au 1^{er} tiers-temps lors d'un match de basketball chez des professionnels et jeunes (moins de 18 ans, U18), entraînant une diminution de nombre d'activités à haute intensité au fil du match (Ben Abdelkrim et al., 2010; Delextrat et al., 2015; García et al., 2020; Scanlan et al., 2015b; Stojanović et al., 2018; Vázquez-Guerrero et al., 2019).

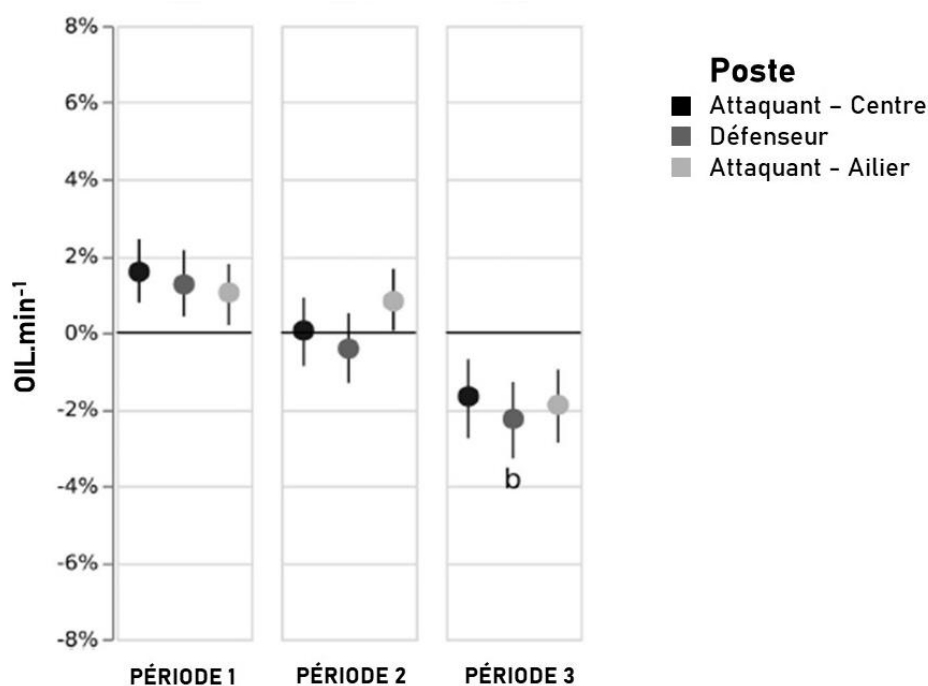


Figure 5. Valeurs de la charge mécanique (on-ice load) relative au temps ($OIL.min^{-1}$) de jeu par poste et période sur l'ensemble d'une saison de ligue Américaine de hockey sur glace.

^b La troisième période montre des valeurs inférieures aux autres périodes. Données correspondant aux valeurs moyennes (cercle) et 95 % d'intervalle de confiance (ligne verticale). D'après Allard et al. (2020).

Plusieurs perturbations physiologiques peuvent contribuer à ce déclin d'activités à haute intensité. La première concerne une importante diminution du glycogène musculaire au fil du match. Des études (Akermark et al., 1996; Vigh-Larsen et al., 2020a) rapportent une réduction d'environ 50% des stocks de glycogène musculaire suite à un match simulé de hockey sur glace (Figure 6). Cela met en avant l'utilisation importante du système anaérobie sur certaines phases de jeu. A contrario d'études plus anciennes qui rapportent une utilisation prédominante par les fibres musculaires de type I (Green et al., 1978; Montpetit et al., 1979), les auteurs montrent qu'à la fois les fibres lentes et rapides sont significativement impactées.

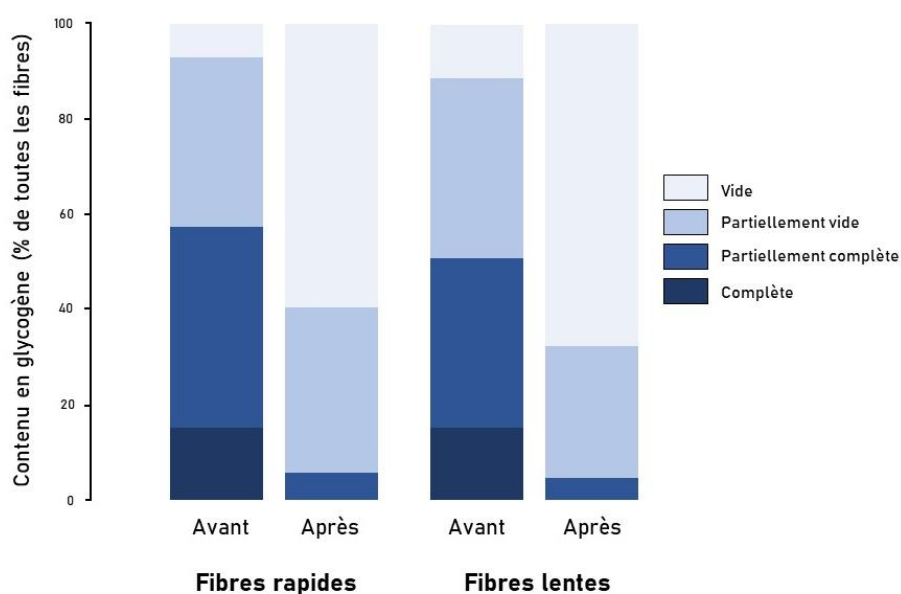


Figure 6. Contenu du muscle en glycogène en fonction de la typologie des fibres musculaire avant et après un match simulé de hockey sur glace sur 6 joueurs. D'après Vigh-Larsen et al. (2020a).

L'autre perturbation physiologique en lien avec cette consommation importante du glycogène musculaire concerne l'accumulation du lactate musculaire et sanguin. Nous l'avons vu précédemment (cf. [section I.2.1](#)), l'ensemble des activités explosives et répétées au cours d'un match nécessite une production rapide d'ATP par les filières anaérobies et plus particulièrement par le système glycolytique. L'ATP est alors le produit de la glycolyse qui utilise le glucose comme substrat énergétique provenant à la fois de la circulation sanguine, des réserves en glycogène musculaire et hépatique. En l'absence ou lors d'un déficit d'oxygène, le produit de

l'oxydation du glucose par la glycolyse correspond à deux molécules de lactate associées à deux ions H⁺ responsables de la diminution du pH musculaire. Ainsi, Vigh-Larsen et al. (2020a) rapportent des valeurs de concentration en lactate musculaire élevées (38 mmol.kg.d.w⁻¹) et pouvant aller jusqu'à 70 mmol.kg.d.w⁻¹ suite à des présences. Concernant les concentrations sanguines en lactate, Noonan (2010) rapporte des valeurs de l'ordre de 8,15 ± 0,46 mmol.L⁻¹ avec une forte variabilité inter- et intra-individuelle (4,4-13,7 mmol.L⁻¹) lors d'une présence et avec un prélèvement dans les 2 min de récupération au banc. L'auteur rapporte que les deux valeurs les plus élevées (13,7 et 12,4 mmol.L⁻¹) font suite aux deux présences de plus longue durée sur la glace, sans pour autant en tirer une relation de causalité compte-tenu du faible nombre de sujets évalués. En revanche, Vigh-Larsen et al. (2020a) ont démontré que le pH musculaire était très légèrement diminué (-0,18 à -0,32 -log H⁺) lors d'un match, laissant à penser que l'acidose musculaire n'est pas un paramètre probant de la détérioration de la performance au cours du match.

2.6 Une évolution de l'activité vers des activités de plus en plus intenses nécessitant un entraînement et un suivi adapté en fonction du poste et du genre

Pour résumer, bien que les valeurs moyennes de la majorité des caractéristiques de jeu semblent rester stables au fil de l'évolution du hockey sur glace (*i.e.*, temps de jeu effectif total, nombre de présence), les études récentes suggèrent une accélération globale du jeu en lien avec une diminution du temps de jeu effectif par présence (40-45 s) durant les matchs plus récents comparés à des matchs plus anciens. Cette évolution, en partie due à un nombre plus important de joueurs disponibles et à des choix stratégiques de la part de l'entraîneur, a semble-t-il eu pour effet d'augmenter les activités à haute intensité durant les présences. Les attaquants passent une plus grande partie de leur temps de jeu à patiner vers l'avant à haute intensité comparés aux défenseurs, alors que ceux-ci disposent d'un temps de jeu effectif plus important à intensité faible à modérée. Ces demandes physiques spécifiques par poste doivent être pris en compte par les entraîneurs afin de planifier au mieux des programmes d'entraînements plus

individualisés. Le suivi de la charge externe en utilisant des indicateurs basés sur la mesure des variations de vitesse (*i.e.*, centrales inertielles) semblent être pertinent afin d'optimiser ces entraînements en relation avec les exigences du hockey sur glace. Cependant, la grande majorité de ces études concernent une population masculine et il existe un manque de données scientifiques dans le secteur féminin, afin de mieux appréhender les contraintes spécifiques liées au genre (Emmonds et al., 2019). Les différences en termes de contexte, règles du jeu, propriétés physiologiques, biomécaniques et/ou caractéristiques physiques (Bracko et Fellingham, 2001) ne permettent pas d'appliquer nécessairement au public féminin les résultats obtenus auprès d'équipes masculines. Il serait donc intéressant de déterminer, dans un contexte de compétition, les caractéristiques spécifiques liées au hockey sur glace féminin.

3. SPÉCIFICITÉ DU HOCKEY SUR GLACE FÉMININ

3.1 Contexte et spécificités

Chaque année non olympique depuis 1990 a lieu le championnat du monde selon des groupes établis par le classement mondial et les résultats des précédentes éditions (montées et descentes). Les années olympiques, seuls les championnats du monde des divisions inférieures à la division Elite, regroupant les 10 meilleures nations, peuvent avoir lieu. À ce jour, 36 nations participent aux différents championnats du monde féminins (IIHF, 2020). Depuis les Jeux Olympiques d'hiver de Nagano (1998), 8 nations (les 5 premières nations mondiales, 2 équipes qualifiées par deux tournois qualificatifs et le pays hôte) s'affrontent pour le titre de championnes Olympiques. À ce jour, seuls le Canada par quatre fois (2002, 2006, 2010, 2014) et les Etats-Unis par deux fois (1998 et 2018) se partagent les titres, tout comme lors des championnats du monde, alors que trois pays européens (Suède, Finlande et Suisse) complètent le classement des médailles. Pour les prochains Jeux Olympiques de Pékin en 2022, la Fédération Internationale de Hockey sur glace (IIHF) et le Comité International Olympique

(CIO) ont décidé d'ouvrir le tournoi à deux nouvelles équipes portant alors le nombre à 10 (6 premières équipes mondiales qualifiées, trois équipes qualifiées par des tournois qualificatifs dédiés et la Chine, le pays hôte de l'édition 2022).

Il existe aujourd'hui, au niveau du hockey sur glace féminin, une grande disparité en termes de compétitivité. Dans ce contexte, il est intéressant de noter que peu de littérature concerne des joueuses de niveau élite et le manque de consistance au niveau de la terminologie et de la classification concernant la population étudiée ne permet pas de comparer les études entre elles. Geithner et al. (2006) considèrent par exemple des joueuses universitaires Canadienne comme une population élite alors que selon la classification de Decroix et al. (2016), il s'agirait simplement de joueuses compétitives (Tableau 4).

Tableau 4. Critères de recommandations pour définir le niveau de performance sur une population féminine.

Niveau de performance	Sédentaire	Loisir	Entraînée	Compétitive	Professionnelle
Nombre d'heures / semaine	0	1-7	5-8	8-15	>17
Nombre d'entraînements / semaine	0	>1	>2	>3	>5
Expérience (années)	0	0-6	>2	>3	>6

Adapté de Decroix et al. (2016).

À ce jour, et au vu des résultats dans les différentes compétitions internationales, seules des nations comme le Canada ou les Etats-Unis peuvent être considérées comme une population élite ou professionnelle selon cette classification (Decroix et al., 2016). Cependant, bien que considérée comme des sportives élites ou professionnelles selon la classification de Decroix et al. (2016), les joueuses de hockey sur glace, au contraire des hommes, ne bénéficient à ce jour que de peu de ligues professionnelles ou de support financier leur permettant de vivre pleinement de leur activité (Fink, 2015). Depuis l'arrêt en juin 2019 de la ligue nationale Nord-

Américaine féminine (NHL), qui faisait figure de championnat de référence au niveau mondial, quelques championnats persistent comme en Suède, en Finlande ou en Russie, regroupant les meilleures joueuses. La majorité des autres championnats restent des championnats mineurs ou universitaires et/ou privés comme au Canada et aux États-Unis. Dans certains pays comme la France, et souvent par manque de licenciées (2405 soit 11% des licences ; +210% en 8 ans chez les jeunes), il n'est pas rare que les joueuses de hockey sur glace soient intégrées à des équipes masculines notamment chez les plus jeunes (FFHG, 2018). Elles transitent ensuite vers des équipes uniquement féminines majoritairement pour des questions de sécurité. Cette expérience mixte, partagée par une grande majorité des joueuses de hockey sur glace, produit des effets positifs d'un point de vue technique (*i.e.*, patinage, maniement du palet) et psychologique (confiance, compétitivité, *leadership*) selon les résultats rapportés par Lamoureux (2013). D'un point de vue réglementaire, la seule différence entre les deux genres se situe au niveau des « charges » (ou mise en échec). Cette technique représente un contact de face ou de côté, effectué avec les hanches, le corps ou l'épaule, entre un joueur de champ avec un joueur de champ adverse ayant pour objectif de séparer l'adversaire du palet. Ce geste technique est interdit chez les femmes depuis 1990 (IIHF, 2019) car, à l'époque, il existait une trop grande différence physique entre les joueuses nord-américaines et celles des autres pays rendant ainsi l'application des mises en échec dangereuse.

3.2 Caractéristiques du jeu féminin vs. masculin

À ce jour, seules deux études ont rapporté des caractéristiques de match de hockey sur glace féminin chez des jeunes joueuses (moins de 14 ans) (Reed et al., 2017) et sur un niveau universitaire Canadien (Jackson et al., 2016). Oscillant entre 10 min et 14 min en moyenne, le temps de jeu effectif total s'avère être inférieur à celui rapporté chez les hommes (entre 15 et 24 min). Cependant, tout comme chez les hommes, Reed et al. (2017) rapportent une large variabilité inter-individuelle (9-18 min) avec des temps de jeu supérieur pour les défenseurs comparés aux attaquants (14,0 vs. 10,3 min, respectivement) (Jackson et al., 2016). Le temps

de jeu effectif par présence est compris entre 40 s et 50 s et le nombre de présences varie entre 5 et 6 par période (Jackson et al., 2016). Jackson et al. (2017) sont les seuls à avoir comparé les mouvements entre les deux genres sur trois matchs de niveau universitaire Canadien. Les auteurs rapportent des similitudes entre les deux genres dans la hiérarchie des mouvements répertoriés avec une majorité des mouvements de glisse vers l'avant (60%), suivi par du patinage vers l'avant à intensité modérée (17%), une position debout statique (9%), du patinage arrière (8%), des duels (2%), des départs de sprint vers l'avant (2%) et du sprint maximal vers l'avant (1%). Cependant, les hommes glissent deux fois plus que les femmes (60% vs. 36%, respectivement) alors que les femmes patinent vers l'avant à intensité modérée (31% vs. 17%, respectivement) en lien avec des vitesses plus faibles (Budarick et al., 2018) (Figure 7) et bataillent plus longtemps (6% vs. 2%, respectivement).

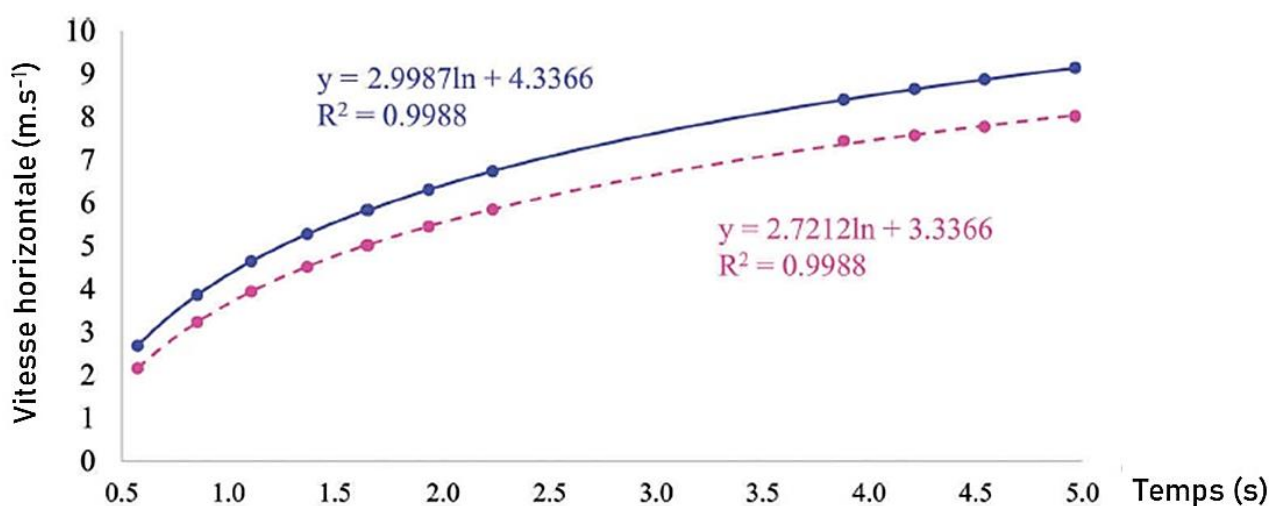


Figure 7. Evolution de la vitesse horizontale sur un sprint en patinage de 34 m selon le genre. (bleu pour les hommes et rose pour les femmes). D'après Budarick et al. (2018).

Du point de vue de la charge externe, trois études se sont intéressées à comparer (i) les contraintes lors de matchs et entraînements (Douglas et al., 2019b), (ii) l'effet du résultat sur différentes variables de charge externe (Douglas et al., 2019a) et (iii) l'effet du niveau de jeu sur ces mêmes variables de charge externe (Douglas et al., 2020). Dans leur première étude, Douglas et al. (2019b) montrent qu'il existe une différence significative pour les deux postes entre la charge interne (*i.e.*, cardiaque) rencontrée chez des joueuses de l'équipe nationale du

Canada lors des entraînements comparée à celle rencontrée lors des matchs [taille d'effet (ES) > 1.5). Ces résultats sont en adéquation avec ceux rapportés par Spiering et al. (2003) avec une différence significative ($p < 0,05$) entre la FC atteinte lors des présences en match et celle atteinte lors des exercices à l'entraînement (90% vs. 76% de la FC_{max} , respectivement) chez les joueuses de l'équipe nationale des Etats-Unis. D'un point de vue de la charge externe, et en accord avec les résultats d'Allard et al. (2020) chez des joueurs professionnels, Douglas et al. (2019b) démontrent également une différence significative du PL entre les entraînements et les matchs (ES > 2,6) pour les deux postes. Là encore, il apparaît que les attaquants supportent des volumes et intensités plus importants que les défenseurs que ce soit à l'entraînement ou en compétition (ES s'échelonnant de 0,26 à 0,55). Cependant, les résultats montrent que la charge externe reflétant l'intensité (*i.e.*, charge relative au temps, $PL \cdot \text{min}^{-1}$) est similaire entre l'entraînement et la compétition chez les attaquants. Dans leur deuxième étude, Douglas et al. (2019a) montrent que les activités à haute intensité et plus particulièrement chez les attaquants ont un impact sur le résultat final du match. Enfin, dans leur dernière étude, Douglas et al. (2020) démontrent qu'il existe des différences significatives en termes d'activités à haute intensité (variables de $PL \cdot \text{min}^{-1}$ et nombre d'efforts explosifs relatif au temps de présence) que ce soit à l'entraînement (ES égal à 0,45 et 0,49, respectivement) ou en compétition (ES > 1,5 pour les deux variables) entre un niveau élite comparé à un niveau sub-élite. Ces données permettent d'établir des « objectifs » d'intensité notamment dans la planification des entraînements sur la glace dans un but de développer les joueuses vers les exigences du haut niveau. L'ensemble de ces résultats est à mettre également en relation avec les résultats des tests physiques obtenus hors glace. En effet, bien que les mouvements effectués soient dans des plans et directions différents du patinage, certaines études démontrent des corrélations entre des tests de puissance réalisés hors glace (*i.e.*, sauts verticaux ou horizontaux ou puissance mesurée à l'aide du test de Wingate sur ergocycle) et les performances en patinage chez des joueuses de hockey sur glace (Boland et al., 2019; Bracko, 2001; Douglas, 2015; Henriksson et al., 2016; Janot et al., 2015; Ransdell et al., 2013).

4. LIMITES ET CONTRAINTES DES ÉVÈNEMENTS MAJEURS

4.1 Limites méthodologiques

Bien que la littérature scientifique concernant le hockey sur glace ait pris un réel essor depuis les années 1990, les disparités en termes de populations étudiées, de niveaux d'entraînement, de protocoles et de variables considérées rendent complexes d'éventuelles comparaisons entre les études disponibles. Par exemple, lors de leur analyse de l'activité via l'utilisation de la vidéo, Lafontaine et al. (1998) n'incluent pas la durée passée dans chaque catégorie de mouvement comparativement à l'étude de Bracko et al. (1998b). D'autre part, le nombre de catégories de mouvement considérées varie de 5 à 27 catégories (Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2016, 2017; Montgomery et al., 2004). Un trop grand nombre de catégories de mouvements référencés semble être trop discriminant et ainsi limiter les différences observées (Lafontaine et al., 1998). De ce fait, un total de sept à dix catégories de mouvements semble être optimal dans une analyse notationnelle de l'activité de hockey sur glace (Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2016, 2017). Bien que pratique à mettre en place et peu coûteuse (Hughes et Franks, 2004), l'analyse notationnelle nécessite cependant un nombre et une expertise des observateurs ainsi qu'une disponibilité importante à la récolte des données (Allard, 2019; Duthie et al., 2003). D'autre part, selon Barris et Button (2008), en raison du temps considérable requis pour collecter et analyser manuellement ces données, les équipes de recherche ont tendance à se concentrer uniquement sur un petit nombre de joueur·euse·s dans des zones de jeu prédéfinies ou sur le·la joueur·euse en possession du palet (*i.e.*, porteur) et ceux se trouvant à proximité du porteur. Ainsi, le développement des nouvelles technologies, même s'il n'est pas sans limites, pousse les investigateurs à progressivement abandonner ce type d'analyse.

Dans le cas de figure où la charge externe est appréhendée à l'aide de capteurs embarqués (*e.g.*, centrales inertielles), les études n'utilisent pas les mêmes variables limitant également la comparaison entre elles. D'une part, alors que Douglas et al. (2019a; 2019b; 2020) utilisent la

variable PL pour quantifier la demande mécanique, Allard et al. (2020) utilisent la variable OIL, qui considère uniquement les accélérations $> 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. D'autre part, certaines études utilisent un large choix de variables spécifiques au hockey sur glace (Chambers et al., 2015) émanant des traitements élaborés par les compagnies (*i.e.*, OIL, force de poussée, charge de patinage) (Douglas et al., 2019a; 2020) sans qu'à ce jour, la littérature scientifique n'ait démontré leur validité ou leur reproductibilité. D'ailleurs, plusieurs études montrent qu'une attention particulière doit être portée vis-à-vis des différentes méthodes de traitement permettant d'accéder au PL (Bredt et al., 2020; Buchheit et Simpson, 2017; Malone et al., 2017; Nicoletta et al., 2018; Thornton et al., 2019) ou en ce qui concerne les mouvements considérés (Crang et al., 2020). Récemment, Hollville et al. (2020) ont montré que le PL surévaluait la charge appliquée au CM comparativement à celle établie à l'aide de plateformes de force (*i.e.*, méthode de référence). Cette surestimation de la charge provient notamment de la non prise en compte du changement du plan de référence lors de la variation d'orientation de la centrale induisant des composantes d'accélérations fictives majorées lors de mouvements à haute intensité. Enfin, standardiser les méthodes d'analyse afin d'évaluer plus précisément l'activité spécifique du sport est recommandé. Par exemple, et bien que ce soit une spécificité du hockey sur glace, exclure des analyses les arrêts de jeu ou les périodes de récupération sur le banc pourrait limiter la sous-estimation potentielle des périodes les plus intenses (Whitehead et al., 2018) comme cela a été démontré dans d'autres sports collectifs utilisant les changements volants illimités (Fox et al., 2020).

4.2 Contraintes des évènements majeurs : un calendrier dense à prendre en compte

La pratique compétitive du hockey sur glace impose d'importants stress physiques sur les joueur·euse·s, tant au niveau amateur que professionnel (Allard, 2019). En lien avec l'engouement populaire et les enjeux financiers toujours plus importants, la majorité des grands championnats ont développé des calendriers de plus en plus denses laissant ainsi peu de place aux séances d'entraînement sur glace et à la préparation physique hors glace (Neeld, 2018). De

ce fait, les entraîneurs et joueur·euse·s doivent habilement manipuler fatigue, récupération, blessures et enjeux de performance.

La formule des compétitions diffère énormément en fonction des ligues, pays ou compétitions (Figure 8). En AHL (*i.e.*, anti-chambre de la NHL), Allard et al. (2020) une moyenne de 3 ± 1 matchs, 2 ± 1 entraînements sur glace et 1 ± 1 « morning skate » (*i.e.*, réveil musculaire le matin du match) par semaine. De ce fait, durant la saison, les joueurs passent quasiment autant de temps en match qu'à l'entraînement. Ce rythme particulier peut alors entraîner deux situations complexes et opposées chez les joueurs : soit un désentraînement pour les joueurs n'ayant pas un temps de jeu suffisant, soit un surmenage pour les joueurs ayant des temps de jeu trop conséquents (Cox et al., 1995). Dans le premier cas, plusieurs études rapportent que l'intensité et le volume d'entraînement ne semblent pas suffisants car trop éloignés des exigences de la compétition pour produire des adaptations physiques nécessaire au maintien d'un état de forme des joueur·euse·s (Allard et al., 2020; Cox et al., 1995; Douglas et al., 2019b; Spiering et al., 2003). Dans le deuxième cas, l'enchaînement effréné des matchs et entraînements associé aux différents stress psychologiques (*i.e.*, voyage, média, sponsors, négociations de contrat, place dans l'équipe) sont autant de facteurs qui peuvent altérer la récupération (Doeven et al., 2018; Quarrie et al., 2017), accélérer l'apparition de la fatigue et diminuer la performance physique au fil de la saison (Whitehead et al., 2019).

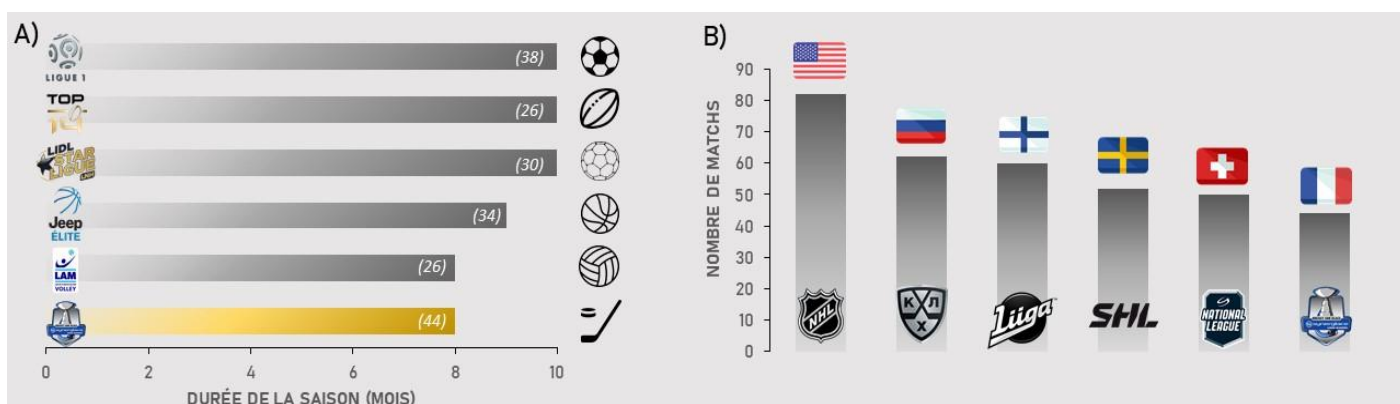


Figure 8. Caractéristiques (durée de la saison et nombre de matchs) des différents sports collectifs en France et dans les différentes ligues majeures de hockey sur glace.

Le nombre de matchs comprends uniquement les matchs de saison régulière (entre parenthèses, panel A).

Comme évoqué précédemment (cf. [section I.3.1](#)), les Championnats du Monde qui clôturent chaque saison s’organisent aussi sur des formats courts avec jusqu’à six matchs en neuf jours pour les phases de groupe et quatre matchs en six jours pour les phases finales (Figure 9). Tous les quatre ans, le hockey sur glace fait partie du programme des Jeux Olympiques d’hiver, depuis 1920 à Anvers pour les hommes et 1998 à Nagano pour les femmes. Le calendrier impose alors de jouer six matchs en 15 jours pour la phase de poule, suivi d’une phase finale à élimination directe avec match tous les trois à quatre jours.

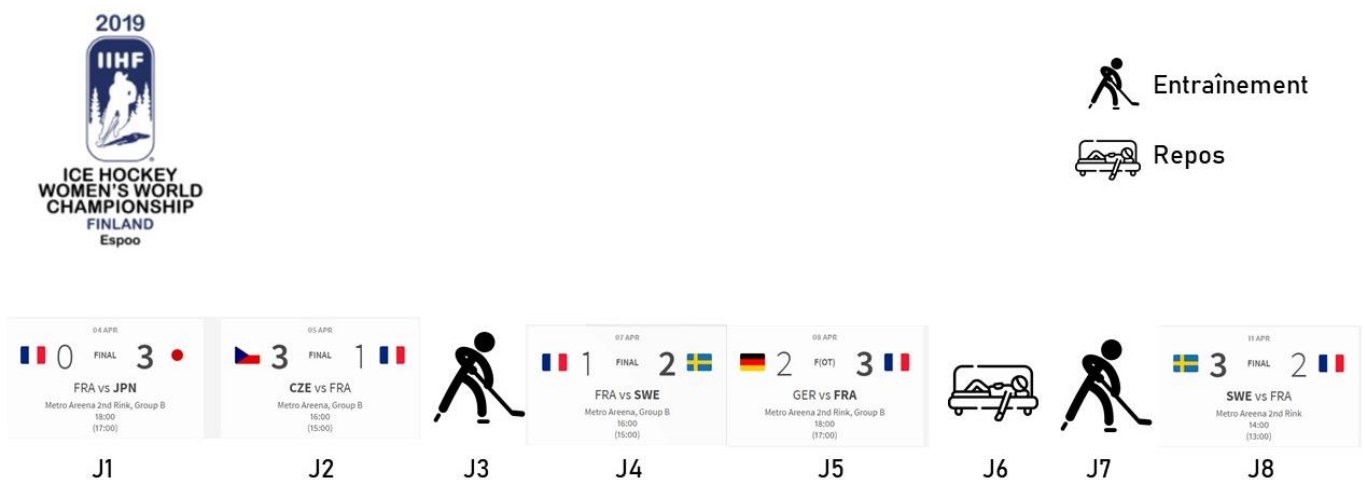


Figure 9. Calendrier de compétition de l’équipe de France de hockey sur glace féminine lors des Championnats du Monde Elite à Espoo (Finlande) en Avril 2019.

Cependant, à ce jour, l’ensemble des études considère la charge externe au cours d’un seul match (Akermark et al., 1996; Bracko et al., 1998b; Brocherie et al., 2018; Lignell et al., 2018), à partir d’indicateurs moyens calculés sur plusieurs matchs (Douglas et al., 2019a; Douglas et Kennedy, 2020; Douglas et al., 2019b; Douglas et al., 2020; Rago et al., 2020; Stanula et al., 2016; Stanula et Rocznio, 2014) ou au cours d’une saison entière (Allard et al., 2020; Peterson et al., 2015a). Ainsi, aucune étude ne considère les contraintes inhérentes à l’enchaînement des matchs. Or, plusieurs facteurs contextuels (*e.g.*, qualité/classement de l’adversaire, nombre de matchs précédents, nombre de jours de repos, renouvellement de l’effectif), physiques (*i.e.*, fatigue transitoire et/ou chronique) ou psychologiques (*i.e.*, résultats précédents) peuvent

influencer le déroulement d'un match et ainsi les variables de charge externe (Dalton-Barron et al., 2020; Julian et al., 2020; Paul et al., 2015). Afin d'optimiser la performance durant ces périodes chargées, le staff doit suivre et réguler au mieux les différentes contraintes/charges (*e.g.*, interne et externe) d'un point de vue collectif mais surtout individuel, afin d'optimiser la récupération nécessaire à l'enchaînement des matchs (Lacome et al., 2018a; Marqués-Jiménez et al., 2017).

Caractéristiques du hockey sur glace féminin



Figure 10. Synthèse de l'analyse du hockey sur glace féminin.

Une mise à jour des caractéristiques de jeu liée au hockey féminin de haut-niveau associée à la quantification de charge externe en situation de compétition (*i.e.*, prise en compte de l'enchaînement des matchs) est nécessaire afin d'améliorer et de comprendre la performance. Afin de développer les phases de haute intensité qui semblent être primordiales et principalement modifiées lors des matchs, une analyse des déterminants musculaires de la performance en hockey sur glace permettrait de mieux définir les méthodes d'entraînement à mettre en œuvre. Définir de manière individuelle ces déterminants dans les situations spécifiques liées au patinage semble d'autant plus pertinent.

II – PROFIL DE PERFORMANCE D'UN·E JOUEUR·SE DE HOCKEY SUR GLACE

Dans le souci de mieux comprendre la performance en hockey sur glace afin de pouvoir l'améliorer, il est important de redéfinir les différents facteurs qui l'influencent et interagissent. De manière plus générale, la performance dans les sports collectifs est une construction complexe qui dépend de la capacité du·de la joueur·euse à gérer plusieurs aspects du jeu, incluant les aspects physiques, les compétences motrices spécifiques ainsi que les prises de décisions en relation avec ses coéquipier·ère·s et adversaires (Grehaigne et al., 1999). Au vu des conditions spécifiques de la pratique, le·la joueur·euse de hockey sur glace doit acquérir des compétences techniques importantes en patinage et maniement de la crosse associées à des qualités physiques diverses (Pearsall et al., 2000).

1. NÉCESSITÉ D'UN PROFIL MUSCULAIRE COMPLET ALLIANT FORCE, PUISSANCE ET VITESSE POUR RÉPONDRE AUX EFFORTS INTERMITTENTS ET INTENSES

1.1 Évaluation des capacités musculaires : entre profilage et prédiction de performance

Le hockey sur glace s'avère être un sport complet qui requiert diverses qualités physiques et physiologiques afin de performer au plus haut niveau (Cox et al., 1995; Montgomery, 1988; Nightingale et al., 2013). En lien avec les contraintes logistiques (*i.e.*, disponibilité des infrastructures) et/ou méthodologiques de l'activité (*i.e.*, froid, luminosité), les évaluations physiques sont majoritairement effectuées hors glace lors de tests de terrain ou de laboratoire. Ces évaluations peuvent également servir de sélection vers le haut-niveau (Douglas, 2015). Par exemple, lors d'un évènement médiatique important organisé par la NHL (*i.e.*, la NHL Entry

Draft, NHLED), chaque année des jeunes joueurs de hockey sur glace sont évalués à l'aide d'une batterie de tests permettant de définir un classement final en fonction des résultats (Gledhill et Jamnik, 2007). Ce classement définit alors un critère de sélection pour les clubs de NHL afin de proposer des contrats aux jeunes joueurs. La batterie de tests comprend une évaluation des capacités aérobie et anaérobie et des qualités musculaires de force, vitesse et puissance. La grande majorité des études rapporte une corrélation significative entre les qualités physiques et la capacité à performer ou à être sélectionné pour le haut niveau (Burr et al., 2008; Delisle-Houde et al., 2018; Delisle-Houde et al., 2019a; Farlinger et al., 2007; Green et al., 2006; Janot et al., 2015; Lignell et al., 2018; Mascaro et al., 1992; Peyer et al., 2010; Potteiger et al., 2010; Ransdell et al., 2013; Runner et al., 2016; Vigh-Larsen et al., 2019). Cependant, certaines études rapportent une absence de corrélation entre performance hors glace et sur glace (Gilenstam et al., 2011; Haukali et Tjelta, 2015; Peterson et al., 2016; Williams, 2020) ou sélection pour le haut niveau (Vescovi et al., 2006).

1.2 La force

1.2.1 Déterminants de la production de force au niveau musculaire

Les propriétés des systèmes neuromusculaire et musculo-squelettique influencent les caractéristiques mécaniques du mouvement, et notamment les capacités de production de force et de vitesse. Cette force dépend de l'interaction entre (i) l'activation que le muscle reçoit de structures générant la propagation d'ordres moteurs (*i.e.*, aires cérébrales du cerveau) et (ii) les propriétés mécaniques et (iii) contractiles des éléments qui constituent le système musculo-squelettique [*i.e.*, surface de section transversale physiologique du muscle (PCSA), tension spécifique, relations force-longueur et force-vitesse (FV), typologie des fibres musculaires]. L'ensemble des structures impliquées dans la transmission du message nerveux du cerveau jusqu'à l'appareil contractile du muscle désigne le système neuromusculaire. Celui-ci est divisé en une composante centrale (*i.e.*, le cerveau, le tronc cérébral et la moelle épinière) et une

composante périphérique (*i.e.*, jonction neuromusculaire jusqu'au système musculo-squelettique).

L'unité fonctionnelle de base du système neuromusculaire est l'unité motrice (UM). Une UM est composée d'un motoneurone alpha et des fibres musculaires qu'il innerve (Enoka, 2008). Le système nerveux transmet via ce motoneurone un signal électrique nommé potentiel d'action (PA) entraînant la contraction des fibres et la production d'une action mécanique. La contraction musculaire provient de la formation, au sein de l'appareil contractile (*i.e.*, sarcomère), de ponts d'unions entre les filaments d'actine et de myosine, provoquant le glissement de manière synchrone de ces myofilaments (Huxley et Brown, 1967). Le nombre de ponts dépend notamment de la longueur du muscle (Gordon et al., 1966), de sa vitesse de contraction (Hill, 1938) et de la tension appliquée aux myofilaments (Linari et al., 2015). La force produite est finalement transmise via les jonctions musculo-tendineuses puis ostéo-tendineuses (*i.e.*, tissus conjonctifs) au squelette (Roberts, 2016).

1.2.1.1 La force maximale isométrique

La force maximale isométrique que le muscle est capable de produire (F_{\max} , en N) dépend de sa PCSA (en cm^2) et de sa force spécifique ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$). Il apparaît que le premier paramètre influençant la capacité de production de force d'un muscle est le nombre de fibres, et plus précisément le nombre de sarcomères disposés en parallèle dans le muscle (MacIntosh et Holash, 2000), dont il dispose. Pour cela, la PCSA est communément évaluée, via des techniques non invasives (*i.e.*, échographie, imagerie par résonance magnétique [IRM]). Cependant, lorsqu'un muscle est penné, l'angle de pennation des fibres musculaires peut entraîner une modification de l'axe de raccourcissement des fibres par rapport à celui du muscle. Ainsi, seulement une partie de la force produite par les fibres d'un muscle penné est exercée dans la direction de sa ligne d'action. Afin de mieux appréhender la projection de la PCSA dans cet angle, le volume est divisé par la longueur des fibres pennées (Lieber et Fridén, 2000). Enfin, afin de considérer la force maximale isométrique, il est également nécessaire de

mesurer la tension spécifique (*i.e.*, force produite par les fibres par unité de PCSA), dépendant notamment des propriétés des fibres musculaires constituant le muscle d'intérêt. Pour rappel, les fibres de type I (dites lentes) produisent peu de force et ont une vitesse de contraction lente. Elles sont, en revanche, plus résistantes à la fatigue que les fibres de type IIA qui sont recrutées à des niveaux de force plus élevés. Les fibres de type IIA résistent moins à la fatigue mais produisent davantage de force et possèdent une vitesse de contraction plus élevée que les fibres de type I. Enfin les fibres de type IIB (dites rapides) produisent de plus hauts niveaux de force et de vitesse mais sont encore plus fatigables que les fibres précédentes (Brooke et Kaiser, 1970). Lors de leurs analyses à l'aide de biopsies du muscle *vastus lateralis*, faisant partie du muscle *quadriceps* (*i.e.*, extenseur du genou) et considéré comme un des muscles principaux du mouvement en patinage notamment lors de la phase de glisse (Buckeridge et al., 2015), des études (Akermark et al., 1996; Green et al., 2010) ont montré qu'il était constitué de 50% à 60% de fibres de type I et 35% de fibres de type IIA. Cette proportion se rapproche de la proportion rencontrée chez des sprinters entraînés (Andersen et al., 1994; Korhonen et al., 2006) et montre la nécessité de fibres musculaires ayant des capacités de contractions rapides (*i.e.*, fibres de type IIA) en lien avec les contraintes du hockey sur glace. Cependant, il apparaît que cette proportion varie entre 10% et 20% au cours d'une saison de hockey sur glace en lien avec la pratique de l'activité (Green et al., 2010). Lors de mouvements dynamiques, d'autres propriétés fondamentales du muscle impactent sa production de force, en particulier sa longueur et sa vitesse de contraction.

1.2.1.2 Relations force-longueur et force-vitesse

La capacité du muscle à produire une force est considérablement dépendante de sa longueur. Ainsi, il existe une longueur, dite optimale, offrant le chevauchement le plus efficace entre les filaments d'actine et de myosine. Dans cette condition (*i.e.*, contraction isométrique), le muscle possède alors ses capacités maximales de production de force. À l'inverse, certaines études (de Brito Fontana et Herzog, 2016; Hauraix et al., 2017) ont mis en avant le fait qu'un muscle peut

produire moins de force lorsqu'il se trouve à une longueur trop faible ou trop élevée. La relation qui existe entre la longueur du muscle et la force qu'il génère est appréhendée par la relation force-longueur (ou tension-longueur) et par la relation couple de force-angle au niveau d'une articulation (Nordez et al., 2010). Tout comme au niveau du muscle, il existe au niveau articulaire, un angle optimal pour lequel le groupe musculaire produit une force maximale (Blazevich et al., 2009). Cette longueur ou cet angle correspondent au meilleur compromis entre les tensions produites par les composantes passives (CES et CEP) et les forces produites par les structures actives (CC). Outre la relation force-longueur, il existe une relation entre la force et la vitesse de contraction du muscle. Initialement étudiée sur muscle isolé (Gasser et Hill, 1924) et décrite mathématiquement par Fenn et Marsh (1935) et Hill (1938), cette relation a été confirmée par la théorie des filaments glissants de (Huxley et Brown, 1967). La relation FV indique que plus la vitesse de contraction est élevée, moins le muscle est capable de produire de la force. Cette diminution de la capacité de production de force est expliquée par une réduction du nombre de ponts d'union formés et de la force produite par chacun des ponts (Piazzesi et al., 2007). Le développement des ergomètres isocinétiques à la fin des années 60 a permis d'appréhender et de mettre en évidence des caractéristiques similaires de la relation FV lors de mouvements mono-articulaires comme les extensions/flexions du genou. Ainsi, lorsque la vitesse de mouvement augmente, la force produite en contraction concentrique par les extenseurs du genou diminue selon une relation curvilinéaire, jusqu'à une valeur plateau au deçà de laquelle la force reste stable. La force produite en contraction excentrique est en revanche moins dépendante de la vitesse que de l'articulation considérée. Toutefois, les mouvements isocinétiques ne permettent pas d'investiguer de très hauts niveaux de vitesse et constituent une modalité d'exercice relativement différente des actions sportives.

Bien qu'il existe des différences de forme, la similitude de la relation FV avec celle observée sur des muscles isolés (*i.e.*, diminution de la force avec la vitesse) (Jaric, 2015) montre que le

comportement du système musculaire global des membres inférieurs lors d'efforts maximaux est principalement dicté par les propriétés intrinsèques des muscles impliqués.

Enfin, les relations force-longueur et FV résultent principalement des propriétés mécaniques intrinsèques des muscles impliqués, mais sont également dépendantes de possibles mécanismes de régulation de la commande nerveuse (*i.e.*, niveau d'activation musculaire, co-activation des antagonistes, boucles réflexes inhibitrices) et de la configuration anatomique de l'articulation (*i.e.*, bras de levier) (Samozino, 2009).

1.2.1.3 Bras de levier

Lorsque l'on considère la contribution d'un muscle au couple de force mesuré au niveau d'une articulation, il est nécessaire de prendre également en compte son bras de levier. Celui-ci est défini comme la distance la plus courte entre le centre de rotation de l'articulation et la ligne d'action du muscle (Pandy, 1999). Ainsi, si deux muscles produisent la même force, le muscle ayant le bras de levier le plus grand possèdera un avantage mécanique, c'est-à-dire que sa contribution au couple articulaire sera supérieure.

1.2.1.4 Le contrôle nerveux de la production de force

Le contrôle de la force produite par un muscle dépend de la commande nerveuse, c'est-à-dire du nombre d'UMs activées (*i.e.*, recrutement spatial) et leur fréquence de recrutement (*i.e.*, recrutement temporel) (Duchateau et Enoka, 2011). Comme nous l'avons vu précédemment, le motoneurone alpha transmet un PA au niveau de la plaque motrice, provoquant la dépolarisation du sarcolemme de chaque fibre musculaire qu'il innerve. Les PA musculaires générés se propagent alors le long des fibres. L'enregistrement de l'activité électromyographique (EMG) de surface, représentant la somme algébrique des PA se propageant le long des fibres musculaires (*i.e.*, potentiels d'action musculaire), au cours de la réalisation de gestes volontaires constitue un moyen d'investiguer l'activité du système neuromusculaire de manière non-invasive (Moritani et Yoshitake, 1998). La quantification du signal EMG permet en effet de déterminer de manière indirecte le niveau d'activité du muscle associé au niveau de force

produit (Disselhorst-Klug et al., 2009). L'EMG permet aussi de déterminer les moments au cours desquels les muscles sont activés (*i.e.*, séquences d'activation ou coordinations musculaires). Aujourd'hui, la miniaturisation et la transmission Wi-Fi des signaux permet de réaliser des mesures EMG dans des conditions écologiques (Behm et al., 2005; Buckeridge et al., 2015).

1.2.2 Evaluation des capacités de force des membres inférieurs en hockey sur glace

Au hockey sur glace, la force maximale dynamique représente la capacité musculaire la plus couramment évaluée (Ebben et al., 2004). La force musculaire des membres inférieurs est importante pour permettre et maintenir l'abaissement du centre de gravité du·de la joueur·euse essentiel dans l'efficacité du patinage notamment lors des premières poussées ou lors des changements de direction (Fortier et al., 2014; Renaud et al., 2017). De plus, certaines études ont montré qu'une augmentation de la force musculaire permettrait, à travers une augmentation de la coordination intra- et inter-musculaire et un renforcement des structures adjacentes du muscle (*i.e.*, ligaments, tendons, os), de diminuer le risque de survenue de blessures liées aux contacts ou à l'intensité du jeu (Case et al., 2020; Lauersen et al., 2018). Pourtant, Ebben et al. (2004) ont constaté que la majorité des tests de force mise en place par les préparateurs physiques s'applique aux membres supérieurs (*i.e.*, développé couché, tirage, grip). Cette enquête montre que seulement 17% des préparateurs physiques (23 interrogés) évaluent la force des membres inférieurs. Certaines études utilisent des tests de musculation fonctionnels comme le squat alors que d'autres mettent en place des évaluations plus analytiques en laboratoires (*i.e.*, tests isocinétiques) afin d'évaluer la force maximale des membres inférieurs. Cependant, les différences de mouvements utilisés selon les études compliquent la comparaison des résultats. Ransdell et Murray (2011) évaluent la répétition maximale (1 RM) en squat devant chez des joueuses de hockey sur glace élite car, comme lors du patinage, ce mouvement augmente l'activation préférentielle du *quadriceps* (extenseur du genou) et des *erector spinae*

(extenseur du dos) comparativement au squat classique (Gullett et al., 2009; Yavuz et al., 2015). Chez des joueuses universitaires, et en utilisant un test de 3-5 RM imposant des contraintes mécaniques plus faibles que le squat à charge maximale sur des populations jeunes afin de prédire la 1 RM (Abadie et Wentworth, 2000; Dohoney et al., 2002; Reynolds et al., 2006), Boland et al. (2019) utilisent le soulevé de terre à la barre hexagonale. Enfin, Behm et al. (2005) utilisent une presse assise pour évaluer des joueurs universitaires alors que Runner et al. (2016) ou Hoff et al. (2005) rapportent des valeurs en squat classique sur une même population. A l'inverse de Janot et al. (2015) qui évaluent une population universitaire homme et femme plus faible, la majorité des études rapporte de faibles corrélations entre force maximale des membres inférieurs et performance sur des tests de vitesse et agilité sur glace (Tableau 5).

Comme nous l'avons vu précédemment (cf. [section II.1.2.1.1](#)), l'autre méthode fréquemment utilisée pour évaluer les capacités de force maximale des joueur·euse·s de hockey sur glace est l'évaluation isocinétique. Bien que les études sur la population féminine (Gilenstam et al., 2011; Henriksson et al., 2016) montrent des corrélations (r compris entre 0,5 et 0,7) significatives entre force relative des extenseurs et fléchisseurs de genou et performance en patinage, les résultats retrouvés chez les garçons semblent diverger. Alors que Brocherie et al. (2005) montrent une relation entre force relative concentrique à vitesse rapide (*i.e.*, $240^{\circ}\cdot s^{-1}$) des muscles de la cuisse et performance en patinage sur 10 m et 30 m ($r = -0,61$, $p < 0,01$ et $r = -0,76$, $p < 0,01$, respectivement), d'autres études (Gilenstam et al., 2011; Potteiger et al., 2010) ne rapportent aucune corrélation entre force maximale des extenseurs de genou et performance lors de test de patinage (*i.e.*, accélération sur 6,1 m, vitesse sur 48 m ou 15 m départ lancé) chez les garçons.

Il semblerait que les qualités de force soient prioritairement travaillées par les préparateurs physiques lors des périodes hors-saison (Mai – Août) (Ebben et al., 2004). Plusieurs études rapportent d'ailleurs des gains de force entre les évaluations de début et celles de fin de pré-saison, un maintien des qualités de force sur la première partie de la saison puis une chute sur

la deuxième partie de la saison (Cox et al., 1995; Delisle-Houde et al., 2019b; Montgomery, 1988). Cette diminution des capacités musculaires, associée à une diminution du volume musculaire de certains muscles (*i.e.*, fibres de type I et IIa du muscle *vastus lateralis*) (Green et al., 2010, 2012), pourrait être due à une accumulation de la fatigue en lien avec l'enchaînement des matchs et entraînements sur la deuxième partie de la saison ou au contraire un désentraînement lié à un manque de sollicitations spécifiques lors des entraînements hors glace qui deviennent moins fréquents (Delisle-Houde et al., 2019b).

Tableau 5. Coefficients de corrélation de Pearson (r) entre les tests d'évaluation hors glace de la force maximale des extenseurs des membres inférieurs et les performances aux tests sur glace.

Référence	Population	Évaluation de la force maximale hors glace	Évaluation de la performance sur glace	r	Valeur de p
Boland et al. (2019)	Féminine universitaire	Soulevé de terre à la barre hexagonale (3-5 RM)	Variables de répétition de sprint en patinage Performances en match	0,00-0,48 0,03-0,35	> 0,13 > 0,14
Janot et al. (2015)	Féminine et masculine universitaires	Squat classique (1RM)	Agilité Accélération sur 6,1 m Accélération sur 44,8 m Performance sur 15,2 m départ lancé Variables de répétition de sprint en patinage	-0,80 -0,21 -0,73 -0,74 -0,82--0,79	
Behm et al. (2005)	Masculine universitaire	Presse assise (1RM)	Test de vitesse maximale Agilité	-0,30 -0,27	
Runner et al. (2016)	Masculine universitaire	Squat classique (1RM)	Accélération sur 27,4 m Patinage arrière sur 27,4 m Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,21 -0,10 -0,16	
		Isocinétique pic de couple de force en extension de genou à 90°.s ⁻¹	Accélération sur 6,1 m Accélération sur 47,9 m Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,33-0,21 -0,71--0,09 -0,52--0,05	< 0,01
Gilensam et al. (2011)	Féminine universitaire	Isocinétique pic de couple de force en extension de genou à 210°.s ⁻¹	Accélération sur 6,1 m Accélération sur 47,9 m Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,33-0,30 -0,64--0,14 -0,61--0,56	< 0,01 < 0,01
	Masculine universitaire	Isocinétique pic de couple de force en extension de genou à 90°.s ⁻¹	Accélération sur 6,1 m Accélération sur 47,9 m Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,48--0,12 -0,48-0,03 -0,29--0,04	
		Isocinétique pic de couple de force en extension de genou à 210°.s ⁻¹	Accélération sur 6,1 m Accélération sur 47,9 m Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,24--0,03 -0,48--0,07 -0,29-0,04	
Brocherie et al. (2005)	Masculine sénior	Isocinétique pic de couple de force en extension de genou à 240°.s ⁻¹	Accélération sur 10 m Accélération sur 30 m	-0,61 -0,76	< 0,01 < 0,01
Potteiger et al. (2010)	Masculine universitaire	Isocinétique pic de couple de force en extension de genou à 120°.s ⁻¹	Variables de répétition de sprint en patinage	-0,28-0,00	

1.3 La vitesse

1.3.1 Déterminants de la production de vitesse au niveau musculaire

Comme nous l'avons vu précédemment, chaque muscle possède une force maximale isométrique différente suivant son volume, l'angle de ses fibres par rapport à la ligne d'action du muscle ou encore sa typologie (cf. section [II.1.2.1.1](#)) (Lieber et Ward, 2011). Lors de mouvements dynamiques, le changement de longueur ainsi que la vitesse de contraction influencent également la capacité de production de force du muscle (cf. section [II.1.2.1.2](#)). Best et Partridge (1928) ont été les premiers à observer la relation FV lors de mouvements pluri-articulaires. En lien avec cette relation FV, les auteurs montraient, au cours d'un exercice de sprint maximal, que la composante de force horizontale maximale appliquée par les membres inférieurs diminuait à mesure que la vitesse de course augmentait. Ces résultats ont depuis été confirmés lors d'un sprint maximal (Morin et al., 2012; Rabita et al., 2015) mais également au cours de sauts verticaux (Samozino et al., 2008) ou de mouvements de squat (Rahmani et al., 2001). Par exemple, lors d'un sprint maximal, la relation FV étant décrite comme linéaire, il est possible de définir un profil individuel en caractérisant, une force maximale théorique que les membres inférieurs pourraient produire en début d'accélération [*i.e.*, à vitesse théoriquement nulle, (F_0)], une vitesse maximale théorique à laquelle les membres inférieurs pourraient s'actionner en fin d'accélération [*i.e.*, en l'absence de contraintes mécaniques, (V_0)] ainsi que la puissance maximale théorique (P_{\max}), correspondant à la puissance maximale qu'un individu est capable de développer à un certain pourcentage de force et de vitesse (Figure 11). En appliquant cette méthode, les études ont montré une forte corrélation entre P_{\max} , la capacité à appliquer des hauts niveaux de force dans une direction horizontale [RF et le ratio de diminution de RF (D_{rf})] (Morin et al., 2012; Morin et al., 2011; Morin et Samozino, 2016; Rabita et al., 2015) et la performance sur 100 m. Concernant des distances plus courtes, il apparaît que plus

celles-ci sont courtes, plus les paramètres de puissance et force (*i.e.*, F_0 et RF) sont importants et corrélés à la performance (Morin et Samozino, 2016).

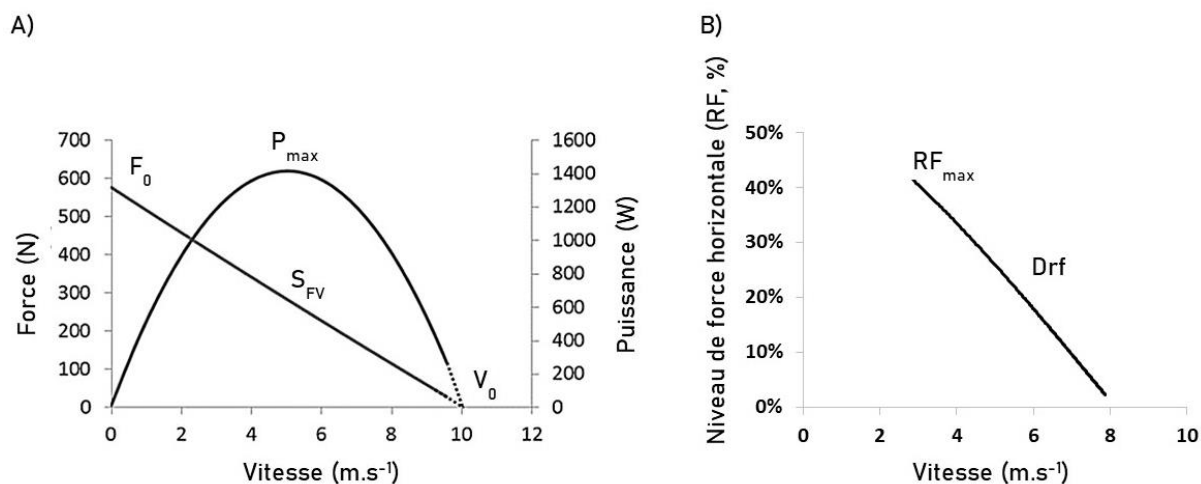


Figure 11. Relation force-vitesse-puissance (panel A) et évolution du ratio de force horizontale en fonction de la vitesse (panel B) modélisées à partir d'un sprint en course à pied.

D'après Samozino et al. (2016).

1.3.2 Evaluation des paramètres de vitesse en hockey sur glace

Comme dans la plupart des activités explosives, la force maximale dynamique en hockey sur glace ne devient déterminante dans la performance que lorsqu'elle est associée à d'autres qualités et en particulier la capacité à exercer de la force à des vitesses importantes. L'évaluation de la vitesse lors de sprints en course à pied, ou plus spécifiquement en patinage, est fréquemment rapportée dans la littérature scientifique concernant le hockey sur glace. La grande majorité des protocoles d'évaluation de la vitesse utilise des distances de sprint supérieure à 30 m (Behm et al., 2005; Bracko et Fellingham, 1997; Bracko et George, 2001; Diakoumis et Bracko, 1998; Farlinger et al., 2007; Geithner, 2009; Geithner et al., 2006; Haukali et Tjelta, 2015; Hoff et al., 2005; Janot et al., 2015; Korte, 2020; Krause et al., 2012; Mascaro et al., 1992; Peyer et al., 2010). L'évaluation de la performance en sprint sur de longues distances (> 30 m) hors glace (course) semble être un bon indicateur de la performance sur glace (patinage) (Behm et al., 2005; Bracko et George, 2001; Diakoumis et Bracko, 1998; Farlinger et al., 2007; Geithner, 2009; Janot et al., 2015; Korte, 2020; Krause et al., 2012) ou

discriminant le niveau de performance (Hoff et al., 2005) que ce soit chez les hommes ou chez les femmes (Tableau 6). Seuls Mascaro et al. (1992) ne démontrent pas de corrélation significative entre la performance en sprint hors glace (40-yard dash) et la performance sur un test sur glace. Cependant, il existe des divergences concernant la corrélation entre la performance en sprint sur une longue distance hors glace et la performance sur la phase d'accélération (5-10 m) en patinage (r compris en 0,3 et 0,9) (Blatherwick, 1989; Bracko et George, 2001; Janot et al., 2015; Runner et al., 2016).

Tableau 6. Coefficients de corrélation de Pearson (r) entre les tests d'évaluation hors glace de la vitesse et les performances aux tests sur glace.

Référence	Population	Evaluation de la vitesse hors glace	Evaluation de la performance sur glace	r	Valeur de p
Bracko et George (2001)	Féminine pré-pubaire à adolescente (8-16 ans)	40-yard dash	Accélération sur 6,1 m	0,44	
			Accélération sur 44,8 m	0,72	
			Agilité	0,52	
			Puissance anaérobie (Reed repeated skating test)	-0,14	
			Capacité anaérobie (Reed repeated skating test)	-0,66	
Diakoumis et Bracko (1998)	Masculine pré-pubaire à adolescente (11-17 ans)	40-yard dash	Accélération sur 6,1 m	0,75	< 0,001
			Accélération sur 44,8 m	0,84	< 0,001
Farlinger et al. (2007)	Masculine universitaire	30 m	Accélération sur 35 m	0,78	< 0,001
			Agilité	0,54	< 0,001
Behm et al. (2005)	Masculine universitaire	40-yard dash	Test de vitesse maximale	0,51	< 0,005
			Agilité	0,32	
Janot et al. (2015)	Féminine et masculine universitaires	40-yard dash	Agilité	0,81	
			Accélération sur 6,1 m	0,27	
			Accélération sur 44,8 m	0,78	
			Performance sur 15,2 m départ lancé	0,64	
			Variables de répétition de sprint en patinage	0,91-0,94	
Krause et al. (2012)	Masculine adolescente	40-yard dash	Accélération sur 37,5 m	0,81	< 0,05
			Agilité	0,47-0,67	< 0,05
Korte (2020)	Masculine sénior élite	Course 5 m	Accélération sur 10 m	0,32	< 0,05
			Agilité	0,41	< 0,01
		Course 10 m	Accélération sur 10 m	0,40	< 0,01
			Accélération sur 30 m	0,33	< 0,05
			Agilité	0,47	< 0,001
Runner et al. (2016)	Masculine universitaire	40-yard dash	Accélération sur 5 m	0,44	< 0,01
			Accélération sur 10 m	0,59	< 0,001
			Accélération sur 30 m	0,47	< 0,01
			Agilité	0,46	< 0,01
			Accélération sur 27,4 m	0,46	
Patinage arrière sur 27,4 m	0,37				
Performance sur 15,2 m départ lancé	0,38				

Peu d'études se sont intéressées à l'évaluation de la phase d'accélération (~10 m) en course chez des joueurs de hockey sur glace (Hoff et al., 2005; Korte, 2020). Récemment, Korte (2020) a démontré une corrélation modérée ($r = 0,4$) entre performance hors et sur glace sur 10 m. De plus, Legerlotz et al. (2020) montrent, sur une comparaison de répétition de sprints avec changements de direction (Repeated Shuttle Sprint) réalisée hors et sur glace, des corrélations modérées (r compris en 0,6 et 0,7) entre le meilleur temps, le temps moyen et le temps cumulé hors et sur glace. Bien que la phase d'accélération en course à pied soit fortement reliée aux capacités musculaires de force et puissance (Morin et Samozino, 2016; Nagahara et al., 2018), il apparaît étonnant que si peu d'études se soient intéressées à l'évaluation de cette phase spécifique du patinage qui présente quelques similitudes avec la phase d'accélération en course (de Koning et al., 1995; Renaud et al., 2017). Des analyses cinématiques similaires ont été réalisées après des joueur·euse·s de hockey sur glace (Buckeridge et al., 2015; Budarick et al., 2018; Lafontaine, 2007; Renaud et al., 2017; Shell et al., 2017) (cf. [section II.2.2](#)). Pearsall et al. (2013) ont réalisé des comparaisons cinétiques, cinématiques et neuromusculaires à l'aide de la littérature scientifique afin de définir les similitudes et spécificités de chacune des tâches (Figure 12). Il apparaît que les amplitudes de mouvements au niveau de la hanche dans le plan sagittal (flexion/extension) sont proches notamment durant la phase d'accélération. En comparaison avec l'activité de course, on observe des plus grandes amplitudes d'abduction et de rotation externe en hockey sur glace en lien avec la nécessité d'accroche du patin sur la glace (Pearsall et al., 2013; Renaud et al., 2017; Shell et al., 2017). Cela se traduit également par une largeur d'appui plus importante que lors de la course en lien avec la nécessité d'une plus grande stabilité sur la glace (Renaud et al., 2017). Au niveau du genou, les amplitudes articulaires restent également similaires même si les cinématiques entre le patinage et la course sont complètement différentes (Pearsall et al., 2013). Lors de l'appui en course, le genou est légèrement en flexion pour ensuite faire une extension tout au long de la phase de poussée. Si cette cinématique se retrouve sur la phase d'accélération en patinage (Shell et al., 2017), lors de la phase de glisse, le genou reste majoritairement en flexion puis fait une extension

uniquement sur la phase de poussée latérale. Enfin, au niveau de l'articulation de la cheville, la cinématique lors du patinage est similaire à celle retrouvée en course lors de la phase d'accélération puis ressemble plus à celle de la marche lors de la phase de glisse. En effet, l'appui lors de la phase de glisse nécessite une flexion dorsale importante et prolongée alors que la flexion plantaire n'intervient elle que dans le prolongement de l'extension de hanche et de l'extension de genou dans la phase de propulsion.

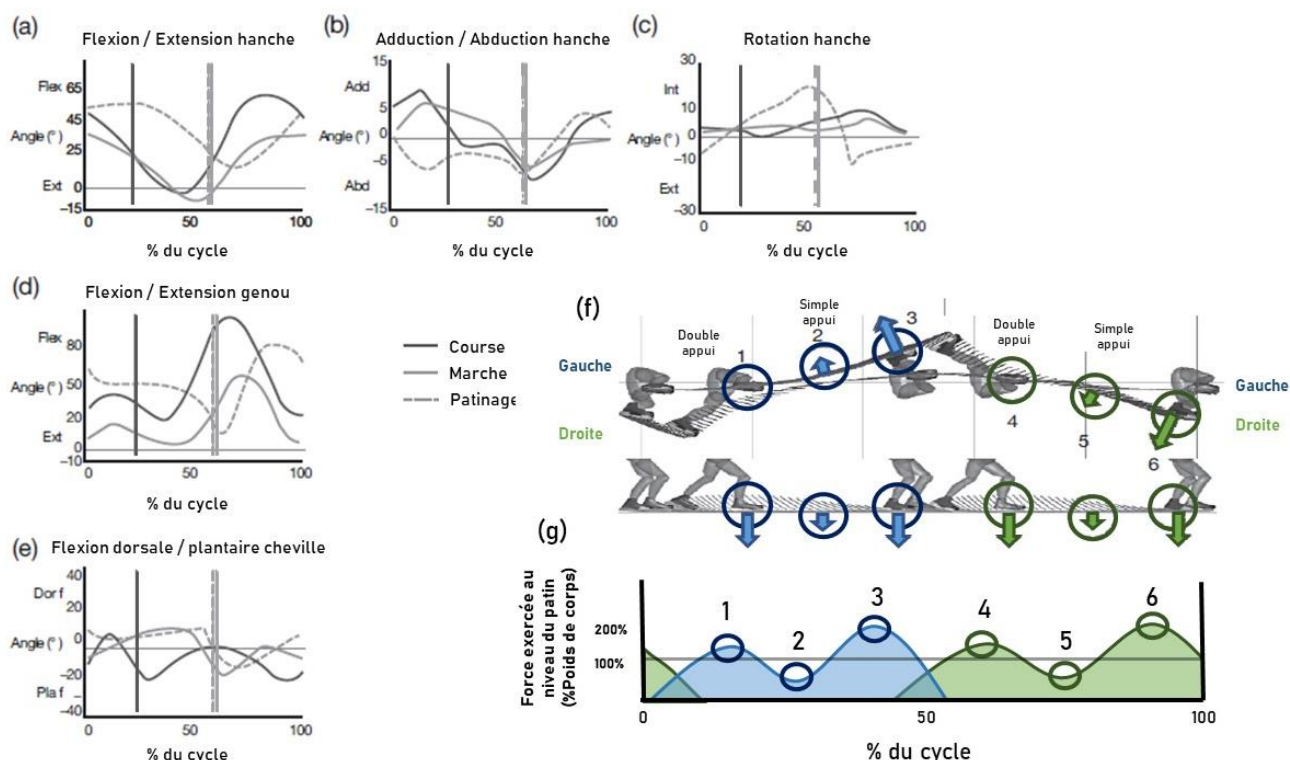


Figure 12. Comparaison des cinématiques de mouvement au niveau des articulations des membres inférieurs entre la marche, la course et le patinage.

Les caractéristiques dans chaque plan de l'espace sont représentées sur un cycle (0 représentant l'appui d'une jambe, jusqu'à 100 représentant un nouvel appui de la même jambe). Les lignes verticales représentent approximativement les phases de poussées au sol ou sur la glace. f et g représentent un cycle de patinage entier avec les directions de poussées (f) ainsi que la force exercée (g). D'après Pearsall et al. (2013).

Il est important de noter qu'il existe tout de même des différences notables entre les deux modes de locomotion. Premièrement, au niveau des amplitudes articulaires de la cheville et en lien avec la rigidité du patin (Robert-Lachaine et al., 2012), les flexions dorsales et plantaires sont limitées. D'autre part, le temps de contact au sol est plus important en patinage (330 vs. 80-100

ms, respectivement) (Nagahara et al., 2014; Robert-Lachaine et al., 2012) ce qui induit une fréquence des appuis moins importante (1,94 vs. 2,14 Hz, respectivement) (Rabita et al., 2015; Shell et al., 2017) qu'en course à pied. La nature des appuis est également très différente entre une surface d'à peine un centimètre carré instable sur une surface glissante en patinage et une surface de plusieurs centimètres carrés beaucoup plus stable en course à pied. Enfin, la posture du patinage requière une inclinaison du tronc supérieure à celle observée durant la course à pied (Bracko, 2004; Marino, 1983).

Bien que les phases d'accélération soient « proches » d'un point de vue biomécanique, il n'existe à ce jour, aucune étude qui se soit intéressée à la comparaison de performance ou de variables spécifiques sur des distances courtes hors et sur glace chez des joueuses de hockey sur glace.

1.4 La puissance

1.4.1 Déterminants de la production de puissance musculaire

La capacité à produire de la puissance est conditionnée par le type d'action dans laquelle le muscle est engagé : excentrique, isométrique, concentrique. Par exemple, de hauts niveaux force peuvent être atteints lors d'une contraction isométrique (*i.e.*, F_{max}) et permettre notamment d'appréhender la notion de taux de développement de la force (*i.e.*, rate of force development, RFD). En revanche, lors de contractions dynamiques, l'explosivité s'exprime dans les mouvements balistiques qui se terminent par une projection de la charge déplacée à la fin d'une contraction concentrique, produisant ainsi de hauts niveaux de vitesse (Giroux, 2014).

1.4.1.1 Cycle étirement-raccourcissement ou stretch-shortening cycle (SSC)

Si le muscle peut être le moteur du mouvement en produisant une force, il peut également absorber de l'énergie qui est ensuite dissipée sous forme de chaleur ou restituée en énergie élastique (Reich et al., 2000). Cet enchaînement d'une contraction excentrique immédiatement suivie d'une contraction concentrique, observé au cours d'un grand nombre de tâches motrices

(*i.e.*, marche, course, saut) est classiquement désigné comme le cycle « étirement-raccourcissement » ou stretch-shortening cycle (SSC) (Komi, 2000). Lorsqu'une fibre musculaire activée est étirée juste avant de se raccourcir, la force et la puissance générée lors de la contraction concentrique est plus élevée que celle résultant d'une contraction concentrique isolée. Il est donc admis que la puissance maximale est supérieure lors de mouvements de type SSC (Cavagna et al., 1965). Bien que les mécanismes responsables de cette augmentation de la performance lors de SSC soient encore débattus dans la littérature (Giroux, 2014), ce type d'exercice induirait des adaptations neuromusculaires au niveau du réflexe d'étirement, de l'élasticité du muscle et des organes tendineux de Golgi situé dans le tendon (Booth et Orr, 2016; Wilk et al., 1993).

La capacité du système musculo-articulaire à stocker et restituer de l'énergie élastique est souvent mise en avant pour expliquer l'impact du SSC sur la puissance produite (van Ingen Schenau et al., 1997). Cette énergie élastique correspond à une partie du travail absorbé lors des actions frénatrices et stocké dans les éléments élastiques du complexe muscle-tendon (Cavagna et al., 1965). Les interactions entre les composantes contractiles (CCs) et les composantes élastiques (*i.e.*, CESs et CEPs) du complexe musculo-tendineux semblent également contribuer à ce phénomène puisque l'énergie restituée par le tendon influence la contribution des éléments contractiles au travail produit lors de SSC (Ettema et al., 1992). On peut alors observer un effet de « catapulte » au niveau de mouvements globaux avec SSC, ou au niveau articulaire lors de stratégies visant à mettre en tension un groupe musculaire transmettant ensuite l'énergie élastique aux articulations adjacentes. La contribution du réflexe d'étirement, induit par l'allongement forcé du muscle pourrait également expliquer l'augmentation de la force lors de la contraction concentrique (Cormie et al., 2011). En hockey sur glace, des études (Buckeridge et al., 2015; Marino, 1983; Robbins et al., 2018; Upjohn et al., 2008) ont montré qu'une projection importante du buste vers l'avant (*i.e.*, faible angle entre le buste et l'horizontale), au moment où le patin est ramené au niveau du centre de gravité (*i.e.*,

mise en charge), était corrélé ($r = 0,48$) avec la performance en patinage (Marino, 1983). Cet angle (40° - 70°), au niveau de l'articulation de la hanche, permettrait ainsi, tout comme lors d'un saut vertical (Bobbert et al., 2013), de mettre en tension (*i.e.*, stockage d'énergie) les muscles déterminants dans la poussée en patinage (plus particulièrement *gluteus maximus*) et ainsi leur permettre une meilleure restitution lors de la phase de poussée (Upjohn et al., 2008). Une analogie similaire est possible au niveau de l'articulation de la cheville. Plusieurs études ont montré de plus grandes amplitudes de cheville, associées à une force musculaire permettant un certain gainage de l'articulation, lors du patinage chez des bons patineurs comparés à de moins bons patineurs (Robbins et al., 2018; Upjohn et al., 2008). Cette plus grande amplitude permet un étirement plus important des muscles *gastrocnemius* et *soleus* durant la phase de support et une restitution de l'énergie accumulée durant la flexion plantaire (Renaud et al., 2017; Robbins et al., 2018).

1.4.1.2 Coordinations musculaires

L'enregistrement de l'activité EMG au cours du mouvement a permis de démontrer que les coordinations intra-musculaires conditionnaient fortement la performance explosive. En effet, les mouvements rapides nécessitent l'activation d'UMs présentant de hauts seuils d'activation, c'est-à-dire les unités motrices principalement constituées de fibres de type II (Henneman, 1957). Les UMs avec un seuil d'activation plus faible nécessitent plus de temps pour produire leur pic de force, et sont donc moins efficaces dans les actions rapides (van Cutsem et al., 1998). La capacité à activer rapidement des UMs ayant un haut seuil de recrutement, est donc déterminante pour produire de hauts niveaux de puissance (Enoka et Fuglevand, 2001). D'autre part, il semblerait qu'une meilleure synchronisation des UMs, c'est-à-dire une meilleure coïncidence de décharge de deux ou plusieurs UMs, permettrait une augmentation des capacités de production de force (Milner-Brown et Lee, 1975).

Les séquences selon lesquelles les muscles sont activés (*i.e.*, coordinations musculaires) vont également jouer un rôle prépondérant dans la réalisation des mouvements explosifs. Au cours

d'un saut par exemple, le timing d'activation et de relaxation des muscles agonistes, synergistes et antagonistes doit, en effet, être extrêmement précis pour optimiser la production de puissance et la performance lors du saut (Bobbert et van Ingen Schenau, 1988). Cette approche permet d'appréhender une part de la composante technique du geste dont l'efficacité va conditionner le niveau de force produit lors de l'impulsion et la vitesse atteinte au moment du décollage (Cormie et al., 2011).

1.4.2 Evaluation de la puissance des membres inférieurs en hockey sur glace

La puissance est un des paramètres souvent déterminant dans la performance sportive comme cela a été démontré dans de nombreuses disciplines explosives (Jiménez-Reyes et al., 2018) et plus particulièrement en hockey sur glace, au égard des nombreux changements de direction, freinages/démarrages et accélérations (Twist et Rhodes, 1993). La mesure de la production de puissance lors de différents mouvements est importante pour l'entraînement mais également afin d'améliorer la compréhension des propriétés de la fonction neuromusculaire (Cronin et Sleivert, 2005). Afin d'évaluer la puissance des membres inférieurs, l'utilisation des différentes modalités de saut est majoritairement rapportée et conseillée pour les préparateurs physiques (Neeld, 2018; Nightingale et al., 2013). Ainsi, les études évaluent la puissance à travers la hauteur mesurée lors de sauts verticaux [*i.e.*, en départ position squat (SJ), saut avec contre-mouvement (CMJ), saut en contrebas ou *drop jump* (DJ)] (Blanár et al., 2019; Boucher et al., 2020; Brocherie et al., 2005; Burr et al., 2008; Burr et al., 2007; Comtois et al., 2011; Delisle-Houde et al., 2019a; Farlinger et Fowles, 2008; Geithner et al., 2006; Haukali et Tjelta, 2015; Hoff et al., 2005; Janot et al., 2015; Kniffin et al., 2017; Krause et al., 2012; Mascaro et al., 1992; Peterson et al., 2016; Peterson et al., 2015b; Vigh-Larsen et al., 2019; Vigh-Larsen et al., 2020b; Vigh-Larsen et al., 2020c), la distance parcourue lors de sauts horizontaux (*i.e.*, long jump) (Behm et al., 2005; Blanár et al., 2019; Boland et al., 2019; Boucher et al., 2020; Bracko et George, 2001; Burr et al., 2008; Delisle-Houde et al., 2018; Delisle-Houde et al., 2019a;

Douglas, 2015; Farlinger et Fowles, 2008; Farlinger et al., 2007; Geithner, 2009; Henriksson et al., 2016; Ransdell et al., 2013; Runner et al., 2016) ou de sauts latéraux (Blanár et al., 2019; Krause et al., 2012).

Mascaro et al. (1992) sont les premiers à rapporter que la hauteur de saut vertical (*i.e.*, CMJ avec bras libres) est le seul prédicteur de la performance sur un sprint de 50 m sur glace alors qu'au contraire, le saut horizontal ne semble pas prédire la performance. Depuis, une grande majorité des études a montré des corrélations modérées à fortes entre les différentes modalités de sauts verticaux et horizontaux évaluées chez des joueur·euse·s de hockey sur glace et la performance en sprint sur glace (*i.e.*, accélération sur 5-10 m, vitesse sur des distances plus importantes ou tests d'agilité) (Blanár et al., 2019; Boucher et al., 2020; Bracko et Fellingham, 1997; Bracko et George, 2001; Delisle-Houde et al., 2019a; Farlinger et al., 2007; Henriksson et al., 2016; Janot et al., 2015; Krause et al., 2012; Runner et al., 2016). La performance lors de ces évaluations de puissance hors glace semble également être un facteur de prédiction pour le potentiel de haut-niveau (Burr et al., 2008; Burr et al., 2007; Douglas, 2015) ou discriminer le niveau de jeu entre les joueur·euse·s (Peterson et al., 2015b; Ransdell et al., 2013; Vigh-Larsen et al., 2019; Vigh-Larsen et al., 2020b; Vigh-Larsen et al., 2020c) (Tableau 7). Certaines études au contraire rapportent une corrélation faible voire nulle entre performance de sauts verticaux ou horizontaux et performance sur glace (Behm et al., 2005; Boland et al., 2019; Comtois et al., 2011; Geithner, 2009). Une explication possible réside dans la variabilité des modalités de passation des protocoles d'évaluation des sauts verticaux ou horizontaux. De plus, la majorité des études rapporte uniquement les performances (en cm) lors des sauts alors que très peu rapportent des mesures biomécaniques de force ou de puissance développées par les membres inférieurs (Burr et al., 2007; Delisle-Houde et al., 2019a; Farlinger et al., 2007). Seules deux études se sont intéressées aux sauts (Blanár et al., 2019; Krause et al., 2012) ou aux déplacements latéraux (*i.e.*, Edgren Side Shuffle) (Farlinger et Fowles, 2008; Farlinger et al., 2007) et ont montré une corrélation modérée (r compris entre 0,4 et 0,6) avec la performance

lors d'un sprint sur glace. Ces résultats démontrent l'importance de la production latérale de puissance afin d'optimiser la performance en patinage. En effet, comme nous le développerons plus tard (cf. [section II.2](#)), une force latérale, perpendiculaire à la direction du mouvement, est primordiale notamment dans la phase de glisse (*i.e.*, hautes vitesses), afin d'assurer une propulsion efficace en lien avec les forces de traction de la glace (Pearsall et al., 2000).

Tableau 7. Coefficients de corrélation de Pearson (r) entre la puissance développée lors de différents mouvements hors glace et les performances mesurées lors de tests effectués sur glace.

Référence	Population	Evaluation de la puissance hors glace	Evaluation de la performance sur glace	r	Valeur de p
Blanár et al. (2019)	Masculine adolescente	CMJ	Agilité	-0,37--0,28	> 0,20
Boucher et al. (2020)	Masculine sénior élite (NHL)	CMJ Saut en longueur	Variables de répétition de sprint en patinage	0,10-0,44 0,14-0,51	> 0,05 < 0,05
Bracko et George (2001)	Féminine pré-pubaire à adolescente (8-16 ans)	CMJ	Accélération sur 6,1 m	-0,31	
			Accélération sur 44,8 m	-0,06	
			Agilité	-0,38	
			Puissance anaérobie (Reed repeated skating test)	-0,29	
			Capacité anaérobie (Reed repeated skating test)	0,62	
Delisle-Houde et al. (2019a)	Masculine universitaire	CMJ Saut en longueur	Accélération sur 30 m	-0,60	< 0,01
			Patinage arrière sur 30 m	-0,32	> 0,05
			Agilité	-0,45	< 0,05
			Accélération sur 30 m	-0,45	< 0,05
			Patinage arrière sur 30 m	-0,28	> 0,05
Farlinger et al. (2007)	Masculine universitaire	CMJ Saut en longueur	Agilité	-0,40	> 0,05
			Accélération sur 35 m	-0,71	< 0,001
			Agilité	-0,52	< 0,001
			Accélération sur 35 m	-0,74	< 0,001
			Agilité	-0,59	< 0,001
Henriksson et al. (2016)	Féminine sénior	Saut en longueur sur une jambe	Agilité	-0,77--0,62	< 0,001
			Variables de répétition de sprint en patinage	-0,49	< 0,001
			Agilité	-0,82	
Janot et al. (2015)	Féminine universitaire	CMJ	Accélération sur 6,1 m	-0,09	
			Accélération sur 44,8 m	-0,09	
			Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,72	
			Variables de répétition de sprint en patinage	-0,92--0,88	
			Accélération sur 27,4 m	-0,55	
Runner et al. (2016)	Masculine universitaire	CMJ Saut en longueur	Patinage arrière sur 27,4 m	-0,51	
			Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,54	
			Accélération sur 27,4 m	-0,24	
			Patinage arrière sur 27,4 m	-0,18	
			Performance sur 15,2 m départ lancé	-0,21	
Behm et al. (2005)	Masculine universitaire	SJ	Test de vitesse maximale	-0,25	
			Agilité	-0,29	
Krause et al. (2012)	Masculine adolescente	CMJ Saut en longueur	Accélération sur 37,5 m	-0,51	< 0,001
			Agilité	-0,39--0,29	< 0,05
			Accélération sur 37,5 m	-0,52	< 0,001
			Agilité	-0,53--0,35	< 0,05

2. LA TECHNIQUE DE PATINAGE, CATALYSEUR D'UNE PERFORMANCE BIOMÉCANIQUE EFFICACE

D'après la littérature scientifique, les capacités musculaires de puissance et de vitesse mesurées lors de mouvements d'extension des membres inférieurs apparaissent déterminantes dans la performance sur glace, en termes de patinage ou d'exigence du jeu. En revanche, comme nous venons de le voir, la force maximale semblerait bien moins prédominante que les capacités musculaires de puissance et de vitesse. Ainsi, d'autres études sont nécessaires afin de déterminer la relation entre force maximale et performance en patinage.

Comme nous l'avons vu, l'ensemble des capacités musculaires des joueur·euse·s de hockey sur glace est déterminé à partir d'évaluations non spécifiques (*i.e.*, hors glace). Mieux comprendre et évaluer la biomécanique du patinage, et ce de façon écologique, est donc essentiel afin d'optimiser la performance en hockey sur glace.

2.1 Une spécificité essentielle dans la performance

Le patinage est logiquement la compétence la plus importante et représente la pierre angulaire du développement au hockey sur glace (Hansen et Reed, 1979; Marino, 1995; Pearsall et al., 2000). Il est d'ailleurs très fréquent que les structures ou joueur·euse·s de hockey sur glace aient recours à des séances spécifiques de patinage afin d'améliorer leur technique (« power skating »). Si certaines similitudes existent avec le patinage de vitesse ou le patinage artistique, le contexte et les tâches impliquées dans le mouvement de patinage du·de la joueur·euse de hockey sur glace sont fondamentalement différents et exigent des habiletés techniques spécifiques. En lien avec l'activité et la situation de jeu, le·la joueur·euse doit constamment

accélérer, freiner, changer de direction ou tourner en réponse aux éléments propres à l'activité (*i.e.*, palet, partenaires, adversaires) et ce dans des temps souvent très courts (Figure 13).

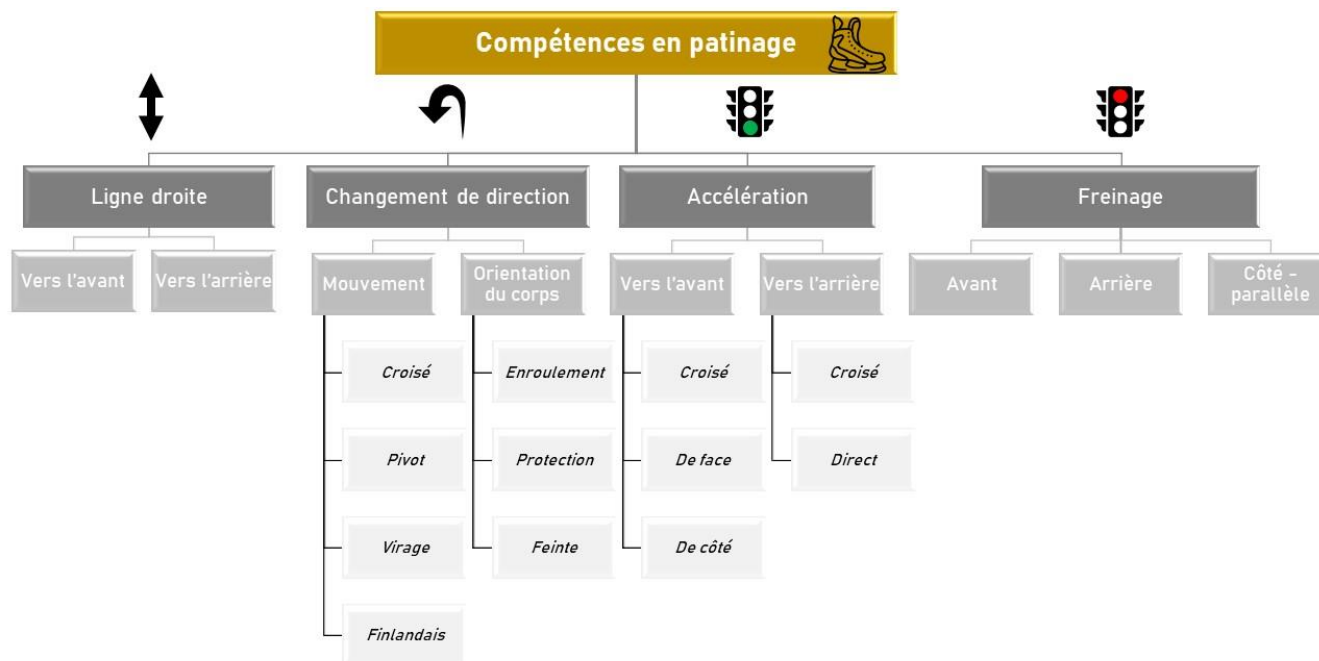


Figure 13. Compétences requises dans les différentes dimensions spécifiques de l'activité pour le joueur de hockey sur glace.

D'après Pearsall et al. (2000).

Le patinage avant est celui qui a été le mieux décrit dans la littérature scientifique et ce depuis longtemps (Marino, 1977, 1983; Marino et Weese, 1979). Il comprend 3 phases : une phase de glisse, une phase de poussée et une phase de recouvrement (Pearsall et al., 2000). La majorité de ces phases est effectuée sur un appui unipodal (80%). À l'inverse, le patinage en marche arrière (appelé « C-cut ») est lui effectué intégralement en double appui avec une alternance d'appuis préférentiels sur l'une ou l'autre jambe afin de pouvoir être en mouvement (Wu et al., 2015).

La performance en patinage est déterminée par de nombreuses interactions de facteurs mécaniques. Certaines sont d'ordres matérielles (*i.e.*, affutage, patin, chaussage) (Federolf et Redmond, 2010; Robert-Lachaine, 2010; Robert-Lachaine et al., 2012) et d'autres inhérentes aux capacités physiques du·de la joueur·euse. La majorité des études évaluent les performances

à partir de tests fonctionnels effectués sur glace et en prenant en compte uniquement la performance (*i.e.*, temps, distance parcourue, nombre de répétitions). Ces tests peuvent aller de la simple évaluation de performance lors d'un sprint en ligne droite (Buckeridge et al., 2015; Budarick et al., 2018; Renaud et al., 2017; Robbins et al., 2018; Shell et al., 2017) à une batterie de plusieurs tests comprenant divers mouvements et trajectoires spécifiques susceptibles de reproduire une présence (Bond et al., 2018; Bracko, 2001; Fortier et al., 2014; Hajek et al., 2020; Janot et al., 2015; Rocznioek et al., 2012; Rocznioek et al., 2016; Schwesig et al., 2017; Schwesig et al., 2018). Dans tous les cas, ces tests s'avèrent discriminants et permettent par exemple d'identifier les bons patineurs qui seront plus à même d'évoluer dans des divisions supérieures (Buckeridge et al., 2015; Budarick et al., 2018; Renaud et al., 2017; Shell et al., 2017; Vigh-Larsen et al., 2020c). La performance sur la phase d'accélération (*i.e.*, ~5 m) s'avère d'ailleurs déterminante (Buckeridge et al., 2015; Marino, 1995; Renaud et al., 2017; Stetter et al., 2019) notamment au vu de la spécificité du sport nécessitant de nombreux changements de direction sur des espaces restreints. L'ensemble de ces évaluations ne permet cependant pas de déterminer la part de la performance liée aux capacités musculaires de l'athlète, de celle liée à la technique de patinage (Buckeridge et al., 2015). Plus récemment, et avec le développement de nouvelles technologies, des évaluations plus complètes *in-situ* ont pu être réalisées permettant ainsi de mieux identifier les composantes biomécaniques et les différents attributs musculaires liés au patinage.

2.2 Analyse biomécanique du patinage

Les premières analyses cinétiques et cinématiques du sprint en patinage chez le joueur de hockey sur glace ont été réalisées dans les années 80. Ces évaluations macroscopiques utilisaient alors des caméras pour définir la fréquence, la longueur et largeur des poussées ou encore des caractéristiques de vitesse et d'accélération en fonction de l'évolution du sprint (Humble et Gastwirth, 1988; Marino, 1977, 1979, 1983). Ces études ont montré que la présence

d'une fréquence d'appuis importante, de temps courts des phases uni- et bi-podales de support et d'un recouvrement rapide de la jambe de poussée étaient corrélés à la performance sur la phase d'accélération (~6 m) (Marino, 1977, 1983; McCaw et Hoshizaki, 1987). De plus, certaines études ont montré que l'augmentation de la vitesse entraînait une augmentation de la fréquence des appuis avec une diminution du temps de contact (Turcotte et al., 2001) mais une longueur des poussées identique (Marino, 1977). Les études plus récentes confirment ces résultats et montrent que les meilleurs patineurs (*i.e.*, ceux étant les plus rapides sur une évaluation de vitesse) ont des fréquences et amplitudes de poussées (longueur et largeur) plus importantes que les moins bons patineurs (Chang et al., 2009; Renaud et al., 2017; Upjohn et al., 2008). Par contre, bien que la largeur des appuis soit plus importante chez les hommes, Shell et al. (2017) n'ont pas rapporté de différence significative entre joueurs et joueuses de niveau universitaire en termes de distance parcourue, de longueur, de temps et de fréquence entre le 1^{er} et le 7^{ème} appui.

À ce jour, il est impossible d'évaluer de façon valide, à l'aide de méthodes de référence telles que les plateformes de force, les différentes composantes de la force de réaction au sol lors du patinage en raison des contraintes imposées par les conditions de pratique. Une seule étude a investigué la force d'un seul et unique appui lors du démarrage à l'aide d'une plateforme de force reproduisant autant que possible la surface de la glace (Sim et Chao, 1978). Les auteurs rapportent des forces maximales dans le plan vertical allant de 1,5 à 2,5 fois le poids de corps du joueur et une force postérieure allant jusqu'à 68 kg (~750 N) selon les joueurs. Bien que la poussée latérale soit spécifique et déterminante dans la propulsion en patinage, celle-ci atteint des valeurs moins importantes que la force postérieure (36 kg ; ~350 N) en accord avec la biomécanique de patinage lors de la phase d'accélération nécessitant moins de force latérale que de force postérieure.

Plusieurs études ont également utilisé l'EMG afin de décrire les séquences d'activation musculaire (*i.e.*, coordinations musculaires). Les premières analyses EMG ont été réalisées en patinage de vitesse (de Boer et al., 1987; de Koning et al., 1991; van Ingen Schenau et al., 1996) et servent encore de référence au hockey sur glace. Plusieurs études ont cependant évalué de façon plus spécifique les joueurs de hockey sur glace sur tapis de patinage (Chang et al., 2009; Dewan et al., 2004; Goudreault et al., 2002; Hinrichs, 1995) alors qu'une seule étude à ce jour a exploré l'activité musculaire en condition écologique lors d'un sprint sur glace (Buckeridge et al., 2015) (Figure 14).

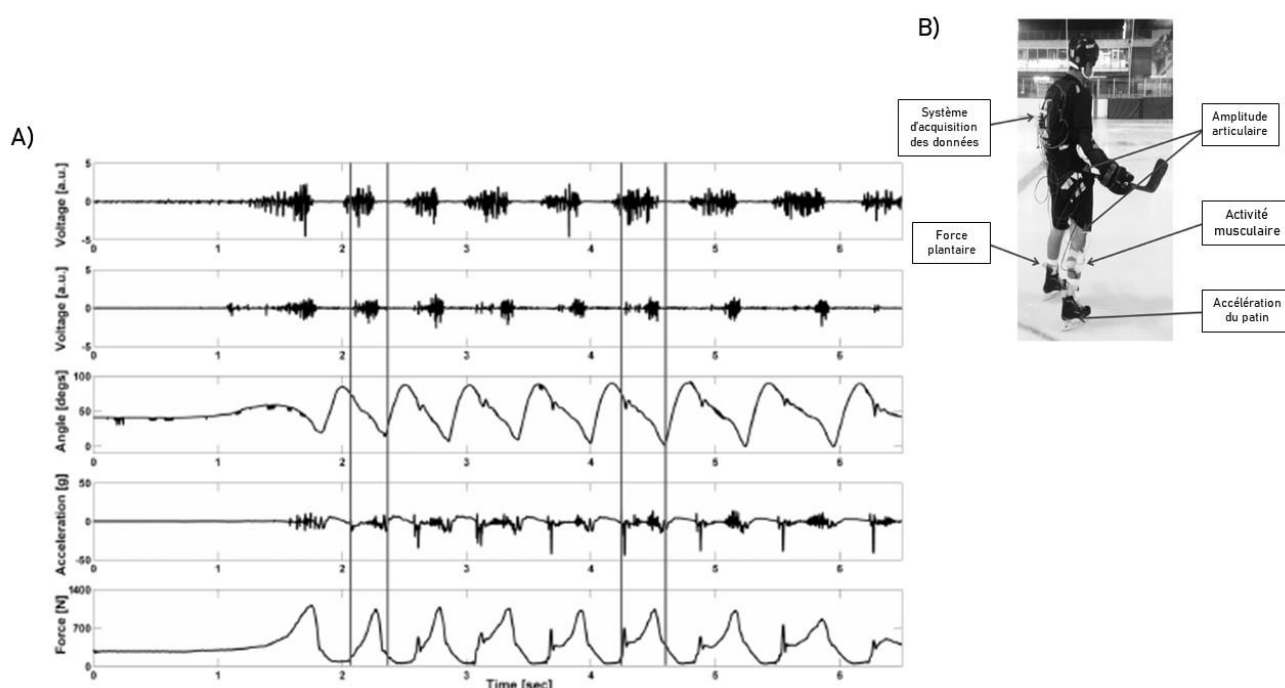


Figure 14. Décours temporel des paramètres cinématiques, cinétiques et d'activité électromyographiques (EMG) de surface lors du patinage avant.

Les mesures ont été effectuées sur les muscles vastus medialis (premier graphique en partant du haut) et gastrocnemius medial (deuxième graphique en partant du haut) (panel A) à partir de plusieurs outils de mesures embarqués sur un joueur de hockey sur glace de haut-niveau lors d'un sprint sur glace (panel B). D'après Buckeridge et al. (2015).

En lien avec la relation FV, Buckeridge et al. (2015) montrent que les niveaux de force au niveau plantaire, mesurés à l'aide de semelles intégrant des capteurs de force (Figure 10), sont significativement ($p < 0,01$) plus importants durant la phase d'accélération comparés à la phase de glisse ($-0,57.kg^{-1}$ entre les deux phases). D'autre part, les meilleurs patineurs appliquent des forces plus importantes au niveau latéral de l'avant pied lors des phases de poussées alors que

les moins bons patineurs appliquent cette force au niveau médial du médio-pied. Cela démontre la nécessité d'utiliser l'ensemble de l'amplitude de la cheville pour avoir une poussée efficace. Robbins et al. (2018) montrent également que la pronation est plus importante chez les bons patineurs lors de la phase de poussée permettant une production de force plus importante et lors de la phase de retour permettant d'enlever le patin du contact de la glace et d'effectuer un recouvrement plus rapide.

Au niveau de l'articulation du genou, lors du premier appui sur du démarrage, les amplitudes de flexion/extension dans le plan sagittal sont faibles (20°) avec une flexion maximale de 40° lors de la phase d'appui allant vers une flexion de 20° lors de la poussée (Lafontaine, 2007). Les études montrent que sur les appuis suivants et notamment sur la phase de glisse, la flexion de genou est beaucoup plus importante lors de la phase initiale de contact avec la glace (60° - 90°) et l'extension est elle aussi un peu plus importante mais toujours incomplète (10° - 20° de flexion) lors de la phase de poussée (Buckeridge et al., 2015; Budarick et al., 2018; Lafontaine, 2007; Renaud et al., 2017; Shell et al., 2017; Stidwill et al., 2010; Upjohn et al., 2008). Deux études (Budarick et al., 2018; Shell et al., 2017) rapportent une flexion de genou lors du contact avec la glace plus importante chez les hommes comparée aux femmes. En revanche, seuls Shell et al. (2017) montrent que l'extension sur la phase de poussée est plus importante chez les femmes. Certaines études montrent que les bons patineurs ont une amplitude d'extension de genou plus importante (Robbins et al., 2018; Upjohn et al., 2008) associée à des vitesses angulaires également plus élevée (Buckeridge et al., 2015), notamment sur la phase d'accélération, comparés aux moins bons patineurs. Chang et al. (2009) montrent que les vitesses angulaires de flexion/extension sont significativement plus importantes avec l'augmentation de la vitesse de patinage.

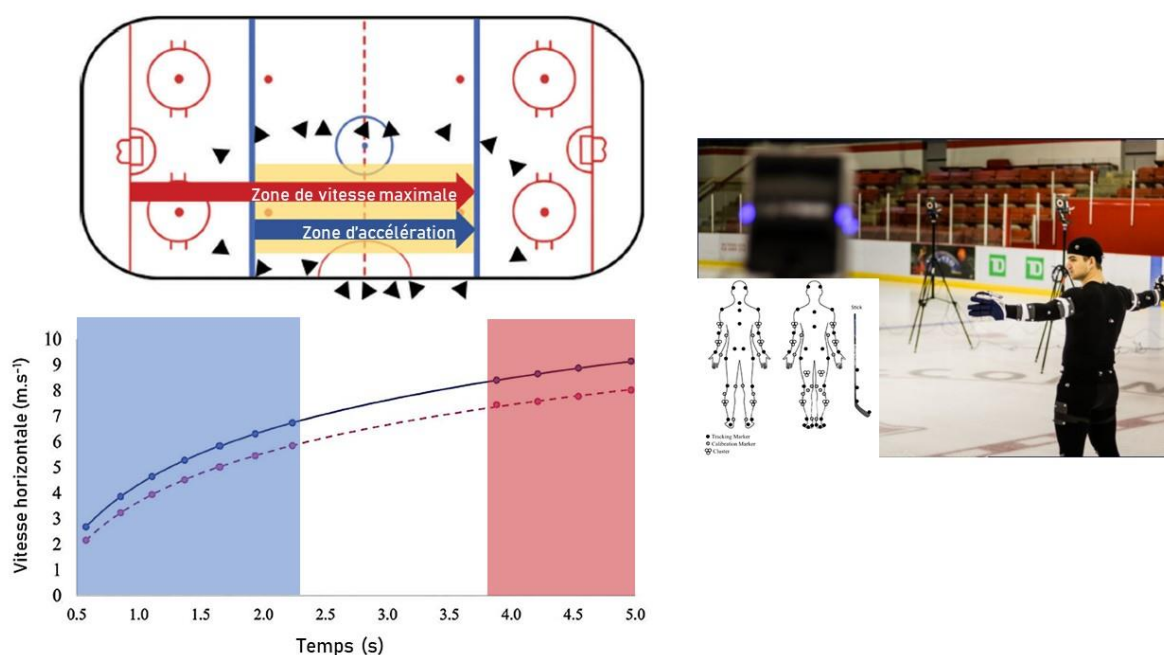
Au niveau de l'articulation de la hanche, les trois plans sont mobilisés tout au long du sprint en patinage. Lors du premier appui de poussée, le mouvement caractéristique est une extension, abduction et rotation externe, ceci afin de positionner la lame du patin à 45° par rapport au plan

de la glace et ainsi se retrouver perpendiculaire à la direction du mouvement (Pearsall et al., 2000). Robbins et al. (2018) montrent également tout comme au niveau du genou, que les bons patineurs ont des recouvrements en flexion de hanche plus rapides, bien que ce résultat semble dépendre de la vitesse de patinage. Buckeridge et al. (2015) rapportent une amplitude articulaire plus importante en extension en fin de phase de poussée chez les bons patineurs. L'amplitude et la vitesse articulaire en abduction sont significativement plus importantes lors de la phase de glisse comparées à la phase d'accélération et augmentent avec la vitesse de patinage (Buckeridge et al., 2015; Chang et al., 2009). Enfin, dans le plan transversal, la hanche est en position quasiment neutre lors du contact avec la glace, pour finir avec une rotation externe en fin de poussée (Robbins et al., 2018; Upjohn et al., 2008). Shell et al. (2017) ne rapportent aucune différence en termes d'amplitudes articulaires entre les genres au niveau du plan sagittal et transversal. Cependant, les femmes ont des amplitudes moins importantes dans le plan frontal (adduction et abduction) durant la phase de support comparé aux hommes (Budarick et al., 2018; Shell et al., 2017).

En ce qui concerne le mouvement du CM durant le sprint en patinage, les bons patineurs ont des déplacements verticaux du CM ainsi que des vitesses de poussées verticales et horizontales plus importants que les moins bons patineurs sur la phase d'accélération (Renaud et al., 2017). Ces déplacements verticaux s'atténuent légèrement au fil des appuis et le déplacement du CM devient plus important dans le plan frontal (Budarick et al., 2018).

2.3 Contraintes et limites d'une évaluation spécifique neuromusculaire

Les études récentes ont évalué, lors d'un sprint sur glace en ligne droite, les caractéristiques biomécaniques du patinage à l'aide de caméras infrarouges à haute fréquence (240 Hz) et de marqueurs fixés sur l'ensemble du corps du·de la joueur·euse (Budarick et al., 2018; Mazurek et al., 2020; Renaud et al., 2017; Robbins et al., 2018; Shell et al., 2017). Ces analyses fiables ont ainsi permis de décomposer les différentes phases du patinage : accélération et maintien de la vitesse. Cependant, bien que ce système soit considéré comme l'outil de référence dans l'analyse du mouvement, la surface de capture du système reste limitée (3 m de large, 6,5 m de long et 1,5 m de hauteur) et ne permet pas une analyse sur une tâche complète de sprint tel qu'un 30 m (Budarick et al., 2018; Shell et al., 2017) (Figure 15).



De plus, l'installation de ce type de système est contraignante en raison des conditions inhérentes à la patinoire ou liée à sa disponibilité. Seules quelques infrastructures, peu accessibles, sont équipées entièrement de ce système et permettent ainsi des analyses biomécaniques sur de plus grandes distances (van der Kruk et al., 2018). Le couplage de ces

analyses avec de l'EMG requiert lui aussi des contraintes logistiques importantes (*i.e.*, outils portables, problématique de l'équipement du·de la joueur·euse) (Buckeridge et al., 2015).

Les systèmes électromécaniques nanométriques (NEMS) comprenant accéléromètre et centrale inertielle, ont permis des analyses biomécaniques lors de tâches spécifiques (Buckeridge et al., 2015; Pilotti-Riley et al., 2019; Stetter et al., 2019) ou lors de la pratique d'activité (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a; Douglas et al., 2019b; Douglas et al., 2020) et semblent être un bon compromis entre fiabilité et facilité d'utilisation (Stetter et al., 2016).

L'ensemble de ces outils demeure cependant onéreux, rare et demande une certaine expertise voire un temps de traitement assez long. Récemment, Samozino et al. (2016) ont développé une méthode afin de déterminer la cinétique du mouvement de sprint appréciée au niveau du CM en utilisant une approche macroscopique de la dynamique inverse la plus simple possible (Helene et Yamashita, 2010). En prenant en compte l'évolution de la distance ou de la vitesse au cours du temps à l'aide de cellules photo-électriques (Haugen et al., 2020; Samozino et al., 2016), d'un radar (Cross et al., 2015; Mendiguchia et al., 2015; Samozino et al., 2016; Simperingham et al., 2019) ou d'un laser (Buchheit et al., 2014b; Devismes et al., 2019; Morin et al., 2019b), il est alors possible de déterminer simplement et rapidement la mécanique du mouvement dans le plan sagittal reflétant ainsi les capacités et propriétés mécaniques musculaires. Récemment, cette méthode a été appliquée sous la forme d'un profil accélération-vitesse en utilisant le système de positionnement par satellites [*i.e.*, Global Positioning System (GPS)] (Nagahara et al., 2017) ou LPS (Hoppe et al., 2018).

Synthèse PARTIE 2

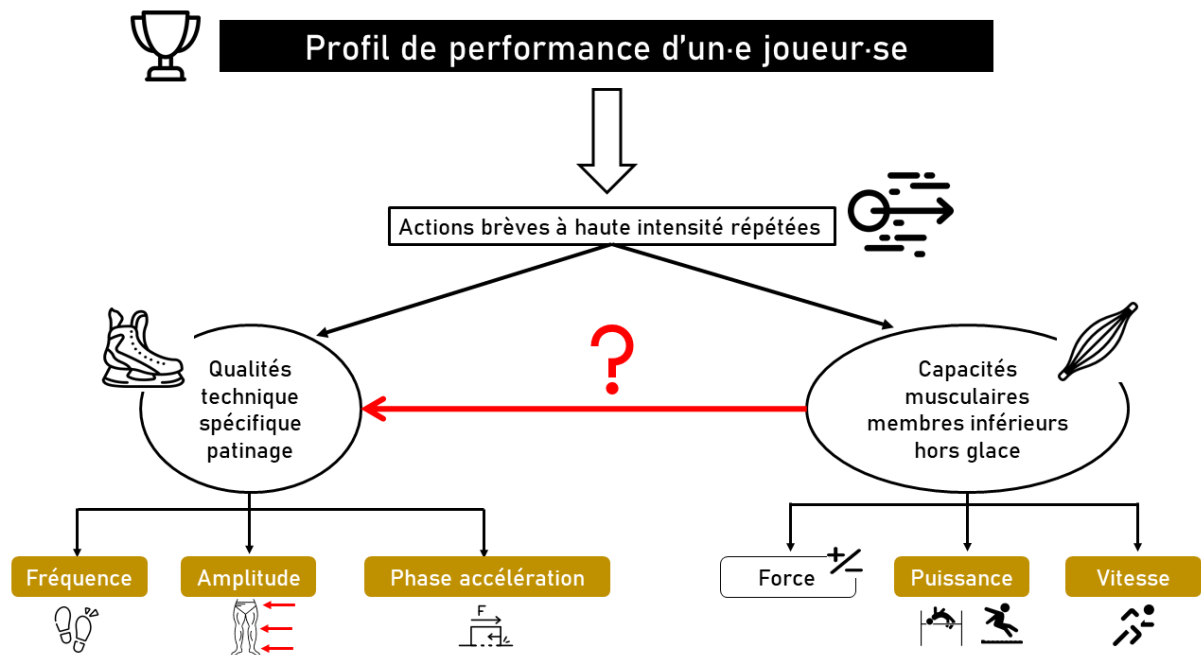


Figure 16. Synthèse des différents paramètres déterminants dans la définition d'un profil de performance d'un-e joueur-se de hockey sur glace.

L'évaluation des capacités musculaires semble définir un profil complet du-de la joueur-euse de hockey sur glace. Les composantes de puissance développée lors de différents mouvements et de vitesse en sprint évaluées hors glace montrent des corrélations modérées avec la performance en patinage. L'évaluation plus poussée *in-situ*, bien que plus complexe à mettre en place, s'avère être plus pertinente. On retrouve également les qualités de puissance qui prédominent avec une composante de force plus importante que celles évaluées hors glace.

III – QUEL ENTRAÎNEMENT POUR OPTIMISER LES CAPACITÉS MUSCULAIRES NÉCESSAIRES À LA PERFORMANCE EN HOCKEY SUR GLACE ?

Le hockey sur glace nécessite des capacités musculaires associant force, puissance et vitesse. Le développement de ces différentes capacités demande des entraînements orientés et planifiés. Le travail de développement de la force, plus contraignant notamment en terme de fatigue ou de planification, est plus généralement entrepris à l'inter-saison (Ebben et al., 2004; Neeld, 2018), afin de poser les fondations pour un travail de puissance plus spécifique par la suite (Bompa et Haff, 2009; Cormie et al., 2010). Plusieurs méthodes d'entraînement spécifiques aux joueur·euse·s de hockey sur glace existent et ont été détaillées dans la littérature scientifique. Ceux-ci peuvent être soit « intégrés » aux exercices spécifiques (*i.e.*, jeux réduits) proposés par les entraîneurs, soit « associés » c'est-à-dire spécifiques à la discipline en y intégrant le patinage, ou encore « dissociés » par l'intermédiaire d'un travail effectué hors glace. Le travail dissocié hors glace a pris un réel essor depuis les années 80 et le développement des cellules de préparation physique ainsi que celui des infrastructures (Cox et al., 1995; Montgomery, 2006). La disponibilité de la glace ou les saisons courtes sont également des facteurs qui poussent les staffs à développer et intégrer ce type d'approche. Les entraînements intégrés et associés étant plus spécifiques devront être privilégiés. La connaissance et la maîtrise de ces différents types d'entraînement sont donc essentielles dans la planification et la programmation des séances en vue d'optimiser le développement musculaire.

1. OPTIMISATION DE L'ENTRAÎNEMENT HORS GLACE : UN OBJECTIF DE DÉVELOPPEMENT MUSCULAIRE ORIENTÉ ET INDIVIDUALISÉ

1.1 Méthodes utilisées en relation plus ou moins étroites avec performance sur la glace

Le travail pliométrique sur les performances en patinage chez le joueur de hockey sur glace est un des entraînements musculaires les plus investigués dans la littérature scientifique (Dæhlin et al., 2017; Lee et al., 2014) et mis en place par les préparateurs physiques dans les structures (Ebben et al., 2004). Lockwood et Brophy (2004) ont étudié l'effet d'un entraînement pliométrique unipodal et bipodal de quatre semaines (8 sessions, 2 fois par semaine) sur la performance en patinage sur 40 m chez six joueurs universitaires Canadiens. Bien que le nombre de participants soit limité et qu'aucune comparaison n'ait été faite avec un groupe contrôle, les résultats indiquent une amélioration significative des performances sur le test de patinage sur 40 m. En accord avec les résultats de Lockwood et Brophy (2004), les résultats de ces études montrent des effets bénéfiques d'un tel entraînement pendant 8 à 12 semaines sur les performances en patinage appréhendées à travers différents tests avec (Lee et al., 2014) ou sans changements de direction (Dæhlin et al., 2017). Dæhlin et al. (2017) ont montré un effet supérieur lorsque l'on surimpose un entraînement pliométrique à un entraînement de force seul notamment sur la performance en patinage sur une distance courte (10 m), primordiale en hockey sur glace (cf. [section II.2.2](#)). Lagrange et al. (2020) ont associé sur une session un travail de force maximale dynamique à 80-90% de la 1 RM suivi d'un travail pliométrique avec des charges légères (*i.e.*, entraînement contrasté) (Ebben et Watts, 1998). Les auteurs ont montré un effet bénéfique de ce type d'entraînement sur la performance en répétition de sprint 6 h après l'entraînement, en lien avec le phénomène de potentialisation musculaire par post-activation (PAP). Ce phénomène est induit par une contraction volontaire réalisée dans la plupart des cas à une intensité maximale ou quasi-maximale ce qui provoque une augmentation couplée de F_{max} et du RFD lors des contractions suivantes. Ainsi, la PAP serait le résultat d'une augmentation

de la sensibilité des ponts d'actine-myosine aux ions calcium et un meilleur recrutement des motoneurones (Tillin et Bishop, 2009). Les exercices pliométriques sont fréquemment utilisés afin d'augmenter la puissance et la force explosive en jouant sur le cycle SSC (Ramírez-Campillo et al., 2013). Tout comme le travail en force maximale, le travail pliométrique permet également un développement spécifique du RFD (Sáez-Sáez de Villarreal et al., 2010) et ainsi la vitesse de contraction.

Concernant l'entraînement en force, les résultats semblent diverger sur la corrélation entre les changements de F_{\max} et les changements de performance en patinage. Dans une étude récente, et bien que l'auteur rapporte des résultats positifs sur des évaluations de force maximale en musculation (*i.e.*, soulevé de terre et squat devant), Bendus (2017) ne montre pas d'effet significatif sur la performance en patinage suite à un entraînement de huit semaines (16 séances) en force maximale chez des joueur·euse·s universitaires Canadiens. Lors de cette même étude, l'auteur a également investigué l'effet de l'électrostimulation sur les quadriceps en plus du programme de force maximale sur 4 semaines. Les résultats ne démontrent aucune différence entre les 2 groupes et ne sont pas en faveur de l'ajout de séances d'électrostimulation spécifique sur les quadriceps lors d'un entraînement en force maximale. À l'inverse, Brocherie et al. (2005) ont montré, chez des joueurs de hockey, un effet positif d'un entraînement (9 sessions sur 3 semaines) avec électrostimulation des quadriceps mais également un transfert sur la glace avec une amélioration des performances (-5%) sur une courte distance de patinage (10 m). Sur une durée plus importante (12 semaines avec 1 session par semaine) et en utilisant de l'électrostimulation corps entier chez des joueurs de hockey amateurs, Schuhbeck et al. (2019) montrent des résultats similaires (~-5%) en termes de performance en patinage. À l'inverse, les auteurs rapportent des gains de force isocinétique moins importants (~15% à 60°.s⁻¹) que ceux rapportés par Brocherie et al. (2005) alors que la hauteur de saut en CMJ s'améliore (~5 %). Ces résultats divergents sont certainement dus aux populations étudiées ou aux programmes neuromusculaires utilisés. Par exemple, l'amélioration de la force maximale est

particulièrement intéressante lorsque la marge de progression est importante, c'est-à-dire chez les personnes peu entraînées. À l'inverse, lorsqu'une force importante est atteinte et maintenue comme c'est le cas chez des athlètes élités, les potentiels d'amélioration de force maximale deviennent très limités (Newton et Kraemer, 1994).

Une des méthodes les plus utilisées afin de développer les capacités musculaires lors du sprint est le travail contre résistance. En hockey sur glace, Ebben et al. (2004) rapportent que le travail de résistance en course à pied est une des méthodes les plus utilisées par les préparateurs physiques pour développer la vitesse. Pollitt (2003) a été le premier à décrire ce type d'entraînement pour les joueurs de hockey avec une possibilité de transfert sur la glace. Dans son article, l'auteur présente une multitude d'exercices adaptables sur la glace et souligne l'intérêt de ce type d'entraînement pour le travail de force et puissance nécessaire sur les premiers appuis en patinage. Récemment, Thompson et al. (2020) ont d'ailleurs montré que la performance en course avec une résistance de 15 ou 30 kg étaient largement corrélées à la performance sur la glace ($r \geq 0,7$). À l'inverse, la performance en course sans résistance n'était que moyennement corrélée ($r \geq 0,35-0,65$). L'intérêt de la course contre résistance est d'augmenter la flexion du tronc afin d'abaisser le CM et augmenter l'avantage mécanique et la fréquence des appuis (Lockie et al., 2003) qui sont deux éléments caractéristiques et déterminants de la phase d'accélération en patinage (Renaud et al., 2017). Farlinger et Fowles (2008) sont les seuls à ce jour à avoir étudié l'impact d'un entraînement en résistance lors de sprints en course à pied sur les performances sur glace. Durant l'inter-saison (2 séances par semaine pendant 16 semaines), les auteurs ont mis en place deux types d'entraînement en cross-over incluant un entraînement pliométrique et un entraînement avec différentes résistances

(légère, moyenne et dure) sur plan incliné afin de simuler les appuis sur la glace (SkateSIM) (Figure 17).

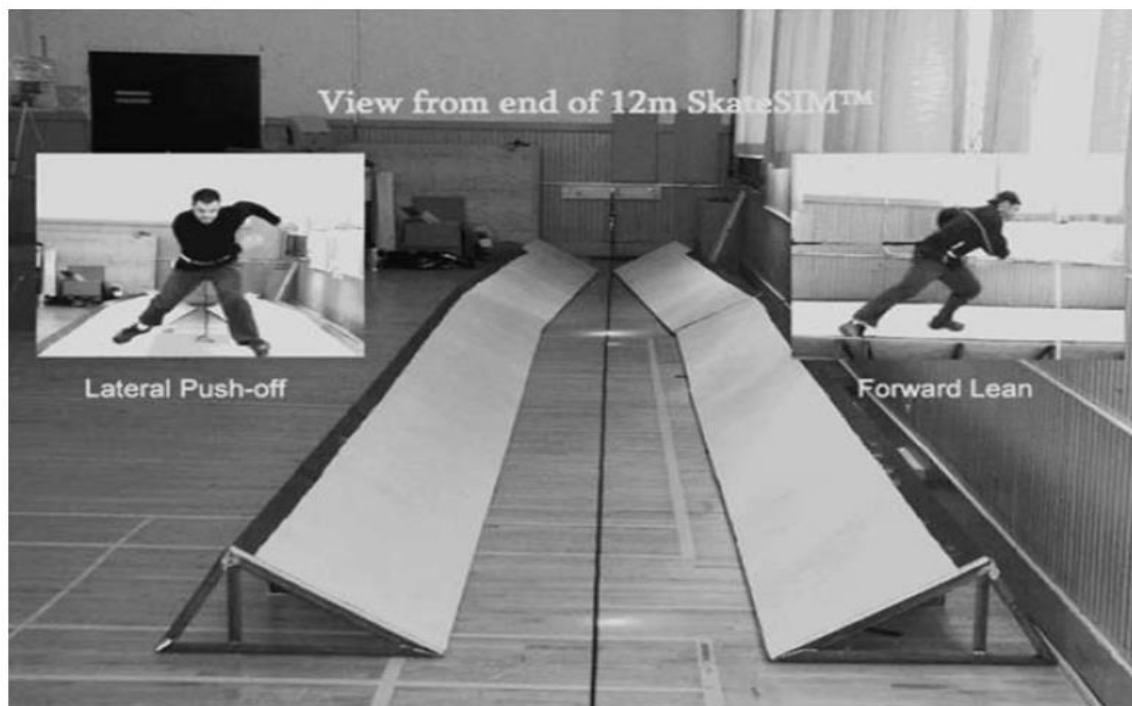


Figure 17. Utilisation du SkateSIM pour un entraînement pliométrique résisté hors glace simulant les appuis lors du patinage. D'après Farlinger et Fowles (2008).

Les auteurs rapportent des résultats significatifs et similaires sur les deux groupes (pliométrique ou SkateSIM) après huit semaines au niveau de performance en course à pied, patinage, triple hop jump et puissance anaérobie. Cependant, le groupe finissant le programme d'entraînement par les 8 semaines de SkateSIM (Plio – SkateSIM) démontre une augmentation plus importante des performances sur et hors glace sur 30 m comparé au groupe finissant par le programme d'entraînement en pliométrie (SkateSIM – Plio). Suite à ces résultats, les auteurs soulignent l'importance de la planification du plan d'entraînement avec une progression dans la spécificité des exercices durant l'inter-saison, afin d'optimiser le transfert des adaptations et donc la performance dans une tâche complexe et spécifique telle que le patinage. Dans leur étude, la mise en place du SkateSIM avec résistance a permis de reproduire l'angle de poussée postéro-

latéral et l'inclinaison vers l'avant du corps que l'on retrouve lors du patinage, comme évoqué précédemment, lors d'un entraînement en course résistée.

1.2 Utilisation des profils force-vitesse pour une meilleure individualisation de l'entraînement

La majorité des études évaluant les joueur·euse·s de hockey sur glace rapportent des performances de temps (*i.e.* sprint en course à pied ou patinage) ou de hauteur (*i.e.*, sauts verticaux) lors des différents tests utilisés (cf. [section II.1](#)). La performance en tant que telle n'est que le reflet global des qualités de force et de vitesse intrinsèques des systèmes neuromusculaire et musculo-squelettique. Il a par exemple été montré que la hauteur de saut lors d'un SJ n'était pas systématiquement un bon indicateur de la puissance développée par les membres inférieurs sur une population entraînée (Morin et al., 2019a). Il est donc suggéré d'utiliser la méthode développée par Samozino et al. (2008) qui prend en compte également la masse de l'athlète (m) et la position de départ du saut afin de mieux déterminer les capacités musculaires des membres inférieurs lors du saut.

Déterminer le profil FV individuel du·de la joueur·euse en sprint sans se baser uniquement sur la performance de temps permettra de mettre en place une planification individualisée et orientée vers le développement d'une capacité définie (*i.e.*, force-orientées, vitesse-orientées ou équilibrées). En effet, deux joueurs réalisant la même performance chronométrique sur un sprint de 30 m peuvent présenter des profils FV différents, et donc des propriétés neuromusculaires et/ou musculo-squelettiques différentes (Morin et Samozino, 2016) (Figure 18).

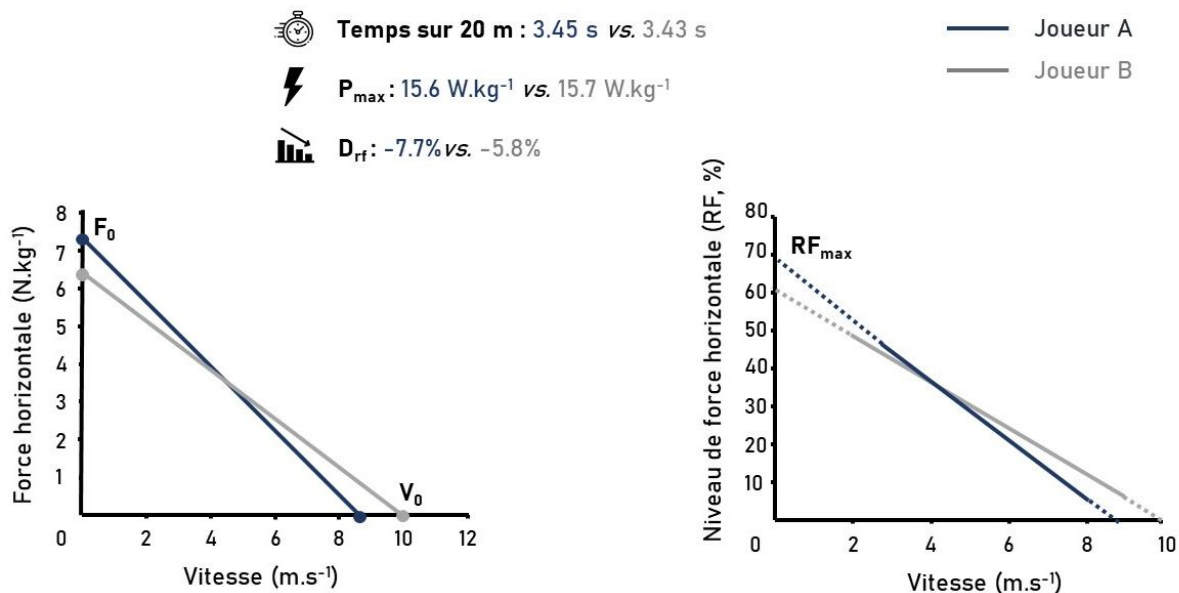


Figure 18. Différents profils force-vitesse pour une même performance.

Profils de deux joueurs de rugby lors d'un sprint de 30 m en course à pied avec des orientations différentes de leur profil force-vitesse. Les deux joueurs atteignent leurs vitesses maximales respectives avant les 30 m. D'après Morin et Samozino (2016).

Un même entraînement pour ces deux joueurs n'aura donc pas les mêmes effets (Cross et al., 2018a). Ce type d'évaluation rapide à mettre en place permet également de suivre les effets de la fatigue lors de répétitions de sprints (Jiménez-Reyes et al., 2019a) ou au cours d'une saison (Jiménez-Reyes et al., 2020). Les études rapportent que la capacité de production de force maximale semble être la plus influencée par la fatigue aigue ou chronique. *A contrario*, la capacité à maintenir cette capacité via un entraînement spécifique permettra de maintenir la performance. Il n'a pas été établi à ce jour de profil FV optimal en course à pied contrairement à celui développé en SJ. Il semblerait, de manière assez logique, que plus la performance est évaluée sur courte distance plus les valeurs de F_0 et RF_{max} ont une influence importante (cf. [section II.1.3.1](#)). Certaines études ont investigué les effets de différents entraînements (Cross et al., 2018a; Lahti et al., 2020b; Rakovic et al., 2018). Rakovic et al. (2018) ne démontrent pas d'effet sur la performance en sprint en course à pied suite à la mise en place d'un programme individualisé de huit semaines (*i.e.*, 16 sessions) basé sur les profils FV comparé à un groupe contrôle réalisant un entraînement de sprint à poids de corps. Les joueuses ont été assignées à un entraînement résisté pour celles présentant les pentes de la relation FV (S_{FV}) les plus faibles,

à un entraînement assisté créant de la survitesses pour celles présentant les S_{FV} les plus hautes et un entraînement mixte associant les deux modalités pour celles présentant les S_{FV} intermédiaires. En lien avec ces résultats, Cross et al. (2018a) montrent un changement *trivial* à *faible* pour l'ensemble des variables suite à un entraînement résisté (*i.e.*, 12 sessions) (i) provoquant une diminution de 10% de la vitesse maximale atteinte (V_{max}) ou (ii) permettant de développer la puissance maximale en course à pied. L'interprétation de ces résultats reste difficile car plusieurs problématiques méthodologiques sont à déplorer. Rakovic et al. (2018) rapportent un nombre de sujets pour chaque groupe d'intervention très faible (*i.e.*, 3-4 pour chaque groupe). De son côté, Cross et al. (2018a) ont divisé en deux un groupe de sujets très hétérogènes (*i.e.*, sport, genre, niveau) et de façon aléatoire. De manière plus générale, les post-tests ont été réalisés directement à l'issue des programmes d'intervention. Or, il existe une grande variabilité inter-individuelle concernant la réponse à l'entraînement (Lahti et al., 2020b; Rakovic et al., 2018) mais également concernant le temps nécessaire pour induire des adaptations soit de force (*i.e.*, adaptations structurelles) soit de vitesse (*i.e.*, adaptations nerveuses) (Jiménez-Reyes et al., 2019b). Enfin, les modalités de résistance concernant le travail résisté en sprint en course à pied diffèrent entre les études. Bien que la littérature semble divergente sur les modalités de la résistance les plus adaptées (Alcaraz et al., 2018, 2019; Cross et al., 2019; Petrakos et al., 2016), le travail en sprint contre haute-résistance est une méthode qui a montré un réel intérêt dans les sports collectifs ces dernières années notamment dans le développement du travail de la force (Cross et al., 2018a; Lahti et al., 2020a; Morin et al., 2017). Récemment, en se basant sur les profils individuels de FV en sprint, Lahti et al. (2020b) ont démontré qu'un programme (*i.e.*, 12 à 16 sessions) de course résistée (*i.e.*, diminution de 75% de la V_{max}) ou de course assistée (*i.e.*, augmentation de 5% de la V_{max}) avaient un impact significatif sur la performance en sprint sur 20 m notamment sur les 2 semaines post-intervention avec une large variabilité inter-individuelle.

À ce jour, aucune étude n'a rapporté de valeurs concernant les profils FV en SJ ou sprint de joueur·euse·s de hockey sur glace. Définir les capacités musculaires lors de ces évaluations sur une population de haut-niveau permettrait aux préparateurs physiques de disposer de valeurs de référence et ainsi mieux orienter leur entraînement. Il serait également intéressant de déterminer les potentielles corrélations entre les différentes capacités musculaires évaluées hors et sur glace en utilisant la même méthode macroscopique. Cependant, bien que P_{max} semble être fortement corrélée entre les différentes tâches évaluées, chaque profil est dépendant de la tâche réalisée (*i.e.*, vertical vs. horizontal) (Jiménez-Reyes et al., 2018; Marcote-Pequeño et al., 2019). Ainsi, les différents paramètres sont faiblement corrélés entre eux (*i.e.*, F_0 , V_0 ou la pente de la relation FV). Afin d'avoir une évaluation complète et globale du·de la joueur·euse de hockey sur glace, une évaluation du profil FV en SJ et en sprint peut donc s'avérer pertinente. Ces évaluations spécifiques permettraient de mieux éclairer les capacités musculaires de chaque individu et ainsi orienter dans chaque tâche la planification et la programmation des entraînements.

1.3 Notion de transfert

Les capacités musculaires semblent spécifiques à chaque tâche hormis la puissance qui est corrélée entre le SJ et le sprint (Jiménez-Reyes et al., 2018; Marcote-Pequeño et al., 2019). Par exemple, Simpson et al. (2021) ont analysé l'effet d'un entraînement de 8 semaines orienté selon le profil FV et le déficit FV [différence entre le profil FV mesurée et le profil FV optimal ($S_{FV_{opt}}$), FV_{imb}] en SJ chez des joueurs de rugby élites. Les joueurs étaient divisés en cinq groupes ($FV_{imb} < 60\%$, déficit de force important ; $FV_{imb} = 60-90\%$, déficit de force ; $FV_{imb} = 90-110\%$, profil équilibré ; $FV_{imb} = 110-140\%$, déficit de vitesse et $FV_{imb} > 140\%$, déficit de vitesse important) et réalisaient un programme spécifique en fonction des objectifs de développement. Les résultats démontraient une augmentation de la force maximale (évaluée avec un 3 RM en squat classique), de la hauteur de saut et de la puissance développée lors du SJ comparé à un groupe contrôle ayant réalisé un programme « classique » de développement de la force. En revanche, aucun effet n'a été observé sur la performance en sprint sur 10 m ou

20 m démontrant ainsi que la mise en place d'un programme basé sur le profil FV vertical ne semble pas être pertinent pour le développement de la performance horizontale en sprint. Wilson et al. (1996) avaient montré qu'avec un entraînement en force de 8 semaines en squat, la 1 RM et la hauteur de saut augmentaient chacune de 21% alors que la performance en sprint de 40 m de 2% seulement. Cela peut s'expliquer par le fait qu'à des haut-niveaux de performance (Barr et al., 2014; Brearley et Bishop, 2019; Jiménez-Reyes et al., 2018), les coordinations inter-segmentaires et la technique du geste semblent plus limitants de la performance que la production de force en elle-même.

Ces résultats soulignent le principe de spécificité qui demeure central dans le concept de transfert (Young, 2006). Ce principe indique que les adaptations sont spécifiques à la nature du stress engendré par l'entraînement. Il est évident que si l'on pousse à l'extrême ce principe, l'entraînement consisterait uniquement à pratiquer l'activité, et donc à surcharger certaines parties du corps, et il n'existerait plus d'entraînements de musculation en tant que tels. Il apparaît que le travail de force général est avantageux sur certaines périodes (*i.e.*, hors-saison) et/ou sur certaines populations (*i.e.*, niveaux loisirs ou confirmés). Il permet d'améliorer les capacités de production de force (*i.e.*, adaptations nerveuses) ou d'augmenter la masse musculaire (*i.e.*, adaptations structurelles). Cependant, le transfert des capacités de production de force vers un geste spécifique semble limité sur des populations très entraînées ou expertes (Brearley et Bishop, 2019; Young, 2006).

De ce fait, la question de transfert des capacités musculaires développées hors glace vers un geste plus complexe (*i.e.*, patinage) apparaît donc légitime. Bendus (2017) ne montre aucun transfert entre le gain en force maximale et la performance en patinage suite à un entraînement de 8 semaines en force maximale chez des joueur·euse·s universitaires Canadien·enne·s. Novák et al. (2019) ont comparé en cross-over les effets d'un entraînement en agilité hors et sur glace chez des adolescents sur la performance en patinage à travers différentes tâches (*i.e.*, ligne droite, manœuvres spécifiques au hockey sur glace, agilité, test de réaction). Les résultats

montrent des effets bénéfiques des deux types d'entraînement notamment sur les performances en patinage de type agilité ou test de réaction, mais aucun effet sur les performances lors de mouvements cycliques tels que le sprint en ligne droite ou avec des virages (« S cornering test »). Les auteurs rapportent des bénéfices plus importants de l'entraînement spécifique en agilité sur la glace, en comparaison de ceux générés par l'entraînement hors glace. L'entraînement en agilité hors glace apparaît ainsi être un bon moyen d'optimiser la performance sur la glace mais l'entraînement spécifique sur glace semble plus efficace. Ces résultats renforcent l'idée de spécificité du patinage avec des tâches motrices que l'on ne retrouve dans aucun type de mouvement hors glace. Ces tâches motrices, bien que réalisées lors des entraînements collectifs, nécessitent également des entraînements spécifiques (« power skating »), afin d'optimiser et rendre plus efficient le travail musculaire réalisé hors ou sur glace. Novák et al. (2020) ont comparé les effets de ce type d'entraînement chez des jeunes joueurs de hockey comparé à un entraînement plus classique incluant des changements de directions et de vitesse. Les auteurs rapportent des effets bénéfiques de chaque entraînement sur des performances en patinage. L'entraînement spécifique diminuait le temps nécessaire pour parcourir des longues distance (*i.e.*, 30 m) alors que l'entraînement aux changements de direction et de vitesse était plus bénéfique sur des performances de courte distance (*i.e.*, accélération sur 4-m) ou sur des performances en agilité.

En conclusion, il apparaît au vu de la littérature que pour optimiser le transfert du travail neuro-musculaire vers des compétences spécifiques à la discipline, l'entraînement devra être aussi spécifique que possible tout en gardant une partie dite générale (« approche des méthodes mixtes ») notamment chez des populations de niveau loisir ou intermédiaire (Brearley et Bishop, 2019). Définir et quantifier l'entraînement spécifique devient alors primordial afin d'orienter la planification de l'entraînement en fonction des objectifs de développement des différentes capacités neuro-musculaires sans créer de surcharge sur certaines structures.

2. QUEL ENTRAÎNEMENT SPÉCIFIQUE SUR LA GLACE POUR DÉVELOPPER LES CAPACITÉS MUSCULAIRES ET SE RAPPROCHER DES EXIGENCES DE COMPÉTITION

2.1 Entraînement spécifique des capacités musculaires

L'entraînement musculaire spécifique sur la glace est depuis très longtemps utilisé par les entraîneurs et préparateurs physiques mais ses effets restent néanmoins peu étudiés dans la littérature. Hollering et Simpson (1977) ont investigué l'effet d'un entraînement de six semaines (3 sessions par semaine) en résistance sur la performance et la vitesse de patinage. Les auteurs ne rapportent pas d'effet significatif sur la performance suite à cet entraînement, certainement en raison de la méthode de résistance utilisée. En effet, dans leur étude, la résistance était imposée par un partenaire ce qui peut être moins efficace car cela ne permet pas une résistance constante et quantifiée. Afin de mieux calibrer la résistance, l'utilisation de vestes lestées lors d'un entraînement spécifique sur glace montre cette fois-ci une amélioration de la performance dans plusieurs tests de patinage (vitesse, accélération et agilité). Janot et al. (2013) ont quant à eux utilisé des résistances élastiques calibrées (résistance forte et résistance modérée égale à la moitié de la résistance forte) (Figure 19).



Figure 19. Exemples d'exercice de patinage contre résistance.

Le panel A représente un départ croisé vers l'avant, le panel B un travail de patinage arrière et le panel C un travail de sauts vers l'avant. D'après Janot et al. (2013).

Les résultats montraient une augmentation significative de la vitesse de patinage (4,2%) et une meilleure performance au test de patinage long (-2,4% sur 44.8-m), sans répercussion significative sur la phase d'accélération, non significative comparativement au groupe contrôle (-3,4% vs. -6,3%, respectivement). Plus récemment, Matthews et al. (2010) ont montré l'intérêt de l'effet de PAP d'un sprint réalisé contre un haut niveau de résistance sur l'amélioration de la performance en patinage sur 25 m (-2,6%). Cependant, la résistance qualifiée de très lourde était ici aussi appliquée par un partenaire avec les limites méthodologiques évoquées précédemment (Hollering et Simpson, 1977).

Récemment, les méthodes d'entraînement intègrent de plus en plus des situations de jeu ou des « jeux réduits » (*i.e.*, jeux à effectifs réduits et/ou en espace restreint), afin de reproduire au plus près les contraintes physiques, technico-tactiques et cognitives rencontrées lors des compétitions (Halouani et al., 2014; Hammami et al., 2018). Bien qu'intéressantes pour les entraîneurs en raison de similitudes avec le contexte de compétition, une évaluation précise des différentes contraintes est nécessaire afin d'optimiser la planification et mieux définir les objectifs de développement des différentes qualités physiques notamment au niveau musculaire.

2.2 Intérêt et limites des situations de jeux réduits pour le développement des qualités musculaires

L'objectif de l'entraînement est de préparer au mieux les joueur·euse·s aux contraintes auxquelles ils·elles devront faire face lors des compétitions. Spiering et al. (2003) ont montré qu'il existait des différences significatives entre les contraintes cardio-vasculaires rencontrées lors des entraînements comparées à celles rencontrées lors des compétitions chez des joueuses universitaires Canadiennes. Les auteurs montrent que cette différence est importante pour les temps passés à des intensités élevées ($> 90\% FC_{max}$; $5,6 \pm 3,5\%$ vs. $10,5 \pm 4,1\%$, respectivement). En adéquation avec ces résultats, Douglas et al. (2019b) ont récemment rapporté des différences significatives ($ES > 1.5$) du volume et de l'intensité de la charge interne

(*i.e.*, cardio-vasculaire) et externe (*i.e.*, charge mécanique, PL) entre les entraînements et les compétitions (Figure 20). Les auteurs interpellent sur l'importance du type de séance proposée, mais également en ce qui concerne la manière dont la séance est construite (*i.e.*, remédiation, explications) afin de ne pas induire des contraintes de volume et intensité trop faibles et ainsi potentiellement s'éloigner des exigences de compétition. À haut-niveau, les contraintes de calendrier et l'enchaînement des matchs imposent d'optimiser le temps d'entraînement disponible en fonction des différents objectifs de développement. À l'inverse, l'entraînement chez les jeunes joueur·euse·s doit à la fois allier développement global du·de la joueur·euse et plaisir afin d'assurer une implication totale (Grehaigne, 2018).

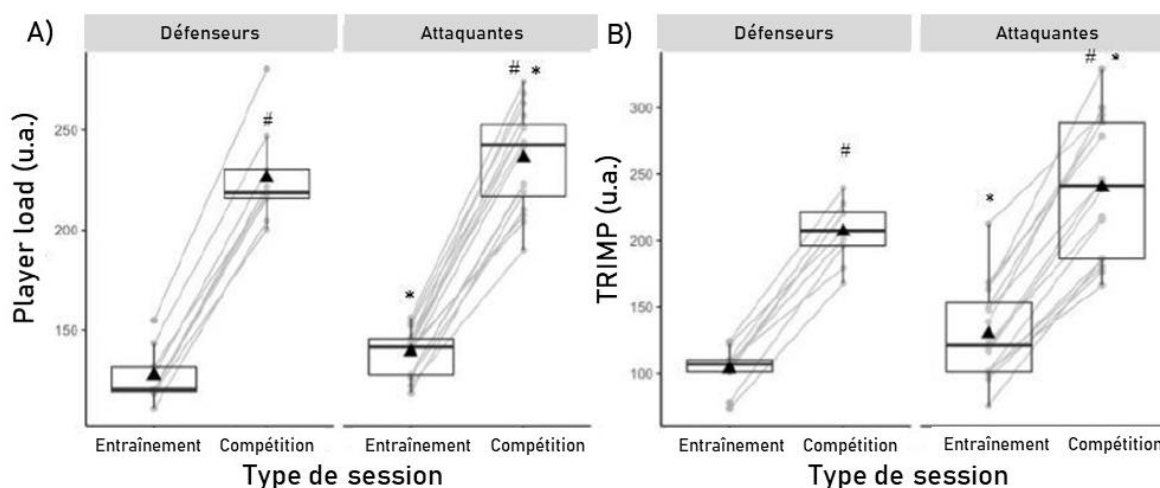


Figure 20. Comparaison de la charge externe et de la charge interne rencontrées à l'entraînement et en compétition par des joueuses élites en fonction du type de séance et du poste.

Le panel A représente la charge externe et le panel B représente la charge interne. * démontre une différence significative entre les postes et # démontre une différence significative entre le type de séance. D'après Douglas et al. (2019b).

Les jeux réduits sont des méthodes d'entraînement qui peuvent permettre de répondre à l'ensemble de ces contraintes tout en étant efficient d'un point de vue du temps imparti. Mis en avant, dans le concept de « périodisation tactique » développée initialement dans le football (Afonso et al., 2020; Lacombe et al., 2018c), l'objectif des jeux réduits est de développer certaines capacités physiques (*i.e.*, force, puissance, vitesse) en lien avec les contraintes de la compétition dans un contexte spécifique de jeu. Hammami et al. (2018) rapportent des effets

modérés à larges concernant l'amélioration des qualités physiques en lien avec l'utilisation des jeux réduits (*i.e.*, vitesse, agilité, puissance, répétition de sprints). Ces effets positifs semblent se traduire également sur les aspects technico-tactiques en comparaison d'entraînements uniquement basés sur du travail athlétique (*i.e.*, efforts intermittents, répétition de sprints).

Durant un jeu réduit en hockey sur glace, les joueur·euse·s touchent plus souvent le palet et ce pour diverses raisons : i) l'espace de jeu réduit, ii) le nombre moindre de joueur·euse·s, et, iii) les conditions et règles du jeu indiquées par l'entraîneur. Malgré le fait que l'aspect technico-tactique des jeux réduits au hockey sur glace soit mieux documenté et établi (USA Hockey, 2019), les exigences physiques, physiologiques et biomécaniques des jeux réduits n'ont que très peu, voire pas, été étudiées. Une seule étude a analysé l'intensité des efforts sur six situations différentes de jeux réduits. Les résultats montrent que l'ensemble des situations se joue à des intensités élevées ($\geq 89\%$ FC_{max} et $\geq 3,6$ L.min⁻¹), se rapprochant donc des contraintes rencontrées en compétition (Rago et al., 2020; Spiering et al., 2003; Stanula et al., 2016; Stanula et Rocznio, 2014), avec des différences selon les situations proposées (*i.e.*, le jeu réduit en 3 vs. 3 en transition étant le plus sollicitant ; Figure 21).

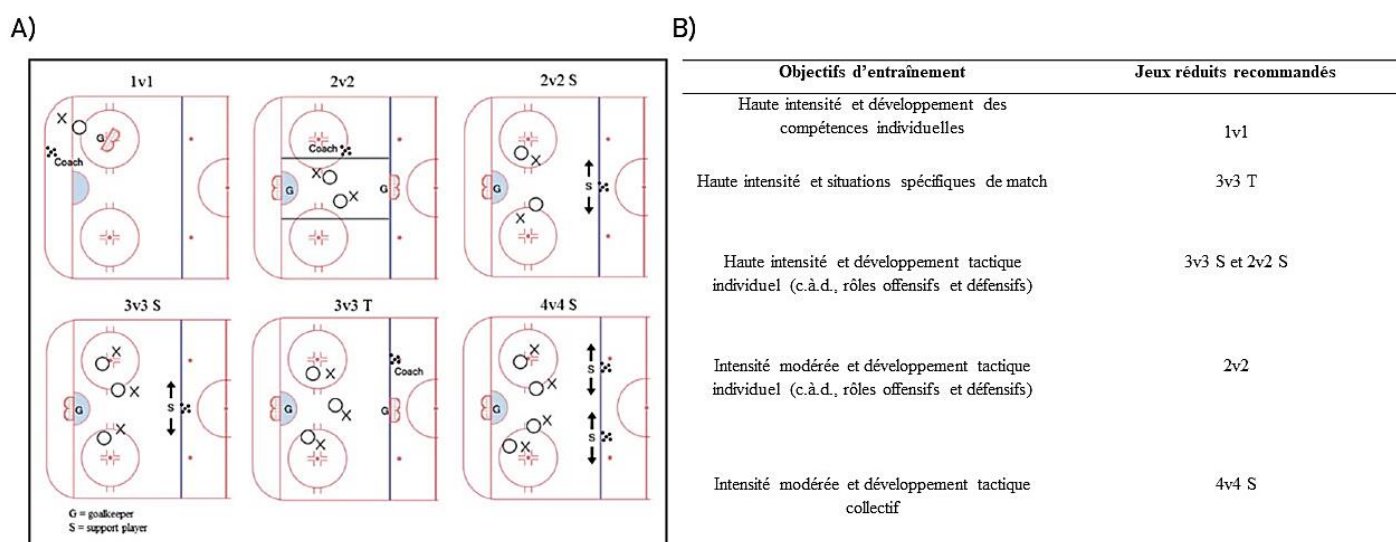


Figure 21. Exemples de jeux réduits proposés par les entraîneurs et recommandations en fonction des objectifs définis.

D'après Lachaume et al. (2017).

Cependant, les auteurs n'évaluent pas les contraintes rencontrées par les joueurs lors d'une compétition, ce qui ne permet pas de comparaison sur une même population. À ce jour, bien que certaines études (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019b; Rago et al., 2020) rapportent les contraintes biomécaniques *via* la charge externe mesurée à l'aide de centrales inertielles lors des entraînements, aucune étude n'a investigué les réponses physiologiques et les contraintes biomécaniques spécifiques lors de jeux réduits en hockey sur glace.

Synthèse PARTIE 3

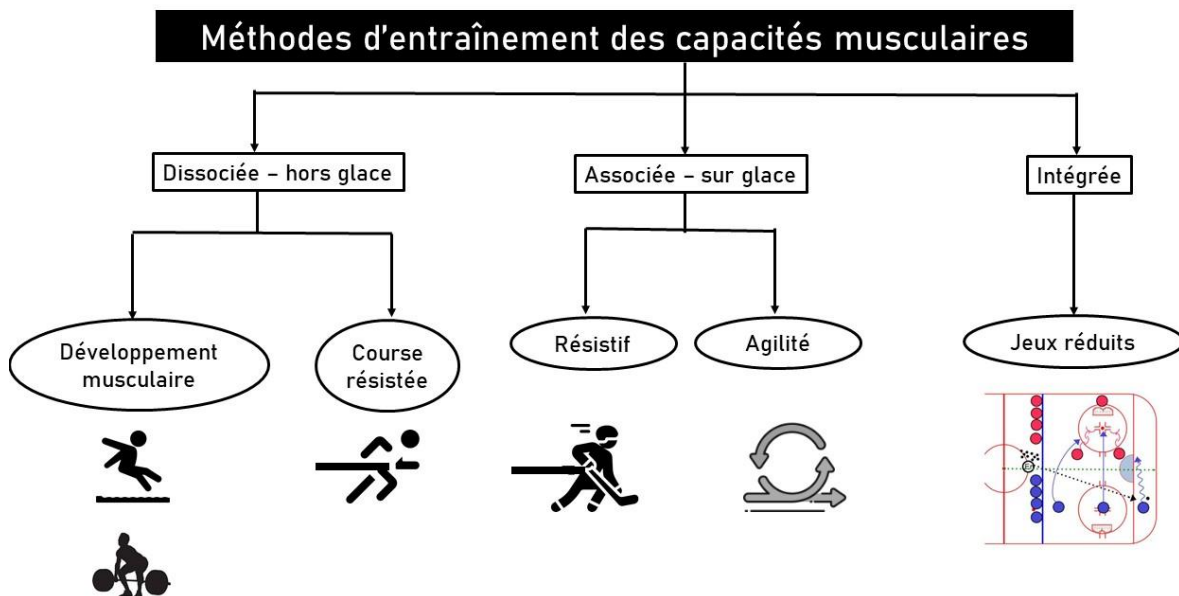


Figure 22. Synthèse des différentes méthodes utilisées pour le développement des capacités musculaires des joueur·euse·s de hockey sur glace.

À notre connaissance, les méthodes utilisées hors glace ne tiennent pas compte des profils musculaires individuels pour construire la programmation des entraînements. Dans le même temps, les entraînements plus spécifiques sur glace ne prennent pas non plus en compte les différents profils individuels pour orienter les entraînements ou utilisent des méthodes sans quantification (*i.e.*, jeux réduits) ou avec une quantification limitée (*i.e.*, patinage résisté). Le développement à la fois de nouvelles méthodes de caractérisation de profils musculaires individuels (*i.e.*, profils FV) et de nouvelles technologies (*i.e.*, centrales inertielles), doit permettre la mise en place d'entraînements plus orientés et individualisés que ce soit spécifiquement sur la glace ou hors glace.

PROBLÉMATIQUE & OBJECTIFS EXPÉRIMENTAUX

Le développement des nouvelles technologies (*i.e.*, centrales inertielles, LPS) a permis de mettre en avant l'importance des efforts à haute intensité en hockey sur glace (Douglas et al., 2019a; Douglas et al., 2020). Les études tendent à démontrer que ces efforts à haute intensité sont aussi ceux qui sont le plus sensibles au déroulement du match avec des diminutions significatives entre le premier et le dernier tiers (Allard et al., 2020; Brocherie et al., 2018; Douglas et al., 2019a; Douglas et Kennedy, 2020; Lignell et al., 2018). En revanche, aucune étude n'a pris en compte les contraintes (*i.e.*, enchaînement de matchs, opposition, enjeux) associées à la participation à des compétitions majeures en hockey sur glace (*i.e.*, championnat du Monde, Jeux Olympiques). Ainsi, évaluer les contraintes biomécaniques lors de ce contexte spécifique permettrait une meilleure planification des entraînements précédents et une gestion individualisée de chaque joueur·euse (*i.e.*, récupération, temps de jeu) afin de maintenir une performance collective au fil de la compétition.

Notre compréhension du rôle des capacités musculaires évaluées *in-situ* sur la performance spécifique reste limitée, notamment en raison de contraintes méthodologiques fortes imposées par les conditions de pratique du hockey sur glace. Déterminer le rôle des propriétés du profil FV dans la performance en patinage permettrait de mieux identifier les capacités musculaires et les besoins de développement individuels, étape nécessaire à l'optimisation de (*i.e.*, individualisation, orientation) la planification et la programmation des entraînements.

Les méthodes d'entraînement étudiées à ce jour ne prennent en compte ni les capacités intrinsèques de chaque individu ni la notion de spécificité de l'entraînement (Brearley et Bishop, 2019; Young, 2006). Une évaluation plus complète prenant en compte à la fois les contraintes physiologiques, biomécaniques et technico-tactiques mises en place lors de ces entraînements apparaît nécessaire pour mieux préparer les joueur·euse·s aux exigences des compétitions (Douglas et al., 2019b).

La partie expérimentale présentée dans ce document vise ainsi à **mieux comprendre les contraintes biomécaniques en contexte de compétition internationale**. Afin de répondre aux contraintes des exercices de haute intensité, l'évaluation de profils FV lors de mouvements effectués en conditions hors glace mais également en patinage permettra d'identifier plus précisément les déterminants musculaires de la performance en hockey sur glace. Enfin, une évaluation complète physiologique, biomécanique et subjective (ressenti) des situations de jeux réduits permettra aux entraîneurs une meilleure planification de ces situations en fonction des objectifs définis.

L'[étude #1](#) a visé à analyser l'activité de hockey sur glace féminin dans des conditions « standardisées » reflétant les contraintes de calendrier d'une compétition internationale majeure. Pour ce faire, six joueuses de l'équipe de France de hockey sur glace féminine ont été équipées de centrales inertielles durant quatre matchs amicaux programmés sur cinq jours contre une même équipe d'un niveau similaire en termes de classement international. Les caractéristiques temporelles (*i.e.*, nombre de présences et temps de jeu effectif moyen par présence, par période ou par match) et la charge externe biomécanique ont été comparées au cours des matchs et entre les matchs. L'objectif était d'**évaluer les fluctuations des différentes variables mesurées dans un contexte aussi contrôlé que possible**, afin de pouvoir par la suite définir les changements significatifs en lien avec le stress, la fatigue et les contraintes d'une compétition officielle.

Les [études #2](#), [#3](#) et [#4](#) ont consisté (i) à appliquer l'utilisation du profil FV en course à pied (Samozino et al., 2016) dans les conditions de sprint sur glace (patinage) à l'aide d'un radar et d'évaluer la reproductibilité de la méthode. Nous avons ensuite comparé les différents outils et méthodes pouvant être utilisés afin de déterminer le profil FV dans les conditions spécifiques de patinage. Pour ce faire, nous avons étudié les différences entre des indicateurs extraits à partir de la cinétique de déplacement du CM mesurée avec (ii) le radar et la vidéo à haute-fréquence ou (iii) à partir de l'utilisation d'un sprint sans contrainte (ou résistance) évalué à

l'aide d'un radar avec l'élaboration du profil FV à l'aide de plusieurs sprints résistés contre un appareil robotisé permettant de calibrer une résistance constante. Les différentes comparaisons d'outils ou de méthodes avaient pour but de **définir les caractéristiques et les limites de chaque approche méthodologique afin d'orienter les utilisateurs vers la méthode la plus appropriée au contexte d'exploration et de l'objectif d'évaluation.**

L'**étude #5** a caractérisé les capacités musculaires de joueuses de hockey sur glace de haut-niveau à l'aide des profils FV en patinage, en sprint et en saut vertical. Ce travail a visé un double objectif : (i) **essayer d'évaluer les corrélations entre capacités musculaires évaluées dans ces différents mouvements reflétant les capacités de force, vitesse et puissance lors de mouvements réalisés à haute intensité** et (ii) **définir de façon simple et spécifique les déterminants musculaires liés à la performance en patinage.**

L'**étude #6** s'est intéressée aux contraintes biomécaniques et physiologiques liées à la mise en place de jeux réduits fréquemment utilisés à l'entraînement. L'objectif était de **quantifier, à l'aide de centrales inertielles, de cardiofréquencemètres, de prise de lactatémie sanguine ou de questionnaires subjectifs, les contraintes inhérentes à différentes situations répétées,** afin d'éclairer les entraîneurs sur la programmation de ces situations en fonction des objectifs définis.

L'ensemble des tests utilisés au cours de la thèse faisait partie intégrante de la routine d'évaluation des joueuses dans le cadre du suivi de leur entraînement et respectait les principes éthiques de la déclaration d'Helsinki. Les données ont été analysées majoritairement en utilisant les langages de programmation labtalk (OriginPro 2020 ; OriginLab Corporation, Northampton, Etats-Unis et R Studio V 3.6.1; R Studio, Boston, Etats-Unis). Lorsque cela était nécessaire, des logiciels spécifiques aux différents outils (radar, centrales inertielles, cardio-fréquencemètres) ont également été utilisés (Stalker ATS System, Version 5.0.3.0, Applied Concepts, Inc, Texas, USA ; OpenField 2.5.0, Catapult Sports, Melbourne, Australie ; Firstbeat Sport, Jyvaskyla, Finlande).

1. CARACTÉRISTIQUES DES PARTICIPANTES AUX ÉTUDES

Les [études #1](#), [#3](#), [#4](#) et [#5](#) ont été réalisées sur des joueuses de l'équipe de France féminine de hockey sur glace. Les [études #2](#) et [#6](#) ont été réalisées sur des joueuses du pôle France féminin de hockey sur glace dont le fonctionnement peut être apparenté à un centre de formation (Tableau 8). Les joueuses participant aux études représentaient l'ensemble des positions (*i.e.*, attaquantes et défenseurs) à l'exception du poste de gardien de but, considéré comme trop spécifique et pour lequel nous ne disposions pas d'un échantillon suffisamment représentatif (*i.e.*, quatre gardiennes). Les joueuses recevaient une explication claire et précise en amont des différentes études menées et remplissaient un formulaire écrit de consentement pour la participation aux études. Pour les participantes mineures, les représentants légaux remplissaient également un formulaire de consentement. L'ensemble des joueuses participantes ne présentait aucune douleur ou blessure des membres inférieurs au cours des trois derniers mois précédants

les études et/ou entraînant une contre-indication à la participation ou un engagement maximal à l'ensemble des tests.

Tableau 8. Caractéristiques des participantes aux études.

Étude	Nombre de participantes	Âge (années)	Taille (cm)	Masse (kg)	Niveau sportif
#1	6	22,5 ± 4,1	166 ± 4	67,3 ± 6,7	Haut-niveau
#2	11	17,6 ± 4,0	166 ± 6	63,6 ± 6,3	Haut-niveau
#3	10	20,5 ± 4,2	167 ± 7	66,1 ± 7,8	Haut-niveau
#4	13	21,0 ± 3,2	165 ± 10	64,8 ± 10,1	Haut-niveau
#5	17	21,6 ± 3,4	166 ± 9	65,3 ± 9,9	Haut-niveau
#6	20	16,9 ± 2,0	166 ± 7	62,2 ± 8,6	Haut-niveau

2. ÉVALUATION DES CONTRAINTES BIOMÉCANIQUES EN SITUATION ÉCOLOGIQUE DE COMPÉTITION OU D'ENTRAÎNEMENT À L'AIDE DE CENTRALES INERTIELLES

Pour les [études #1](#) et [#6](#), les joueuses étaient équipées durant la compétition ou en situation de jeux réduits à l'aide de centrales inertielles incorporant un accéléromètre tri-axial, un gyroscope et un magnétomètre enregistrant les signaux mécaniques à une fréquence de 100 Hz. Ces outils ont montré une bonne fiabilité et reproductibilité pour mesurer le PL dans des situations spécifiques de hockey sur glace [coefficient de variation (CV) < 1,0% et coefficient de corrélation intra-classe (ICC) compris entre 0,8 et 1,0 pour les comparaisons intra-appareils] (van Iterson et al., 2017) et sont régulièrement utilisés pour évaluer la charge externe des joueur·euse·s (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a; 2019b; 2020). Deux modèles de centrale inertielle différents (*i.e.*, minimax S4 pour l'[étude #1](#) et Vector S7 pour l'[étude #6](#))

développés par le même fabricant (Catapult Sports, Melbourne, Australie) ont été utilisés dans le cadre de la thèse. Le Vector S7 est plus léger (53 g vs. 67 g, respectivement) et compact ($16 \times 44 \times 81$ mm vs. $19 \times 50 \times 88$ mm, respectivement) et procure des mesures d'accélération (± 16 g vs. ± 6 g, respectivement) et d'angle (2000 degrés. s^{-1} vs. 1000 degrés. s^{-1}) avec une meilleure précision comparativement au modèle S4. Chaque centrale était placée en haut du dos, entre les *scapulae* des joueuses en utilisant les brassières fournies par le fabricant (Figure 23).

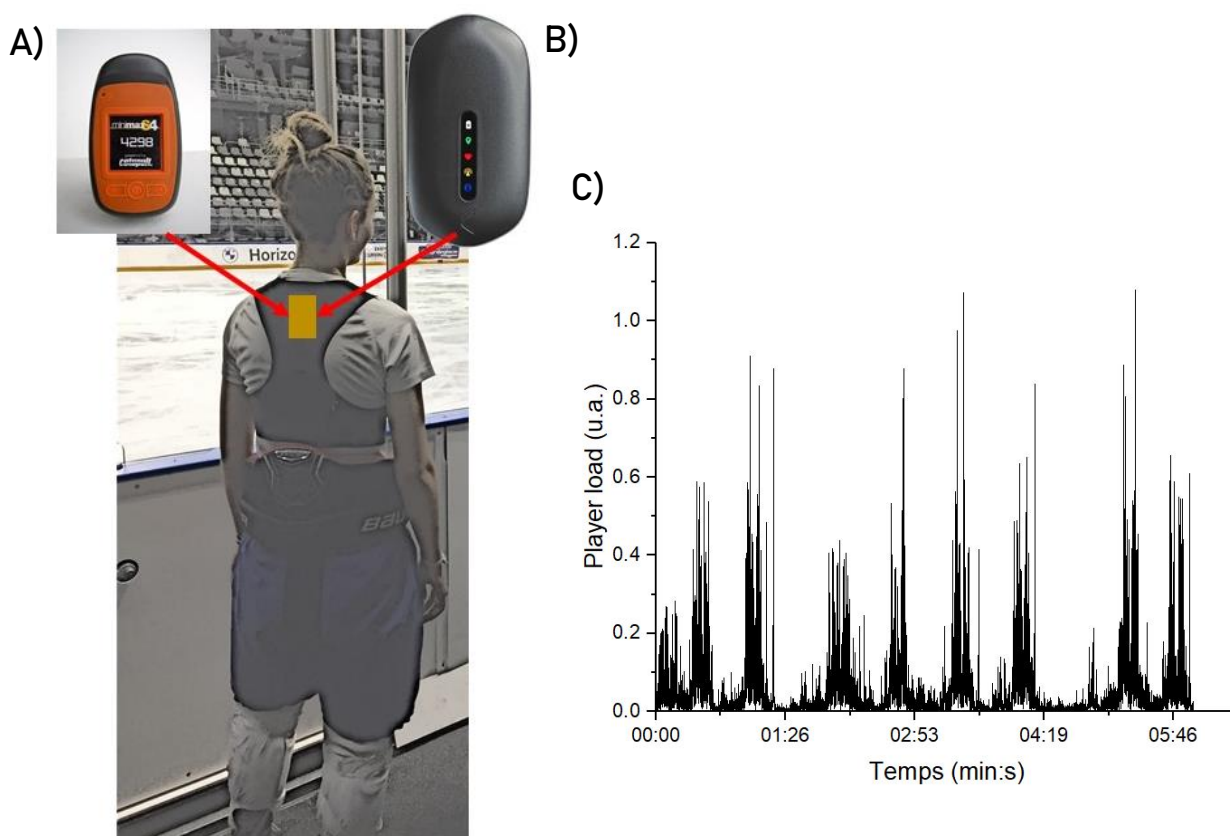


Figure 23. Positionnement des centrales inertielles et signaux expérimentaux. Modèles utilisés pour l'étude #1 (Minimax S4 ; panel A) et l'étude #6 (Vector S7 ; panel B). Signaux expérimentaux de PL issus des centrales inertielles lors d'un exercice de hockey sur glace (panel C).

Même si la relation entre le tronc et les accélérations du CM n'est pas encore parfaite, ces centrales inertielles offrent un point de départ pour mesurer la charge externe d'un point de vue biomécanique (Nedergaard et al., 2017) et en situation écologique. Les centrales étaient allumées 10 min avant le début du match ou de l'entraînement par le même investigateur. Les

données étaient ensuite exportées et analysées à l'aide du logiciel OriginPro. Une synchronisation manuelle avec les enregistrements vidéos réalisés lors des compétitions à l'aide d'une caméra vidéo (HDR-CX405 full-HD, Sony, Allemagne, 50 Hz) ou du MCS (PlaySight, Tel-Aviv, Israël) lors des entraînements était effectuée avec les données des centrales inertielles à l'aide du logiciel OriginPro. Cette synchronisation a permis d'identifier les périodes d'activité sur la glace, les périodes de récupération sur le banc ou les pauses entre les périodes. De plus, les centrales inertielles apparaissent fiables et précises dans la détection des collisions durant l'activité de hockey sur glace (Pilotti-Riley et al., 2019). Ainsi, la synchronisation de la vidéo avec l'analyse des données brutes d'accélérométrie a permis de détecter les collisions (pics ≥ 2 u.a.) comme (i) un contact avec la balustrade sans mise en échec, (ii) une mise en échec ou (iii) la chute d'une joueuse. Ces différentes actions ont été exclues de l'analyse afin de se concentrer uniquement sur la charge mécanique induite par les déplacements sans contact.

Cette charge mécanique a été calculée selon trois méthodes. Tout d'abord, en utilisant le PL, défini comme « *un vecteur de magnitude modifié, exprimé comme la racine carrée de la somme des carrés des changements d'accélération entre les mouvements mesurés sur chaque axe du mouvement (x, y et z) et exprimé en unité arbitraire* » (Figure 23) (Boyd et al., 2011) :

$$PL \text{ (u. a.)} = \frac{\sqrt{(a_x(t) - a_x(t-1))^2 + (a_y(t) - a_y(t-1))^2 + (a_z(t) - a_z(t-1))^2}}{100} \quad (1)$$

où a_x (u.a.) est l'accélération médio-latérale, a_y (u.a.) est l'accélération antéro-postérieure et a_z (u.a.) est l'accélération verticale.

Plus récemment, Catapult Sports a développé une nouvelle variable spécifique au hockey sur glace (*i.e.*, OIL) qui ne considère que les phases de jeu actives sur la glace et exclut les phases de repos ou de faible intensité telles que les périodes de récupération au banc ou la station debout (Allard et al., 2020). Pour déterminer le OIL, les algorithmes considèrent le PL incluant uniquement des accélérations $> 0,3 \text{ m.s}^{-2}$.

L'utilisation de ces variables PL et OIL directement analysées et fournies par les logiciels des fabricants, permet un retour en temps réel ou après un court délai aux entraîneurs. Cependant, plusieurs études rapportent des différences dans le traitement du signal effectué par les algorithmes des fabricants, rendant ainsi complexe les comparaisons entre les différents fabricants mais également entre les appareils suite à la mise à jour des logiciels (Bredt et al., 2020; Buchheit et al., 2014a; Nicolella et al., 2018). De ce fait, notre équipe a récemment introduit une nouvelle méthode de calcul concernant la charge externe biomécanique basée sur les accélérations dans les trois plans de l'espace du mouvement : Accel'Rate (AR ; brevet déposé numéro FR18/4435592 ; Hollville et al., 2021, Sensors, in revision). Cette méthode de calcul semble plus fiable et moins variable selon les intensités ou type de mouvement (rotation notamment) des exercices (Hollville et al., 2021, Sensors, in revision). Le calcul de l'AR se fait selon l'équation suivante :

$$AR \text{ (u. a.)} = \frac{|\sqrt{(a_x(t))^2 + (a_y(t))^2 + (a_z(t))^2} - \sqrt{(a_x(t-1))^2 + (a_y(t-1))^2 + (a_z(t-1))^2}|}{100} \quad (2)$$

où a_x (u.a.) est l'accélération médio-latérale, a_y (u.a.) est l'accélération antéro-postérieure et a_z (u.a.) est l'accélération verticale.

3. PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE

Pour l'[étude #2](#), qui sert de fondation aux [études #3](#), [#4](#) et [#5](#), nous avons tenté de mettre en place et évaluer la reproductibilité de la méthode macroscopique développée par Samozino et al. (2016) lors d'un sprint en patinage.

Tout d'abord, la méthode de calcul des cinétiques de force et puissance étant basée sur la masse corporelle du participant, les joueuses étaient d'abord pesées totalement équipées avant les tests.

Suite à un échauffement spécifique sur glace standardisé de 15 min comprenant des exercices de patinage et finissant par trois sprints progressifs de 40 m selon le ressenti des joueuses, la vitesse instantanée des joueuses a été mesurée au cours d'un sprint de 40 m. La position de départ était standardisée (*i.e.*, départ de face) et les joueuses tenaient leur crosse (*i.e.*, main gauche pour les droitères, main droite pour les gauchères) lors de la réalisation des sprints, afin de reproduire au maximum les conditions de patinage durant l'activité (Bond et al., 2018).

La vitesse horizontale instantanée (V_h) était mesurée à une fréquence de 47 Hz à l'aide d'un radar (Stalker ATS II, Texas, USA) fixé sur un tripode à une hauteur de 1 m du sol (correspondant approximativement au CM de la joueuse) et situé à 3 m derrière la ligne de départ (Simperingham et al., 2016). Les données acquises sauvegardées sur le logiciel Stalker ATS System (Version 5.0.3.0, Applied Concepts, Inc, Texas, USA) étaient exportées vers le logiciel OriginPro pour analyse. Les données brutes de vitesse situées avant le départ et après le plateau de vitesse maximale atteinte (V_{max}) ont été supprimées pour l'analyse (Simperingham et al., 2019).

Bien que Marino (1979) ait depuis longtemps décrit l'évolution de l'accélération au cours du temps lors d'un sprint en patinage, l'objectif premier, afin de pouvoir appliquer la méthode de Samozino et al. (2016), était de démontrer que la vitesse au cours du temps décrivait bien une fonction mono-exponentielle (di Prampero et al., 2005). En appliquant la méthode de régression des moindres carrés, l'équation était :

$$v(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3)$$

où t est le temps (en s) et τ une constante d'accélération (en $m.s^{-2}$) en fonction du temps. Récemment, afin d'améliorer le traitement et la modélisation du signal, notamment pour la phase de départ, Samozino (2018) a suggéré de supprimer les premières valeurs en ajoutant un délai de temps (Δt) de 0,3 s afin de s'assurer que les premières valeurs de vitesse soient

considérées comme fiables. En ajoutant ce délai, ce qui permet également de ne pas surestimer les paramètres de force et puissance, l'équation devient alors :

$$v(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-\frac{t-\Delta t}{\tau}}\right) \quad (4)$$

À partir de cette équation, et après intégration, l'ensemble des variables biomécaniques du profil FV peuvent être modélisées. Tout d'abord la variable de force est modélisée selon l'équation suivante :

$$F_h(t) = m \times a_h(t) + F_{aero} \quad (5)$$

où F_h (en N) est la force horizontale antéro-postérieure nette de la réaction du sol, m (en kg) est la masse du système (joueuse) totalement équipée et F_{aero} (en N) est la résistance due aux forces de frictions aérodynamiques. La puissance horizontale antéro-postérieure moyenne produite (P_h , en W) peut alors être modélisée à tout instant selon l'équation :

$$P_h(t) = F_h(t) \times V_h(t) \quad (6)$$

P_{max} correspond au sommet de la relation modélisée à partir d'une régression polynomiale de 2nd degré. La pente de la relation FV (S_{FV}) est obtenue en modélisant $-F_0 / V_0$. Les valeurs relatives pour chaque paramètre ont été également obtenues en rapportant les valeurs à m .

Enfin, il est possible d'évaluer l'efficacité mécanique de l'application de la force lors de chaque appui grâce au ratio (RF, en %) de F_h sur la résultante totale de la force de réaction du sol (F_{Res} , en N), et sur l'ensemble du sprint par la pente de la diminution linéaire de RF lorsque la vitesse augmente (D_{RF} , en %) :

$$RF = \frac{F_h}{F_{Res}} \times 100 = \frac{F_h}{\sqrt{F_h^2 + F_v^2}} \times 100 \quad (7)$$

où F_v est la moyenne de la force de réaction du sol verticale nette appliquée au CM du sujet.

4. ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques ont été réalisées soit à l'aide du logiciel Statistica (version 13 ; TIBCO Software Inc, OK, USA ; [études #2](#) et [#5](#)) soit à l'aide du logiciel OriginPro (études [#1](#), [#3](#), [#4](#) et [#6](#)). Les données sont présentées sous la forme « moyenne \pm écart-type (SD) » dans le texte, les tableaux et les figures, sauf exceptions précisées dans le texte ou les légendes. Pour chaque procédure de test statistique, le niveau de significativité a été fixé à $p < 0,05$. Dans un premier temps, la normalité des données a été testée par un test de Kolmogorov-Smirnov. Pour chaque ANOVA à mesures répétées, la sphéricité des données a d'abord été vérifiée au moyen du test de Mauchly. Lorsque celle-ci n'était pas respectée, la valeur de p était ajustée au moyen d'une correction de Geisser/Greenhouse. Une procédure *post-hoc* de Tukey a été utilisée lorsque l'ANOVA indiquait un effet significatif d'un facteur ou une interaction entre les deux facteurs. La différence moyenne relative ainsi que la taille d'effet de Cohen (d) ont également été rapportés (Hopkins et al., 2009). Afin d'interpréter les mesures de d , l'échelle suivante a été adoptée : *triviale* ($d < 0,2$), *faible* ($d = 0,2-0,6$), *modéré* ($d = 0,6-1,2$), *large* ($d = 1,2-2,0$) et *très large* ($d > 2,0$). La reproductibilité relative et absolue a été évaluée en utilisant l'ICC, l'erreur de mesure standard (SEM) ou l'erreur type estimée (TEE), le CV et la méthode de visualisation graphique de concordance de Bland-Altman avec des limites (LOA) fixées à 95% (différence moyenne $\pm 1,96 \times SD$) (Atkinson et Nevill, 1998). Les seuils proposés par Hopkins et al. (2009) ont été utilisés afin de déterminer les niveaux de reproductibilité (ICC) de chaque variable : 0,20-0,49 "*faible*", 0,50-0,74 "*modéré*", 0,75-0,89 "*haut*", 0,90-0,98 "*très haut*" and $\geq 0,99$ "*quasi-parfait*". La TEE a été calculée avec un intervalle de confiance à 95% et standardisée afin d'être interprétée (Hopkins, 2000). Le plus petit changement significatif (SWC) a été calculé en prenant en compte le SEM multiplié par 0,3 et l'écart-type standard entre les participants multiplié par 0,2 (Hopkins, 2004). Le coefficient de corrélation de Pearson (r) a été calculé afin d'évaluer les relations avec les valeurs seuils de 0,3, 0,5, 0,7, 0,9 et 1,0,

représentant, respectivement, une relation *faible, modérée, forte, très forte* et *quasi-parfaite* (Hopkins et al., 2009).

ÉTUDE 1 : L'ENCHAÎNEMENT DE MATCHS INTERNATIONAUX DE HOCKEY SUR GLACE FÉMININ NE SEMBLE PAS INFLUENCER LA CHARGE MÉCANIQUE EXTERNE.

ABSTRACT

This study aimed to quantify in- and between-match characteristics and mechanical workload variations elicited by a congested schedule in high-level female ice hockey. Six players were monitored during four international pre-season exhibition matches against the same opponent. Two different methods (Player Load and Accel'Rate) were used to assess specific mechanical workload. Number of shifts and effective playing time per shift were significantly higher for period 2 ($p = 0.03$ for both). Mechanical workload intensity (*i.e.*, relative and peak workload) showed a significant ($p \leq 0.05$) decrease from period 1 to period 2 and period 3 (*moderate-to-large* Cohen's d). All workload variables remained stable between matches ($p > 0.25$). Team variability showed *good-to-moderate* CVs ($< 10\%$) for all variables for in- and between-match variability. Accumulated workload computed with Player Load method was threefold higher compared to Accel'Rate method (+87.8% mean difference; *large* Cohen's d). These findings demonstrate that high-level female ice hockey-specific mechanical workload declines with reduced high-intensity output across periods, while it remains stable between matches against standardized opposition. This study strongly suggests that the present workload metrics could be used to determine the mechanical demand elicited by matches played against various opponents in real game conditions.

Publication associée :

Perez J., Brocherie F., Couturier A. & Guilhem G. International matches elicits stable mechanical workload in high-level female ice hockey. *Biology of Sport*. **Under review.**

1. INTRODUCTION

Bien que confirmant la nature intense et répétée (*i.e.*, faible ratio effort:récupération) (Brocherie et al., 2018), les données relatives à l'analyse du jeu basée sur une approche quantitative restent limitées en hockey sur glace (Bracko et al., 1998a; Jackson et al., 2016, 2017), ce qui ne permet pas de déterminer précisément l'intensité du jeu (Douglas et al., 2020). Des études précédentes (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a) ont montré une diminution significative de la charge mécanique au cours d'un match qui semble être attribuée à des perturbations physiologiques pouvant entraîner l'accumulation à la fois d'une fatigue progressive et aigüe (*i.e.*, transitoire) (Brocherie et al., 2018; Jackson et al., 2016, 2017) (cf. [Introduction générale, section I.2.5](#)).

À ce jour, la plupart des études examine les demandes locomotrices en utilisant des variables objectives de charge biomécanique au cours d'un seul et unique match (Douglas et al., 2019a; 2019b; Jackson et al., 2016) ou tout au long d'une saison (Allard et al., 2020). Cependant, les compétitions majeures (*i.e.*, championnat du Monde, Jeux Olympiques ou les grands championnats nationaux) imposent aux équipes un calendrier dense avec une succession de matchs (cf. [Introduction générale, section I.4.2](#)). De ce fait, il semble intéressant d'appréhender de façon fiable les variations de charge mécanique (notamment à partir du PL) induites par l'accumulation et la succession de matchs joués selon ce type de calendrier.

Dans ce contexte, il est recommandé de standardiser les méthodes d'analyse des données afin de pouvoir évaluer précisément et de façon reproductible l'activité spécifique du hockey sur glace (cf. [Introduction générale, section I.4.1](#)). De plus, il apparaît intéressant d'appliquer une méthode de calcul de la charge mécanique permettant de limiter les erreurs de mesures en lien avec les changements de composante d'accélération générées par le changement d'orientation de la centrale inertielle (Hollville et al., 2020; Reche-Soto et al., 2019).

L'objectif de cette première étude a été de quantifier les variations de charge mécanique intra- et inter-match induites par la succession de matches internationaux contre un même adversaire

(*i.e.*, opposition standardisée) chez des joueuses de hockey sur glace féminin équipées de centrales inertielles.

2. MÉTHODES

Six joueuses de hockey sur glace de haut-niveau appartenant à l'équipe de France (cf. [Méthodes expérimentales, section 1](#)) ont participé à cette étude et ont été systématiquement équipées sur l'ensemble des quatre matchs amicaux. L'ensemble des joueuses était réparti sur les trois premières lignes de la composition d'équipe (trois joueuses sur la première ligne, deux joueuses sur la seconde et une joueuse sur la troisième) lors de l'ensemble des matchs. Les quatre matchs amicaux ont été joués durant un stage de pré-saison contre une même équipe nationale de niveau similaire (*i.e.*, les deux équipes ont participé au championnat du Monde élite lors de la saison 2018-2019 et se situaient aux 5^e et 10^e rang mondial pour l'équipe nationale Suisse et française, respectivement). Les matchs se sont déroulés sur la même patinoire (*e.g.*, 60 × 30 m) sur une période de cinq jours, reproduisant le calendrier d'une compétition internationale avec un temps moyen de repos entre les matchs de 20 ± 3 h (Tableau 9).

Tableau 9. Programme du stage de l'équipe de France lors des oppositions standardisées contre l'équipe nationale Suisse.

	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Matin	10:30 Entraînement Durée : 1 h	11:15 Morning skate Durée : 30 min	11:15 Morning skate Durée : 30 min	Repos	11:15 Morning skate Durée : 30 min	Repos
		19:00 Match 1 Score : 0-3 Durée : 15 min d'échauffement sur la glace + 3 × 20 min	19:00 Match 2 Score : 1-2 Durée : 15 min d'échauffement sur la glace + 3 × 20 min	15:30 Entraînement Durée : 1 h	19:00 Match 3 Score : 3-2 Durée : 15 min d'échauffement sur la glace + 3 × 20 min	14:00 Match 4 Score : 0-1 Durée : 15 min d'échauffement sur la glace + 3 × 20 min

Une analyse notationnelle de la tâche (*i.e.*, temps de jeu effectif et nombre de présences par période et par match pour chaque joueuse) a été réalisée via l'enregistrement (HDR-CX405 full-HD, Sony, Germany, 50 Hz) des mouvements des joueuses.

Les joueuses étant également équipées de centrales inertielles (cf. [Méthodes expérimentales, section 2](#)), l'enregistrement vidéo et les données brutes des centrales inertielles ont été synchronisés manuellement pour chaque joueuse afin de considérer uniquement la charge mécanique effectuée durant le temps de jeu effectif (*i.e.*, le temps de jeu effectué sur la glace, en dehors des arrêts de jeu).

La charge mécanique, calculée en utilisant à la fois le PL et AR, a été normalisée selon le temps de jeu effectif de chaque joueuse (PL.min⁻¹ et AR.min⁻¹, u.a.).

En utilisant l'analyse notationnelle à l'aide des enregistrements vidéos, toutes les présences (n = 493) ont été analysées et le temps de jeu effectif par présence, en excluant l'ensemble des arrêts de jeu ou temps de récupération, était de $45,4 \pm 26,1$ s. Des études précédentes ont recommandé l'utilisation d'une moyenne mobile afin de mieux décrire la charge mécanique maximale (*i.e.*, max PL et max AR, u.a.) (Fereday et al., 2020; Fox et al., 2020; Lacomme et al., 2018c). Selon Lacomme et al. (2018c), la durée du chevauchement entre les fenêtres successives a été fixée à 20% du temps de jeu effectif par présence. De ce fait, la durée du chevauchement entre les fenêtres successives pour l'utilisation de la moyenne mobile était de 9,0 s. L'ensemble des présences dont le temps de jeu effectif était < 9 s a donc été exclu de l'analyse pour la charge mécanique maximale (n = 10).

Nous avons réalisé une analyse de la variance à mesures répétées (effet temps) pour comparer les caractéristiques de match (*i.e.*, temps de jeu effectif par présence, période ou match) et les variables dérivées des centrales inertielles (*i.e.*, PL, AR, PL.min⁻¹, AR.min⁻¹, max PL et max AR) pour chaque période. La même analyse a été appliquée entre les matchs (effet match). La

variabilité intra- et inter-match pour chaque joueuse et l'ensemble de l'équipe a été calculée en utilisant le CV, évalué comme *bon* (< 5%), *modéré* (5–10%), ou *faible* (\geq 10%) (Lord et al., 2020).

3. RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques de match

Les tableaux 10 et 11 rapportent les caractéristiques de match. L'analyse *post-hoc* montre une augmentation significative et *modérée* entre la première (P1) et la deuxième période (P2) (+30,7% ; $p < 0,001$; $d = 0,85$). À l'inverse, nous avons observé une diminution significative et *modérée* entre P2 et la troisième période (P3) (-16,9% ; $p = 0,01$; $d = 0,62$) (Figure 24).

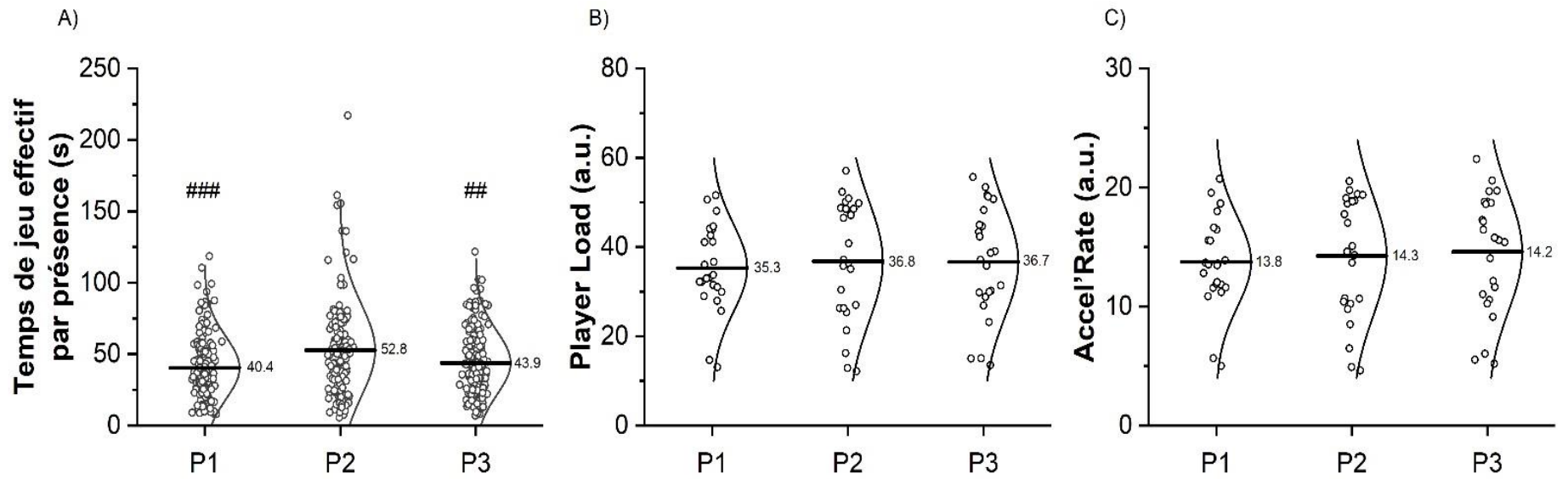


Figure 24. Caractéristiques de matchs lors d'un calendrier incluant quatre matchs en cinq jours, avec une durée entre les matchs d'environ 24 h. Temps de jeu effectif par présence en excluant les arrêts de jeu (panel A), charge mécanique accumulée Player load (PL, panel B) et Accel'Rate (AR, panel C) par période. P1 : période 1 ; P2 : période 2 ; P3 : période 3.

Tableau 10. Caractéristiques de jeu et indicateurs de charge mécanique moyens obtenus à l'issue de quatre matchs de hockey sur glace féminin au niveau international.

Variable	P1	P2	P3	Moyenne (match)	Total (4 matchs)
Nombre de présences	7 ± 1 (6-8)	6 ± 1 (6-7)	7 ± 1 (6-8)	7 ± 2 (6-7)	21 ± 5 (18-23)
Temps de jeu effectif par présence (s)	40,4 ± 22,0 ### (37,2-43,6)	52,8 ± 32,3 (47,7-57,9)	43,9 ± 22,3 ## (40,7-47,2)	45,4 ± 26,1 (43,1-47,6)	
Temps de jeu effectif (min)	5,6 ± 0,3 (4,9-6,2)	6,3 ± 0,5 (5,3-7,3)	6,3 ± 0,5 (5,3-7,3)	6,1 ± 2,1 (5,6-6,5)	18,4 ± 5,4 (16,1-20,6)
PL (u.a.)	35,32 ± 3,35 (26,71-43,92)	36,79 ± 4,49 (25,25-48,33)	36,70 ± 4,09 (26,20-47,21)	36,27 ± 9,24 (31,68-40,86)	110,89 ± 32,79 (97,05-124,74)
AR (u.a.)	13,77 ± 0,78 (12,16-15,37)	14,26 ± 1,04 (12,10-16,42)	14,60 ± 1,02 (12,49-16,71)	14,21 ± 4,62 (13,12-15,30)	43,03 ± 12,49 (37,76-48,31)
PL.min⁻¹ (u.a.)	6,61 ± 0,20 (6,11-7,11)	6,07 ± 0,15 ** (5,68-6,46)	6,10 ± 0,08 ** (5,89-6,31)	6,26 ± 0,59 (6,05-6,47)	
AR.min⁻¹ (u.a.)	2,55 ± 0,05 (2,42-2,69)	2,32 ± 0,04 *** (2,23-2,42)	2,36 ± 0,02 ** (2,32-2,40)	2,41 ± 0,14 (2,34-2,48)	
Max PL (u.a.)	0,175 ± 0,008 (0,155-0,194)	0,165 ± 0,003 (0,156-0,174)	0,162 ± 0,007 * (0,145-0,180)	0,167 ± 0,015 (0,160-0,175)	
Max AR (u.a.)	0,065 ± 0,002 (0,059-0,072)	0,064 ± 0,001 (0,061-0,066)	0,061 ± 0,002 (0,056-0,067)	0,064 ± 0,006 (0,061-0,066)	

Les données entre parenthèses correspondent à 95% d'intervalle de confiance. * ($p \leq 0,05$), ** ($p \leq 0,01$) et *** ($p \leq 0,001$) significativement différent de P1. ## ($p \leq 0,01$) et ### ($p \leq 0,001$) significativement différent de P2. P1 : période 1 ; P2 : période 2 ; P3 : période 3.

Tableau 11. Caractéristiques de jeu, indicateurs de charge mécanique et variabilité inter-match lors d'un enchaînement de quatre matchs de hockey sur glace féminin de niveau international.

Variables	Caractéristiques des matchs et charge mécanique				Variabilité inter-match			
	Moyenne \pm écart-type (avec 95% d'intervalle de confiance).				Joueuse		Équipe	
	Match 1	Match 2	Match 3	Match 4	CV (95% CI)	SWC	CV (95% CI)	SWC
Nombre de présences	20 \pm 2 (15-26)	21 \pm 2 (17-26)	21 \pm 3 (13-29)	20 \pm 2 (14-25)	13,1 (8,1-32,0)		3,1 (1,9-7,4)	
Temps de jeu effectif (min)	18,8 \pm 2,0 (13,7-24,0)	18,3 \pm 1,5 (14,3-22,2)	19,0 \pm 2,9 (11,5-26,5)	17,3 \pm 2,7 (10,4-24,2)	19,5 (12,0-47,0)	0,6	4,1 (2,5-9,8)	0,2
PL (u.a.)	116,74 \pm 13,25 (82,69-150,79)	110,26 \pm 10,16 (84,15-136,37)	113,47 \pm 16,77 (70,36-156,58)	103,47 \pm 15,62 (62,95-143,27)	16,2 (10,0-39,0)	2,93	5,3 (3,1-12,0)	1,17
AR (u.a.)	44,05 \pm 4,49 (32,52-55,59)	43,54 \pm 4,19 (32,76-54,32)	44,58 \pm 6,50 (27,86-61,29)	39,96 \pm 6,08 (24,32-55,60)	16,0 (10,0-39,0)	1,11	4,9 (3,1-12,0)	0,42
PL.min⁻¹ (u.a.)	6,39 \pm 0,22 (5,82-6,97)	6,15 \pm 0,12 (5,85-6,45)	6,37 \pm 0,12 (6,06-6,68)	6,19 \pm 0,16 (5,79-6,59)	4,9 (3,1-12,0)	0,06	1,9 (1,2-4,9)	0,02
AR.min⁻¹ (u.a.)	2,42 \pm 0,07 (2,24-2,59)	2,39 \pm 0,06 (2,23-2,55)	2,46 \pm 0,05 (2,33-2,59)	2,40 \pm 0,04 (2,30-2,50)	4,7 (3,1-12,0)	0,02	1,3 (0,6-2,5)	0,01
Max PL (u.a.)	0,163 \pm 0,011 (0,136-0,191)	0,178 \pm 0,002 (0,172-0,186)	0,172 \pm 0,008 (0,151-0,192)	0,167 \pm 0,007 (0,149-0,184)	7,5 (5,0-20,0)	0,003	4,0 (2,5-9,8)	0,001
Max AR (u.a.)	0,065 \pm 0,002 (0,060-0,069)	0,063 \pm 0,002 (0,058-0,067)	0,063 \pm 0,002 (0,057-0,068)	0,061 \pm 0,002 (0,057-0,065)	5,0 (3,1-12,0)	0,0006	2,2 (1,2-4,9)	0,0003

CV : coefficient de variation (avec 95% d'intervalle de confiance) ; SWC : plus petit changement significatif.

3.2 Charge mécanique intra-match (période)

Aucun effet de la période n'a été observé sur PL et AR lors d'un match ($p > 0,55$; Figure 24 et Tableau 10). En revanche, les valeurs de charge mécanique relative $\text{PL}\cdot\text{min}^{-1}$ ($p = 0,004$) et $\text{AR}\cdot\text{min}^{-1}$ diffèrent entre les périodes ($p < 0,001$), avec une diminution significative et *modérée* du $\text{PL}\cdot\text{min}^{-1}$ entre P1 et P2 (-8,6% ; $p = 0,006$; $d = -1,09$) et P3 (-8,0% ; $p = 0,009$; $d = -1,16$), sans variation significative entre P2 et P3 (+0,5% ; $p = 0,97$; $d = 0,11$). De même, $\text{AR}\cdot\text{min}^{-1}$ diminuait *largement* de P1 à P2 (-9,4% ; $p < 0,001$; $d = -1,44$) et P3 (-8,1% ; $p = 0,002$; $d = -1,44$) et reste inchangé entre P2 et P3 (+1,4% ; $p = 0,69$; $d = 0,50$). Concernant la charge mécanique maximale, nous avons observé un effet de la période significatif pour max PL ($p = 0,05$) et une tendance pour max AR ($p = 0,06$), avec une diminution de P1 à P3 (-7,3% ; $p = 0,05$; $d = -0,62$ et -6,4% ; $p = 0,05$; $d = -0,72$, respectivement) pour max PL et max AR. Durant le 4^{ème} et dernier match, l'ensemble des variables de charge mécanique a diminué de P1 à P3 ($> -7,5\%$; $p > 0,37$; d compris entre -0,23 et -0,21 pour PL et AR, $> -11,1\%$; $p < 0,001$; d compris entre -1,29 et -1,52 pour les valeurs relatives et $> -10,6\%$; $p < 0,05$; d compris entre -0,75 et -1,13 pour les valeurs maximales de charge).

3.3 Charge mécanique inter-matches

Aucune différence n'a été observée entre les matchs concernant la charge mécanique accumulée (effet match : $p > 0,69$ pour PL et AR), relative ($p > 0,47$ pour $\text{PL}\cdot\text{min}^{-1}$ et $\text{AR}\cdot\text{min}^{-1}$) et maximale ($p > 0,25$ pour max PL et max AR ; Figure 25).

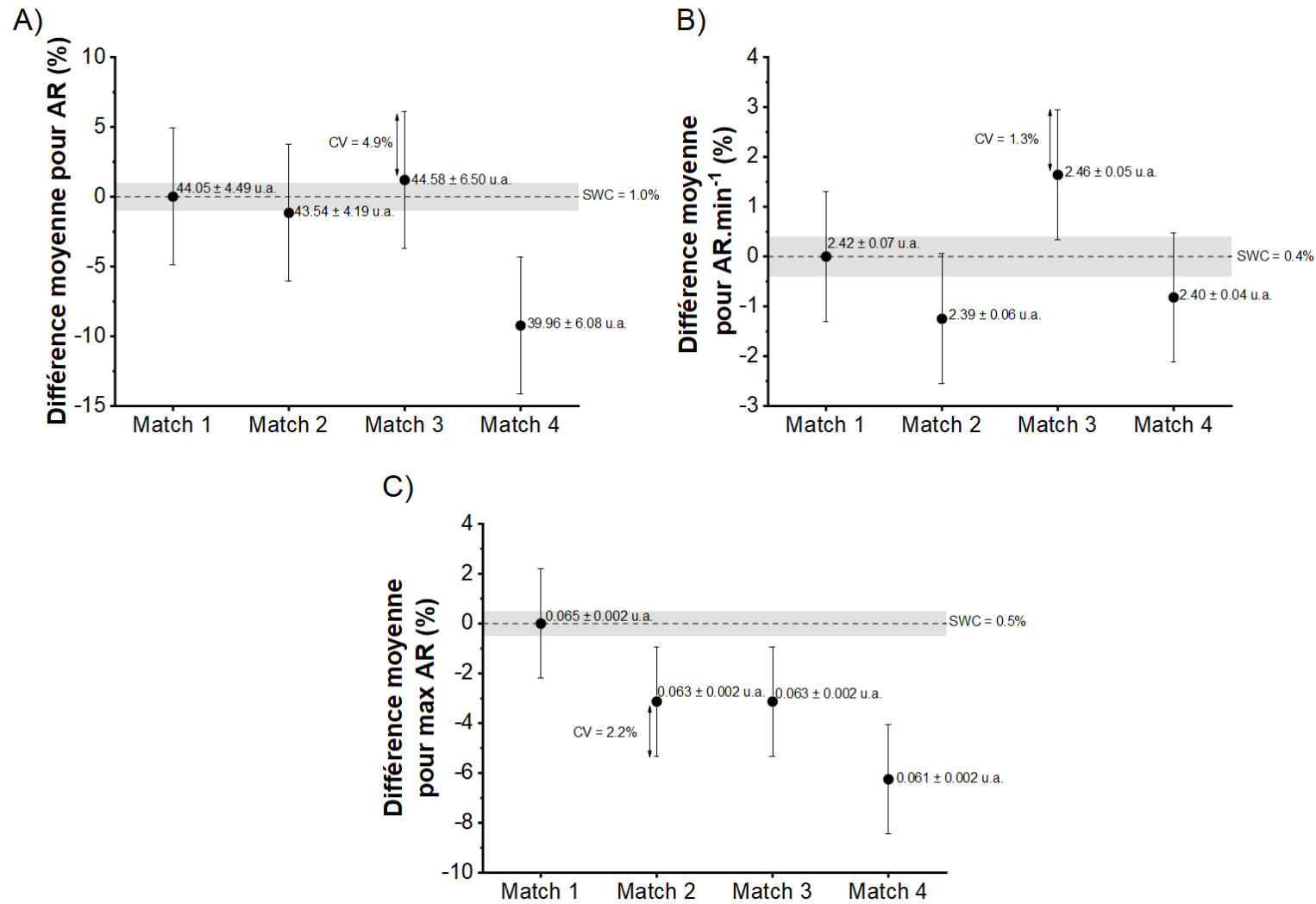


Figure 25. Différence moyenne relative de charge mécanique (Accel'Rate, AR) entre les matchs dans un contexte de calendrier dense.

Les données sont rapportées en référence au Match 1 pour la charge mécanique accumulée Accel'Rate (panel A), valeur relative au temps d'Accel'Rate (AR.min⁻¹; panel B) et la valeur maximale de la moyenne mobile sur 9 s (max AR; panel C). Les valeurs absolues rapportée pour chaque variable correspondent à la moyenne ± écart-type. Le coefficient de variation (CV) représente la variabilité inter-match de chaque variable et la partie grisée représente un changement trivial (SWC).

3.4 Variabilité intra- et inter-match

Le CV intra-match pour les joueuses concernant les variables dérivées des centrales inertielles a été considéré comme *bon-à-modéré* (CV s'échelonnant de 4,5% à 9,2%) avec les valeurs les plus faibles obtenues pour les valeurs maximales de charge mécanique et les valeurs les plus élevées pour la charge mécanique cumulée. En comparaison de la variabilité intra-joueuse, des valeurs plus élevées de CV (s'échelonnant de 3,2% pour la charge mécanique maximale à 5,1% pour la charge relative) ont été observées pour les variables incluant l'ensemble de l'équipe. En revanche, aucune différence significative n'a été observée concernant la charge mécanique entre les différents matchs, quelles que soient les variables considérées (Tableau 11).

3.5 Comparaison des différentes méthodes de calcul de la charge mécanique

La charge mécanique cumulée calculée l'ensemble de la période de 20 min ($175,68 \pm 41,29$ u.a. et $68,17 \pm 16,74$ u.a. pour PL and AR, respectivement) était supérieure à celle obtenue sur le temps de jeu effectif uniquement ($110,89 \pm 32,79$ u.a. et $43,03 \pm 12,49$ u.a. pour PL and AR, respectivement). À l'inverse, les valeurs relatives étaient inférieures avec le calcul incluant l'ensemble de la période de 20 min ($1,95 \pm 0,36$ u.a. vs. $6,26 \pm 0,59$ u.a.). Dans tous les cas, le PL était environ trois fois plus important que l'AR ($\times 2,6$; $d = 1,21$) pour la même analyse de charge cumulée. Enfin, il existe une corrélation quasi-parfaite entre les variables de charge mécanique cumulée (PL et AR; $r = 0,98$; $r^2 = 0,96$; $p < 0,001$) et relatives (PL.min⁻¹ and AR.min⁻¹; $r = 0,91$; $r^2 = 0,82$; $p < 0,001$) et une très forte corrélation entre les charges mécaniques maximales obtenues pour les deux indicateurs considérés (max PL et max AR; $r = 0,85$; $p < 0,001$).

4. CONCLUSION

Bien qu'une diminution des paramètres traduisant les activités à haute intensité (*i.e.*, valeurs normalisées et maximales de charge mécanique) soit observée entre les périodes, les résultats de cette **étude #1** montrent que l'ensemble des variables de charge mécanique reste stable au cours des matchs joués dans des conditions standardisées d'opposition. Cependant,

l'accumulation de la fatigue au cours des matchs semble induire une diminution de la charge mécanique durant le 4^{ème} et dernier match. Ces informations peuvent s'avérer pertinentes pour les entraîneurs désireux de mieux gérer la charge supportée par les joueur·se·s pendant une compétition. En effet, la mise en place d'un tel suivi individualisé permettrait de mieux répartir la charge entre les joueur·se·s pour augmenter leur disponibilité respective en fin de compétition, d'optimiser les processus de récupération chez les joueur·se·s ayant un temps de jeu élevé, ou encore de détecter une charge mécanique insuffisante nécessitant des séances supplémentaires pour maintenir l'état de forme des joueur·se·s. Une analyse plus fine permettrait d'identifier les demandes spécifiques à chaque poste afin d'orienter les contenus d'entraînement dans le but de répondre à ces besoins particuliers.

ÉTUDE 2 : REPRODUCTIBILITÉ DU PROFIL FORCE-VITESSE LORS DU SPRINT EN PATINAGE.

Abstract

The aims of this study were to ensure that the skating velocity describes a mono-exponential function in order to determine the reliability of radar-derived profiling results from skating sprint accelerations applying sprint running force-velocity assessment approach. Eleven young highly-trained female ice hockey players performed two 40-m skating sprints on two separate days to evaluate inter-trial and test-retest reliability. The velocity-time data recorded by a radar device was used to calculate the kinetics variables of the skating sprint acceleration: maximal theoretical force (F_0), maximal theoretical velocity (V_0), maximal theoretical power (P_{max}) and the slope of the linear force-velocity relationship (S_{FV}). All variables, except S_{FV} and S_{FVrel} (the slope of the linear relationship between horizontal force relative to body mass and velocity) [“low” to “moderate” intra-class correlation coefficient (ICC)], revealed “acceptable” inter-trial and test-retest reliability ($ICC \geq 0.75$ and coefficient of variation [CV] $\leq 10\%$). Furthermore, test-retest reliability (ICC and CV) and sensitivity [Standard Error of Measurement (SEMs) \leq Small Worthwhile Change (SWCs)] were higher when averaging the two trials compared to the best trial (40-m split time) only. These findings offer a promising and simple method to monitor training-induced changes in macroscopic mechanical variables of ice hockey skating performance.

Publication associée :

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. (2019). Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomechanics*, 1-15.

1. INTRODUCTION

Au hockey sur glace, les activités locomotrices de haute intensité et de sprint ($\sim 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) représentent respectivement $\sim 45\%$ et $\sim 18\%$ de la distance totale parcourue durant un match (Brocherie et al., 2018; Lignell et al., 2018). Les qualités de patinage étant des déterminants majeurs et discriminants du niveau de performance (Bracko, 2004; Buckeridge et al., 2015; Pearsall et al., 2013; Renaud et al., 2017), il apparaît dès lors intéressant de décrire précisément la cinétique du patinage (*i.e.*, capacités musculaires de force, vitesse et puissance) pour identifier les talents potentiels et/ou individualiser et orienter l'entraînement.

À notre connaissance, aucune étude n'a pour le moment investigué le profil FV sur un sprint sur glace (patinage). L'application de la méthode macroscopique développée par Samozino et al. (2016) durant un sprint sur glace doit répondre au postulat selon lequel l'évolution de la vitesse au cours du temps décrit une fonction mono-exponentielle avec un plateau à V_{\max} comme précédemment observé au cours d'un sprint en course à pied (di Prampero et al., 2005; Morin et al., 2006). Bien que le développement de nouvelles méthodes d'analyse du mouvement ait permis d'évaluer la cinématique du patinage sur de grandes distances (*i.e.*, ligne droite de 50 m) (van der Kruk et al., 2018), la majorité des études ayant analysé la cinématique du patinage en hockey sur glace reste limitée à une partie de l'ensemble de la tâche (*i.e.*, phase d'accélération ou phase de glisse). Ce constat est principalement lié aux capacités limitées des systèmes de mesure (Budarick et al., 2018; Renaud et al., 2017; Robbins et al., 2018; Shell et al., 2017) (cf. [Introduction générale, section II.2.3](#)).

Après avoir vérifié que la vitesse au cours du temps lors d'un sprint en patinage décrit bien une fonction mono-exponentielle, l'objectif de cette **étude #2** a été de déterminer la reproductibilité intra- et inter-session des différentes variables mécaniques dérivées de performances de sprint sur glace évaluées au moyen d'un radar.

2. MÉTHODES

11 jeunes joueuses de hockey sur glace de haut niveau (cf. [Méthodes expérimentales, section 1](#)) appartenant au pôle France féminin de la Fédération Française de hockey sur glace ont participé à cette étude. Chaque joueuse a participé à deux sessions de test programmées à la même heure (± 1 h) de la journée. Au cours de ces sessions, chaque joueuse a effectué deux sprints sur glace sur une distance de 40 m séparés par quatre min de récupération passive. Auparavant, les joueuses ont été pesées entièrement équipées ($73,6 \pm 10,6$ kg). Entre les deux sessions de test, les joueuses ont effectué un entraînement spécifique sur glace de basse à moyenne intensité basé sur du travail technico-tactique.

La reproductibilité relative et absolue intra- et inter-session a été évaluée en utilisant l'ICC, l'erreur de mesure standard (SEM), le CV et la méthode de visualisation graphique concordance de Bland-Altman (cf. [Méthodes expérimentales, section 4](#)). La sensibilité du test a été déterminée en comparant le SWC et le SEM et en utilisant les seuils proposés par Lexell et Downham (2005). Lorsque le SEM est \leq au SWC, la capacité du test à détecter les changements est considérée comme "*bonne*", lorsque le SEM est égal au SWC est considéré comme "*satisfaisante*" et lorsque le SEM est \geq au SWC, le test est considéré comme "*négligeable*". Afin d'évaluer les biais systématiques, un t-test apparié a été effectué afin de tester que les moyennes en intra- et inter-session ne diffèrent pas. Les deux essais de la première session ont été pris en compte pour l'analyse intra-session, alors que pour la reproductibilité inter-session, l'ensemble des variables a été analysé en comparant : (i) la meilleure performance sur 40 m (*i.e.*, temps le plus court pour parcourir les 40 m) et (ii) la moyenne des deux essais.

3. RÉSULTATS

Pour l'ensemble des essais, l'évolution de la vitesse au cours du temps décrit une fonction mono-exponentielle : $r^2 = 0,98$; $p < 0,01$ (Figure 26).

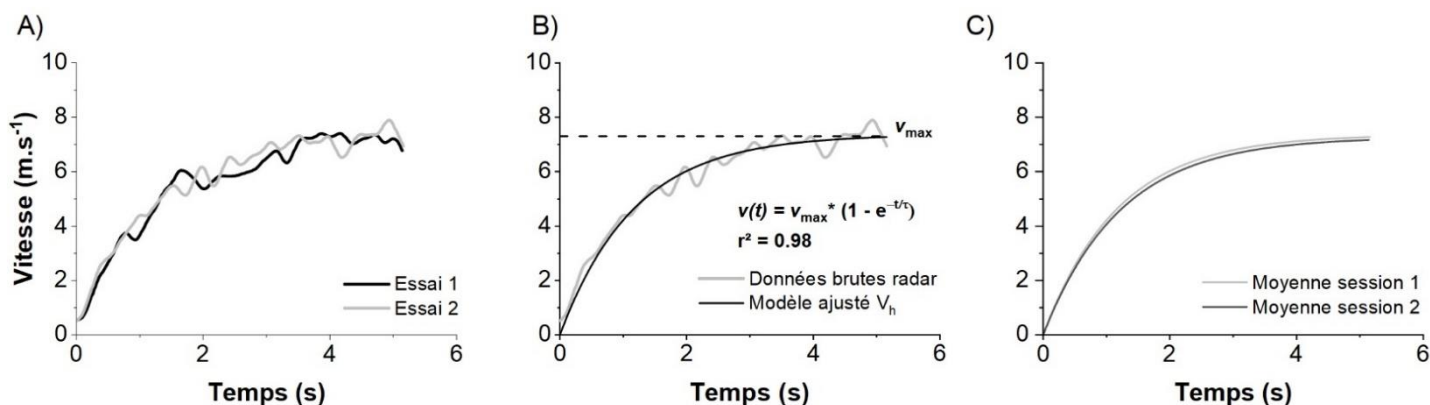


Figure 26. Exemple individuel illustrant la procédure de collecte et d'analyse de la vitesse horizontale instantanée du centre de masse au cours du temps lors d'un sprint en patinage. La vitesse horizontale instantanée a été mesurée lors de deux sprints de 40 m (essai 1 en noir et essai 2 en gris) avec un radar durant la même session (panel A). Pour chaque essai, la vitesse horizontale instantanée au cours du temps a été modélisée à l'aide d'une fonction mono-exponentielle (panel B). la moyenne de la relation vitesse-temps modélisée a ensuite été calculée entre les essais pour les deux sessions de test (panel C). L'ensemble des données a été collecté sur une même joueuse.

3.1 Reproductibilité intra-session

Aucune différence n'a été observée entre les essais pour les variables investiguées ($p \geq 0,38$; "trivial" à "faible" d). Les valeurs ICC indiquent une reproductibilité relative en intra-session de "haute" à "très haute" pour l'ensemble des variables, excepté pour S_{FV} et S_{FVrel} pour lesquels l'ICC a atteint des valeurs "faibles". L'ensemble des CVs étant inférieurs à 10%, ils ont donc été considérés comme "acceptables". Excepté pour les variables S_{FV} , S_{FVrel} , F_0 et F_{0rel} , l'ensemble des SEMs ont été inférieurs ou égaux à leur SWCs respectifs, indiquant une sensibilité du test "satisfaisante" à "bonne". Pour l'ensemble des variables, les valeurs de SEM étaient inférieures (< 5% des valeurs moyennes) et la différence des moyennes proche de 0 (Tableau 12).

Tableau 12. Répétabilité relative et absolue des variables biomécaniques dérivées de l'évaluation au radar entre les deux essais de sprints en patinage sur 40 m.

	Essai 1	Essai 2	Valeur de p	d ; effet	ICC	CV (%)	Biais moyen	$\pm 95\%$ LOA	SEM (%)	SWC
F₀ (N)	390 \pm 51	391 \pm 47	0,94	0,04 ; 'trivial'	0,78 (0,45-0,94)	5,9 (4,1-10,0)	1,73	79,86	3,14	8,02
F_{0rel} (N.kg⁻¹)	5,47 \pm 0,72	5,50 \pm 0,67	0,90	0,05 ; 'trivial'	0,77 (0,43-0,93)	5,9 (4,1-10,0)	0,04	1,16	3,16	0,11
V₀ (m.s⁻¹)	8,12 \pm 0,37	7,98 \pm 0,32	0,38	0,39 ; 'faible'	0,86 (0,57-0,96)	1,7 (1,2-3,0)	-0,13	0,40	0,76	0,06
P_{max} (W)	793 \pm 129	783 \pm 111	0,84	0,09 ; 'trivial'	0,87 (0,60-0,96)	5,3 (3,9-8,4)	-10,44	132,6	2,54	22,16
P_{maxrel} (W.kg⁻¹)	11,14 \pm 1,75	11,00 \pm 1,53	0,83	0,09 ; 'trivial'	0,85 (0,53-0,96)	5,1 (3,6-9,0)	-0,15	1,97	2,62	0,30
S_{FVrel} (N.m.s⁻¹.kg⁻¹)	-0,67 \pm 0,08	-0,69 \pm 0,08	0,60	0,23 ; 'faible'	0,29 (0,02-0,81)	7,6 (5,3-13,0)	-0,02	0,20	4,34	0,01
S_{FV} (N.m.s⁻¹)	-47,95 \pm 5,29	-49,01 \pm 5,44	0,65	0,20 ; 'faible'	0,40 (0-0,79)	7,2 (5,0-13,0)	-1,06	11,94	3,80	0,64
V_{max} (m.s⁻¹)	7,79 \pm 0,35	7,67 \pm 0,31	0,40	0,37 ; 'faible'	0,91 (0,70-0,98)	1,4 (1,0-2,5)	-0,12	0,30	0,61	0,06
5 m (s)	1,60 \pm 0,09	1,60 \pm 0,09	0,96	0,02 ; 'trivial'	0,80 (0,41-0,94)	2,3 (1,6-4,0)	0,00	0,12	1,18	0,02
40 m (s)	6,55 \pm 0,29	6,60 \pm 0,26	0,68	0,18 ; 'trivial'	0,96 (0,86-0,99)	1,0 (0,7-1,8)	0,05	0,18	0,42	0,05

d : taille d'effet de Cohen ; ICC : Coefficient de corrélation intra-classe; CV : coefficient de variation (avec 95% d'intervalle de confiance); LOA: limites de concordance ($1,96 \times SD$); SEM : erreur standard de mesure ; SWC : plus petit changement significatif. * Significativement différent : $p < 0,05$.

3.2 Reproductibilité inter-session

Aucun biais significatif n'a été observé entre les sessions sur l'ensemble des variables calculées à l'aide des deux méthodes (meilleure performance ou moyenne des performances). La reproductibilité relative inter-session a été jugée comme "*faible*" pour S_{FVrel} , "*modérée*" pour S_{FV} et "*haute*" à "*très haute*" pour l'ensemble des autres variables lorsque l'on considérait les meilleures performances (Tableau 13). Lorsque l'on considérait les valeurs moyennes (Tableau 14), la reproductibilité relative inter-session pour l'ensemble des variables a été évaluée comme "*haute*" à "*très haute*". L'ensemble des CVs inter-session a été considéré comme "*acceptable*" (< 10 %), avec des valeurs de CVs plus importantes lorsque l'on prend en compte les meilleures performances comparées aux valeurs moyennes. Lorsque l'on considère les meilleures performances, les SEMs apparaissent inférieures ou égales aux SWCs pour V_0 , P_{max} et V_{max} , indiquant une sensibilité du test "*bonne*" ou "*satisfaisante*". Les autres variables montraient une sensibilité du test "*négligeable*". Seulement les variables S_{FVrel} et S_{FV} montraient des valeurs de SEMs importantes (> 5% des valeurs moyennes). Lorsque l'on considère les valeurs moyennes des deux essais, l'ensemble des SEMs (excepté pour S_{FVrel} et S_{FV}) étaient inférieurs ou égaux aux SWCs respectifs, indiquant une sensibilité "*satisfaisante*" à "*bonne*". L'ensemble des valeurs des SEMs étaient faibles (< 5% des valeurs moyennes). Les biais moyens entre les sessions étaient de $-16,1 \pm 31,1$ N, $0,02 \pm 0,16$ m.s⁻¹, $33,5 \pm 64,5$ W et $1,90 \pm 4,10$ N.m.s⁻¹ pour F_0 , V_{max} , P_{max} and S_{FV} , respectivement. Pour les valeurs relatives, les biais moyens entre les sessions sont présentés sur les méthodes de concordance de Bland-Altman suivantes (Figure 22).

Tableau 13. Répétabilité relative et absolue des variables biomécaniques dérivées de l'évaluation au radar entre les deux sessions du meilleur sprint en patinage sur 40 m.

	Meilleur essai session 1	Meilleur essai session 2	Valeur de p	d ; effet	ICC	CV (%)	Biais moyen	\pm 95% LOA	SEM (%)	SWC
F₀ (N)	397 \pm 73	421 \pm 94	0,51	0,29 ; 'faible'	0,77 (0,34-0,93)	9,2 (6,4-16,0)	25,15	122,24	4,79	14,27
F_{0rel} (N.kg⁻¹)	5,60 \pm 1,00	5,91 \pm 1,22	0,52	0,28 ; 'faible'	0,76 (0,28-0,92)	9,2 (6,4-16,0)	0,31	1,79	4,85	0,18
V₀ (m.s⁻¹)	7,97 \pm 0,48	8,02 \pm 0,42	0,80	0,11 ; 'trivial'	0,84 (0,52-0,96)	1,8 (1,3-3,3)	0,05	0,54	1,04	0,08
P_{max} (W)	797 \pm 180	848 \pm 217	0,56	0,26 ; 'small'	0,86 (0,57-0,96)	8,6 (6,1-15,0)	50,57	226,84	4,46	36,29
P_{maxrel} (W.kg⁻¹)	11,22 \pm 2,44	11,91 \pm 2,90	0,55	0,26 ; 'faible'	0,84 (0,50-0,95)	8,7 (6,1-15,0)	0,69	3,33	4,50	0,48
S_{FVrel} (N.m.s⁻¹.kg⁻¹)	-0,69 \pm 0,09	-0,73 \pm 0,13	0,47	0,32 ; 'faible'	0,43 (0,00-0,81)	8,9 (6,2-16,0)	-0,04	0,25	5,42	0,01
S_{FV} (N.m.s⁻¹)	-49,56 \pm 7,26	-52,32 \pm 10,46	0,48	0,31 ; 'faible'	0,57 (0,00-0,86)	8,6 (6,1-15,0)	2,76	17,20	5,31	1,30
V_{max} (m.s⁻¹)	7,67 \pm 0,46	7,72 \pm 0,40	0,78	0,12 ; 'trivial'	0,88 (0,62-0,97)	1,6 (1,1-2,8)	0,05	0,46	0,92	0,08
5 m (s)	1,60 \pm 0,14	1,56 \pm 0,12	0,52	0,28 ; 'faible'	0,75 (0,30-0,92)	3,7 (2,6-6,5)	-0,04	0,20	1,89	0,02
40 m (s)	6,60 \pm 0,47	6,50 \pm 0,39	0,59	0,24 ; 'faible'	0,89 (0,65-0,97)	1,9 (1,3-3,3)	-0,10	0,44	0,97	0,08

d : taille d'effet de Cohen ; ICC : Coefficient de corrélation intra-classe; CV : coefficient de variation (avec 95% d'intervalle de confiance); LOA: limites de concordance ($1,96 \times SD$); SEM : erreur standard de mesure ; SWC : plus petit changement significatif. * Significativement différent : $p < 0,05$.

Tableau 14. Répétabilité relative et absolue des variables biomécaniques dérivées de l'évaluation au radar entre les deux sessions de la moyenne des deux sprints en patinage sur 40 m.

	Moyenne des 2 essais session 1	Moyenne des 2 essais session 2	Valeur de p	d ; effet	ICC	CV (%)	Biais moyen	$\pm 95\%$ LOA	SEM (%)	SWC
F₀ (N)	392 \pm 47	408 \pm 65	0,51	0,29 ; 'faible'	0,88 (0,62-0,97)	5,2 (3,6-9,1)	16,05	60,91	2,31	10,46
F_{0rel} (N.kg⁻¹)	5,50 \pm 0,66	5,69 \pm 0,80	0,55	0,26 ; 'faible'	0,86 (0,55-0,96)	5,0 (3,5-8,8)	0,19	0,86	2,32	0,13
V₀ (m.s⁻¹)	8,04 \pm 0,32	8,05 \pm 0,39	0,95	0,03 ; 'trivial'	0,90 (0,68-0,97)	1,4 (1,1-2,3)	0,01	0,35	0,66	0,07
P_{max} (W)	790 \pm 120	823 \pm 160	0,59	0,24 ; 'faible'	0,92 (0,73-0,98)	5,1 (3,6-9,0)	33,49	126,50	2,32	26,83
P_{maxrel} (W.kg⁻¹)	11,08 \pm 1,62	11,53 \pm 2,06	0,58	0,25 ; 'faible'	0,90 (0,68-0,97)	5,2 (3,6-9,1)	0,45	1,80	2,35	0,35
S_{FVrel} (N.m.s⁻¹.kg⁻¹)	-0,69 \pm 0,07	-0,70 \pm 0,08	0,66	0,19 ; 'trivial'	0,80 (0,41-0,94)	5,2 (3,6-9,1)	-0,01	0,10	2,14	0,01
S_{FV} (N.m.s⁻¹)	-48,64 \pm 4,68	-50,54 \pm 6,71	0,45	0,33 ; 'faible'	0,79 (0,39-0,94)	4,0 (2,8-7,0)	1,90	8,03	2,47	1,00
V_{max} (m.s⁻¹)	7,73 \pm 0,31	7,74 \pm 0,38	0,91	0,05 ; 'faible'	0,92 (0,73-0,98)	1,1 (0,8-1,1)	0,02	0,31	0,60	0,07
5 m (s)	1,60 \pm 0,19	1,58 \pm 0,09	0,60	0,23 ; 'faible'	0,88 (0,62-0,97)	2,0 (1,4-3,5)	-0,02	0,10	0,93	0,02
40 m (s)	6,57 \pm 0,28	6,53 \pm 0,32	0,72	0,16 ; 'trivial'	0,93 (0,77-0,98)	1,3 (0,9-2,3)	-0,05	0,24	0,58	0,06

d : taille d'effet de Cohen ; ICC : Coefficient de corrélation intra-classe; CV : coefficient de variation (avec 95% d'intervalle de confiance); LOA: limit of agreement ($1,96 \times SD$); SEM : erreur standard de mesure ; SWC : plus petit changement significatif. * Significativement différent : $p < 0,05$.

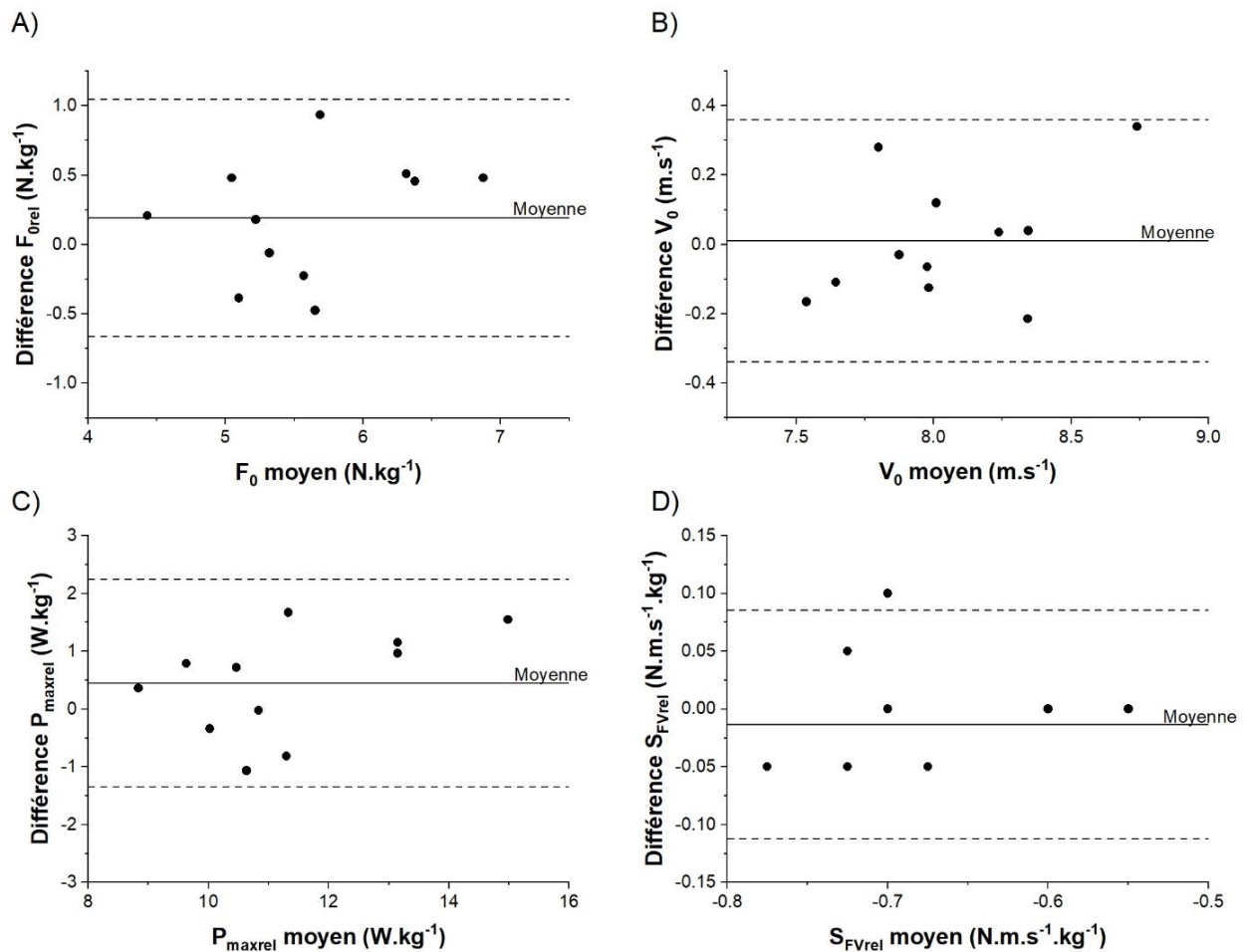


Figure 27. Concordance des variables théoriques maximales moyennes issues du profil force-vitesse en patinage entre les deux sessions estimée par la méthode graphique de Bland-Altman.

Les variables représentées sont F_{0rel} (panel A), V_0 (panel B), P_{maxrel} (panel C) et S_{FVrel} (panel D). Les lignes en pointillées supérieures et inférieures représentent les 95% des limites de concordance (moyenne $\pm 1,96$ SD de la différence entre la session 1 et la session 2). Veuillez noter que deux points sur le panel D (-0,775 ; -0,05) et (-0,675 ; -0,05) représentent respectivement deux et trois participants ayant des valeurs identiques.

4. CONCLUSION

Les résultats de cette **étude #2** indiquent que les variables biomécaniques dérivées de l'évaluation radar lors d'un sprint sur glace de 40 m démontrent un niveau de reproductibilité relative et absolue acceptable. Les résultats indiquent qu'il est préférable de considérer les valeurs moyennes des essais plutôt que les meilleures performances pour augmenter la reproductibilité des mesures de force, vitesse et puissance. Cette étude souligne l'intérêt de l'utilisation de cette méthode simple et prometteuse dans le suivi de l'évolution des variables biomécaniques en hockey sur glace en lien avec l'entraînement mis en place.

ÉTUDE 3 : L'UTILISATION DE LA VIDÉO HAUTE-FRÉQUENCE ENTRAÎNE UNE ESTIMATION TRONQUÉE DU PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE COMPARÉE A L'UTILISATION DU RADAR.

Abstract

This study aimed to compare the force-velocity mechanical variables derived from high-speed video- and radar-based method during forward skating sprint in ice hockey. Thirteen elite female ice hockey players performed two 40-m forward skating sprints to determine, in the horizontal plane, maximal velocity reached (V_{\max}), relative maximal theoretical force (F_0), maximal theoretical velocity (V_0), relative maximal power (P_{\max}), linear slope of the force-velocity relationship (FV slope), maximal value of the ratio of force (RF_{\max}) and index of force application technique (Drf). Two different high-speed video-based methods adding a time shift (ST-TS) or not (ST) were used and independently compared to the radar-derived method. ST and ST-TS showed significant mean differences (all $p < 0.002$) compared to radar-derived processing for all variables except for V_0 ($p = 0.26$) and V_{\max} ($p = 0.13$) inferred from ST. In reference to radar-derived variables, ST-TS significantly induced *largely* lower values compared to radar of the main forward skating sprint determinants (P_{\max} , F_0 , RF_{\max} and Drf) and *moderate-to-large* overestimation for velocity variables (V_0 and V_{\max}). Correlations between ST or ST-TS and radar-derived methods ranged from *trivial* for velocity variables to *very large* for force and power variables. Consequently, practitioners must be aware that using such high-speed video-based methods would permit to determine mechanical variables at the cost of much lower accuracy and reliability than the radar-derived method.

Publication associée :

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. Truncated estimation of skating force-velocity profiling when using high-speed video-based methods compared to radar-derived processing. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Biomechanics*. **Under review.**

1. INTRODUCTION

Nous venons de le voir dans l'[étude #2](#), la modélisation du profil FV durant le sprint en patinage s'avère possible et reproductible en utilisant un radar afin de mesurer V_h . Plus récemment, Stenroth et al. (2020) ont adapté une méthode alternative basée sur la mesure de temps de passage (méthode ST) grâce à l'utilisation de la vidéo à haute-fréquence (*i.e.*, 240 images par seconde) comme précédemment présenté pour évaluer le profil FV lors d'un sprint en course à pied (Romero-Franco et al., 2017). Cette méthode ajoute un délai de temps (méthode ST-TS) afin de réduire l'incertitude concernant l'identification du début de la production de F_0 en modifiant la durée du premier temps de passage tout en maintenant les autres temps de passage au fil du sprint sur glace. D'une part, cette approche utilise un outil peu onéreux et facile d'utilisation. D'autre part, Stenroth et al. (2020) rapportent des biais conséquents lorsque les variables biomécaniques sont dérivées de cette méthode alternative, notamment en ce qui concerne les variables de force et puissance (F_0 , P_{max} et RF_{max}), comparées à celles obtenues à l'aide d'un film vidéo acquis tout au long du sprint. Par exemple, la reproductibilité inter-essais de la méthode basée sur la vidéo à haute-fréquence apparaît inférieure à celle rapportée utilisant le radar pour déterminer V_0 (ICCs s'étalant de 0,198 à 0,343 contre 0,86, respectivement) et V_{max} durant le sprint en patinage (ICCs s'étalant de 0,497 à 0,596 contre 0,91, respectivement) (cf. [étude #2](#)). De plus, bien que Stenroth et al. (2020) suggèrent d'analyser uniquement la meilleure performance, les résultats de l'[étude #2](#) en patinage ou ceux de Simperingham et al. (2019) en course à pied confirment que le calcul de la moyenne des paramètres entre les essais améliore le niveau de reproductibilité.

Cette **étude #3** a eu pour objectif de comparer les variables biomécaniques inhérentes au profil FV dérivées des méthodes utilisant la vidéo à haute-fréquence à celle utilisant le radar durant le sprint sur glace.

2. MÉTHODES

Au cours d'un stage de pré-saison de l'équipe de France de hockey sur glace, 13 joueuses de hockey sur glace de haut-niveau (cf. [Méthodes expérimentales, section 1](#)) ont été évaluées afin de déterminer les variables biomécaniques inhérentes au profil FV en patinage. Pour ce faire, deux méthodes utilisant la vidéo haute-fréquence (ST et ST-TS) (Romero-Franco et al., 2017; Stenroth et al., 2020) ont été comparées à la méthode utilisant le radar (cf. [étude #2](#)).

La vitesse horizontale de déplacement du CM était simultanément mesurée à l'aide du radar et d'une caméra haute-fréquence (iPhone 6, Apple Inc., USA, 240 images par seconde, résolution 720 pixels). L'évaluation du profil FV à partir de mesures de vitesse issues du radar a été précédemment décrite (cf. [Méthodes expérimentales, section 3](#)) et s'appuie sur les résultats de l'[étude #2](#). Dans le même temps, une caméra fixée à une hauteur de 1,5 m (dans le plan frontal) et positionnée à 20 m de la ligne de départ et 11,5 m du couloir de patinage (Samozino, 2018) était utilisée par un même examinateur pour investiguer l'ensemble du sprint. D'après les recommandations de Romero-Franco et al. (2017) et selon le théorème de Thalès, la parallaxe de la vidéo a été corrigée afin de s'assurer que les temps intermédiaires à 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40 m étaient correctement mesurés. La correction de la parallaxe a été assurée en positionnant des marqueurs verticaux aux distances ajustées correspondantes aux distances évaluées. Ainsi, lorsque la joueuse est filmée en train de franchir le marqueur vertical au niveau du centre de gravité (*i.e.*, défini au niveau des hanches), celle-ci se situe précisément au niveau de la distance évaluée. Les marqueurs se situent respectivement à 6,96, 11,30, 15,65, 20,00, 24,35, 28,70, 33,04 et 37,39 m de la ligne de départ. Le couloir de patinage était parallèle, et situé à 1,5 m, de la ligne des marqueurs verticaux.

L'analyse des données issues de l'enregistrement vidéo à haute-fréquence a été réalisé par un seul et même investigateur via le logiciel Kinovéa (Version 0.8.26, 2017). Les images correspondant aux temps de passage (*i.e.*, alignement des marqueurs verticaux avec le passage des hanches) ont été sélectionnées manuellement. Les feuilles de calculs conçues par Morin et

Samozino (2019)¹ et Stenroth et al. (2020)² ont été utilisées afin de modéliser le profil FV et l'ensemble des variables biomécaniques extraites à partir des mesures de vitesse en utilisant la méthode ST et ST-TS, respectivement. La position de la joueuse a été modélisée en fonction du temps selon l'équation (8) pour ST (Morin et Samozino, 2019) et l'équation (9) pour ST-TS en ajoutant le paramètre de délai de temps c (Stenroth et al., 2020).

$$x(t) = v_{max} \times (t + \tau e^{-t/\tau}) - v_{max} \times \tau \quad (8)$$

$$x(t) = v_{max} \times (t + c + \tau e^{-(t+c)/\tau}) - v_{max} \times \tau \quad (9)$$

V_{max} et τ ont été calculées en utilisant la fonction « solveur » intégrée à Excel (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, United States) (Figure 28).

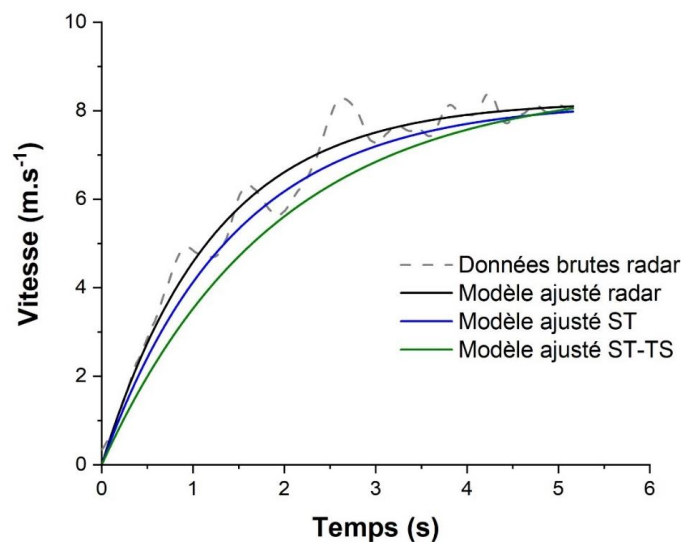


Figure 28. Vitesse horizontale du centre de masse mesurée lors d'un sprint en patinage. Le tracé en pointillés représente les données brutes de la vitesse mesurée en fonction du temps à l'aide du radar et les tracés pleins représentent les modèles ajustés dérivés de chaque méthode [temps de passage en utilisant la vidéo haute-fréquence (ST) en bleu, temps de passage avec délai de temps en utilisant la vidéo haute-fréquence (ST-TS) en vert et radar en noir]. Les données ont été mesurées au cours du même sprint en patinage d'une seule joueuse.

La fonction a été paramétrée afin de minimiser la somme des carrés des différences entre la modélisation et les positions réelles de la joueuse en ajustant les différentes constantes (V_{max} et τ). Après avoir estimé V_{max} et τ , l'ensemble des variables de la relation FV a été déterminé après

¹ https://www.researchgate.net/publication/321767606_Spreadsheet_for_Sprint_acceleration_force-velocity-power_profiling

² https://www.researchgate.net/publication/342233454_Spreadsheet_for_sprint_acceleration_force-velocity-power_profiling_with_optimization_to_correct_start_time

intégration selon les équations détaillées auparavant [cf. [Méthodes expérimentales, section 3](#) ; équations (4), (5) et (6)].

Afin de synchroniser les deux outils (vidéo et radar), le départ en patinage a été déterminé pour la vidéo à haute-fréquence comme le moment où l'examineur détectait visuellement le premier mouvement de la joueuse (*i.e.*, le premier changement de posture entre deux images consécutives) et pour le radar, lorsque la vitesse du CM dépassait $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Romero-Franco et al., 2017).

Une analyse de corrélation de Pearson et un t-test apparié ont été appliqués variables biomécaniques modélisées à l'aide de ST, ST-TS et du radar. Le degré de concordance entre les méthodes a été estimé en utilisant la méthode de Bland-Altman. Afin de déterminer la reproductibilité relative entre les méthodes pour les différentes variables, les ICCs ont également été calculées (cf. [Méthodes expérimentales, section 4](#)).

3. RÉSULTATS

Le délai de temps moyen du paramètre c lors de l'utilisation de la méthode ST-TS pour l'ensemble des joueuses était de $0,268 \pm 0,053$ s. Comparativement au radar, ST et ST-TS ont montré des différences significatives pour l'ensemble des variables, à l'exception de V_0 ($p = 0,26$) et V_{\max} ($p = 0,13$) modélisées à partir de la méthode ST (Tableau 15). Pour F_0 , V_0 , P_{\max} et V_{\max} , le biais moyen entre ST, ST-TS et le radar ont été présentés à l'aide de la méthode de concordance de Bland-Altman (Figure 29). ST montrait une différence négative *faible* à *modérée* comparée au radar pour l'ensemble des variables sauf pour la pente de la relation FV (différence positive modérée ; Tableau 15). ST-TS montrait des valeurs *largement* inférieures pour F_0 , P_{\max} , RF_{\max} , et Drf comparées au radar (Tableau 16). L'ICC était *modéré* à *haut* pour F_0 , P_{\max} , et RF_{\max} à la fois pour ST et ST-TS alors que pour les autres variables, l'ICC était *très faible* à *faible* (Tableaux 15 et 16). Les corrélations entre ST ou ST-TS et le radar variaient entre *triviale* pour V_{\max} et V_0 à *très forte* pour F_0 (seulement pour ST-TS), P_{\max} , et RF_{\max} (Tableaux 15 et 16). La TEE s'étalait de *faible* pour P_{\max} à *très forte* pour V_0 , Drf et V_{\max} pour

ST (Tableau 15) et de *modérée* pour F_0 , P_{\max} et RF_{\max} à *très forte* pour l'ensemble des autres variables concernant ST-TS (Tableau 16).

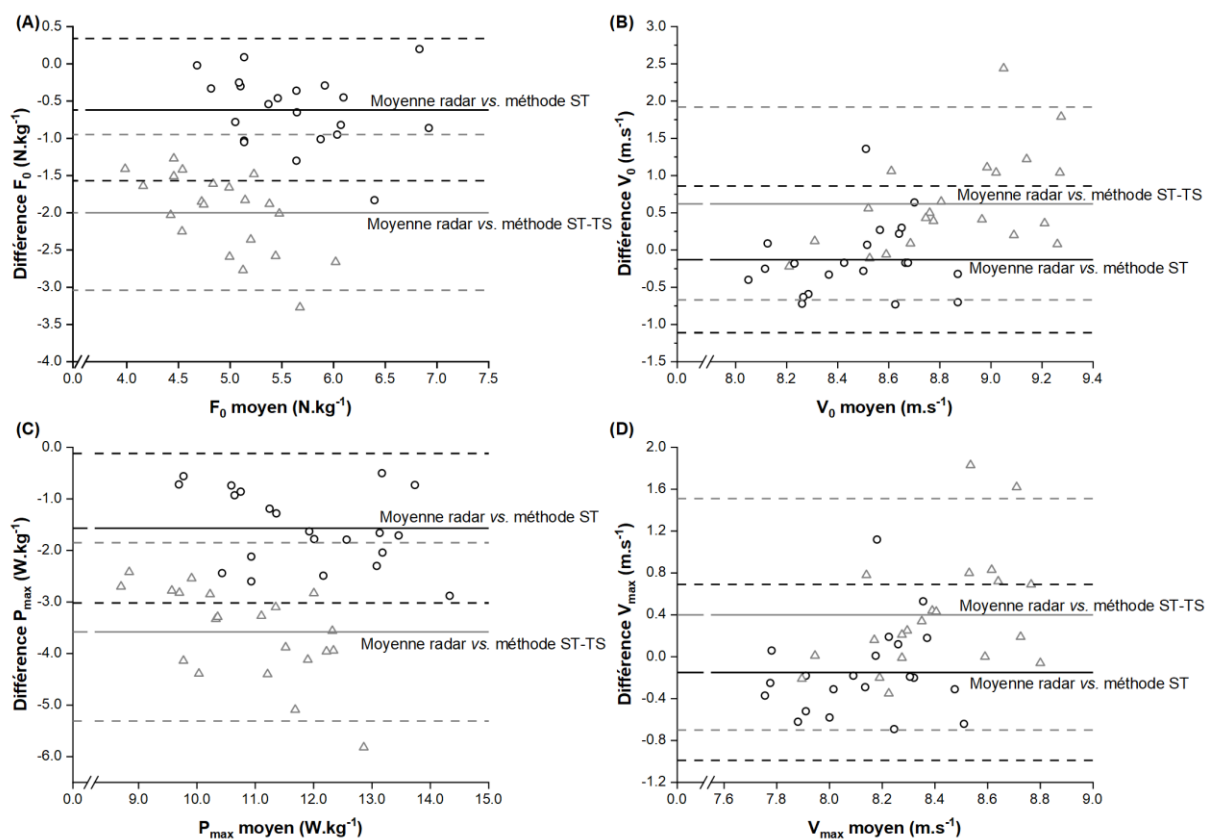


Figure 29. Concordance des variables théoriques maximales entre les méthodes utilisant la vidéo haute-fréquence et le radarestimée par la méthode graphique de Bland-Altman.

Les différentes variables représentées sont F_0 (panel A), V_0 (panel B), P_{\max} (panel C) et V_{\max} (panel D). Les cercles et lignes noires représentent les différences entre la méthode utilisant les temps de passage déterminés à l'aide de la vidéo haute-fréquence (ST) et la méthode utilisant le radar alors que les cercles et lignes grises représentent les différences entre la méthode utilisant les temps de passage et le délai de temps déterminés à l'aide de la vidéo haute-fréquence (ST-TS) et la méthode utilisant le radar. Les lignes en pointillées supérieures et inférieures représentent les 95% des limites de concordance (moyenne $\pm 1,96 \times SD$ de la différence entre les méthodes).

Tableau 15. Différences entre les variables mécaniques lors d'un sprint en patinage obtenues à partir de la méthode utilisant les temps de passage déterminés à l'aide de la vidéo haute fréquence (ST) en référence à la méthode utilisant le radar.

	Valeur de <i>p</i>	Différence moyenne (%)	± 95% LOA	<i>d</i> ; effet	ICC	<i>r</i>	Valeur de <i>p</i>	TEE
F₀ (N.kg⁻¹)	< 0,001	-0,62 (-10,88)	0,96	-0,85 ; "modéré"	0,74 (0,45-0,88) "modéré"	0,74 (0,46-0,89)	<0,001	0,90 (0,51-1,94) "modérée"
V₀ (m.s⁻¹)	0,26	-0,13 (-1,54)	0,99	-0,37 ; "faible"	-0,10 (-0,54-0,35) "très faible"	-0,04 (-0,47-0,40)	0,86	23,90 (15,87-30,85) "très large"
P_{max} (W.kg⁻¹)	< 0,001	-1,57 (-13,15)	1,45	-0,98 ; "modéré"	0,87 (0,70-0,94) "haut"	0,88 (0,71-0,95)	<0,001	0,55 (0,33-0,98) "faible"
S_{FV} (N.s.kg⁻¹.m⁻¹)	0,002	0,06 (9,32)	0,17	0,74 ; "modéré"	0,46 (0,02-0,74) "faible"	0,49 (0,07-0,76)	0,03	1,79 (0,86-14,30) "large"
RF_{max} (%)	< 0,001	-2,52 (-6,73)	2,45	-0,98 ; "modéré"	0,86 (0,67-0,94) "haut"	0,85 (0,67-0,94)	<0,001	0,61 (0,37-1,12) "modérée"
Dr_f (%)	0,002	0,63 (9,62)	1,59	0,81 ; "modéré"	0,34 (-0,12-0,67) "faible"	0,39 (-0,05-0,70)	0,08	2,38 (1,02-18,61) "très large"
V_{max} (m.s⁻¹)	0,13	-0,15 (-1,86)	0,84	-0,47 ; "faible"	0,03 (-0,43-0,45) "faible"	0,08 (-0,37-0,49)	0,74	12,97 (6,24-18,63) "très large"

d : taille d'effet de Cohen ; ICC : Coefficient de corrélation intra-classe; CV : coefficient de variation (avec 95% d'intervalle de confiance); LOA: limites de concordance ($1,96 \times SD$); SEM : erreur standard de mesure ; *r* coefficient de corrélation de Pearson ; TEE : erreur type.

Tableau 16. Différences entre les variables mécaniques lors d'un sprint en patinage obtenues à partir de la méthode utilisant les temps de passage avec un délai de temps déterminés à l'aide de la vidéo haute fréquence (ST-TS) en référence à la méthode utilisant le radar.

	Valeur de <i>p</i>	Différence moyenne (%)	± 95% LOA	<i>d</i> ; effet	ICC	<i>r</i>	Valeur de <i>p</i>	TEE
F₀ (N.kg⁻¹)	< 0,001	-2,00 (-40,27)	1,05	-1,72 ; "large"	0,58 (0,19-0,80) "modéré"	0,68 (0,35-0,86)	<0,001	1,07 (0,59-2,64) "modérée"
V₀ (m.s⁻¹)	< 0,001	0,62 (6,92)	1,30	1,13 ; "modéré"	-0,01 (-0,47-0,42) "très faible"	-0,05 (-0,48-0,39)	0,81	18,24 (14,42-22,71) "très large"
P_{max} (W.kg⁻¹)	< 0,001	-3,58 (-32,86)	1,73	-1,62 ; "large"	0,78 (0,52-0,90) "haut"	0,84 (0,63-0,93)	<0,001	0,66 (0,39-1,23) "modérée"
S_{FV} (N.s.kg⁻¹.m⁻¹)	< 0,001	0,27 (46,70)	0,18	1,73 ; "large"	0,23 (-0,24-0,60) "faible"	0,29 (-0,17-0,64)	0,21	3,35 (1,20-5,93) "très large"
RF_{max} (%)	< 0,001	-8,14 (-23,56)	3,12	-1,73 ; "large"	0,76 (0,49-0,90) "haut"	0,76 (0,49-0,90)	<0,001	0,86 (0,49-1,80) "modérée"
Dr_f (%)	< 0,001	2,48 (45,79)	1,70	-1,74 ; "large"	0,18 (-0,29-0,56) "faible"	0,24 (-0,22-0,61)	0,31	4,14 (1,31-4,46) "très large"
V_{max} (m.s⁻¹)	0,004	0,40 (4,71)	1,11	0,93 ; "modéré"	-0,06 (-0,51-0,38) "faible"	-0,08 (-0,50-0,36)	0,72	12,00 (6,10-18,21) "très large"

d : taille d'effet de Cohen ; ICC : Coefficient de corrélation intra-classe; CV : coefficient de variation (avec 95% d'intervalle de confiance); LOA: limites de concordance ($1,96 \times SD$); SEM : erreur standard de mesure ; *r* coefficient de corrélation de Pearson ; TEE : erreur type.

4. CONCLUSION

Bien que simple d'utilisation, la méthode ST basée sur la vidéo haute-fréquence entraîne une estimation tronquée du profil FV en patinage et de l'ensemble des variables biomécaniques associées, en comparaison avec la méthode utilisant le radar considérée comme méthode de référence. Par ailleurs, l'ajout d'un délai de temps (*i.e.*, méthode ST-TS) semble nuire à la validité des mesures. La méthode utilisant le radar doit donc être privilégiée afin de déterminer plus précisément les variables biomécaniques lors d'un sprint en patinage. Être conscients des limites associées à ces deux méthodes est une étape préalable importante à leur utilisation et interprétation dans le cadre du hockey sur glace.

ÉTUDE 4 : UTILISATION DU RADAR VS. APPAREIL DE RÉSISTANCE ROBOTIQUE DANS LA DÉTERMINATION DU PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE. QUELLE MÉTHODE POUR QUEL OBJECTIF ?

ABSTRACT

This study aimed to compare skating force-velocity relationships determined throughout sprints performed against various loaded conditions or inferred from movement kinetics measured during a single unloaded sprint. Ten female ice hockey players performed one unloaded maximal skating sprint test measured with a radar gun followed by 4 resisted skating sprints against a robotic horizontal resistance with progressive loads in reference to equipped body mass (BM): 3 kg (robotic resistance), 25%, 50% and 75% of equipped BM. Maximal theoretical force (F_0), velocity (V_0), power (P_{max}), optimal velocity (V_{opt}) condition for producing maximal power and slope of the linear force-velocity relationship (SFV) were determined from each method and compared using a paired sample t-test, absolute mean bias (\pm 95% confidence intervals), Pearson correlations and typical error of the estimate (TEE) in standardized units [effect size (ES)]. Statistical significance was set at $p < 0.05$. No statistical difference was found for all mechanical variables determined from the two methods (p ranging 0.09-0.59). While exhibiting positive correlations ranging from *moderate* ($r = 0.50$ for SFV) to *high* (r ranging from 0.71 to 0.84 for F_0 , V_0 , V_{opt} and P_{max}) between methods, all variables exhibited *large* levels of error between approaches (ES ranging 0.66-1.71). Multiple loaded and single unloaded methods were comparable to determine force-velocity relationships during on-ice skating sprint. The low-cost fatigue-free unloaded method suggests it could be used in constrained contexts (*i.e.*, congested schedule, low available time) or for a simple force-velocity profiling. Inversely, multiple loaded methods would be more appropriate to evaluate and individualize training for skilled ice hockey players accustomed to resistive skating sprint.

Publication associée :

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods. *Journal of Strength and Conditioning Research*. **In revision.**

1. INTRODUCTION

Différentes méthodes (*i.e.*, profil cinétique sur plusieurs sprints ou dynamique inverse) et outils d'analyse (*i.e.*, plateformes de force, radar, vidéo) (Cross et al., 2017) ont permis de définir certaines propriétés biomécaniques (F_0 , V_0 , P_{\max} ou S_{FV}) de l'appareil locomoteur durant un effort maximal, susceptibles d'évaluer les capacités d'un athlète et d'individualiser son entraînement (Morin et Samozino, 2016).

Sur le terrain, le profil FV être déterminé soit à l'aide de quelques sprints résistés contre des charges externes progressives, soit lors d'un sprint unique effectué à poids de corps (Cross et al., 2018a; Cross et al., 2018b; Helland et al., 2019). Cependant, la littérature scientifique (Cross et al., 2018b; Helland et al., 2019) montre que la corrélation entre les deux méthodes diffère selon les problématiques méthodologiques et notamment les outils utilisés. Le sprint unique à poids de corps est une méthode simple à mettre en place dans les conditions de terrain en utilisant des données facilement accessibles (*i.e.*, données de distance ou vitesse en fonction du temps). À l'inverse, la méthode nécessitant plusieurs sprints résistés est plus contraignante (*i.e.*, temps, fatigue) pour générer des données cinétiques, mais semble plus pertinente pour la mise en place d'un programme spécifique de sprints résistés. En effet, cette dernière permet de balayer l'ensemble du spectre du profil FV permettant ainsi de mieux définir les charges de résistance spécifiques aux objectifs de développement définis (*i.e.*, force, puissance, vitesse). De tels exercices de sprints résistés sont d'ailleurs communément employés par les entraîneurs durant les séances sur glace (Janot et al., 2013; Matthews et al., 2010; Pollitt, 2003). À ce jour, et comme évoqué précédemment, le profil FV en patinage a été évalué uniquement en utilisant un sprint unique à poids de corps [[étude #2](#); (Stenroth et al., 2020)]. Dès lors, la corrélation des paramètres obtenus à partir de la méthode de sprint unique et celle basée sur des sprints répétés et résistés reste inconnue dans le contexte spécifique du hockey sur glace.

L'objectif de cette **étude #4** a été de comparer si la relation FV en patinage déterminée à l'aide d'un sprint unique à poids de corps est comparable à celle obtenue à partir de sprints résistés

contre différentes charges. Cette comparaison permettrait de sélectionner quelle méthode serait la plus appropriée pour définir un entraînement résistif optimal.

2. MÉTHODES

Dix joueuses de hockey sur glace de haut-niveau (cf. [Méthodes expérimentales, section 1](#)) ont participé à cette étude. Trois sessions de test ont été planifiées à des horaires identiques (± 1 h) durant trois jours consécutifs. Les joueuses ont été pesées, équipées au préalable ($74,1 \pm 7,8$ kg).

Suite à un échauffement standardisé sur la glace, les joueuses ont réalisé un sprint en patinage à poids de corps sur une distance de 40 m (cf. [Méthodes expérimentales, section 3](#)) suivi de quatre sprints résistés contre des charges progressives calibrées en fonction de la masse de la joueuse équipée. Afin de garantir les mêmes conditions pour l'ensemble des joueuses et de réduire l'effet de la dégradation de la glace due aux « coups de patins » (*i.e.*, appuis) et freinages sur la qualité de glisse, le couloir de patinage a été déplacé à chaque nouveau test. Les charges prescrites pour chaque joueuse étaient de 3 kg (résistance robotique), 25%, 50% et 75% de la masse de la joueuse équipée. Les joueuses étaient attachées au niveau de la ceinture à un appareil robotique portable produisant une résistance horizontale constante (1080 Sprint, 1080 Motion, Lidingö, Suède) réglable au kg (fonction isotonique, de 1 à 30 kg), permettant de mesurer simultanément V_h , P_h , F_h , la distance et le temps. La résistance absolue a été convertie en résistance relative robotique (conversion de 0,35 recommandée par le constructeur, quel que soit le coefficient de friction de la surface d'appui) (Cross et al., 2018a; Thompson et al., 2021), avec des distances définies lors d'essais pilotes : 40 m pour 3 kg, 30 m pour 25% et 50% de la masse de la joueuse équipée et 20 m pour 75% de la masse de la joueuse équipée.

La condition de vitesse optimale (V_{opt}) pour laquelle la production de puissance est maximale a été calculée pour les deux méthodes comme la condition à laquelle P_{max} correspond à $0,5 \times V_0$ (Cross et al., 2018b). De la même façon, la charge optimale (L_{opt}) a été définie uniquement

pour la méthode des sprints résistés en utilisant V_{opt} afin de déterminer la résistance robotique correspondant au pic de la relation puissance-vitesse (PV) (Cross et al., 2018b).

Une régression linéaire, un t-test simple et le calcul des biais absolus avec des intervalles de confiance à $\pm 95\%$ (Hopkins, 2000) ont été appliqués aux variables F_0 , P_{max} , V_0 , S_{FV} , et V_{opt} afin de comparer les deux méthodes. r a été calculé afin d'évaluer la relation entre les deux méthodes (cf. [Méthodes expérimentales, section 4](#)).

3. RÉSULTATS

La figure 30 présente les données brutes extraites de l'évaluation par le radar et l'appareil robotique (panel A), la relation charge-vitesse déterminée avec l'appareil robotique durant les sprints résistés contre les différentes charges (panel B) et la comparaison des profils FV et PV obtenues à partir des deux méthodes (panel C).

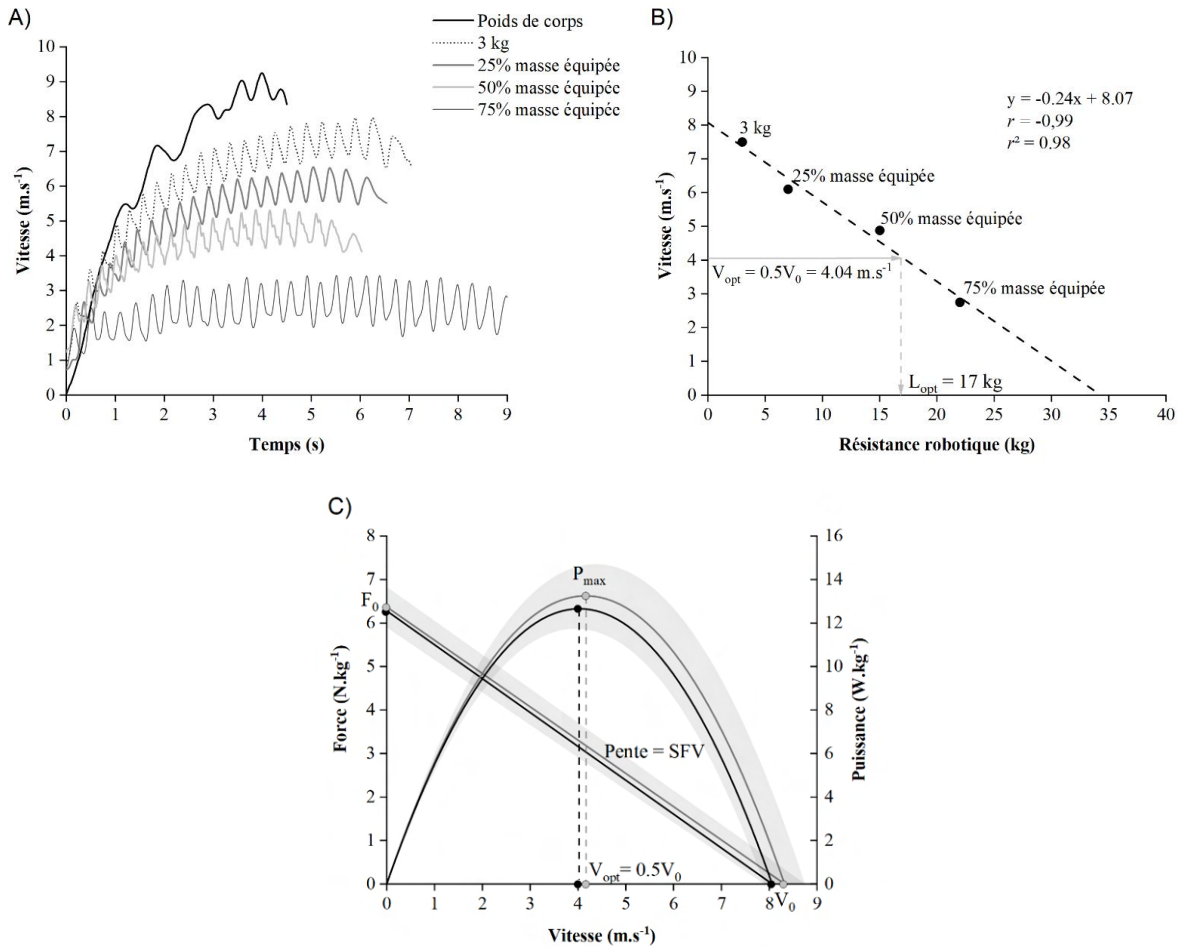


Figure 30. Comparaison des profils force-vitesse déterminés à l'aide d'un sprint unique ou de plusieurs sprints résistés.

A- Vitesse horizontale du centre de masse en fonction du temps mesurée à l'aide du radar (méthode sprint unique à poids de corps) et à l'aide d'un appareil robotique durant plusieurs sprints résistés contre différentes charges correspondant à 3 kg (résistance robotique), 25%, 50% et 75% de la masse d'une joueuse équipée (taille 1,69 m et masse équipée 84 kg dans le présent exemple). B- Relation charge-vitesse déterminée à l'aide de l'appareil robotique durant plusieurs sprints résistés effectués par la même joueuse contre les différentes conditions de charge. La charge optimale (L_{opt}) a été calculée à la vitesse optimale ($V_{opt} = 0,5 \times V_0$) correspondant à la vitesse induisant la production de puissance maximale (P_{max}). C- Relations force-vitesse et puissance-vitesse déterminées à l'aide de la méthode du sprint unique (tracé grisé) et de la méthode utilisant plusieurs sprints résistés (tracé noir). Les zones grisées représentent les limites de confiance à 95% de l'équation prédictive entre les deux méthodes. F_0 , force maximale théorique ; V_0 , vitesse maximale théorique ; P_{max} , puissance maximale ; V_{opt} , vitesse optimale induisant P_{max} et SFV, la pente de la relation force-vitesse.

Tableau 17. Comparaison des variables biomécaniques extraites des relations force-vitesse déterminées à partir de la méthode du sprint unique à poids de corps et de la méthode utilisant de multiples sprints avec des conditions de charges différentes.

Caractéristiques biomécaniques	Sprint unique à poids de corps (Moyenne \pm SD)	Multiples sprints résistés (Moyenne \pm SD)	Méthode des multiples sprints résistés vs. méthode du sprint unique à poids de corps			
			t-test apparié (Valeur de p)	Biais moyen absolu (95% CI)	Coefficient de corrélation de Pearson (r)	TEE (ES; inférence)
F_0 (N.kg ⁻¹)	6,37 \pm 0,65	6,28 \pm 0,67	0,59	-0,09 (-1,15 ; 0,97)	0,71	1,00; <i>Large</i>
P_{max} (W.kg ⁻¹)	13,23 \pm 2,07	12,67 \pm 1,77	0,16	-0,55 (-2,93 ; 1,82)	0,84	0,66; <i>Large</i>
V_0 (m.s ⁻¹)	8,32 \pm 0,59	8,06 \pm 0,57	0,09	-0,26 (-1,17 ; 0,65)	0,72	0,96; <i>Large</i>
S_{FV} (N.m.s ⁻¹)	-0,76 \pm 0,06	-0,78 \pm 0,09	0,52	-0,02 (-0,19 ; 0,15)	0,50	1,71; <i>Large</i>
V_{opt} (m.s ⁻¹)	4,16 \pm 0,30	4,03 \pm 0,29	0,09	-0,13 (-0,59 ; 0,33)	0,72	0,96; <i>Large</i>

95% CI, 95% d'intervalle de confiance ; TEE : erreur type ; ES, taille d'effet ; V_0 , vitesse maximale théorique ; F_0 , force maximale théorique ; S_{FV} , pente de la relation force-vitesse ; P_{max} , puissance maximale et V_{opt} , vitesse induisant la puissance maximale.

Aucune différence significative (p compris entre 0,09 et 0,59) n'a été observée entre les différentes variables biomécaniques déterminées à partir des deux méthodes comparées (Tableau 17). Bien que les résultats montrent des relations *fortes* (S_{FV}) à *très fortes* (F_0 , V_0 et P_{max}) entre les deux méthodes, l'ensemble des variables présente de *larges* niveaux d'erreur entre les deux approches (ES compris entre 0,66 et 1,71 ; Tableau 17). L_{opt} , défini à l'aide de la méthode utilisant les sprints résistés, était de 17 ± 1 kg en résistance robotique soit une résistance absolue de 50 ± 4 kg (*i.e.*, $70,0 \pm 4,4\%$ de la masse de la joueuse équipée).

4. CONCLUSION

La *large* variation des données biomécaniques d'intérêt entre les joueuses appelle à la prudence concernant l'interprétation des données. Cependant, les résultats suggèrent que la détermination du profil FV à l'aide d'un sprint unique à poids de corps peut être proposée comme procédure rapide et peu coûteuse en termes de fatigue afin d'évaluer et mettre en place un entraînement individualisé de patinage résisté. Cette méthode pourrait s'avérer particulièrement utile lorsque les joueur·euse·s ne sont pas totalement habitué·e·s à des entraînements au patinage avec résistance. À l'inverse, bien que plus chronophages, les sprints résistés effectués contre différentes conditions de charge à l'aide d'une résistance horizontale robotique pourraient être utilisés sur une population élite avec une technique de patinage de niveau plus élevé afin de proposer un entraînement individualisé en résistance. Couvrant un plus large spectre de la relation FV, la méthode des sprints résistés permet de mieux appréhender les différents paramètres individuels de charge en fonction des objectifs de développement de la puissance, de la force ou de la vitesse.

ÉTUDE 5 : QUELLES CAPACITÉS MUSCULAIRES POUR LA PERFORMANCE LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE ? INTÉRÊT DES PROFILS FORCE-VITESSE EN PATINAGE ET HORS GLACE POUR UNE ÉVALUATION COMPLÈTE DE LA JOUEUSE DE HOCKEY SUR GLACE.

ABSTRACT

This study aimed to investigate the correlations between players' mechanical capacities determined during off- and on-ice tests. Whole body force-velocity relationships were assessed in elite female ice hockey players ($n = 17$) during jumping [squat jump (SJ)], running (5 m and 30 m) and skating (5 m and 40 m) sprint tasks. Mechanical capacities estimated include relative maximal theoretical force (F_{0rel}), velocity (V_0), power (P_{maxrel}), slope of the linear relationship between force relative to body mass and velocity (S_{FVrel}), maximal horizontal component of the ground reaction force to the corresponding resultant force (RF_{max}) and minimal rate of decrease of this ratio (DRF). On-ice mechanical capacities (F_{0rel} , P_{maxrel} , RF_{max} and DRF) *largely-to-very largely* correlated with 40-m skating split time (r ranging from 0.82 for DRF to -0.91 for P_{maxrel} ; $p < 0.001$). Performance variables (SJ height, 30-m running and 40-m forward skating split time) and P_{maxrel} demonstrated the largest associations between jumping, running and skating tasks (r ranging from -0.81 for 30-m sprint running time to 0.92 for SJ height; $p < 0.001$). *Small* (V_0 , S_{FVrel} , DRF and force-velocity deficit) to *very large* (P_{maxrel}) correlations (r ranging from 0.58 to 0.72; $p < 0.05$) were obtained between mechanical variables inferred from off- and on-ice force-velocity tests. The capacity to generate high amounts of horizontal power and effective horizontal force during the first steps on the ice is paramount for forward skating sprint performance. Mechanical capacities determined during forward skating sprint could be considered in ice hockey testing to identify fitness and/or technical/training requirements.

Publication associée :

Perez J., Guilhem G., Hager R. & Brocherie F. (2020). Mechanical determinants of forward skating sprint inferred from off- and on-ice force-velocity evaluations in elite female ice hockey players. *European Journal of Sport Science*, 1-12.

1. INTRODUCTION

Bien qu'il soit essentiel d'identifier les déterminants physiques de la performance en hockey sur glace, certaines études ont montré de faibles relations entre les évaluations hors et sur glace (Nightingale et al., 2013; Vescovi et al., 2006). Des recherches sont donc nécessaires afin de développer des évaluations pertinentes à la fois hors (*i.e.*, SJ ou sprint en course à pied) (Bracko et George, 2001; Burr et al., 2007; Delisle-Houde et al., 2019a) et sur glace (*i.e.*, sprint en patinage) (Buckeridge et al., 2015; Delisle-Houde et al., 2019a; Renaud et al., 2017) susceptibles de mieux refléter la performance au hockey sur glace (cf. [Introduction générale, section II.1](#)).

Comme nous l'avons démontré précédemment dans l'[étude #2](#), il est possible d'appliquer le profil FV durant un sprint sur glace afin de définir F_0 , V_0 , P_{\max} et S_{FV} et ainsi identifier les variables déterminantes de la performance en patinage. En raison des faibles forces de friction de la glace, la technique de patinage nécessite d'appliquer des forces à la fois dans le plan frontal, sagittal et transversal (Pearsall et al., 2013; Robbins et al., 2018), ce qui est susceptible d'influencer la production des différentes variables biomécaniques. Cependant, la F_h demeure prédominante afin de permettre le déplacement du CM vers l'avant. De plus, RF_{\max} et Drf sont des indices supplémentaires capables d'évaluer de manière fiable la capacité du·de la joueur·euse à générer une F_h effective.

À ce jour, aucune étude ne s'est intéressée aux relations entre les profils FV hors et sur glace sur une population de joueuses de haut-niveau (*i.e.*, équipe de France féminine). Des études récentes dans d'autres disciplines montrent que ces profils sont influencés par le niveau de jeu (Devismes et al., 2019; Jiménez-Reyes et al., 2018) et sont spécifiques à chaque sportif·ve (Haugen et al., 2019; Jiménez-Reyes et al., 2018).

L'objectif de cette **étude #5** a été de déterminer les relations entre les différentes variables biomécaniques inhérentes aux profils FV évalués hors et sur glace chez des joueuses de hockey sur glace de haut-niveau.

2. MÉTHODES

Trois sessions d'évaluation, auxquelles 17 joueuses de l'équipe de France de hockey sur glace féminin ont pris part (cf. [Méthodes expérimentales, section 1](#)), ont été planifiées durant la première semaine du stage de pré-saison 2018-2019 (cf. [étude #3](#)). Chaque évaluation a été effectuée à la même heure de la journée (± 1 h), le mardi (jour 1, 17:00), le mercredi (jour 2, 16:00) et le samedi (jour 5, 17:00) pour les sauts, le sprint en course à pied et le sprint en patinage, respectivement. Bien que le contenu des entraînements entre les sessions d'évaluation ait été contrôlé (*i.e.*, travail technico-tactique à basse voir moyenne intensité), les joueuses ont renseigné leur « état » de fatigue à l'aide du questionnaire « Rating of Fatigue » (ROF) (Micklewright et al., 2017) avant chaque évaluation afin de s'assurer d'une absence de fatigue importante et fluctuante entre les sessions d'évaluation.

2.1 Évaluation du profil FV en SJ

Un échauffement général de 15 min a été mené par un préparateur physique au cours duquel les joueuses ont pédalé à intensité modérée et effectué des exercices de mobilité suivi de plusieurs essais de SJ à vide ou chargés. En accord avec la méthode proposée par Giroux et al. (2016), les joueuses ont réalisé deux essais de SJ pour chacune des cinq conditions de charge prédéterminées (*i.e.*, à la fin de la saison précédente, trois semaines auparavant) à partir de la 1 RM en squat classique : un jalon de 0,5 kg, une barre de 10 kg, une barre de 20 kg, 30% de la 1 RM et 40% de la 1 RM. La hauteur de saut a été mesurée à l'aide du système optique OptoJump (Microgate, Bolzano, Italy). Les valeurs de force verticale et de vitesse obtenues pour chacune des cinq conditions à l'aide de la méthode de Samozino et al. (2008) ont été modélisées en utilisant une régression linéaire afin de déterminer l'ordonnée à l'origine (y) et l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses (x) ainsi que la pente de la relation correspondant à F_0 , V_0 et S_{FV} , respectivement. P_{max} correspondait au sommet de la régression polynomiale du second degré modélisant la relation entre la puissance et la vitesse. Nous avons également calculé la pente de la relation FV appliquée au système neuromusculaire entier (S_{FVopt}) qui théoriquement optimise la hauteur de saut (*i.e.*, profil optimal), d'après la méthode

proposée par Samozino et al. (2012). L'angle de poussée (en radians), qui correspond à la moyenne de l'angle de poussée entre la surface de la glace (*i.e.*, plan horizontal) et la résultante de la force appliquée au CM durant le patinage, a été défini à 45° comme reporté par Pearsall et al. (2000). FV_{imb} a été calculé comme l'amplitude de différence relative entre le profil FV déterminé et S_{FVopt} selon l'équation suivante :

$$FV_{imb} = 100 \times \frac{S_{FV}}{S_{FVopt}} \quad (10)$$

2.2 Evaluation du profil FV durant le sprint en course à pied

La performance lors du sprint en course à pied et la relation FV associée ont été évaluées au cours d'un sprint maximal de 30 m selon la méthode de Samozino et al. (2016) . Après 15 min d'échauffement (*i.e.*, course à basse intensité, mobilité articulaire et étirements dynamiques), les joueuses ont réalisé trois sprints de 30 m à vitesse progressive à 70%, 80% et 90% de leur perception de l'effort. Pour l'évaluation, les joueuses ont réalisé 2 sprints maximaux de 30 m entrecoupés de 4 min de repos sur une piste extérieure en tartan (~28°C de température ambiante, 30% d'humidité relative). Les joueuses devaient adopter un départ trois points avec le pouce au sol, à 0.5 m derrière les premières cellules photo-électriques. V_h a été mesurée à l'aide du radar Stalker ATS II à une fréquence de 47 Hz. Le radar était positionné derrière la ligne de départ, à une hauteur de 1 m du sol, correspondant approximativement à la moyenne de hauteur du CM des joueuses (Samozino, 2018). Trois paires de cellules photo-électriques (Brower Timing System, Utah, USA) étaient positionnées à 0 m, 5 m et 30 m et ajustées selon la hauteur de hanche des joueuses. Les temps de passage ont été mesurés avec une précision de 0,01 s. Les performances sur 5 m et 30 m ont été mesurées au cours d'un même sprint.

L'évaluation du profil FV en patinage a été réalisée selon la méthode développée précédemment (cf. [Méthodes expérimentales, section 3](#)). Trois paires de cellules photo-électriques (Brower

Timing System, Utah, USA) ont été positionnées à 0 m, 5 m et 40 m et ajustées selon la hauteur de hanche des joueuses afin de mesurer les temps de passage.

Une analyse ANOVA à mesures répétées a été appliquée aux mesures de ROF afin de comparer l'état de fatigue des joueuses sur les trois sessions d'évaluation. Les relations entre les performances en patinage (*i.e.*, temps de passage à 5 m et 40 m) et les variables biomécaniques (F_{0rel} , V_0 , S_{FVrel} , RF , P_{maxrel} et Drf) ont été évaluées selon le calcul de r . Un t-test apparié et d ont été utilisés afin de comparer les différentes variables issues des profils FV évalué en saut vertical, en sprint en course à pied et en patinage (cf. [Méthodes expérimentales, section 4](#)).

3. RÉSULTATS

Aucune différence significative n'a été observée concernant les mesures de ROF relevées avant chaque session d'évaluation (ROF SJ : $4,5 \pm 0,2$; ROF course à pied : $4,4 \pm 0,3$; ROF patinage : $4,9 \pm 0,3$; $p = 0,13$).

3.1 Capacités musculaires liées à la performance sur glace

Le Tableau 18 rapporte les performances sur 5 m et 40 m en patinage et les variables biomécaniques associées issues du profil FV. Le temps sur 5 m était *fortement* corrélé à celui nécessaire pour couvrir 40 m ($r = 0,82$; $p < 0,001$). Les résultats montrent une corrélation *forte* entre performance sur 5 m et F_{0rel} ($r = -0,59$; $p < 0,05$), P_{maxrel} ($r = -0,62$; $p < 0,01$) et RF_{max} ($r = -0,58$; $p < 0,05$) alors qu'il existe une corrélation *très forte* entre la performance sur 40 m et F_{0rel} ($r = -0,89$; $p < 0,001$) et RF_{max} ($r = -0,89$; $p < 0,001$) et *quasi-parfaite* avec P_{maxrel} ($r = -0,91$; $p < 0,001$). L'ensemble des autres variables (*i.e.*, F_0 , V_0 , Drf , S_{FV} , S_{FVrel} et V_{max}) montre des corrélations significatives avec la performance sur 40 m (r compris entre $-0,49$ et $0,82$; $p < 0,05$) mais pas avec la performance sur 5 m (r compris entre $-0,32$ et $0,47$; $p > 0,05$; Tableau 19).

Tableau 18. Variables biomécaniques et performance obtenues lors de l'évaluation du sprint de 40 m sur glace.

	Moyenne \pm SD	Range
F_{0rel} (N.kg⁻¹)	6,1 \pm 0,6	4,7 - 6,8
F₀ (N)	454 \pm 84	324 - 637
V₀ (m.s⁻¹)	8,49 \pm 0,18	8,19 - 8,81
P_{max} (W)	966 \pm 189	686 - 1354
P_{maxrel} (W.kg⁻¹)	12,8 \pm 1,4	10,0 - 14,8
RF_{max} (%)	39,2 \pm 2,2	34,00 - 42,00
D_{RF} (%)	-6,8 \pm 0,6	-7,7 - -5,4
SFV_{rel} (N.m.s⁻¹.kg⁻¹)	-0,72 \pm 0,07	-0,80 - -0,60
SFV (N.m.s⁻¹)	-53,44 \pm 9,31	-38,25 - -74,94
V_{max} (m.s⁻¹)	8,24 \pm 0,18	7,92 - 8,57
Temps de passage 5 m (s)	1,20 \pm 0,05	1,13 - 1,29
Temps de passage 40 m (s)	6,09 \pm 0,17	5,92 - 6,40

Tableau 19. Coefficients de corrélation de Pearson entre les performances sur 5 et 40 m et les variables de la relation force-vitesse obtenues lors d'un sprint en patinage sur 40 m.

	Temps de passage 5 m (s)		Temps de passage 40 m (s)	
	<i>r</i> (95% CI)	Valeur de <i>p</i>	<i>r</i> (95% CI)	Valeur de <i>p</i>
F_{0rel} (N.kg⁻¹)	-0,59 (-0,84 ; -0,18)	0,012	-0,89 (-0,96 ; -0,73)	< 0.001
F₀ (N)	-0,37 (-0,73 ; 0,12)	0,140	-0,59 (-0,84 ; -0,17)	0.013
V₀ (m.s⁻¹)	-0,32 (-0,70 ; 0,18)	0,207	-0,49 (-0,79 ; -0,03)	0.045
P_{maxrel} (W.kg⁻¹)	-0,62 (-0,85 ; -0,22)	0,008	-0,91 (-0,97 ; -0,78)	< 0.001
RF_{max} (%)	-0,58 (-0,84 ; -0,16)	0,014	-0,89 (-0,96 ; -0,74)	< 0.001
DRF (%)			0,82 (0,58 ; 0,94)	< 0.001
S_{FVrel} (N.m.s⁻¹.kg⁻¹)	0,47 (0,01 ; 0,79)	0,053	0,72 (0,38 ; 0,90)	0.001
S_{FV} (N.m.s⁻¹)	0,36 (-0,13 ; 0,72)	0,156	0,56 (0,14 ; 0,83)	0.017
V_{max} (m.s⁻¹)	-0,37 (-0,73 ; 0,12)	0,143	-0,56 (-0,83 ; -0,13)	0.018
Temps de passage 40 m (s)	0,82 (0,57 ; 0,94)	< 0,001		

r, corrélation de Pearson ; 95% CI, 95% d'intervalle de confiance.

3.2 Capacités musculaires et performances sur et hors glace

La hauteur maximale mesurée lors du SJ était de $27,8 \pm 4,5$ cm, alors que la performance en sprint course à pied sur 5 m était de $1,21 \pm 0,07$ s et $4,90 \pm 0,17$ s sur 30 m. Les résultats détaillés de la performance en sprint sur glace sont reportés dans le Tableau 18. F_{0rel} et P_{maxrel} produites lors du SJ étaient significativement supérieures comparés à la course à pied et au patinage ($p < 0,001$; *large d*), alors que V_0 était significativement supérieure en patinage ($p < 0,001$; *large d* ; Tableau 20 et Figure 31). D_{rf} était significativement supérieure en course à pied comparé au patinage ($p < 0,001$; *large d*). P_{maxrel} était la variable la plus significativement corrélée avec la performance mesurée dans les différentes tâches ($r = 0,92$ pour la hauteur de saut ; $r = -0,81$ pour la performance sur 30 m en course à pied ; et $r = -0,91$ pour la performance sur 40 m sur glace ; $p < 0,001$). La corrélation entre les variables biomécaniques calculées à partir des évaluations en SJ, en course à pied et en patinage était *très forte* pour P_{maxrel} ($r = 0,72$; $p < 0,01$) et les variables de performance [sprint en course à pied vs. sprint en patinage ; $r = 0,80$; $p < 0,001$; Figure 32]. L'ensemble des autres variables biomécaniques montrait des corrélations s'étalant de *triviales* pour S_{FVrel} et FV_{imb} ($r = -0,02$; $p > 0,84$) à *modérées* pour F_{0rel} entre le en course à pied et en patinage ($r = 0,31$; $p > 0,23$). La hauteur de saut ne montrait pas de corrélation significative avec la performance sur glace de 5 m ($r = -0,34$; $p = 0,18$) mais montrait une corrélation significative *très forte* avec la performance sur glace de 40 m ($r = -0,77$; $p < 0,001$).

Tableau 20. Comparaison entre les variables issues de la relation force-évaluée en course à pied et en saut vertical avec celles obtenues lors de l'évaluation du sprint en patinage.

	Tâche	Moyenne \pm SD	Valeur de p	d ; effet
F_{0rel} (N.kg ⁻¹)	Patinage	6,1 \pm 0,6		
	Course	7,3 \pm 0,5	< 0,001	-1,50 ; large
	Saut	29,4 \pm 3,1	< 0,001	-1,96 ; large
V_0 (m.s ⁻¹)	Patinage	8,49 \pm 0,18		
	Course	7,48 \pm 0,49	< 0,001	1,60 ; large
	Saut	2,78 \pm 0,39	< 0,001	1,96 ; large
P_{maxrel} (W.kg ⁻¹)	Patinage	12,8 \pm 1,4		
	Course	13,6 \pm 1,2	0,002	-0,65 ; modéré
	Saut	19,8 \pm 2,6	< 0,001	-1,71 ; large
S_{FVrel} (N.m.s ⁻¹ .kg ⁻¹)	Patinage	-0,72 \pm 0,07		
	Course	-0,98 \pm 0,10	< 0,001	1,68 ; large
	Saut	-11,01 \pm 2,78	< 0,001	1,85 ; large
D_{RF} (%)	Patinage	-6,8 \pm 0,6		
	Course	-9,4 \pm 0,9	< 0,001	1,59 ; large
FV_{imb} (%)	Saut	105,4 \pm 30,2	NA	NA

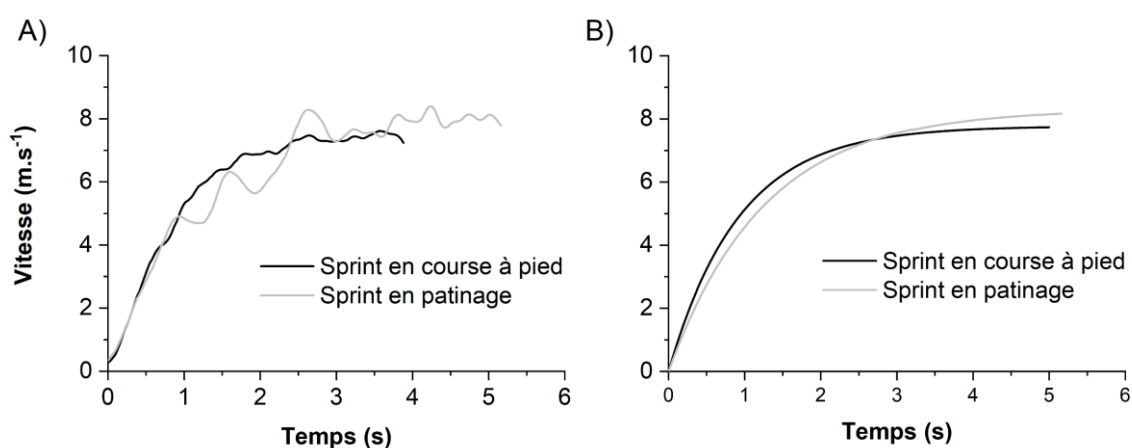


Figure 31. Vitesse horizontale du centre de masse mesurée lors d'un sprint en course à pied et en patinage.

Données brutes de la vitesse horizontale instantanée mesurée en fonction du temps à l'aide du radar (panel A) et modèles ajustés (panel B). Les données représentées ont été mesurées sur une même joueuse.

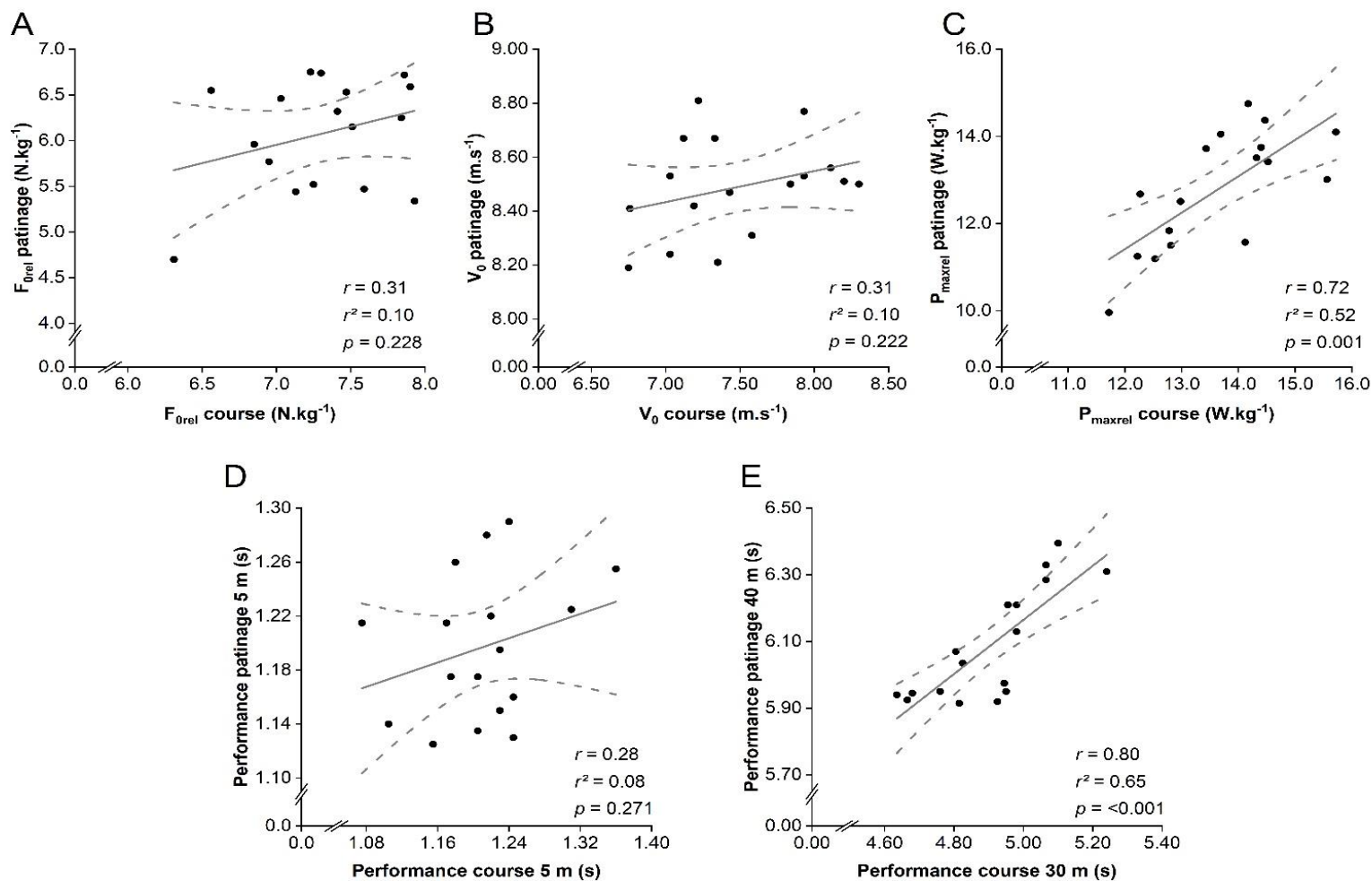


Figure 32. Analyse des coefficients de corrélation de Pearson entre les mêmes variables issues des profils force-vitesse obtenus en course à pied et en patinage.

Panel A : force relative maximale théorique (F_{0rel}) ; panel B vitesse maximale théorique (V_0) ; panel C : puissance relative maximale théorique (P_{maxrel}) ; panel D : temps sur 5 m en course à pied et en patinage ; panel E : temps sur 40 m en patinage et 30 m en course à pied. r , coefficient de corrélation de Pearson. Les lignes en pointillées représentent l'intervalle de confiance à 95%.

4. CONCLUSION

À l'exception de $P_{\max\text{rel}}$, il existe des relations modérées entre les variables maximales théoriques extraites de l'évaluation des profils FV en SJ, en sprint en course à pied et en patinage. Ces résultats suggèrent que chaque modalité d'évaluation renseigne sur des propriétés musculaires spécifiques qui ne sont pas pleinement reflétées les unes par les autres. En revanche, au regard de la spécificité du hockey sur glace, l'évaluation du profil FV lors d'un sprint sur glace doit être considéré comme prioritaire et être intégrée aux batteries de test permettant d'apprécier les capacités des joueur·euse·s de hockey sur glace. La détermination du profil FV individuel permettra par la suite au préparateur physique de mettre en place une planification de l'entraînement en lien avec les objectifs de développement de la composante de force ou de vitesse afin d'optimiser, respectivement, la performance en patinage sur la phase d'accélération ou la capacité à maintenir des hauts niveaux de force avec une augmentation de la vitesse.

ÉTUDE 6 : ÉVALUATION DES CONTRAINTES PHYSIOLOGIQUES ET BIOMÉCANIQUES IMPOSÉES PAR DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE JEUX RÉDUITS EN HOCKEY SUR GLACE

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, les méthodologies de l'entraînement ont évolué vers une approche dite plus « intégrée » de la préparation physique. Ainsi, comme dans beaucoup d'autres sports collectifs, les jeux réduits sont régulièrement utilisés par les entraîneurs (USA Hockey, 2019). Leur but est de générer une charge, un stress d'entraînement lors des tâches motrices reproduisant les contraintes physiques, technico-tactiques, psycho-cognitives (*i.e.*, prise de décision) et comportementales (*i.e.*, communication/intéraction) rencontrées lors des matchs (Hill-Haas et al., 2011). Plusieurs paramètres clés caractérisent les jeux réduits : la surface de jeu utilisée, le nombre de joueurs impliqués (avec ou sans joker, postes fixes ou non) ou les règles du jeu définies (hors-jeu, nombre de touches de balle autorisées, durée de possession, etc). En jouant sur ces différents paramètres, l'entraîneur peut alors influencer certains facteurs du jeu afin d'orienter des réponses spécifiques (Dobbin et al., 2021). Bien que de nombreuses études aient démontré l'intérêt des jeux réduits dans le développement des capacités physiques et des compétences technico-tactiques dans différents sports collectifs (Clemente et al., 2021; Delextrat et al., 2018; Dellal et al., 2012; Owen et al., 2012), il n'existe à ce jour qu'une seule étude portant sur l'intérêt des jeux réduits en hockey sur glace chez des joueurs adolescents (Lachaume et al., 2017). Cependant, cette étude n'a abordé que les contraintes physiologiques, omettant ainsi les contraintes biomécaniques associées. De plus, comme précédemment mentionné dans l'[étude #5](#), il est difficile, compte-tenu des spécificités liées aux genres, d'extrapoler les effets physiologiques obtenus auprès d'une population masculine vers une population féminine. Investiguer les réponses physiologiques et biomécaniques des joueuses de

hockey sur glace induites par différents types de jeux réduits permettrait d'une part de combler cette lacune et d'autre part, d'optimiser les conditions d'entraînements par la réduction des différences entraînement vs. matchs en termes de stress (Douglas et al., 2019b; Spiering et al., 2003).

À ce jour, les différentes études contemporaines s'étant attachées à évaluer les contraintes biomécaniques à l'entraînement ou en compétition proposent des variables différentes (*i.e.*, PL vs. OIL) (Allard et al., 2020; Douglas et al., 2019a; 2019b; 2020) (cf. [Introduction générale, section I.4.1](#)). Par conséquent, définir les variables qui permettent d'évaluer facilement et précisément les réelles contraintes biomécaniques spécifiques à l'activité hockey sur glace (*e.g.*, changements volants illimités) s'avérerait particulièrement utile pour optimiser le suivi des joueur·euse·s.

L'objectif de cette **étude #6** a consisté à quantifier les contraintes physiologiques et biomécaniques de différentes situations de jeux réduits (*i.e.*, surface et nombre de joueuses impliquées) et de comparer les différents modes de calculs de la charge externe mécanique utilisée dans la littérature scientifique spécifique au hockey sur glace.

2. MÉTHODES

Vingt jeunes joueuses de hockey sur glace, appartenant au pôle France de la Fédération Française de Hockey sur Glace (cf. [Méthodes expérimentales, section 1](#)), ont réalisé six sessions d'entraînement réparties les mardi, mercredi et jeudi à la même heure de la journée (± 1 h) sur deux semaines d'affilées durant la saison. Durant cette période, les entraînements du lundi et vendredi soirs consistaient en un travail technico-tactique à moyenne intensité. Le weekend séparant les deux semaines d'évaluation était considéré comme une période de repos. Afin de s'assurer d'un état de fatigue similaire entre les sessions d'évaluation, les joueuses ont rapporté leur ressenti à l'aide du questionnaire ROF (Micklewright et al., 2017) après chaque session. L'ensemble des mesures a été réalisé sur la même patinoire de dimension officielle olympique (*i.e.*, 60 m \times 30 m). L'ensemble des joueuses a effectué au moins quatre des six sessions

planifiées (75% des joueuses ont réalisés les six sessions, 10% et 15% ont réalisé respectivement cinq et quatre sessions).

Après un échauffement de 10-15 min ($12,42 \pm 2,17$ min) comprenant des exercices techniques de patinage, de maniement et de lancers à haute intensité et sans opposition dirigé par un entraîneur national, les joueuses ont enchaîné ensuite cinq jeux réduits (Figure 33) de façon aléatoire à chaque session : 1 vs. 1 en coin (1vs1), 2 vs. 2 tiers de glace (2vs2T), 3 vs. 3 tiers de glace (3vs3T), 2 vs. 2 demi-glace (2vs2D) et 3 vs. 3 demi-glace (3vs3D). Pour le 1vs1, la surface de jeu (~ 91 m²) était délimitée par la cage située sur le point d'engagement et les balustrades. Les 2vs2T et 3vs3T étaient joués dans l'intégralité de la zone offensive (~ 660 m²) alors que les 2vs2D et 3vs3D étaient joués sur la moitié de la patinoire divisée dans sa longueur (~ 929 m²). Dans tous les jeux réduits, dès qu'un palet sortait de la zone de jeu, un entraîneur remettait immédiatement un autre palet en jeu pour assurer la continuité de l'exercice. Chaque jeu réduit durait exactement 8 min suivi d'une récupération passive de 5 min avant de démarrer le jeu suivant. La durée des présences sur chaque jeu réduit était déterminée (30 s pour le 1vs1 et 40 s pour l'ensemble des autres situations) et les changements étaient effectués au sifflet de l'entraîneur. La durée de 40 s a été choisie afin de se rapprocher des durées de présences rencontrées en compétition (cf. [étude #1](#) et [Introduction générale, section I.2.6](#)). Lors d'une étude pilote, le 1vs1 sur 40 s avait démontré des contraintes physiques trop importantes sur les joueuses inhibant ainsi les aspects technico-tactiques du jeu. C'est pourquoi nous avons décidé *a posteriori* de diminuer la durée des présences pour cette situation. Les joueuses n'ont reçu aucune recommandation d'un point de vue tactique de la part des entraîneurs. À l'exception de

la suppression du hors-jeu, aucune règle particulière n'a été appliquée durant l'ensemble des situations.

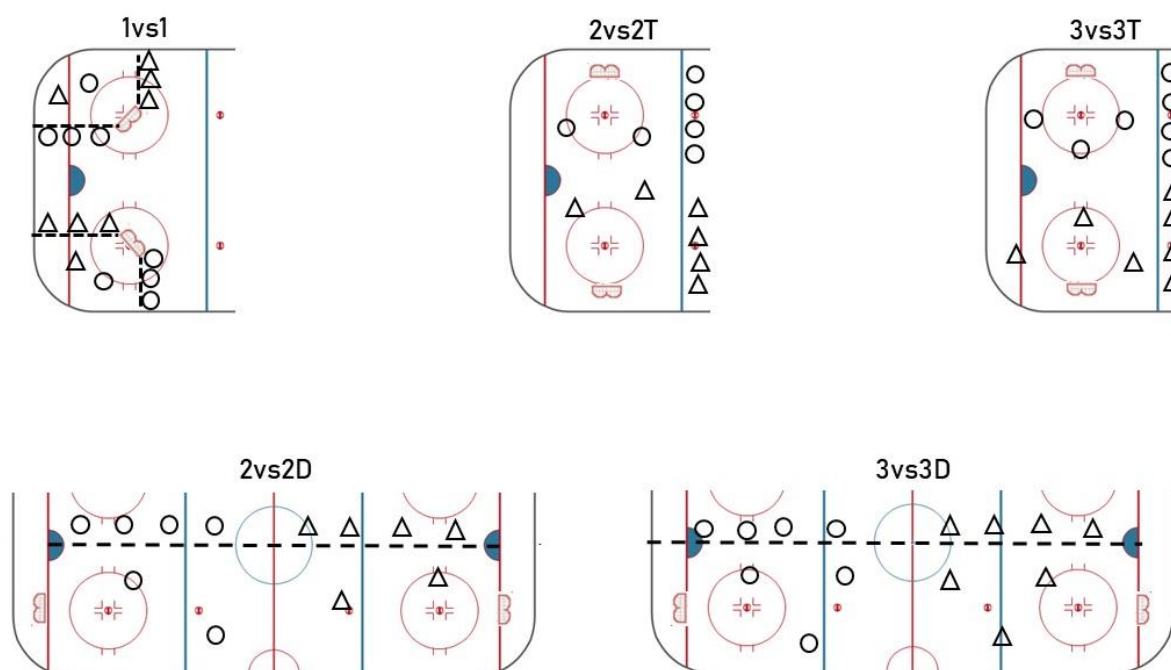


Figure 33. Schéma des différentes situations de jeux réduits étudiées.

1vs1, 1 vs. 1 en coin ; 2vs2T, 2 vs. 2 tiers de glace ; 3vs3T, 3 vs. 3 tiers de glace ; 2vs2D, 2 vs. 2 demi-glace ; 3vs3D, 3 vs. 3 demi-glace.

Durant l'intégralité des sessions d'entraînement, la fréquence cardiaque de chaque joueuse était enregistrée à une fréquence de 1000 Hz à l'aide de cardio-fréquencemètres Firstbeat™ (Firstbeat Sport, Jyväskylä, Finlande) et retransmise en temps réel sur le logiciel Firstbeat Sport (Firstbeat Sport, Jyväskylä, Finlande). *A posteriori*, les FC brutes, minimales (FC_{\min}) et maximales (FC_{\max}) ont été extraites pour analyse. Pour évaluer la charge interne de chaque joueuse en lien avec sa FC sur chaque jeu réduit, le training impulse (TRIMP) a été calculé selon l'équation de Banister :

$$TRIMP = \text{somme} (D \times FC_r \times 0.64e^y) \quad (11)$$

où D est la durée (min), FC_r est la FC de réserve, y est la FC de réserve multipliée par 1,92 pour les hommes ou 1,67 pour les femmes et exprimée en unité arbitraire (u.a.).

Le TRIMP a été normalisé (i) selon le temps total de chaque jeu réduit (*i.e.*, 8 min ; $TRIMP \cdot \text{min}^{-1}$) et (ii) selon le temps de jeu effectif par joueuse pour chaque jeu réduit (*i.e.*, $TRIMP \cdot \text{présence}^{-1}$)

¹⁾ afin de pouvoir comparer les jeux entre eux (différents temps de jeu entre le 1vs1 et les autres situations). Ulmer et al. (2019) rapportent que le TRIMP présente une fiabilité modérée pour l'évaluation de la charge interne lors d'un entraînement de jeunes joueurs de hockey sur glace utilisant des jeux réduits.

Un prélèvement sanguin capillaire (~20 µL) a été réalisé dans les 2 min suivant la fin de l'échauffement et après chaque jeu réduit pour mesure de la concentration sanguine en lactate ([La]) (Lactate Pro LT-1710, Arkray Inc., Kyoto, Japon). Compte-tenu des contraintes logistiques (trois appareils disponibles) et humaines (deux investigateurs à chaque séance), seulement sept joueuses ont été prélevées sur trois sessions consécutives au cours d'une même semaine. L'ordre de prélèvement des joueuses est resté le même pour chaque groupe tout au long de la semaine.

Les joueuses ont également rapporté après chaque jeu réduit leur perception de l'effort réalisé (*i.e.*, RPE) d'un point de vue musculaire (RPE_m), cardio-respiratoire (RPE_c) et technico-tactique (RPE_{tt}) à l'aide d'échelles CR-10 modifiées (Foster et al., 2001) (Figure 34). Ces évaluations spécifiques ont été préalablement validées (Borg et al., 2010) ou décrites (McLaren et al., 2017; Weston et al., 2015). Pour chaque item, l'investigateur interrogeait la joueuse avec une question type : « Selon l'échelle ci-dessus, comment évalues-tu la difficulté de l'exercice au niveau musculaire, la difficulté au niveau cardio-respiratoire et la difficulté au niveau technico-tactique ? »

EVALUATION	DIFFICULTE
0	Repos
1	Très très facile
2	Facile
3	Modérée
4	Assez difficile
5	Difficile
6	
7	Très difficile
8	
9	
10	Maximale

Figure 34. Échelle de perception de l'effort (RPE) utilisée pour évaluer les contraintes musculaires, cardio-respiratoires et technico-tactiques lors des jeux réduits. Adaptée de Foster et al. (2001).

Concernant les contraintes biomécaniques, l'ensemble des joueuses était équipées de centrales inertielles Vector S7 (cf. [Méthodes expérimentales, section 2](#)) pendant trois sessions consécutives au cours d'une même semaine (*i.e.*, 10 joueuses la première semaine et 10 autres joueuses la deuxième semaine). La console et le logiciel Openfield™ (Version 2.5.0, Catapult Sports, Melbourne, Australie) ont été utilisés pour l'enregistrement des données en temps réel et l'export des variables pour analyse *a posteriori*. D'autre part, des enregistrements vidéos à partir d'un MCS (PlaySight, Tel-Aviv, Israël) a été utilisé afin de synchroniser *a posteriori* les présences de chaque joueuse sur chaque jeu réduit et ainsi définir les contraintes biomécaniques effectives (PL_{eff}) (cf. [étude #1](#)). Les variables PL, OIL et PL_{eff} (cf. [Méthodes expérimentales, section 2](#)) ont été utilisées pour déterminer les contraintes biomécaniques sur chaque exercice (*i.e.*, échauffement et jeux réduits). Chaque variable a été normalisée (i) selon le temps total de chaque jeu réduit (*i.e.*, $PL \cdot \text{min}^{-1}$, $OIL \cdot \text{min}^{-1}$ et $PL_{\text{eff}} \cdot \text{min}^{-1}$, respectivement) et (ii) selon le temps

de jeu effectif pour chaque joueuse sur chaque jeu réduit (*i.e.*, PL.présence⁻¹, OIL.présence⁻¹ et PL_{eff}.présence⁻¹, respectivement). Enfin, un ratio d'efficacité a été proposé pour évaluer le rapport entre charge externe effective et le coût énergétique induit (PL_{eff}/TRIMP).

Afin d'évaluer les possibles associations entre les capacités physiques et les réponses aux différents jeux réduits, le temps nécessaire pour couvrir 40 m en patinage (n = 17, cf. [étude #2](#) et [#5](#)) et l'estimation de la $\dot{V}O_{2max}$ à l'aide d'un test incrémenté en course à pied [*i.e.*, 30-15 Intermittent Fitness Test (30-15 IFT) (Bruce et Moule, 2017; Buchheit, 2008), n = 20] évalués à la période de la saison la plus proche (< 1 mois) de l'étude ont été pris en compte.

Une analyse ANOVA à mesures répétées a été réalisée sur les valeurs de ROF afin de comparer l'état de fatigue des joueuses suite aux six sessions d'évaluation. Les comparaisons entre les deux variables de charge externe globale (*i.e.*, PL et OIL) et la charge externe effective par présence (*i.e.*, PL_{eff}) ont été effectuées à l'aide d'un t-test apparié et des évaluations de la concordance ont été réalisées indépendamment à l'aide de la méthode de Bland-Altman (cf. [Méthodes expérimentales, section 4](#)). De plus, *r* a été calculé pour chaque association afin d'évaluer la relation entre PL ou OIL en référence au PL_{eff}. Pour comparer l'ensemble des caractéristiques de charge mécanique et les réponses physiologiques associées pour chaque jeu réduit, une analyse de la variance à mesures répétées a été réalisée. Nous avons défini les caractéristiques de [La], TRIMP.présence⁻¹, PL_{eff}.présence⁻¹, RPE_m, RPE_c et RPE_t comme les plus représentatives de la charge mécanique et des réponses physiologiques et subjectives associées. Afin d'établir la relation entre la charge externe (*i.e.*, PL_{eff}) et la charge interne (*i.e.*, TRIMP), une régression linéaire a été utilisée pour (i) l'ensemble des joueuses instrumentées, (ii) trois joueuses considérées comme les meilleures patineuses et (iii) trois joueuses considérées comme les patineuses les plus faibles selon l'expertise technique identifiée par les entraîneurs nationaux. La même méthode a été répétée pour évaluer la relation entre le ratio d'efficacité (*i.e.*, PL_{eff}/TRIMP) et les qualités physiques évaluées (*i.e.*, vitesse en patinage avec le temps

nécessaire pour couvrir 40 m en patinage et $\dot{V}O_{2max}$ estimée avec le dernier palier validé au 30-15 IFT)

3. RÉSULTATS

Aucune différence significative n'a été observée entre les mesures de ROF prélevées à l'issue de chaque session ($F = 2,04$; $p = 0,08$) (Tableau 21).

Tableau 21. Évaluation de l'état de fatigue à l'aide du questionnaire « Rating of Fatigue » (ROF) à la fin de chaque session de jeux réduits.

Session	ROF (u.a.)
Session 1	5,6 ± 0,3
Session 2	5,4 ± 0,3
Session 3	6,1 ± 0,2
Session 4	5,7 ± 0,2
Session 5	6,1 ± 0,3
Session 6	6,3 ± 0,3

3.1 Comparaison entre les différentes variables de charge externe

La méthode de concordance de Bland-Altman (Figure 35) montrent des biais moyens relatifs par rapport à PL_{eff} inférieurs en utilisant la variable OIL ($-9,4 \pm 20,5\%$; $ES = -0,31$) comparé à la variable PL ($32,7 \pm 17,0\%$; $ES = 1,11$). Bien qu'il existe une différence significative ($p < 0,001$) entre les différentes variables, les résultats montrent une corrélation *très forte* ($> 0,94$) entre elles (Tableau 22).

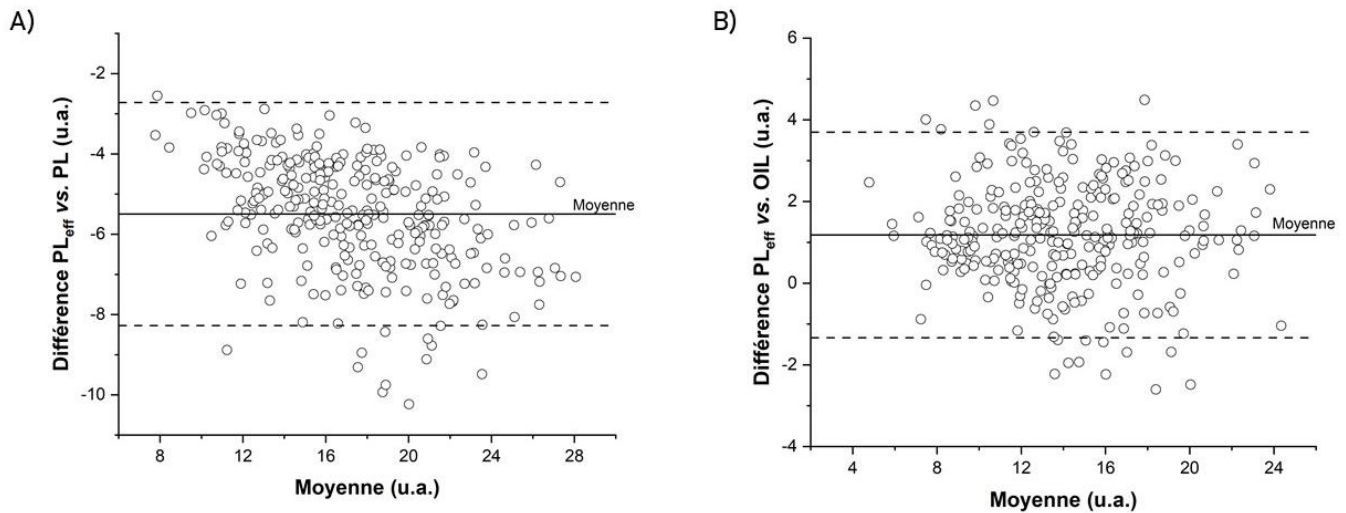


Figure 35. Graphiques de Bland-Altman représentant la concordance entre les différentes variables de charge externe mécanique.

Évaluation du player load (PL ; panel A) et du on-ice load (OIL ; panel B) en référence à la charge mécanique considérée uniquement sur le temps de jeu effectif (player load effectif, PL_{eff}). Les lignes en pointillées représentent les 95% des limites de concordance (moyenne $\pm 1,96 \times SD$ de la différence).

Tableau 22. Comparaison entre les différentes variables de charge externe mécanique.

Variable	Total (u.a.)	PL_{eff} (u.a.)	t-test apparié	Biais moyen ($\pm LoA$)	Biais moyen absolu ($\pm LoA$)	ES	r (95% CI)
Player load (PL)	20,04 \pm 4,40	14,54 \pm 3,79	< 0,001	-5,50 \pm 2,78	-32,70 \pm 17,00	-1,11	0,95 (0,92-0,97)
On-ice load (OIL)	13,36 \pm 3,85	14,54 \pm 3,79	< 0,001	1,18 \pm 2,52	9,35 \pm 20,48	0,31	0,94 (0,91-0,97)

95% des limites de concordance, $\pm LoA$; ES, taille d'effet ; Coefficient de corrélation de Pearson, r ; 95% CI, 95% d'intervalle de confiance.

3.2 Caractérisation des jeux réduits

Nous avons observé un effet significatif ($p \leq 0,002$) du type de jeux réduits sur l'ensemble des paramètres (*i.e.*, [La], TRIMP.présence⁻¹, PL_{eff} .présence⁻¹, RPE_m et RPE_c) excepté pour la RPE_t ($p = 0,20$; Figure 36). L'analyse *post-hoc* montre des valeurs significativement plus élevées de [La] pour le 2vs2D comparativement au 2vs2T (-2,02 ; $p = 0,009$; $d = -0,86$), au 3vs3D (-2,12 ; $p = 0,006$; $d = -0,90$) et au 3vs3T (-3,07 ; $p < 0,001$; $d = -1,27$). Bien qu'il y ait une tendance à des valeurs plus importantes pour le 2vs2D, aucune différence significative n'a

été observée avec le 1vs1 ($-1,62$; $d = -0,61$; $p = 0,057$). Concernant le TRIMP.présence⁻¹, l'analyse *post-hoc* montre des valeurs significativement ($p < 0,001$) plus élevées pour le 1vs1, 2vs2D et le 2vs2T en comparaison avec le 3vs3D ($-1,64$; $d = -1,17, -1,28$; $d = -0,92$ et $-1,22$; $d = -0,80$, respectivement) et au 3vs3T 3vs3T ($-1,84$; $d = -1,43, -1,48$; $d = -1,16$ et $-1,41$; $d = -1,00$, respectivement). Concernant le PL_{eff}.présence⁻¹, l'analyse *post-hoc* montre des valeurs significativement ($p < 0,001$) plus élevées pour le 1vs1 comparé au 2vs2D ($-1,35$; $d = -1,18$), 2vs2T ($-1,55$; $d = -1,31$), 3vs3D ($-2,37$; $d = -1,88$) et 3vs3T ($-2,34$; $d = -1,86$). Des valeurs significativement plus élevées ($p < 0,001$) sont également observées pour le 2vs2D et le 2vs2T comparé au 3vs3D ($-1,02$; $d = -0,96$ et $-0,83$; $d = -0,80$, respectivement) et au 3vs3T ($-0,99$; $d = -0,93$ et $-0,59$; $d = -0,71$, respectivement). Concernant la RPE_m, l'analyse *post-hoc* montre des valeurs significativement plus élevées pour le 3vs3D comparé au 2vs2T ($-0,83$; $p = 0,02$, $d = -0,52$) et au 3vs3T ($-0,83$; $p = 0,002$; $d = -0,66$) alors que le 2vs2D montrait des valeurs significativement plus élevées que le 3vs3T ($-0,64$; $p = 0,02$; $d = -0,53$). Enfin, pour la RPE_c, l'analyse *post-hoc* montre des valeurs significativement plus élevées pour le 3vs3D comparé au 2vs2T ($-0,94$; $p = 0,004$; $d = -0,73$) et au 3vs3T ($-0,87$; $p = 0,009$; $d = -0,68$)

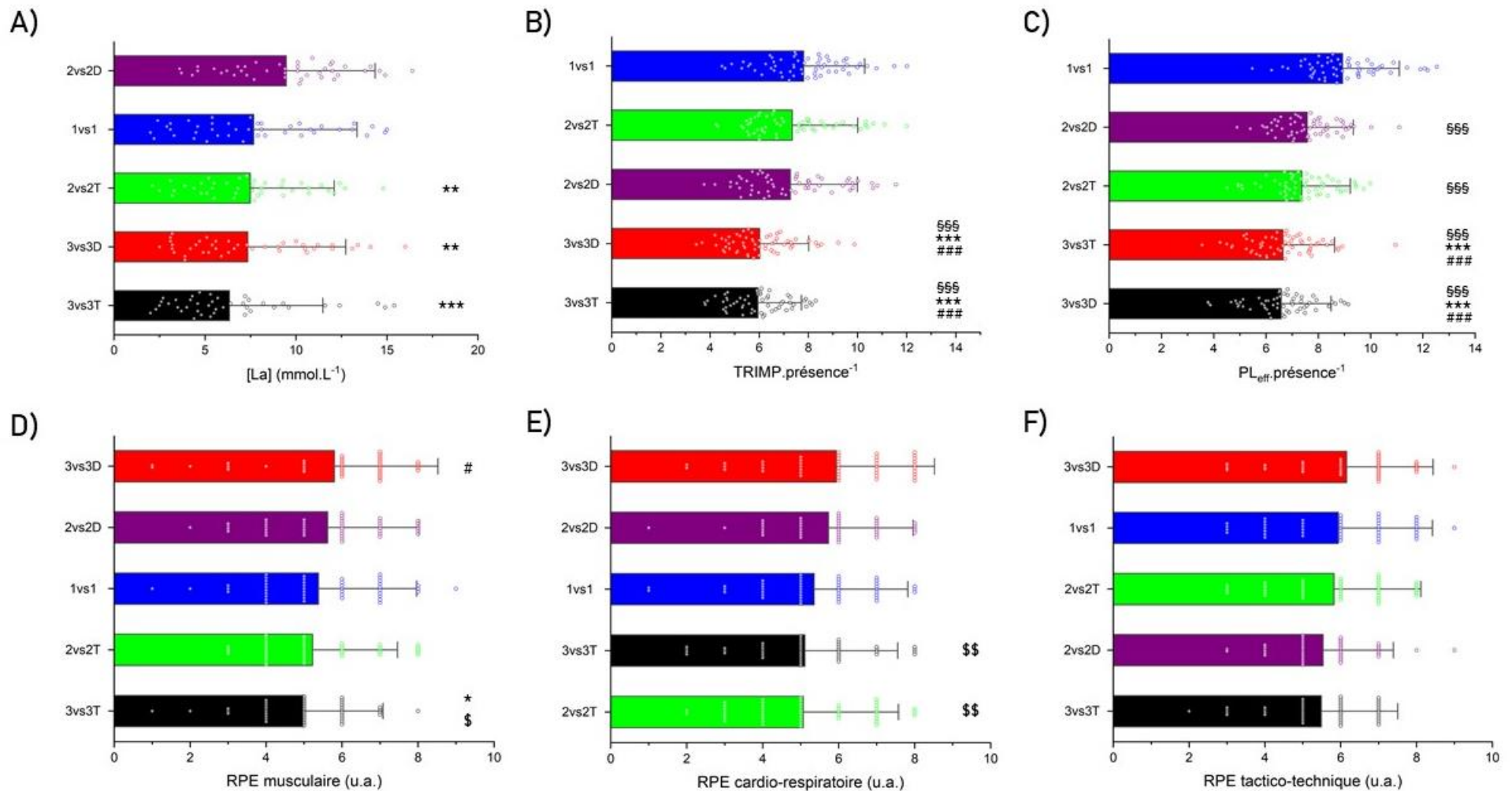


Figure 36. Caractéristiques physiologiques et biomécaniques de chaque jeu réduit.

Les points représentent les valeurs individuelles alors que les histogrammes représentent la moyenne par type de jeu réduit.

*, **, *** différence significative comparé au 2vs2D avec $p < 0,05$, $p < 0,01$ et $p < 0,001$, respectivement.

\$\$\$ différence significative comparé au 1vs1 avec $p < 0,001$.

et ### différence significative comparé au 2vs2T avec $p < 0,05$ et $p < 0,001$, respectivement.

\$ et \$\$ différence significative comparé à 3vs3D avec $p < 0,05$ et $p < 0,01$, respectivement.

3.3 Paramètres en lien avec l'efficacité technique (patinage)

La figure 37 présente les régressions linéaires du TRIMP en fonction du PL_{eff} en prenant en compte l'ensemble du groupe (partie grisée), les trois meilleures patineuses sur 40 m (partie en vert) et les trois moins bonnes patineuses sur 40 m (partie en rouge). La figure 38 montre les régressions linéaires entre l'efficacité technique (*i.e.*, $PL_{\text{eff}}/\text{TRIMP}$) et le pallier atteint lors du test 30-15 IFT (panel A) ou la performance sur 40 m en patinage (panel B).

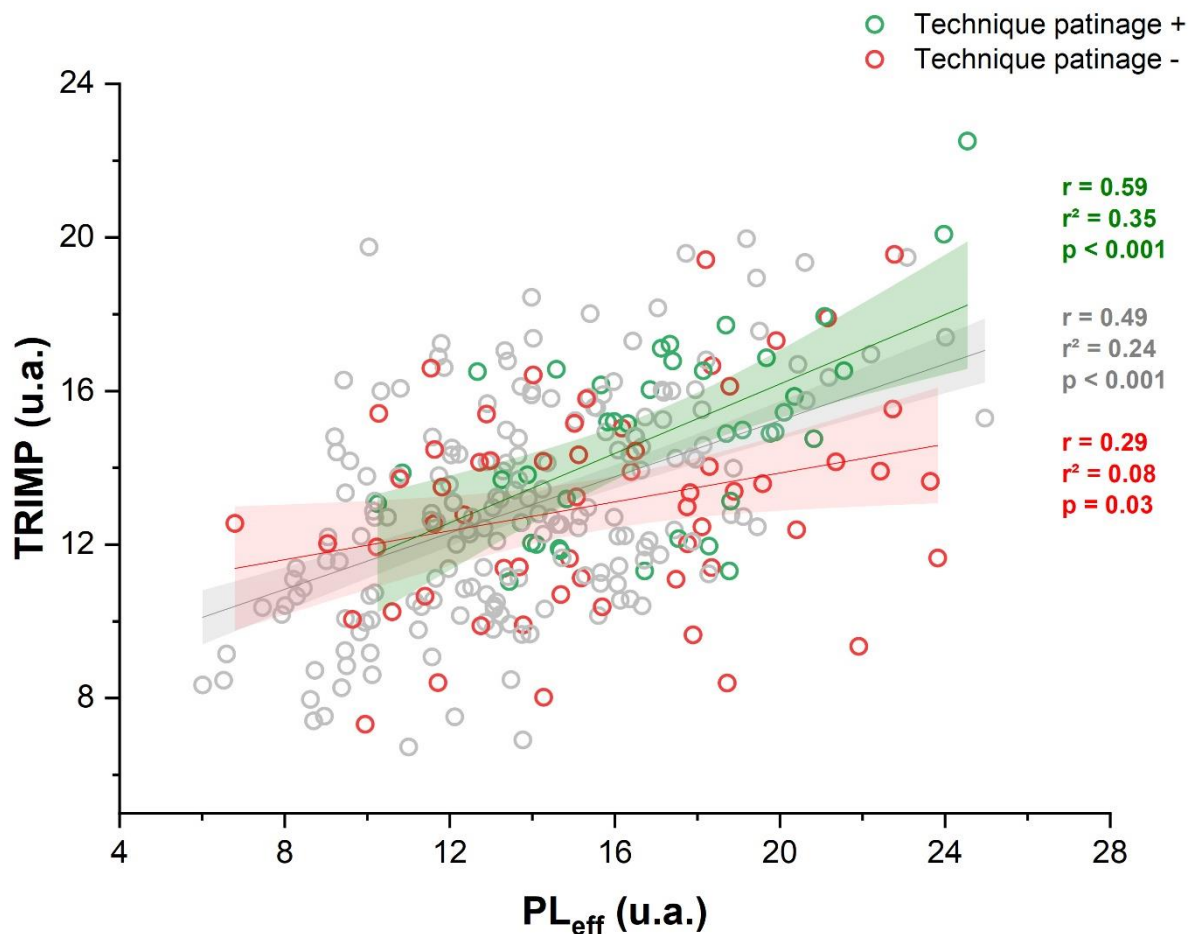


Figure 37. Régressions linéaires traduisant l'efficacité technique du patinage.

Relations entre le training impulse (charge interne, TRIMP) et la charge mécanique (player load effectif, PL_{eff}). La partie grisée représente la régression linéaire en prenant en compte l'ensemble des joueuses, la partie rouge représente la régression linéaire en prenant en compte les trois patineuses ayant le niveau de patinage le plus perfectible selon l'entraîneur national sur 40 m et la partie verte représente la régression linéaire en prenant en compte les trois meilleures patineuses sur 40 m.

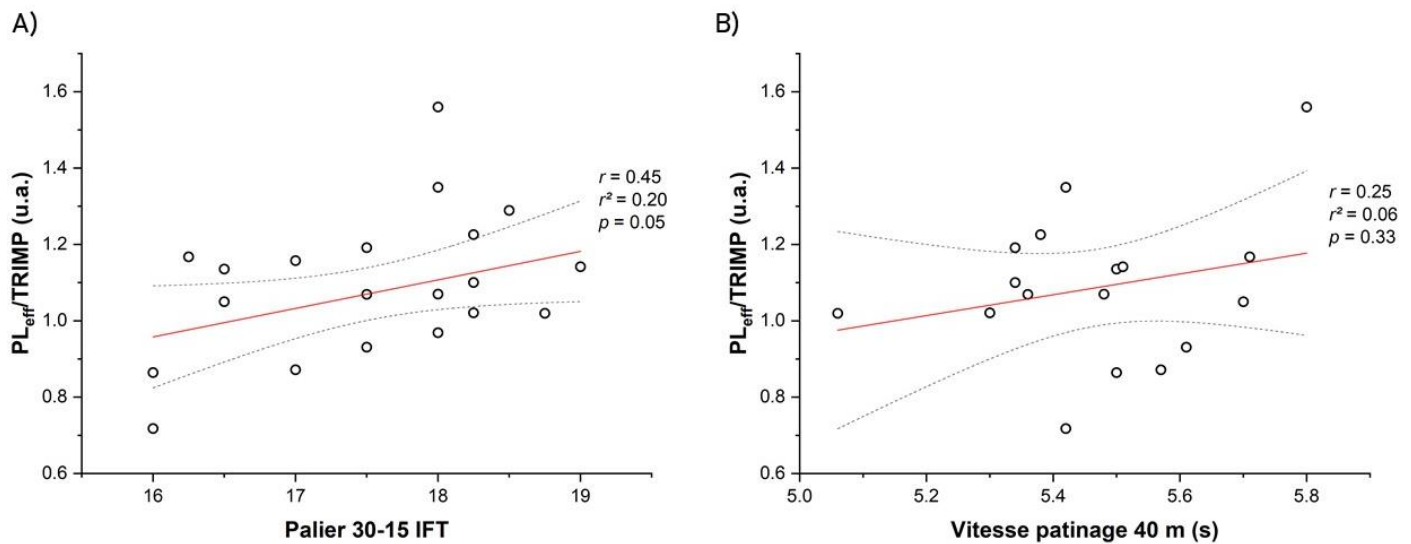


Figure 38. Analyse des coefficients de corrélation de Pearson entre les qualités physiques et l'efficacité technique du patinage.

Les qualités physiques ont été évaluées lors d'un test incrémenté 30-15 Intermittent Fitness Test [(30-15 IFT), panel A] et lors d'un test de vitesse sur glace sur 40 m (panel B). Le rapport d'efficacité technique du patinage est le rapport $PL_{eff}/TRIMP$.

4. CONCLUSION

Dans un premier temps, ces résultats ont montré que la variable utilisée pouvait induire une surestimation (*i.e.*, PL) ou une sous-estimation (*i.e.*, OIL) de la charge externe réelle rencontrée en hockey sur glace. Bien que l'utilisation de la variable OIL semble plus proche, un traitement des données en fonction des temps de jeu effectif (*i.e.*, PL_{eff}) semble plus fiable pour évaluer la charge externe réelle rencontrée en situation de jeu.

Il apparaît, qu'en fonction du type de jeu réduit proposé par les entraîneurs, les réponses physiologiques et biomécaniques peuvent différer. Les situations de 1vs1 ou 2vs2D semblent être les situations les plus contraignantes en termes de charge mécanique et de demande physiologique associée ([La] et TRIMP), à l'inverse du 3vs3T ou 3vs3D. Les situations en demi-longueur (*i.e.*, 2vs2D et 3vs3D) entraînent des perceptions à l'effort musculaire (RPE_m) et cardio-respiratoire (RPE_c) plus importantes que les situations en tiers de glace (*i.e.*, 2vs2T et 3vs3T). En revanche, il n'existe pas de différence significative au niveau de la perception de l'effort technico-tactique entre les différentes situations de jeux réduits. L'expertise et l'âge des

joueuses évaluées peut certainement expliquer les résultats en lien avec une moins bonne connaissance et maîtrise technique et tactique.

Enfin, ces résultats ont montré que les aptitudes techniques spécifiques (*i.e.*, patinage) ou certaines qualités physiques (*i.e.*, $\dot{V}O_{2max}$ extrapolée) pouvaient impacter positivement l'efficacité technique du patinage (Figure 38). Ainsi, pour une même charge externe mécanique, un meilleur patinage permet d'atteindre des niveaux d'intensité (*i.e.*, TRIMP) supérieurs (35 % de la variance expliquée). À l'inverse, une moins bonne technique de patinage limite l'atteinte d'intensités élevées lors des présences d'une part. D'autre part, il semblerait qu'une $\dot{V}O_{2max}$ plus élevée améliore l'efficacité même du patinage en optimisant la charge mécanique au profit d'une charge interne (*i.e.*, TRIMP) moindre. De futures recherches incluant des évaluations standardisées et simultanées de la charge mécanique et du coût réel physiologique en situation de patinage semblent nécessaires.

DISCUSSION GÉNÉRALE

En sports collectifs, les ressources technico-tactiques, physiques et mentales sont autant d'éléments à prendre en compte pour accéder à la performance. Toutefois, en hockey sur glace, l'intensité du jeu et le format (enchaînements des matchs) des compétitions internationales confèrent à la composante physique une place prépondérante. Dans ce contexte, il apparaît primordial de déterminer au mieux les variables reflétant la charge mécanique qui peuvent traduire les différentes contraintes spécifiques inhérentes au hockey sur glace. L'enjeu des travaux expérimentaux qui font l'objet de cette thèse visait à proposer des méthodes permettant de mieux appréhender le rôle des capacités musculaires, traduites par des variables mécaniques simples issues de mouvements spécifiques en situation écologique, dans la performance en hockey sur glace.

Dans un premier temps, il s'agissait de mieux apprécier les contraintes biomécaniques induites par des matchs internationaux. L'[étude #1](#) a donc permis d'identifier les variables de charge mécanique témoignant de l'intensité caractéristique du hockey sur glace. Bien que nos résultats aient confirmé une diminution des variables de charge (*i.e.*, max PL et max AR ou $PL \cdot \text{min}^{-1}$ et $AR \cdot \text{min}^{-1}$) en lien avec le développement d'une fatigue transitoire, ces variables restent stables malgré l'enchaînement rapproché des matchs (*i.e.*, quatre en cinq jours).

Les [études #2](#), [#3](#) et [#4](#) ont consisté à :

- Éprouver la faisabilité et la reproductibilité du profil FV lors d'un sprint en patinage chez des joueuses de hockey sur glace ;
- Identifier les méthodes pouvant être utilisées de manière fiable et pratique en fonction des différents objectifs envisagés : fiabilité et rapidité avec le radar, facilité d'utilisation mais estimation tronquée avec la vidéo haute-fréquence ou travail résistif avec un outil de résistance robotique.

L'[étude #5](#) a permis, à partir de l'évaluation des profils FV, d'identifier les variables biomécaniques – mesurées hors et sur glace – déterminantes dans la performance en patinage. Nous avons ainsi observé que les paramètres spécifiques de force et de puissance en patinage ou de puissance en course à pied étaient fortement corrélés avec la performance lors de la phase d'accélération (*i.e.*, temps au 5 m) et sur l'ensemble du sprint incluant l'atteinte et le maintien de la vitesse maximale (*i.e.*, temps au 40 m).

Enfin, l'[étude #6](#) a permis d'évaluer les réponses physiologiques, biomécaniques et technico-tactiques induites par différents formats (*i.e.*, nombre de joueuses impliquées ou surface de jeu) de jeux réduits. Les résultats ont montré que les petites surfaces de jeu (nécessitant de nombreux changements de direction ; 1vs1) ou à l'inverse les plus grandes surfaces utilisées par joueuse (*i.e.*, 2vs2) impactaient grandement la charge mécanique et la demande physiologique associée.

À partir de ces constats majeurs, trois axes principaux de discussion seront approfondis. Dans le premier axe, nous montrerons comment les résultats de cette thèse permettent de préciser les déterminants de la performance en hockey sur glace. Nous verrons également comment ces résultats participent à notre compréhension des exigences biomécaniques et physiologiques des activités intermittentes à haute intensité. Dans le deuxième axe, nous évoquerons les perspectives qui émergent à la lumière de nos résultats et nous détaillerons les problématiques et expérimentations que nous avons identifiées mais qui n'ont pu être mises en place. Enfin, nous évoquerons les limites méthodologiques de cette thèse.

1. LE HOCKEY SUR GLACE COMME TERRAIN DE COMPRÉHENSION DES ACTIVITÉS INTERMITTENTES À HAUTE INTENSITÉ ?

1.1 Une meilleure connaissance des contraintes biomécaniques et physiologiques en hockey sur glace féminin

Dans la revue de littérature (cf. [Introduction générale, section I](#)), nous avons vu que la majorité des études analysant l'activité à travers différentes méthodes (*i.e.*, caractéristiques de jeu, analyse notationnelle, analyse utilisant des mesures embarquées) concernaient le public masculin. L'ensemble des études s'accorde sur l'importance du suivi des variables de charge qui reflètent l'intensité du jeu, qui permettent de discriminer le niveau de pratique des joueuses (Douglas et al., 2020) et sont positivement corrélées à l'issue d'un match (*i.e.*, plus spécifiquement pour les attaquantes) (Douglas et al., 2019a). Il apparaît également que ces variables sont inférieures lors des entraînements en comparaison de celles rapportées lors des compétitions, ne permettant pas aux joueuses d'être préparées à ce haut niveau de contraintes (Douglas et al., 2019b; Spiering et al., 2003). Dans le cadre de l'[étude #1](#), nous avons redéfini les caractéristiques temporelles de match de hockey sur glace féminin dans un contexte de compétition internationale. Ces caractéristiques (*i.e.*, nombre de présences et temps de jeu effectif) sont semblables à celles rencontrées en hockey sur glace masculin (21 ± 5 présences de ~ 45 s ; Figure 3) et témoignent d'une évolution vers des temps de présence sur la glace plus courts (cf. [Introduction générale, section I.2.1](#)). Les résultats ont également permis de valider les résultats d'études antérieures montrant une diminution *modérée* de l'intensité (*i.e.*, max PL et max AR ou $\text{PL}\cdot\text{min}^{-1}$ et $\text{AR}\cdot\text{min}^{-1}$), évaluée à l'aide de centrales inertielles, entre 7% et 9% selon les variables entre la première période et la troisième période (Tableau 10). En revanche, contrairement à notre hypothèse et en lien avec d'autres résultats issus d'autres sports collectifs féminins (Birdsey et al., 2019; Clarke et al., 2015), les résultats ne montrent pas de variation significative de la charge externe avec l'enchaînement des matchs (*i.e.*, charge globale cumulée et charge reflétant l'intensité ; Figure 25). Ces résultats peuvent s'expliquer par le contexte

compétitif différent rencontré lors de ces matchs amicaux « standardisés », comparativement à une compétition officielle. D'une part, le stress relié à l'enjeu d'une compétition officielle ou la variation de la qualité de l'opposition sont autant d'éléments qui peuvent influencer les contraintes exercées sur les joueuses (Dalton-Barron et al., 2020). D'autre part, au regard de leur expérience et de leur niveau de compétition, les joueuses évaluées lors de cette étude étaient habituées à ce genre de calendrier dense rencontré lors des compétitions internationales. De plus, le hockey sur glace est un sport porté (*i.e.*, glisse de la lame de patin permise par la surface gelée) et les temps de jeu moyens sont relativement faibles comparés à d'autres sports collectifs ($18,4 \pm 5,4$ min ; cf. [Introduction générale, section I.2.1](#)). Ainsi, la moindre charge externe cumulée, associée aux impacts du sol moins importants, semble créer moins de dommages musculaires liés à la pratique que certains sports impliquant un volume de SSC conséquent comme la course à pied ou certains sports collectifs (Lignell et al., 2018). La potentielle réduction de la charge traumatique permettrait de limiter le temps nécessaire pour assurer une récupération musculaire suffisante suite à un match et favoriserait ainsi la répétition des matchs, comme constaté dans la majorité des championnats (cf. [Introduction générale, section I.4.2](#)). Bien qu'il n'y ait pas de différence significative d'un point de vue statistique, on note tout de même une *faible* diminution lors du dernier match (*i.e.*, match 4) en ce qui concerne la charge externe cumulée ($\sim 9\%$) et *modérée* en ce qui concernant le pic de charge ($\sim 6\%$) comparativement au premier match (Figure 25). De plus, le match 4 est le seul pour lequel l'ensemble des variables de charge a diminué entre la première et la troisième période. En considérant que cette diminution de la charge externe ne soit pas due à un changement d'opposition (*i.e.*, opposition standardisée), ce résultat pourrait être le reflet d'une fatigue résiduelle accumulée durant les matchs précédents pour les joueuses suivies, tout comme pour leurs adversaires.

Dans le cadre de l'[étude #6](#), nous avons quantifié les contraintes physiologiques et biomécaniques de situations spécifiques de jeux réduits. La surface de jeu utilisée par joueuse

impactait la charge mécanique (*i.e.*, PL_{eff}) et la demande physiologique associée, reflétée par [La] et TRIMP. Ainsi, les situations de jeu de 1vs1 et 2vs2D permettent la réalisation d'actions à haute intensité (Figure 35). À l'inverse, l'implication d'un plus grand nombre de joueuses tend à diminuer les contraintes physiques sans pour autant augmenter les contraintes technico-tactiques rapportées par les joueuses (Figure 36). Il n'est pas à exclure que le niveau de jeu et l'expérience des joueuses puissent expliquer au moins en partie ces résultats, en raison du niveau de connaissance et de compréhension de l'échelle d'évaluation. En comparaison avec les résultats rapportés lors de matchs dans la littérature scientifique (Douglas et al., 2019b; 2020) ou dans l'[étude #1](#), il apparaît que l'utilisation des jeux réduits entraîne des contraintes biomécaniques d'intensité (*i.e.*, $PL \cdot \text{min}^{-1}$) supérieures à celles rencontrées lors des matchs (de 8% à 38% selon les situations). La différence entre les contraintes biomécaniques observées lors des entraînements et celles observées en compétition par Douglas et al. (2019b) pourrait alors être liée au type d'entraînement proposé par les entraîneurs. En effet, bien que les jeux réduits prennent une part de plus en plus importante dans les entraînements en hockey sur glace, Douglas et al. (2019b) rapportent des entraînements incluant de longues explications des exercices par les entraîneurs et un objectif prioritaire de développement des aspects technico-tactiques. L'ensemble de ces éléments conduit alors une diminution globale de l'intensité sur l'entraînement proposé. Les auteurs suggèrent d'ailleurs une utilisation plus importante de jeux réduits afin de se rapprocher des contraintes rencontrées lors des matchs.

Dans l'[étude #2](#), nous avons estimé comme acceptable ($ICC \geq 0,75$ et $CV \leq 10\%$) la reproductibilité intra- et inter-session des différents paramètres de force, vitesse et puissance extraits du profil FV et modélisés à partir de V_h mesurée par radar. À l'inverse, bien que plus simple d'utilisation, la vidéo haute-fréquence sous-estime les paramètres de force et de puissance mesurées, en comparaison des résultats obtenus avec le radar (cf. [étude #3](#)). Ces résultats sont notamment liés à la difficulté de définir la première image au cours de laquelle a lieu la production de force permettant le déplacement horizontal. L'ajout d'un délai de temps

proposé par Stenroth et al. (2020) accentue la sous-estimation des paramètres de force et puissance. Enfin, l'évaluation du profil FV semble accessible avec le même niveau de reproductibilité, à partir de mesures de vitesse obtenues lors d'un sprint unique évalué au radar ou de sprints effectués à différents niveaux de résistance à l'aide d'un appareil robotique (cf. [étude #4](#)). Ainsi, l'ensemble de ces résultats permet d'envisager l'utilisation de chaque méthode en fonction de l'objectif d'évaluation du profil FV. L'utilisation du radar semble la plus adaptée d'un point de vue pratique compte-tenu de la reproductibilité obtenue (ICCs inter-session compris entre 0,76 et 0,88 pour les variables F_0 , F_{0rel} , V_0 , P_{max} , P_{maxrel} et V_{max} ; Tableau 14) et du temps nécessaire pour réaliser les évaluations. La méthode à l'aide de plusieurs sprints résistés semble en revanche plus pertinente sur une population experte (*i.e.*, expérience de sprints résistés sur glace et technique de patinage) et permet de préciser la charge à appliquer en fonction de l'objectif de développement défini (*i.e.*, force ou puissance), à l'image du principe du braquet en cyclisme appliqué au patinage, comme cela a été proposé en course à pied (Cross et al., 2017; Lahti et al., 2020b).

Dans l'[étude #5](#), nous nous sommes donc servis du profil FV évalué sur glace en plus de ceux évalués hors glace (*i.e.*, SJ et course à pied), afin d'obtenir une appréciation globale des capacités musculaires des joueuses de hockey sur glace de haut niveau. Cela a également permis d'explorer les liens entre les paramètres cinétiques et les capacités musculaires en patinage et en course à pied (Figure 32). Les résultats ont démontré de fortes corrélations entre P_{max} produite sur chaque tâche ($r = 0,72$) et entre les performances en sprint sur glace (patinage) et en course à pied ($r = 0,80$). En revanche, et en adéquation avec la littérature scientifique (Jiménez-Reyes et al., 2018), l'ensemble des autres variables testées ne montre pas de relations entre les tâches. Ces résultats confirment donc la notion de spécificité du rôle des capacités musculaires en fonction de l'orientation des forces majoritairement impliquées dans la réalisation du mouvement. Plus spécifiquement, et en adéquation avec les résultats rapportés lors du sprint en course à pied, nous avons montré, qu'associés à l'efficacité des premiers appuis

(*i.e.*, 5 m), les capacités de force et de puissance horizontales produites en patinage semblent être essentielles dans la performance en patinage (Tableau 19).

Ces résultats ont ainsi permis de mieux appréhender, à travers des évaluations simples et écologiques les capacités musculaires déterminantes en hockey sur glace. Bien que les règles et conditions de pratique en fassent une discipline unique (*i.e.*, surface et aire de jeu, règles du jeu), le hockey sur glace apparaît être un terrain expérimental pertinent pour améliorer notre compréhension des contraintes et des réponses induites par les exercices intermittents à haute intensité.

1.2 Un modèle à transposer sur les activités intermittentes à haute intensité ?

De nombreux sports collectifs requièrent la répétition d'actions à haute intensité entrecoupées de périodes de récupération de durée variable et souvent incomplètes (Buchheit et Laursen, 2013a). Austin et al. (2011) définissent la répétition d'efforts à haute intensité comme trois actions ou plus (accélération, sprints, contact, saut) avec moins de 21 s de récupération entre les efforts (*i.e.*, « Repeated High-Intensity Effort », RHIE). Bien qu'aucune étude n'ait investigué la composante RHIE en hockey sur glace, les actions à haute intensité spécifiques de l'activité au cours d'une présence (accélérations, freinages, débordements, duels pour le gain palet, serrages ou encore « mises en échec ») indiquent l'importance des activités RHIE à l'instar de ce qui a été rapporté dans d'autres sports collectifs de combat (*e.g.*, rugby à 7, rugby à XV) (Couderc et al., 2019; Gabbett, 2015). Couderc et al. (2019) rapportent d'ailleurs une durée moyenne proche de la durée d'une présence en hockey sur glace pour une période de RHIE en rugby à 7 masculin (39 ± 14 s). La répétition d'efforts maximaux lors d'une présence pourrait également s'apparenter aux efforts maximaux répétés de sprint en course à pied (*i.e.*, « repeated sprint ability », RSA) entraînant une diminution importante des stocks de PCr (~70%) (Dawson et al., 1997) associée à une augmentation importante de la lactatémie sanguine (glycolyse anaérobie) (Girard et al., 2011; Spencer et al., 2005). La resynthèse partielle (~60-

65%) de la PCr associée à une diminution de la glycolyse anaérobie en lien avec une augmentation de l'acidose musculaire, même légère en hockey sur glace (cf. [Introduction générale, section I.2.5](#)), entraîne une augmentation de l'utilisation du système aérobie (Dupont et al., 2010; Spencer et al., 2005). La sollicitation de cette filière permet alors aux joueurs de récupérer entre les présences et de limiter le développement de la fatigue tout au long d'un match (Peterson et al., 2015a; Stanula et al., 2014) (cf. [Introduction générale, section I.2.1](#)). Ainsi, de nombreuses études ont évalué la capacité aérobie des joueur·euse·s de hockey sur glace (Cox et al., 1995; Nightingale et al., 2013). Cependant, des études récentes ont démontré une faible corrélation entre $\dot{V}O_{2max}$ et la performance lors de RSA sur glace (Lowery et al., 2018) ou la capacité à discriminer le niveau de jeu et la performance en match (Ferland et al., 2021). Ces résultats confirment qu'un niveau minimal de $\dot{V}O_{2max}$ est nécessaire pour pouvoir pratiquer à haut-niveau (Ferland et al., 2021) mais qu'il ne semble pas être un facteur déterminant de la performance chez des athlètes élités (Bishop et al., 2003; Rampinini et al., 2009; Wadley et Le Rossignol, 1998). En revanche, et en accord avec les résultats de [l'étude #6](#), montrant une corrélation entre capacité aérobie et efficacité du patinage, Peterson et al. (2015a) rapportent une forte corrélation ($r > 0,6$) entre $\dot{V}O_{2max}$ estimée et la performance lors d'un RSA adapté en patinage chez des athlètes de niveaux inférieurs (*i.e.*, niveau universitaire). L'utilisation de jeux réduits, utilisant une grande surface de jeu par joueuse (*i.e.*, 2vs2D ou 2vs2T) ou à l'inverse une surface restreinte nécessitant de nombreux changements de direction (*i.e.*, 1vs1) (cf. [étude #6](#)), semblerait intéressante au regard de l'intensité évaluée à l'aide du TRIMP.présence⁻¹ et du PL_{eff}.présence⁻¹ afin d'améliorer les performances en RSA. En effet, des études menées en handball (Dello Iacono et al., 2016; Dello Iacono et al., 2015), basketball (Delextrat et al., 2018) ou football (Bujalance-Moreno et al., 2019; Owen et al., 2012) ont démontré que ce type d'entraînement était aussi efficace sur l'amélioration des performances en RSA qu'un travail d'intervalles à haute intensité (*i.e.*, « high-intensity interval training, HIIT) en course à pied. Il apparaît d'ailleurs préférable d'utiliser les situations de jeux réduits en période de compétition afin de couvrir l'ensemble des contraintes spécifiques (*i.e.*,

biomécaniques et technico-tactiques) à l'activité (Dello Iacono et al., 2015). À l'inverse, l'utilisation de HIIT ou de répétition de sprints (*i.e.*, « repeated sprint training ») en course à pied ou sur ergocycle semble pertinente (*i.e.*, contrainte de temps, logistique) afin de maintenir, voire développer (Bishop et al., 2011; Girard et al., 2011), les capacités physiologiques des joueur·euse·s ayant moins de temps de jeu (Delextrat et Martinez, 2014). Ce même type d'entraînement pourrait également mis en place sur des périodes courtes sans compétitions, comme des trêves internationales (Brocherie et al., 2020). Plus récemment, Brocherie et al. (2020) ont également montré l'intérêt d'un microcycle de 14 jours de HIIT [15 s d'effort à 90-110% de la vitesse maximale aérobie (VMA) alterné avec 15 s de récupération passive] associé à du travail de renforcement musculaire (endurance musculaire répétée) et du RSA (4 séries de 5-10-15-20-m en sprint en course à pied avec une récupération lors du retour en marchant et 5 min de récupération entre chaque série) dans l'amélioration significative de la capacité aérobie (+25,8% en distance totale parcourue) évaluée à l'aide du test Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level 2 et de la performance en répétition de sprint sur glace (-1,69% du temps total).

Outre la composante physiologique, ce type de travail à haute intensité (*i.e.*, HIIT), semble également jouer un rôle sur les propriétés des complexes neuromusculaire et musculo-squelettique. Kinnunen et al. (2019) ont par exemple montré qu'après un entraînement de deux semaines et demi de HIIT (6 sprints maximaux de 30 s sur une pente de 9,5% avec 4 min de récupération entre chaque sprint ; « sprint interval training », SIT) augmentait la force maximale isométrique des fléchisseurs plantaires. Cette augmentation de force était le résultat d'une augmentation de la conduction nerveuse supra-spinale induisant une augmentation du RFD associée à une réduction de la co-activation du muscle antagoniste (*i.e.*, *tibialis anterior*). Cependant, bien que les résultats de l'[étude #5](#) indiquent l'importance de la force sur la performance en patinage, Kinnunen et al. (2019) n'ont observé aucun transfert de cette augmentation de force maximale isométrique des fléchisseurs plantaires sur la performance en patinage (*i.e.*, temps nécessaire pour couvrir 11 m et 34 m). Ces résultats peuvent s'expliquer

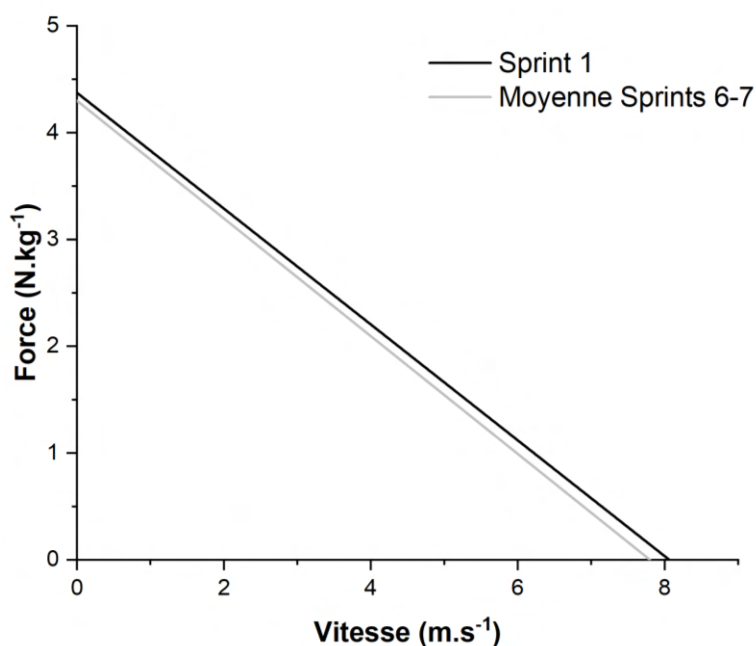
par (i) la durée du programme d'entraînement ou (ii) la problématique de transfert des capacités musculaires dans une tâche spécifique (cf. [Introduction générale, section III.1.3](#)). De plus, il est difficile de savoir si l'augmentation de la force maximale est due au programme de HIIT en lui-même ou si elle est le résultat d'un travail de force à vitesse élevée inhérent à la pente importante sur laquelle les joueuses ont effectué leurs sprints. Inversement, Naimo et al. (2015) ont montré un effet bénéfique d'un entraînement de HIIT (sprints de 10 s à 20 s séparés par 4 min, SIT) sur ergocycle sur la puissance produite lors d'un test de Wingate et sur la performance en patinage (sprint de 33 m sur glace). Leurs résultats corroborent les relations observées dans l'[étude #5](#) entre la puissance maximale développée lors d'une tâche hors glace et la performance en patinage (sprint sur glace). Les auteurs montrent également une augmentation du volume musculaire au niveau du *quadriceps*. Ces résultats sont à prendre en considération, étant donné l'importance des capacités de production de force de ce muscle dans la performance en patinage (Buckeridge et al., 2015) (cf. [Introduction générale, section II.1.2](#)). La répétition de sprints, nécessitant des niveaux de force à vitesse élevée, est reconnue pour sa capacité à augmenter la longueur des fibres musculaires (Kumagai et al., 2000) mais également d'augmenter la PCSA en favorisant le développement des fibres de type II (Brocherie et al., 2014; Ross et Leveritt, 2001). L'utilisation de ce type d'entraînement permettrait ainsi le développement de la vitesse (*i.e.*, V_{\max} et V_0) ou de la P_{\max} en course à pied qui ont montré des relations importantes avec la performance en patinage (cf. [Introduction générale, section II.1.3](#)).

Le hockey sur glace étant caractérisé par des actions intermittentes à haute intensité, l'ensemble de ces résultats suggèrent qu'un travail de répétition d'efforts à haute intensité réalisé majoritairement en situation écologique entraîne des adaptations spécifiques physiologiques et neuromusculaires permettant l'optimisation de la performance (Bishop et al., 2011; Buchheit et Laursen, 2013b).

2. DE NOUVELLES PERSPECTIVES D'ACCOMPAGNEMENT DE LA PERFORMANCE

Les résultats des **études #2 à #5**, montrent l'importance d'évaluer en condition écologique les capacités de force, vitesse et puissance des joueur·euse·s de hockey sur glace afin de mieux orienter et individualiser les entraînements à mettre en place par la suite. La problématique majeure de ces évaluations réside dans la logistique que cela requiert, associée au temps d'analyse conséquent des données recueillies. En effet, dans un contexte de plus en plus compétitif où les temps d'entraînements sont de plus en plus restreints (cf. [Introduction générale, section I.4.2](#)) et le nombre de joueur·euse·s par effectif de plus en plus conséquent, la planification de telles évaluations devient un réel défi bien que primordiale pour la mise en place d'entraînements individualisés. L'objectif serait donc, à l'aide des nouvelles technologies de type LPS, de mettre en place une évaluation simultanée de l'ensemble des joueur·euse·s lors de deux ou trois sprints réalisés pendant l'entraînement (Lacome, 2020). L'application de cette procédure permettrait alors de pouvoir évaluer plus fréquemment les profils FV dans des conditions écologiques et ainsi observer les modifications des variables inhérentes aux profils individuels en fonction des entraînements proposés (et vérifier si les objectifs ont été atteints), de la gestion de la fatigue ou de la saison (Jimenez-Reyes et al., 2020). Il serait d'ailleurs intéressant d'établir un suivi longitudinal de ces profils individuels au cours de la carrière du·de la joueur·euse. Une telle démarche offrirait la possibilité de définir les facteurs sensibles à l'âge et à l'expertise par exemple. Cela permettrait ainsi d'identifier des axes de développement prioritaires en fonction de l'expérience du·de la joueur·euse. Le hockey sur glace nécessitant la répétition d'actions à haute intensité, il serait dès lors intéressant d'évaluer l'évolution du profil FV au cours d'efforts répétés sur glace. Jiménez-Reyes et al. (2019a) ont par exemple montré que la fatigue induite par la répétition de sprints entraînait une diminution plus importante de V_0 comparativement à celle observée sur F_0 chez des joueurs de rugby à 7 élites. La mise en

place de ce type de protocole permettrait de déterminer l'effet de la fatigue induite par la répétition de sprints chez des joueur·euse·s de hockey sur glace en prenant en compte les spécificités liées aux conditions de pratique (*i.e.*, sport porté, moindre force de traction). En lien avec les résultats de Jiménez-Reyes et al. (2019a), une étude pilote sur une joueuse du pôle France féminin a montré une tendance à la diminution des paramètres de vitesse (*i.e.*, V_0) au fil de la répétition de sprints ($n = 7$) de 40 m sur glace (Figure 39).



*Figure 39. Exemple de l'évolution du profil force-vitesse d'une joueuse du pôle France féminin au cours de sept sprints de 40 m sur glace (patinage). Les sprints étaient entrecoupés de 25 s de récupération passive (*i.e.*, retour glissé à la ligne de départ).*

Une évaluation au plus près des contraintes de la discipline semble également pertinente. Comme précédemment mentionné, les situations de jeux réduits représentent une méthode d'entraînement intéressante au regard des contraintes globales (*i.e.*, physiologiques, biomécaniques ou technico-tactiques) qu'elles génèrent. D'un point de vu biomécanique, outre la quantification de la charge mécanique à l'aide de méthodes répondant aux contraintes techniques liées aux conditions de pratique (*e.g.*, navigation inertielle), il serait intéressant de mieux caractériser les contraintes de force (*i.e.*, accélération) et de vitesse induites par les différentes situations proposées et ainsi pouvoir les comparer aux contraintes rencontrées lors des matchs. L'utilisation du système LPS offre de nouvelles possibilités d'évaluation *in-situ* de ces contraintes. Ainsi, il est possible de construire sur l'ensemble d'un ou plusieurs entraînements et de façon individuelle ou collective un profil accélération-vitesse (*i.e.*, « acceleration-speed profile », AS) (Morin et al., 2020) permettant de caractériser les situations d'entraînement proposées (Figure 40).

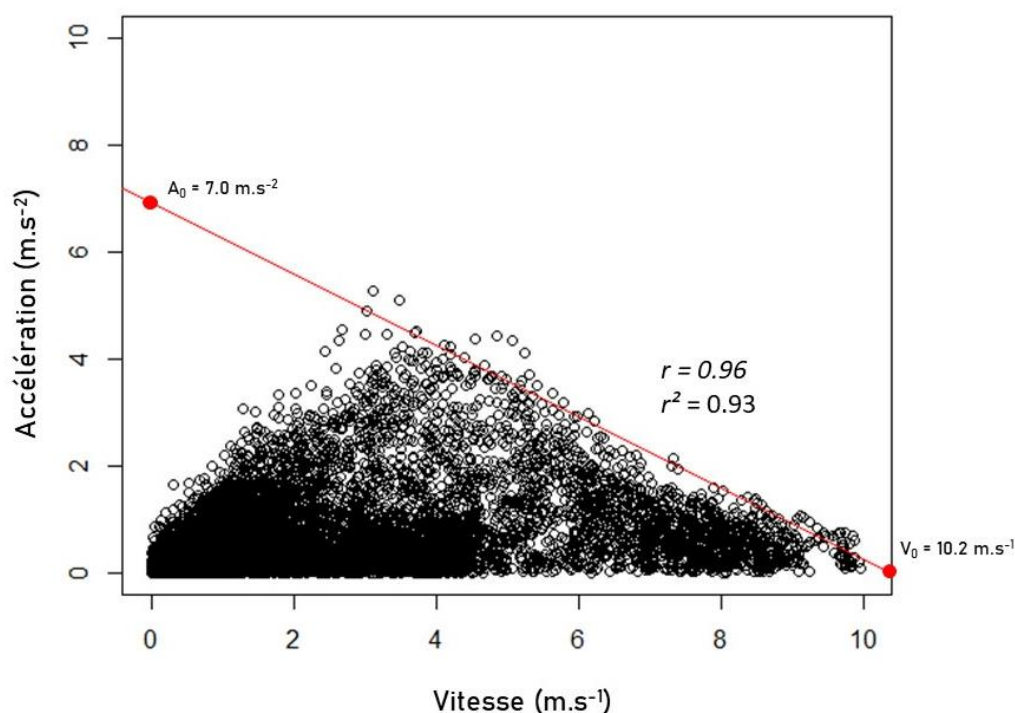


Figure 40. Exemple de modélisation d'un profil accélération-vitesse d'un joueur de hockey sur glace professionnel lors d'un entraînement. Données brutes issues d'un système de positionnement radar local (*i.e.*, LPS ; données non publiées).

Bien que proches et basés sur les mêmes théories conceptuelles, les profils AS et FV présentent des informations différentes et complémentaires non interchangeables (Morin et al., 2020; Morin, 2020).

Outre l'évaluation macroscopique des capacités musculaires réalisée à l'aide du profil FV, il semblerait intéressant de déterminer les relations entre ces caractéristiques macroscopiques et les propriétés neuromusculaires et musculo-squelettiques sous-jacentes qui conditionnent la performance motrice. Une étude des activations musculaires impliquées dans les différentes tâches permettrait ainsi d'identifier le rôle des coordinations musculaires dans l'efficacité mécanique des différentes phases du sprint sur glace (*i.e.*, accélération et maintien de la vitesse). Ainsi, cela permettrait de confirmer les résultats de Buckeridge et al. (2015) montrant le rôle de l'activation des *gastrocnemius* dans la phase d'accélération (relations avec F_0 et RF_{max} ?) et de l'activation du *quadriceps* et des muscles *gluteus* dans la phase de maintien de la vitesse (relations avec V_0 et Drf ?). Des études en course à pied ont par exemple démontré un lien entre l'activité musculaire et la force maximale des extenseurs de la hanche (*i.e.*, *gluteus maximus* et *biceps femoris*) avec la production de force horizontale notamment sur les premiers appuis (*i.e.*, phase d'accélération) (Edouard et al., 2018; Morin et al., 2015). Les auteurs rapportent une activation importante du *gluteus maximus* sur les premiers appuis certainement en lien avec la position penchée vers l'avant due à la course sur tapis. On pourrait dès lors penser qu'une activation spécifique ait également lieu durant la phase de vitesse en patinage qui nécessite une inclinaison du tronc vers l'avant. Parallèlement, et en lien avec nos résultats de l'[étude #5](#) montrant une relation entre P_{max} en SJ et P_{max} lors du sprint sur glace, Morales-Artacho et al. (2018) ont observé une relation importante entre la force maximale volontaire isométrique des extenseurs du genou et les variables F_0 et P_{max} déterminés en saut vertical. Outre la relation avec la force maximale volontaire isométrique, les auteurs rapportent également une relation entre l'architecture du muscle *vastus lateralis* (*i.e.*, PCSA et angle de pennation) et les mêmes variables (*i.e.*, F_0 et P_{max}) issues du profil FV en SJ. Là encore, ces résultats sont intéressants

car le muscle *vastus lateralis* est un des principaux muscles impliqués dans la phase de glisse en patinage (Buckeridge et al., 2015).

En hockey sur glace, des études avaient déjà rapporté des ratios d'efficacité technique du patinage (*i.e.*, dépense énergétique nécessaire au travail mécanique produit) en considérant le nombre de foulées en fonction de la vitesse (Allisse et al., 2019) ou la masse de l'athlète (Allisse et al., 2020). Les auteurs suggèrent l'intérêt de l'utilisation de ces ratios dans la prédiction de $\dot{V}O_{2max}$ en patinage. Dans notre dernière étude (*i.e.*, [étude #6](#)), nous avons proposé un ratio [*i.e.*, rapport entre la charge externe mécanique (*i.e.*, PL_{eff}) et la charge interne induite (*i.e.*, TRIMP)] pouvant potentiellement traduire cette efficacité en patinage. Un ratio similaire d'efficacité de l'entraînement a été développé par Delaney et al. (2018) permettant d'évaluer les variations de charge interne en relation avec les changements de charge externe. Les résultats montrent qu'avec une bonne technique de patinage selon l'expertise technique identifiée par les entraîneurs nationaux, les joueuses atteignent des contraintes de charge interne (*i.e.*, TRIMP) plus importantes pour une même charge externe (*i.e.*, PL_{eff}) (Figure 37). Il apparaît également que ce ratio est significativement corrélé à la $\dot{V}O_{2max}$ des joueuses mesurée en course à pied (*i.e.*, 30-15 IFT ; Figure 38). Cependant, les résultats sont à nuancer car $\dot{V}O_{2max}$ n'expliquerait que 20% de la variance du ratio d'efficacité. Il serait intéressant désormais d'investiguer lors d'une évaluation en condition écologique (*i.e.*, patinage, sur glace), les capacités cardio-respiratoires induites par des contraintes mécaniques standardisées. Deux types de tests pourraient ainsi être envisagés : (i) un test plus spécifique incluant des changements de direction (type 30-15 Intermittent Ice Test) (Besson et al., 2013; Buchheit et al., 2011; Ferland et al., 2021) et (ii) un test limitant les variations d'accélération de type tour de patinoire (Ferguson et al., 1969). Ce test triangulaire s'avère nécessaire afin d'évaluer l'impact des changements de direction sur les contraintes cardio-respiratoires. De plus, une évaluation standardisée de la charge mécanique aurait pour but d'évaluer la part de charge mécanique inhérente aux mouvements « parasites » effectués au niveau du haut du corps. En

effet, il apparaît que la position de la centrale inertielle (*i.e.*, entre les *scapulae*) (Figure 23) influence grandement l'évaluation de la charge mécanique évaluée au niveau du CM (Hollville et al., 2020; Nedergaard et al., 2017). Ainsi, en hockey sur glace, un balancement des bras plus important a tendance à accroître les mouvements au niveau du haut du corps lors du patinage (Hayward-Ellis et al., 2017) et augmenterait donc artificiellement la charge mesurée par accélérométrie.

Il serait par ailleurs intéressant de reproduire les [études #1](#), [#5](#) et [#6](#) sur une population masculine. Cela permettrait de comparer l'ensemble des réponses observées en fonction du genre, notamment la quantification de la charge mécanique induites par les contacts. Nous avons en effet supprimé l'ensemble des charges mécaniques > 2 u.a. en lien avec un contact (cf. [Méthodes expérimentales, section 2](#)). Cependant, en hockey sur glace masculin, les mises en échec (*i.e.*, collisions) étant autorisées, il est important de prendre en compte cette charge mécanique supplémentaire puisqu'elle représente une part importante de la charge mécanique globale. Ces phases de collisions, intégrées dans les périodes de RHIE (cf. [Discussion générale, section 1.2](#)), représentent également un potentiel traumatique substantiel avec une influence conséquente sur la récupération post-exercice. L'utilisation des centrales inertielles permet ainsi dans d'autres sports de contact comme le football Australien (Gastin et al., 2014), le rugby (Suarez-Arrones et al., 2014) ou le football Américain (Wellman et al., 2017) de déterminer les collisions et quantifier leur coût mécanique. Par exemple, en rugby, McLellan et Lovell (2012) ont établi une échelle d'intensité (de 5-6 g à > 10 g) afin de classer chaque collision. En hockey sur glace, Pilotti-Riley et al. (2019) ont également démontré, en comparant à des analyses vidéos, la validité des mesures d'accélération pour identifier les impacts liés aux mises en échec et déterminer leur intensité (entre 8 g et 10 g). Cependant, aucune étude ne s'est intéressée à l'évaluation ou l'intégration de cette charge mécanique lors d'un match. Or, il apparaît important de mesurer cette charge compte-tenu des conséquences qu'elle induit. En effet, des études ont montré qu'au-delà d'une certaine intensité (> 3 g), les impacts sont

fortement associés à des indicateurs indirects de dommages musculaires (*i.e.*, activité plasmatique de la créatine kinase) (Gastin et al., 2019) ou entraînent une diminution de la capacité de production de force (*i.e.*, RFD) et de puissance jusqu'à 48 h après un match (McLellan et Lovell, 2012).

3. THÈSE, PLANIFICATION ET ALÉAS (SITUATION SANITAIRE)

La crise sanitaire survenue au milieu de la thèse a entraîné la modification de certaines études et n'a pas permis la réalisation de l'ensemble des expérimentations planifiées.

Dans le prolongement de l'[étude #1](#), nous aurions souhaité évaluer les contraintes physiologiques et biomécaniques dans un contexte de compétitions internationales (*i.e.*, championnat du Monde) en investiguant l'effet de l'âge (*i.e.*, équipes sénior vs. U18) et l'effet du niveau de jeu (*i.e.*, niveau élite vs. 2^e division pour l'équipe sénior). En effet, dans l'[étude #1](#), nous avons défini la variabilité des données mécaniques dans un contexte standardisé ce qui permettait de déterminer si les facteurs contextuels de compétition (*i.e.*, adversaire, résultat, ordre des matchs) avaient un effet sur ces variables. De plus, nous aurions souhaité comparer les contraintes physiologiques et biomécaniques rencontrées lors de compétitions (*i.e.*, championnat du Monde U18) à celles rencontrées lors de la mise en place de certains jeux réduits identifiés dans l'[étude #6](#). La crise sanitaire au milieu de la thèse n'a pas permis de récolter les données sur les différentes compétitions identifiées en raison de leurs annulations.

Nous avons également planifié une étude chronique qui avait pour but d'évaluer les effets d'un entraînement de quatre semaines (deux sessions par semaine) sur les capacités musculaires et la performance sur glace (patinage). Suite à une évaluation de deux sprints de 40 m sur glace ([étude #2](#)), deux groupes d'entraînement auraient été constitués en fonction des caractéristiques individuelles du profil FV (Lahti et al., 2020b). L'objectif aurait été de tendre vers un profil horizontal dit « optimal » (celui-ci n'ayant pas été démontré à ce jour contrairement à S_{FVopt}

déterminé en SJ, cf. [étude #5](#)) visant à optimiser la performance sur le sprint de 40 m sur glace. D'un côté, le groupe présentant un déficit de F_0 aurait réalisé des exercices de patinage contre résistance (n = 10 sprints, repos entre chaque sprint de 3 min) soit à l'aide d'une résistance maîtrisée (e.g., robotique ; [étude #4](#)), soit à l'aide de résistances élastiques sur une distance allant de 10 m à 20 m. D'un autre côté, le groupe présentant un déficit de V_0 ou un Dr_f important aurait réalisé des exercices de sprints sans résistance sur 40 m (n = 10 sprints, repos entre chaque sprint de 3 min). Contrairement à ce qui a pu être développé précédemment concernant l'intérêt du HIIT (cf. [Discussion générale, section 1.2](#)), nous avons souhaité partir sur des entraînements SIT afin de favoriser la récupération en lien avec le travail de vitesse et de résistance afin que ceux-ci restent qualitatifs. Nous avons planifié une évaluation de deux sprints de 40 m sur glace directement à la fin du protocole afin d'évaluer les effets immédiats de ce type d'entraînement. Une évaluation était également programmée deux semaines après l'intervention afin d'évaluer les effets retardés de l'entraînement orienté (Jiménez-Reyes et al., 2019b).

4. CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES

Bien que les études en sciences du sport investiguent de plus en plus la population féminine, accéder à un nombre conséquent d'athlètes de haut niveau, et notamment en hockey sur glace en France, reste un vrai défi (Emmonds et al., 2019). Considérant le nombre limité de participantes sur les [études #1, #2, #3, #4 et #5](#) (n < 20), il convient de rester prudent quant à l'interprétation et la généralisation de l'ensemble des résultats. Par exemple, pour l'[étude #1](#), six joueuses ont été évaluées lors de quatre matchs. Or nous avons précisé en introduction (cf. [Introduction générale, section I.2.4](#)) que le poste ou la place de la joueuse dans l'alignement (i.e., deux premières lignes) peuvent influencer les caractéristiques du jeu. L'utilisation de centrales inertielles permet de répondre à l'ensemble des difficultés pratiques et méthodologiques concernant l'évaluation des contraintes mécaniques en hockey sur glace (cf.

[Introduction générale, section I.4.1](#)) (Stetter et al., 2016). Le nombre de centrales inertielles à notre disposition pour la thèse était de 10 unités. Les joueuses équipées n'ont également pas pu participer à l'ensemble des quatre matchs (*i.e.*, pour cause de blessure ou de choix de l'entraîneur national). Ces contraintes ont réduit le nombre de joueuses remplissant les critères d'inclusion de l'étude. Il aurait été intéressant de répliquer les mesures dans un contexte similaire, en équipant d'autres joueuses, afin d'augmenter la taille d'échantillon (voir [étude #6](#)). Dans l'[étude #2](#), nous avons évalué la reproductibilité des variables mécaniques extraites du profil FV établi auprès de 11 joueuses. Or, il est important de noter que le niveau de reproductibilité est particulièrement dépendant du nombre de participants (Hopkins, 2000). De plus, la littérature scientifique relative au profilage FV en patinage est à ce jour inexistante. Ainsi, il est difficile d'identifier, uniquement à partir des données de l'[étude #2](#), des paramètres (*i.e.*, niveau de jeu, choix et niveau d'affûtage des patins) qui pourraient influencer la reproductibilité de ce test.

L'ensemble des études n'a pas été réalisé sur la même population et il existe une différence d'expérience entre certains groupes. Par exemple, sur les [études #2](#) et [#6](#), les joueuses ayant participé sont issues du pôle France féminin qui est une structure de développement des jeunes joueuses (âge moyen $16,9 \pm 2,0$ ans *vs.* $23,2 \pm 3,4$ ans pour l'équipe de France féminine lors du dernier championnat du Monde). Les résultats de ces études sont donc uniquement valables pour cette population. Compte-tenu de leurs conditions d'entraînements précédant leur entrée au sein du pôle France féminin, leurs capacités physiques et technico-tactiques évoluent très rapidement au fil de leurs trois années de formation. Des études complémentaires sur une population plus expérimentée et donc aux capacités physiques plus « stables » restent donc nécessaires pour confirmer et améliorer l'ensemble de ces résultats. Enfin, bien que l'ensemble des participantes aient une expérience de pratique élevée (*i.e.*, > 10 ans), la moyenne d'âge sur l'ensemble des études reste jeune (*i.e.*, < 23 ans)

Dans notre [étude #5](#), nous avons proposé et étudié une évaluation des capacités musculaires lors d'un sprint en patinage. Cette tâche motrice haute intensité, bien que standardisée, facilement reproductible et discriminante du niveau de pratique (Buckeridge et al., 2015; Renaud et al., 2017), n'inclut pas une forte composante excentrique rencontrée lors des nombreuses actions de type freinage ou changements de direction. Il conviendrait dans ce cas d'évaluer l'application de la méthode développée par Harper et al. (2020) en course à pied. Cette méthode, basée sur les mêmes principes macroscopiques développés lors d'une phase d'accélération par Samozino et al. (2016), vise à déterminer, à l'aide de la V_h (évaluée à l'aide du radar) les caractéristiques cinétiques et cinématiques lors d'une phase de freinage suite à un sprint. Nous pourrions également envisager de mesurer à l'aide du radar un enchaînement d'actions de type accélération maximale, freinage et accélération maximale dans la direction opposée afin d'évaluer les capacités individuelles macroscopiques dans des mouvements de type SSC. Une analyse de la charge mécanique associée à la réalisation de cet enchaînement à l'aide des centrales inertielles permettrait une meilleure quantification de ces actions sensibles aux variations d'accélération.

L'application des connaissances issues des sciences du sport représente aujourd'hui un aspect à part entière de la construction du projet de performance en hockey sur glace. Ces travaux de thèse visent à mettre à disposition des acteurs de terrain (*i.e.*, entraîneurs, préparateurs physiques) des connaissances nouvelles pouvant participer au développement physique et à l'optimisation de la performance.

1. L'INDIVIDUALISATION EN PÉRIODE DE COMPÉTITION (COURT-TERME) : CLÉ DU MAINTIEN DE LA PERFORMANCE ?

L'objectif serait de pouvoir équiper et suivre l'ensemble des joueur·euse·s d'un collectif afin d'évaluer la charge mécanique effective (*i.e.*, par présence) lors des matchs. Cela permettrait dans un premier temps d'adopter des stratégies individuelles en termes de temps de jeu ou de récupération. En fonction de l'évolution des variables clés à suivre (*i.e.*, variables de charge reflétant l'intensité, cf. [étude #1](#)), des choix stratégiques technico-tactiques pourraient alors être pris entre, voire pendant les matchs. En effet, le développement des outils technologique permet désormais un suivi en temps réel de ces variables et ouvre ainsi la possibilité d'un retour immédiat aux entraîneurs (Connors et al., 2018). À long-terme, l'acquisition de telles données permettrait d'éclairer l'efficacité des stratégies adoptées en fonction des situations.

Dans un deuxième temps, un ajout de contraintes physiques pourrait être mis en place pour les joueur·euse·s ayant eu un faible temps de jeu afin de maintenir leur condition physique. En effet, nous avons vu en introduction (cf. [Introduction générale, section I.4.2](#)), qu'un calendrier dense réduit le nombre d'entraînements hors et sur glace durant la saison ce qui complique difficile la mise en place de méthodes d'entraînement permettant une augmentation ou au minimum un maintien des capacités musculaires (Cox et al., 1995). À la lumière de nos

résultats, il semblerait intéressant de proposer des séances courtes induisant peu de fatigue (~20 min), après les matchs afin de stimuler de façon spécifique les composantes physiologiques et musculaires déterminantes dans la performance en hockey sur glace. Ce type de séance, appelé « micro-dosing » (Blagrove et Hooper, 2021), pourrait être constitué soit d'un exercice nécessitant un haut niveau de force (3-6 séries de 3-6 répétitions, ~10 s par série, à 80-100% de la 1 RM) combiné à un mouvement explosif (3-6 mouvements) (Lagrange et al., 2020), soit un travail de répétition de sprints (3 séries de 6 × 30 m) ou de HIIT (2 à 3 séries de 6 à 8 répétitions d'une durée de 15 s à 90-110% de la VMA) (Brocherie et al., 2020). La mise en place de ce type de séance permet une stimulation de F_{max} , de RFD et des muscles avec une forte composante en fibres de type II particulièrement impliquées dans les tâches motrices exécutées en hockey sur glace (cf. [Introduction général, section III.1.1](#) et [Discussion générale, section I.2](#)).

2. LA GESTION DE LA PHASE PRÉ-COMPÉTITIVE (MOYEN-TERME) : OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE

À l'approche de la compétition ou durant la saison, la planification des entraînements intègre le principe de spécificité (cf. [Introduction générale, section III.1.3](#)) afin de préparer les joueur·euse·s. Ainsi, la mise en place de jeux réduits devra être priorisée en fonction de l'objectif de charge ou décharge de l'ensemble ou d'une partie des paramètres physiques (*i.e.*, physiologique ou musculaire) ou technico-tactiques. L'entraîneur peut alors mobiliser l'ensemble des variables qu'il peut ajuster lors d'une séance d'entraînement (surface de jeu, nombre de joueur·euse·s impliqués.es, règles spécifiques) afin de répondre à l'objectif défini (USA Hockey, 2019). Cette démarche pourrait être également adaptée aux réponses individuelles en fonction des profils identifiés (capacités physiques, efficacité du patinage) en lien avec le suivi des différents paramètres mesurés quotidiennement à partir de mesures

embarquées (*i.e.*, centrales inertielles et cardio-fréquence-mètre). Ce suivi individuel pourrait être d'autant plus pertinent à l'approche d'une compétition majeure internationale (*i.e.*, championnat du monde ou Jeux Olympiques) (Vachon et al., 2020).

3. LA GESTION À LONG-TERME : VERS UN DÉVELOPPEMENT INDIVIDUALISÉ ET ORIENTÉ DES CAPACITÉS MUSCULAIRES

La planification à long terme doit permettre un développement global des capacités musculaires de l'athlète. En hockey sur glace, la spécificité de la discipline nécessite d'adopter une action prioritaire sur le développement des capacités déterminantes de la performance en patinage. Un travail de type patinage résisté comme détaillé précédemment (cf. [Discussion, section III](#)) pourrait alors être entrepris en amont de la saison si le développement musculaire nécessite un volume d'entraînement important et à l'aide de quelques rappels (*i.e.*, « shock » microcycles) au cours de la saison. Concernant le développement des capacités musculaires en conditions hors glace, souvent prioritaire en période de hors-saison (Neeld, 2018), définir les profils FV en SJ et en course à pied permettrait la mise en place de programmes orientés (*i.e.*, développement de la force ou de la vitesse) et individualisés (Jiménez-Reyes et al., 2017; Jiménez-Reyes et al., 2019b; Lahti et al., 2020b) afin de développer P_{max} dans chacune des tâches. Par exemple, Thompson et al. (2020) ont récemment montré que la performance sur un sprint en course à pied résisté était significativement corrélée à la performance sur un sprint en patinage. En parallèle du travail de développement musculaire réalisé sur la glace, des évaluations régulières au fil de la saison (Jimenez-Reyes et al., 2020), mais également au fil des programmes, permettraient (i) d'identifier les effets en lien avec les contraintes d'une saison de hockey sur glace et (ii) de déterminer si les objectifs définis ont été atteints.

CONCLUSION

Ce travail de thèse a permis de renforcer la compréhension des facteurs biomécaniques en lien avec la performance en hockey sur glace, potentiellement transférables à d'autres activités intermittentes à haute intensité. Les résultats obtenus ont montré la stabilité des variables de charge mécanique reflétant l'intensité (*i.e.*, normalisée selon le temps de jeu effectif) lors d'un contexte standardisé de calendrier dense (enchaînement de matchs), bien qu'une diminution de ces mêmes variables soit observée au cours du match. Afin de mieux préparer les joueur·euse·s aux contraintes spécifiques de la discipline, une évaluation fiable et rapide des capacités musculaires à l'aide des profils force-vitesse en situation écologique (patinage sur glace) semble essentielle. La modélisation de ces profils à partir de mesures de vitesse effectuées à l'aide d'un radar lors de sprints à poids de corps ou de sprints effectués à différents niveaux de résistance semble accessible avec le même niveau de reproductibilité. À l'inverse, l'utilisation de la vidéo haute-fréquence semble sous-estimer la force et la puissance mesurées. L'évaluation globale des capacités musculaires lors de mouvements effectués hors glace (*i.e.*, squat jump et sprint en course à pied) et spécifiques au patinage à l'aide de profils force-vitesse démontre de fortes corrélations entre la puissance maximale produite sur chaque tâche hors glace et la performance en sprint sur glace. De manière plus spécifique, nous avons montré, qu'associées à l'efficacité des premiers appuis, la force et la puissance horizontales produites en patinage semblent être essentielles dans la performance en sprint. Enfin, nous avons montré que la surface de jeu utilisée par joueuse impactait la charge mécanique et la demande physiologique associée, reflétée par la lactatémie et la charge d'entraînement évaluée à partir de la mesure de la fréquence cardiaque. L'ensemble de ces résultats doit permettre de définir des objectifs et méthodes d'entraînement visant un développement orienté (force ou vitesse), individualisé, spécifique ou non, des différentes capacités musculaires.

Plusieurs perspectives de recherche émanent de ce travail. Dans un premier temps, une meilleure quantification biomécanique, des contraintes de forces (*i.e.*, accélération) et de vitesses induites par la mise en place d'une méthodologie de l'entraînement basée sur l'utilisation de jeux réduits. Dans un second temps, il serait intéressant de déterminer le rôle des propriétés neuromusculaires sous-jacentes des performances, mesurées à un niveau macroscopique, évaluées à l'aide du profil force-vitesse. Enfin, une évaluation concomitante des paramètres physiologiques et biomécaniques en patinage permettrait de définir les caractéristiques de l'efficacité en patinage et ainsi optimiser l'individualisation de l'entraînement (*i.e.*, travail technique de patinage, amélioration des paramètres physiologiques ou musculaires).

RÉFÉRENCES

- Abadie, B. R., & Wentworth, M. C.** (2000). Prediction of one repetition maximal strength from a 5-10 repetition submaximal strength test in college-aged females. *Journal of Exercise Physiology Online*, 3(3).
- Afonso, J., Bessa, C., Nikolaidis, P. T., Teoldo, I., & Clemente, F.** (2020). A systematic review of research on tactical periodization: Absence of empirical data, burden of proof, and benefit of doubt. *Human Movement*, 21(1).
- Akermark, C., Jacobs, I., Rasmusson, M., & Karlsson, J.** (1996). Diet and muscle glycogen concentration in relation to physical performance in Swedish elite ice hockey players. *International Journal of Sport Nutrition*, 6(3), 272-284. doi: 10.1123/ijnsn.6.3.272
- Alcaraz, P. E., Carlos-Vivas, J., Oponjuru, B. O., & Martínez-Rodríguez, A.** (2018). The effectiveness of resisted sled training (rst) for sprint performance: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(9), 2143-2165. doi: 10.1007/s40279-018-0947-8
- Alcaraz, P. E., Carlos-Vivas, J., Oponjuru, B. O., & Martínez-Rodríguez, A.** (2019). Authors' reply to cross et al.: Comment on: "The effectiveness of resisted sled training (rst) for sprint performance: A systematic review and meta-analysis". *Sports Medicine*, 49(2), 353-356. doi: 10.1007/s40279-018-01037-x
- Allard, P.** (2019). *Suivi longitudinal de la charge externe de joueurs professionnels de hockey sur glace au cours d'une saison*. Master, Montreal.
- Allard, P., Martinez, R., Deguire, S., & Tremblay, J.** (2020). In-season session training load relative to match load in professional ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/JSC.00000000000003490
- Allisse, M., Bui, H. T., Desjardins, P., Léger, L., Comtois, A. S., & Leone, M.** (2019). Assessment of on-ice oxygen cost of skating performance in elite youth ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.00000000000003324
- Allisse, M., Bui, H. T., Léger, L., Comtois, A.-S., & Leone, M.** (2020). Updating the skating multistage aerobic test and correction for $\dot{V}O_{2\max}$ prediction using a new skating economy index in elite youth ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(11), 3182-3189. doi: 10.1519/jsc.00000000000002602
- Andersen, J. L., Klitgaard, H., & Saltin, B.** (1994). Myosin heavy chain isoforms in single fibres from m. Vastus lateralis of sprinters: Influence of training. *Acta Physiologica Scandinavica*, 151(2), 135-142. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1994.tb09730.x>
- Atkinson, G., & Nevill, A. M.** (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26(4), 217-238. doi: 10.2165/00007256-199826040-00002
- Austin, D., Gabbett, T., & Jenkins, D.** (2011). Repeated high-intensity exercise in professional rugby union. *Journal of Sports Sciences*, 29(10), 1105-1112. doi: 10.1080/02640414.2011.582508
- Barr, M. J., Sheppard, J. M., Agar-Newman, D. J., & Newton, R. U.** (2014). Transfer effect of strength and power training to the sprinting kinematics of international rugby players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(9), 2585-2596. doi: 10.1519/jsc.0000000000000423
- Barris, S., & Button, C.** (2008). A review of vision-based motion analysis in sport. *Sports Medicine*, 38(12), 1025-1043. doi: 10.2165/00007256-200838120-00006

- 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.
- Bell, G. J., Game, A., Bouchard, J., Reid, C., Gervais, P., & Snyder Miller, G.** (2011). Near maximal heart rate responses during a varsity ice hockey game. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, *36*(S2).
- Ben Abdelkrim, N., Castagna, C., Jabri, I., Battikh, T., El Faza, S., & El Ati, J.** (2010). Activity profile and physiological requirements of junior elite basketball players in relation to aerobic-anaerobic fitness. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *24*(9), 2330-2342. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181e381c1
- Bendus, V.** (2017). *The effect of maximal strength training versus maximal strength and electrostimulation training on lower body strength, sprinting time, and skating times*. Master, Brock University.
- Besson, C., Buchheit, M., Praz, M., Deriaz, O., & Millet, G. P.** (2013). Cardiorespiratory responses to the 30-15 intermittent ice test. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *8*(2), 173-180.
- Best, C. H., & Partridge, R. C.** (1928). The equation of motion of a runner, exerting a maximal effort. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, containing papers of a biological character*, *103*(724), 218-225.
- Birdsey, L. P., Weston, M., Russell, M., Johnston, M., Cook, C. J., & Kilduff, L. P.** (2019). Neuromuscular, physiological and perceptual responses to an elite netball tournament. *Journal of Sports Sciences*, *37*(19), 2169-2174. doi: 10.1080/02640414.2019.1625613
- Bishop, D., Girard, O., & Mendez-Villanueva, A.** (2011). Repeated-sprint ability—part ii. *Sports Medicine*, *41*(9), 741-756.
- Bishop, D., Lawrence, S., & Spencer, M.** (2003). Predictors of repeated-sprint ability in elite female hockey players. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *6*(2), 199-209. doi: 10.1016/s1440-2440(03)80255-4
- Blagrove, R. C., & Hooper, D. R.** (2021). Strength training for enhancing performance and reducing injury risk. *The Science and Practice of Middle and Long Distance Running*, 207.
- Blanár, M., Broďáni, J., Kováčová, N., Czaková, M., & Šiška, L.** (2019). Limiting factors of skating performance in ice hockey. *Int. J. Physiol. Nutr. Phys. Educ*, *4*, 871-875.
- Blatherwick, A. H. J.** (1989). *A physiological profile of an elite ice hockey player: The importance of skating speed and acceleration*. Doctoral, University of Minnesota., Minneapolis. Retrieved from <https://books.google.fr/books?id=I5ailAAACAAJ>
- Blazevich, A. J., Cannavan, D., Horne, S., Coleman, D. R., & Aagaard, P.** (2009). Changes in muscle force-length properties affect the early rise of force in vivo. *Muscle & Nerve*, *39*(4), 512-520. doi: <https://doi.org/10.1002/mus.21259>
- Bobbert, M. F., Casius, L. R., & Kistemaker, D. A.** (2013). Humans make near-optimal adjustments of control to initial body configuration in vertical squat jumping. *Neuroscience*, *237*, 232-242.
- Bobbert, M. F., & van Ingen Schenau, G. J.** (1988). Coordination in vertical jumping. *Journal of Biomechanics*, *21*(3), 249-262.
- Boland, M., Delude, K., & Miele, E. M.** (2019). Relationship between physiological off-ice testing, on-ice skating, and game performance in division i female ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *33*(6), 1619-1628. doi: 10.1519/JSC.0000000000002265

- Bompa, T. O., & Haff, G.** (2009). *Periodization: Theory and methodology of training*. [5-th edition]. Champaign, IL, USA: Human Kinetics.
- Bond, C. W., Bennett, T. W., & Noonan, B. C.** (2018). Evaluation of skating top speed, acceleration, and multiple repeated sprint speed ice hockey performance tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(8), 2273-2283. doi: 10.1519/JSC.0000000000002644
- Booth, M. A., & Orr, R.** (2016). Effects of plyometric training on sports performance. *Strength & Conditioning Journal*, 38(1), 30-37. doi: 10.1519/ssc.0000000000000183
- Borg, E., Borg, G., Larsson, K., Letzter, M., & Sundblad, B.-M.** (2010). An index for breathlessness and leg fatigue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(4), 644-650. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.00985.x>
- Boucher, V. G., Parent, A.-A., St-Jean Miron, F., Leone, M., & Comtois, A. S.** (2020). Comparison between power off-ice test and performance on-ice anaerobic testing. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(12), 3498-3505. doi: 10.1519/jsc.0000000000002336
- Boyd, L. J., Ball, K., & Aughey, R. J.** (2011). The reliability of minimax accelerometers for measuring physical activity in Australian football. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 311-321. doi: 10.1123/ijsp.6.3.311
- Bracko, M., Fellingham, G., Hall, L., Fisher, A., & Cryer, W.** (1998a). Performance skating characteristics of professional ice hockey forwards. *Research in Sports Medicine*, 8(3), 251-263. doi: 10.1080/15438629809512531
- Bracko, M. R.** (2001). On-ice performance characteristics of elite and non-elite women's ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 42-47.
- Bracko, M. R.** (2004). Biomechanics powers ice hockey performance. *Biomechanics*, 2004, 47-53.
- Bracko, M. R., & Fellingham, G. W.** (1997). Prediction of ice skating performance with off-ice testing in youth hockey players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(5), 172.
- Bracko, M. R., & Fellingham, G. W.** (2001). Comparison of physical performance characteristics of female and male ice hockey players. *Pediatric Exercise Science*, 13(1), 26. doi: 10.1123/pes.13.1.26
- Bracko, M. R., Fellingham, G. W., Hall, L. T., Fisher, A. G., & Cryer, W.** (1998b). Performance skating characteristics of professional ice hockey forwards. *Research in Sports Medicine*, 8(3), 251-263. doi: 10.1080/15438629809512531
- Bracko, M. R., & George, J. D.** (2001). Prediction of ice skating performance with off-ice testing in women's ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 116-122.
- Brearley, S., & Bishop, C.** (2019). Transfer of training: How specific should we be? *Strength & Conditioning Journal*, 41(3), 97-109. doi: 10.1519/ssc.0000000000000450
- Bredt, S. d. G. T., Chagas, M. H., Peixoto, G. H., Menzel, H. J., & Andrade, A. G. P. d.** (2020). Understanding player load: Meanings and limitations. *Journal of human kinetics*, 71(1), 5-9. doi: <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0072>
- Brocherie, F., Babault, N., Cometti, G., Maffiuletti, N., & Chatard, J. C.** (2005). Electrostimulation training effects on the physical performance of ice hockey players. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(3), 455-460. doi: 10.1249/01.mss.0000155396.51293.9f
- Brocherie, F., Girard, O., Forchino, F., Al Haddad, H., Dos Santos, G. A., & Millet, G. P.** (2014). Relationships between anthropometric measures and athletic performance, with special reference to repeated-sprint ability, in the Qatar national soccer team. *Journal of Sports Sciences*, 32(13), 1243-1254.

- Brocherie, F., Girard, O., & Millet, G. P.** (2018). Updated analysis of changes in locomotor activities across periods in an international ice hockey game. *Biology of Sport*, 35(3), 261-267. doi: 10.5114/biolSport.2018.77826
- Brocherie, F., Perez, J., & Guilhem, G.** (2020). Effects of a 14-day high-intensity shock microcycle in high-level ice hockey players' fitness. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.0000000000003769
- Brooke, M. H., & Kaiser, K. K.** (1970). Muscle fiber types: How many and what kind? *Archives of Neurology*, 23(4), 369-379.
- Bruce, L. M., & Moule, S. J.** (2017). Validity of the 30-15 intermittent fitness test in subelite female athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(11), 3077-3082. doi: 10.1519/jsc.0000000000001775
- Buchheit, M.** (2008). The 30-15 intermittent fitness test: Accuracy for individualizing interval training of young intermittent sport players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(2), 365-374. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181635b2e
- Buchheit, M., Haddad, H. A., Simpson, B. M., Palazzi, D., Bourdon, P. C., Salvo, V. D., & Mendez-Villanueva, A.** (2014a). Monitoring accelerations with gps in football: Time to slow down? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(3), 442. doi: 10.1123/ijsp.2013-0187
- Buchheit, M., & Laursen, P. B.** (2013a). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part i: Cardiopulmonary emphasis. *Sports Medicine*, 43(5), 313-338.
- Buchheit, M., & Laursen, P. B.** (2013b). High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle. Part ii: Anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Medicine*, 43(10), 927-954. doi: 10.1007/s40279-013-0066-5
- Buchheit, M., Lefebvre, B., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S.** (2011). Reliability, usefulness, and validity of the 30-15 intermittent ice test in young elite ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(5), 1457-1464. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181d686b7
- Buchheit, M., Samozino, P., Glynn, J. A., Michael, B. S., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., & Morin, J.-B.** (2014b). Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 32(20), 1906-1913. doi: 10.1080/02640414.2014.965191
- Buchheit, M., & Simpson, B. M.** (2017). Player-tracking technology: Half-full or half-empty glass? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(s2), S2-S35. doi: 10.1123/ijsp.2016-0499
- 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), e0127324. doi: 10.1371/journal.pone.0127324
- Budarick, A. R., Shell, J. R., Robbins, S. M. K., Wu, T., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J.** (2018). Ice hockey skating sprints: Run to glide mechanics of high calibre male and female athletes. *Sports Biomechanics*, 1-17. doi: 10.1080/14763141.2018.1503323
- Bujalance-Moreno, P., Latorre-Román, P., & García-Pinillos, F.** (2019). A systematic review on small-sided games in football players: Acute and chronic adaptations. *Journal of Sports Sciences*, 37(8), 921-949. doi: 10.1080/02640414.2018.1535821
- Burr, J. F., Jamnik, R. K., Baker, J., Macpherson, A., Gledhill, N., & McGuire, E. J.** (2008). Relationship of physical fitness test results and hockey playing potential in elite-level ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5), 1535-1543. doi: 10.1519/JSC.0b013e318181ac20

- Burr, J. F., Jamnik, V. K., Dogra, S., & Gledhill, N.** (2007). Evaluation of jump protocols to assess leg power and predict hockey playing potential. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(4), 1139-1145. doi: 10.1519/R-21496.1
- Carey, D. G., Drake, M. M., Pliego, G. J., & Raymond, R. L.** (2007). Do hockey players need aerobic fitness? Relation between vo2 max and fatigue during high-intensity intermittent ice skating. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 963.
- Case, M. J., Knudson, D. V., & Downey, D. L.** (2020). Barbell squat relative strength as an identifier for lower extremity injury in collegiate athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(5), 1249-1253. doi: 10.1519/jsc.0000000000003554
- Cavagna, G., Saibene, F., & Margaria, R.** (1965). Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *Journal of Applied Physiology*, 20(1), 157-158.
- Chambers, R., Gabbett, T. J., Cole, M. H., & Beard, A.** (2015). The use of wearable microsensors to quantify sport-specific movements. *Sports Medicine*, 45(7), 1065-1081. doi: 10.1007/s40279-015-0332-9
- Chang, R., Turcotte, R., & Pearsall, D.** (2009). Hip adductor muscle function in forward skating. *Sports Biomechanics*, 8(3), 212-222. doi: 10.1080/14763140903229534
- Clarke, A. C., Anson, J. M., & Pyne, D. B.** (2015). Neuromuscular fatigue and muscle damage after a women's rugby sevens tournament. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(6), 808-814. doi: 10.1123/ijsp.2014-0590
- Clarke, A. C., Ryan, S., Couvalias, G., Dascombe, B. J., Coutts, A. J., & Kempton, T.** (2018). Physical demands and technical performance in australian football league women's (aflw) competition match-play. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(7), 748-752. doi: 10.1016/j.jsams.2017.11.018
- Clemente, F. M., Afonso, J., & Sarmiento, H.** (2021). Small-sided games: An umbrella review of systematic reviews and meta-analyses. *PloS One*, 16(2), e0247067. doi: 10.1371/journal.pone.0247067
- Comtois, A. S., Savage, J., Briand, M., Whittom, F., McCrossim, J., Sercia, P., & Leone, M.** (2011). Repeat ice-skating sprints in relation to off-ice tests. Paper presented at the Medicine & Science in Sports & Exercise, 143.
- Connors, R. T., Whitehead, P. N., Shimizu, T. S., & Bailey, J. D.** (2018). Coaching and technology: Live team monitoring to improve training and safety. *Strategies*, 31(5), 15-20. doi: 10.1080/08924562.2018.1490230
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U.** (2010). Influence of strength on magnitude and mechanisms of adaptation to power training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(8), 1566-1581. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181cf818d
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U.** (2011). Developing maximal neuromuscular power: Part 1--biological basis of maximal power production. *Sports Medicine*, 41(1), 17-38. doi: 10.2165/11537690-000000000-00000
- Couderc, A., Gabbett, T. J., Piscione, J., Robineau, J., Peeters, A., Igarza, G., . . . Lacombe, M.** (2019). Repeated high-intensity effort activity in international male rugby sevens. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/JSC.0000000000002986
- Coutts, A. J., Quinn, J., Hocking, J., Castagna, C., & Rampinini, E.** (2010). Match running performance in elite australian rules football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 543-548. doi: 10.1016/j.jsams.2009.09.004

- Cox, M. H., Miles, D. S., Verde, T. J., & Rhodes, E. C.** (1995). Applied physiology of ice hockey. *Sports Medicine*, 19(3), 184-201.
- Crang, Z. L., Duthie, G., Cole, M. H., Weakley, J., Hewitt, A., & Johnston, R. D.** (2020). The validity and reliability of wearable microtechnology for intermittent team sports: A systematic review. *Sports Medicine*. doi: 10.1007/s40279-020-01399-1
- Cronin, J., & Sleivert, G.** (2005). Challenges in understanding the influence of maximal power training on improving athletic performance. *Sports Medicine*, 35(3), 213-234. doi: 10.2165/00007256-200535030-00003
- Cross, M. R., Brughelli, M., Brown, S. R., Samozino, P., Gill, N. D., Cronin, J. B., & Morin, J.-B.** (2015). Mechanical properties of sprinting in elite rugby union and rugby league. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(6), 695-702. doi: 10.1123/ijsp.2014-0151 10.1123/ijsp.2014-0151 10.1123/ijsp.2014-0151 10.1123/ijsp.2014-0151
- Cross, M. R., Brughelli, M., Samozino, P., & Morin, J. B.** (2017). Methods of power-force-velocity profiling during sprint running: A narrative review. *Sports Medicine*, 47(7), 1255-1269. doi: 10.1007/s40279-016-0653-3
- Cross, M. R., Lahti, J., Brown, S. R., Chedati, M., Jimenez-Reyes, P., Samozino, P., . . . Morin, J. B.** (2018a). Training at maximal power in resisted sprinting: Optimal load determination methodology and pilot results in team sport athletes. *PloS One*, 13(4), e0195477. doi: 10.1371/journal.pone.0195477
- Cross, M. R., Samozino, P., Brown, S. R., Lahti, J., Jimenez-Reyes, P., & Morin, J. B.** (2019). Comment on: "The effectiveness of resisted sled training (rst) for sprint performance: A systematic review and meta-analysis". *Sports Medicine*, 49(2), 349-351. doi: 10.1007/s40279-018-01038-w
- Cross, M. R., Samozino, P., Brown, S. R., & Morin, J. B.** (2018b). A comparison between the force-velocity relationships of unloaded and sled-resisted sprinting: Single vs. Multiple trial methods. *European Journal of Applied Physiology*, 118(3), 563-571. doi: 10.1007/s00421-017-3796-5
- Dæhlin, T. E., Haugen, O. C., Haugerud, S., Hollan, I., Raastad, T., & Rønnestad, B. R.** (2017). Improvement of ice hockey players' on-ice sprint with combined plyometric and strength training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7), 893-900. doi: 10.1123/ijsp.2016-0262
- Dalton-Barron, N., Whitehead, S., Roe, G., Cummins, C., Beggs, C., & Jones, B.** (2020). Time to embrace the complexity when analysing gps data? A systematic review of contextual factors on match running in rugby league. *Journal of Sports Sciences*, 38(10), 1161-1180. doi: 10.1080/02640414.2020.1745446
- Dawson, B., Goodman, C., Lawrence, S., Preen, D., Polglaze, T., Fitzsimons, M., & Fournier, P.** (1997). Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 7(4), 206-213. doi: 10.1111/j.1600-0838.1997.tb00141.x
- de Boer, R. W., Cabri, J., Vaes, W., Clarijs, J. P., Hollander, A. P., de Groot, G., & van Ingen Schenau, G. J.** (1987). Moments of force, power, and muscle coordination in speed-skating. *International Journal of Sports Medicine*, 8(06), 371-378.
- de Brito Fontana, H., & Herzog, W.** (2016). Vastus lateralis maximum force-generating potential occurs at optimal fascicle length regardless of activation level. *European Journal of Applied Physiology*, 116(6), 1267-1277.
- de Koning, J. J., de Groot, G., & van Ingen Schenau, G. J.** (1991). Coordination of leg muscles during speed skating. *Journal of Biomechanics*, 24(2), 137-146.

- 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*, 27(12), 1703-1708.
- Decroix, L., De Pauw, K., Foster, C., & Meeusen, R.** (2016). Guidelines to classify female subject groups in sport-science research. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(2), 204-213. doi: 10.1123/ijsp.2015-0153
- Delaney, J. A., Duthie, G. M., Thornton, H. R., & Pyne, D. B.** (2018). Quantifying the relationship between internal and external work in team sports: Development of a novel training efficiency index. *Science and Medicine in Football*, 2(2), 149-156. doi: 10.1080/24733938.2018.1432885
- Delextrat, A., Badiella, A., Saavedra, V., Matthew, D., Schelling, X., & Torres-Ronda, L.** (2015). Match activity demands of elite spanish female basketball players by playing position. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 15(2), 687-703.
- Delextrat, A., Gruet, M., & Bieuzen, F.** (2018). Effects of small-sided games and high-intensity interval training on aerobic and repeated sprint performance and peripheral muscle oxygenation changes in elite junior basketball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(7), 1882-1891. doi: 10.1519/jsc.0000000000002570
- Delextrat, A., & Martinez, A.** (2014). Small-sided game training improves aerobic capacity and technical skills in basketball players. *International Journal of Sports Medicine*, 35(5), 385-391. doi: 10.1055/s-0033-1349107
- Delisle-Houde, P., Chiarlitti, N. A., Reid, R. E., & Andersen, R. E.** (2018). Relationship between physiologic tests, body composition changes, and on-ice playing time in canadian collegiate hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(5), 1297-1302.
- Delisle-Houde, P., Chiarlitti, N. A., Reid, R. E. R., & Andersen, R. E.** (2019a). Predicting on-ice skating using laboratory- and field-based assessments in collegiate ice hockey players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(9), 1-21. doi: 10.1123/ijsp.2018-0708
- Delisle-Houde, P., Reid, R. E. R., Insogna, J. A., Chiarlitti, N. A., & Andersen, R. E.** (2019b). Seasonal changes in physiological responses and body composition during a competitive season in male and female elite collegiate ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(8), 2162-2169. doi: 10.1519/JSC.0000000000002338
- Dellal, A., Varliette, C., Owen, A., Chirico, E. N., & Pialoux, V.** (2012). Small-sided games versus interval training in amateur soccer players: Effects on the aerobic capacity and the ability to perform intermittent exercises with changes of direction. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(10), 2712-2720. doi: 10.1519/JSC.0b013e31824294c4
- Dello Iacono, A., Ardigo, L. P., Meckel, Y., & Padulo, J.** (2016). Effect of small-sided games and repeated shuffle sprint training on physical performance in elite handball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(3), 830-840. doi: 10.1519/jsc.0000000000001139
- Dello Iacono, A., Eliakim, A., & Meckel, Y.** (2015). Improving fitness of elite handball players: Small-sided games vs. High-intensity intermittent training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(3), 835-843. doi: 10.1519/jsc.0000000000000686
- Devismes, M., Aeles, J., Philips, J., & Vanwanseele, B.** (2019). Sprint force-velocity profiles in soccer players: Impact of sex and playing level. *Sports Biomechanics*, 1-11. doi: 10.1080/14763141.2019.1618900
- Dewan, C., Pearsall, D., & Turcotte, R.** (2004). *A myoelectric comparison of treadmill and ice skating*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive

- di Prampero, P. E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J. B., Belli, A., & Antonutto, G.** (2005). Sprint running: A new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, *208*(14), 2809-2816. doi: 10.1242/jeb.01700
- Diakoumis, K., & Bracko, M.** (1998). Prediction of skating performance with off-ice testing in deaf ice hockey players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *30*(5), 272.
- Dillman, C. J., Stockholm, A. J., & Greer, N.** (1984). *Movement of ice hockey players*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive
- Disselhorst-Klug, C., Schmitz-Rode, T., & Rau, G.** (2009). Surface electromyography and muscle force: Limits in semg-force relationship and new approaches for applications. *Clinical Biomechanics*, *24*(3), 225-235.
- Dobbin, N., Atherton, A., & Hill, C.** (2021). Influence of game design, physical demands, and skill involvement on the subjective task load associated with various small-sided games among elite junior rugby league players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1-9. doi: 10.1123/ijsp.2020-0257
- Doeven, S. H., Brink, M. S., Kosse, S. J., & Lemmink, K.** (2018). Postmatch recovery of physical performance and biochemical markers in team ball sports: A systematic review. *BMJ Open Sport Exerc Med*, *4*(1), e000264. doi: 10.1136/bmjsem-2017-000264
- Dohoney, P., Chromiak, J. A., Lemire, D., Abadie, B. R., & Kovacs, C.** (2002). Prediction of one repetition maximum (1-rm) strength from a 4-6 rm and a 7-10 rm submaximal strength test in healthy young adult males. *J Exerc Physiol*, *5*(3), 54-59.
- Douglas, A.** (2015). *The role fitness testing plays in team selection of elite female ice hockey players*. Master, York University.
- Douglas, A., Johnston, K., Baker, J., Rotondi, M. A., Jamnik, V. K., & Macpherson, A. K.** (2019a). On-ice measures of external load in relation to match outcome in elite female ice hockey. *Sports*, *7*(7), 173. doi: 10.3390/sports7070173
- Douglas, A., & Kennedy, C.** (2020). Tracking in-match movement demands using local positioning system in world-class men's ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *34*(3), 639-646. doi: 10.1519/JSC.00000000000003414
- Douglas, A., Rotondi, M. A., Baker, J., Jamnik, V. K., & Macpherson, A. K.** (2019b). On-ice physical demands of world-class women's ice hockey: From training to competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *14*(9), 1227-1232. doi: 10.1123/ijsp.2018-0571
- Douglas, A., Rotondi, M. A., Baker, J., Jamnik, V. K., & Macpherson, A. K.** (2020). A comparison of on-ice external load measures between subelite and elite female ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.00000000000003771
- Duchateau, J., & Enoka, R. M.** (2011). Human motor unit recordings: Origins and insight into the integrated motor system. *Brain Research*, *1409*, 42-61.
- Dupont, G., McCall, A., Prieur, F., Millet, G. P., & Berthoin, S.** (2010). Faster oxygen uptake kinetics during recovery is related to better repeated sprinting ability. *European Journal of Applied Physiology*, *110*(3), 627-634.
- Duthie, G. M., Pyne, D., & Hooper, S.** (2003). The reliability of video based time motion analysis. *Journal of Human Movement Studies*, *44*, 259-271.
- Ebben, W. P., Carroll, R. M., & Simenz, C. J.** (2004). Strength and conditioning practices of national hockey league strength and conditioning coaches. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *18*(4), 889-897. doi: 10.1519/14133.1

- Ebben, W. P., & Watts, P. B.** (1998). A review of combined weight training and plyometric training modes: Complex training. *Strength & Conditioning Journal*, 20(5), 18-27.
- Edouard, P., Mendiguchia, J., Lahti, J., Arnal, P. J., Gimenez, P., Jiménez-Reyes, P., . . . Morin, J.-B.** (2018). Sprint acceleration mechanics in fatigue conditions: Compensatory role of gluteal muscles in horizontal force production and potential protection of hamstring muscles. *Frontiers in Physiology*, 9(1706). doi: 10.3389/fphys.2018.01706
- Emmonds, S., Heyward, O., & Jones, B.** (2019). The challenge of applying and undertaking research in female sport. *Sports Medicine - Open*, 5(1), 51. doi: 10.1186/s40798-019-0224-x
- Enoka, R. M.** (2008). *Neuromechanics of human movement: Human kinetics*.
- Enoka, R. M., & Fuglevand, A. J.** (2001). Motor unit physiology: Some unresolved issues. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 24(1), 4-17.
- Ettema, G., Huijing, P., & De Haan, A.** (1992). The potentiating effect of prestretch on the contractile performance of rat gastrocnemius medialis muscle during subsequent shortening and isometric contractions. *Journal of Experimental Biology*, 165(1), 121-136.
- Farlinger, C. M., & Fowles, J. R.** (2008). The effect of sequence of skating-specific training on skating performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(2), 185-198. doi: 10.1123/ijssp.3.2.185
- Farlinger, C. M., Kruisselbrink, L. D., & Fowles, J. R.** (2007). Relationships to skating performance in competitive hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 915-922. doi: 10.1519/R-19155.1
- 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.
- Fenn, W., & Marsh, B.** (1935). Muscular force at different speeds of shortening. *The Journal of Physiology*, 85(3), 277-297.
- Fereday, K., Hills, S. P., Russell, M., Smith, J., Cunningham, D. J., Shearer, D., . . . Kilduff, L. P.** (2020). A comparison of rolling averages versus discrete time epochs for assessing the worst-case scenario locomotor demands of professional soccer match-play. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 23(8), 764-769. doi: 10.1016/j.jsams.2020.01.002
- Ferguson, R., Marcotte, G., & Montpetit, R.** (1969). A maximal oxygen uptake test during ice skating. *Medicine and Science in Sports*, 1(4), 207-211.
- Ferland, P. M., Marcotte-L'Heureux, V., Roy, P., Carey, V. D., Charron, J., Lagrange, S., . . . Comtois, A. S.** (2021). Maximal oxygen consumption requirements in professional north american ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.0000000000003966
- FFHG.** (2018). Evolution du nombre de licenciés. Retrieved from <https://www.hockeyfrance.com/decouvrir-et-pratiquer/donnons-des-elles-au-hockey-hockey-feminin/statistiques/>
- Fink, J. S.** (2015). Female athletes, women's sport, and the sport media commercial complex: Have we really “come a long way, baby”? *Sport Management Review*, 18(3), 331-342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.smr.2014.05.001>
- 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. doi: 10.1080/14763141.2014.981852
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., . . . Dodge, C.** (2001). A new approach to monitoring exercise training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 15(1), 109-115.

- Fox, J., Conte, D., Stanton, R., McLean, B., & Scanlan, A.** (2020). The application of accelerometer-derived moving averages to quantify peak demands in basketball: A comparison of sample duration, playing role, and session type. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/JSC.0000000000003486
- Gabbett, T. J.** (2015). Relationship between accelerometer load, collisions, and repeated high-intensity effort activity in rugby league players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(12), 3424-3431. doi: 10.1519/jsc.0000000000001017
- García, F., Vázquez-Guerrero, J., Castellano, J., Casals, M., & Schelling, X.** (2020). Differences in physical demands between game quarters and playing positions on professional basketball players during official competition. *Journal of Sports Science & Medicine*, 19(2), 256-263.
- Gasser, H. S., & Hill, A. V.** (1924). The dynamics of muscular contraction. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, containing papers of a biological character*, 96(678), 398-437.
- Gastin, P. B., Hunkin, S. L., Fahrner, B., & Robertson, S.** (2019). Deceleration, acceleration, and impacts are strong contributors to muscle damage in professional Australian football. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(12), 3374-3383. doi: 10.1519/jsc.0000000000003023
- Gastin, P. B., McLean, O. C., Breed, R. V. P., & Spittle, M.** (2014). Tackle and impact detection in elite Australian football using wearable microsensor technology. *Journal of Sports Sciences*, 32(10), 947-953. doi: 10.1080/02640414.2013.868920
- Geithner, C. A.** (2009). Predicting performance in women's ice hockey. *Advances in strength and conditioning research*, 51-63.
- Geithner, C. A., Lee, A. M., & Bracko, M. R.** (2006). Physical and performance differences among forwards, defensemen, and goalies in elite women's ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(3), 500-505. doi: 10.1519/17375.1
- Gilenstam, K. M., Thorsen, K., & Henriksson-Larsen, K. B.** (2011). Physiological correlates of skating performance in women's and men's ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(8), 2133-2142. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181ecd072
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A., & Bishop, D.** (2011). Repeated-sprint ability—part i. *Sports Medicine*, 41(8), 673-694.
- Giroux, C.** (2014). *Analyse des déterminants biomécaniques et neuromusculaires de la performance dans les activités sportives explosives*. Rouen University.
- Giroux, C., Rabita, G., Chollet, D., & Guilhem, G.** (2016). Optimal balance between force and velocity differs among world-class athletes. *Journal of Applied Biomechanics*, 32(1), 59. doi: 10.1123/jab.2015-0070 10.1123/jab.2015-0070
- Gledhill, N., & Jamnik, V.** (2007). Detailed assessment protocols for NHL entry draft players. *York University, Toronto*.
- Gordon, A. M., Huxley, A. F., & Julian, F. J.** (1966). The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. *The Journal of Physiology*, 184(1), 170-192. doi: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1966.sp007909>
- Goudreault, R., Pearsall, D. J., Turcotte, R., Montgomery, D., & Lefebvre, R.** (2002). *Forward skating in ice hockey: Comparison of EMG activation patterns at three velocities using a skate treadmill*. Paper presented at the IV World Congress of Biomechanics, Calgary, Alberta, Canada
- Green, H. J., Batada, A., Cole, B., Burnett, M. E., Kollias, H., McKay, S., . . . Tupling, S.** (2010). Cellular responses in skeletal muscle to a season of ice hockey. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 35(5), 657-670. doi: 10.1139/h10-060

- Green, H. J., Batada, A., Cole, B., Burnett, M. E., Kollias, H., McKay, S., . . . Tupling, S.** (2012). Muscle cellular properties in the ice hockey player: A model for investigating overtraining? *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 90*, 567-578. doi: 10.1139/y2012-017
- Green, H. J., Bishop, P., Houston, M., McKillop, R., Norman, R., & Stothart, P.** (1976). Time-motion and physiological assessments of ice hockey performance. *Journal of Applied Physiology, 40*(2), 159-163.
- Green, H. J., Daub, B. D., Painter, D. C., & Thomson, J. A.** (1978). Glycogen depletion patterns during ice hockey performance. *Medicine and Science in Sports, 10*(4), 289-293.
- Green, M. R., Pivarnik, J. M., Carrier, D. P., & Womack, C. J.** (2006). Relationship between physiological profiles and on-ice performance of a national collegiate athletic association division i hockey team. *Journal of Strength and Conditioning Research, 20*(1), 43.
- Grehaigne, J.-F.** (2018). Les jeux à effectif réduit: Plaisir et apprentissage. *eJRIEPS. Ejournal de la recherche sur l'intervention en éducation physique et sport*(Hors-série N° 2).
- Grehaigne, J.-F., Godbout, P., & Bouthier, D.** (1999). The foundations of tactics and strategy in team sports. *Journal of Teaching in Physical Education, 18*, 159-174. doi: 10.1123/jtpe.18.2.159
- Gullett, J. C., Tillman, M. D., Gutierrez, G. M., & Chow, J. W.** (2009). A biomechanical comparison of back and front squats in healthy trained individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research, 23*(1), 284-292. doi: 10.1519/JSC.0b013e31818546bb
- Hajek, F., Keller, M., Taube, W., von Duvillard, S. P., Bell, J. W., & Wagner, H.** (2020). Testing-specific skating performance in ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.0000000000003475
- Halouani, J., Chtourou, H., Gabbett, T., Chaouachi, A., & Chamari, K.** (2014). Small-sided games in team sports training: A brief review. *Journal of Strength and Conditioning Research, 28*(12), 3594-3618. doi: 10.1519/jsc.0000000000000564
- Hammami, A., Gabbett, T. J., Slimani, M., & Bouhlel, E.** (2018). Does small-sided games training improve physical fitness and team-sport-specific skills? A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness, 58*(10), 1446-1455. doi: 10.23736/s0022-4707.17.07420-5
- Hansen, H., & Reed, A.** (1979). *Functions and on-ice competencies of a high caliber hockey player—a job analysis*. Paper presented at the Science in Skiing, Skating, and Hockey. Proceedings of the International Symposium of Biomechanics in Sports, 107-115
- Harper, D. J., Morin, J.-B., Carling, C., & Kiely, J.** (2020). Measuring maximal horizontal deceleration ability using radar technology: Reliability and sensitivity of kinematic and kinetic variables. *Sports Biomechanics, 1*-17. doi: 10.1080/14763141.2020.1792968
- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Samozino, P.** (2020). Power-force-velocity profiling of sprinting athletes: Methodological and practical considerations when using timing gates. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 34*(6), 1769-1773. doi: 10.1519/jsc.0000000000002890
- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Seiler, S.** (2019). Sprint mechanical variables in elite athletes: Are force-velocity profiles sport specific or individual? *PloS One, 14*(7), e0215551. doi: 10.1371/journal.pone.0215551
- Haukali, E., & Tjelta, L. I.** (2015). Correlation between “off-ice” variables and skating performance among young male ice hockey players. *International Journal of Applied Sports Sciences, 27*(1), 26-32.

- Hauraix, H., Dorel, S., Rabita, G., Guilhem, G., & Nordez, A.** (2017). Muscle fascicle shortening behaviour of vastus lateralis during a maximal force–velocity test. *European Journal of Applied Physiology*, *117*(2), 289-299.
- Hayward-Ellis, J., Alexander, M. J. L., Glazebrook, C. M., & Leiter, J.** (2017). Ground reaction forces produced by two different hockey skating arm swing techniques. *European Journal of Sport Science*, *17*(9), 1153-1160. doi: 10.1080/17461391.2017.1357757
- Helene, O., & Yamashita, M. T.** (2010). The force, power, and energy of the 100 meter sprint. *American Journal of Physics*, *78*(3), 307-309. doi: 10.1119/1.3274162
- Helland, C., Haugen, T., Rakovic, E., Eriksrud, O., Seynnes, O., Mero, A. A., & Paulsen, G.** (2019). Force-velocity profiling of sprinting athletes: Single-run vs. Multiple-run methods. *European Journal of Applied Physiology*, *119*(2), 465-473. doi: 10.1007/s00421-018-4045-2
- Henneman, E.** (1957). Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science*, *126*(3287), 1345-1347.
- Henriksson, T., Vescovi, J. D., Fjellman-Wiklund, A., & Gilenstam, K.** (2016). Laboratory-and field-based testing as predictors of skating performance in competitive-level female ice hockey. *Open access journal of sports medicine*, *7*, 81.
- Hill-Haas, S. V., Dawson, B., Impellizzeri, F. M., & Coutts, A. J.** (2011). Physiology of small-sided games training in football: A systematic review. *Sports Medicine*, *41*(3), 199-220. doi: 10.2165/11539740-000000000-00000
- Hill, A. V.** (1938). The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B - Biological Sciences*, *126*(843), 136-195. doi: doi:10.1098/rspb.1938.0050
- Hinrichs, J. N.** (1995). Emg activity of ice skating and treadmill skating in hockey players. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *5*(4), 278.
- Hoff, J., Kemi, O., & Helgerud, J.** (2005). Strength and endurance differences between elite and junior elite ice hockey players. The importance of allometric scaling. *International Journal of Sports Medicine*, *26*(07), 537-541.
- Hollering, B. L., & Simpson, D.** (1977). The effect of three types of training programs upon skating speed of college ice hockey players. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *17*(3), 335-340.
- Hollville, E., Couturier, A., Guilhem, G., & Rabita, G.** (2020). *A new metric to estimate the mechanical load using wearable accelerometers*. Paper presented at the European Congress of Sport Science
- Hopkins, W. G.** (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, *30*(1), 1-15. doi: 10.2165/00007256-200030010-00001
- Hopkins, W. G.** (2004). How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*, *8*(1), 1-7.
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J.** (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *41*(1), 3-13. doi: 10.1249/MSS.0b013e31818cb278
- Hoppe, M. W., Baumgart, C., Polglaze, T., & Freiwald, J.** (2018). Validity and reliability of gps and lps for measuring distances covered and sprint mechanical properties in team sports. *PLoS One*, *13*(2), e0192708. doi: 10.1371/journal.pone.0192708
- Hughes, M., & Franks, I. M.** (2004). Notational analysis of sport: Systems for better coaching and performance in sport. *Journal of Sports Science & Medicine*, *3*(2), 104-104.

- Humble, R. N., & Gastwirth, B. W.** (1988). The biomechanics of forward power skating. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, 5(2), 363-376.
- Huxley, H. E., & Brown, W.** (1967). The low-angle x-ray diagram of vertebrate striated muscle and its behaviour during contraction and rigor. *Journal of Molecular Biology*, 30(2), 383-416. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(67\)80046-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(67)80046-9)
- IIHF.** (2019). Règles de jeu officielles I. International, Hockey, Federation. (Ed.) Retrieved from https://www.hockeyfrance.com/wp-content/uploads/2012/11/files_Arbitrage_IIHF_LIVRE_DES_REGLES_2018_V4-sept2019_1.pdf
- Jackson, J., Snydmiller, G. D., Game, A. B., Gervais, P., & Bell, G. J.** (2016). Movement characteristics and heart rate profiles displayed by female university ice hockey players. *Int J Kinesiol Sport Sci*, 4(1), 43-54. doi: 10.7575/aiac.ijkss.v.4n.1p.43
- Jackson, J., Snydmiller, G. D., Game, A. B., Gervais, P., & Bell, G. J.** (2017). Investigation of positional differences in fitness of male university ice hockey players and the frequency, time spent and heart rate of movement patterns during competition. *Int J Kinesiol Sport Sci*, 5(3), 6-15. doi: 10.7575/aiac.ijkss.v.5n.3p.6
- Janot, J. M., Auner, K. A., Emberts, T. M., Kaatz, R. M., Matteson, K. M., Muller, E. A., & Cook, M.** (2013). The effects of bungeeski training on measures of on-ice acceleration and speed. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(4), 419-427. doi: 10.1123/ijsp.8.4.419
- Janot, J. M., Beltz, N. M., & Dalleck, L. D.** (2015). Multiple off-ice performance variables predict on-ice skating performance in male and female division iii ice hockey players. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(3), 522-529.
- Jaric, S.** (2015). Force-velocity relationship of muscles performing multi-joint maximum performance tasks. *International Journal of Sports Medicine*, 36(9), 699-704. doi: 10.1055/s-0035-1547283
- Jiménez-Reyes, P., Cross, M., Ross, A., Samozino, P., Brughelli, M., Gill, N., & Morin, J.-B.** (2019a). Changes in mechanical properties of sprinting during repeated sprint in elite rugby sevens athletes. *European Journal of Sport Science*, 19(5), 585-594. doi: 10.1080/17461391.2018.1542032
- Jimenez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Parraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Cuadrado-Peñafiel, V., Castano-Zambudio, A., . . . Morin, J. B.** (2020). Seasonal changes in the sprint acceleration force-velocity profile of elite male soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research, Publish Ahead of Print*. doi: 10.1519/JSC.0000000000003513
- Jiménez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Párraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Cuadrado-Peñafiel, V., Castaño-Zambudio, A., . . . Morin, J. B.** (2020). Seasonal changes in the sprint acceleration force-velocity profile of elite male soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.0000000000003513
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Brughelli, M., & Morin, J.-B.** (2017). Effectiveness of an individualized training based on force-velocity profiling during jumping. *Frontiers in Physiology*, 7(677). doi: 10.3389/fphys.2016.00677
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., Brughelli, M., & Morin, J.-B.** (2018). Relationship between vertical and horizontal force-velocity-power profiles in various sports and levels of practice. *PeerJ*, 6, e5937. doi: 10.7717/peerj.5937
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., & Morin, J.-B.** (2019b). Optimized training for jumping performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics. *PloS One*, 14(5), e0216681. doi: 10.1371/journal.pone.0216681

- Julian, R., Page, R. M., & Harper, L. D.** (2020). The effect of fixture congestion on performance during professional male soccer match-play: A systematic critical review with meta-analysis. *Sports Medicine*. doi: 10.1007/s40279-020-01359-9
- Karcher, C., & Buchheit, M.** (2014). On-court demands of elite handball, with special reference to playing positions. *Sports Medicine*, 44(6), 797-814. doi: 10.1007/s40279-014-0164-z
- Kempton, T., Sullivan, C., Bilsborough, J. C., Cordy, J., & Coutts, A. J.** (2015). Match-to-match variation in physical activity and technical skill measures in professional Australian football. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(1), 109-113. doi: 10.1016/j.jsams.2013.12.006
- Kinnunen, J. V., Piitulainen, H., & Piirainen, J. M.** (2019). Neuromuscular adaptations to short-term high-intensity interval training in female ice-hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(2), 479-485. doi: 10.1519/jsc.0000000000001881
- Kniffin, K. M., Howley, T., & Bardreau, C.** (2017). Putting muscle into sports analytics: Strength, conditioning, and ice hockey performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3253-3259. doi: 10.1519/JSC.00000000000002211
- Komi, P. V.** (2000). Stretch-shortening cycle: A powerful model to study normal and fatigued muscle. *Journal of Biomechanics*, 33(10), 1197-1206.
- Korhonen, M. T., Cristea, A., Alén, M., Häkkinen, K., Sipilä, S., Mero, A., . . . Suominen, H.** (2006). Aging, muscle fiber type, and contractile function in sprint-trained athletes. *Journal of Applied Physiology*, 101(3), 906-917. doi: 10.1152/jappphysiol.00299.2006
- Korte, V.** (2020). *Relationships between general and specific physical characteristics and match-related indicators in elite Finnish ice hockey players at different playing positions*. Master, Jyväskylä. Retrieved from <http://urn.fi/URN:NBN:fi:jyu-202006154161>
- Krause, D. A., Smith, A. M., Holmes, L. C., Klebe, C. R., Lee, J. B., Lundquist, K. M., . . . Hollman, J. H.** (2012). Relationship of off-ice and on-ice performance measures in high school male hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(5), 1423-1430.
- Kumagai, K., Abe, T., Brechue, W. F., Ryushi, T., Takano, S., & Mizuno, M.** (2000). Sprint performance is related to muscle fascicle length in male 100-m sprinters. *J Appl Physiol* (1985), 88(3), 811-816. doi: 10.1152/jappl.2000.88.3.811
- Lachaume, C. M., Trudeau, F., & Lemoyne, J.** (2017). Energy expenditure by elite midget male ice hockey players in small-sided games. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 12(4), 504-513.
- Lacome, M.** (2020, 26/03/2021). Calculating force-velocity profile assess through gps devices in soccer: From labouring to automatic process. Retrieved from <http://mathlacome.com/fvp-easy/>
- Lacome, M., Carling, C., Hager, J. P., Dine, G., & Piscione, J.** (2018a). Workload, fatigue, and muscle damage in an under-20 rugby union team over an intensified international tournament. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(8), 1059-1066. doi: 10.1123/ijsp.2017-0464
- Lacome, M., Simpson, B. M., Cholley, Y., Lambert, P., & Buchheit, M.** (2018b). Small-sided games in elite soccer: Does one size fit all? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(5), 568-576. doi: 10.1123/ijsp.2017-0214
- Lacome, M., Simpson, B. M., Cholley, Y., Lambert, P., & Buchheit, M.** (2018c). Small-sided games in elite soccer: Does one size fit all? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(5), 568-576. doi: 10.1123/ijsp.2017-0214

- Lafontaine, D.** (2007). Three-dimensional kinematics of the knee and ankle joints for three consecutive push-offs during ice hockey skating starts. *Sports Biomechanics*, *6*(3), 391-406. doi: 10.1080/14763140701491427
- Lafontaine, D., Lamontagne, M., & Lockwood, K. L.** (1998). *Time-motion analysis of ice-hockey skills during games*
- Lagrange, S., Ferland, P. M., Leone, M., & Comtois, A. S.** (2020). Contrast training generates post-activation potentiation and improves repeated sprint ability in elite ice hockey players. *International Journal of Exercise Science*, *13*(6), 183-196.
- Lahti, J., Huuhka, T., Romero, V., Bezodis, I., Morin, J. B., & Häkkinen, K.** (2020a). Changes in sprint performance and sagittal plane kinematics after heavy resisted sprint training in professional soccer players. *PeerJ*, *8*, e10507. doi: 10.7717/peerj.10507
- Lahti, J., Jiménez-Reyes, P., Cross, M. R., Samozino, P., Chassaing, P., Simond-Cote, B., . . . Morin, J.-B.** (2020b). Individual sprint force-velocity profile adaptations to in-season assisted and resisted velocity-based training in professional rugby. *Sports*, *8*(5), 74.
- Lamoureux, J. N.** (2013). *Should girls play hockey with boys? Perspectives from the USA women's olympic hockey team*. Master, North Dakota University.
- Lauersen, J. B., Andersen, T. E., & Andersen, L. B.** (2018). Strength training as superior, dose-dependent and safe prevention of acute and overuse sports injuries: A systematic review, qualitative analysis and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, *52*(24), 1557. doi: 10.1136/bjsports-2018-099078
- Lee, C., Lee, S., & Yoo, J.** (2014). The effect of a complex training program on skating abilities in ice hockey players. *J Phys Ther Sci*, *26*(4), 533-537. doi: 10.1589/jpts.26.533
- Leger, L.** (1980). Le hockey sur glace (pp. 115-129).
- Legerlotz, K., Kittelmann, J., Dietzel, M., Wolfarth, B., & Bohlke, N.** (2020). Ice hockey-specific repeated shuttle sprint test performed on ice should not be replaced by off-ice testing. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/JSC.0000000000003576
- Lexell, J. E., & Downham, D. Y.** (2005). How to assess the reliability of measurements in rehabilitation. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, *84*(9), 719-723.
- Lieber, R. L., & Fridén, J.** (2000). Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle & Nerve*, *23*(11), 1647-1666. doi: [https://doi.org/10.1002/1097-4598\(200011\)23:11<1647::AID-MUS1>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1097-4598(200011)23:11<1647::AID-MUS1>3.0.CO;2-M)
- Lieber, R. L., & Ward, S. R.** (2011). Skeletal muscle design to meet functional demands. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *366*(1570), 1466-1476.
- Lignell, E., Fransson, D., Krstrup, P., & Mohr, M.** (2018). Analysis of high-intensity skating in top-class ice hockey match-play in relation to training status and muscle damage. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *32*(5), 1303-1310. doi: 10.1519/JSC.0000000000001999
- Linari, M., Brunello, E., Reconditi, M., Fusi, L., Caremani, M., Narayanan, T., . . . Irving, M.** (2015). Force generation by skeletal muscle is controlled by mechanosensing in myosin filaments. *Nature*, *528*(7581), 276-279. doi: 10.1038/nature15727
- Link, D., Weber, M., Linke, D., & Lames, M.** (2018). Can positioning systems replace timing gates for measuring sprint time in ice hockey? *Frontiers in Physiology*, *9*, 1882. doi: 10.3389/fphys.2018.01882
- Lockie, R. G., Murphy, A. J., & Spinks, C. D.** (2003). Effects of resisted sled towing on sprint kinematics in field-sport athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *17*(4), 760-767. doi: 10.1519/1533-4287(2003)017<0760:eorsto>2.0.co;2

- Lockwood, K. J., & Brophey, P.** (2004). The effect of a plyometric training program intervention on skating speed in junior hockey players. *The Sport Journal*, 7, 184-201.
- Logan-Sprenger, H. M., Palmer, M. S., & Spriet, L. L.** (2011). Estimated fluid and sodium balance and drink preferences in elite male junior players during an ice hockey game. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 36(1), 145-152. doi: 10.1139/h10-098
- Lord, C., John Blazeovich, A., Abbiss, C. R., & Ma'ayah, F.** (2020). A reduction in match-to-match variability using maximal mean analyses in sub-elite soccer. *International Journal of Sports Medicine*, 41(5), 300-305. doi: 10.1055/a-1073-7851
- Lowery, M. R., Tomkinson, G. R., Peterson, B. J., & Fitzgerald, J. S.** (2018). The relationship between ventilatory threshold and repeated-sprint ability in competitive male ice hockey players. *J Exerc Sci Fit*, 16(1), 32-36. doi: 10.1016/j.jesf.2018.03.003
- MacIntosh, B., & Holash, R.** (2000). Power output and force-velocity properties of muscle. *Biomechanics and biology of movement. Champaign (IL): Human Kinetics*, 193-210.
- Malone, J. J., Lovell, R., Varley, M. C., & Coutts, A. J.** (2017). Unpacking the black box: Applications and considerations for using gps devices in sport. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(s2), S2-18. doi: 10.1123/ijsp.2016-0236
- Marcote-Pequeño, R., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., González-Hernández, J. M., Gómez, M. Á., & Jiménez-Reyes, P.** (2019). Association between the force-velocity profile and performance variables obtained in jumping and sprinting in elite female soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(2), 209. doi: 10.1123/ijsp.2018-0233 10.1123/ijsp.2018-0233
- Marino, G. W.** (1977). Kinematics of ice skating at different velocities. *Research Quarterly. American Alliance for Health, Physical Education and Recreation*, 48(1), 93-97. doi: 10.1080/10671315.1977.10762155
- Marino, G. W.** (1979). Acceleration-time relationships in an ice skating start. *Research Quarterly. American Alliance for Health, Physical Education, Recreation and Dance*, 50(1), 55-59. doi: 10.1080/10671315.1979.10615578
- Marino, G. W.** (1983). Selected mechanical factors associated with acceleration in ice skating. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 54(3), 234-238. doi: 10.1080/02701367.1983.10605301
- Marino, G. W.** (1995, July). *Biomechanics of power skating: Past research, future trends*. Paper presented at the 13th International Symposium for Biomechanics in Sports, Thunder Bay, Canada, 246-252
- Marino, G. W., & Weese, R. G.** (1979). A kinematic analysis of the ice skating stride. *Science in skiing, skating and hockey*, 65-74.
- Marqués-Jiménez, D., Calleja Gonzalez, J., Arratibel, I., Delextrat, A., & Terrados, N.** (2017). Fatigue and recovery in soccer: Evidence and challenges. *The Open Sports Sciences Journal*, 10. doi: 10.2174/1875399X01710010051
- Mascaro, T., Seaver, B. L., & Swanson, L.** (1992). Prediction of skating speed with off-ice testing in professional hockey players. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 15(2), 92-98. doi: 10.2519/jospt.1992.15.2.92
- Matthews, M. J., Comfort, P., & Crebin, R.** (2010). Complex training in ice hockey: The effects of a heavy resisted sprint on subsequent ice-hockey sprint performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(11), 2883-2887. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181e7253c

- Mazurek, C. M., Pearsall, D. J., Renaud, P. J., & Robbins, S. M.** (2020). Differences in inter-segment coordination between high- and low-calibre ice hockey players during forward skating. *Sports Biomechanics*, 1-16. doi: 10.1080/14763141.2020.1797151
- McCaw, S. T., & Hoshizaki, T. B.** (1987). A kinematic comparison of novice, intermediate, and elite ice skaters. In J. M. (Ed.), *Biomechanics xb* (pp. 637-642). Champaign: Human Kinetics.
- McLaren, S. J., Smith, A., Spears, I. R., & Weston, M.** (2017). A detailed quantification of differential ratings of perceived exertion during team-sport training. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(3), 290-295.
- McLellan, C. P., & Lovell, D. I.** (2012). Neuromuscular responses to impact and collision during elite rugby league match play. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(5), 1431-1440. doi: 10.1519/JSC.0b013e318231a627
- Mendiguchia, J., Martinez-Ruiz, E., Morin, J. B., Samozino, P., Edouard, P., Alcaraz, P. E., . . . Mendez-Villanueva, A.** (2015). Effects of hamstring-emphasized neuromuscular training on strength and sprinting mechanics in football players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25(6), e621-e629. doi: <https://doi.org/10.1111/sms.12388>
- Micklewright, D., St Clair Gibson, A., Gladwell, V., & Al Salman, A.** (2017). Development and validity of the rating-of-fatigue scale. *Sports Medicine*, 47(11), 2375-2393. doi: 10.1007/s40279-017-0711-5
- Milner-Brown, H., & Lee, R.** (1975). Synchronization of human motor units: Possible roles of exercise and supraspinal reflexes. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38(3), 245-254.
- Mohr, M., Krstrup, P., & Bangsbo, J.** (2003). Match performance of high-standard soccer players with special reference to development of fatigue. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 519-528. doi: 10.1080/0264041031000071182
- Montgomery, D. L.** (1988). Physiology of ice hockey. *Sports Medicine*, 5(2), 99-126.
- Montgomery, D. L.** (2006). Physiological profile of professional hockey players - a longitudinal comparison. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 31(3), 181-185. doi: 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 A. B. Ashare & D. J. Pearsall (Eds.), *Safety in ice hockey: Fourth volume* (pp. 288-295). West Conshohocken, PA: ASTM International. doi:10.1520/STP11626S
- Montpetit, R. R., Binette, P., & Taylor, A. W.** (1979). Glycogen depletion in a game-simulated hockey task. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences. Journal Canadien des Sciences Appliquées Au Sport*, 4(1), 43-45.
- Morales-Artacho, A. J., Ramos, A. G., Pérez-Castilla, A., Padial, P., Argüelles-Cienfuegos, J., de la Fuente, B., & Feriche, B.** (2018). Associations of the force-velocity profile with isometric strength and neuromuscular factors. *International Journal of Sports Medicine*, 39(13), 984-994.
- Morin, J.-B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., & Lacour, J.-R.** (2012). Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11), 3921-3930. doi: 10.1007/s00421-012-2379-8
- Morin, J.-B., Edouard, P., & Samozino, P.** (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(9), 1680-1688. doi: 10.1249/MSS.0b013e318216ea37

- Morin, J.-B., Gimenez, P., Edouard, P., Arnal, P., Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., . . . Mendiguchia, J.** (2015). Sprint acceleration mechanics: The major role of hamstrings in horizontal force production. *Frontiers in Physiology*, *6*(404). doi: 10.3389/fphys.2015.00404
- Morin, J.-B., Jiménez-Reyes, P., Brughelli, M., & Samozino, P.** (2019a). When jump height is not a good indicator of lower limb maximal power output: Theoretical demonstration, experimental evidence and practical solutions. *Sports Medicine*, *49*(7), 999-1006. doi: 10.1007/s40279-019-01073-1
- Morin, J.-B., Le Mat, Y., Osgnach, C., Pilati, A., Samozino, P., & di Prampero, P.** (2020). Team sport players individual acceleration-speed profile in-situ: A proof of concept in professional football. *SportRxiv*. Retrieved from osf.io/preprints/sportrxiv/br296
- Morin, J.-B., & Samozino, P.** (2016). Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *11*(2), 267-272. doi: 10.1123/ijsp.2015-0638
- Morin, J.-B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M. R., & Nagahara, R.** (2019b). A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with improved design. *Journal of Biomechanics*, *94*, 82-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.07.020>
- Morin, J. B.** (2020, 26/03/2021). The “in-situ” sprint profile for team sports: Testing players without testing them? Retrieved from <https://jbmorin.net/2020/08/02/the-in-situ-sprint-profile-for-team-sports-testing-players-without-testing-them/>
- Morin, J. B., Jeannin, T., Chevallier, B., & Belli, A.** (2006). Spring-mass model characteristics during sprint running: Correlation with performance and fatigue-induced changes. *International Journal of Sports Medicine*, *27*(2), 158-165. doi: 10.1055/s-2005-837569
- Morin, J. B., Petrakos, G., Jiménez-Reyes, P., Brown, S. R., Samozino, P., & Cross, M. R.** (2017). Very-heavy sled training for improving horizontal-force output in soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(6), 840-844. doi: 10.1123/ijsp.2016-0444
- Morin, J. B., & Samozino, P.** (2019). *Spreadsheet for sprint acceleration force-velocity-power profiling of the data set: Subtitle [Data set]*. ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/321767606_Spreadsheet_for_Sprint_acceleration_force-velocity-power_profiling
- Moritani, T., & Yoshitake, Y.** (1998). 1998 isek congress keynote lecture: The use of electromyography in applied physiology. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *8*(6), 363-381.
- Nagahara, R., Botter, A., Rejc, E., Koido, M., Shimizu, T., Samozino, P., & Morin, J.-B.** (2017). Concurrent validity of gps for deriving mechanical properties of sprint acceleration. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(1), 129. doi: 10.1123/ijsp.2015-0566
- Nagahara, R., Matsubayashi, T., Matsuo, A., & Zushi, K.** (2014). Kinematics of transition during human accelerated sprinting. *Biol Open*, *3*(8), 689-699. doi: 10.1242/bio.20148284
- Nagahara, R., Mizutani, M., Matsuo, A., Kanehisa, H., & Fukunaga, T.** (2018). Association of sprint performance with ground reaction forces during acceleration and maximal speed phases in a single sprint. *Journal of Applied Biomechanics*, *34*(2), 104. doi: 10.1123/jab.2016-0356
- Naimo, M., De Souza, E., Wilson, J., Carpenter, A., Gilchrist, P., Lowery, R., . . . Joy, J.** (2015). High-intensity interval training has positive effects on performance in ice hockey players. *International Journal of Sports Medicine*, *36*(1), 61-66.

- Nedergaard, N. J., Robinson, M. A., Eusterwiemann, E., Drust, B., Lisboa, P. J., & Vanrenterghem, J.** (2017). The relationship between whole-body external loading and body-worn accelerometry during team-sport movements. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(1), 18-26. doi: 10.1123/ijsp.2015-0712
- Neeld, K.** (2018). Preparing for the demands of professional hockey. *Strength & Conditioning Journal*, *40*(2), 1-16. doi: 10.1519/ssc.0000000000000374
- Newton, R. U., & Kraemer, W. J.** (1994). Developing explosive muscular power: Implications for a mixed methods training strategy. *Strength & Conditioning Journal*, *16*(5), 20-31.
- Nicolella, D. P., Torres-Ronda, L., Saylor, K. J., & Schelling, X.** (2018). Validity and reliability of an accelerometer-based player tracking device. *PloS One*, *13*(2), e0191823. doi: 10.1371/journal.pone.0191823
- Nightingale, S. C., Miller, S., & Turner, A.** (2013). The usefulness and reliability of fitness testing protocols for ice hockey players: A literature review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *27*(6), 1742-1748. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182736948
- Noonan, B.** (2010). Intragame blood-lactate values during ice hockey and their relationships to commonly used hockey testing protocols. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *24*(9), 2290-2295. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181e99c4a
- Nordez, A., McNair, P., Casari, P., & Cornu, C.** (2010). Static and cyclic stretching: Their different effects on the passive torque–angle curve. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *13*(1), 156-160.
- Novák, D., Lipinska, P., Roczniok, R., Spieszny, M., & Stastny, P.** (2019). Off-ice agility provide motor transfer to on-ice skating performance and agility in adolescent ice hockey players. *Journal of Sports Science & Medicine*, *18*(4), 680-694.
- Novák, D., Tomasek, A., Lipinska, P., & Stastny, P.** (2020). The specificity of motor learning tasks determines the kind of skating skill development in older school-age children. *Sports (Basel)*, *8*(9). doi: 10.3390/sports8090126
- Owen, A., Wong, D. P., Paul, D., A. D., Lyon, O., & Lyon, F.** (2012). Effects of a periodized small-sided game training intervention on physical performance in elite professional soccer. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, *26*, 2748-2754. doi: 10.1519/JSC.0b013e318242d2d1
- Pandy, M. G.** (1999). Moment arm of a muscle force. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *27*(1), 79-118.
- Paul, D. J., Bradley, P. S., & Nassis, G. P.** (2015). Factors affecting match running performance of elite soccer players: Shedding some light on the complexity. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *10*(4), 516-519. doi: 10.1123/ijsp.2015-0029
- Pearsall, D., Turcotte, R., Levangie, C., & Forget, S.** (2013). Biomechanical adaptation in ice hockey skating. In H. Youlian (Ed.), *Routledge handbook of ergonomics in sport and exercise* (pp. 51-60). Abingdon: Routledge. doi:10.4324/9780203123355.ch4
- Pearsall, D., Turcotte, R., & Murphy, S.** (2000). Biomechanics of ice hockey. In W. E. Garrett & D. T. Kirkendall (Eds.), *Exercise and sport science* (Vol. 43, pp. 675-692). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Peeters, A., Carling, C., Piscione, J., & Lacombe, M.** (2019). In-match physical performance fluctuations in international rugby sevens competition. *Journal of Sports Science & Medicine*, *18*(3), 419-426.
- Peterson, B. J., Fitzgerald, J. S., Dietz, C. C., Ziegler, K. S., Baker, S. E., & Snyder, E. M.** (2016). Off-ice anaerobic power does not predict on-ice repeated shift performance in hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *30*(9), 2375-2381.

- Peterson, B. J., Fitzgerald, J. S., Dietz, C. C., Ziegler, K. S., Ingraham, S. J., Baker, S. E., & Snyder, E. M.** (2015a). Aerobic capacity is associated with improved repeated shift performance in hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(6), 1465-1472. doi: 10.1519/JSC.0000000000000786
- Peterson, B. J., Fitzgerald, J. S., Dietz, C. C., Ziegler, K. S., Ingraham, S. J., Baker, S. E., & Snyder, E. M.** (2015b). Division i hockey players generate more power than division iii players during on-and off-ice performance tests. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(5), 1191-1196.
- Petrakos, G., Morin, J. B., & Egan, B.** (2016). Resisted sled sprint training to improve sprint performance: A systematic review. *Sports Medicine*, 46(3), 381-400. doi: 10.1007/s40279-015-0422-8
- Peyer, K., Pivarnik, J. M., Eisenmann, J. C., & Vorkapich, M.** (2010). Fitness characteristics of ncaa division i ice hockey players and their relation to game performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(5), 158.
- Piazzesi, G., Reconditi, M., Linari, M., Lucii, L., Bianco, P., Brunello, E., . . . Lombardi, V.** (2007). Skeletal muscle performance determined by modulation of number of myosin motors rather than motor force or stroke size. *Cell*, 131(4), 784-795. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.09.045>
- Pilotti-Riley, A., Stojanov, D., Sohaib Arif, M., & McGregor, S. J.** (2019). Video corroboration of player incurred impacts using trunk worn sensors among national ice-hockey team members. *PLoS One*, 14(6), e0218235. doi: 10.1371/journal.pone.0218235
- Polley, C. S., Cormack, S. J., Gabbett, T. J., & Polglaze, T.** (2015). Activity profile of high-level australian lacrosse players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(1), 126-136. doi: 10.1519/jsc.0000000000000599
- Pollitt, D. J.** (2003). Sled dragging for hockey training. *Strength & Conditioning Journal*, 25(3), 7-16.
- Potteiger, J. A., Smith, D. L., Maier, M. L., & Foster, T. S.** (2010). Relationship between body composition, leg strength, anaerobic power, and on-ice skating performance in division i men's hockey athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(7), 1755-1762.
- Quarrie, K. L., Raftery, M., Blackie, J., Cook, C. J., Fuller, C. W., Gabbett, T. J., . . . Tucker, R.** (2017). Managing player load in professional rugby union: A review of current knowledge and practices. *British Journal of Sports Medicine*, 51(5), 421-427. doi: 10.1136/bjsports-2016-096191
- Quinney, H. A., Dewart, R., Game, A., Snydmiller, G., Warburton, D., & Bell, G.** (2008). A 26 year physiological description of a national hockey league team. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 33(4), 753-760.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Saez-de-Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P., & Morin, J. B.** (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scand J Med Sci Sports*, 25(5), 583-594. doi: 10.1111/sms.12389
- Rago, V., Vigh-Larsen, J. F., Deylami, K., Muschinsky, A., & Mohr, M.** (2020). Use of rating of perceived exertion-based training load in elite ice hockey training and match-play. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Publish Ahead of Print. doi: 10.1519/jsc.00000000000003915
- Rahmani, A., Viale, F., Dalleau, G., & Lacour, J.-R.** (2001). Force/velocity and power/velocity relationships in squat exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 84(3), 227-232.
- Rakovic, E., Paulsen, G., Helland, C., Eriksrud, O., & Haugen, T.** (2018). The effect of individualised sprint training in elite female team sport athletes: A pilot study. *Journal of Sports Sciences*, 36(24), 2802-2808. doi: 10.1080/02640414.2018.1474536

- Ramírez-Campillo, R., Andrade, D. C., & Izquierdo, M.** (2013). Effects of plyometric training volume and training surface on explosive strength. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(10), 2714-2722. doi: 10.1519/JSC.0b013e318280c9e9
- Rampinini, E., Sassi, A., Morelli, A., Mazzoni, S., Fanchini, M., & Coutts, A. J.** (2009). Repeated-sprint ability in professional and amateur soccer players. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism. Physiologie Appliquée, Nutrition et Métabolisme*, 34(6), 1048-1054. doi: 10.1139/h09-111
- Ransdell, L. B., & Murray, T.** (2011). A physical profile of elite female ice hockey players from the USA. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2358-2363. doi: 10.1519/JSC.0b013e31822a5440
- Ransdell, L. B., Murray, T. M., & Gao, Y.** (2013). Off-ice fitness of elite female ice hockey players by team success, age, and player position. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(4), 875-884. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182651fd2
- Reche-Soto, P., Nieto, D., Suarez, A., Gómez-Carmona, C., & Pino Ortega, J.** (2019). Acelt y player load: Dos variables para la cuantificación de la carga neuromuscular [acelt and player load: Two variables to quantify neuromuscular load]. *Rev Int Med Cienc Act Fís Deporte*, 20, 167-183.
- Reed, N., Taha, T., Greenwald, R., & Keightley, M.** (2017). Player and game characteristics and head impacts in female youth ice hockey players. *J Athl Train*, 52(8), 771-775. doi: 10.4085/1062-6050-52.5.04
- Reich, T., Lindstedt, S. L., LaStayo, P., & Pierotti, D. J.** (2000). Is the spring quality of muscle plastic? *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 278(6), R1661-R1666.
- Renaud, P. J., Robbins, S. M. K., Dixon, P. C., Shell, J. R., Turcotte, R. A., & Pearsall, D. J.** (2017). Ice hockey skate starts: A comparison of high and low calibre skaters. *Sports Engineering*, 20(4), 255-266. doi: 10.1007/s12283-017-0227-0
- Reynolds, J. M., Gordon, T. J., & Robergs, R. A.** (2006). Prediction of one repetition maximum strength from multiple repetition maximum testing and anthropometry. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 20(3), 584-592.
- Robbins, S. M., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J.** (2018). Principal component analysis identifies differences in ice hockey skating stride between high- and low-calibre players. *Sports Biomechanics*, 1-19. doi: 10.1080/14763141.2018.1524510
- Robert-Lachaine, X.** (2010). *Force measurement and ankle motion of the forward skating and crossovers with a standard hockey skate and a modified hockey skate*
- 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. doi: 10.1007/s12283-012-0103-x
- Roberts, T. J.** (2016). Contribution of elastic tissues to the mechanics and energetics of muscle function during movement. *The Journal of Experimental Biology*, 219(2), 266. doi: 10.1242/jeb.124446
- Rocznik, R., Maszczyk, A., Czuba, M., Stanula, A., Pietraszewski, P., & Gabryś, T.** (2012). The predictive value of on-ice special tests in relation to various indexes of aerobic and anaerobic capacity in ice hockey players. *Human Movement*, 13(1), 28-32.
- Rocznik, R., Stanula, A., Maszczyk, A., Mostowik, A., Kowalczyk, M., Fidos-Czuba, O., & Zajac, A.** (2016). Physiological, physical and on-ice performance criteria for selection of elite ice hockey teams. *Biology of Sport*, 33(1), 43.

- Romero-Franco, N., Jimenez-Reyes, P., Castano-Zambudio, A., Capelo-Ramirez, F., Rodriguez-Juan, J. J., Gonzalez-Hernandez, J., . . . Balsalobre-Fernandez, C.** (2017). Sprint performance and mechanical outputs computed with an iphone app: Comparison with existing reference methods. *European Journal of Sport Science*, 17(4), 386-392. doi: 10.1080/17461391.2016.1249031
- Ross, A., & Leveritt, M.** (2001). Long-term metabolic and skeletal muscle adaptations to short-sprint training: Implications for sprint training and tapering. *Sports Medicine*, 31(15), 1063-1082. doi: 10.2165/00007256-200131150-00003
- Runner, A. R., Lehnhard, R. A., Butterfield, S. A., Tu, S., & O'Neill, T.** (2016). Predictors of speed using off-ice measures of college hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(6), 1626-1632. doi: 10.1519/JSC.0000000000000911
- Sáez-Sáez de Villarreal, E., Requena, B., & Newton, R. U.** (2010). Does plyometric training improve strength performance? A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 513-522. doi: 10.1016/j.jsams.2009.08.005
- Samozino, P.** (2009). *Capacités mécaniques des membres inférieurs et mouvements explosifs. Approches théoriques intégratives appliquées au saut vertical.* Jean Monnet-Saint-Etienne University.
- Samozino, P.** (2018). A simple method for measuring force, velocity and power capabilities and mechanical effectiveness during sprint running. In J.-B. Morin & P. Samozino (Eds.), *Biomechanics of training and testing: Innovative concepts and simple field methods* (pp. 237-267). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-05633-3_11
- Samozino, P., Morin, J. B., Hintzy, F., & Belli, A.** (2008). A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, 41(14), 2940-2945. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.07.028>
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin, J. B.** (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 26(6), 648-658. doi: 10.1111/sms.12490
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A., & Morin, J. B.** (2012). Optimal force-velocity profile in ballistic movements--altius: Citius or fortius? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 44(2), 313-322. doi: 10.1249/MSS.0b013e31822d757a
- Scanlan, A. T., Dascombe, B. J., Kidcaff, A. P., Peucker, J. L., & Dalbo, V. J.** (2015a). Gender-specific activity demands experienced during semiprofessional basketball game play. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(5), 618-625. doi: 10.1123/ijsp.2014-0407
- Scanlan, A. T., Tucker, P. S., Dascombe, B. J., Berkelmans, D. M., Hiskens, M. I., & Dalbo, V. J.** (2015b). Fluctuations in activity demands across game quarters in professional and semiprofessional male basketball. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(11), 3006-3015. doi: 10.1519/jsc.0000000000000967
- Schuhbeck, E., Birkenmaier, C., Schulte-Göcking, H., Pronnet, A., Jansson, V., & Wegener, B.** (2019). The influence of wb-ems-training on the performance of ice hockey players of different competitive status. *Frontiers in Physiology*, 10, 1136. doi: 10.3389/fphys.2019.01136
- Schwesig, R., Hermassi, S., Edelmann, S., Thorhauer, U., Schulze, S., Fieseler, G., . . . Chelly, M. S.** (2017). Relationship between ice hockey-specific complex test and maximal strength, aerobic capacity and postural regulation in professional players. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 57. doi: 10.23736/S0022-4707.17.07020-7

- Schwesig, R., Lauenroth, A., Schulze, S., Laudner, K. G., Bartels, T., Delank, K. S., . . . Hermassi, S.** (2018). Reliability of an ice hockey-specific complex test. *Sportverletzung Sportschaden*, 32(3), 196-203. doi: 10.1055/a-0648-8874
- Seliger, V., Kostka, V., Grusová, D., Kovác, J., Machovcová, J., Pauer, M., . . . Urbánková, R.** (1972). Energy expenditure and physical fitness of ice-hockey players. *Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie Einschliesslich Arbeitsphysiologie*, 30(4), 283-291. doi: 10.1007/bf00696119
- Shell, J. R., Robbins, S. M. K., Dixon, P. C., Renaud, P. J., Turcotte, R. A., Wu, T., & Pearsall, D. J.** (2017). Skating start propulsion: Three-dimensional kinematic analysis of elite male and female ice hockey players. *Sports Biomechanics*, 16(3), 313-324. doi: 10.1080/14763141.2017.1306095
- Sim, F. H., & Chao, E. Y.** (1978). Injury potential in modern ice hockey. *The American Journal of Sports Medicine*, 6(6), 378-384. doi: 10.1177/036354657800600612
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., Pearson, S. N., & Ross, A.** (2019). Reliability of horizontal force–velocity–power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports Biomechanics*, 18(1), 88-99. doi: 10.1080/14763141.2017.1386707
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., & Ross, A.** (2016). Advances in sprint acceleration profiling for field-based team-sport athletes: Utility, reliability, validity and limitations. *Sports Medicine*, 46(11), 1619-1645. doi: 10.1007/s40279-016-0508-y
- Simpson, A., Waldron, M., Cushion, E., & Tallent, J.** (2021). Optimised force-velocity training during pre-season enhances physical performance in professional rugby league players. *Journal of Sports Sciences*, 39(1), 91-100. doi: 10.1080/02640414.2020.1805850
- Sirotic, A. C., Coutts, A. J., Knowles, H., & Catterick, C.** (2009). A comparison of match demands between elite and semi-elite rugby league competition. *Journal of Sports Sciences*, 27(3), 203-211. doi: 10.1080/02640410802520802
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C.** (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: Specific to field-based team sports. *Sports Medicine*, 35(12), 1025-1044. doi: 10.2165/00007256-200535120-00003
- Spiering, B. A., Wilson, M. H., Judelson, D. A., & Rundell, K. W.** (2003). Evaluation of cardiovascular demands of game play and practice in women's ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(2), 329-333. doi: 10.1519/1533-4287(2003)017<0329:eocdog>2.0.co;2
- Stanula, A., Gabryś, T., Rocznik, R., Szmatlan-Gabryś, U., Ozimek, M., & Mostowik, A.** (2016). Quantification of the demands during an ice-hockey game based on intensity zones determined from the incremental test outcomes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 176-183. doi: 10.1519/jsc.0000000000001081
- Stanula, A., & Rocznik, R.** (2014). Game intensity analysis of elite adolescent ice hockey players. *Journal of human kinetics*, 44(1), 211-221.
- Stanula, A., Rocznik, R., Maszczyk, A., Pietraszewski, P., & Zajac, A.** (2014). The role of aerobic capacity in high-intensity intermittent efforts in ice-hockey. *Biology of Sport*, 31(3), 193-199. doi: 10.5604/20831862.1111437
- Stenroth, L., Vartiainen, P., & Karjalainen, P. A.** (2020). Force-velocity profiling in ice hockey skating: Reliability and validity of a simple, low-cost field method. *Sports Biomechanics*, 1-15. doi: 10.1080/14763141.2020.1770321
- Stetter, B. J., Buckeridge, E., Nigg, S. R., Sell, S., & Stein, T.** (2019). Towards a wearable monitoring tool for in-field ice hockey skating performance analysis. *European Journal of Sport Science*, 1-9. doi: 10.1080/17461391.2018.1563634

- Stetter, B. J., Buckeridge, E., von Tschanner, 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. doi: 10.1123/jab.2014-0245
- Stidwill, T. J., Pearsall, D., & Turcotte, R.** (2010). Comparison of skating kinetics and kinematics on ice and on a synthetic surface. *Sports Biomechanics*, *9*(1), 57-64. doi: 10.1080/14763141003690237
- Stojanović, E., Stojiljković, N., Scanlan, A. T., Dalbo, V. J., Berkelmans, D. M., & Milanović, Z.** (2018). The activity demands and physiological responses encountered during basketball match-play: A systematic review. *Sports Medicine*, *48*(1), 111-135. doi: 10.1007/s40279-017-0794-z
- Suarez-Arrones, L., Arenas, C., López, G., Requena, B., Terrill, O., & Mendez-Villanueva, A.** (2014). Positional differences in match running performance and physical collisions in men rugby sevens. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *9*(2), 316-323. doi: 10.1123/ijsp.2013-0069
- Thoden, J. S., & Jette, M.** (1975). Aerobic and anaerobic activity patterns in junior and professional hockey. *Movement (Special Hockey)*, *2*, 145-153.
- Thompson, K. M. A., Safadie, A., Ford, J., & Burr, J. F.** (2020). Off-ice resisted sprints best predict all-out skating performance in varsity hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.0000000000003861
- Thompson, K. M. A., Whinton, A. K., Ferth, S., Spriet, L. L., & Burr, J. F.** (2021). Moderate load resisted sprints do not improve subsequent sprint performance in varsity-level sprinters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *35*(1), 72-77. doi: 10.1519/jsc.0000000000002524
- Thornton, H. R., Nelson, A. R., Delaney, J. A., Serpiello, F. R., & Duthie, G. M.** (2019). Interunit reliability and effect of data-processing methods of global positioning systems. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *14*(4), 432. doi: 10.1123/ijsp.2018-0273
- Tillin, N. A., & Bishop, D.** (2009). Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Medicine*, *39*(2), 147-166. doi: 10.2165/00007256-200939020-00004
- Turcotte, R., Pearsall, D., Montgomery, D., Lefebvre, R., Nicolaou, M., & Loh, J.** (2001). *Plantar force measures during forward skating in ice hockey*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive
- Twist, P., & Rhodes, T.** (1993). Exercise physiology: The bioenergetic and physiological demands of ice hockey. *Strength & Conditioning Journal*, *15*(5), 68-70.
- Ulmer, J. G., Tomkinson, G. R., Short, S., Short, M., & Fitzgerald, J. S.** (2019). Test-retest reliability of tripm in collegiate ice hockey players. *Biology of Sport*, *36*(2), 191-194. doi: 10.5114/biolSport.2019.84670
- Upjohn, T., Turcotte, R., Pearsall, D., & Loh, J.** (2008). Three-dimensional kinematics of the lower limbs during forward ice hockey skating. *Sports Biomechanics*, *7*(2), 206-221. doi: 10.1080/14763140701841621
- USA Hockey.** (2019). Teaching concepts through small area games. Retrieved from <https://www.usahockey.com/smallareagames>
- Vachon, A., Berryman, N., Mujika, I., Paquet, J.-B., Arvisais, D., & Bosquet, L.** (2020). Effects of tapering on neuromuscular and metabolic fitness in team sports: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Sport Science*, 1-12. doi: 10.1080/17461391.2020.1736183

- van Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K.** (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *The Journal of Physiology*, *513*(1), 295-305.
- van der Kruk, E., Schwab, A. L., van der Helm, F. C. T., & Veeger, H. E. J.** (2018). Getting in shape: Reconstructing three-dimensional long-track speed skating kinematics by comparing several body pose reconstruction techniques. *Journal of Biomechanics*, *69*, 103-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.01.002>
- van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F., & de Haan, A.** (1997). Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle? *Journal of Applied Biomechanics*, *13*(4), 389-415.
- van Ingen Schenau, G. J., de Groot, G., Scheurs, A. W., Meester, H., & de Koning, J. J.** (1996). A new skate allowing powerful plantar flexions improves performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *28*(4), 531-535. doi: 10.1097/00005768-199604000-00020
- van Iterson, E. H., Fitzgerald, J. S., Dietz, C. C., Snyder, E. M., & Peterson, B. J.** (2017). Reliability of triaxial accelerometry for measuring load in men's collegiate ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*(5), 1305-1312. doi: 10.1519/JSC.0000000000001611
- Vázquez-Guerrero, J., Fernández-Valdés, B., Jones, B., Moras, G., Reche, X., & Sampaio, J.** (2019). Changes in physical demands between game quarters of u18 elite official basketball games. *PloS One*, *14*(9), e0221818. doi: 10.1371/journal.pone.0221818
- 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), 207-221.
- Vigh-Larsen, J. F., Beck, J. H., Daasbjerg, A., Knudsen, C. B., Kvorning, T., Overgaard, K., . . . Mohr, M.** (2019). Fitness characteristics of elite and subelite male ice hockey players: A cross-sectional study. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/JSC.0000000000003285
- Vigh-Larsen, J. F., Ermidis, G., Rago, V., Randers, M. B., Fransson, D., Nielsen, J. L., . . . Mohr, M.** (2020a). Muscle metabolism and fatigue during simulated ice hockey match-play in elite players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. doi: 10.1249/mss.0000000000002370
- Vigh-Larsen, J. F., Haverinen, M. T., Knudsen, C. B., Daasbjerg, A., Beck, J. H., Overgaard, K., . . . Andersen, T. B.** (2020b). The relationship between age and fitness profiles in elite male ice hockey players. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. doi: 10.23736/s0022-4707.20.11313-6
- Vigh-Larsen, J. F., Haverinen, M. T., Panduro, J., Ermidis, G., Andersen, T. B., Overgaard, K., . . . Mohr, M.** (2020c). On-ice and off-ice fitness profiles of elite and u20 male ice hockey players of two different national standards. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi: 10.1519/jsc.0000000000003836
- Wadley, G., & Le Rossignol, P.** (1998). The relationship between repeated sprint ability and the aerobic and anaerobic energy systems. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *1*(2), 100-110. doi: 10.1016/s1440-2440(98)80018-2
- Wellman, A. D., Coad, S. C., Goulet, G. C., & McLellan, C. P.** (2017). Quantification of accelerometer derived impacts associated with competitive games in national collegiate athletic association division i college football players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*(2), 330-338. doi: 10.1519/jsc.0000000000001506
- Weston, M., Siegler, J., Bahnert, A., McBrien, J., & Lovell, R.** (2015). The application of differential ratings of perceived exertion to australian football league matches. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *18*(6), 704-708.

- Whitehead, P. N., Conners, R. T., & Shimizu, T. S.** (2019). The effect of in-season demands on lower-body power and fatigue in male collegiate hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(4), 1035-1042. doi: 10.1519/JSC.0000000000003090
- Whitehead, S., Till, K., Weaving, D., & Jones, B.** (2018). The use of microtechnology to quantify the peak match demands of the football codes: A systematic review. *Sports Medicine*, 48(11), 2549-2575. doi: 10.1007/s40279-018-0965-6
- Wilk, K. E., Voight, M. L., Keirns, M. A., Gambetta, V., Andrews, J. R., & Dillman, C. J.** (1993). Stretch-shortening drills for the upper extremities: Theory and clinical application. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 17(5), 225-239. doi: 10.2519/jospt.1993.17.5.225
- Williams, M.** (2020). Physical performance and the relationship to game performance in elite adolescent ice hockey. *IUSCA Journal*, 1(1).
- Wilson, G. J., Murphy, A. J., & Walshe, A.** (1996). The specificity of strength training: The effect of posture. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 73(3), 346-352. doi: 10.1007/BF02425497
- Wu, T., Pearsall, D. J., Russell, P. J., & Imanaka, Y.** (2015). *Kinematic comparisons between forward and backward skating in ice hockey*. Paper presented at the ISBS-Conference Proceedings Archive
- Yavuz, H. U., Erdağ, D., Amca, A. M., & Aritan, S.** (2015). Kinematic and emg activities during front and back squat variations in maximum loads. *Journal of Sports Sciences*, 33(10), 1058-1066. doi: 10.1080/02640414.2014.984240
- Young, W. B.** (2006). Transfer of strength and power training to sports performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(2), 74-83. doi: 10.1123/ijsp.1.2.74

ANNEXES

Étude #1

L'ENCHAÎNEMENT DE MATCHS INTERNATIONAUX DE HOCKEY SUR GLACE FÉMININ NE SEMBLE PAS INFLUENCER LA CHARGE MÉCANIQUE EXTERNE



Publication associée :

Perez J., Brocherie F., Couturier A. & Guilhem G. International matches elicits stable mechanical workload in high-level female ice hockey. *Biology of Sport*. **Under review.**

Title: INTERNATIONAL MATCHES ELICITS STABLE MECHANICAL WORKLOAD IN HIGH-LEVEL FEMALE ICE HOCKEY

Head title: MECHANICAL DEMAND IN HIGH-LEVEL FEMALE ICE HOCKEY

Authors:

Jérôme Perez^{1,2}, Franck Brocherie¹, Antoine Couturier¹, Gaël Guilhem¹

Affiliations:

¹ French Institute of Sport (INSEP), Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370), Paris, France.

² French Ice Hockey Federation, Cergy, France.

ABSTRACT

This study aimed to quantify in- and between-match characteristics and mechanical workload variations elicited by a congested schedule in high-level female ice hockey. Six players were monitored during four international pre-season exhibition matches against the same opponent. Two different methods (Player Load and Accel'Rate) were used to assess specific mechanical workload. Number of shifts and effective playing time per shift were significantly higher for period 2 ($p = 0.03$ for both). Mechanical workload intensity (i.e., relative and peak workload) showed a significant ($p \leq 0.05$) decrease from period 1 to period 2 and period 3 (*moderate-to-large* Cohen's d). All workload variables remained stable between matches ($p > 0.25$). Team variability showed *good-to-moderate* CVs ($< 10\%$) for all variables for in- and between-match variability. Accumulated workload computed with Player Load method was threefold higher compared to Accel'Rate method (+87.8% mean difference; *large* Cohen's d). These findings demonstrate that high-level female ice hockey-specific mechanical workload declines with reduced high-intensity output across periods, while it remains stable between matches against standardized opposition. This study strongly suggests that the present workload metrics could be used to determine the mechanical demand elicited by matches played against various opponents in real game conditions.

Keywords: mechanical demand, accelerometry, congested fixture period, workload monitoring.

INTRODUCTION

Ice hockey is characterized by short and high-intensity efforts interspersed with long recovery periods on the bench. Time-motion analyses (TMA) confirmed this observation as reflected by low work-to-rest ratio [1]. However, such data are (i) scarce in ice hockey [1-5] and (ii) qualitative in nature and in turn unable to reflect playing intensity [6].

The development of wearable technology such as inertial measurement units (IMUs) has allowed for more detailed and objective quantification of sport-specific movement demands [i.e., using Player Load (PL)] [7-9]. This measure has been widely used in different team sports during competition or training to quantify players' mechanical workload [10-13]. However, its application during ice hockey tasks remains specific (i.e., gliding sport) due to the movement demands associated with skating stride [14-16]. Previous studies [15, 16] showed that mechanical workload drops by ~8% and ~13% from the first to the second and third period, respectively. This decline has also been reported in video-based TMA studies in men's ice hockey and might be attributed to the accumulation of both progressive and transient fatigue experienced throughout the match [1, 5, 6].

To date, most of the studies investigated the locomotor demand using objective measures of mechanical workload across the course of a match-play [3, 14, 16] or throughout an entire season [15]. However, major competitions (World Championship, Olympic Game or national championship' play-off) require players to perform successive matches over 7-10 days with no more than 48 h in between. Only one study [6] investigated mechanical workload using Local Positioning System (LPS) during an Under-20 Men's World championship tournament but did not examine the influence of congested match schedule on workload metrics. For instance, contextual factors (e.g., opponent level, match period or consecutive matches) should be considered because they might influence workload metrics output [17]. Therefore, it remains challenging to reliably detect mechanical workload (mainly PL data) variations induced by successive matches played over a congested schedule.

Standardized data processing methods that allow to accurately assess the sport-specific activity are recommended. Indeed, excluding stoppage and benching from match analysis [1] may limit the potential underestimation of the most intense periods [18] due to flying and unlimited substitutions as observed in basketball [19]. In addition, alternative computation method of mechanical workload indexes could be implemented to overcome fictitious rate of changes in acceleration components generated by the device orientation changes [20].

Therefore, this study aimed to quantify in- and between-match mechanical workload variations elicited by successive international matches against the same opponent (i.e., standardized opposition) in high-level women ice hockey players using IMUs-derived measures. We hypothesized that a reduction of the workload appears across periods and across matches due to fatigue accumulation.

MATERIAL AND METHODS

Participants

Based on international classification [21], six high-level female ice hockey players (age 22.5 ± 4.1 years, height 165.8 ± 4.2 cm, weight 67.3 ± 6.7 kg) participated in the study and were systematically monitored over the four exhibition matches. All players were members of the French team (10th at the International Ice Hockey Federation's world ranking at the moment of the experiment). All the players belonging to the first three units (3 players in the first unit, 2 players in the second unit and 1 player in the third unit) of the team line-up participated to all matches. They received a clear explanation of the study before providing written consent to participate in conformity with the Declaration of Helsinki.

Design

An observational design was conducted to compare match characteristics (i.e., number of shift, effective playing time per shift, per period and per match) and mechanical workload of high-

level female ice hockey players during four international pre-season exhibition matches against the same opponent (both teams competed at the same level during the Women World Championship 2019). Matches were played in the same ice rink arena (e.g., 60 × 30 m) within a 5-day period, mimicking the common competition schedule during an international championship with an average resting time of 20 ± 3 h between matches (Table 1).

Methodology

Match characteristics

Each match was recorded using a video camera (HDR-CX405 full-HD, Sony, Germany, 50 Hz sampling frequency) with fixed optical allowing to record all players (i.e. a total of 24 observations over the 6 matches) activity including benching.

Mechanical workload processing

During each match, players wore the same trunk-mounted IMUs devices (MinimaxX S4, Catapult Innovations, Melbourne, Australia) that include a 100 Hz in-built tri-axial accelerometers, gyroscope and magnetometer. Each unit was positioned in the upper back (i.e., between the scapulae) of each player using a standard vest and were turned on 10 min before each match. Tri-axial accelerometer raw data were exported and synchronized with the video footage using Origin Pro software (Origin 2020, OriginLab Corporation, Northampton, MA). On-ice stoppage, inter-period, and benching times were excluded from the analysis. IMUs-derived measures appeared to be reliable and accurate to detect collisions during ice-hockey matches [22]. As spikes in accelerometer data could occur during locomotor movements, video analysis of spikes was used to define collisions as (i) board contact with no body-checking; (ii) board contact with body-checking; (iii) open ice body-checking; and (iv) player fall [22]. Each action meeting the above-mentioned criteria that resulted in an instantaneous $PL \geq 2$ a.u. was excluded from the analysis.

Mechanical workload was computed using: (i) Player Load (PL), often used during indoor activity [8, 9] and more specifically during ice hockey tasks showing a moderate-to-large test-retest reliability [23], and (ii) Accel'Rate (AR), an alternative computation method less sensitive to sensor rotations [20].

AR and PL were expressed as accumulated mechanical workload (a.u.). PL and AR were normalized to the effective playing time (PL.min⁻¹ and AR.min⁻¹, a.u.).

Previous studies recommend using rolling averages to better describe peak mechanical workload (i.e., peak PL and peak AR, a.u.) [19, 24, 25]. The duration of the overlapping between the successive windows was set at 20% [24] of all players and matches shifts effective playing time. Video footage was used to determine the mean shift effective playing time over all players and matches. All shifts (n = 493) were analyzed and effective playing time per shift excluding on-ice stoppage was 45.4 ± 26.1 s. Hence, the duration of the overlapping between the successive windows was 9.0 s. All shifts with an effective playing time < 9 s were excluded from the analysis of the peak mechanical workload (n = 10).

Statistical Analyses

All data were analysed using custom written scripts (Origin 2020, OriginLab Corporation, Northampton, MA) and expressed as mean ± standard deviation (SD). Statistical significance was set at $p \leq 0.05$. Normality and sphericity were confirmed using the Shapiro-Wilk and Levene's Test, respectively. Differences for match characteristics (effective playing time per shift, period and match) and IMUs-derived measures (PL, AR, PL.min⁻¹, AR.min⁻¹, peak PL and peak AR) covered during each period [period 1 (P1), period 2 (P2) and period 3 (P3)] were analyzed using a one-way repeated measures ANOVA (period effect). The same analysis was applied between matches (match effect). Where significant effects were observed, Tukey's post-hoc test was used to identify specific differences. The relative mean difference and Cohen's d effect size were reported when post-hoc analysis revealed significant differences. The Cohen's d was interpreted using the following scale: *trivial* ($d < 0.2$), *small* ($d = 0.2-0.6$),

moderate ($d = 0.6-1.2$), *large* ($d = 1.2-2.0$) and *very large* ($d > 2.0$) [26]. In- and between-match variability for each player and for the team were examined using the coefficient of variation (CV), rated as *good* ($< 5\%$), *moderate* ($5-10\%$), or *poor* ($\geq 10\%$) [27]. The smallest worthwhile change (SWC) was calculated as 0.2 of the between-participants SD [28].

RESULTS

Match characteristics

Match characteristics are reported in Tables 2 and 3. A main effect of period was found for the effective playing time per shift ($p < 0.001$). Post-hoc showed a significant *moderate* increase of the effective playing time per shift from P1 to P2 (+30.7%; $p < 0.001$, $d = 0.85$) and a significant *moderate* decrease from P2 to P3 (-16.9%; $p = 0.01$, $d = 0.62$) (Figure 1).

In-match mechanical workload demands

No effect of period was found for in-match PL and AR ($p > 0.55$; Figure 1 and Table 2). A main effect of period was found for PL.min⁻¹ ($p = 0.004$) and for AR.min⁻¹ ($p < 0.001$). Post-hoc showed a significant *moderate* decrease of PL.min⁻¹ from P1 to P2 (-8.6%; $p = 0.006$, $d = -1.09$) and period 3 (-8.0%; $p = 0.009$, $d = -1.16$) but not between P2 and P3 (+0.5%; $p = 0.97$, $d = 0.11$). Similarly, AR.min⁻¹ *largely* decreased from P1 to P2 (-9.4%; $p < 0.001$, $d = -1.44$) and P3 (-8.1%; $p = 0.002$, $d = -1.44$) but not between P2 and P3 (+1.4%; $p = 0.69$, $d = 0.50$). Considering peak mechanical workload, a significant effect of period was found for peak PL ($p = 0.05$) and a trend for peak AR ($p = 0.06$). There was a decrease from P1 to P3 (-7.3%; $p = 0.05$, $d = -0.62$ and -6.4%; $p = 0.05$, $d = -0.72$ for peak PL and peak AR, respectively) for both variables. During match 4, workload variables significantly decreased from P1 to P3 ($> -7.5\%$; $p > 0.37$, d ranging from -0.23 to -0.21 for PL and AR, $> -11.1\%$; $p < 0.001$, d ranging from -1.29 to -1.52 for relative values and $> -10.6\%$; $p < 0.05$, d ranging from -0.75 to -1.13 for peak workload).

Between-match mechanical workload demands

No significant difference was found for accumulated ($p > 0.69$ for PL and AR), relative values ($p > 0.47$ for PL.min⁻¹ and AR.min⁻¹) and peak mechanical workload ($p > 0.25$ for peak PL and peak AR; Figure 2).

In- and between-match variability

In-match player CV for the change in IMUs-derived measures were considered as *good-to-moderate* (CVs ranging 4.5%-9.2%) with the lowest value obtained for the peak mechanical workload and the highest value for the accumulated mechanical workload. Compared to player variability, higher CVs (ranging from 3.2% for the peak mechanical workload to 5.1% for relative mechanical workload) were observed for all the team variables. Mechanical workload was not significantly different between matches, regardless the considered indicator (Table 3).

Data processing and computation method

Higher PL and AR were obtained for the match when considering the entire 20-min period (175.68 ± 41.29 a.u. and 68.17 ± 16.74 a.u. for PL and AR, respectively) compared to effective playing time (110.89 ± 32.79 a.u. and 43.03 ± 12.49 a.u. for PL and AR, respectively). Inversely, relative values were higher considering only shifts compared to the entire 20-min period (6.26 ± 0.59 a.u. vs. 1.95 ± 0.36 a.u.). PL was threefold higher than AR (+87.8% mean difference; $d = 1.21$) for the same accumulated workload analysis.

DISCUSSION

This study aimed to quantify in- and between-match characteristics and mechanical workload variations elicited by a congested schedule with standardized opposition in high-level female ice hockey. Reported mechanical workload (i.e., relative and peak workload using rolling average) significantly decreased across the periods. Inversely, accumulated mechanical workload was stable with low variability (CV < 10%) between matches. From a methodological

point of view, mechanical workload quantification using AR consistently showed lower values compared to PL, in line with previous data obtained in running [20].

While the players monitored here performed a higher number of shifts compared to female ice hockey players during Canadian university matches [3] (21 ± 5 vs. 16), effective playing time per shift remained similar (~ 45 s). In this context, total and peak AR and PL *moderately* decreased by $\sim 8.5\%$ and $\sim 5.5\%$ respectively from P1 to P3. This finding aligns with previous TMA [1, 5] or LPS/IMUs technologies [6, 15, 16]. Our results confirm this decline in high-intensity output across periods (Table 2), in a similar extent as in elite male American Hockey League (-4.5% and -6.0% from P1 to P2 and P3, respectively) [15]. Douglas et al. [16] also reported similar decrease in explosive efforts metrics in P2 (-10.0%) and P3 (-8.0%) compared to P1. Using pre- and post-match biopsies, a recent study attributed this decline in explosive performance to a pronounced glycolytic loading resulting in a marked decrease of muscle glycogen (-53%) [29].

The present protocol, mimicking a congested schedule similar to a World Championship tournament, should be considered when interpreting the present variations in IMUs-derived measures [17]. Contrarily to our hypothesis, results did not show any changes in workload across matches. Such standardization of match opposition may differ from official tournaments where the team plays against various opponents. Alternatively, the high-level players participating in this study were accustomed to this type of congested schedule during international competitions. In addition, ice hockey is a glided sport with a relatively low volume of effective playing time compared to the aforementioned sports (18.4 ± 5.4 min). The lower workload and ground impacts may lead to a lower amount of exercise-induced muscle damage compared to stretch-shortening cycle activities such as sprint running or field team sports [5]. This potential reduced traumatic loading may shorten the time required for a sufficient post-match recovery and favours matches repetition. It is important to note that while no statistical difference was found between matches, the last match (match 4) showed a *small* drop for the

accumulated workload (~9.0%) and a *moderate* drop for the peak workload (~6.0%) compared to the first match. In addition, match 4 was the only match highlighting a decrease for all variables from P1 to P3. Considering that the decrease in workload does not result from a change in opponent team (i.e. standardized opposition), this decline could be reflective of a residual fatigue accumulated during the previous matches for either the players monitored or the opponents. While we cannot rule out that similar accumulated fatigue affected the performance of the opponent team, one may assume that these effects may be amplified during an official competition with higher competitiveness and accompanying stress.

Although challenging, standardizing match conditions and contextual factors as much as possible is required to reliably detect variations in mechanical workload. This study is the first investigating the variability of different IMUs-derived measures over standardized international matches conditions in ice hockey (same opponent, place, team composition), during a congested schedule. Team variability showed *good-to-moderate* (< 10%) CVs for all variables for in- and between-match. Considering player variability, only accumulated workload showed highest value with *poor* (> 10%) CVs for between-match variability. These variables are directly linked to match characteristics, especially effective playing time per period or match that also showed a high variability for both in- and between-match. Specific ice hockey rules (e.g., unlimited substitutions, penalty situations) allowed coaches to make tactical adjustments especially during P3 depending on the match outcome [3, 16].

Previously reported IMUs-derived measures in female ice hockey matches considered the entire 20-min period without taking into account the specificity of the sport (brief high-intensity bouts interspersed with long recovery periods) [14, 16]. Such data processing may lead to an overestimation of the accumulated mechanical workload and an underestimation of the high-intensity effective playing time. Using the method proposed by Douglas et al. [14], the present data demonstrates lower PL (175.68 ± 41.29 a.u. vs. ~230 a.u.) and PL.min⁻¹ (1.95 ± 0.36 a.u. vs. ~2.20 a.u.) than elite level competition but similar PL (175.68 ± 41.29 a.u. vs. 183.0 ± 44.3

a.u) and higher PL.min⁻¹ (1.95 ± 0.36 a.u. vs. 1.8 ± 0.4 a.u.) compared to sub-elite level competition [30]. Differences with elite level competition could reflect the differences in performance level of the players monitored (i.e., 10th vs. 2nd position at the IIHF World Rankings). However, regarding the highest intensity completed by the players monitored in the present study compared to sub-elite players, it seems that the international level could be considered as a higher level compared to Canadian collegiate level [30].

Ice hockey elicits numerous collisions, changes in directions, cutting maneuvers and complex motor tasks performed at extremes joint amplitudes and high intensity. Such movements substantially modify accelerometer orientation which may in turn generate fictitious rate of changes in acceleration components [7]. Using an alternative computation method of mechanical workload (AR) [20], all AR-derived variables were lower compared to PL-derived variables (divided on average by 2.6, -87.8% mean difference), while CVs ratings were closer. In line with Reche-Soto et al. [20], these findings indicated that AR method could be a stable (i.e., less sensitive to sensor rotations) and valid PL metrics.

The present study provides important insights for female ice hockey practitioners; however, some limitations should be considered. While, the low sample size does not permit to further dissociate specific player positions that may have an impact on the match characteristics and IMUs-derived measures, we accumulated repeated observations over successive matches to provide a more reflective overview of ice hockey specific mechanical workload [3, 14, 16]. According to Lacombe et al. [24], the overlapping between the successive windows for the moving average was set at 20% of the effective playing time per shift. Further studies should investigate the effect of different processing periods on workload, given its crucial implication to implement appropriate training prescription based on drill-duration [19].

CONCLUSION

In conclusion, while high-intensity output (i.e., relative and peak workload) declines across periods, this study shows that workload metrics remain stable in high-level female ice hockey matches played against standardized opposition. The effect of accumulated fatigue seems to induce a reduction in mechanical workload during the fourth match. Such information could be helpful to coaches to prepare physical fitness and tactics according to competitive schedule. In addition, the monitoring of such metrics may contribute to a better individualisation for detecting a possible fatigue effect or a lower mechanical workload due to match/coaching scenario. A more position-specific analysis is warranted to better identify congested workload demand and to enhance the training process.

ACKNOWLEDGEMENTS

J. Perez received a PhD scholarship (CIFRE contract no 2017/1706) funded by the French Ice Hockey Federation and the French Agency of Research and Technology. We would like to acknowledge all of the players, coaches, and managers from the French women's national team for their participation in this project. The authors also warmly thank E. Hollville for his contribution to data processing. The Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370) is a partner of the French-speaking network ReFORM, recognised as a Research Centre for the Prevention of Injury and Illness and the Protection of Athletes by the Olympic Committee (IOC). As a member of the IOC Medical Research Network, ReFORM has received funding from the IOC to establish long-term research programmes on the prevention of injuries and illnesses in sport for the protection of athlete health.

CONFLICT OF INTEREST

None

REFERENCES

1. Brocherie F, Girard O, Millet GP. Updated analysis of changes in locomotor activities across periods in an international ice hockey game. *Biol Sport*. 2018;35(3):261-7.
2. Bracko M, Fellingham G, Hall L, Fisher A, Cryer W. Performance skating characteristics of professional ice hockey forwards. *Res Sports Med*. 1998;8(3):251-63.
3. Jackson J, Snydermilller GD, Game AB, Gervais P, Bell GJ. Movement characteristics and heart rate profiles displayed by female university ice hockey players. *Int J Kinesiol Sport Sci*. 2016;4(1):43-54.
4. Jackson J, Snydermilller GD, Game AB, Gervais P, Bell GJ. Investigation of positional differences in fitness of male university ice hockey players and the frequency, time spent and heart rate of movement patterns during competition. *Int J Kinesiol Sport Sci*. 2017;5(3):6-15.
5. Lignell E, Fransson D, Krustруп P, Mohr M. Analysis of high-intensity skating in top-class ice hockey match-play in relation to training status and muscle damage. *J Strength Cond Res*. 2018;32(5):1303-10.
6. Douglas A, Kennedy C. Tracking in-match movement demands using local positioning system in world-class men's ice hockey. *J Strength Cond Res*. 2020;34(3):639-46.
7. Roell M, Roecker K, Gehring D, Mahler H, Gollhofer A. Player monitoring in indoor team sports: Concurrent validity of inertial measurement units to quantify average and peak acceleration values. *Front Physiol*. 2018;9(141).
8. Luteberget LS, Holme BR, Spencer M. Reliability of wearable inertial measurement units to measure physical activity in team handball. *Int J Sports Physiol Perform*. 2018;13(4):467-73.
9. Boyd LJ, Ball K, Aughey RJ. The reliability of MinimaxX accelerometers for measuring physical activity in Australian football. *Int J Sports Physiol Perform*. 2011;6(3):311-21.
10. Wik EH, Luteberget LS, Spencer M. Activity profiles in international women's team handball using playerLoad. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12(7):934-42.

11. Luteberget LS, Trollerud HP, Spencer M. Physical demands of game-based training drills in women's team handball. *J Sports Sci.* 2018;36(5):592-8.
12. Fox J, Stanton R, Scanlan A. A comparison of training and competition demands in semiprofessional male basketball players. *Res Q Exerc Sport.* 2018;89(1):103-11.
13. Young CM, Gustin PB, Sanders N, Mackey L, Dwyer DB. Player load in elite netball: Match, training, and positional comparisons. *Int J Sports Physiol Perform.* 2016;11(8):1074-9.
14. Douglas A, Rotondi MA, Baker J, Jamnik VK, Macpherson AK. On-ice physical demands of world-class women's ice hockey: From training to competition. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;14(9):1227-32.
15. Allard P, Martinez R, Deguire S, Tremblay J. In-season session training load relative to match load in professional ice hockey. *J Strength Cond Res.* 2020;[Epub Ahead of Print];10.1519/JSC.0000000000003490.
16. Douglas A, Johnston K, Baker J, Rotondi MA, Jamnik VK, Macpherson AK. On-ice measures of external load in relation to match outcome in elite female ice hockey. *Sports.* 2019;7(7):173.
17. Dalton-Barron N, Whitehead S, Roe G, Cummins C, Beggs C, Jones B. Time to embrace the complexity when analysing GPS data? A systematic review of contextual factors on match running in rugby league. *J Sports Sci.* 2020;38(10):1161-80.
18. Whitehead S, Till K, Weaving D, Jones B. The use of microtechnology to quantify the peak match demands of the football codes: A systematic review. *Sports Med.* 2018;48(11):2549-75.
19. Fox J, Conte D, Stanton R, McLean B, Scanlan A. The application of accelerometer-derived moving averages to quantify peak demands in basketball: A comparison of sample duration, playing role, and session type. *J Strength Cond Res.* 2020;[Epub Ahead of Print];10.1519/JSC.0000000000003486.
20. Reche-Soto P, Nieto D, Suarez A, Gómez-Carmona C, Pino Ortega J. AcelT y Player Load: Dos variables para la cuantificación de la carga neuromuscular [AcelT and Player Load:

- Two variables to quantify neuromuscular load]. *Rev Int Med Cienc Act Fís Deporte*. 2019;20:167-83.
21. Decroix L, De Pauw K, Foster C, Meeusen R. Guidelines to classify female subject groups in sport-science research. *Int J Sports Physiol Perform*. 2016;11(2):204-13.
 22. Pilotti-Riley A, Stojanov D, Sohaib Arif M, McGregor SJ. Video corroboration of player incurred impacts using trunk worn sensors among national ice-hockey team members. *PLoS One*. 2019;14(6):e0218235.
 23. Van Iterson EH, Fitzgerald JS, Dietz CC, Snyder EM, Peterson BJ. Reliability of triaxial accelerometry for measuring load in men's collegiate ice hockey. *J Strength Cond Res*. 2017;31(5):1305-12.
 24. Lacombe M, Simpson BM, Cholley Y, Lambert P, Buchheit M. Small-sided games in elite soccer: Does one size fit all? *Int J Sports Physiol Perform*. 2018;13(5):568-76.
 25. Fereday K, Hills SP, Russell M, Smith J, Cunningham DJ, Shearer D, et al. A comparison of rolling averages versus discrete time epochs for assessing the worst-case scenario locomotor demands of professional soccer match-play. *J Sci Med Sport*. 2020;23(8):764-9.
 26. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;41(1):3-13.
 27. Lord C, John Blazeovich A, Abbiss CR, Ma'ayah F. A Reduction in match-to-match variability using maximal mean analyses in sub-elite soccer. *Int J Sports Med*. 2020;41(5):300-5.
 28. Hopkins WG. How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*. 2004;8(1):1-7.
 29. Vigh-Larsen JF, Ermidis G, Rago V, Randers MB, Fransson D, Nielsen JL, et al. Muscle metabolism and fatigue during simulated ice hockey match-play in elite players. *Med Sci Sports Exerc*. 2020;[Epub Ahead of Print];10.1249/mss.0000000000002370.

30. Douglas AS, Rotondi MA, Baker J, Jamnik VK, Macpherson AK. A Comparison of On-Ice External Load Measures Between Subelite and Elite Female Ice Hockey Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2020;[Epub Ahead of Print];10.1519/jsc.0000000000003771.

1 **FIGURES LEGEND**

2 **Figure 1.** Effective playing time per shift excluding on-ice stoppage (panel A), accumulated
3 workload PlayerLoad (panel B) and Accel'Rate (panel C) by period. P1: period 1; P2: period
4 2; P3: period 3.

5 ## ($p \leq 0.01$) and ### ($p \leq 0.001$) significantly different from P2

6 **Figure 2.** Relative mean difference between matches compared to Match 1 for accumulated
7 mechanical workload Accel'Rate (AR; panel A), relative value of Accel'Rate ($\text{AR} \cdot \text{min}^{-1}$; panel
8 B) and peak workload using a rolling average of 9 s (peak AR; panel C). Absolute values of
9 each measure are displayed as mean \pm standard deviation. Coefficient of variation (CV)
10 represents the between-match variability of each measure and the grey areas, called the smallest
11 worthwhile change (SWC), represent trivial change.

Table 1. Team schedule throughout the experimentation.

	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Morning	<p>10:30 Training</p> <p>Duration: 1 h</p>	<p>11:15 Morning skate</p> <p>Duration: 30 min</p>	<p>11:15 Morning skate</p> <p>Duration: 30 min</p>	<p>OFF</p>	<p>11:15 Morning skate</p> <p>Duration: 30 min</p>	<p>OFF</p>
Afternoon	<p>OFF</p>	<p>19:00 Match 1</p> <p>Score: 0-3</p> <p>Duration: 15 min on-ice warm-up + 3 x 20 min</p>	<p>19:00 Match 2</p> <p>Score: 1-2</p> <p>Duration: 15 min on-ice warm-up + 3 x 20 min</p>	<p>15:30 Training</p> <p>Duration: 1 h</p>	<p>19:00 Match 3</p> <p>Score: 3-2</p> <p>Duration: 15 min on-ice warm-up + 3 x 20 min</p>	<p>14:00 Match 4</p> <p>Score: 0-1</p> <p>Duration: 15 min on-ice warm-up + 3 x 20 min</p>

Table 2. Match characteristics and mechanical workload between periods.

Variable	Period 1	Period 2	Period 3	Mean (match)	Aggregate (4 matches)
Number of shifts	7 ± 1 (6-8)	6 ± 1 (6-7)	7 ± 1 (6-8)	7 ± 2 (6-7)	21 ± 5 (18-23)
Effective playing time per shift (s)	40.4 ± 22.0 ### (37.2-43.6)	52.8 ± 32.3 (47.7-57.9)	43.9 ± 22.3 ## (40.7-47.2)	45.4 ± 26.1 (43.1-47.6)	
Effective playing time (min)	5.6 ± 0.3 (4.9-6.2)	6.3 ± 0.5 (5.3-7.3)	6.3 ± 0.5 (5.3-7.3)	6.1 ± 2.1 (5.6-6.5)	18.4 ± 5.4 (16.1-20.6)
PL (a.u.)	35.32 ± 3.35 (26.71-43.92)	36.79 ± 4.49 (25.25-48.33)	36.70 ± 4.09 (26.20-47.21)	36.27 ± 9.24 (31.68-40.86)	110.89 ± 32.79 (97.05-124.74)
AR (a.u.)	13.77 ± 0.78 (12.16-15.37)	14.26 ± 1.04 (12.10-16.42)	14.60 ± 1.02 (12.49-16.71)	14.21 ± 4.62 (13.12-15.30)	43.03 ± 12.49 (37.76-48.31)
PL.min⁻¹ (a.u.)	6.61 ± 0.20 (6.11-7.11)	6.07 ± 0.15 ** (5.68-6.46)	6.10 ± 0.08 ** (5.89-6.31)	6.26 ± 0.59 (6.05-6.47)	
AR.min⁻¹ (a.u.)	2.55 ± 0.05 (2.42-2.69)	2.32 ± 0.04 *** (2.23-2.42)	2.36 ± 0.02 ** (2.32-2.40)	2.41 ± 0.14 (2.34-2.48)	
Peak PL rolling average (a.u.)	0.175 ± 0.008 (0.155-0.194)	0.165 ± 0.003 (0.156-0.174)	0.162 ± 0.007 * (0.145-0.180)	0.167 ± 0.015 (0.160-0.175)	
Peak AR rolling average (a.u.)	0.065 ± 0.002 (0.059-0.072)	0.064 ± 0.001 (0.061-0.066)	0.061 ± 0.002 (0.056-0.067)	0.064 ± 0.006 (0.061-0.066)	

Data are displayed as mean ± SD (and 95% confidence interval). PL: Player Load; AR: Accel'Rate.

* ($p \leq 0.05$), ** ($p \leq 0.01$) and *** ($p \leq 0.001$) significantly different from Period 1

($p \leq 0.01$) and ### ($p \leq 0.001$) significantly different from Period 2

Table 3. Matches characteristics, mechanical workload and between-match variability.

Variables	Matches characteristics and mechanical workload				Between-match variability			
	Mean \pm standard deviation (with 95% confidence interval).				Player		Team	
	Match 1	Match 2	Match 3	Match 4	CV (95% CI)	SWC	CV (95% CI)	SWC
Number of shifts	20 \pm 2 (15-26)	21 \pm 2 (17-26)	21 \pm 3 (13-29)	20 \pm 2 (14-25)	13.1 (8.1-32.0)		3.1 (1.9-7.4)	
Effective playing time (min)	18.8 \pm 2.0 (13.7-24.0)	18.3 \pm 1.5 (14.3-22.2)	19.0 \pm 2.9 (11.5-26.5)	17.3 \pm 2.7 (10.4-24.2)	19.5 (12.0-47.0)	0.6	4.1 (2.5-9.8)	0.2
PL (a.u.)	116.74 \pm 13.25 (82.69-150.79)	110.26 \pm 10.16 (84.15-136.37)	113.47 \pm 16.77 (70.36-156.58)	103.47 \pm 15.62 (62.95-143.27)	16.2 (10.0-39.0)	2.93	5.3 (3.1-12.0)	1.17
AR (a.u.)	44.05 \pm 4.49 (32.52-55.59)	43.54 \pm 4.19 (32.76-54.32)	44.58 \pm 6.50 (27.86-61.29)	39.96 \pm 6.08 (24.32-55.60)	16.0 (10.0-39.0)	1.11	4.9 (3.1-12.0)	0.42
PL.min⁻¹ (a.u.)	6.39 \pm 0.22 (5.82-6.97)	6.15 \pm 0.12 (5.85-6.45)	6.37 \pm 0.12 (6.06-6.68)	6.19 \pm 0.16 (5.79-6.59)	4.9 (3.1-12.0)	0.06	1.9 (1.2-4.9)	0.02
AR.min⁻¹ (a.u.)	2.42 \pm 0.07 (2.24-2.59)	2.39 \pm 0.06 (2.23-2.55)	2.46 \pm 0.05 (2.33-2.59)	2.40 \pm 0.04 (2.30-2.50)	4.7 (3.1-12.0)	0.02	1.3 (0.6-2.5)	0.01
Peak PL (a.u.)	0.163 \pm 0.011 (0.136-0.191)	0.178 \pm 0.002 (0.172-0.186)	0.172 \pm 0.008 (0.151-0.192)	0.167 \pm 0.007 (0.149-0.184)	7.5 (5.0-20.0)	0.003	4.0 (2.5-9.8)	0.001
Peak AR (a.u.)	0.065 \pm 0.002 (0.060-0.069)	0.063 \pm 0.002 (0.058-0.067)	0.063 \pm 0.002 (0.057-0.068)	0.061 \pm 0.002 (0.057-0.065)	5.0 (3.1-12.0)	0.0006	2.2 (1.2-4.9)	0.0003

PL: Player Load; AR: Accel'Rate; CV: coefficient of variation (with 95% confidence interval); SWC: smallest worthwhile change.

Figure 1.

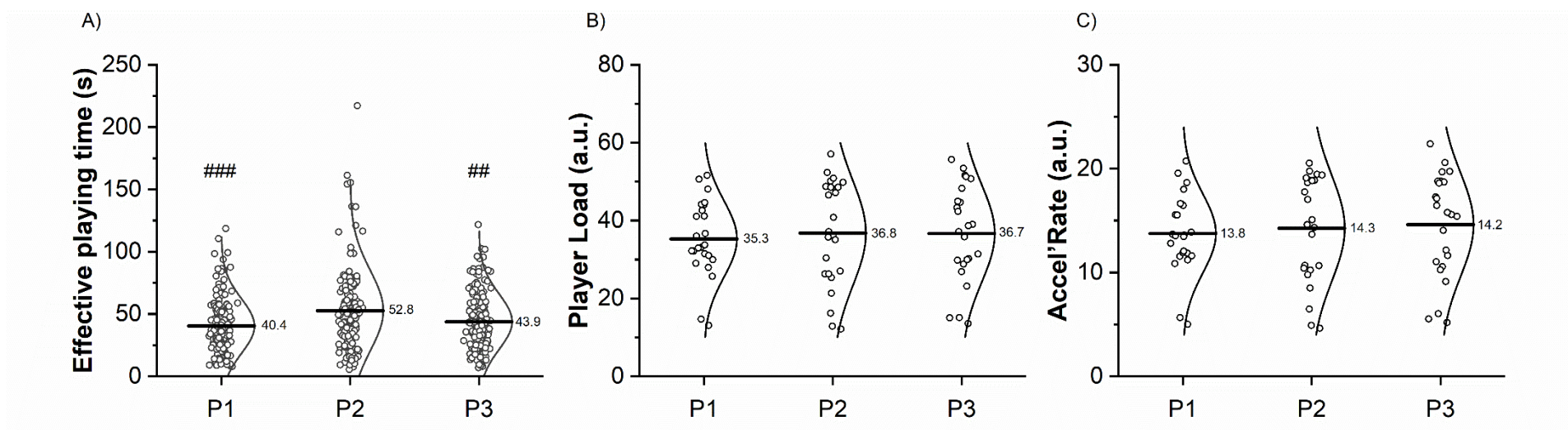
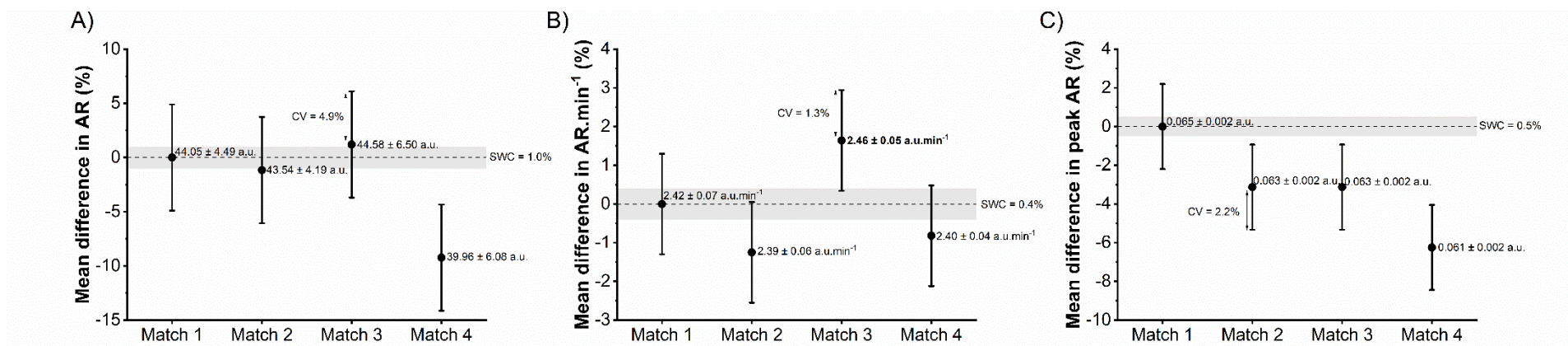


Figure 2.



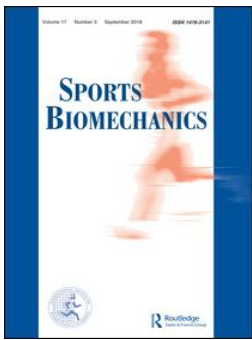
Étude #2

REPRODUCTIBILITÉ DU PROFIL FORCE-VITESSE LORS DU SPRINT EN PATINAGE



Publication associée :

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. (2019). Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomechanics*, 1-15.



Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration

Jérôme Perez, Gaël Guilhem & Franck Brocherie


To cite this article: Jérôme Perez, Gaël Guilhem & Franck Brocherie (2019): Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration, Sports Biomechanics, DOI: [10.1080/14763141.2019.1648541](https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1648541)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1648541>




Published online: 29 Aug 2019.



[Submit your article to this journal](#) 



[View related articles](#) 



[View Crossmark data](#) 



Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration

J erome Perez^{a,b}, Ga el Guilhem^a and Franck Brocherie^a

^aLaboratory Sport, Expertise and Performance, Research Department, French Institute of Sport, Paris, France; ^bFrench Women Academy of Ice Hockey, French Federation of Ice Hockey, Chamb ery, France

ABSTRACT

The aims of this study were to ensure that the skating velocity describes a mono-exponential function in order to determine the reliability of radar-derived profiling results from skating sprint accelerations applying sprint running force-velocity assessment approach. Eleven young highly-trained female ice hockey players performed two 40-m skating sprints on two separate days to evaluate inter-trial and test-retest reliability. The velocity-time data recorded by a radar device was used to calculate the kinetics variables of the skating sprint acceleration: maximal theoretical force (F_0), maximal theoretical velocity (V_0), maximal theoretical power (P_{max}) and the slope of the linear force-velocity relationship (S_{FV}). S_{FV} and S_{FVrel} variables (the slope of the linear relationship between horizontal force relative to body mass and velocity) demonstrated 'low' to 'moderate' intra-class correlation coefficients (ICC). All other variables revealed 'acceptable' inter-trial and test-retest reliability (ICC ≥ 0.75 and coefficient of variation [CV] $\leq 10\%$). Furthermore, test-retest reliability (ICC and CV) and sensitivity [Standard Error of Measurement (SEMs) \leq Small Worthwhile Change (SWCs)] were higher when averaging the two trials compared to the best trial (40-m split time) only. These findings offer a promising and simple method to monitor training-induced changes in macroscopic mechanical variables of ice hockey skating performance.

ARTICLE HISTORY

Received 16 January 2019
Accepted 22 July 2019

KEYWORDS

Skating; instantaneous mechanical power; biomechanics; team sports

Introduction

Ice hockey is considered as the fastest team sport with repeated sprints reaching > 11 m/s at a high-level of play (Merk, 2018). High-intensity skating and forward sprint activities represent respectively $\sim 45\%$ and $\sim 18\%$ of the total skating distance (~ 120 m/min) covered during a game (Brocherie, Girard, & Millet, 2018; Lignell, Fransson, Krustrup, & Mohr, 2018), indicating that the demands imposed on ice hockey players are unique in comparison to other team sports (Couderc et al., 2019; Gabbett, Jenkins, & Abernethy, 2012; Spencer, Bishop, Dawson, & Goodman, 2005). The ability to start quickly to win the puck possession and/or reach a high velocity to attack the opponent camp are in turn major determinants of ice hockey performance (Bracko, 2004; Pearsall, Turcotte, Levangie, & Forget, 2013). Accordingly, previous studies (Buckeridge, LeVangie, Stetter, Nigg, & Nigg, 2015; Renaud

et al., 2017) have demonstrated that sprint skating performance are different between high- to low-calibre ice hockey players. Therefore, the accurate evaluation of on-ice skating kinetics (force, velocity and power) appears of primary importance for talent identification and training individualisation in ice hockey.

A new macroscopic method founded on the inverse dynamic approach (Samozino et al., 2016) and the time-course of forward velocity of the centre of mass has recently permitted to calculate various biomechanical variables during sprint running. This procedure is based on the maximum velocity reached at the end of the acceleration (V_{\max}) and the acceleration time constant (τ) values obtained by modelling raw velocity data using a radar system (Samozino et al., 2016; Simperingham, Cronin, & Ross, 2016). The derivation of the velocity-time curve then allows to accurately determine the horizontal force, velocity and instantaneous power output applied on the centre of mass exerted by an athlete during sprint running (Buchheit et al., 2014; Samozino et al., 2016; Simperingham, Cronin, Pearson, & Ross, 2019; van der Kruk, van der Helm, Veeger, & Schwab, 2018). The slope (S_{FV}) of the linear relationship between the theoretical horizontal force production (F_0) and the maximal theoretical velocity (V_0) inferred from these measurements is an index of the athlete's individual balance between force and velocity generating-capacity. The maximal theoretical mechanical power output generated (P_{\max}) could also be determined as the apex of the power-velocity relationship. Modelling these variables over the entire running task had permitted to better understand their respective contribution to each phase of sprint performance. F_0 appears to be determinant for the first running steps (*i.e.* up to 20 m) while V_0 has a major contribution to the high-velocity running phase (Morin & Samozino, 2016). The mean ratio of force (RF), defined as the ratio of the horizontal component of the ground reaction force to the corresponding resultant force, has been proposed as reflective of the effectiveness of ground force application technique (Morin, Edouard, & Samozino, 2011; Rabita et al., 2015). On the ice, although skate's blade must be oriented perpendicularly to the intended direction of motion, the capacity to generate an efficient F_0 seems paramount for an efficient forward skating performance (Pearsall et al., 2013). In this regard, evaluating the force-velocity profile during forward ice hockey skating sprint could contribute to the optimization of each player skating capability. To the best of our knowledge, no study has yet investigated the force-velocity-power profile during on-ice forward sprint skating. The application of the method developed by Samozino et al. (2016) during ice hockey skating sprint should be based on the assumption that the velocity curve describes a mono-exponential function with a plateau at V_{\max} , as consistently reported during sprint running task (Di Prampero et al., 2005; Morin, Jeannin, Chevallier, & Belli, 2006). The force production during forward skating has been mainly assessed on a skating treadmill or using a force transducer on the skates (Stidwill, Pearsall, & Turcotte, 2010; Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh, 2008; van der Kruk, Reijne, de Laat, & Veeger, 2018). On-ice conditions do not allow to use force plates (*i.e.* considered as the reference method) to evaluate the direction and magnitude of the forces applied in an ecological setting. While some sophisticated motion tracking technology has allowed to assess forward skating kinematics along a 50-m straight line (van der Kruk, Schwab, van der Helm, & Veeger, 2018), most of the studies that analysed ice hockey kinematics are often limited to a part of the entire skating sprint (acceleration or steady-state phase) due to measurement

system restriction (Budarick et al., 2018; Renaud et al., 2017; Robbins, Renaud, & Pearsall, 2018; Shell et al., 2017).

Therefore, the present study firstly aimed to ensure that the forward skating velocity describes a mono-exponential function in order to apply the method developed by Samozino et al. (2016). Then, it would be possible to determine the inter-trial and test-retest reliability of radar-derived mechanical variables in on-ice conditions. We hypothesised that the time-course forward velocity of the centre of mass would describe a mono-exponential function. Mechanical variables derived from the velocity-time curve had shown acceptable (Simperingham et al., 2019) to high (Buchheit et al., 2014; Samozino et al., 2016) inter-trial and test-retest reliability in sprint running conditions. Therefore, we expected similar reliability in forward skating conditions.

Methods

Participants

Eleven young highly-trained female ice hockey players (mean \pm SD: age, 17.6 ± 4.0 years; height, 1.66 ± 0.06 m; body mass, 63.6 ± 6.3 kg; playing experience, 10.5 ± 4.1 years) from the women national training centre of the French Federation of Ice Hockey were recruited for this study. Players were representative of all playing positions except goaltending. All players were familiar with the testing procedures and participated in ~ 11 h of combined ice hockey-specific training sessions (*i.e.* four on-ice hockey training sessions, two off-ice conditioning sessions and two strength training sessions) and one to two competitive games per week. Informed written consent were obtained from all participants and from their legal guardians when participants were minors. The protocol was approved by the ethics committee Ouest IV and conformed to the standards of the Declaration of Helsinki. Players were free from any lower limb musculoskeletal injury during the three months preceding data collection and were instructed to avoid any strenuous exercise in the two days before testing.

Experimental design

On two occasions, players were requested to perform, at the same time of day (± 1 h), two on-ice 40-m maximal forward sprint skating tests interspersed by 4 min of passive rest on the ice rink (~ 8 °C ambient temperature and $\sim 77\%$ relative humidity). Players were instructed to wear their full ice hockey equipment and were weighed (73.6 ± 10.6 kg fully equipped) before the first testing session. Between the two testing sessions, only low-to-moderate intensity technical/tactical training were scheduled. We examined relative and absolute inter-trial and test-retest reliability using intra-class correlation coefficients (ICC), standard error of measurement (SEM), CV and 95% limits of agreement (LOA) of Bland-Altman plots.

Testing procedures

Following a 15-min standardised warm-up including free skating drills and three 40-m progressive sprints at players' self-perceived V_{\max} , players then performed two 40-m

maximal sprint skating tests from a staggered-stance standing straight forward position (Pearsall, Turcotte, & Murphy, 2000). Because removing the stick from the players' hands may alter ice hockey skating mechanics (Bond, Bennett, & Noonan, 2018), they skated as fast as possible while holding their stick, mimicking on-game skating.

Instantaneous horizontal velocity (V_h) was measured at a sampling rate of 47 Hz using a radar device (Stalker ATS II, Texas, USA) positioned 3 m behind the starting line on a tripod set 1 m above the ground to approximately align with players' centre of mass (Simperingham et al., 2016). Each data acquisition was saved on Stalker ATS SystemTM software (Version 5.0.3.0, Applied Concepts, Inc, Texas, USA) and imported to Origin software (Version 8.0, OriginLab Corporation, USA) for further analysis. The velocity raw data prior to the start and after the V_{max} plateau were discarded from the analysis (Simperingham et al., 2019). The velocity-time curve for each sprint was fitted to a mono-exponential function (Equation (1)) and least-square regression method (Figure 1):

$$v(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (1)$$

where t is the time. The raw values for which there was a doubt between the signal and noise at the start were also discarded using a time delay (Δt) of 0.3 s (Equation (2)) to associate the first velocity value considered to the true time. Adding this parameter leads to not overestimate force and power measurements and improves the reliability (Samozino, 2018):

$$v(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-(t-\Delta t)/\tau}\right) \quad (2)$$

F_0 , V_0 , P_{max} (modelled as $F_0 \times V_0/4$), S_{FV} (modelled as $-F_0/V_0$), the time required to cover 5 m and 40 m were obtained with the same processing and computation method developed by Samozino et al. (2016). Relative values for F_0 (F_{0rel}), P_{max} (P_{maxrel}) and S_{FV} (S_{FVrel}) were calculated relatively to the player's body mass (fully equipped).

Statistical analysis

Statistics were carried out using Statistica version 13 (TIBCO Software Inc, OK, USA). All data were expressed as mean \pm standard deviation (SD) and statistical significance was set

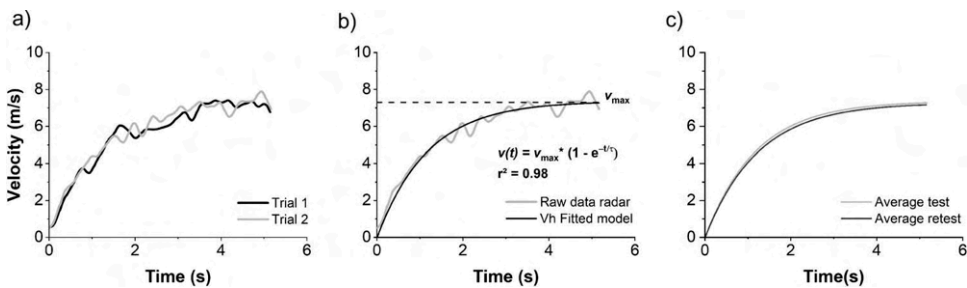


Figure 1. Raw data of the velocity-time curve measured by radar between two trials from the same testing session (panel A), fitted data of the horizontal velocity-time curve with a mono-exponential function (panel B) and averaged fitted data of the velocity-time curve from each testing session (panel C). Data were collected from the same player in all three panels.

at $p < 0.05$. Before using parametric statistical test procedures, the assumptions of normality were verified using the Kolmogorov-Smirnov test. To determine the inter-trial and test-retest relative reliability of computed variables, ICC was calculated. The thresholds adopted to determine the level of reliability for each variables were: 0.20–0.49 ‘low’, 0.50–0.74 ‘moderate’, 0.75–0.89 ‘high’, 0.90–0.98 ‘very high’ and ≥ 0.99 ‘extremely high’ (Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009). To test the absolute reliability, SEM and CV were calculated. The level of agreement between trials and test-retest was quantified using the 95% LOA method. The inter-trial and test-retest differences were drawn in relation to the mean values and 95% of the differences were expected to lie between the two LOA that were the mean difference ± 1.96 SD of the differences (Atkinson & Nevill, 1998). The smallest worthwhile change (SWC) was calculated as 0.3 of the standard error of measurement (SEM) and 0.2 of the between-participants SDs, respectively (Hopkins, 2004). Test sensitivity was determined by comparing SWC with SEM, using the thresholds proposed by Lexell and Downham (2005). When SEM was \leq SWC, the test’s capacity to detect change was considered ‘good’, when SEM was equal to SWC it was considered ‘satisfactory’, and when SEM was \geq SWC the test was rated as ‘marginal’. To investigate systematic bias, a paired sample t-test was conducted to test the hypothesis that the sample means of test and retest values did not differ. The effect size of the difference (d) for all variables was determined as: (mean value trial 2—mean value of trial 1)/pooled SD. The modified scale by Hopkins et al. (2009) was used for the interpretation of d : < 0.20 ‘trivial’; 0.20–0.59 ‘small’; 0.60–1.19 ‘moderate’; 1.20 – 1.99 ‘large’ and < 2.00 ‘very large’. The two trials of the first session were analysed for the inter-trial analysis, whereas for the test-retest reliability, all variables were analysed for comparisons of: (i) the best 40-m trial from test and retest (shortest time to cover the 40-m distance) and (ii) the average of the two trials.

Results

For all trials, the velocity-time curve obtained from the mono-exponential function well fitted to the raw data ($r^2 = 0.98$; $p < 0.01$; Figure 1).

Inter-trial reliability

No variable differed between trials ($p \geq 0.38$, ‘trivial’ to ‘small’ d). The values of ICC were indicative of ‘high’ to ‘very high’ relative inter-trial reliability for all variables, with the exception of S_{FV} and S_{FVrel} that were rated as ‘low’. All CVs were below 10% and considered as ‘acceptable’. Except for S_{FV} , S_{FVrel} , F_0 , and F_{0rel} , all SEMs were lower or equal than their respective SWCs, indicating a ‘satisfactory’ to ‘good’ test sensitivity. For all variables, SEM values were low ($< 5\%$ of mean values) and change in mean close to 0 (Table 1).

Test-retest reliability

No significant test-retest bias was found for any of the computed variables for any of the two methods (best and averaged values). Relative test-retest reliability was deemed as ‘low’ for S_{FVrel} , ‘moderate’ for S_{FV} and ‘high’ to ‘very high’ for all other variables when considering best trials (Table 2). Considering averaged trials (Table 3), relative test-retest reliability

Table 1. Relative and absolute inter-trial reliability of radar-derived mechanical variables from two 40 m on-ice forward sprint skating.

	Trial 1	Trial 2	p value	d; effect	ICC	CV (%)	Mean bias	± 95% LOA	SEM	SWC
F ₀ (N)	390 ± 51	391 ± 47	0.938	0.04; <i>trivial'</i>	0.78 (0.45–0.94)	5.9 (4.1–10.0)	1.73	79.86	12.28	8.02
F _{0rel} (N/kg)	5.47 ± 0.72	5.50 ± 0.67	0.902	0.05; <i>trivial'</i>	0.77 (0.43–0.93)	5.9 (4.1–10.0)	0.04	1.16	0.18	0.11
V ₀ (m/s)	8.12 ± 0.37	7.98 ± 0.32	0.375	0.39; <i>small'</i>	0.86 (0.57–0.96)	1.7 (1.2–3.0)	-0.13	0.40	0.06	0.06
P _{max} (W)	793 ± 129	783 ± 111	0.837	0.09; <i>trivial'</i>	0.87 (0.60–0.96)	5.3 (3.9–8.4)	-10.44	132.6	20.40	22.16
P _{maxrel} (W/kg)	11.14 ± 1.75	11.00 ± 1.53	0.832	0.09; <i>trivial'</i>	0.85 (0.53–0.96)	5.1 (3.6–9.0)	-0.15	1.97	0.30	0.30
S _{FVel} ((N.m)/s/kg)	-0.67 ± 0.08	-0.69 ± 0.08	0.597	0.23; <i>small'</i>	0.29 (0.02–0.81)	7.6 (5.3–13.0)	-0.02	0.20	0.03	0.01
S _{FV} ((N.m)/s)	-47.95 ± 5.29	-49.01 ± 5.44	0.651	0.20; <i>small'</i>	0.40 (0–0.79)	7.2 (5.0–13.0)	-1.06	11.94	1.83	0.64
V _{max} (m/s)	7.79 ± 0.35	7.67 ± 0.31	0.403	0.37; <i>small'</i>	0.91 (0.70–0.98)	1.4 (1.0–2.5)	-0.12	0.30	0.05	0.06
5 m (s)	1.60 ± 0.09	1.60 ± 0.09	0.956	0.02; <i>trivial'</i>	0.80 (0.41–0.94)	2.3 (1.6–4.0)	0.00	0.12	0.02	0.02
40 m (s)	6.55 ± 0.29	6.60 ± 0.26	0.678	0.18; <i>trivial'</i>	0.96 (0.86–0.99)	1.0 (0.7–1.8)	0.05	0.18	0.03	0.05

Mean ± SD values.

Note. d: Cohen' d effect size; ICC: intra-class correlation coefficient (lower–upper limit); CV: coefficient of variation (with confidence interval); LOA: limit of agreement (1.96 × SD); SEM: standard error of measurement; SWC: smallest worthwhile change. * Significantly different, $p < 0.05$.

Table 2. Relative and absolute test-retest reliability of radar-derived mechanicals variables from the best 40 m skating sprints.

	Best trial test	Best trial retest	p value	d; Effect	ICC	CV (%)	Mean bias	± 95% LOA	SEM	SWC
F ₀ (N)	397 ± 73	421 ± 94	0.508	0.29; 'small'	0.77 (0.34–0.93)	9.2 (6.4–16.0)	25.15	122.24	18.80	14.27
F _{0rel} (N/kg)	5.60 ± 1.00	5.91 ± 1.22	0.522	0.28; 'small'	0.76 (0.28–0.92)	9.2 (6.4–16.0)	0.31	1.79	0.28	0.18
V ₀ (m/s)	7.97 ± 0.48	8.02 ± 0.42	0.800	0.11; 'trivial'	0.84 (0.52–0.96)	1.8 (1.3–3.3)	0.05	0.54	0.08	0.08
P _{max} (W)	797 ± 180	848 ± 217	0.557	0.26; 'small'	0.86 (0.57–0.96)	8.6 (6.1–15.0)	50.57	226.84	34.89	36.29
P _{maxrel} (W/kg)	11.22 ± 2.44	11.91 ± 2.90	0.549	0.26; 'small'	0.84 (0.50–0.95)	8.7 (6.1–15.0)	0.69	3.33	0.51	0.48
S _{Fvel} ((N.m)/s/kg)	−0.69 ± 0.09	−0.73 ± 0.13	0.468	0.32; 'small'	0.43 (0.00–0.81)	8.9 (6.2–16.0)	−0.04	0.25	0.04	0.01
S _{Fv} ((N.m)/s)	−49.56 ± 7.26	−52.32 ± 10.46	0.484	0.31; 'small'	0.57 (0.00–0.86)	8.6 (6.1–15.0)	2.76	17.20	2.65	1.30
V _{max} (m/s)	7.73 ± 0.31	7.74 ± 0.38	0.912	0.05; 'small'	0.92 (0.73–0.98)	1.1 (0.8–1.1)	0.02	0.31	0.05	0.07
5 m (s)	1.60 ± 0.09	1.56 ± 0.12	0.161	−0.34; 'small'	0.77 (0.34–0.93)	3.3 (1.6–3.9)	−0.04	0.16	0.02	0.02
40 m (s)	6.57 ± 0.28	6.50 ± 0.39	0.259	−0.21; 'small'	0.86 (0.57–0.96)	1.9 (1.3–3.3)	−0.07	0.39	0.06	0.07

Mean ± SD values.

Note. d: Cohen' d effect size; ICC: intra-class correlation coefficient (lower—upper limit); CV: coefficient of variation (with confidence interval); LOA: limit of agreement (1.96 × SD); SEM: standard error of measurement; SWC: smallest worthwhile change. * Significantly different, $p < 0.05$.

Table 3. Relative and absolute test-retest reliability radar-derived mechanical variables from the average of two 40 m skating sprints.

	Average of the 2 trials test	Average of the 2 trials retest	p value	d; effect	ICC	CV (%)	Mean bias	± 95% LOA	SEM	SWC
F ₀ (N)	392 ± 47	408 ± 65	0.508	0.29; 'small'	0.88 (0.62–0.97)	5.2 (3.6–9.1)	16.05	60.91	9.37	10.46
F _{0rel} (N/kg)	5.50 ± 0.66	5.69 ± 0.80	0.552	0.26; 'small'	0.86 (0.55–0.96)	5.0 (3.5–8.8)	0.19	0.86	0.13	0.13
V ₀ (m/s)	8.04 ± 0.32	8.05 ± 0.39	0.949	0.03; 'trivial'	0.90 (0.68–0.97)	1.4 (1.1–2.3)	0.01	0.35	0.05	0.07
P _{max} (W)	790 ± 120	823 ± 160	0.591	0.24; 'small'	0.92 (0.73–0.98)	5.1 (3.6–9.0)	33.49	126.50	19.46	26.83
P _{maxrel} (W/kg)	11.08 ± 1.62	11.53 ± 2.06	0.578	0.25; 'small'	0.90 (0.68–0.97)	5.2 (3.6–9.1)	0.45	1.80	0.28	0.35
S _{Fvel} ((N.m)/s/kg)	-0.69 ± 0.07	-0.70 ± 0.08	0.663	0.19; 'trivial'	0.80 (0.41–0.94)	5.2 (3.6–9.1)	-0.01	0.10	0.02	0.01
S _{Fv} ((N.m)/s)	-48.64 ± 4.68	-50.54 ± 6.71	0.445	0.33; 'small'	0.79 (0.39–0.94)	4.0 (2.8–7.0)	1.90	8.03	1.23	1.00
V _{max} (m/s)	7.67 ± 0.46	7.72 ± 0.40	0.783	0.12; 'trivial'	0.88 (0.62–0.97)	1.6 (1.1–2.8)	0.05	0.46	0.07	0.08
5 m (s)	1.60 ± 0.14	1.58 ± 0.09	0.530	-0.18; 'small'	0.81 (0.48–0.95)	2.7 (1.9–4.6)	-0.02	0.22	0.03	0.03
40 m (s)	6.60 ± 0.47	6.53 ± 0.32	0.489	-0.19; 'trivial'	0.85 (0.45–0.97)	2.0 (1.4–3.4)	-0.07	0.69	0.10	0.08

Mean ± SD values.

Note. d: Cohen' d effect size; ICC: intra-class correlation coefficient (lower–upper limit); CV: coefficient of variation (with confidence interval); LOA: limit of agreement (1.96 × SD); SEM: standard error of measurement; SWC: smallest worthwhile change. * Significantly different, p < 0.05.

of all variables was considered as 'high' to 'very high'. All test-retest CVs were considered as 'acceptable' (< 10%), with higher CVs using the best vs. averaged trial. When considering the best trial, SEMs were lower or equal than SWC for V_0 , P_{\max} and V_{\max} , indicating a 'satisfactory' or 'good' test sensitivity. The other variables showed a 'marginal' test sensitivity. Only the S_{FVrel} and S_{FV} showed a high SEM (> 5% of the mean values). When considering the averaged value of the two trials, all SEMs (except S_{FVrel} and S_{FV}) were lower or equal than their respective SWCs indicating that all were of 'good' or 'satisfactory' test sensitivity. All SEMs values were low (< 5% of mean values). The mean bias between test and retest was 16.1 ± 31.1 N, 0.05 ± 0.23 m/s, 33.5 ± 64.5 W and 1.90 ± 4.10 (N.m)/s for F_0 , V_{\max} , P_{\max} and S_{FV} , respectively. For relative values, the mean bias between the test and retest was presented in Bland and Altman plots (Figure 2).

Discussion and implications

This study aimed to assess the feasibility to apply the method developed by Samozino et al. (2016) in the particular context of on-ice hockey skating sprint acceleration. After validating that the skating velocity describes a mono-exponential function, we assessed

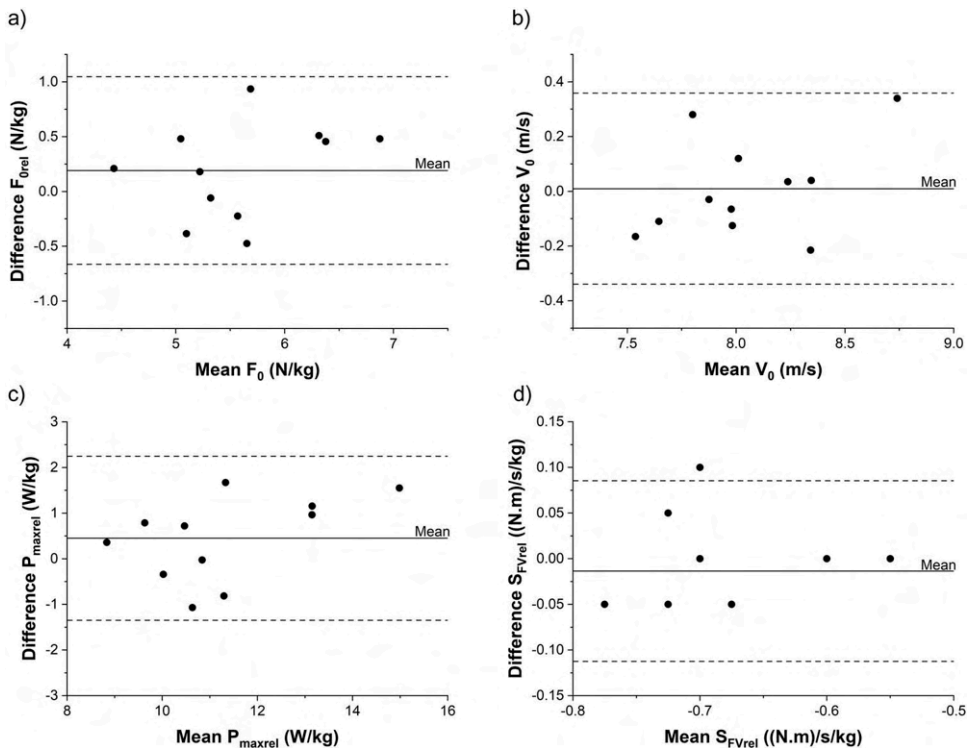


Figure 2. Bland and Altman plots of the averaged test and retest values for F_{0rel} (panel A), V_0 (panel B), P_{\maxrel} (panel C) and S_{FVrel} (panel D). Upper and lower horizontal dotted lines represent the 95% limits of agreement (mean \pm 1.96 SD of the difference between test and retest). Please note that two dots of the panel D plots (-0.775 ; -0.05) and (-0.675 ; -0.05) represent respectively two and three participants (identical values).

the relative and absolute reliability of radar-derived kinetic variables and force-velocity relationship measured during on-ice 40-m forward sprint skating in highly-trained female ice hockey players. All variables, except S_{FV} and S_{FVrel} ('low' to 'moderate' ICC), revealed 'acceptable' inter-trial and test-retest reliability (ICC ≥ 0.75 and CV $\leq 10\%$). Furthermore, test-retest reliability (ICC and CV) and sensitivity (SEMs \leq SWCs) were higher when considering averaged values from the two trials compared to the best trial only. Finally, the mean bias and the 95% LOA showed 'good' level of agreement for all parameters.

On-ice forward skating start, commonly named 'running motion' (*i.e.* the first 2–4 strides) (Lafontaine, 2007), elicits specific kinetic and kinematic patterns compared with running sprint standing starts (Pearsall et al., 2013; Renaud et al., 2017). Although there is more transverse and frontal plane motion in forward skating compared to running stride (Pearsall et al., 2013), our findings showed that the horizontal velocity-time curve of the centre of mass described the same mono-exponential function in both motor tasks (Di Prampero et al., 2005). As mentioned by Samozino et al. (2016), the biomechanical model exclusively focuses on the sagittal ground reaction force component that is considered as the most effective variable to move forward. Testing the reliability of a method is always a mixed effect of the participants' movement pattern and the method used itself. As such, improving the setting of the testing protocol and data processing tends to enhance method's reliability (Samozino, 2018). For example, Haugen, Breitschadel, and Samozino (2018) highlighted the importance of timing gate set up (*i.e.* type and position) to improve the reliability of the force-velocity-power profile assessment of sprinting athletes. Regarding the radar velocity data processing, Samozino (2018) advised to apply a 0.3 s delay in his fitted mono-exponential function (Equation (2)) in order to exclude the starting signal noise of the radar system and avoid any overestimation of F_0 and P_{max} . The application of this delay in our data processing is a possible explanation for the higher reliability reported in our study for F_{0rel} (ICC ranging 0.79–0.90) compared to those reported by Buchheit et al. (2014) (ICC = 0.64 in inter-trial reliability) or Simperingham et al. (2019) (ICC ranging 0.54–0.79 in inter-trial and test-retest reliability). Previous studies evaluating sprint skating in ice hockey players have reported some differences in the acceleration phase between high- and low-calibre skaters (Buckeridge et al., 2015; Renaud et al., 2017). Such differences may be related to a higher rate of force development, thereby resulting in greater mechanical power output during the initial accelerative strides. Therefore, an accurate estimation of F_0 is crucial because this mechanical variable and the maximal RF value appear to be determinant for the acceleration phase (*i.e.* up to 20 m). These variables showed a strong relationship with time splits of shorter sprints (Buchheit et al., 2014; Morin & Samozino, 2016) as it could be observed in sports requiring many changes in direction. In this view, the ability to start quickly and apply an important F_0 in the shortest period of time with the smallest friction on the ice (Houdijk, de Koning, de Groot, Bobbert, & van Ingen Schenau, 2000; Shell et al., 2017) is probably the most relevant skating skill to reach the highest horizontal velocity (Marino, 1995).

Monitoring changes in acceleration and sprint performance requires reliable methods, particularly in highly-trained athletes who exhibit lower potential of progress than

sedentary or recreationally active individuals. In most cases, coaches require multiple sprints performance to detect the best trial or calculate the averaged sprint time for a given test (Bond et al., 2018). Accordingly, it has been shown that using a multiple sprints test improves the reliability and decreases the ‘signal-to-noise’ ratio (Haugen & Buchheit, 2016). However, Morin and Samozino (2016) have demonstrated that it is possible to reproduce the same sprinting performance with different force-velocity profile during sprint running. Here, we reported ‘high’ to ‘very high’ inter-trial and test-retest reliability for almost all variables. Only S_{FV} (ICC: 0.40; CV: $7.2 \pm 5.1\%$) and S_{FVrel} (ICC: 0.29; CV: $7.6 \pm 6.7\%$) reported in the present study contrast with the higher inter-trial reliability reported by Samozino et al. (2016) (*i.e.* CV: $4.0 \pm 2.7\%$; 50-m running with high-level sprinters) and Buchheit et al. (2014) (*i.e.* ICC: 0.88; 40-m running with highly-trained young soccer players). Keeping in mind that the reliability evaluated in the present study is the mixed effect of the participants’ movement pattern and the method used, these differences could be explained by the age of our players and probably to a ‘low sprint experience’. For the test-retest reliability, when considering the best trial observed for S_{FV} and S_{FVrel} (ICC: 0.57, CV: $8.6 \pm 6.8\%$ and ICC: 0.43, CV: $8.9 \pm 9.3\%$, respectively), our results were lower than the ICC (0.71 for both variables) recently reported during short distance (30 m) sprint running accelerations (Simperingham et al., 2019) but with a closer CV (8.5% for both variables). However, averaging values from two trials tended to improve the test-retest reliability (ICC 0.79 and 0.80, respectively for S_{FV} and S_{FVrel} vs. 0.74 for both variables) as reported by Simperingham et al. (2019). Therefore, we advise practitioners to average two trials to use S_{FV} and S_{FVrel} in order to monitor training-induced changes (*e.g.* force or velocity dominant) in force-velocity-power profile in ice hockey skating.

Whilst the average high-intensity skating distance is relatively low during an ice hockey game (*i.e.* 15–16 m) (Lignell et al., 2018) peak velocity can reach ≥ 11 m/s (Merk, 2018). Such high-intensity activities can be frequently repeated, accounting for $\sim 18\%$ of the total effective playing time (Brocherie et al., 2018). In comparison with F_0 measured in other team-sport female players (*i.e.* 6.3 to 7.3 N/kg) (Jiménez-Reyes et al., 2019; Marcote-Pequeno et al., 2019; Rakovic, Paulsen, Helland, Eriksrud, & Haugen, 2018), F_0 of the players measured on-ice (5.9 ± 1.2 N/kg) appeared to be lower. This low F_0 associated to the high on-ice V_0 (8.02 ± 0.42 m/s) tends to decrease S_{FVrel} (-0.73 ± 0.13 (N.m)/s/kg) compared to those obtained in running conditions (-0.78 to -0.87 (N.m)/s/kg) (Jimenez-Reyes et al., 2019). Such velocity-dominant slope seems to be specific to the force-velocity-power profile observed in ice hockey sprint skating. Further studies with larger samples of individuals, different genders, playing positions and standards are warranted to verify this assumption.

Several limitations should be kept in mind when interpreting the data from the present study. Firstly, the low sample size precludes any general conclusions as relative reliability results are particularly dependant on the number of participants (Hopkins, 2000). While the playing experience is suitable, as previously stated, the female ice hockey players who participated to the present study possibly had a ‘low skating sprint experience’ resulting from minimal structured skating velocity training experience or technical proficiency. However, we assume that the reliability should be greater with male and female ice hockey players of higher playing standards. Future studies should therefore intend to investigate the reliability considering elite level population. Another point to mention

relates to the application of simplified inverse dynamic approach which only consider the movement kinetics in the sagittal plan and not in the frontal and transverse plan. Although this method appears convenient to *in situ* conditions, this warrants further investigation using more conventional mechanical approaches.

From a practical viewpoint, skating kinetics and force-velocity-power relationship could be measured and computed during on-ice 40-m forward sprint skating task from simple and easily collectable variables (*i.e.* body mass, stature and instantaneous velocity). This novel on-ice force-velocity-power profiling model appears convenient for an ecological use by sport practitioners to determine individual profile and prescribe adequate training program (*e.g.* force or velocity dominant). Further, this approach yields new insights into the understanding of ice hockey skating biomechanics. For example, the technical capability would complement the force-velocity-power profile to characterise the acceleration phase of the forward sprint skating, well known to discriminate high- and low-calibre ice hockey players (Buckeridge et al., 2015; Renaud et al., 2017).

Conclusion

The current study indicates that radar-derived kinetics variables assessed during on-ice 40-m forward sprint skating demonstrate an acceptable level of relative and absolute reliability. Averaging trials should be recommended over the use of the best trial only to improve the reliability of forward skating force, velocity and power measurements. These findings offer a promising and simple method to monitor training-induced changes in macroscopic mechanical variables of ice hockey skating. Further studies comparing on-ice *vs.* off-ice mechanical variables and force-velocity profile would be relevant to better understand skating performance. Such investigations could provide practical insights to optimise transfer from off-ice training to on-ice performance.

Acknowledgments

The authors would like to thank the French Federation of Ice Hockey and the players of the French women's national training centre for their involvement in the experimentation. They also expressed their gratitude to Jean-Baptiste Chauvin, manager of the team for his helpful collaboration.

Disclosure statement

The Laboratory Sport, Expertise and Performance is a partner of the French network for Injury and Illness Research in Sport (FIIRST), recognized as a Research Centre for the Prevention of Injury and Illness and the Protection of Athletes by the International Olympic Committee (IOC). As a member of the IOC Medical Research Network, FIIRST has received funding from the IOC to establish long-term research programmes on the prevention of injuries and illnesses in sport for the protection of athlete health.

ORCID

Gaël Guilhem  <http://orcid.org/0000-0002-0377-2060>

Franck Brocherie  <http://orcid.org/0000-0002-0808-7986>

References

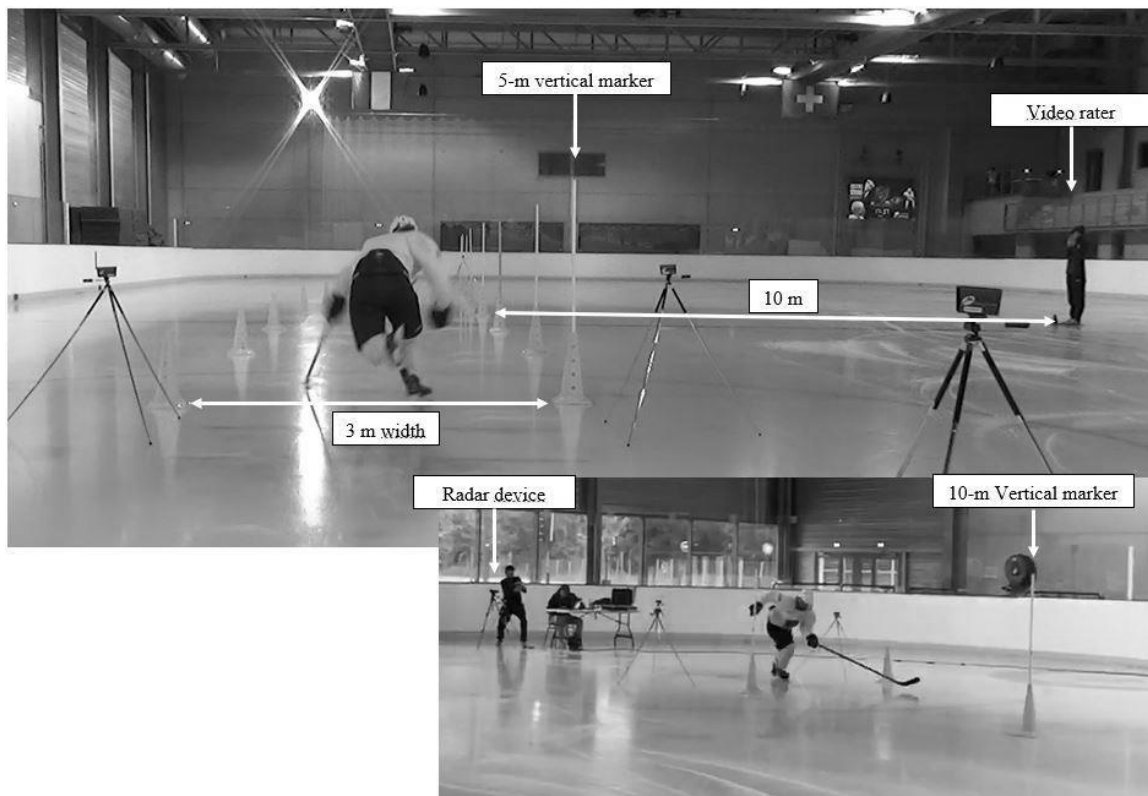
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26, 217–238. doi:10.2165/00007256-199826040-00002
- Bond, C. W., Bennett, T. W., & Noonan, B. C. (2018). Evaluation of skating top speed, acceleration, and multiple repeated sprint speed ice hockey performance tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32, 2273–2283. doi:10.1519/JSC.0000000000002644
- Bracko, M. R. (2004, September). Biomechanics powers ice hockey performance. *Biomechanics*, 47–53.
- Brocherie, F., Girard, O., & Millet, G. P. (2018). Updated analysis of changes in locomotor activities across periods in an international ice hockey game. *Biology of Sport*, 35, 261–267. doi:10.5114/biolsport.2018.77826
- Buchheit, M., Samozino, P., Glynn, J. A., Michael, B. S., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., & Morin, J. B. (2014). Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 32, 1906–1913. doi:10.1080/02640414.2014.965191
- 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, e0127324. doi:10.1371/journal.pone.0127324
- Budarick, A. R., Shell, J. R., Robbins, S. M. K., Wu, T., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. (2018). Ice hockey skating sprints: Run to glide mechanics of high calibre male and female athletes. *Sports Biomechanics*, 1–17. doi:10.1080/14763141.2018.1503323
- Couderc, A., Gabbett, T. J., Piscione, J., Robineau, J., Peeters, A., Igarza, G., ... Lacombe, M. (2019). Repeated high-intensity effort activity in international male rugby sevens. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi:10.1519/JSC.0000000000002986
- Di Prampero, P. E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J. B., Belli, A., & Antonutto, G. (2005). Sprint running: A new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, 208, 2809–2816. doi:10.1242/jeb.01700
- Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., & Abernethy, B. (2012). Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15, 80–86. doi:10.1016/j.jsams.2011.07.004
- Haugen, T., Breitschadel, F., & Samozino, P. (2018). Power-force-velocity profiling of sprinting athletes: Methodological and practical considerations when using timing gates. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi:10.1519/JSC.0000000000002890
- Haugen, T., & Buchheit, M. (2016). Sprint running performance monitoring: Methodological and practical considerations. *Sports Medicine*, 46, 641–656. doi:10.1007/s40279-015-0446-0
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 30, 1–15. doi:10.2165/00007256-200030010-00001
- Hopkins, W. G. (2004). How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*, 8, 1–7. Retrieved from <http://www.sportsci.org/jour/04/wghtests.htm>
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41, 3–13. doi:10.1249/MSS.0b013e31818cb278
- 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 & Science in Sports & Exercise*, 32, 635–641. doi:10.1097/00005768-200003000-00013

- Jimenez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Cuadrado-Penañiel, V., Parraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2019). Differences in sprint mechanical force-velocity profile between trained soccer and futsal players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 478–485. doi:10.1123/ijsp.2018-0402
- Jiménez-Reyes, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., Párraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2019). Differences in sprint mechanical force-Velocity profile between trained soccer and futsal players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 478–485. doi:10.1123/ijsp.2018-0402
- Lafontaine, D. (2007). Three-dimensional kinematics of the knee and ankle joints for three consecutive push-offs during ice hockey skating starts. *Sports Biomechanics*, 6, 391–406. doi:10.1080/14763140701491427
- Lexell, J. E., & Downham, D. Y. (2005). How to assess the reliability of measurements in rehabilitation. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 84, 719–723. doi:10.1097/01.phm.0000176452.17771.20
- Lignell, E., Fransson, D., Krustup, P., & Mohr, M. (2018). Analysis of high-intensity skating in top-class ice hockey match-play in relation to training status and muscle damage. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32, 1303–1310. doi:10.1519/JSC.0000000000001999
- Marcote-Pequeno, R., Garcia-Ramos, A., Cuadrado-Penañiel, V., Gonzalez-Hernandez, J. M., Gomez, M. A., & Jimenez-Reyes, P. (2019). Association between the force-velocity profile and performance variables obtained in jumping and sprinting in elite female soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 209–215. doi:10.1123/ijsp.2018-0233
- Marino, G. W. (1995, July). *Biomechanics of power skating: Past research, future trends*. Paper presented at the 13th International Symposium for Biomechanics in Sports, Thunder Bay, Canada, 246–252.
- Merk, M. (2018, May 17). Stats you've never seen before! Retrieved from <https://www.iihf.com/en/events/2018/wm/news/3150/stats-you-have-never-seen-before>
- Morin, J. B., Edouard, P., & Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43, 1680–1688. doi:10.1249/MSS.0b013e318216ea37
- Morin, J. B., Jeannin, T., Chevallier, B., & Belli, A. (2006). Spring-mass model characteristics during sprint running: Correlation with performance and fatigue-induced changes. *International Journal of Sports Medicine*, 27, 158–165. doi:10.1055/s-2005-837569
- Morin, J. B., & Samozino, P. (2016). Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11, 267–272. doi:10.1123/ijsp.2015-0638
- Pearsall, D., Turcotte, R., Levangie, C., & Forget, S. (2013). Biomechanical adaptation in ice hockey skating. In H. Youlian (Ed.), *Routledge handbook of ergonomics in sport and exercise* (pp. 51–60). Abingdon: Routledge. doi:10.4324/9780203123355.ch4
- Pearsall, D., Turcotte, R., & Murphy, S. (2000). Biomechanics of ice hockey. In W. E. Garrett & D. T. Kirkendall (Eds.), *Exercise and sport science* (Vol. 43, pp. 675–692). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Saez-de-Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25, 583–594. doi:10.1111/sms.12389
- Rakovic, E., Paulsen, G., Helland, C., Eriksrud, O., & Haugen, T. (2018). The effect of individualised sprint training in elite female team sport athletes: A pilot study. *Journal of Sports Sciences*, 36, 2802–2808. doi:10.1080/02640414.2018.1474536
- Renaud, P. J., Robbins, S. M. K., Dixon, P. C., Shell, J. R., Turcotte, R. A., & Pearsall, D. J. (2017). Ice hockey skate starts: A comparison of high and low calibre skaters. *Sports Engineering*, 20, 255–266. doi:10.1007/s12283-017-0227-0

- Robbins, S. M., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. (2018). Principal component analysis identifies differences in ice hockey skating stride between high- and low-calibre players. *Sports Biomechanics*, 1–19. doi:[10.1080/14763141.2018.1524510](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1524510)
- Samozino, P. (2018). A simple method for measuring force, velocity and power capabilities and mechanical effectiveness during sprint running. In J.-B. Morin & P. Samozino (Eds.), *Biomechanics of training and testing: Innovative concepts and simple field methods* (pp. 237–267). Cham: Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-319-05633-3_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05633-3_11)
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin, J. B. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26, 648–658. doi:[10.1111/sms.12490](https://doi.org/10.1111/sms.12490)
- Shell, J. R., Robbins, S. M. K., Dixon, P. C., Renaud, P. J., Turcotte, R. A., Wu, T., & Pearsall, D. J. (2017). Skating start propulsion: Three-dimensional kinematic analysis of elite male and female ice hockey players. *Sports Biomechanics*, 16, 313–324. doi:[10.1080/14763141.2017.1306095](https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1306095)
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., Pearson, S. N., & Ross, A. (2019). Reliability of horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports Biomechanics*, 18, 88–99. doi:[10.1080/14763141.2017.1386707](https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1386707)
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., & Ross, A. (2016). Advances in sprint acceleration profiling for field-based team-sport athletes: Utility, reliability, validity and limitations. *Sports Medicine*, 46, 1619–1645. doi:[10.1007/s40279-016-0508-y](https://doi.org/10.1007/s40279-016-0508-y)
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: Specific to field-based team sports. *Sports Medicine*, 35, 1025–1044. doi:[10.2165/00007256-200535120-00003](https://doi.org/10.2165/00007256-200535120-00003)
- Stidwill, T. J., Pearsall, D., & Turcotte, R. (2010). Comparison of skating kinetics and kinematics on ice and on a synthetic surface. *Sports Biomechanics*, 9, 57–64. doi:[10.1080/14763141003690237](https://doi.org/10.1080/14763141003690237)
- Upjohn, T., Turcotte, R., Pearsall, D. J., & Loh, J. (2008). Three-dimensional kinematics of the lower limbs during forward ice hockey skating. *Sports Biomechanics*, 7, 206–221. doi:[10.1080/14763140701841621](https://doi.org/10.1080/14763140701841621)
- van der Kruk, E., Reijne, M. M., de Laat, B., & Veeger, D. (2018). Push-off forces in elite short-track speed skating. *Sports Biomechanics*, 1–12. doi:[10.1080/14763141.2018.1441898](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1441898)
- van der Kruk, E., Schwab, A. L., van der Helm, F. C. T., & Veeger, H. E. J. (2018). Getting in shape: Reconstructing three-dimensional long-track speed skating kinematics by comparing several body pose reconstruction techniques. *Journal of Biomechanics*, 69, 103–112. doi:[10.1016/j.jbiomech.2018.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.01.002)
- van der Kruk, E., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., & Schwab, A. L. (2018). Power in sports: A literature review on the application, assumptions, and terminology of mechanical power in sport research. *Journal of Biomechanics*, 79, 1–14. doi:[10.1016/j.jbiomech.2018.08.031](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.08.031)

Étude #3

L'UTILISATION DE LA VIDÉO HAUTE-FRÉQUENCE ENTRAÎNE UNE ESTIMATION TRONQUÉE DU PROFIL FORCE-VITESSE EN PATINAGE COMPARÉE A L'UTILISATION DU RADAR



Publication associée :

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. Truncated estimation of skating force-velocity profiling when using high-speed video-based methods compared to radar-derived processing. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology Biomechanics*. **Under review.**

1 **Truncated estimation of skating force-velocity profiling when using high-speed video-**
2 **based methods compared to radar-derived processing.**

3

4 Jerome Perez^{1,2}, Gaël Guilhem¹, Franck Brocherie¹

5 ¹ French Institute of Sport (INSEP), Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370),
6 Paris, France

7 ² French Ice Hockey Federation, Cergy, France.

8

9 **Correspondence:**

10 Jerome PEREZ
11 Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370),
12 French Institute of Sport (INSEP)
13 11, Avenue du Tremblay
14 75012 Paris
15 France
16 Phone: +33 (0)1 41 74 43 54
17 Email: jerome.perez@insep.fr

18

19 **Abstract**

20 This study aimed to compare the force-velocity biomechanical variables derived from high-
21 speed video- and radar-based method during forward skating sprint in ice hockey. Thirteen elite
22 female ice hockey players performed two 40-m forward skating sprints to determine, in the
23 horizontal plane, maximal velocity reached, relative maximal theoretical force, maximal
24 theoretical velocity, relative maximal power, linear slope of the force-velocity relationship,
25 maximal value of the ratio of force and index of force application technique. Two different
26 high-speed video-based methods adding a time shift (ST-TS) or not (ST) were used and
27 independently compared to the radar-derived method. ST and ST-TS showed significant mean
28 differences (all $p < 0.002$) compared to radar-derived processing for all variables except for
29 maximal theoretical velocity ($p = 0.26$) and maximal velocity reached ($p = 0.13$) inferred from
30 ST. In reference to radar-derived variables, ST-TS significantly induced *largely* lower values
31 compared to radar of the main forward skating sprint determinants (force and power variables)
32 and *moderate-to-large* overestimation for velocity variables. Correlations between ST or ST-
33 TS and radar-derived methods ranged from *trivial* for velocity variables to *very large* for force
34 and power variables. Consequently, practitioners must be aware that using such high-speed
35 video-based methods would permit to determine biomechanical variables at the cost of much
36 lower accuracy and reliability than the radar-derived method.

37

38 **Keywords:** biomechanics, team sport, assessment, testing, skating

39 Introduction

40 Horizontal force, power output and acceleration achieved during forward skating sprint are key
41 determinants of ice hockey performance (Pearsall et al., 2013; Perez et al., 2020). Recently, the
42 application of the force-velocity (FV) profiling during forward skating has been proposed using
43 either *in situ* radar-derived (Perez et al., 2019; Perez et al., 2020) or high-speed video-based
44 (Stenroth et al., 2020) measurements with potential practical applications for training
45 individualization and monitoring (Morin and Samozino, 2016; Jimenez-Reyes et al., 2019;
46 Jimenez-Reyes et al., 2020).

47 Unfortunately, on-ice conditions do not allow the use of gold standard methods (*i.e.* force
48 plates) to clearly determine concurrent validity for both methods. Several studies have reported
49 acceptable validity of running sprint-related velocity-time curve inferred from radar device
50 (Simperingham et al., 2016) and its derived mechanical variables (Samozino et al., 2016).
51 Potential limitations (*i.e.*, change in sprinting posture during the first few steps) that could affect
52 measurements validity (Bezodis et al., 2012) has been successfully corrected by shifting the
53 measures by a 0.3 s time delay to not overestimate force and power measurements (Samozino,
54 2018). As previously mentioned, this method has been successfully applied to skating sprints
55 (Perez et al., 2019). While one may argue that such method requires specific data processing, it
56 allows practitioners to accurately assess mechanical determinants of forward skating sprint such
57 as relative maximal theoretical horizontal force (F_0), power (P_{max}) and the maximal ratio of the
58 horizontal component of the ground-reaction force to the corresponding resultant force (RF_{max})
59 (Perez et al., 2020). Recently, Stenroth et al. (2020) adapted an elegant alternative method based
60 on the measurement of split time (ST method) with high-speed video (*i.e.*, 240 frames per
61 second) primarily developed to assess FV profiling during running sprint (Romero-Franco et
62 al., 2017). This procedure, adding a time shift (ST-TS method), has been proposed in the context
63 of ice skating in order to easily determine on-ice forward skating sprint mechanical variables.
64 On the one hand, this approach uses low-cost handling tools more accessible to practitioners.
65 On the other hand, Stenroth et al. (2020) reported substantial bias when skating sprint
66 mechanical variables are inferred from this alternative procedure – especially during the
67 acceleration phase (F_0 , P_{max} and RF_{max}) – compared to the data obtained using a continuous
68 video tracking. For instance, inter-trial reliability, determined with intra-class correlation
69 coefficients (ICCs), of high-speed video-based method appears to be lower to those reported
70 using radar-derived method for maximal theoretical velocity (V_0 ; ICCs ranging from 0.198 to
71 0.343 *vs.* 0.86, respectively) and maximal velocity (V_{max}) reached during skating sprint (ICCs
72 ranging from 0.497 to 0.596 *vs.* 0.91, respectively) (Perez et al., 2019). In addition, while
73 Stenroth et al. (2020) suggested to analyse only the fastest trial, several running- and skating-
74 based studies showed that averaging sprint trials improve the reliability (Perez et al., 2019;
75 Simperingham et al., 2019).

76 This study therefore aimed to compare the force-velocity mechanical variables derived from
77 high-speed video- and radar-based method during on-ice forward skating sprint in ice hockey.
78 In line with the results from Stenroth et al. (2020) showing significant differences between two
79 different video-based methods (ST-TS and continuous tracking), we hypothesised that
80 significant differences would be found between the high-speed video-based methods and the
81 radar-derived method, the latter remaining the preferred approach to infer FV-related
82 mechanical variable.

83

84 Method

85 *Participants*

86 Thirteen elite female ice hockey players of the French national team (mean \pm SD: age, 21.0 \pm
87 3.2 years; height, 1.65 \pm 0.10 m; body mass, 64.8 \pm 10.1 kg; playing experience, 14.3 \pm 3.1
88 years) participated in this study. They were free from any musculoskeletal injury of the lower
89 limb during the three months preceding data collection. All participants received a clear
90 explanation of the experimental procedure and informed written consent were obtained from
91 all participants and from their legal guardians when participants were minors. The protocol was
92 integrated in the regular training of the players and was approved by ethics committee Ouest
93 IV in accordance with the Declaration of Helsinki.

94 *Experimental design*

95 Forward skating sprint FV profile was determined during the pre-season training camp of the
96 national team as described elsewhere (Perez et al., 2020). Players were instructed to wear their
97 full ice hockey equipment and were weighed (72.6 \pm 9.4 kg fully equipped) before the testing
98 session. The study compared mechanical variables determined using two high-speed video-
99 based methods (ST and ST-TS) (Romero-Franco et al., 2017; Stenroth et al., 2020) and those
100 obtained using the radar-derived method (Perez et al., 2019) for the same forward skating sprint
101 for each player. ST method has been validated by Romero-Franco et al. (2017) during running
102 sprint and designed into a spreadsheet by Morin and Samozino (2019). ST-TS method was
103 recently developed by Stenroth et al. (2020) which added an optimised parameter in the context
104 of forward skating sprint, named time shift, to the original method (Romero-Franco et al.,
105 2017). This ST-TS approach aimed to remove uncertainty in identifying the onset of horizontal
106 force generation by changing the duration of the first-time interval while maintaining the
107 differences between other split times.

108 *Testing procedures*

109 Players had a general warm-up of 15 min including skating skills and three progressive 40-m
110 forward skating sprints at self-perceived increasing skating velocity, as previously detailed
111 (Perez et al., 2019). Then, players performed two on-ice (\sim 10 °C ambient temperature and
112 \sim 75% relative humidity) 40-m maximal forward skating sprints interspersed by 4 min of
113 passive rest. Players started from a standing straight position with skates' blades positioned in
114 a "V" stance and skated as fast as possible while holding their stick, mimicking in-game skating.
115 Trials were assessed by recording each sprint using a radar device (Stalker ATS II; Applied
116 Concepts, Plano, TX, USA) and a high-speed camera (iPhone 6, Apple Inc., USA, framerate
117 240 frames per second, resolution 720 pixels). Instantaneous horizontal velocity (V_h , in $m \cdot s^{-1}$)
118 was measured by the radar device at a 47 Hz sampling frequency. The radar was located 3.5 m
119 behind the starting line at a height of 1 m from the ice surface, corresponding approximatively
120 to the average height of players' centre of mass (Samozino, 2018; Perez et al., 2019; Perez et
121 al., 2020). Meanwhile, to record the video of each sprint, the camera was held by the same
122 practitioner at a height of 1.5 m (in the frontal plane) and positioned at 20 m from the starting
123 line and at 11.5 m from the skating line (Samozino, 2018). The practitioner moved the camera
124 around itself in order to film the sprint from the side and register the entire sprint. According to
125 Romero-Franco et al. (2017) and using Thales theorem, video parallax was corrected to ensure
126 5-, 10-, 15-, 20-, 25-, 30-, 35- and 40-m split times were measured properly (Figure 1). The
127 correction of the parallax was done by positioning the different markers (*i.e.*, vertical markers)
128 not exactly at the associated distances (*i.e.*, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 m from the starting
129 line), but at adjusted positions so that the players were filmed to cross the markers with their
130 hip when they were exactly at these targeted distances (*i.e.*, to correct for the parallax error, the
131 markers positions were respectively positioned at 6.96, 11.30, 15.65, 20.00, 24.35, 28.70, 33.04
132 and 37.39 m from the start line). Skating line was parallel to the line of the markers with a 1.5
133 m average separation between the lines.

134 **Data processing**

135 Radar raw data acquisitions were saved on Stalker ATS System™ software (Version 5.0.3.0,
 136 Applied Concepts, Inc, Texas, USA) and imported to a custom-made Origin script (Version
 137 8.0, OriginLab Corporation, USA) to model mechanical variables from the V_h -time curve data
 138 set (Figure 1) (Perez et al., 2019). F_0 (in $N.kg^{-1}$), V_0 (in $m.s^{-1}$), relative maximal horizontal
 139 power P_{max} (in $W.kg^{-1}$), slope of the linear relationship between force expressed relatively to
 140 body mass and velocity (FV slope, in $N.m.kg^{-1}.s^{-1}$), maximal ratio of force (RF_{max} , in %) and
 141 index of force application technique (Drf , in %) were determined.

142 Considering the ST and ST-TS methods, only one rater performed the analysis. Kinovea
 143 software (Version 0.8.26, 2017) was used to measure the split times by manually selecting the
 144 frames in which the players passed the markers with their hip. Spreadsheets designed by Morin
 145 and Samozino (2019) and Stenroth et al. (2020) were used to calculate FV profile and sprint
 146 mechanical variables using ST and ST-TS methods, respectively. Position of the player was
 147 modelled as a function of time with the equation (1) for ST (Morin and Samozino, 2019) and
 148 equation (2) for ST-TS adding the time shift parameter c (Stenroth et al., 2020).

$$149 \quad x(t) = v_{max} \times (t + \tau e^{-t/\tau}) - v_{max} \times \tau \quad (1)$$

$$150 \quad x(t) = v_{max} \times (t + c + \tau e^{-(t+c)/\tau}) - v_{max} \times \tau \quad (2)$$

151

152 Constant maximal velocity (V_{max} , plateau of the velocity) and τ (acceleration time constant)
 153 were found using built-in solver function of Excel (Microsoft Corporation, Redmond,
 154 Washington, United States) (Figure 1). The solver was set to minimise the sum of squared
 155 differences between the modelled and actual positions of the player by altering the constants.
 156 A non-linear generalised reduced gradient algorithm was used as the solving method. After
 157 estimating V_{max} and τ , all mechanical variables from the FV relationship could be modelled
 158 after integration:

$$159 \quad V_h(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3)$$

$$160 \quad F_h(t) = m \times a_h(t) + F_{aero} \quad (4)$$

161 where F_h (in N) is the net horizontal antero-posterior of the ground reaction force, m (in kg) is
 162 the system mass which included full ice hockey equipment during the on-ice measures and F_{aero}
 163 (in N) is the resistance due to aerodynamic friction force. Mean net horizontal antero-posterior
 164 power output (P_h , in W) was then modelled at each instant as the product of F_h and V_h :

$$165 \quad P_h(t) = F_h(t) \times V_h(t) \quad (5)$$

166

167 In order to synchronise the two devices, the start of the skating sprint was determined as the
 168 moment in which there is the first movement of the player detected by visual inspection with
 169 high-speed video and the centre-of-mass velocity above an arbitrary speed of $0.2 m.s^{-1}$ for the
 170 radar (Romero-Franco et al., 2017). A total of 21 skating sprints were analysed individually.

171 **Statistical analysis**

172 All data were analysed using custom written scripts (Origin 2020, OriginLab Corporation,
 173 Northampton, MA) and expressed as mean \pm standard deviation (SD). Statistical significance
 174 was set at $p < 0.05$. Normality was confirmed using the Shapiro-Wilk test. To investigate

175 systematic bias (mean differences), a paired sample t-test was conducted between the same
 176 mechanical variables inferred from ST, ST-TS and radar-derived methods. The level of
 177 concordance between ST, ST-TS and radar-derived methods was estimated by the Bland and
 178 Altman plots (Bland and Altman, 2010) with a 95 % limit of agreements (95 % LoA, mean
 179 bias; mean difference, ± 1.96 SD). The Cohen's d scale was used to interpret the effect sizes
 180 (Hopkins et al., 2009). To determine the inter-method relative reliability of computed variables,
 181 ICCs were calculated (Hopkins et al., 2009). Pearson's product-moment correlation analysis
 182 was used to determine the relationship between the same mechanical variables derived from
 183 ST, ST-TS and radar-derived methods (Hopkins et al., 2009). The typical error of the estimate
 184 (TEE) (95 % confidence intervals, 95 % CI) was calculated and standardised for the purpose of
 185 interpretation (Hopkins, 2000).

186

187 **Results**

188 The mean time shift parameter (c) of the ST-TS method for all the player was 0.268 ± 0.053 s.
 189 ST and ST-TS showed significant mean differences compared to radar for all variables except
 190 for V_0 ($p = 0.26$) and V_{\max} ($p = 0.13$) inferred from ST (Table 1). For F_0 , V_0 , P_{\max} and V_{\max} , the
 191 mean bias between ST, ST-TS and radar-derived methods were displayed as Bland and Altman
 192 plots (Figure 2). Bias and random errors for the other variables were reported in Tables 1 and
 193 2. ST showed a negative *small-to-moderate* difference compared to radar for all variables
 194 except for FV slope (positive *moderate* difference) (Table 1). ST-TS showed even *largely* lower
 195 values for F_0 , P_{\max} , RF_{\max} and Drf variables and *moderate-to-large* higher values for V_0 , FV
 196 slope and V_{\max} variables compared to radar (Table 2). Relative reliability (ICC) was *moderate-*
 197 *to-high* for F_0 , P_{\max} and RF_{\max} for both ST and ST-TS while other variables were *very low-to-*
 198 *low* (Tables 1 and 2). Correlations between ST or ST-TS and radar ranged from *trivial* for V_{\max}
 199 and V_0 to *very large* for F_0 (only for ST-TS), P_{\max} and RF_{\max} (Tables 1 and 2). TEE was *small*
 200 for P_{\max} to *very large* for V_0 , Drf and V_{\max} for ST (Table 1) and ranged from *moderate* for F_0 ,
 201 P_{\max} and RF_{\max} to *very large* for all other variables for ST-TS (Table 2).

202

203 **Discussion**

204 This present study demonstrated that, comparatively to radar-derived processing, both high-
 205 speed video-based methods underestimated the force and power variables (*i.e.*, F_0 , P_{\max} , RF_{\max} ,
 206 and Drf , *small-to-large* differences), while velocity (*i.e.* V_0 and V_{\max}) and FV slope variables
 207 were *moderately-to-largely* overestimated by ST-TS method only. Furthermore, although
 208 mechanical variables derived from ST appeared to be more accurate than ST-TS, high-speed
 209 video-based methods seemed to be less accurate with *small-to-large* mean differences
 210 depending on variables compared to the measures obtained from the radar.

211 In line with Stenroth et al. (2020), our findings showed that the implementation of time shift in
 212 velocity data processing (ST-TS) induced a significant ($p < 0.001$) and *large* (d ranging from
 213 1.62 to 1.74) underestimation (from -24 to -46% on average) of the main determinants of
 214 forward skating sprint performance (*i.e.*, F_0 , P_{\max} , RF_{\max} , and Drf variables) when compared to
 215 radar-derived data processing (Perez et al., 2020). While significant differences between ST
 216 and radar ($p \leq 0.002$) were also observed with a *moderate* effect size (d ranging 0.81-0.98),
 217 using original ST (Romero-Franco et al., 2017) appeared to reduce, but not fully remove, the
 218 underestimation of the main determinants of forward skating sprint performance observed for
 219 ST-TS (from -7 to -13%). Additionally, ST tended to improve the ICCs compared to ST-TS,
 220 especially for F_0 , P_{\max} , RF_{\max} , and Drf variables (0.34-0.87 vs. 0.18-0.78). Finally, our results

221 showed that both F_0 , P_{\max} and RF_{\max} high-speed video-derived measures showed significant
222 *large-to-very large* correlations (r ranging from 0.68 to 0.88) with those derived from the radar-
223 derived method. However, these results (large range and $r < 0.9$) do not allow to clearly consider
224 these methods as accurate as the reference radar-based method.

225 In their study, Stenroth et al. (2020) measured sprint skating velocity over a 30-m. Budarick et
226 al. (2018) showed that this distance may not allow ice hockey players to reach their ultimate
227 maximum velocity as acceleration was still positive at 34 m. The achievement of V_{\max} is a
228 prerequisite to reliably build the FV relationship during forward skating sprint inferred from
229 the mono-exponential modelling of the velocity-time curve (Samozino et al., 2016; Perez et al.,
230 2019). It is therefore unlikely that a 30-m distance may be consistently long enough for ice
231 hockey players to reach their V_{\max} (Perez et al. 2020). This setup could thus induce higher
232 variability in measured peak velocity compared to longer sprint distance and partly explain the
233 difference in V_{\max} measurement. In line with the findings of Stenroth et al. (2020), we observed
234 a significant overestimation of V_0 and V_{\max} assessed over 40 m using ST-TS compared to radar,
235 leading to higher differences in FV slope. This overestimation could be mainly attributed to the
236 added time shift parameter, which has been shown to lower the curvature of the velocity-time
237 relationship (Stenroth et al., 2020). Considering ST, V_0 and V_{\max} were not significantly different
238 compared to the radar-derived measures with a *small* difference (d ranging 0.37 and 0.47,
239 respectively). Importantly, V_0 and V_{\max} variables inferred from both high-speed video-based
240 methods showed *very large* TEEs (12.00-23.90), *very low* ICCs (0.01-0.10) and no correlations
241 (r ranging from 0.04 to 0.08) compared to the same radar-derived variables. These results
242 confirm that the assessment of instantaneous metric (V_{\max}) or extracted from the FV profile
243 requires continuous measures with sufficient sampling frequency as allowed using the radar.

244 While the current findings revealed *large-to-very large* correlations between high-speed video-
245 based and radar-derived method, particularly for mechanical determinants of forward skating
246 sprint, high-speed video-based methods present some limitations for measuring mechanical
247 variables. The accuracy of the determination of the frame corresponding to the start of the sprint
248 which corresponds to the beginning of the force production is indeed a crucial factor for
249 accurate assessment of sprint mechanical variable (Samozino, 2018). Unfortunately, this
250 standardised three-point starting position recommended in sprint running (Romero-Franco et
251 al., 2017) is not directly transposable to on-ice forward skating. Such subjective data processing
252 may lead to potential approximations or errors and in turn impair inter-trial and inter-rater
253 reliability (Romero-Franco et al., 2017; Stenroth et al., 2020). While ST-TS developed by
254 Stenroth et al. (2020) improved intra-rater reliability, our findings showed that this method,
255 adding a time shift, seems less accurate than the original procedure developed by Romero-
256 Franco et al. (2017). One could also note that none of the tested methods includes a direct
257 synchronization between movement kinetics and mechanical variable (e.g. using a trigger
258 signal), which necessarily affect the determination of sprint start and resulting metrics.

259 While easy-to-use, high-speed video-based methods lead to a truncated estimation of
260 mechanical variables compared to radar-derived measures mainly due to subjective
261 determination of the skating sprint start. The implementation of time shift seems to further
262 impair the validity of the measurements. Radar-derived method should be prioritized to
263 accurately determine mechanical variables during on-ice forward skating sprint. Practitioners
264 have to be aware of the limitations of the high-speed video-based methods when implementing
265 them to assess mechanical determinants of the on-ice forward skating sprint.

266 **Abbreviations**

267	a_h	Acceleration
268	d	Cohen's d scale
269	D_{rf}	Rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force
270		to the corresponding resultant force (%)
271	F_0	Maximal theoretical horizontal force relative to body mass ($N \cdot kg^{-1}$)
272	F_{aero}	Aerodynamic friction force (N)
273	F_h	Net horizontal antero-posterior ground reaction force (N)
274	FV	Force-velocity relationship
275	ICC	Intra-class correlation coefficients
276	m	System mass (kg)
277	P_h	Mean net horizontal antero-posterior power output (W)
278	P_{max}	Maximal theoretical horizontal power relative to body mass ($W \cdot kg^{-1}$)
279	r	Pearson's product-moment correlation
280	RF_{max}	Maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force to the
281		corresponding resultant force (%)
282	ST	Split time method measured from high-speed video
283	ST-TS	Split time with time shift method measured from high-speed video
284	V_0	Maximal theoretical horizontal velocity ($m \cdot s^{-1}$)
285	V_h	Instantaneous horizontal velocity ($m \cdot s^{-1}$)
286	V_{max}	Maximal horizontal velocity ($m \cdot s^{-1}$)
287	τ	Acceleration time constant ($m \cdot s^{-2}$)

288

289 **Acknowledgements**

290 J. Perez received a PhD scholarship (CIFRE contract no 2017/1706) funded by the French Ice
 291 Hockey Federation and the French Agency of Research and Technology. The Laboratory Sport,
 292 Expertise and Performance (EA 7370) is a partner of the French-speaking network ReFORM,
 293 recognised as a Research Centre for the Prevention of Injury and Illness and the Protection of
 294 Athletes by the Olympic Committee (IOC). As a member of the IOC Medical Research
 295 Network, ReFORM has received funding from the IOC to establish long-term research
 296 programmes on the prevention of injuries and illnesses in sport for the protection of athlete
 297 health.

298 **References**

299

- 300 Bezodis, N.E., Salo, A.I., and Trewartha, G. (2012). Measurement error in estimates of sprint
301 velocity from a laser displacement measurement device. *Int. J. Sports Med.* 33, 439-
302 444. doi:10.1055/s-0031-1301313.
- 303 Bland, J.M., and Altman, D.G. (2010). Statistical methods for assessing agreement between
304 two methods of clinical measurement. *Int. J. Nurs. Stud.* 47, 931-936.
- 305 Budarick, A.R., Shell, J.R., Robbins, S.M.K., Wu, T., Renaud, P.J., and Pearsall, D.J. (2018).
306 Ice hockey skating sprints: run to glide mechanics of high calibre male and female
307 athletes. *Sports Biomech.*, 1-17. doi:10.1080/14763141.2018.1503323.
- 308 Hopkins, W.G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med.*
309 30, 1-15. doi:10.2165/00007256-200030010-00001.
- 310 Hopkins, W.G., Marshall, S.W., Batterham, A.M., and Hanin, J. (2009). Progressive statistics
311 for studies in sports medicine and exercise science. *Med. Sci. Sports Exerc.* 41, 3-13.
312 doi:10.1249/MSS.0b013e31818cb278.
- 313 Jimenez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Parraga-Montilla, J.A., Morcillo-Losa, J.A., Cuadrado-
314 Penafiel, V., Castano-Zambudio, A., et al. (2020). Seasonal Changes in the Sprint
315 Acceleration Force-Velocity Profile of Elite Male Soccer Players. *J. Strength Cond.*
316 *Res.* Publish Ahead of Print. doi:10.1519/JSC.0000000000003513.
- 317 Jimenez-Reyes, P., Samozino, P., and Morin, J.B. (2019). Optimized training for jumping
318 performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics. *PLoS*
319 *One* 14, e0216681. doi:10.1371/journal.pone.0216681.
- 320 Morin, J.B., and Samozino, P. (2016). Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for
321 Individualized and Specific Training. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 11, 267-272.
322 doi:10.1123/ijspp.2015-0638.
- 323 Morin, J.B., and Samozino, P. (2019). Spreadsheet for Sprint acceleration force-velocity-
324 power profiling. ResearchGate. Available from:
325 [https://www.researchgate.net/publication/321767606_Spreadsheet_for_Sprint_acceler](https://www.researchgate.net/publication/321767606_Spreadsheet_for_Sprint_acceleration_force-velocity-power_profiling)
326 [ation_force-velocity-power_profiling](https://www.researchgate.net/publication/321767606_Spreadsheet_for_Sprint_acceleration_force-velocity-power_profiling)
- 327 Pearsall, D., Turcotte, R., Levangie, C., and Forget, S. (2013). "Biomechanical Adaptation in
328 Ice Hockey Skating," in *Routledge Handbook of Ergonomics in Sport and Exercise*,
329 ed. H. Youlian. (Abingdon: Routledge), 51-60.
- 330 Perez, J., Guilhem, G., and Brocherie, F. (2019). Reliability of the force-velocity-power
331 variables during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomech.*, 1-15.
332 doi:10.1080/14763141.2019.1648541.
- 333 Perez, J., Guilhem, G., Hager, R., and Brocherie, F. (2020). Mechanical determinants of
334 forward skating sprint inferred from off- and on-ice force-velocity evaluations in elite
335 female ice hockey players. *Eur. J. Sport. Sci.*, 1-12.
336 doi:10.1080/17461391.2020.1751304.
- 337 Romero-Franco, N., Jiménez-Reyes, P., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F.,
338 Rodríguez-Juan, J.J., González-Hernández, J., et al. (2017). Sprint performance and
339 mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference
340 methods. *European Journal of Sport Science* 17, 386-392.
341 doi:10.1080/17461391.2016.1249031.
- 342 Samozino, P. (2018). "A Simple Method for Measuring Force, Velocity and Power
343 Capabilities and Mechanical Effectiveness During Sprint Running," in *Biomechanics*
344 *of Training and Testing: Innovative Concepts and Simple Field Methods*, eds. J.-B.
345 Morin & P. Samozino. (Cham: Springer International Publishing), 237-267.

Skating force-velocity methods comparison

- 346 Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez De Villarreal, E., et al.
347 (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and
348 mechanical effectiveness in sprint running. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 26, 648-658.
349 doi:10.1111/sms.12490.
- 350 Simperingham, K.D., Cronin, J.B., Pearson, S.N., and Ross, A. (2019). Reliability of
351 horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations
352 using radar technology. *Sports Biomech.* 18, 88-99.
353 doi:10.1080/14763141.2017.1386707.
- 354 Simperingham, K.D., Cronin, J.B., and Ross, A. (2016). Advances in Sprint Acceleration
355 Profiling for Field-Based Team-Sport Athletes: Utility, Reliability, Validity and
356 Limitations. *Sports Med.* 46, 1619-1645. doi:10.1007/s40279-016-0508-y.
- 357 Stenroth, L., Vartiainen, P., and Karjalainen, P.A. (2020). Force-velocity profiling in ice
358 hockey skating: reliability and validity of a simple, low-cost field method. *Sports*
359 *Biomech.*, 1-15. doi:10.1080/14763141.2020.1770321.

360

361

362 **Figure legends**

363 **Figure 1.** Raw data (dotted line) of the velocity-time curve measured by radar and fitted model
364 (straight lines) derived from each method [high-speed video split time (ST) in blue, high-speed
365 video split time with time shift (ST-TS) in green and radar in black]. Data were collected from
366 the same skating sprint of one player.

367 **Figure 2.** Bland and Altman plots of both high-speed video-based methods and radar-derived
368 method for F_0 (panel A), V_0 (panel B), P_{\max} (panel C) and V_{\max} (panel D). Dark circles and lines
369 represented differences between high-speed video split time method (ST) and radar-derived
370 method while grey triangles and lines represented differences between high-speed video split
371 time with time shift method (ST-TS) and radar-derived method. Upper and lower horizontal
372 dotted lines represent the 95% limits of agreement (mean \pm 1.96 SD of the difference between
373 methods).

Skating force-velocity methods comparison

Table 1. Differences in forward skating sprint mechanical variables determined with split time (ST) high-speed video-based method in reference to radar-based method.

	<i>p</i> value	Mean difference (%)	± 95% LOA	<i>d</i> ; effect	ICC	<i>r</i>	<i>p</i> value	TEE
F ₀ (N·kg ⁻¹)	< .001	-0.62 (-10.88)	0.96	-0.85; “moderate”	0.74 (0.45-0.88) “moderate”	0.74 (0.46-0.89)	< .001	0.90 (0.51-1.94) “moderate”
V ₀ (m·s ⁻¹)	.264	-0.13 (-1.54)	0.99	-0.37; “small”	-0.10 (-0.54-0.35) “very low”	-0.04 (-0.47-0.40)	.863	23.90 (15.87-30.85) “very large”
P _{max} (W·kg ⁻¹)	< .001	-1.57 (-13.15)	1.45	-0.98; “moderate”	0.87 (0.70-0.94) “high”	0.88 (0.71-0.95)	< .001	0.55 (0.33-0.98) “small”
FV slope (N·s·kg ⁻¹ ·m ⁻¹)	.002	0.06 (9.32)	0.17	0.74; “moderate”	0.46 (0.02-0.74) “low”	0.49 (0.07-0.76)	.027	1.79 (0.86-14.30) “large”
RF _{max} (%)	< .001	-2.52 (-6.73)	2.45	-0.98; “moderate”	0.86 (0.67-0.94) “high”	0.85 (0.67-0.94)	< .001	0.61 (0.37-1.12) “moderate”
Drf (%)	.002	0.63 (9.62)	1.59	0.81; “moderate”	0.34 (-0.12-0.67) “low”	0.39 (-0.05-0.70)	.082	2.38 (1.02-18.61) “very large”
V _{max} (m·s ⁻¹)	.128	-0.15 (-1.86)	0.84	-0.47; “small”	0.03 (-0.43-0.45) “low”	0.08 (-0.37-0.49)	.741	12.97 (6.24-18.63) “very large”

Note. LOA: limit of agreement (1.96*SD); *d*: Cohen’ *d* effect size; ICC: intra class correlation coefficient (lower – upper limit); *r*: Pearson’s product–moment correlation; TEE: standardised typical error of the estimate.

Skating force-velocity methods comparison

Table 2. Differences in forward skating sprint mechanical variables determined with split time with a time-shift (ST-TS) high-speed video-based method in reference to radar-based method.

	<i>p</i> value	Mean difference (%)	± 95% LOA	<i>d</i> ; effect	ICC	<i>r</i>	<i>p</i> value	TEE
F_0 (N·kg ⁻¹)	< .001	-2.00 (-40.27)	1.05	-1.72; “large”	0.58 (0.19-0.80) “moderate”	0.68 (0.35-0.86)	< .001	1.07 (0.59-2.64) “moderate”
V_0 (m·s ⁻¹)	< .001	0.62 (6.92)	1.30	1.13; “moderate”	-0.01 (-0.47-0.42) “very low”	-0.05 (-0.48-0.39)	.813	18.24 (14.42-22.71) “very large”
P_{max} (W·kg ⁻¹)	< .001	-3.58 (-32.86)	1.73	-1.62; “large”	0.78 (0.52-0.90) “high”	0.84 (0.63-0.93)	< .001	0.66 (0.39-1.23) “moderate”
FV slope (N·s·kg ⁻¹ ·m ⁻¹)	< .001	0.27 (46.70)	0.18	1.73; “large”	0.23 (-0.24-0.60) “low”	0.29 (-0.17-0.64)	.207	3.35 (1.20-5.93) “very large”
RF _{max} (%)	< .001	-8.14 (-23.56)	3.12	-1.73; “large”	0.76 (0.49-0.90) “high”	0.76 (0.49-0.90)	< .001	0.86 (0.49-1.80) “moderate”
Drf (%)	< .001	2.48 (45.79)	1.70	-1.74; “large”	0.18 (-0.29-0.56) “low”	0.24 (-0.22-0.61)	.313	4.14 (1.31-4.46) “very large”
V_{max} (m·s ⁻¹)	.004	0.40 (4.71)	1.11	0.93; “moderate”	-0.06 (-0.51-0.38) “low”	-0.08 (-0.50-0.36)	.722	12.00 (6.10-18.21) “very large”

Note. LOA: limit of agreement (1.96*SD); *d*: Cohen’ *d* effect size; ICC: intra class correlation coefficient (lower – upper limit); *r*: Pearson’s product–moment correlation; TEE: standardised typical error of the estimate.

Étude #4

UTILISATION DU RADAR VS. APPAREIL DE RÉSISTANCE
ROBOTIQUE DANS LA DÉTERMINATION DU PROFIL
FORCE-VITESSE EN PATINAGE.
QUELLE MÉTHODE POUR QUEL OBJECTIF ?



Publication associée :

Perez J., Guilhem G. & Brocherie F. Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods. *Journal of Strength and Conditioning Research*. **In revision.**

Journal of Strength and Conditioning Research

Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods. --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods.
Short Title:	Single or multiple methods for assessing skating force-velocity profile?
Article Type:	Technical Reports
Keywords:	Skating, acceleration, biomechanics, resisted sprinting, team sports
Corresponding Author:	Jerome PEREZ, M.D. / Ph.D. student Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance Paris, FRANCE
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Jerome PEREZ, M.D. / Ph.D. student
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Jerome PEREZ, M.D. / Ph.D. student Gaël Guilhem, Ph. D. Franck BROCHERIE, Ph. D.
Order of Authors Secondary Information:	
Manuscript Region of Origin:	FRANCE
Abstract:	<p>This study aimed to compare skating force-velocity relationships determined throughout sprints performed against various loaded conditions or inferred from movement kinetics measured during a single unloaded sprint. Ten female ice hockey players performed one unloaded maximal skating sprint test measured with a radar gun followed by 4 resisted skating sprints against a robotic horizontal resistance with progressive loads in reference to equipped body mass (BM): 3 kg (robotic resistance), 25%, 50% and 75% of equipped BM. Maximal theoretical force (F0), velocity (V0), power (Pmax) and slope of the linear force-velocity relationship (SFV) were determined from each method and compared using a paired sample t-test, absolute mean bias (\pm 95% confidence intervals), Pearson correlations and typical error of the estimate (TEE) in standardized units [effect size (ES)]. Statistical significance was set at $p < 0.05$. No statistical difference was found for all mechanical variables determined from the two methods (p ranging 0.09-0.59). While exhibiting high (SFV) to very-high (F0, V0 and Pmax) correlations between methods, all variables exhibited large levels of error between approaches (ES ranging 0.66-1.71). Multiple loaded and single unloaded methods were comparable to determine force-velocity relationships during on-ice skating sprint. The low-cost fatigue-free unloaded method suggests it could be used in constrained contexts (i.e., congested schedule, low available time) or for a simple force-velocity profiling. Inversely, multiple loaded methods would be more appropriate to evaluate and individualize training for skilled ice hockey players accustomed to resistive skating sprint.</p>
Suggested Reviewers:	Micheal Cahill mcahill@athleteth.com Kevin Neeld kneeld@bostonbruins.com

1 **Manuscript title:** Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded
2 vs. multiple loaded methods.

3 **Running head:** Single or multiple methods for assessing skating force-velocity profile?
4

5 Jerome Perez ^{1,2}, Gaël Guilhem¹, Franck Brocherie¹

6 ¹ French Institute of Sport (INSEP), Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370),
7 Paris, France

8 ² French Ice Hockey Federation, Cergy, France.
9

10 **Correspondence Address:**

11 Jerome PEREZ

12 Laboratory Sport, Expertise and Performance (EA 7370),

13 French Institute of Sport (INSEP)

14 11, Avenue du Tremblay

15 75012 Paris

16 France

17 Phone: +33 (0)1 41 74 43 54

18 Email: jerome.perez@insep.fr
19

20 **Conflict of Interest Disclosure:** Authors have no conflict of interest disclosure
21
22
23

24 **ACKNOWLEDGMENTS**

25 J. Perez received a PhD scholarship (CIFRE contract no 2017/1706) funded by the French Ice
26 Hockey Federation and the French Agency of Research and Technology. The Laboratory Sport,
27 Expertise and Performance (EA 7370) is a partner of the French-speaking network ReFORM,
28 recognised as a Research Centre for the Prevention of Injury and Illness and the Protection of
29 Athletes by the Olympic Committee (IOC). As a member of the IOC Medical Research
30 Network, ReFORM has received funding from the IOC to establish long-term research
31 programmes on the prevention of injuries and illnesses in sport for the protection of athlete
32 health

- 1 **Manuscript title:** Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded
- 2 vs. multiple loaded methods.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

3 ABSTRACT

1
2 4 This study aimed to compare skating force-velocity relationships determined throughout sprints
3
4 5 performed against various loaded conditions or inferred from movement kinetics measured
5
6 6 during a single unloaded sprint. Ten female ice hockey players performed one unloaded
7
8 7 maximal skating sprint test measured with a radar gun followed by 4 resisted skating sprints
9
10 8 against a robotic horizontal resistance with progressive loads in reference to equipped body
11
12 9 mass (BM): 3 kg (robotic resistance), 25%, 50% and 75% of equipped BM. Maximal theoretical
13
14 10 force (F_0), velocity (V_0), power (P_{max}) and slope of the linear force-velocity relationship (SFV)
15
16 11 were determined from each method and compared using a paired sample t-test, absolute mean
17
18 12 bias (\pm 95% confidence intervals), Pearson correlations and typical error of the estimate (TEE)
19
20 13 in standardized units [effect size (ES)]. Statistical significance was set at $p < 0.05$. No statistical
21
22 14 difference was found for all mechanical variables determined from the two methods (p ranging
23
24 15 0.09-0.59). While exhibiting *high* (SFV) to *very-high* (F_0 , V_0 and P_{max}) correlations between
25
26 16 methods, all variables exhibited *large* levels of error between approaches (ES ranging 0.66-
27
28 17 1.71). Multiple loaded and single unloaded methods were comparable to determine force-
29
30 18 velocity relationships during on-ice skating sprint. The low-cost fatigue-free unloaded method
31
32 19 suggests it could be used in constrained contexts (*i.e.*, congested schedule, low available time)
33
34 20 or for a simple force-velocity profiling. Inversely, multiple loaded methods would be more
35
36 21 appropriate to evaluate and individualize training for skilled ice hockey players accustomed to
37
38 22 resistive skating sprint.
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50

51 24 **Keywords:** Skating, acceleration, biomechanics, resisted sprinting, team sports
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

25 INTRODUCTION

1
2 26 The determination of mechanical characteristics of locomotor patterns during horizontal
3
4 27 displacements performed with maximal involvement (*e.g.*, sprint running) has been
5
6 28 investigated using different methods (*i.e.*, composite profile of over-ground sprint running
7
8 29 kinetics across multiple sprints or macroscopic inverse dynamic approaches to model
9
10 30 mechanical variables during over-ground sprinting) and equipment [*i.e.*, (multiple) force plates,
11
12 31 radar, video] (3). Such approaches permit to determine variables [theoretical maximal
13
14 32 horizontal force (F_0), velocity (V_0), power (P_{\max}) and the slope of the linear force-velocity (FV)
15
16 33 relationship (SFV)] inclined to provide insight into athletes' sprinting capabilities and better
17
18 34 individualize their training (13).
19
20
21
22
23
24
25

26 36 On-field testing conditions allow to determine the FV relationships using different sprints
27
28 37 performed against a range of external loads or a single "unloaded free-sprinting" acceleration
29
30 38 (4, 5, 7). However, scientific literature (5, 7) showed that agreement between both methods
31
32 39 differs upon the influence of few methodological issues (*e.g.*, equipment used). Single unloaded
33
34 40 method appears to be quickly and easily translatable into on-field conditions using accessible
35
36 41 input data (*i.e.*, distance- or velocity-time data) (13). In contrast, multiple loaded method results
37
38 42 in a more costly protocol (*i.e.*, time-consuming, fatiguing) to generate kinetic data from each
39
40 43 resisted skating sprint but appears more relevant for resisted training implementation (5). While
41
42 44 such resisted-sprint exercise is commonly applied by coaches during on-ice training (10, 12,
43
44 45 17), whether the mechanical capabilities assessed using both methods are similar in the
45
46 46 particular context of on-ice skating remains unknown. To date, in ice hockey, skating FV
47
48 47 relationships have been only assessed using the single unloaded method (14, 15, 19).
49
50
51
52
53
54
55

56 48 The aim of this study was to compare whether FV relationships determined throughout multiple
57
58 49 loaded skating sprints to that determined from a single unloaded skating sprint. Such
59
60
61
62
63
64
65

1 50 comparison would allow practitioners to select which method would be the best to determine
2 51 optimal resistance training. Applying the same radar-based measurement method (5), we
3
4 52 hypothesized concordant results for maximal mechanical parameters extracted from the FV
5
6
7 53 relationship inferred from both multiple loaded and single unloaded methods.
8
9

10 54

11 55 **METHODS**

12 56 *Experimental Approach to the Problem*

13
14
15
16 57 Three testing sessions were scheduled at the same time of the day (± 1 h) during three
17
18
19 58 consecutive days. Players participated in only one testing session and were instructed to avoid
20
21
22 59 any strenuous exercise in the two days before testing. Players were instructed to wear their ice
23
24 60 hockey equipment and were weighed (74.1 ± 7.8 kg wearing equipment) before testing.
25
26 61 Following a standardized warm-up, players performed one unloaded 40-m maximal skating
27
28
29 62 sprint test (14, 15) followed by 4 forward skating sprints performed against progressive loaded
30
31
32 63 conditions calibrated to equipped body mass (BM). These resisted sprints were interspersed by
33
34 64 4 min of passive rest. To ensure that individual sprinting conditions were consistent between
35
36 65 players, the skating line was shifted to a new ice surface after each player's assessment.
37
38

39 66

40 41 67 *Subjects*

42
43 68 Ten sub-elite female ice hockey players [age: 20.5 ± 4.2 years; unequipped BM: 66.1 ± 7.8 kg;
44
45
46 69 height: 1.67 ± 0.07 m; playing experience: 10.8 ± 4.6 years] volunteered for this study.
47
48
49 70 Participants were informed regarding the purpose, procedures and risks associated with the
50
51 71 study, before providing written informed consent (and from their legal guardians when they
52
53 72 were minors). The protocol was approved by the Institutional Review Board (University Ovest
54
55
56 73 IV) in accordance with the Declaration of Helsinki.
57

58 74

59
60
61
62
63
64
65

75 *Testing procedures*

1
2 76 Unloaded sprinting performance was measured with a radar gun (Stalker ATS II, Applied
3
4 77 Concepts, Dallas, TX, USA), attached to a tripod positioned 3.5 m behind the start line and at
5
6
7 78 a height of 1 m, collecting outward bound V–time data at 46.9 Hz (14, 15).
8

9
10 79 Four resisted skating sprinting conditions were prescribed for each subject: 3 kg (robotic
11
12 80 resistance), 25%, 50% and 75% of equipped BM. Subjects were harnessed to a portable
13
14 81 horizontal robotic resistance device (1080 Sprint, 1080 Motion, Lidingö, Sweden) able to
15
16 82 provide constant horizontal resistance modes with 1-kg increment (“isotonic” function; from 1
17
18 83 to 30 kg). The device simultaneously records horizontal velocity, power, force, distances and
19
20 84 time. Absolute resistance was converted to relative robotic resistance (0.35 conversion
21
22 85 coefficient provided by the manufacturer, not considering sprint surface coefficient of friction)
23
24 86 (4, 20), with distance modeled based on pilot testing as follows: 40-m at 3 kg; 30-m at 25% and
25
26 87 50% of equipped BM, respectively and 20-m at 75% of equipped BM. Recently, Thompson et
27
28 88 al. (20) compared 0-10 m, 10-20 m and 20-30 m sprint times recorded using both devices and
29
30 89 found *high-to-very-high* correlations (*i.e.*, r ranging from 0.87 to 0.99).
31
32
33
34
35
36
37
38

39 91 *Data processing*

40
41 92 Two data processing were applied: (i) assessment of skating sprint mechanical outputs (F_0 , V_0 ,
42
43 93 P_{\max} and SFV) from the acceleration phase of an unloaded skating sprint measured with the
44
45 94 radar gun [described in detail elsewhere (14, 15)]; and (ii) computation of individual loading
46
47 95 parameters, collected from the manufacturer robotic software (*i.e.*, horizontal force, velocity
48
49 96 and power outputs), from multiple loaded skating sprints combined into a load-V and FV
50
51 97 relationships (5). F_0 , V_0 and SFV were determined as the graphical intercepts of the FV
52
53 98 relationships and the regression slope, respectively (18). P_{\max} was determined as the apex of the
54
55 99 quadratic power-velocity (PV) relationships using the first mathematical derivation of the
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

100 associated quadratic equation (18). Optimal velocity (V_{opt}) condition for producing maximal
101 power was calculated for both methods at the point of P_{max} , corresponding to $0.5 \times V_0$ (5).
102 Optimal loading (L_{opt}) was calculated in the same manner for the multiple loaded method only,
103 using an inverse computation to determine the robotic resistance corresponding to the peak of
104 the PV relationship (5).

106 *Statistical analysis*

107 Descriptive statistics are presented as means \pm standard deviation. Statistics were calculated
108 using a modified statistical Excel spreadsheet (8), with the single unloaded method as the
109 criterion. Comparisons between multiple loaded and single unloaded methods used linear
110 regressions and absolute bias \pm 95% confidence intervals (8). Strength of agreement was
111 assessed using Pearson's correlation coefficient (r), with threshold values of 0.3, 0.5, 0.7, 0.9,
112 and 1.0, representing *small*, *moderate*, *high*, *very-high* and *almost perfect* relationships,
113 respectively (9). Magnitude of error was expressed as the typical error of estimate (TEE) in
114 standardized units [effect size (ES)], using a modified Cohen's scale to provide qualitative
115 inferences: 0.1, 0.3, 0.6, and > 0.6 to represent *trivial*, *small*, *moderate*, and *large*, respectively
116 (9). As it is important to assess differences between mean values other than within-subject
117 variations and retest correlations, a paired sample t-test was also used to compare the
118 mechanical outcomes between the two methods. Alpha was set at $p < 0.05$.

120 **RESULTS**

121 Figure 1 displays raw data from radar gun and robotic devices (Panel A), load-V relationship
122 determined with the robotic device during resisted skating sprint against the different loads
123 (Panel B) and comparison of the FV and PV profiles obtained from the two methods (Panel C).
124 No statistical difference was found for all mechanical variables determined from the two

125 methods (p ranging 0.09-0.59, Table 1). While exhibiting *high* (SFV) to *very-high* (F_0 , V_0 and
1
2 126 P_{\max}) correlations between methods, all variables exhibited *large* levels of error between
3
4 127 approaches (ES ranging 0.66-1.71, Table 1). L_{opt} determined from the multiple loaded method
5
6
7 128 was 17 ± 1 kg for robotic resistance, representing an absolute resistance of 50 ± 4 kg (*i.e.*, 70.0
8
9 129 $\pm 4.4\%$ of equipped BM).

14 131 **DISCUSSION**

16 132 The present study showed that maximal mechanical parameters extracted from the FV
17
18
19 133 relationship inferred from both multiple loaded and single unloaded methods were comparable
20
21 134 during on-ice forward skating sprints, as reflected by low bias and *high* to *very-high* correlations
22
23
24 135 for all mechanical characteristics. However, *large* TEEs were observed between methods for
25
26 136 all characteristics indicating the presence of inter-subject variations.

28
29 137
30
31 138 The capacity to produce high amount of horizontal power and force has been shown to be
32
33
34 139 determinant of forward skating sprint performance (15). The present results showed that both
35
36 140 P_{\max} and F_0 determined from multiple loaded and single unloaded methods were *very highly*
37
38 141 related. However, skating V_0 did not reach the level of correlation ($r = 0.71$ vs. 0.99) previously
39
40
41 142 observed during over-ground running sprints (5). This result may originate from the fact that
42
43 143 maintaining a maximal effort upon resistive loading may be challenging during skating due to
44
45
46 144 the non-fixed ground support of the skater and low friction (6). It is also plausible that the lower
47
48 145 numbers of external loads (*i.e.*, 4 vs. 6) compared to Cross et al. (5) may impact the accuracy
49
50
51 146 and the reliability of the result. Finally, familiarization may have plausibly contributed to inter-
52
53 147 subject variations with some players responding ‘positively’ or ‘negatively’ (5) when loading
54
55
56 148 was progressively applied to the system, based on their experience with resisted skating
57
58 149 technique.

150

1
2 151 While our results suggest that both methods were comparable, practitioners may choose one or
3
4 152 the other method depending on their application context and objectives. Single unloaded
5
6
7 153 method should be used to quickly determine FV skating profile and a V_{opt} to train at maximal
8
9
10 154 power in resisted skating. In contrast, multiple loaded method should be used to determine a
11
12 155 more practical load-V relationship to better implement the training content. Based on the
13
14 156 present findings, implementing loads which elicit movements oriented towards maximal force
15
16
17 157 and maximal velocity (unloaded free sprint or minimal load with the robotic equipment) of the
18
19 158 FV relationship warrant further investigation. However, in opposite to the minimal robotic
20
21
22 159 resistance (*i.e.*, 1 kg), 100% equipped BM testing should be performed only by accustomed and
23
24 160 skilled players due to the skating technique required to be accurate and reliable.

161

25
26
27
28
29 162 To date, while some studies reported a suitable effect of resisted skating sprints on skating
30
31
32 163 performance (10, 12), no study has yet reported an optimal loading to develop maximal power
33
34 164 in on-ice condition. The multiple loaded method allowed to determine a L_{opt} about 17 ± 1 kg
35
36 165 for robotic resistance representing an absolute resistance of 50 ± 4 kg (*i.e.*, $70.0 \pm 4.4\%$
37
38
39 166 equipped BM). While scientific literature remains inconsistent regarding the most suitable
40
41 167 loading to develop sprint performance (1, 16), this result suggests the use of heavy loads
42
43
44 168 training ($> 60\%$ BM) to obtain an approximative 50% velocity decrement that generate maximal
45
46 169 power characteristics (2, 4, 11) and improve skating sprint acceleration (15).

170

50 51 171 **PRACTICAL APPLICATIONS**

52
53 172 With all the caution required regarding the inter-subject variation, the present findings suggest
54
55
56 173 that a single unloaded skating sprint could be confidently proposed as a quick and fatigue-free
57
58 174 procedure for assessing and implementing individualized specific resistance skating training.

59
60
61
62
63
64
65

175 This method may be used in constrained contexts (*i.e.*, congested schedule or low available
1
2 176 time) or to assess players which are not thoroughly accustomed to resistance skating training.
3
4 177 Inversely, while more time-consuming, multiple loaded skating sprints with robotic horizontal
5
6
7 178 resistance could be potentially preferable to evaluate skilled ice hockey players and to
8
9
10 179 individualize training program design. Allowing to cover a larger spectrum of the FV
11
12 180 relationship, the multiple loaded method provides insight into loading parameters that may be
13
14 181 of value for power, force or velocity development.
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

182 REFERENCES

- 1
2 183
3
4
5 184 1. Alcaraz PE, Carlos-Vivas J, Oponjuru BO, and Martínez-Rodríguez A. The
6 185 Effectiveness of Resisted Sled Training (RST) for Sprint Performance: A Systematic Review
7 186 and Meta-analysis. *Sports Med* 48: 2143-2165, 2018.
- 8 187 2. Cross MR, Brughelli M, Samozino P, Brown SR, and Morin JB. Optimal Loading for
9 188 Maximizing Power During Sled-Resisted Sprinting. *Int J Sports Physiol Perform* 12:
10 189 1069-1077, 2017.
- 11 190 3. Cross MR, Brughelli M, Samozino P, and Morin JB. Methods of Power-Force-Velocity
12 191 Profiling During Sprint Running: A Narrative Review. *Sports Med* 47: 1255-1269,
13 192 2017.
- 14 193 4. Cross MR, Lahti J, Brown SR, et al. Training at maximal power in resisted sprinting:
15 194 Optimal load determination methodology and pilot results in team sport athletes. *PLoS*
16 195 *One* 13: e0195477, 2018.
- 17 196 5. Cross MR, Samozino P, Brown SR, and Morin JB. A comparison between the force-
18 197 velocity relationships of unloaded and sled-resisted sprinting: single vs. multiple trial
19 198 methods. *Eur J Appl Physiol* 118: 563-571, 2018.
- 20 199 6. Federolf PA, Mills R, and Nigg B. Ice friction of flared ice hockey skate blades. *J Sports*
21 200 *Sci* 26: 1201-1208, 2008.
- 22 201 7. Helland C, Haugen T, Rakovic E, et al. Force-velocity profiling of sprinting athletes:
23 202 single-run vs. multiple-run methods. *Eur J Appl Physiol* 119: 465-473, 2019.
- 24 203 8. Hopkins WG. Analysis of validity by linear regression (Excel spreadsheet). *A new view*
25 204 *of statistics*, 2000.
- 26 205 9. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, and Hanin J. Progressive statistics for
27 206 studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 41: 3-13, 2009.
- 28 207 10. Janot JM, Auner KA, Emberts TM, et al. The effects of BungeeSkate training on
29 208 measures of on-ice acceleration and speed. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 419-427,
30 209 2013.
- 31 210 11. Lahti J, Huuhka T, Romero V, et al. Changes in sprint performance and sagittal plane
32 211 kinematics after heavy resisted sprint training in professional soccer players. *PeerJ* 8:
33 212 e10507, 2020.
- 34 213 12. Matthews MJ, Comfort P, and Crebin R. Complex training in ice hockey: the effects of
35 214 a heavy resisted sprint on subsequent ice-hockey sprint performance. *J Strength Cond*
36 215 *Res* 24: 2883-2887, 2010.
- 37 216 13. Morin J-B and Samozino P. Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for
38 217 Individualized and Specific Training. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 267-272, 2016.
- 39 218 14. Perez J, Guilhem G, and Brocherie F. Reliability of the force-velocity-power variables
40 219 during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomech*: 1-15, 2019.
- 41 220 15. Perez J, Guilhem G, Hager R, and Brocherie F. Mechanical determinants of forward
42 221 skating sprint inferred from off- and on-ice force-velocity evaluations in elite female ice
43 222 hockey players. *Eur J Sport Sci*: 1-12, 2020.
- 44 223 16. Petrakos G, Morin JB, and Egan B. Resisted Sled Sprint Training to Improve Sprint
45 224 Performance: A Systematic Review. *Sports Med* 46: 381-400, 2016.
- 46 225 17. Pollitt DJ. Sled dragging for hockey training. *Strength Cond J* 25: 7-16, 2003.
- 47 226 18. Samozino P, Rabita G, Dorel S, et al. A simple method for measuring power, force,
48 227 velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand J Med Sci*
49 228 *Sports* 26: 648-658, 2016.
- 50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

- 229 19. Stenroth L, Vartiainen P, and Karjalainen PA. Force-velocity profiling in ice hockey
1 230 skating: reliability and validity of a simple, low-cost field method. *Sports Biomech*: 1-
2 231 15, 2020.
- 3 232 20. Thompson KMA, Whinton AK, Ferth S, Spriet LL, and Burr JF. Moderate Load
4 233 Resisted Sprints Do Not Improve Subsequent Sprint Performance in Varsity-Level
5 234 Sprinters. *J Strength Cond Res* 35: 72-77, 2021.
6 235
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

236 **FIGURES**

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

237

238 **Figure 1.** A. Velocity-time curves measured with radar gun (single unloaded method) and with
 239 robotic device during multiple resisted skating sprints against loads (multiple loaded method)
 240 corresponding to 3 kg (robotic resistance), 25%, 50% and 75% of equipped body mass (BM) in
 241 a 1.69 m tall, 84 kg weight equipped women ice hockey player. B. Linear load-velocity profile
 242 determined with the robotic device during resisted skating sprint performed against the various
 243 loaded conditions (3 kg, 25%, 50% and 75% equipped BM) by the same player. Optimal load
 244 (L_{opt}) was computed at optimal velocity ($V_{opt} = 0.5 \times V_0$) corresponding to velocity eliciting
 245 maximal power (P_{max}). C. Force-velocity and power-velocity relationships inferred from
 246 multiple loaded and single unloaded methods. Black trace represents the mean FV relationship
 247 determined from the multiple loaded method. The grey trace represents the mean FV
 248 relationship determined from the single unloaded method while grey surrounding area represent
 249 the 95% confidence limits of the predictive equation between the two methods. F_0 , maximal
 250 theoretical force; V_0 , maximal theoretical velocity; P_{max} , maximal power; V_{opt} , corresponding
 251 optimal velocity for P_{max} and SFV, the slope of the force-velocity relationship.

252

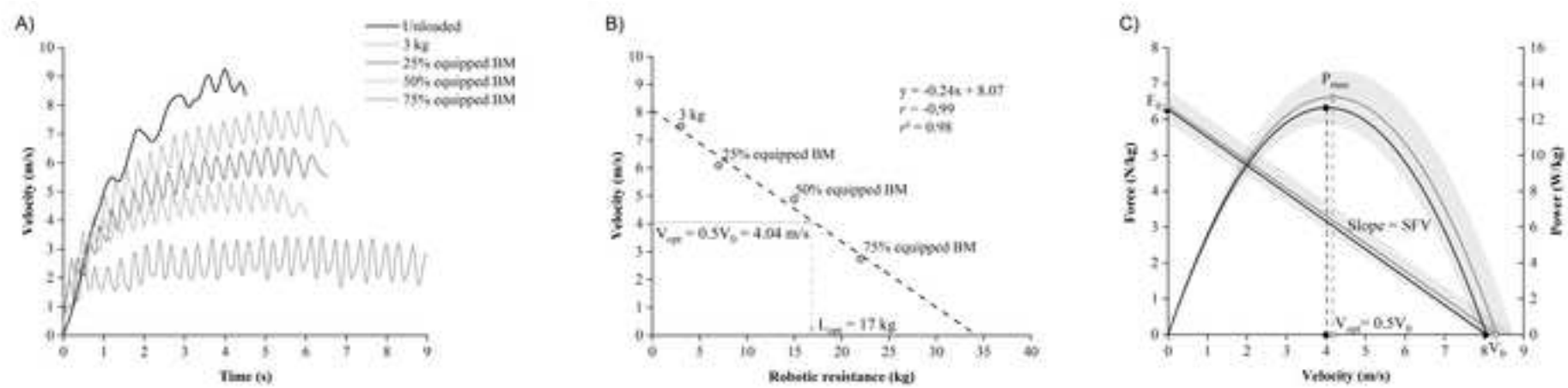


Table 1. Comparison of force-velocity relationships mechanical outcomes between multiple loaded and single unloaded methods.

Mechanical characteristics	Single unloaded skating sprint (Mean \pm SD)	Multiple loaded skating sprints (Mean \pm SD)	Multiple loaded vs. single unloaded methods			
			Pair sample <i>t</i> -test (<i>p</i> - value)	Absolute mean bias (95% CI)	Pearson's correlation coefficient (<i>r</i>)	TEE (ES; inference)
F_0 (N.kg ⁻¹)	6.37 \pm 0.65	6.28 \pm 0.67	0.59	-0.09 (-1.15; 0.97)	0.71	1.00; <i>Large</i>
P_{\max} (W.kg ⁻¹)	13.23 \pm 2.07	12.67 \pm 1.77	0.16	-0.55 (-2.93; 1.82)	0.84	0.66; <i>Large</i>
V_0 (m.s ⁻¹)	8.32 \pm 0.59	8.06 \pm 0.57	0.09	-0.26 (-1.17; 0.65)	0.72	0.96; <i>Large</i>
SFV (N.m.s ⁻¹)	-0.76 \pm 0.06	-0.78 \pm 0.09	0.52	-0.02 (-0.19; 0.15)	0.50	1.71; <i>Large</i>
V_{opt} (m.s ⁻¹)	4.16 \pm 0.30	4.03 \pm 0.29	0.09	-0.13 (-0.59; 0.33)	0.72	0.96; <i>Large</i>

SD, standard deviation; 95% CI, 95% of confidence intervals; TEE, typical error estimate; ES, effect size; V_0 , theoretical maximum velocity; F_0 , theoretical maximum force; SFV, slope of the linear force-velocity relationship; P_{\max} , peak power and V_{opt} , velocity at peak power production.

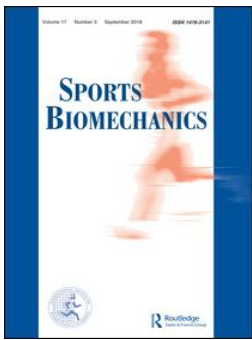
Étude #5

QUELLES CAPACITÉS MUSCULAIRES POUR LA PERFORMANCE LORS D'UN SPRINT EN PATINAGE ?
INTÉRÊT DES PROFILS FORCE-VITESSE EN PATINAGE ET HORS GLACE POUR UNE ÉVALUATION COMPLÈTE DE LA JOUEUSE DE HOCKEY SUR GLACE.



Publication associée :

Perez J., Guilhem G., Hager R. & Brocherie F. (2020). Mechanical determinants of forward skating sprint inferred from off- and on-ice force-velocity evaluations in elite female ice hockey players. *European Journal of Sport Science*, 1-12.



Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration

Jérôme Perez, Gaël Guilhem & Franck Brocherie

To cite this article: Jérôme Perez, Gaël Guilhem & Franck Brocherie (2019): Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration, Sports Biomechanics, DOI: [10.1080/14763141.2019.1648541](https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1648541)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1648541>



Published online: 29 Aug 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration

J erome Perez^{a,b}, Ga el Guilhem^a and Franck Brocherie^a

^aLaboratory Sport, Expertise and Performance, Research Department, French Institute of Sport, Paris, France; ^bFrench Women Academy of Ice Hockey, French Federation of Ice Hockey, Chamb ery, France

ABSTRACT

The aims of this study were to ensure that the skating velocity describes a mono-exponential function in order to determine the reliability of radar-derived profiling results from skating sprint accelerations applying sprint running force-velocity assessment approach. Eleven young highly-trained female ice hockey players performed two 40-m skating sprints on two separate days to evaluate inter-trial and test-retest reliability. The velocity-time data recorded by a radar device was used to calculate the kinetics variables of the skating sprint acceleration: maximal theoretical force (F_0), maximal theoretical velocity (V_0), maximal theoretical power (P_{max}) and the slope of the linear force-velocity relationship (S_{FV}). S_{FV} and S_{FVrel} variables (the slope of the linear relationship between horizontal force relative to body mass and velocity) demonstrated 'low' to 'moderate' intra-class correlation coefficients (ICC). All other variables revealed 'acceptable' inter-trial and test-retest reliability (ICC ≥ 0.75 and coefficient of variation [CV] $\leq 10\%$). Furthermore, test-retest reliability (ICC and CV) and sensitivity [Standard Error of Measurement (SEMs) \leq Small Worthwhile Change (SWCs)] were higher when averaging the two trials compared to the best trial (40-m split time) only. These findings offer a promising and simple method to monitor training-induced changes in macroscopic mechanical variables of ice hockey skating performance.

ARTICLE HISTORY

Received 16 January 2019
Accepted 22 July 2019

KEYWORDS

Skating; instantaneous mechanical power; biomechanics; team sports

Introduction

Ice hockey is considered as the fastest team sport with repeated sprints reaching > 11 m/s at a high-level of play (Merk, 2018). High-intensity skating and forward sprint activities represent respectively $\sim 45\%$ and $\sim 18\%$ of the total skating distance (~ 120 m/min) covered during a game (Brocherie, Girard, & Millet, 2018; Lignell, Fransson, Krustrup, & Mohr, 2018), indicating that the demands imposed on ice hockey players are unique in comparison to other team sports (Couderc et al., 2019; Gabbett, Jenkins, & Abernethy, 2012; Spencer, Bishop, Dawson, & Goodman, 2005). The ability to start quickly to win the puck possession and/or reach a high velocity to attack the opponent camp are in turn major determinants of ice hockey performance (Bracko, 2004; Pearsall, Turcotte, Levangie, & Forget, 2013). Accordingly, previous studies (Buckeridge, LeVangie, Stetter, Nigg, & Nigg, 2015; Renaud

et al., 2017) have demonstrated that sprint skating performance are different between high- to low-calibre ice hockey players. Therefore, the accurate evaluation of on-ice skating kinetics (force, velocity and power) appears of primary importance for talent identification and training individualisation in ice hockey.

A new macroscopic method founded on the inverse dynamic approach (Samozino et al., 2016) and the time-course of forward velocity of the centre of mass has recently permitted to calculate various biomechanical variables during sprint running. This procedure is based on the maximum velocity reached at the end of the acceleration (V_{\max}) and the acceleration time constant (τ) values obtained by modelling raw velocity data using a radar system (Samozino et al., 2016; Simperingham, Cronin, & Ross, 2016). The derivation of the velocity-time curve then allows to accurately determine the horizontal force, velocity and instantaneous power output applied on the centre of mass exerted by an athlete during sprint running (Buchheit et al., 2014; Samozino et al., 2016; Simperingham, Cronin, Pearson, & Ross, 2019; van der Kruk, van der Helm, Veeger, & Schwab, 2018). The slope (S_{FV}) of the linear relationship between the theoretical horizontal force production (F_0) and the maximal theoretical velocity (V_0) inferred from these measurements is an index of the athlete's individual balance between force and velocity generating-capacity. The maximal theoretical mechanical power output generated (P_{\max}) could also be determined as the apex of the power-velocity relationship. Modelling these variables over the entire running task had permitted to better understand their respective contribution to each phase of sprint performance. F_0 appears to be determinant for the first running steps (*i.e.* up to 20 m) while V_0 has a major contribution to the high-velocity running phase (Morin & Samozino, 2016). The mean ratio of force (RF), defined as the ratio of the horizontal component of the ground reaction force to the corresponding resultant force, has been proposed as reflective of the effectiveness of ground force application technique (Morin, Edouard, & Samozino, 2011; Rabita et al., 2015). On the ice, although skate's blade must be oriented perpendicularly to the intended direction of motion, the capacity to generate an efficient F_0 seems paramount for an efficient forward skating performance (Pearsall et al., 2013). In this regard, evaluating the force-velocity profile during forward ice hockey skating sprint could contribute to the optimization of each player skating capability. To the best of our knowledge, no study has yet investigated the force-velocity-power profile during on-ice forward sprint skating. The application of the method developed by Samozino et al. (2016) during ice hockey skating sprint should be based on the assumption that the velocity curve describes a mono-exponential function with a plateau at V_{\max} , as consistently reported during sprint running task (Di Prampero et al., 2005; Morin, Jeannin, Chevallier, & Belli, 2006). The force production during forward skating has been mainly assessed on a skating treadmill or using a force transducer on the skates (Stidwill, Pearsall, & Turcotte, 2010; Upjohn, Turcotte, Pearsall, & Loh, 2008; van der Kruk, Reijne, de Laat, & Veeger, 2018). On-ice conditions do not allow to use force plates (*i.e.* considered as the reference method) to evaluate the direction and magnitude of the forces applied in an ecological setting. While some sophisticated motion tracking technology has allowed to assess forward skating kinematics along a 50-m straight line (van der Kruk, Schwab, van der Helm, & Veeger, 2018), most of the studies that analysed ice hockey kinematics are often limited to a part of the entire skating sprint (acceleration or steady-state phase) due to measurement

system restriction (Budarick et al., 2018; Renaud et al., 2017; Robbins, Renaud, & Pearsall, 2018; Shell et al., 2017).

Therefore, the present study firstly aimed to ensure that the forward skating velocity describes a mono-exponential function in order to apply the method developed by Samozino et al. (2016). Then, it would be possible to determine the inter-trial and test-retest reliability of radar-derived mechanical variables in on-ice conditions. We hypothesised that the time-course forward velocity of the centre of mass would describe a mono-exponential function. Mechanical variables derived from the velocity-time curve had shown acceptable (Simperingham et al., 2019) to high (Buchheit et al., 2014; Samozino et al., 2016) inter-trial and test-retest reliability in sprint running conditions. Therefore, we expected similar reliability in forward skating conditions.

Methods

Participants

Eleven young highly-trained female ice hockey players (mean \pm SD: age, 17.6 ± 4.0 years; height, 1.66 ± 0.06 m; body mass, 63.6 ± 6.3 kg; playing experience, 10.5 ± 4.1 years) from the women national training centre of the French Federation of Ice Hockey were recruited for this study. Players were representative of all playing positions except goaltending. All players were familiar with the testing procedures and participated in ~ 11 h of combined ice hockey-specific training sessions (*i.e.* four on-ice hockey training sessions, two off-ice conditioning sessions and two strength training sessions) and one to two competitive games per week. Informed written consent were obtained from all participants and from their legal guardians when participants were minors. The protocol was approved by the ethics committee Ouest IV and conformed to the standards of the Declaration of Helsinki. Players were free from any lower limb musculoskeletal injury during the three months preceding data collection and were instructed to avoid any strenuous exercise in the two days before testing.

Experimental design

On two occasions, players were requested to perform, at the same time of day (± 1 h), two on-ice 40-m maximal forward sprint skating tests interspersed by 4 min of passive rest on the ice rink (~ 8 °C ambient temperature and $\sim 77\%$ relative humidity). Players were instructed to wear their full ice hockey equipment and were weighed (73.6 ± 10.6 kg fully equipped) before the first testing session. Between the two testing sessions, only low-to-moderate intensity technical/tactical training were scheduled. We examined relative and absolute inter-trial and test-retest reliability using intra-class correlation coefficients (ICC), standard error of measurement (SEM), CV and 95% limits of agreement (LOA) of Bland-Altman plots.

Testing procedures

Following a 15-min standardised warm-up including free skating drills and three 40-m progressive sprints at players' self-perceived V_{\max} , players then performed two 40-m

maximal sprint skating tests from a staggered-stance standing straight forward position (Pearsall, Turcotte, & Murphy, 2000). Because removing the stick from the players' hands may alter ice hockey skating mechanics (Bond, Bennett, & Noonan, 2018), they skated as fast as possible while holding their stick, mimicking on-game skating.

Instantaneous horizontal velocity (V_h) was measured at a sampling rate of 47 Hz using a radar device (Stalker ATS II, Texas, USA) positioned 3 m behind the starting line on a tripod set 1 m above the ground to approximately align with players' centre of mass (Simperingham et al., 2016). Each data acquisition was saved on Stalker ATS SystemTM software (Version 5.0.3.0, Applied Concepts, Inc, Texas, USA) and imported to Origin software (Version 8.0, OriginLab Corporation, USA) for further analysis. The velocity raw data prior to the start and after the V_{max} plateau were discarded from the analysis (Simperingham et al., 2019). The velocity-time curve for each sprint was fitted to a mono-exponential function (Equation (1)) and least-square regression method (Figure 1):

$$v(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (1)$$

where t is the time. The raw values for which there was a doubt between the signal and noise at the start were also discarded using a time delay (Δt) of 0.3 s (Equation (2)) to associate the first velocity value considered to the true time. Adding this parameter leads to not overestimate force and power measurements and improves the reliability (Samozino, 2018):

$$v(t) = V_{max} \times \left(1 - e^{-(t-\Delta t)/\tau}\right) \quad (2)$$

F_0 , V_0 , P_{max} (modelled as $F_0 \times V_0/4$), S_{FV} (modelled as $-F_0/V_0$), the time required to cover 5 m and 40 m were obtained with the same processing and computation method developed by Samozino et al. (2016). Relative values for F_0 (F_{0rel}), P_{max} (P_{maxrel}) and S_{FV} (S_{FVrel}) were calculated relatively to the player's body mass (fully equipped).

Statistical analysis

Statistics were carried out using Statistica version 13 (TIBCO Software Inc, OK, USA). All data were expressed as mean \pm standard deviation (SD) and statistical significance was set

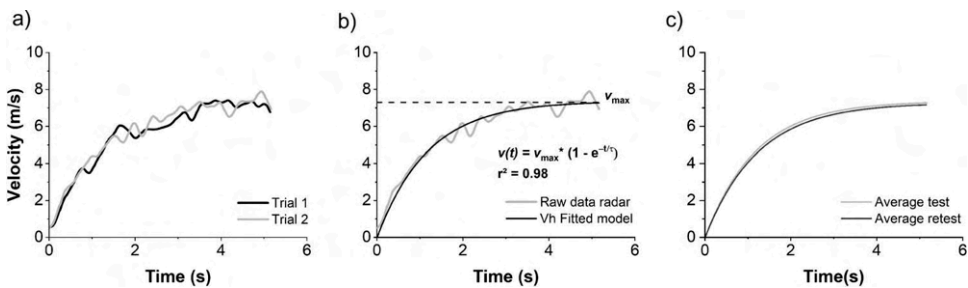


Figure 1. Raw data of the velocity-time curve measured by radar between two trials from the same testing session (panel A), fitted data of the horizontal velocity-time curve with a mono-exponential function (panel B) and averaged fitted data of the velocity-time curve from each testing session (panel C). Data were collected from the same player in all three panels.

at $p < 0.05$. Before using parametric statistical test procedures, the assumptions of normality were verified using the Kolmogorov-Smirnov test. To determine the inter-trial and test-retest relative reliability of computed variables, ICC was calculated. The thresholds adopted to determine the level of reliability for each variables were: 0.20–0.49 ‘low’, 0.50–0.74 ‘moderate’, 0.75–0.89 ‘high’, 0.90–0.98 ‘very high’ and ≥ 0.99 ‘extremely high’ (Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009). To test the absolute reliability, SEM and CV were calculated. The level of agreement between trials and test-retest was quantified using the 95% LOA method. The inter-trial and test-retest differences were drawn in relation to the mean values and 95% of the differences were expected to lie between the two LOA that were the mean difference ± 1.96 SD of the differences (Atkinson & Nevill, 1998). The smallest worthwhile change (SWC) was calculated as 0.3 of the standard error of measurement (SEM) and 0.2 of the between-participants SDs, respectively (Hopkins, 2004). Test sensitivity was determined by comparing SWC with SEM, using the thresholds proposed by Lexell and Downham (2005). When SEM was \leq SWC, the test’s capacity to detect change was considered ‘good’, when SEM was equal to SWC it was considered ‘satisfactory’, and when SEM was \geq SWC the test was rated as ‘marginal’. To investigate systematic bias, a paired sample t-test was conducted to test the hypothesis that the sample means of test and retest values did not differ. The effect size of the difference (d) for all variables was determined as: (mean value trial 2—mean value of trial 1)/pooled SD. The modified scale by Hopkins et al. (2009) was used for the interpretation of d : < 0.20 ‘trivial’; 0.20–0.59 ‘small’; 0.60–1.19 ‘moderate’; 1.20 – 1.99 ‘large’ and < 2.00 ‘very large’. The two trials of the first session were analysed for the inter-trial analysis, whereas for the test-retest reliability, all variables were analysed for comparisons of: (i) the best 40-m trial from test and retest (shortest time to cover the 40-m distance) and (ii) the average of the two trials.

Results

For all trials, the velocity-time curve obtained from the mono-exponential function well fitted to the raw data ($r^2 = 0.98$; $p < 0.01$; Figure 1).

Inter-trial reliability

No variable differed between trials ($p \geq 0.38$, ‘trivial’ to ‘small’ d). The values of ICC were indicative of ‘high’ to ‘very high’ relative inter-trial reliability for all variables, with the exception of S_{FV} and S_{FVrel} that were rated as ‘low’. All CVs were below 10% and considered as ‘acceptable’. Except for S_{FV} , S_{FVrel} , F_0 , and F_{0rel} , all SEMs were lower or equal than their respective SWCs, indicating a ‘satisfactory’ to ‘good’ test sensitivity. For all variables, SEM values were low ($< 5\%$ of mean values) and change in mean close to 0 (Table 1).

Test-retest reliability

No significant test-retest bias was found for any of the computed variables for any of the two methods (best and averaged values). Relative test-retest reliability was deemed as ‘low’ for S_{FVrel} , ‘moderate’ for S_{FV} and ‘high’ to ‘very high’ for all other variables when considering best trials (Table 2). Considering averaged trials (Table 3), relative test-retest reliability

Table 1. Relative and absolute inter-trial reliability of radar-derived mechanical variables from two 40 m on-ice forward sprint skating.

	Trial 1	Trial 2	p value	d; effect	ICC	CV (%)	Mean bias	± 95% LOA	SEM	SWC
F ₀ (N)	390 ± 51	391 ± 47	0.938	0.04; <i>trivial'</i>	0.78 (0.45–0.94)	5.9 (4.1–10.0)	1.73	79.86	12.28	8.02
F _{0rel} (N/kg)	5.47 ± 0.72	5.50 ± 0.67	0.902	0.05; <i>trivial'</i>	0.77 (0.43–0.93)	5.9 (4.1–10.0)	0.04	1.16	0.18	0.11
V ₀ (m/s)	8.12 ± 0.37	7.98 ± 0.32	0.375	0.39; <i>small'</i>	0.86 (0.57–0.96)	1.7 (1.2–3.0)	-0.13	0.40	0.06	0.06
P _{max} (W)	793 ± 129	783 ± 111	0.837	0.09; <i>trivial'</i>	0.87 (0.60–0.96)	5.3 (3.9–8.4)	-10.44	132.6	20.40	22.16
P _{maxrel} (W/kg)	11.14 ± 1.75	11.00 ± 1.53	0.832	0.09; <i>trivial'</i>	0.85 (0.53–0.96)	5.1 (3.6–9.0)	-0.15	1.97	0.30	0.30
S _{Fvel} ((N.m)/s/kg)	-0.67 ± 0.08	-0.69 ± 0.08	0.597	0.23; <i>small'</i>	0.29 (0.02–0.81)	7.6 (5.3–13.0)	-0.02	0.20	0.03	0.01
S _{Fv} ((N.m)/s)	-47.95 ± 5.29	-49.01 ± 5.44	0.651	0.20; <i>small'</i>	0.40 (0–0.79)	7.2 (5.0–13.0)	-1.06	11.94	1.83	0.64
V _{max} (m/s)	7.79 ± 0.35	7.67 ± 0.31	0.403	0.37; <i>small'</i>	0.91 (0.70–0.98)	1.4 (1.0–2.5)	-0.12	0.30	0.05	0.06
5 m (s)	1.60 ± 0.09	1.60 ± 0.09	0.956	0.02; <i>trivial'</i>	0.80 (0.41–0.94)	2.3 (1.6–4.0)	0.00	0.12	0.02	0.02
40 m (s)	6.55 ± 0.29	6.60 ± 0.26	0.678	0.18; <i>trivial'</i>	0.96 (0.86–0.99)	1.0 (0.7–1.8)	0.05	0.18	0.03	0.05

Mean ± SD values.

Note. d: Cohen' d effect size; ICC: intra-class correlation coefficient (lower—upper limit); CV: coefficient of variation (with confidence interval); LOA: limit of agreement (1.96 × SD); SEM: standard error of measurement; SWC: smallest worthwhile change. * Significantly different, $p < 0.05$.

Table 2. Relative and absolute test-retest reliability of radar-derived mechanicals variables from the best 40 m skating sprints.

	Best trial test	Best trial retest	p value	d; Effect	ICC	CV (%)	Mean bias	± 95% LOA	SEM	SWC
F ₀ (N)	397 ± 73	421 ± 94	0.508	0.29; 'small'	0.77 (0.34–0.93)	9.2 (6.4–16.0)	25.15	122.24	18.80	14.27
F _{0rel} (N/kg)	5.60 ± 1.00	5.91 ± 1.22	0.522	0.28; 'small'	0.76 (0.28–0.92)	9.2 (6.4–16.0)	0.31	1.79	0.28	0.18
V ₀ (m/s)	7.97 ± 0.48	8.02 ± 0.42	0.800	0.11; 'trivial'	0.84 (0.52–0.96)	1.8 (1.3–3.3)	0.05	0.54	0.08	0.08
P _{max} (W)	797 ± 180	848 ± 217	0.557	0.26; 'small'	0.86 (0.57–0.96)	8.6 (6.1–15.0)	50.57	226.84	34.89	36.29
P _{maxrel} (W/kg)	11.22 ± 2.44	11.91 ± 2.90	0.549	0.26; 'small'	0.84 (0.50–0.95)	8.7 (6.1–15.0)	0.69	3.33	0.51	0.48
S _{FVel} ((N.m)/s/kg)	−0.69 ± 0.09	−0.73 ± 0.13	0.468	0.32; 'small'	0.43 (0.00–0.81)	8.9 (6.2–16.0)	−0.04	0.25	0.04	0.01
S _{FV} ((N.m)/s)	−49.56 ± 7.26	−52.32 ± 10.46	0.484	0.31; 'small'	0.57 (0.00–0.86)	8.6 (6.1–15.0)	2.76	17.20	2.65	1.30
V _{max} (m/s)	7.73 ± 0.31	7.74 ± 0.38	0.912	0.05; 'small'	0.92 (0.73–0.98)	1.1 (0.8–1.1)	0.02	0.31	0.05	0.07
5 m (s)	1.60 ± 0.09	1.56 ± 0.12	0.161	−0.34; 'small'	0.77 (0.34–0.93)	3.3 (1.6–3.9)	−0.04	0.16	0.02	0.02
40 m (s)	6.57 ± 0.28	6.50 ± 0.39	0.259	−0.21; 'small'	0.86 (0.57–0.96)	1.9 (1.3–3.3)	−0.07	0.39	0.06	0.07

Mean ± SD values.

Note. d: Cohen' d effect size; ICC: intra-class correlation coefficient (lower—upper limit); CV: coefficient of variation (with confidence interval); LOA: limit of agreement (1.96 × SD); SEM: standard error of measurement; SWC: smallest worthwhile change. * Significantly different, $p < 0.05$.

Table 3. Relative and absolute test-retest reliability radar-derived mechanical variables from the average of two 40 m skating sprints.

	Average of the 2 trials test	Average of the 2 trials retest	p value	d; effect	ICC	CV (%)	Mean bias	± 95% LOA	SEM	SWC
F ₀ (N)	392 ± 47	408 ± 65	0.508	0.29; 'small'	0.88 (0.62–0.97)	5.2 (3.6–9.1)	16.05	60.91	9.37	10.46
F _{0rel} (N/kg)	5.50 ± 0.66	5.69 ± 0.80	0.552	0.26; 'small'	0.86 (0.55–0.96)	5.0 (3.5–8.8)	0.19	0.86	0.13	0.13
V ₀ (m/s)	8.04 ± 0.32	8.05 ± 0.39	0.949	0.03; 'trivial'	0.90 (0.68–0.97)	1.4 (1.1–2.3)	0.01	0.35	0.05	0.07
P _{max} (W)	790 ± 120	823 ± 160	0.591	0.24; 'small'	0.92 (0.73–0.98)	5.1 (3.6–9.0)	33.49	126.50	19.46	26.83
P _{maxrel} (W/kg)	11.08 ± 1.62	11.53 ± 2.06	0.578	0.25; 'small'	0.90 (0.68–0.97)	5.2 (3.6–9.1)	0.45	1.80	0.28	0.35
S _{Fvel} ((N.m)/s/kg)	-0.69 ± 0.07	-0.70 ± 0.08	0.663	0.19; 'trivial'	0.80 (0.41–0.94)	5.2 (3.6–9.1)	-0.01	0.10	0.02	0.01
S _{Fv} ((N.m)/s)	-48.64 ± 4.68	-50.54 ± 6.71	0.445	0.33; 'small'	0.79 (0.39–0.94)	4.0 (2.8–7.0)	1.90	8.03	1.23	1.00
V _{max} (m/s)	7.67 ± 0.46	7.72 ± 0.40	0.783	0.12; 'trivial'	0.88 (0.62–0.97)	1.6 (1.1–2.8)	0.05	0.46	0.07	0.08
5 m (s)	1.60 ± 0.14	1.58 ± 0.09	0.530	-0.18; 'small'	0.81 (0.48–0.95)	2.7 (1.9–4.6)	-0.02	0.22	0.03	0.03
40 m (s)	6.60 ± 0.47	6.53 ± 0.32	0.489	-0.19; 'trivial'	0.85 (0.45–0.97)	2.0 (1.4–3.4)	-0.07	0.69	0.10	0.08

Mean ± SD values.

Note. d: Cohen' d effect size; ICC: intra-class correlation coefficient (lower–upper limit); CV: coefficient of variation (with confidence interval); LOA: limit of agreement (1.96 × SD); SEM: standard error of measurement; SWC: smallest worthwhile change. * Significantly different, p < 0.05.

of all variables was considered as 'high' to 'very high'. All test-retest CVs were considered as 'acceptable' (< 10%), with higher CVs using the best vs. averaged trial. When considering the best trial, SEMs were lower or equal than SWC for V_0 , P_{\max} and V_{\max} , indicating a 'satisfactory' or 'good' test sensitivity. The other variables showed a 'marginal' test sensitivity. Only the S_{FVrel} and S_{FV} showed a high SEM (> 5% of the mean values). When considering the averaged value of the two trials, all SEMs (except S_{FVrel} and S_{FV}) were lower or equal than their respective SWCs indicating that all were of 'good' or 'satisfactory' test sensitivity. All SEMs values were low (< 5% of mean values). The mean bias between test and retest was 16.1 ± 31.1 N, 0.05 ± 0.23 m/s, 33.5 ± 64.5 W and 1.90 ± 4.10 (N.m)/s for F_0 , V_{\max} , P_{\max} and S_{FV} , respectively. For relative values, the mean bias between the test and retest was presented in Bland and Altman plots (Figure 2).

Discussion and implications

This study aimed to assess the feasibility to apply the method developed by Samozino et al. (2016) in the particular context of on-ice hockey skating sprint acceleration. After validating that the skating velocity describes a mono-exponential function, we assessed

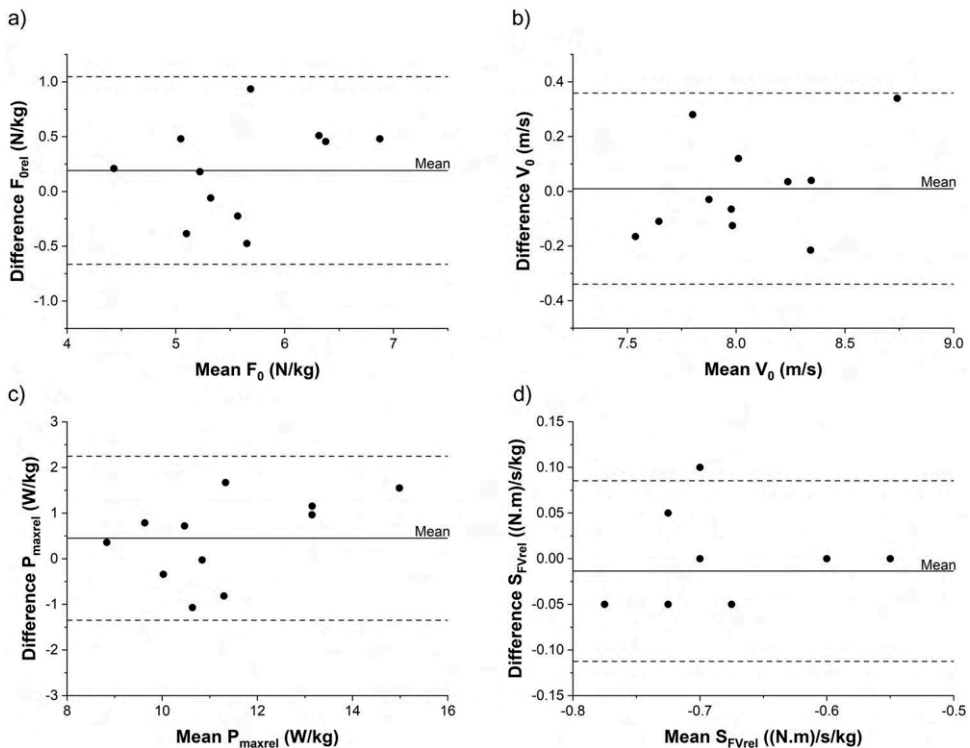


Figure 2. Bland and Altman plots of the averaged test and retest values for F_{0rel} (panel A), V_0 (panel B), P_{maxrel} (panel C) and S_{FVrel} (panel D). Upper and lower horizontal dotted lines represent the 95% limits of agreement (mean \pm 1.96 SD of the difference between test and retest). Please note that two dots of the panel D plots (-0.775 ; -0.05) and (-0.675 ; -0.05) represent respectively two and three participants (identical values).

the relative and absolute reliability of radar-derived kinetic variables and force-velocity relationship measured during on-ice 40-m forward sprint skating in highly-trained female ice hockey players. All variables, except S_{FV} and S_{FVrel} ('low' to 'moderate' ICC), revealed 'acceptable' inter-trial and test-retest reliability (ICC ≥ 0.75 and CV $\leq 10\%$). Furthermore, test-retest reliability (ICC and CV) and sensitivity (SEMs \leq SWCs) were higher when considering averaged values from the two trials compared to the best trial only. Finally, the mean bias and the 95% LOA showed 'good' level of agreement for all parameters.

On-ice forward skating start, commonly named 'running motion' (*i.e.* the first 2–4 strides) (Lafontaine, 2007), elicits specific kinetic and kinematic patterns compared with running sprint standing starts (Pearsall et al., 2013; Renaud et al., 2017). Although there is more transverse and frontal plane motion in forward skating compared to running stride (Pearsall et al., 2013), our findings showed that the horizontal velocity-time curve of the centre of mass described the same mono-exponential function in both motor tasks (Di Prampero et al., 2005). As mentioned by Samozino et al. (2016), the biomechanical model exclusively focuses on the sagittal ground reaction force component that is considered as the most effective variable to move forward. Testing the reliability of a method is always a mixed effect of the participants' movement pattern and the method used itself. As such, improving the setting of the testing protocol and data processing tends to enhance method's reliability (Samozino, 2018). For example, Haugen, Breitschadel, and Samozino (2018) highlighted the importance of timing gate set up (*i.e.* type and position) to improve the reliability of the force-velocity-power profile assessment of sprinting athletes. Regarding the radar velocity data processing, Samozino (2018) advised to apply a 0.3 s delay in his fitted mono-exponential function (Equation (2)) in order to exclude the starting signal noise of the radar system and avoid any overestimation of F_0 and P_{max} . The application of this delay in our data processing is a possible explanation for the higher reliability reported in our study for F_{0rel} (ICC ranging 0.79–0.90) compared to those reported by Buchheit et al. (2014) (ICC = 0.64 in inter-trial reliability) or Simperingham et al. (2019) (ICC ranging 0.54–0.79 in inter-trial and test-retest reliability). Previous studies evaluating sprint skating in ice hockey players have reported some differences in the acceleration phase between high- and low-calibre skaters (Buckeridge et al., 2015; Renaud et al., 2017). Such differences may be related to a higher rate of force development, thereby resulting in greater mechanical power output during the initial accelerative strides. Therefore, an accurate estimation of F_0 is crucial because this mechanical variable and the maximal RF value appear to be determinant for the acceleration phase (*i.e.* up to 20 m). These variables showed a strong relationship with time splits of shorter sprints (Buchheit et al., 2014; Morin & Samozino, 2016) as it could be observed in sports requiring many changes in direction. In this view, the ability to start quickly and apply an important F_0 in the shortest period of time with the smallest friction on the ice (Houdijk, de Koning, de Groot, Bobbert, & van Ingen Schenau, 2000; Shell et al., 2017) is probably the most relevant skating skill to reach the highest horizontal velocity (Marino, 1995).

Monitoring changes in acceleration and sprint performance requires reliable methods, particularly in highly-trained athletes who exhibit lower potential of progress than

sedentary or recreationally active individuals. In most cases, coaches require multiple sprints performance to detect the best trial or calculate the averaged sprint time for a given test (Bond et al., 2018). Accordingly, it has been shown that using a multiple sprints test improves the reliability and decreases the ‘signal-to-noise’ ratio (Haugen & Buchheit, 2016). However, Morin and Samozino (2016) have demonstrated that it is possible to reproduce the same sprinting performance with different force-velocity profile during sprint running. Here, we reported ‘high’ to ‘very high’ inter-trial and test-retest reliability for almost all variables. Only S_{FV} (ICC: 0.40; CV: $7.2 \pm 5.1\%$) and S_{FVrel} (ICC: 0.29; CV: $7.6 \pm 6.7\%$) reported in the present study contrast with the higher inter-trial reliability reported by Samozino et al. (2016) (*i.e.* CV: $4.0 \pm 2.7\%$; 50-m running with high-level sprinters) and Buchheit et al. (2014) (*i.e.* ICC: 0.88; 40-m running with highly-trained young soccer players). Keeping in mind that the reliability evaluated in the present study is the mixed effect of the participants’ movement pattern and the method used, these differences could be explained by the age of our players and probably to a ‘low sprint experience’. For the test-retest reliability, when considering the best trial observed for S_{FV} and S_{FVrel} (ICC: 0.57, CV: $8.6 \pm 6.8\%$ and ICC: 0.43, CV: $8.9 \pm 9.3\%$, respectively), our results were lower than the ICC (0.71 for both variables) recently reported during short distance (30 m) sprint running accelerations (Simperingham et al., 2019) but with a closer CV (8.5% for both variables). However, averaging values from two trials tended to improve the test-retest reliability (ICC 0.79 and 0.80, respectively for S_{FV} and S_{FVrel} vs. 0.74 for both variables) as reported by Simperingham et al. (2019). Therefore, we advise practitioners to average two trials to use S_{FV} and S_{FVrel} in order to monitor training-induced changes (*e.g.* force or velocity dominant) in force-velocity-power profile in ice hockey skating.

Whilst the average high-intensity skating distance is relatively low during an ice hockey game (*i.e.* 15–16 m) (Lignell et al., 2018) peak velocity can reach ≥ 11 m/s (Merk, 2018). Such high-intensity activities can be frequently repeated, accounting for $\sim 18\%$ of the total effective playing time (Brocherie et al., 2018). In comparison with F_0 measured in other team-sport female players (*i.e.* 6.3 to 7.3 N/kg) (Jiménez-Reyes et al., 2019; Marcote-Pequeno et al., 2019; Rakovic, Paulsen, Helland, Eriksrud, & Haugen, 2018), F_0 of the players measured on-ice (5.9 ± 1.2 N/kg) appeared to be lower. This low F_0 associated to the high on-ice V_0 (8.02 ± 0.42 m/s) tends to decrease S_{FVrel} (-0.73 ± 0.13 (N.m)/s/kg) compared to those obtained in running conditions (-0.78 to -0.87 (N.m)/s/kg) (Jimenez-Reyes et al., 2019). Such velocity-dominant slope seems to be specific to the force-velocity-power profile observed in ice hockey sprint skating. Further studies with larger samples of individuals, different genders, playing positions and standards are warranted to verify this assumption.

Several limitations should be kept in mind when interpreting the data from the present study. Firstly, the low sample size precludes any general conclusions as relative reliability results are particularly dependant on the number of participants (Hopkins, 2000). While the playing experience is suitable, as previously stated, the female ice hockey players who participated to the present study possibly had a ‘low skating sprint experience’ resulting from minimal structured skating velocity training experience or technical proficiency. However, we assume that the reliability should be greater with male and female ice hockey players of higher playing standards. Future studies should therefore intend to investigate the reliability considering elite level population. Another point to mention

relates to the application of simplified inverse dynamic approach which only consider the movement kinetics in the sagittal plan and not in the frontal and transverse plan. Although this method appears convenient to *in situ* conditions, this warrants further investigation using more conventional mechanical approaches.

From a practical viewpoint, skating kinetics and force-velocity-power relationship could be measured and computed during on-ice 40-m forward sprint skating task from simple and easily collectable variables (*i.e.* body mass, stature and instantaneous velocity). This novel on-ice force-velocity-power profiling model appears convenient for an ecological use by sport practitioners to determine individual profile and prescribe adequate training program (*e.g.* force or velocity dominant). Further, this approach yields new insights into the understanding of ice hockey skating biomechanics. For example, the technical capability would complement the force-velocity-power profile to characterise the acceleration phase of the forward sprint skating, well known to discriminate high- and low-calibre ice hockey players (Buckeridge et al., 2015; Renaud et al., 2017).

Conclusion

The current study indicates that radar-derived kinetics variables assessed during on-ice 40-m forward sprint skating demonstrate an acceptable level of relative and absolute reliability. Averaging trials should be recommended over the use of the best trial only to improve the reliability of forward skating force, velocity and power measurements. These findings offer a promising and simple method to monitor training-induced changes in macroscopic mechanical variables of ice hockey skating. Further studies comparing on-ice *vs.* off-ice mechanical variables and force-velocity profile would be relevant to better understand skating performance. Such investigations could provide practical insights to optimise transfer from off-ice training to on-ice performance.

Acknowledgments

The authors would like to thank the French Federation of Ice Hockey and the players of the French women's national training centre for their involvement in the experimentation. They also expressed their gratitude to Jean-Baptiste Chauvin, manager of the team for his helpful collaboration.

Disclosure statement

The Laboratory Sport, Expertise and Performance is a partner of the French network for Injury and Illness Research in Sport (FIIRST), recognized as a Research Centre for the Prevention of Injury and Illness and the Protection of Athletes by the International Olympic Committee (IOC). As a member of the IOC Medical Research Network, FIIRST has received funding from the IOC to establish long-term research programmes on the prevention of injuries and illnesses in sport for the protection of athlete health.

ORCID

Gaël Guilhem  <http://orcid.org/0000-0002-0377-2060>

Franck Brocherie  <http://orcid.org/0000-0002-0808-7986>

References

- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*, 26, 217–238. doi:10.2165/00007256-199826040-00002
- Bond, C. W., Bennett, T. W., & Noonan, B. C. (2018). Evaluation of skating top speed, acceleration, and multiple repeated sprint speed ice hockey performance tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32, 2273–2283. doi:10.1519/JSC.0000000000002644
- Bracko, M. R. (2004, September). Biomechanics powers ice hockey performance. *Biomechanics*, 47–53.
- Brocherie, F., Girard, O., & Millet, G. P. (2018). Updated analysis of changes in locomotor activities across periods in an international ice hockey game. *Biology of Sport*, 35, 261–267. doi:10.5114/biolsport.2018.77826
- Buchheit, M., Samozino, P., Glynn, J. A., Michael, B. S., Al Haddad, H., Mendez-Villanueva, A., & Morin, J. B. (2014). Mechanical determinants of acceleration and maximal sprinting speed in highly trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 32, 1906–1913. doi:10.1080/02640414.2014.965191
- 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, e0127324. doi:10.1371/journal.pone.0127324
- Budarick, A. R., Shell, J. R., Robbins, S. M. K., Wu, T., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. (2018). Ice hockey skating sprints: Run to glide mechanics of high calibre male and female athletes. *Sports Biomechanics*, 1–17. doi:10.1080/14763141.2018.1503323
- Couderc, A., Gabbett, T. J., Piscione, J., Robineau, J., Peeters, A., Igarza, G., ... Lacombe, M. (2019). Repeated high-intensity effort activity in international male rugby sevens. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi:10.1519/JSC.0000000000002986
- Di Prampero, P. E., Fusi, S., Sepulcri, L., Morin, J. B., Belli, A., & Antonutto, G. (2005). Sprint running: A new energetic approach. *Journal of Experimental Biology*, 208, 2809–2816. doi:10.1242/jeb.01700
- Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., & Abernethy, B. (2012). Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15, 80–86. doi:10.1016/j.jsams.2011.07.004
- Haugen, T., Breitschadel, F., & Samozino, P. (2018). Power-force-velocity profiling of sprinting athletes: Methodological and practical considerations when using timing gates. *Journal of Strength and Conditioning Research*. doi:10.1519/JSC.0000000000002890
- Haugen, T., & Buchheit, M. (2016). Sprint running performance monitoring: Methodological and practical considerations. *Sports Medicine*, 46, 641–656. doi:10.1007/s40279-015-0446-0
- Hopkins, W. G. (2000). Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*, 30, 1–15. doi:10.2165/00007256-200030010-00001
- Hopkins, W. G. (2004). How to interpret changes in an athletic performance test. *Sportscience*, 8, 1–7. Retrieved from <http://www.sportsci.org/jour/04/wghtests.htm>
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41, 3–13. doi:10.1249/MSS.0b013e3181818cb278
- 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 & Science in Sports & Exercise*, 32, 635–641. doi:10.1097/00005768-200003000-00013

- Jimenez-Reyes, P., Garcia-Ramos, A., Cuadrado-Penañiel, V., Parraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2019). Differences in sprint mechanical force-velocity profile between trained soccer and futsal players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 478–485. doi:10.1123/ijsp.2018-0402
- Jiménez-Reyes, P., García-Ramos, A., Cuadrado-Peñafiel, V., Párraga-Montilla, J. A., Morcillo-Losa, J. A., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2019). Differences in sprint mechanical force-Velocity profile between trained soccer and futsal players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 478–485. doi:10.1123/ijsp.2018-0402
- Lafontaine, D. (2007). Three-dimensional kinematics of the knee and ankle joints for three consecutive push-offs during ice hockey skating starts. *Sports Biomechanics*, 6, 391–406. doi:10.1080/14763140701491427
- Lexell, J. E., & Downham, D. Y. (2005). How to assess the reliability of measurements in rehabilitation. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 84, 719–723. doi:10.1097/01.phm.0000176452.17771.20
- Lignell, E., Fransson, D., Krustup, P., & Mohr, M. (2018). Analysis of high-intensity skating in top-class ice hockey match-play in relation to training status and muscle damage. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32, 1303–1310. doi:10.1519/JSC.0000000000001999
- Marcote-Pequeno, R., Garcia-Ramos, A., Cuadrado-Penañiel, V., Gonzalez-Hernandez, J. M., Gomez, M. A., & Jimenez-Reyes, P. (2019). Association between the force-velocity profile and performance variables obtained in jumping and sprinting in elite female soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 209–215. doi:10.1123/ijsp.2018-0233
- Marino, G. W. (1995, July). *Biomechanics of power skating: Past research, future trends*. Paper presented at the 13th International Symposium for Biomechanics in Sports, Thunder Bay, Canada, 246–252.
- Merk, M. (2018, May 17). Stats you've never seen before! Retrieved from <https://www.iihf.com/en/events/2018/wm/news/3150/stats-you-have-never-seen-before>
- Morin, J. B., Edouard, P., & Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43, 1680–1688. doi:10.1249/MSS.0b013e318216ea37
- Morin, J. B., Jeannin, T., Chevallier, B., & Belli, A. (2006). Spring-mass model characteristics during sprint running: Correlation with performance and fatigue-induced changes. *International Journal of Sports Medicine*, 27, 158–165. doi:10.1055/s-2005-837569
- Morin, J. B., & Samozino, P. (2016). Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11, 267–272. doi:10.1123/ijsp.2015-0638
- Pearsall, D., Turcotte, R., Levangie, C., & Forget, S. (2013). Biomechanical adaptation in ice hockey skating. In H. Youlian (Ed.), *Routledge handbook of ergonomics in sport and exercise* (pp. 51–60). Abingdon: Routledge. doi:10.4324/9780203123355.ch4
- Pearsall, D., Turcotte, R., & Murphy, S. (2000). Biomechanics of ice hockey. In W. E. Garrett & D. T. Kirkendall (Eds.), *Exercise and sport science* (Vol. 43, pp. 675–692). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Saez-de-Villarreal, E., Couturier, A., Samozino, P., & Morin, J. B. (2015). Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25, 583–594. doi:10.1111/sms.12389
- Rakovic, E., Paulsen, G., Helland, C., Eriksrud, O., & Haugen, T. (2018). The effect of individualised sprint training in elite female team sport athletes: A pilot study. *Journal of Sports Sciences*, 36, 2802–2808. doi:10.1080/02640414.2018.1474536
- Renaud, P. J., Robbins, S. M. K., Dixon, P. C., Shell, J. R., Turcotte, R. A., & Pearsall, D. J. (2017). Ice hockey skate starts: A comparison of high and low calibre skaters. *Sports Engineering*, 20, 255–266. doi:10.1007/s12283-017-0227-0

- Robbins, S. M., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. (2018). Principal component analysis identifies differences in ice hockey skating stride between high- and low-calibre players. *Sports Biomechanics*, 1–19. doi:[10.1080/14763141.2018.1524510](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1524510)
- Samozino, P. (2018). A simple method for measuring force, velocity and power capabilities and mechanical effectiveness during sprint running. In J.-B. Morin & P. Samozino (Eds.), *Biomechanics of training and testing: Innovative concepts and simple field methods* (pp. 237–267). Cham: Springer International Publishing. doi:[10.1007/978-3-319-05633-3_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05633-3_11)
- Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin, J. B. (2016). A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26, 648–658. doi:[10.1111/sms.12490](https://doi.org/10.1111/sms.12490)
- Shell, J. R., Robbins, S. M. K., Dixon, P. C., Renaud, P. J., Turcotte, R. A., Wu, T., & Pearsall, D. J. (2017). Skating start propulsion: Three-dimensional kinematic analysis of elite male and female ice hockey players. *Sports Biomechanics*, 16, 313–324. doi:[10.1080/14763141.2017.1306095](https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1306095)
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., Pearson, S. N., & Ross, A. (2019). Reliability of horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports Biomechanics*, 18, 88–99. doi:[10.1080/14763141.2017.1386707](https://doi.org/10.1080/14763141.2017.1386707)
- Simperingham, K. D., Cronin, J. B., & Ross, A. (2016). Advances in sprint acceleration profiling for field-based team-sport athletes: Utility, reliability, validity and limitations. *Sports Medicine*, 46, 1619–1645. doi:[10.1007/s40279-016-0508-y](https://doi.org/10.1007/s40279-016-0508-y)
- Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: Specific to field-based team sports. *Sports Medicine*, 35, 1025–1044. doi:[10.2165/00007256-200535120-00003](https://doi.org/10.2165/00007256-200535120-00003)
- Stidwill, T. J., Pearsall, D., & Turcotte, R. (2010). Comparison of skating kinetics and kinematics on ice and on a synthetic surface. *Sports Biomechanics*, 9, 57–64. doi:[10.1080/14763141003690237](https://doi.org/10.1080/14763141003690237)
- Upjohn, T., Turcotte, R., Pearsall, D. J., & Loh, J. (2008). Three-dimensional kinematics of the lower limbs during forward ice hockey skating. *Sports Biomechanics*, 7, 206–221. doi:[10.1080/14763140701841621](https://doi.org/10.1080/14763140701841621)
- van der Kruk, E., Reijne, M. M., de Laat, B., & Veeger, D. (2018). Push-off forces in elite short-track speed skating. *Sports Biomechanics*, 1–12. doi:[10.1080/14763141.2018.1441898](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1441898)
- van der Kruk, E., Schwab, A. L., van der Helm, F. C. T., & Veeger, H. E. J. (2018). Getting in shape: Reconstructing three-dimensional long-track speed skating kinematics by comparing several body pose reconstruction techniques. *Journal of Biomechanics*, 69, 103–112. doi:[10.1016/j.jbiomech.2018.01.002](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.01.002)
- van der Kruk, E., van der Helm, F. C. T., Veeger, H. E. J., & Schwab, A. L. (2018). Power in sports: A literature review on the application, assumptions, and terminology of mechanical power in sport research. *Journal of Biomechanics*, 79, 1–14. doi:[10.1016/j.jbiomech.2018.08.031](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.08.031)

Équilibre entre contraintes biomécaniques et capacités musculaires : exploration innovante en hockey sur glace

Le hockey sur glace est le sport collectif générant les déplacements les plus rapides. Cette capacité à atteindre des vitesses de patinage élevées en un minimum de temps apparaît comme un critère de performance communément admis dans la littérature. Néanmoins, (i) le contexte de pratique (*i.e.*, sport couvert pratiqué sur glace) limite les solutions permettant d'affiner notre compréhension des déterminants biomécaniques de la performance en patinage en situation écologique ; et (ii) les connaissances disponibles sont principalement issues de mesures prélevées auprès de collectifs masculins, ce qui limite leur transfert aux spécificités de la pratique féminine. Ce travail de thèse a pour objectif d'évaluer les contraintes biomécaniques en situation de compétition et d'entraînement et de déterminer le rôle des capacités musculaires des joueuses de hockey sur glace dans la performance.

Dans une première étude utilisant l'accélérométrie triaxiale, nous avons montré que les actions brèves et répétées à haute intensité, caractéristiques de l'activité, induisent une diminution de la charge mécanique. Bien que la charge mécanique soit inférieure lors du dernier match par rapport aux trois précédentes oppositions, aucune différence significative n'a été observée entre les matchs. Afin d'évaluer les capacités musculaires de joueuses de hockey sur glace et leur lien avec les exigences de l'activité, nous avons estimé comme acceptable la reproductibilité intra- et inter-session des différents paramètres de force, vitesse et puissance inhérents au profil et modélisés à partir de mesures de vitesse effectuées à l'aide d'un radar (étude 2). À l'inverse, l'utilisation de la vidéo haute-fréquence semble sous-estimer la force et la puissance mesurée, en comparaison aux résultats obtenus avec le radar (étude 3). Ces résultats semblent accessibles avec le même niveau de reproductibilité, à partir de mesure de vitesse (*i.e.* radar) obtenues lors d'un sprint unique ou de sprints effectués à différents niveaux de résistance (étude 4). Ces résultats sont à prendre en considération dans l'application d'un suivi individuel des différents indicateurs.

Une évaluation globale des capacités musculaires lors de mouvements effectuées hors glace (*i.e.*, squat jump et sprint en course à pied) et spécifique au patinage à l'aide de profils force-vitesse permettrait d'établir les liens entre les différentes variables et les contraintes caractéristiques de l'activité. Les résultats de la cinquième étude démontrent de fortes corrélations entre la puissance maximale produites sur chaque tâche hors glace et la performance en sprint sur glace. En revanche, l'ensemble des autres variables testées ne montrent pas de relations entre les tâches. De manière plus spécifique, nous avons montré, qu'associés à l'efficacité des premiers appuis, la force et la puissance horizontales produites en patinage semblent être essentielles dans la performance en sprint.

Enfin, nous avons appréhendé dans une sixième étude les réponses biomécaniques et physiologiques individuelles durant différents jeux réduits effectués à l'entraînement. Les résultats ont montré que la plus petite surface de jeu par joueuse utilisée ou à l'inverse les plus grandes surfaces augmentaient fortement la charge mécanique (Player load) et la demande physiologique associée, reflétée par la lactatémie et la charge d'entraînement évaluée à partir de la mesure de la fréquence cardiaque.

Ces travaux de thèse montrent que la répétition d'actions à haute intensité influence la charge mécanique en situation de compétition et d'entraînement et mettent en avant le rôle déterminant des capacités de production de force et de puissance dans la performance en patinage. Ces résultats apportent un éclairage nouveau aux entraîneurs désireux d'analyser plus finement l'activité, et ouvrent des perspectives d'applications prometteuses et concrètes vis à vis de la planification et de l'individualisation des entraînements en lien avec les exigences du hockey sur glace.

Mots clés : analyse de l'activité, centrales inertielles, profil force-vitesse, patinage, entraînement, jeux réduits.

Equilibrium between biomechanical demands and muscular capacities: Innovative exploration in ice hockey

Ice hockey is considered as the team sport requiring the fastest locomotor patterns. Based on the literature, the capacity to reach the highest velocity in the lowest time appears to be determinant for skating performance. However, (i) activity context (*i.e.*, indoor sport on ice condition) constrain options allowing to better understanding in-situ skating biomechanical demands; and (ii) most of the studies concern men's performance restricting transfer to the specificity of the women gender. The aim of this thesis is to evaluate biomechanical demands during competition and training context and determine the correlation between muscular capacities and skating performance in women ice hockey players.

In the first study, we assessed the mechanical workload using tri-axial accelerometry during four games against standardized opposition (*i.e.*, same opponent). Brief and repeated high-intensity actions, specific to the activity, lead to a decrease on some mechanical workload parameters. In contrast, while the last game exhibited a drop off all workload variables, no significant difference was observed between games.

In order to evaluate muscular capacities of women ice hockey players, we assessed the validity and reliability of three different methods allowing to determine skating force-velocity profile. Our results showed that intra-trial and test-retest reliability of the force-velocity variables inferred from the radar method was deemed acceptable (study 2). Conversely, the high-speed video-based method appeared to underestimate force and power output variables in comparison to the results inferred from the radar method (study 3). Finally, biomechanical variables determined using velocity measurement (*i.e.*, radar method) from a single unloaded seemed to be comparable with the same reliability to biomechanical variables inferred from multiple resisted skating sprint (study 4). These findings must be considered to implement a specific monitoring of these variables.

A complete evaluation of muscular capacities across different off-ice tasks (*i.e.*, squat jump and running sprint) and specific on-ice task (*i.e.*, skating sprint) using force-velocity profiling would allow to determine the correlation between biomechanical variables and ice hockey-specific demands. The results of the fifth study demonstrated a high relationship between maximal power output of each task and skating performance. In contrast, all other variables did not show any relationship between tasks. More specifically, we attested that the capacity to generate high amounts of horizontal power and effective horizontal force especially during the first steps on the ice is paramount for forward skating sprint performance.

Finally, the sixth study investigated individual biomechanical and physiological responses during various small-sided games. Our results showed that the smallest and largest game's area per player largely increased the mechanical workload (Player Load) and the physiological demand associated, reflected by lactate and training impulse measurements.

To conclude, this thesis demonstrates the impact of repeated high-intensity actions on mechanical workload during competition and training and highlighted the capacity to generate high amounts of horizontal power and effective horizontal force for skating performance. These results must allow coaches to accurately analyze ice hockey activity and offer promising practical applications in order to adopt a more individualized and specific training program.

Keywords: activity analysis, inertial measurement units, force-velocity profiling, skating, training, small-sided games.