

Université de Montréal

Profil force-vitesse de joueurs et joueuses de hockey élités adolescent(e)s : considérations pour
la prescription de l'entraînement hors glace.

Par

Julien Glaude-Roy

Programme de sciences biomédicales, Faculté de médecine
en extension à l'Université du Québec à Trois-Rivières

Thèse présentée

en vue de l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

en sciences biomédicales

Avril 2025

© Julien Glaude-Roy, 2025

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

Université de Montréal

Programme de sciences biomédicales, Faculté de médecine

en extension à l'Université du Québec à Trois-Rivières

Cette thèse intitulée

**Profil force-vitesse de joueurs et joueuses de hockey élités adolescent(e)s : considérations
pour la prescription de l'entraînement hors glace.**

Présentée par

Julien Glaude-Roy

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes

Philippe Gendron

Président-rapporteur

Jean Lemoyne

Directeur de recherche

Jonathan Tremblay

Membre du jury

Nicolas Berryman

Examineur externe

Résumé

Le hockey sur glace est un sport complexe aux exigences physiques et physiologiques importantes et variées. La route vers l'excellence mène à une spécialisation hâtive durant l'adolescence qui, du même coup, est une période critique du développement biologique et psychosocial des jeunes joueurs. Durant cette période, ces derniers se tournent vers les salles d'entraînement afin de maximiser le développement des qualités métaboliques et neuromusculaires nécessaires à une performance optimale en hockey sur glace. La grande variabilité interindividuelle dans le début et la forme du processus de maturation durant l'adolescence nécessitent des méthodes d'évaluations permettant d'individualiser rapidement et facilement la prescription d'exercice. Le profil force-vitesse (F-V) horizontal se présente comme outil prometteur pour établir facilement et rapidement le bilan des capacités neuromusculaires de l'athlète pour l'individualisation de l'entraînement. À ce jour, les données disponibles en hockey sur glace sont limitées et absentes dans le contexte de l'adolescence.

La première étude considère le caractère complémentaire des qualités métaboliques et neuromusculaires en s'intéressant aux associations entre le profil F-V au sprint, les capacités anaérobies et la capacité à répéter des sprints de joueurs et joueuses de hockey élite. Elle démontre l'importance d'être en mesure d'appliquer de la force à haute vitesse afin de maximiser leurs capacités anaérobies. De plus, les différences importantes observées entre les hommes et les femmes suggèrent que les priorités d'entraînement puissent varier en fonction du sexe biologique.

La seconde étude prend en compte la problématique du transfert hors glace à sur glace unique au hockey et explore les associations entre le profil F-V de patinage, la puissance des jambes, la vitesse de sprint et l'habileté à changer de direction des joueurs et joueuses de hockey élite. Les résultats démontrent l'importance d'une bonne préparation physique générale afin de maximiser le développement des habiletés mécaniques de patinage. De plus, ils suggèrent que la priorisation d'exercices qui misent sur les changements de direction ou l'accélération et la vitesse en ligne droite devrait avoir des effets distincts sur l'accélération et la vitesse sur la glace.

La troisième étude considère la forme du processus de maturation physique en comparant le profil F-V de patinage de joueurs de hockey à trois stades pubertaires distincts. Les résultats démontrent une augmentation constante de la vitesse sur glace, mais une augmentation plus tardive des qualités mécaniques associées à la force musculaire. Ils suggèrent qu'avant l'atteinte du pic de croissance, l'entraînement de la technique et de la vitesse devrait être priorisé. Le développement de la force peut être priorisé après l'atteinte du pic de croissance.

En conclusion, les trois études portent sur l'analyse des associations entre le profil F-V de sprint et de patinage de joueurs et joueuses de hockey élite à l'adolescence, le système anaérobie, la performance physique à l'extérieur de la glace et la maturation physique. Les résultats de ces études démontrent que 1- les capacités anaérobies sont principalement affectées par la capacité des joueurs et joueuses à appliquer de la force dans l'axe horizontal à haute vitesse, 2- une bonne préparation physique générale permet de maximiser le développement des capacités mécaniques de patinage, mais que le choix des exercices pourrait influencer les adaptations au niveau de l'accélération ou la vitesse sur la glace et 3- la technique et la vitesse sur glace devraient être priorisées avant l'atteinte du pic de croissance alors que le développement de l'accélération et de la force horizontale devrait être priorisé après l'atteinte de celui-ci. En somme, les résultats permettent de mieux guider les intervenants dans leur interprétation des résultats du profil F-V de patinage pour l'individualisation de l'entraînement musculaire.

Mots-clés : biomécanique, maturation, transfert, patinage, individualisation, préparation physique, évaluation de la performance

Abstract

Ice hockey is a complex sport with significant and varied physical and physiological demands. The path to excellence often involves early specialization during adolescence, which is also a critical period for the biological and psychosocial development of young players. During this time, athletes turn to training facilities to maximize the development of the physiological and neuromuscular qualities required for optimal performance in ice hockey. The large interindividual variability in the timing and pattern of the maturation process during adolescence calls for assessment methods that allow for quick and easy individualization of exercise prescriptions. The horizontal force-velocity (F-V) profile emerges as a promising tool to easily and rapidly assess an athlete's neuromuscular capacities for individualized training. To date, available data in ice hockey are limited and absent in the context of adolescence.

The first study examines the complementary nature of physiological and neuromuscular qualities by exploring the associations among the sprint F-V profile, anaerobic capacity, and repeated sprint ability in elite youth male and female hockey players. It demonstrates the importance of being able to apply force at high speed to maximize anaerobic capacities. Moreover, the significant differences observed between men and women suggest that training priorities may vary based on biological sex.

The second study addresses the off-ice to on-ice transfer issues unique to hockey, exploring the associations among the skating F-V profile, leg power, sprint speed, and change-of-direction abilities in elite hockey players. The findings underscore the importance of solid general physical preparation to optimize the development of skating mechanical skills. They also indicate that prioritizing exercises focusing on change of direction or on acceleration and straight-line speed should have distinct effects on on-ice acceleration and speed.

The third study considers the progression of physical maturation by comparing the skating F-V profile of hockey players at three distinct pubertal stages. The results reveal a consistent increase in on-ice speed but a later increase in the mechanical qualities associated with muscular strength. They suggest that before reaching peak growth velocity, training should prioritize

technique and speed, while strength development can be emphasized after peak height velocity is reached.

In conclusion, these three studies analyze the associations among the sprint and skating F-V profiles of elite adolescent hockey players, the anaerobic system, off-ice physical performance, and physical maturation. The findings show that 1- anaerobic capacities are primarily influenced by a player's ability to apply force in the horizontal axis at high speed, 2- good general physical preparation maximizes the development of skating mechanical capacities, yet the choice of exercises may influence adaptations related to on-ice acceleration or speed, and 3- on-ice technique and speed should be prioritized before reaching peak height velocity, while the development of acceleration and horizontal force should be prioritized afterward. Ultimately, these results provide practitioners with better guidance in interpreting skating F-V profile outcomes for individualized strength training.

Keywords: biomechanics, maturation, transfer, skating, individualization, strength and conditioning, performance evaluation

Table des matières

Résumé.....	5
Abstract.....	7
Table des matières.....	9
Liste des tableaux.....	13
Liste des figures.....	15
Liste des sigles et abréviations.....	17
Remerciements.....	23
Introduction.....	25
Chapitre 1 – Revue de la littérature.....	29
1.1. Évolution de la science du hockey sur glace.....	29
1.2. Les qualités métaboliques du hockey sur glace.....	32
1.2.1. Le système aérobie.....	35
1.2.2. Les systèmes anaérobies lactique et alactique.....	35
1.3. Les qualités neuromusculaires en hockey sur glace.....	39
1.3.1 La puissance.....	42
1.3.2. La force.....	44
1.4. Complémentarité des qualités métaboliques et neuromusculaires.....	46
1.4.1. Vitesse maximale en hockey sur glace.....	48
Chapitre 2 – Problématique, objectifs et méthode générale.....	51
2.1 Adolescence, puberté et qualités physiques.....	51
2.2. Individualisation de l’entraînement neuromusculaire.....	54
2.2.1. L’indice de force dynamique.....	54

2.2.2.	Le profil force-vitesse vertical	56
2.2.3.	Le profil force-vitesse horizontal.....	59
2.2.4.	Interprétation du profil force-vitesse horizontal	63
2.3.	Objectifs et hypothèses spécifiques.....	64
2.3.1.	Questions et hypothèses de recherche – Profil force-vitesse, capacités anaérobies et capacité à répéter des sprints.....	65
2.3.2.	Questions et hypothèses de recherche – Profil force-vitesse de patinage et qualités physiques hors glace.	66
2.3.3.	Questions et hypothèses de recherche – Profil force-vitesse de patinage et maturation physique.....	67
2.4.	Méthode générale.....	67
Chapitre 3 – Associations entre les variables du profil force-vitesse, les capacités anaérobies et la capacité à répéter des sprints à l’extérieur de la glace.		71
3.1.	Apport original de l’étudiant et contribution des co-auteurs.....	71
3.2.	Résumé en français	72
3.3.	Abstract	73
3.4.	Introduction.....	74
3.5.	Methods	77
3.5.1.	Participants.....	77
3.5.2.	Study design	78
3.5.3.	Horizontal force-velocity profile	78
3.5.4.	Wingate	79
3.5.5.	Repeated-sprint ability.....	79
3.5.6.	Statistical analysis.....	80
3.6.	Results	81

3.6.1. Associations between F-V mechanical capabilities and anaerobic capacities.....	81
3.6.2. Differences between male and female players	81
3.7. Discussion.....	83
3.8. Conclusion	86
3.9. Statements and declarations	87
Chapitre 4 – Associations entre la puissance des membres inférieurs, la vitesse de sprint et l’agilité mesurées à l’extérieur de la glace et les variables du profil force-vitesse en patinage.	93
4.1. Apport original de l’étudiant et contribution des co-auteurs.....	93
4.2. Résumé en français	94
4.3. Abstract	96
4.4. Introduction.....	98
4.5. Materials and methods	101
4.5.1. Context and participants.....	101
4.5.2. Study design	102
4.5.3. Skating force-velocity profile	103
4.5.4. Off-ice speed, agility and leg power.....	104
4.5.5. Statistical analyses	105
4.6. Results	106
4.7. Discussion.....	108
4.8. Conclusion	111
4.9. Statements and declarations	112
Chapitre 5 – Associations entre les variables du profil force-vitesse sur la glace et la maturité physique des jeunes joueurs de hockey.	117
5.1. Apport original de l’étudiant et contribution des co-auteurs.....	117

5.2. Résumé en français	118
5.3. Abstract	119
5.4. Introduction.....	120
5.5. Methods	122
5.6. Results	126
5.7. Discussion	127
5.8. Conclusion	129
5.8. Statements and declarations	130
Chapitre 6 – Discussion générale	137
6.1. Profil force-vitesse et capacités anaérobies en hockey sur glace.....	139
6.2. Transfert des habiletés hors glace aux habiletés mécaniques de patinage	142
6.3. Profil force-vitesse et maturation physique.....	145
6.4. Contributions, limites et perspectives	147
6.4.1. Contributions de la thèse	147
6.4.2. Limites	148
6.4.3. Perspectives scientifiques	149
6.4.4. Perspectives pratiques	151
6.5. Conclusion	153
Références bibliographiques.....	155
Annexe A – Code source pour l’application de traitement des données radar.....	167
Annexe B - Certificats d’éthique.....	178

Liste des tableaux

Tableau 1. – Synthèse des qualités métaboliques en hockey sur glace en fonction du sexe biologique et du niveau de jeu.....	38
Tableau 2. – Synthèse des qualités neuromusculaires en hockey sur glace en fonction du sexe biologique et du niveau de jeu.....	45

Liste des figures

Figure 1. – Contribution relative des systèmes énergétiques pour le renouvellement de l'ATP à une intensité constante en fonction du temps adapté de Gatin (2001).	34
Figure 2. – Illustration théorique de la relation force-longueur du muscle adaptée de Scott et al., (2021).	41
Figure 3. – Illustration de la relation hyperbolique force-vitesse au niveau musculaire ou monoarticulaire adaptée de Jaric (2015).	42
Figure 4. – Représentation graphique d'un effort à 130% de la VAM pour deux athlètes ayant une VAM identique, mais différentes MSS selon Blondel et al. (2001).	48
Figure 5. – Moments propices pour le développement des qualités physique adaptés de Balyi et al. (2013) et de Lloyd and Oliver (2012).	53
Figure 6. – Relations force-vitesse et puissance-vitesse théoriques adaptées de (Jaric, 2015)..	58
Figure 7. – Modèle adapté de Morin et Samozino (2016) pour interpréter les variables du profil force-vitesse horizontal.	64
Figure 8. – Capture d'écran du fichier Excel rendu disponible par Jean-Benoit Morin au https://jbmorin.net/downloads-%f0%9f%93%8a%f0%9f%93%88/	68
Figure 9. – Capture d'écran de l'écran de l'interface de l'application MySprint	69
Figure 10. – Capture d'écran de l'outil développé en R et R Shiny pour le traitement des données radar.	70
Figure 11. – Associations entre les paramètres hors glace et sur glace du profil force-vitesse à la conclusion de la thèse.	145
Figure 12. – Organisation sous forme de cadrans des résultats du profil force-vitesse telle que proposée par Hicks et al. (2022). A : Comparaison du profil F-V d'un individu avec le profil optimal, B : Comparaison simultanée des profils F-V de plusieurs athlètes, C : Illustration des profils F-V de plusieurs athlètes sous forme de cadrans, D : Inclusion de l'erreur de mesure dans l'illustration sous forme de cadrans.	151

Liste des sigles et abréviations

ADP : Adénosine diphosphate

ATP : Adénosine triphosphate

bpm : Battements par minute

c.-à-d. : c'est-à-dire

COD : Changement de direction

CM : Centre de masse

CMJ : Saut avec contre-mouvement

DLTA : Développement à long terme de l'athlète

F_0 : Force relative maximale théorique

FMS : Mouvements fonctionnels fondamentaux

F-V : Force-vitesse

FV_{imb} : Pourcentage de déséquilibre entre la pente du profil et la pente du profil optimal

Hz : Hertz

ICC : Corrélation intraclasse

IIHF : Fédération internationale de hockey sur glace

IMTP : Tirade maximale isométrique

J : Joules

K : Kelvin

kg : Kilogramme

LAH : Ligue américaine de hockey

LNH : Ligue nationale de hockey

m : Mètre

M15 : Moins de 15 ans

M16 : Moins de 16 ans

M17 : Moins de 17 ans

M18 : Moins de 18 ans

M20 : Moins de 20 ans

MI : Membres inférieurs

min : Minute

ml : Millilitre

ms : milliseconde

MSS : Vitesse maximale

N : Newton

P_{\max} : Puissance maximale théorique

P-V : Puissance-vitesse

Rf_{\max} : Ratio de force maximale théorique

R.M. : Répétition maximale

s : Seconde

SA : Système aérobie

SAA : Système anaérobie alactique

SAL : Système anaérobie lactique

sec : Seconde

SEM : Erreur type de mesure

S_{fv} : Pente de la relation force-vitesse

S_{fvopt} : Pente optimale de la relation force-vitesse

SJ : Saut sans contre-mouvement

SL : Saut en longueur

SSS : Habiletés sportives spécifiques

U.A. : Unités arbitraires

V_0 : Vitesse maximale théorique

$\dot{V}O_{2max}$: Consommation Maximale d'Oxygène

VAM : Vitesse Aérobie Maximale

W : Watts

YPD : Modèle de développement physique des jeunes

À celles et ceux qui m'ont entouré d'amitié et de bienveillance

Remerciements

Les gens qui me connaissent savent très bien que les mots plus personnels n'ont jamais été une force chez moi. Au regard du travail accompli, je réalise que l'étape des remerciements est essentielle pour clore un grand projet comme celui du doctorat. En écrivant ces lignes, je tiens à mentionner qu'il me sera difficile de rassembler et reconnaître en quelques lignes toutes les personnes qui ont influencé mon parcours et mes pensées à travers ce projet. Un projet doctoral est la somme, oui, de travaux de recherche rigoureux et de longues heures de réflexion, mais surtout une série de discussions et échanges sporadiques avec une personne ou une autre qui, très souvent, m'ont permis de franchir un obstacle sur lequel je me butais depuis longtemps.

Je tiens d'abord à remercier Jean Lemoyne, qui m'a permis de cheminer et avancer durant toutes ces années. Notre relation remonte à mon arrivée dans la belle région de la Mauricie en 2017, alors que je débutais mes études à la maîtrise sous la direction de Sacha Stoloff. Dès mon arrivée, tu m'as offert du support sans obligation de le faire. Ton altruisme m'aura convaincu d'embarquer dans ce projet de près de six ans qui a été revu et réimaginé à maintes reprises. Notre passion commune pour le sport et l'enseignement aura certainement nourri notre nombre incalculable d'idées révolutionnaires pour créer le prochain Lidström ou Datsyuk. J'espère que nous aurons l'occasion de laisser fleurir ces idées encore longtemps. Merci pour tout.

Je tiens aussi à remercier Jessica. Sans toi, il m'aurait été impossible de m'investir autant et aussi longtemps dans ce projet. Ta présence et ton support, malgré toutes les embûches, m'auront aidé à garder le cap. Merci.

Je veux ensuite remercier Jean-François Brunelle, collègue et amis, que j'ai côtoyé à presque toutes les semaines depuis 2017. Tu auras toujours été présent pour m'aider à orienter mes réflexions et me rappeler que malgré tout ce que les chiffres peuvent dire, nous travaillons toujours avec des êtres humains. Merci.

Je remercie aussi mes collègues Kyle, Maxime et Jérémie. Messieurs, vous êtes toujours présent pour m'aider à décrocher et m'amuser durant nos soirées de jeu. Merci.

Finalement, merci à tous les intervenants, membres administratifs et athlètes du programme des équipes du Québec ainsi que du programme de hockey de l'Académie les Estacades. Sans votre implication et votre participation, tous les projets de cette thèse n'auraient pu avoir lieu. Merci.

Introduction

Rassemblant les foules et soulevant les passions à travers tout le pays, le hockey sur glace est l'un des sports les plus pratiqués au Canada avec 550 137 membres (Hockey Canada, 2023). De ce nombre, environ 360 000 jeunes, garçons et filles, ont moins de 18 ans et rêvent d'atteindre les plus hauts niveaux. La popularité de ce sport, le rêve d'évoluer dans la Ligue nationale de hockey (LNH) ainsi que le système de développement québécois (Marier & Pilote, 2019), les poussent à se spécialiser précocement et à pratiquer leur sport tout au long de l'année dès leur entrée au secondaire (Ogden & Edwards, 2016; Huard Pelletier & Lemoyne, 2020). La professionnalisation du sport motive les adolescent(e)s à fréquenter rapidement les salles d'entraînement afin d'améliorer leurs qualités métaboliques et neuromusculaires et maximiser leurs performances sur la glace. Parallèlement, cette période correspond à celle de la puberté où les jeunes athlètes subissent d'importants changements morphologiques. Ils atteignent leur pic de croissance entre 12 et 16 ans chez les garçons et entre 9 et 15 ans chez les filles (Malina & e Silva, 2017). Ces changements s'accompagnent d'une amélioration notable de la force et de la puissance musculaires (Albaladejo-Saura et al., 2021). Toutefois, on observe une grande variabilité interindividuelle quant au moment et l'ampleur de la vitesse de croissance durant cette période (Van Praagh, 2007). Désireux et désireuses d'aider les jeunes athlètes à atteindre leur plein potentiel, les entraîneurs/entraîneuses et préparateurs/préparatrices physiques recherchent continuellement des outils pratiques et efficaces pour évaluer les capacités de leurs joueurs et joueuses et pour optimiser leur prescription d'exercices.

Les dix dernières années sont marquées par l'émergence de méthodes et d'approches visant à optimiser la performance des hockeyeurs et hockeyeuses. L'indice de force dynamique (Sheppard et al., 2011) ou le profil force-vitesse vertical (Samozino et al., 2012) sont des exemples d'approches intéressantes qui nécessitent beaucoup de temps d'évaluation et qui sont peu spécifiques au mouvement de patinage. Inversement, la détermination du profil force-vitesse (F-V) horizontal semble être une option plus simple et prometteuse pour individualiser et optimiser la prescription de l'entraînement en résistance (Morin & Samozino, 2016). Cette méthode permet

de renforcer la spécificité du programme d'entraînement soumis aux athlètes à l'aide d'un seul test. Bien que les résultats de la méthode demeurent mitigés (Lindberg et al., 2022), des travaux récents en soccer et en basketball ont démontré des gains supérieurs chez les participant(e)s ayant reçu un entraînement individualisé en fonction de leur profil F-V vertical ou horizontal comparativement à ceux et celles ayant reçu un plan général pour améliorer la puissance (Barrera-Domínguez et al., 2023; Jiménez-Reyes, Samozino, Brughelli, et al., 2017). Cette méthode présente donc des possibilités intéressantes pour l'optimisation de l'entraînement des jeunes joueurs et joueuses de hockey sur glace durant l'adolescence.

À ce jour, les travaux se rapportant spécifiquement au hockey sont rares. Ils se concentrent principalement sur la fiabilité de la méthode pour l'évaluation de la capacité de patinage ainsi que les relations entre les paramètres du profil F-V de patinage, de sprint et au saut vertical (Perez et al., 2022; Perez et al., 2021; Stenroth et al., 2020). De plus, ces travaux n'ont pas inclus la participation de joueurs ou joueuses de hockey adolescent(e)s. Cette thèse vise donc à augmenter les connaissances disponibles sur le profil F-V des athlètes de hockey durant l'adolescence. Elle s'intéresse plus spécifiquement au patinage avant et les différentes capacités mesurées hors glace. La thèse se divise en trois parties distinctes. La première s'intéresse aux liens entre les capacités neuromusculaires et métaboliques hors glace de joueurs et joueuses de hockey adolescent(e)s élites. La deuxième se penche sur les liens possibles entre les capacités neuromusculaires hors glace et le profil F-V de patinage. La dernière explore l'évolution de ces associations en fonction de la maturité physique chez les garçons.

Le premier chapitre comprend une revue de la littérature qui revoit l'évolution de la science en hockey sur glace, décrit les qualités métaboliques et mécaniques fondamentales chez l'être humain, leur expression chez les joueurs et joueuses de hockey sur glace, ainsi que leur complémentarité.

Le deuxième chapitre comprend la problématique de recherche, les objectifs, les questions et les hypothèses de recherche ainsi que la méthode générale utilisée. Il définit et décrit le processus de maturation durant la puberté, l'importance de l'individualisation de l'entraînement neuromusculaire ainsi que les méthodes utilisées pour le faire. S'en suit la

présentation de l'objectif général et des objectifs spécifiques de la thèse. La méthode générale présente les outils disponibles pour calculer le profil F-V horizontal ainsi que l'outil principal de cette thèse.

Le troisième chapitre présente le premier article de thèse et décrit les associations observées entre les variables du profil F-V, les capacités anaérobies et la capacité à répéter des sprints à l'extérieur de la glace. Les principaux résultats suggèrent que des adolescent(e)s hautement entraîné(e)s, garçons ou filles, doivent être en mesure de générer de la force dans le plan horizontal lorsqu'ils/elles courent à haute vitesse. Chez les filles la capacité à générer de la force dans les premiers pas du sprint est aussi déterminante pour les capacités anaérobies et la capacité à répéter des sprints.

Le quatrième chapitre présente le deuxième article de thèse et décrit les associations observées entre la puissance des membres inférieurs (MI), la vitesse de sprint et l'agilité mesurées à l'extérieur de la glace et les variables du profil F-V de patinage. Les principaux résultats démontrent l'importance d'une préparation physique générale touchant à toutes les aptitudes mesurées à l'extérieur de la glace pour maximiser la performance de patinage. Ils suggèrent aussi que la puissance des membres inférieurs et l'agilité pourraient mener à une meilleure accélération sur la glace alors que la vitesse de sprint serait associée à une plus grande vitesse maximale sur la glace.

Le cinquième chapitre présente le troisième article de thèse et explore les associations entre les variables du profil F-V de patinage et la maturité physique des jeunes joueurs de hockey. Les principaux résultats démontrent les différences entre les paramètres du profil F-V de patinage à trois stades de puberté : Pré-, Mi- et Post-pubertaire. Les capacités liées à l'accélération semblent se différencier plus tardivement à l'adolescence alors que les capacités associées à la vitesse augmentent graduellement. Pour les intervenant(e)s, l'accent devrait être mis principalement sur l'amélioration des techniques de patinage jusqu'à la fin de la puberté où l'amélioration des qualités neuromusculaires aura alors le plus de potentiel d'amélioration. Le travail en force maximale pourra être priorisé après l'atteinte du pic de croissance.

Le sixième chapitre est la discussion générale de la thèse. Il rassemble les conclusions des trois chapitres précédents en faisant le lien avec les objectifs généraux et spécifiques de la thèse. Il fait aussi ressortir les forces et les limites y étant associées ainsi que les perspectives qui en émanent.

Chapitre 1 – Revue de la littérature

1.1. Évolution de la science du hockey sur glace

Sport le plus populaire au Québec, le hockey sur glace est un sport d'invasion où trois attaquant(e)s, deux défenseurs/défenseuses et un(e) gardien(e) s'affrontent sur une surface glacée durant trois périodes égales de 20 minutes. Sport pratiqué à des intensités moyennes à élevées, le hockey est de nature intermittente et requiert différentes qualités physiques. Depuis le premier match organisé le 3 mars 1875 à Montréal (Martel, 2020), les exigences métaboliques et neuromusculaires du sport ont évolué de pair avec les changements et ajustements apportés aux règles du jeu pendant la structuration et la modernisation du sport. Jusqu'aux années 60, le jeu était contrôlé par les joueurs les plus habiles et intelligents avec la rondelle (Martel, 2020). Souvent identifiée comme étant « l'âge d'or » de la Ligue Nationale de Hockey (LNH), cette période plus simple du hockey incluait seulement six franchises et environ 120 joueurs (Leonetti & Barkley, 1993). Les jeunes joueurs étaient toujours bienvenus, conditionnellement à leur talent, mais les groupes étaient stables, ce qui permettait aux joueurs de performer durant de longues années. La condition physique était secondaire alors que les règles du jeu et la ligue continuaient de se définir.

L'année 1967 marque le début de l'expansion de la LNH de six à douze équipes augmentant du même coup le nombre de matchs joués et le stress physique imposé sur les joueurs (Zeisler, 2012). Cette réalité engendre les premières préoccupations face à leur préparation physique. Parallèlement, c'est aussi l'émergence du courant scientifique dans le contexte de l'évaluation de la condition physique. L'être humain devient une machine dont on peut mesurer les différentes composantes et optimiser le développement par l'entraînement. Les évolutions technologiques permettent maintenant de documenter, de façon encore rudimentaire au regard d'aujourd'hui, les diverses réponses physiologiques liées aux exigences du sport comme la fréquence cardiaque, la consommation d'oxygène ou la tolérance à l'effort (Wilson et al., 1976). Au Québec, Georges Larivière est un pionnier de la recherche en hockey sur glace publiant une trentaine d'ouvrages autour du sport. Ses premiers travaux se concentrent sur la biomécanique

et l'efficacité des gestes de patinage (Lariviere, 1972; Lariviere, 1968). Entre autres, il examine la vitesse, la longueur des foulées, l'angle du tronc et les angles de propulsion dans le but d'identifier les patrons de mouvements les plus efficaces. En Tchécoslovaquie, Seliger et al. (1972) estiment la dépense énergétique de joueurs de hockey à partir de matchs simulés dans le but d'identifier les exigences métaboliques du sport. Dès 1976, on retrouve des publications rapportant des travaux de recherche destinés à établir les profils physiologiques du joueur de hockey. Par exemple, Wilson et al. (1976) font état d'une série d'expériences menées par l'Institut de Physiologie de Stockholm qui inclut l'évaluation, au niveau métabolique, des systèmes aérobie et anaérobie et, au niveau neuromusculaire, de la force et du type de fibres musculaires. L'intérêt grandissant pour l'évaluation des capacités physiques des joueurs marque le début d'une amélioration progressive de la condition physique des athlètes sur le terrain.

À la fin des années 80 et au début des années 90, des auteurs comme Montgomery (1988) ou Twist et Rhodes (1993) brosent un portrait global des exigences physiologiques du sport. Au moment de la publication, les auteurs font état d'un manque de professionnalisation des intervenant(e)s responsables de la préparation physique des athlètes et d'un besoin d'établir les bases pour guider les choix de méthodes d'entraînement de ces derniers. Dans leur analyse, ils discutent de l'utilité du système aérobie pour maximiser la récupération entre les efforts intenses et le rôle du système anaérobie dans la production d'énergie nécessaire aux efforts à très haute intensité. D'un point de vue neuromusculaire, la force du bas du corps apparaît essentielle pour donner et absorber des contacts solides alors que la force du haut du corps peut être utile pour la puissance des lancers ou sortir l'adversaire de l'enclave. La puissance musculaire est fondamentale pour arrêter et repartir brusquement à chaque présence et sert de base pour l'agilité qui est exprimée dans l'enchaînement aléatoire d'une variété de virages et changements de direction en maniant la rondelle. Enfin, une meilleure flexibilité des membres inférieurs permet aux joueurs et joueuses de demeurer en position de base plus basse sur la glace et patiner plus efficacement. Leur analyse illustre de la complexité des interactions entre les différents systèmes énergétiques et qualités neuromusculaires nécessaires à une performance optimale en hockey sur glace.

Treize ans plus tard, les exigences physiologiques du sport n'ont guère changé dans leur nature. En revanche, la meilleure préparation des athlètes se reflète dans l'accélération du jeu. Montgomery (2006) illustre ces changements en s'intéressant à l'évolution de la condition physique des joueurs des Canadiens de Montréal. Une de ses principales observations est l'augmentation constante de la taille et la masse des joueurs parallèlement à une légère augmentation de la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) de 1982 à 2003. Ces changements suggèrent que la professionnalisation de la préparation physique abordée par Twist et Rhodes (1993) a possiblement influencé l'augmentation de la forme physique des joueurs étant plus costauds, plus rapides et plus forts que par le passé.

Aujourd'hui, le développement et l'augmentation de l'accessibilité des technologies portables et des systèmes de reconnaissance vidéo ont permis une analyse plus détaillée des exigences physiques et physiologiques du sport mettant de l'avant les différences entre les positions, le niveau joué, le moment du match et le sexe biologique (Vigh-Larsen & Mohr, 2024). Au niveau professionnel, Allard et al. (2022) ont recensé la charge d'entraînement sur glace de joueurs professionnels de la ligue américaine de hockey (LAH) à travers une saison complète. Grâce à des unités de mesure inertielles portées dans le dos, ils ont enregistré l'ensemble des mouvements fait par les joueurs sur la glace. Ils ont observé une diminution constante de la charge d'entraînement et de l'intensité de la première à la troisième période. De plus, ils ont noté que l'intensité mesurée c.-à-d. la charge d'entraînement sur glace par minute des attaquants était significativement supérieure à celle des défenseurs. Quant à eux, Brocherie et al. (2018) ont décrit le temps de jeu effectif, le temps de repos, le nombre de présences et les activités de faibles, moyennes et hautes intensités de 10 joueurs de la LNH lors d'un match disputé dans le cadre des championnats du monde. En moyenne, les joueurs avaient $5,4 \pm 1,2$ minutes de temps de jeu effectif, réparties entre $7,4 \pm 1,8$ présences sur la glace qui étaient entrecoupées de $4,5 \pm 1,6$ minutes sur le banc à chaque période. Pour chaque présence sur la glace, les joueurs avaient $44,0 \pm 5,7$ secondes de temps de jeu effectif pour $41,7 \pm 4,1$ de temps d'arrêt (dû aux arrêts de jeu). Au niveau international, les hommes de l'équipe canadienne de moins de 20 ans parcouraient entre 2 500 et 5 000 mètres durant des matchs internationaux, dont 200 à 1 000 mètres à plus de 24 km/h (Douglas & Kennedy, 2020). Il semble aussi exister une différence entre le niveau des

athlètes ayant le même âge, mais jouant à un niveau inférieur. Byrkjedal et al. (2022) ont rapporté les données de joueurs U21 norvégiens. Ceux-ci parcourraient seulement 150 à 600m à plus de 25 km/h lors de parties officielles.

D'un point de vue physiologique, la fréquence cardiaque a aussi été utilisée pour évaluer les exigences de matchs de joueurs de hockey. Contrairement aux distances parcourues, la charge interne imposée aux joueurs semble plus constante. Chez des joueurs polonais de moins de 20 ans, la fréquence cardiaque moyenne était de 159 ± 7 bpm pour les attaquants et 151 ± 8 bpm pour les défenseurs (Stanula et al., 2016). Chez les moins de 18 ans, la fréquence cardiaque moyenne des joueurs était de 161 ± 7 battements par minute (bpm) pour les attaquants et 158 ± 6 pour les défenseurs (Stanula & Rocznik, 2014). Entre 18 et 20% des rencontres étaient à une fréquence cardiaque supérieure à celle associée à la puissance critique individuelle des joueurs.

Chez les femmes, les données disponibles provenant d'études scientifiques se font plus rares, mais les exigences physiques varient aussi en fonction du niveau des joueuses. De façon générale, c'est l'habileté à fournir des efforts à haute intensité qui distingue les joueuses des deux niveaux. Par exemple, la charge d'entraînement à haute intensité durant un match, calculée en unités arbitraires (U.A.), est de deux à quatre fois plus élevée pour les joueuses internationales (Douglas et al., 2022). La même chose est observée à l'entraînement où, par exemple, les attaquantes internationales sont exposées à $442,8 \pm 260,1$ U.A. de patinage à haute intensité contre $88,2 \pm 92,4$ U.A. pour les joueuses universitaires (Douglas et al., 2022). Comme chez les hommes, l'intensité tend aussi à diminuer entre les périodes (Perez et al., 2022). Ainsi, l'analyse des exigences physiques et physiologiques démontre l'importance pour les joueurs et joueuses de hockey aspirant à performer dans leur sport d'être en mesure de fournir, de façon répétitive, des efforts à très haute intensité. Les prochaines sections recensent les qualités métaboliques et neuromusculaires associées à la performance du joueur de hockey.

1.2. Les qualités métaboliques du hockey sur glace

D'un point de vue fondamental, les muscles ont des propriétés métaboliques et neuromusculaires qui leur sont propres. Ils sont composés en proportions variables de différents types de fibres musculaires qui ont des propriétés contractiles et bioénergétiques distinctes. Bien qu'elles

puissent être classifiées en sept types différents (Scott et al., 2001), il existe deux grandes catégories de fibres musculaires : les fibres lentes (Type I) et les fibres rapides (Type II). Les fibres de type I ont une capacité oxydative élevée, une capacité glycolytique faible, une vitesse de contraction lente (≈ 110 ms), une grande résistance à la fatigue et développent relativement peu de force à des vitesses de contraction élevées. À l'inverse, les fibres de type II ont une capacité oxydative faible à modérée, une capacité glycolytique élevée, voire très élevée, une vitesse de contraction rapide (≈ 50 ms), une résistance à la fatigue faible à modérée et développent beaucoup de force à des vitesses de contraction très élevées (Scott et al., 2021). Ces caractéristiques distinctes entre les deux types de fibres sont expliquées physiologiquement par des différences dans la forme de la myosine ATPase qui est plus lente dans les fibres de type I, le réticulum sarcoplasmique plus développé des fibres de types II et la plus grande taille des unités motrices des fibres de type II (Scott et al., 2021). Malgré ces différences physiologiques, chaque muscle présente des fibres des deux grands types dans des proportions qui varient en fonction des antécédents de la personne.

Pour contracter les muscles et générer un mouvement, le corps hydrolyse l'adénosine triphosphate (ATP) en adénosine diphosphate (ADP) dans une réaction exothermique qui permet de produire l'énergie nécessaire aux contractions musculaires (Scott et al., 2021). Cette source d'énergie est disponible à tout moment en quantité infime dans le corps, mais peut être produite par trois mécanismes principaux qui sont sollicités à différentes proportions en fonction de l'intensité et la durée de l'effort produit par les muscles : 1- la phosphorylation directe, 2- la glycolyse et 3- la phosphorylation oxydative. Pour les efforts de 90% d'intensité relative à un effort maximal, la phosphorylation directe produit principalement l'énergie nécessaire aux demandes énergétiques et repose sur une réaction couplée de la créatine phosphate et de l'ADP. Ce mécanisme fait partie du système anaérobie alactique (SAA) qui a une puissance maximale de 7-8 secondes et une capacité de 15 à 20 secondes. Pour les efforts d'intensité de 60 à 90% de la vitesse maximale et de plus longue durée (20 secondes à 120 secondes approximativement), la glycolyse produit principalement de l'énergie à partir de la dégradation du glucose disponible dans le sang ou du glycogène musculaire. Ce mécanisme fait partie du système anaérobie lactique (SAL) qui a une puissance maximale de 20 à 60 secondes et une capacité de 60 à 120 secondes.

Pour les efforts d'intensité sous 60% de la vitesse maximale, la phosphorylation oxydative est la principale source d'énergie pour les muscles. Ce mécanisme dégrade le glucose, l'acide pyruvique, les acides gras et les acides aminés à l'intérieur des mitochondries par une série de réactions du cycle de Krebs. Ce mécanisme fait partie du système aérobie (SA) qui a une puissance maximale de 2 à 6 minutes et une capacité de 6 minutes à plusieurs heures en fonction des substrats disponibles dans le corps. Bien que les trois systèmes aient des fonctions distinctes, il est important de rappeler qu'ils contribuent tous à la production d'énergie, mais que leur contribution relative est dépendante de l'intensité et de la durée de l'effort fourni (Scott et al., 2021). La Figure 1 illustre cette relation et démontre l'effet synergique de chaque système pour la performance. Ici, la contribution des systèmes est illustrée pour des efforts à intensité constante sans prise en compte du caractère intermittent du hockey sur glace. Pour les intervenant(e)s sur le terrain, l'évaluation de la puissance et la capacité de chaque système sont réalisées en mesurant la performance dans des fenêtres de temps représentant leur puissance et leurs capacités respectives.

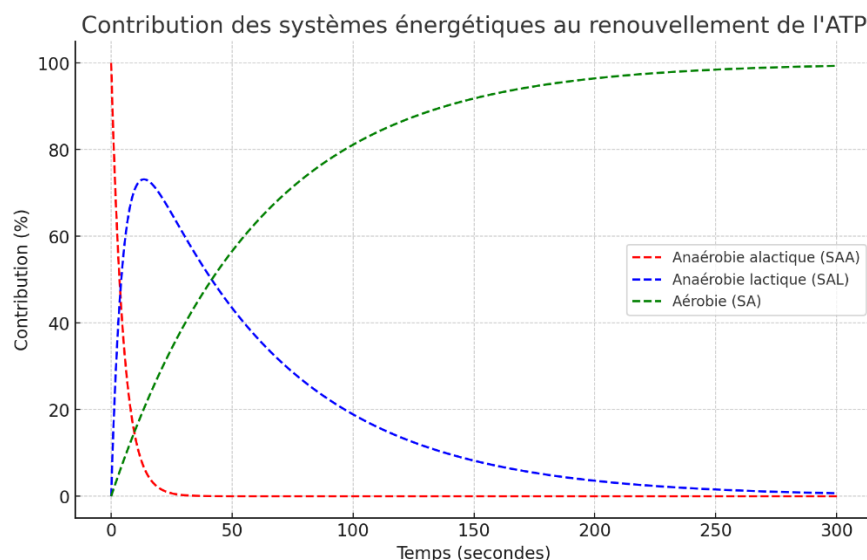


Figure 1. – Contribution relative des systèmes énergétiques pour le renouvellement de l'ATP à une intensité constante en fonction du temps adapté de Gastin (2001).

1.2.1. Le système aérobie

La puissance du SA est généralement mesurée par la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2max}$). En ligne avec les exigences physiques mesurées durant les matchs, les capacités métaboliques évoluent grandement en fonction du niveau des participants et de leur sexe biologique. Chez les joueurs professionnels, la $\dot{V}O_{2max}$ varie généralement entre 55,0 et 60,0 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Vigh-Larsen & Mohr, 2024). Par exemple, la $\dot{V}O_{2max}$ de joueurs de la LNH, mesurée par calorimétrie indirecte lors de tests intermittents sur glace, était de 56,5 ± 4,7 ml·kg⁻¹·min⁻¹ et 57,3 ± 4,1 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Ferland et al., 2021). Similairement, la $\dot{V}O_{2max}$ de joueurs professionnels seniors, mesurée par calorimétrie indirecte sur vélo stationnaire, était de 58,8 ± 2,4 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Stanula et al., 2014). Au niveau universitaire, des valeurs similaires de 54,9 ± 4,4 ml·kg⁻¹·min⁻¹ ont été observées (Peterson et al., 2015). Les joueurs de niveau junior ont une $\dot{V}O_{2max}$ similaire aux joueurs plus âgés, soit 57,4 ± 5,6 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Burr et al., 2008). C'est à l'adolescence que la $\dot{V}O_{2max}$ semble évoluer plus significativement alors que la distance parcourue durant un test navette augmente significativement entre 13 et 14 ans, mais plafonne ensuite jusqu'à 15 ans (Cordingley et al., 2019). Chez les femmes, les capacités métaboliques semblent influencées par les distances parcourues lors des matchs plus faibles alors que la $\dot{V}O_{2max}$ est plus basse que chez les hommes. Par exemple, des joueuses de niveau universitaire canadien avaient une $\dot{V}O_{2max}$ de 44,6 ± 5,3 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Geithner et al., 2006). Aux États-Unis, les valeurs rapportées pour des joueuses universitaires étaient de 40,1 ± 1,0 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Durocher et al., 2008) et 50,3 ± 3,4 ml·kg⁻¹·min⁻¹ (Carey et al., 2007). Le grand écart entre les études est expliqué par les différences entre les niveaux de compétition (Division I vs III) ou le test utilisé (incrémental ou continu, avec mesure directe ou estimation en fonction du palier complété).

1.2.2. Les systèmes anaérobies lactique et alactique

Comme il est possible d'observer dans la Figure 1, la courte durée des présences sur la glace fait en sorte que les SAA et SAL sont aussi très sollicités en hockey sur glace (Vigh-Larsen & Mohr, 2024). Ces systèmes ont été étudiés à profusion chez les hommes et quelques fois chez les femmes (Bournival et al., 2023). Regroupant tous les efforts à une intensité supérieure à celle atteinte à la $\dot{V}O_{2max}$, différents protocoles ont été utilisés afin de mesurer cette qualité. Le test

d'effort maximal de 30 secondes sur ergocycle (Wingate) est certainement l'un des plus utilisés. En moyenne les joueurs tchèques de la LNH enregistrent des valeurs de puissance maximale de 1 200 à 1 450 watts (W) pour une puissance maximale relative entre 14 et 16 $W \cdot kg^{-1}$ et une capacité anaérobie entre 28 et 34 kJ ou entre 340 et 370 $J \cdot kg^{-1}$ (Heller et al., 2019; Quinney et al., 2008). De leur côté, Kokinda et al. (2020) ont comparé les capacités anaérobies de trois cohortes de joueurs slovaques : cohorte 1 ≥ 20 ans, cohorte 2 entre 18 et 20 ans, cohorte 3 < 18 ans. Ils ont observé que la puissance maximale augmentait graduellement de 869,1 W pour la cohorte 3 à 1 062,9 W pour la cohorte 2 et 1 139,2 W pour la cohorte 1. La puissance maximale relative semblait plutôt plafonner à l'âge adulte alors qu'elle était de 11,9 $W \cdot kg^{-1}$ pour la cohorte 3 et 12,6 $W \cdot kg^{-1}$ pour les cohortes 2 et 1. Pour les trois groupes, la capacité anaérobie était entre 271 $J \cdot kg^{-1}$ et 274 $J \cdot kg^{-1}$. À l'adolescence, la puissance maximale et la puissance maximale relative de joueurs manitobains de niveau AAA passent d'environ 600 W et 10 $W \cdot kg^{-1}$ à 13 ans à environ 900 W et 12 $W \cdot kg^{-1}$ à 16 ans (Leiter et al., 2018). Les auteurs n'ont pas rapporté les changements au niveau de la capacité anaérobie pour ces groupes. Chez les femmes, les données de Wingate sont plus rares, faisant difficilement le portrait de l'ensemble de cette population. Les données répertoriées se rapportent principalement à des joueuses de niveau collégial et universitaire. La puissance relative observée chez des joueuses de Division III était de 9,24 $W \cdot kg^{-1}$ (Janot et al., 2015) alors que des joueuses de niveau collégial Division 1 avaient une puissance maximale d'environ 775 W pour une puissance maximale relative de 6,8 $W \cdot kg^{-1}$ et une puissance moyenne variant de 452 à 515 W (Boland et al., 2019).

À cause du caractère intermittent du hockey sur glace, plusieurs auteurs ont utilisé des tests de sprints répétés pour évaluer les capacités anaérobies des joueurs et joueuses. De façon générale, cette capacité est non seulement influencée par la performance initiale au sprint et la récupération entre chaque effort mais aussi d'un ensemble de sous-facteurs métaboliques et neuromusculaires de ces deux composantes (Bishop et al., 2011; Girard et al., 2011). La comparaison des résultats entre les études spécifiques au hockey sur glace est donc complexe puisque les protocoles utilisés varient énormément en distance, en nombre de répétitions, en temps de repos et en nombre de changements de direction utilisés (Kyles et al., 2023). Par exemple, sur un total de 41 articles ayant mesuré cette qualité, 19 protocoles différents ont été

répertoriés (Bournival et al., 2023). De façon générale, les joueurs élites performant mieux que les joueurs compétitifs en raison de leurs meilleures habiletés de patinage (Bournival et al., 2023).

Enfin, le SAA est généralement représenté par des tests de sprints de 30 à 40m chez les athlètes de sports d'équipe (Simperingham et al., 2016; Stastny et al., 2023). En hockey sur glace, les sprints hors glace et sur glace ont souvent été utilisés (Bournival et al., 2023). On observe une amélioration de l'accélération et de la vitesse de patinage en fonction du niveau de jeu et de l'âge des joueurs. Par exemple, des professionnels évoluant en Suisse mettaient $2,54 \pm 0,08$ sec pour parcourir 15m et $4,27 \pm 0,11$ sec pour parcourir 30m sur la glace (Kierot et al., 2024). Chez les joueurs élites danois et finlandais, les temps pour une accélération de 10m sur glace étaient de $1,77 \pm 0,10$ sec et $1,71 \pm 0,04$ sec alors que les temps pour un sprint de 30m étaient de $4,19 \pm 0,14$ sec et $4,06 \pm 0,09$ sec respectivement (Vigh-Larsen et al., 2020). Pour leur part, Wagner et al. (2021) ont exploré les associations entre la performance sur glace et hors glace de joueurs de hockey suisses de moins de 15 ans (M15) et de moins de 17 ans (M17). Ils ont rapporté un temps moyen pour une distance de 0 à 6 mètres de $1,32 \pm 0,06$ sec pour les M17 et $1,35 \pm 0,10$ sec pour les M15. Le temps moyen pour une distance de 30 mètres était de $4,63 \pm 0,18$ sec et $4,78 \pm 0,26$ sec pour les M17 et M15 respectivement. Quelques auteurs se sont aussi intéressés au SAA chez les femmes. Par exemple, Bracko (2001) a comparé les habiletés sur glace de joueuses de l'équipe nationale canadienne ($n=8$) et finlandaise ($n=1$) de l'édition 1996/1997 (âge = 25 ± 5 ans) aux habiletés de joueuses de club plus jeunes ($n=15$; âge = 19 ± 2 ans). La capacité d'accélérer était représentée par le temps sur une distance de 6,1 m alors que la vitesse maximale était évaluée par un sprint de 47,85m. Les joueuses plus expérimentées avaient un temps d'accélération de $1,43 \pm 0,08$ sec et un temps pour la vitesse maximale $6,93 \pm 0,19$ sec. Les joueuses de club avaient des temps de $1,49 \pm 0,09$ sec et de $7,19 \pm 0,27$ sec pour les mêmes distances. De son côté, Geithner (2009) a utilisé des temps sur des distances similaires pour évaluer l'accélération (6,1m) et la vitesse maximale (44,80 m) de 192 joueuses de l'Université d'Alberta (âge = $20,9 \pm 2,5$ ans). Il a rapporté un temps moyen de $1,48 \pm 0,13$ sec pour la distance associée à l'accélération et un temps moyen de $7,09 \pm 0,49$ secondes pour la distance associée à la vitesse maximale. Une autre étude avec 61 joueuses plus jeunes (âge = $12,12 \pm 2,05$ ans) a aussi évalué leurs habiletés de patinage avant sur les mêmes distances. En moyenne, les joueuses avaient des temps de $1,63 \pm$

0,12 sec et $7,56 \pm 0,50$ sec sur ces distances. Comme pour les hommes, les joueuses plus expérimentées tendent à être plus rapides que les joueuses moins expérimentées ou plus jeunes.

En résumé, la revue de la littérature pour l'ensemble des capacités métaboliques des joueurs et joueuses de hockey sur glace met en évidence trois constats principaux. Premièrement, la capacité aérobie semble plafonner plus rapidement vers la fin de la puberté. Considérant la nature anaérobie du sport, cette qualité demeure importante pour permettre de récupérer entre les efforts intenses, mais est possiblement moins utile pour permettre aux joueurs et joueuses de se démarquer aux plus hauts niveaux. Deuxièmement, les capacités anaérobies continuent d'augmenter avec l'âge et le niveau de jeu. Considérant que l'adolescence est une période critique pour maximiser l'expression des capacités physiques à l'âge adulte (Van Praagh, 2007), l'élaboration de stratégies pour maximiser le développement des capacités anaérobies sera essentielle. Enfin, la progression des capacités métaboliques est majoritairement présentée en fonction du niveau de jeu ou l'âge des athlètes sans considération pour la maturation physique à l'adolescence.

Tableau 1. – Synthèse des qualités métaboliques en hockey sur glace en fonction du sexe biologique et du niveau de jeu.

SE	Sexe	Population / Niveau	Résultats	Référence
SA	H	LNH (sur glace)	$57,3 \pm 4,1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Ferland et al., 2021
		Professionnels (vélo)	$58,08 \pm 2,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Stanula et al., 2014
		Universitaires	$54,9 \pm 4,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Peterson et al., 2015
		Juniors élites	$57,4 \pm 5,6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Burr et al., 2008
		Adolescents compétitifs (13-15 ans)	$54,4 \text{ à } 58,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Cordingley et al., 2019
	F	Universitaires (Canada)	$44,6 \pm 5,3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Geithner et al., 2006
		Universitaires (États-Unis, Div. I et III)	$40,1 \pm 1,0$; $50,3 \pm 3,4 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$	Durocher et al., 2008 ; Carey et al., 2007
SAL	H	LNH (tchèques)	$1200\text{--}1450 \text{ W}$; $14\text{--}16 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$; $340\text{--}370 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$	Heller et al., 2019 ; Quinney et al., 2008
		Slovaques élites (16 à 20 ans)	$869 \text{ W} \rightarrow 1139 \text{ W}$; $12 \rightarrow 13 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$; $271\text{--}274 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$	Kokinda et al., 2020

		Adolescents AAA (13-16 ans)	600 → 900 W ; 10 → 12 W·kg ⁻¹	Leiter et al., 2018
	F	Universitaires (Div. I)	~775 W ; 7 W·kg ⁻¹ ; puissance moyenne : 452–515 W	Boland et al., 2019
		Universitaires (Div. III)	9,24 W·kg ⁻¹	Janot et al., 2015
SA	H	Professionnels suisses	15 m : 2,54 sec ; 30 m : 4,27 sec	Kierot et al., 2024
		Élites dano-finlandais	10 m : 1,77 / 1,71 sec ; 30 m : 4,19 / 4,06 sec	Vigh-Larsen et al., 2020
		Suisses M15 et M17	6 m : 1,35 / 1,32 sec ; 30 m : 4,78 / 4,63 sec	Wagner et al., 2021
	F	Équipes nationales (Canada et Finlande)	6,1 m : 1,43 sec ; 47,85 m : 6,93 sec	Bracko, 2001
			Senior amateur	
		Universitaire	6,1 m : 1,48 sec ; 44,8 m : 7,09 sec	Geithner, 2009
		Adolescentes compétitives (12 ans)	6,1 m : 1,63 sec ; 44,8 m : 7,56 sec	

F : Femmes, H : Hommes, SA : Système aérobie, SAA : Système anaérobie alactique, SAL : Système anaérobie lactique, SE : Systèmes énergétiques

1.3. Les qualités neuromusculaires en hockey sur glace

Les muscles sont les moteurs du corps humain et leur contraction génère la tension nécessaire pour produire du mouvement. Les propriétés mécaniques des muscles peuvent être complexes à analyser puisque la force générée dépend de la cinématique de contraction, du niveau d'excitation du système nerveux et du temps écoulé depuis le changement du niveau d'excitation du muscle (McMahon, 1984). La morphologie du muscle comme le type de fibres qui le composent, la surface de la coupe transversale, sa longueur ou l'angle de pennation influencent aussi les capacités mécaniques de celui-ci (Cormie et al., 2011). Au niveau microscopique, la tension est produite dans le sarcomère par la formation et la déformation des ponts actine-myosine qui causent le glissement des filaments d'actine et myosine l'un sur l'autre (Scott et al.,

2021). Cette configuration confère différentes propriétés mécaniques qui incluent la relation force-longueur, la résistance passive et la relation force-vitesse (F-V). La relation force-longueur dans sa portion active a une forme de cloche (Figure 2). Elle est influencée par la capacité des ponts actine-myosine à se former et la force produite dépend de l'état d'étirement du muscle. En position raccourcie, le chevauchement excessif des filaments d'actine et myosine oblige une position sous-optimale des ponts actine-myosine. La force générée est donc faible. À la longueur optimale du muscle, les filaments se chevauchent parfaitement et permettent à un nombre maximal de ponts actine-myosine de se former. La force générée est donc maximale. En position d'étirement, il y a peu ou pas de chevauchement entre les filaments, ce qui limite le nombre de ponts pouvant se former. À l'instar de la position raccourcie, la force générée est faible. En plus de la force active, le muscle génère de la force passivement grâce aux structures élastiques du muscle (titine, tissus conjonctifs, tendons, etc.). Ces structures stockent et restituent l'énergie élastique qui s'additionne à la force générée activement par le muscle (force totale dans la Figure 2). En position raccourcie, la force passive est quasi nulle puisque les structures élastiques du muscle ne sont pas encore sous tension. Au-delà de la longueur optimale, la force passive du muscle augmente exponentiellement grâce à l'énergie emmagasinée dans les structures élastiques. Cette propriété explique que la force totale générée puisse dépasser la force active du muscle.

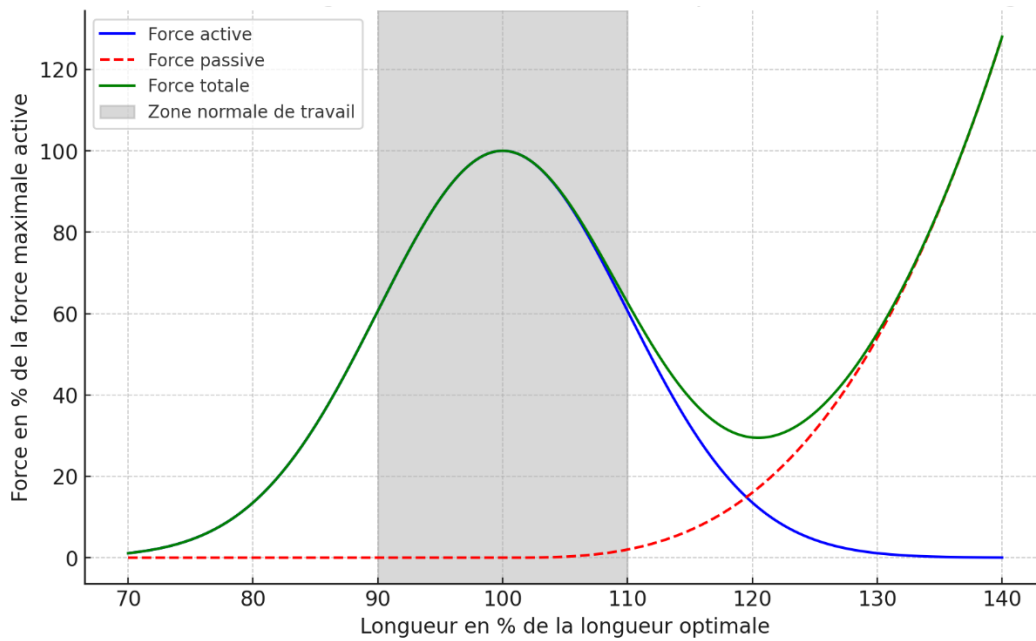


Figure 2. – Illustration théorique de la relation force-longueur du muscle adaptée de Scott et al., (2021).

Finalement, la force produite par le muscle est depuis longtemps démontrée comme étant inversement proportionnelle à la vitesse de contraction du muscle (Hill, 1938). La Figure 3 illustre cette relation non-linéaire (Jaric, 2015). De façon générale, plus la vitesse augmente, plus la force diminue. Puisque la puissance est le produit de la force et de la vitesse, la relation puissance-vitesse (P-V) a une forme parabolique qui atteint son pic autour de 50% de la force maximale.

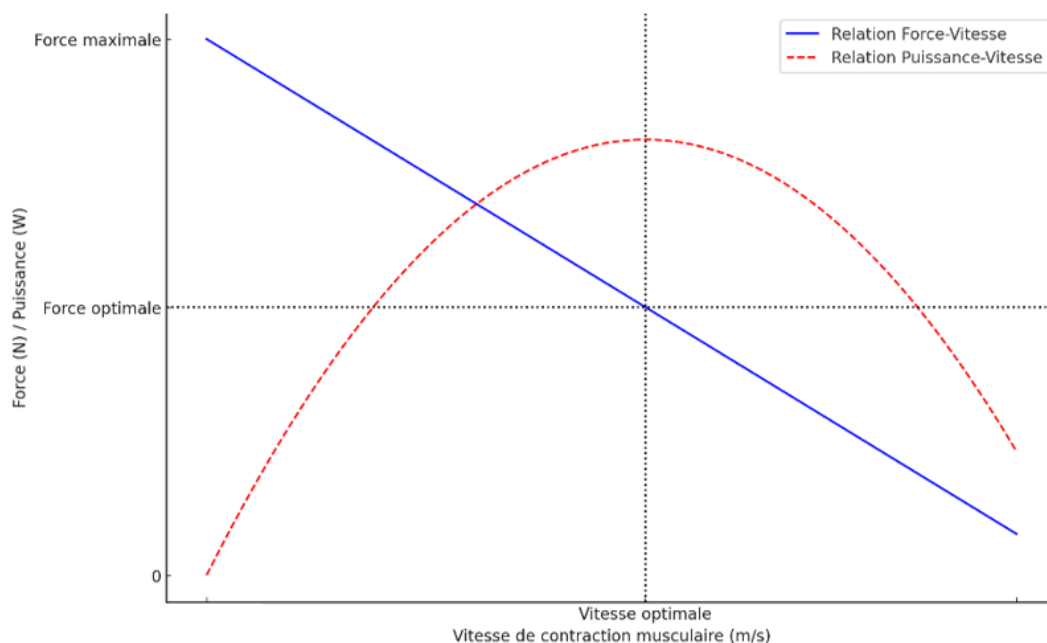


Figure 3. – Illustration de la relation hyperbolique force-vitesse au niveau musculaire ou monoarticulaire adaptée de Jaric (2015).

1.3.1 La puissance

En laboratoire, il est possible de distinguer la contribution du système nerveux central et la contribution des caractéristiques morphologiques du muscle pour décrire les capacités neuromusculaires d'un athlète. Sur le terrain, cette distinction est limitée par les enjeux techniques vécus par les intervenant(e)s comme le manque de temps, les groupes nombreux et le besoin de mesurer régulièrement les athlètes. Dans cette thèse, les capacités neuromusculaires de l'athlète se limiteront aux propriétés mécaniques du muscle et la relation F-V. Plusieurs auteurs ont étudié les capacités neuromusculaires qui distinguent les joueurs et joueuses d'âges et niveaux différents sur le terrain. Pour mesurer la puissance, le saut à contre-mouvement (CMJ) est le test le plus utilisé en raison de sa grande fidélité et sa capacité à être implanté dans une variété de scénarios d'évaluation (Alba-Jiménez et al., 2022). Chez les joueurs professionnels ayant participé aux tests physiques de la LNH, la puissance des membres inférieurs (MI) était de 5 510 W et 5 680 W en moyenne pour les attaquants et les défenseurs respectivement (Cohen et al., 2022). La puissance des MI semble ensuite diminuer en fonction du niveau de jeu et de l'âge

des joueurs (Kierot et al., 2024). Par exemple, des joueurs danois de première division sautaient 50,1 cm en moyenne comparativement à 44,9 cm pour leurs compatriotes de deuxième division correspondant à des puissances de 4868 W et 4 331 W (Vigh-Larsen et al., 2019). La hauteur du saut des joueurs de l'équipe nationale des moins de 16 ans (M16) de la République Tchèque était de 37,9 cm en moyenne comparativement à 32,1 pour des joueurs de l'équipe nationale M16 polonaise considérée comme étant de niveau inférieur ce qui correspond à des puissances des MI de 3371 W et 3110 W (Roczniok et al., 2024). Chez les femmes, des joueuses invitées au camp de sélection de l'équipe nationale américaine avaient une puissance des MI de 4187 W en moyenne. Dans un camp organisé par la Fédération internationale de hockey sur glace (IIHF) en juillet 2011, 204 joueuses provenant de 13 pays ont participé à une série de tests physiques qui comprenait les sauts verticaux (Ransdell et al., 2013). Pour évaluer l'effet du rayonnement des nations sur la performance physique des joueuses, celles-ci ont été divisées en trois groupes en fonction des résultats des nations aux différentes compétitions internationales. La puissance des MI était de 4098 W pour le premier groupe (Canada et États-Unis), 3873 W pour le deuxième groupe (Finlande et Suède) et 3520 W pour le dernier groupe (les neuf nations restantes). À un niveau inférieur, des joueuses membres de la première ligue de Suède avaient une puissance des MI de 3 250 W en moyenne (Petré et al., 2023). Au Québec, Roy et al. (2023) se sont intéressés aux différences entre des femmes de niveau universitaire canadien et des joueuses de niveau secondaire. Ils n'ont pas observé de différence significative alors que les joueuses plus âgées avaient une puissance maximale de 2 669 W en moyenne par rapport à 2 503 W pour les joueuses plus jeunes.

Le saut en longueur sans élan est aussi régulièrement utilisé dans la littérature pour évaluer la puissance des membres inférieurs. Des joueurs participant aux tests physiques du repêchage de la LNH sautaient 254 ± 18 cm (Burr et al., 2008). Quant à eux, Wagner et al. (2021) ont comparé les capacités de joueurs M15, M17 et M20 des meilleures ligues suisses. La distance du saut augmentait à chaque niveau passant de 211 ± 20 cm à 231 ± 15 cm à 250 ± 16 cm. Chez les femmes, des joueuses invitées au camp de l'équipe nationale américaine sautaient 215 ± 11 cm (Ransdell & Murray, 2011). Lors du camp de juillet 2011 organisé par l'IIHF, le premier groupe sautait 206 ± 13 cm, le deuxième groupe sautait $206,6 \pm 14,7$ cm et le dernier groupe sautait 194

± 14 cm (Ransdell et al., 2013). Au Québec, les joueuses participant au camp M16 de l'équipe provinciale sautaient 195 ± 15 cm (Martini et al., 2022). En analysant les résultats des différentes études, on remarque, indépendamment du sexe, une augmentation constante de la puissance des MI en fonction de l'âge et du niveau des participants. De plus, à niveau de compétition ou âge égal, les hommes sont plus puissants que les femmes.

1.3.2. La force

La force est une autre qualité neuromusculaire couramment évaluée chez les joueurs de hockey. En raison des propriétés intrinsèques du muscle et de l'accessibilité des différentes méthodes d'évaluation sur le terrain, cette qualité a été évaluée de plusieurs manières. En laboratoire, l'évaluation grâce à des appareils isocinétiques permet d'isoler chaque groupe musculaire et leurs capacités à des angles et vitesses précises. L'accessibilité à ce type d'appareil étant limitée et leur validité écologique étant relativement faible, peu d'études ont inclus ce genre d'évaluation dans leur protocole. Potteiger et al. (2010) ont évalué la force isocinétique des quadriceps et des ischiojambiers de joueurs de hockey universitaire. Ils ont rapporté des couples de 220 à 300 N·m pour les quadriceps et 140 à 200 N·m pour les ischiojambiers à une vitesse de $120^\circ \cdot s^{-1}$. Chez les femmes de 15 à 25 ans, Henriksson et al. (2016) ont rapporté des couples pour les quadriceps de 121 à 163 N·m à $90^\circ \cdot s^{-1}$ et de 89 à 123 N·m à $210^\circ \cdot s^{-1}$. Avec l'augmentation de l'accessibilité des appareils d'évaluations comme les plateformes de force et le peu de fatigue causée chez l'athlète, les évaluations isométriques ont suscité énormément d'attention dans la littérature. Par exemple, Kierot et al. (2024) ont comparé la force de joueurs de 16, 18 et 21 ans ainsi que des joueurs professionnels grâce à un test de tirade isométrique. Elle était de $26,5 \pm 2,5$ N·kg⁻¹ pour les joueurs de 16 ans et progressait pour chaque groupe d'âge atteignant $31,9 \pm 1,9$ N·kg⁻¹ en moyenne pour les professionnels. Des joueurs adolescents de la Suisse (âge = $16,1 \pm 1,3$ ans) avaient une force relative de $33,2 \pm 3,0$ N·kg⁻¹ dans un test de squat isométrique (Keiner et al., 2024). Le mouvement de patinage inclut des mouvements avec de plus grandes amplitudes dans le plan frontal alors que le patineur pousse vers les côtés avec la lame du patin (Budarick et al., 2020; Renaud et al., 2017). L'utilisation de tests isométriques permet aussi d'isoler des articulations et/ou des angles précis pour affiner les analyses de la force et s'approcher des angles et positions adoptées durant le geste de patinage. Secomb et al. (2021) ont exploré cette avenue en utilisant un appareil

permettant de mesurer la force isométrique des muscles des hanches à 0°, 25° et 50° d'abduction. Enfin, l'accessibilité aux appareils utilisés pour mesurer la force maximale isométrique ou isocinétique étant parfois limitée, l'évaluation de la force maximale des MI est parfois réalisée grâce à l'évaluation de la charge maximale soulevée pour une répétition (1 R.M.). Le 1 R.M. au squat des joueurs adolescents suisses de l'étude de Keiner et al. (2024) était de 164 ± 25 kg. Le 1 R.M. au squat des joueuses invitées au camp de sélection de l'équipe nationale était de 89 ± 11 kg (Ransdell & Murray, 2011).

Peu importe la méthode utilisée pour évaluer la force ou la puissance des MI, celles-ci contribuent à la performance de patinage en hockey sur glace. Par exemple, les résultats de Kierot et al. (2024) démontraient que la force expliquait de 12 à 40% de la variance de la performance de patinage. De leur côté, Secomb et al. (2021) ont démontré que la combinaison des différentes valeurs de force isométrique en abduction et la force relative lors d'un CMJ pouvaient expliquer 46% de la variance d'un test de patinage de 10m et 85% de la variance dans un test de changement de direction. En recensant les différentes études qui ont mesuré la force et la puissance musculaire, on remarque que ces qualités augmentent continuellement en fonction de l'âge et du niveau de compétition en plus d'être plus élevées chez les hommes que chez les femmes. Or, les données disponibles à ce jour négligent les changements biologiques vécus à l'adolescence.

Tableau 2. – Synthèse des qualités neuromusculaires en hockey sur glace en fonction du sexe biologique et du niveau de jeu.

Qualité musculaire	Sexe	Population / Niveau	Résultats	Référence
Puissance (CMJ)	H	LNH - Attaquants / Défenseurs	5 510 W / 5 680 W	Cohen et al., 2022
		1re / 2e division danoise	4868 W / 4331 W ; 50,1 cm / 44,9 cm	Vigh-Larsen et al., 2019
		Équipes nationales M16 (Tchéquie / Pologne)	3371 W / 3110 W ; 37,9 cm / 32,1 cm	Roczniok et al., 2024
	F	Camp équipe nationale USA	4 187 W	Ransdell & Murray, 2011

		IIHF – Groupes 1 / 2 / 3	4 098 W / 3 873 W / 3 520 W	Ransdell et al., 2013
		1re ligue suédoise	3 250 W	Petré et al., 2023
		Université vs secondaire (Québec)	2 669 W / 2 503 W	Roy et al., 2023
Puissance (SL)	H	LNH – repêchage	254 ± 18 cm	Burr et al., 2008
		Suisses M15 / M17 / M20	211 ± 20 / 231 ± 15 / 250 ± 16 cm	Wagner et al., 2021
	F	Camp équipe nationale USA	215 ± 11 cm	Ransdell & Murray, 2011
		IIHF – Groupes 1 / 2 / 3	206 / 207 / 194 cm	Ransdell et al., 2013
		Camp M16 Québec	195 ± 15 cm	Martini et al., 2022
Force isocinétique	H	Universitaires	Quadriceps : 220–300 N·m ; Ischios : 140–200 N·m	Potteiger et al., 2010
	F	15 à 25 ans	121–163 N·m à 90°·s ⁻¹ ; 89–123 N·m à 210°·s ⁻¹	Henriksson et al., 2016
Force isométrique	H	16 / 18 / 21 ans + Pros	26,5 → 31,9 N·kg ⁻¹	Kierot et al., 2024
		Adolescents suisses (15-17 ans)	33,2 ± 3,0 N·kg ⁻¹	Keiner et al., 2024
Force (1 R.M. squat)	H	Adolescents suisses	164 ± 25 kg	Keiner et al., 2024
	F	Camp équipe nationale USA	88 ± 11 kg	Ransdell & Murray, 2011

CMJ : Saut à contre mouvement, F : Femmes, H : Hommes, R.M. : Répétition maximale, SL : Saut en longueur

1.4. Complémentarité des qualités métaboliques et neuromusculaires

Depuis le début de cette thèse, les qualités métaboliques et neuromusculaires ont été abordées séparément pour faciliter le recensement des écrits et son analyse. Or, comme mentionné, les muscles partagent à la fois des qualités métaboliques et des qualités neuromusculaires. Ce constat suggère donc une certaine complémentarité entre les deux qualités qui a d'ailleurs été observée pour plusieurs cas dans la littérature. Par exemple, l'amélioration de la force par un entraînement en résistance contribue à améliorer l'efficacité en course à pied par une meilleure économie à la course (Balsalobre-Fernández et al., 2016). Les effets observés sont similaires après un entraînement en pliométrie (Eihara et al., 2022) ou la combinaison avec l'entraînement en

force maximale (Llangos-Lagos et al., 2024a). Plus récemment, la méta-analyse de Llangos-Lagos et al. (2024b) confirme bien ces observations en combinant les résultats de plus de 652 coureurs de longue distance. En fait, le hockey sur glace intègre aussi une variété d'actions offensives et défensives comme les entrées de zone ou les mises en échec qui sont associées à des capacités neuromusculaires distinctes (Daigle et al., 2022). L'entraînement concurrent des capacités neuromusculaires et métaboliques apparaît bénéfique pour la performance athlétique durant l'adolescence et la puberté (Gäbler et al., 2018).

Un modèle pour représenter les capacités métaboliques d'un individu à une intensité supérieure à la vitesse aérobie maximale (VAM) est la réserve de vitesse anaérobie (ASR), un concept mis de l'avant par Blondel et al. (2001). Ces derniers ont testé l'hypothèse que le temps limite avant épuisement pouvait être mieux représenté par des vitesses représentant un pourcentage de la différence entre la vitesse maximale (MSS) et la VAM. Dans leur devis, 10 étudiants en éducation physique ont complété des tests de VAM et de MSS ainsi que quatre épreuves de course jusqu'à épuisement à des intensités de 90, 100, 120 et 140% de la VAM. À partir des résultats, ils ont conclu que la représentation de l'intensité de l'exercice au-dessus de la VAM en fonction d'un % de l'ASR était valide et permettait d'expliquer la variabilité interindividuelle du temps limite avant épuisement pour les intensités ciblées. Depuis, plusieurs auteurs ont investigué la validité du concept avec une variété de populations autant pour des efforts en continu (Bundle et al., 2003; Weyand et al., 2006) que pour des efforts intermittents (Buchheit et al., 2012) tels que des sprints répétés (Buchheit & Mendez-Villanueva, 2014; Mendez-Villanueva et al., 2008; Ufland et al., 2013). La Figure 5 présente l'utilité du modèle pour la prescription individualisée de l'entraînement. Elle illustre les qualités métaboliques de deux athlètes qui ont des VAM identiques, mais des MSS différentes. Pour une prescription d'un effort à 130% de la VAM, l'athlète A utilise une plus grande portion de son ASR que l'athlète B qui a une MSS supérieure. Ainsi, tous les efforts au-dessus de la VAM sont subjectivement plus faciles pour l'athlète B que l'athlète A. La recension des écrits aura démontré que le SA semble atteindre un plafond dès la fin de l'adolescence en hockey sur glace. Puisque le sport a une dominante anaérobie importante, l'amélioration de la vitesse maximale devient un enjeu important durant cette période.

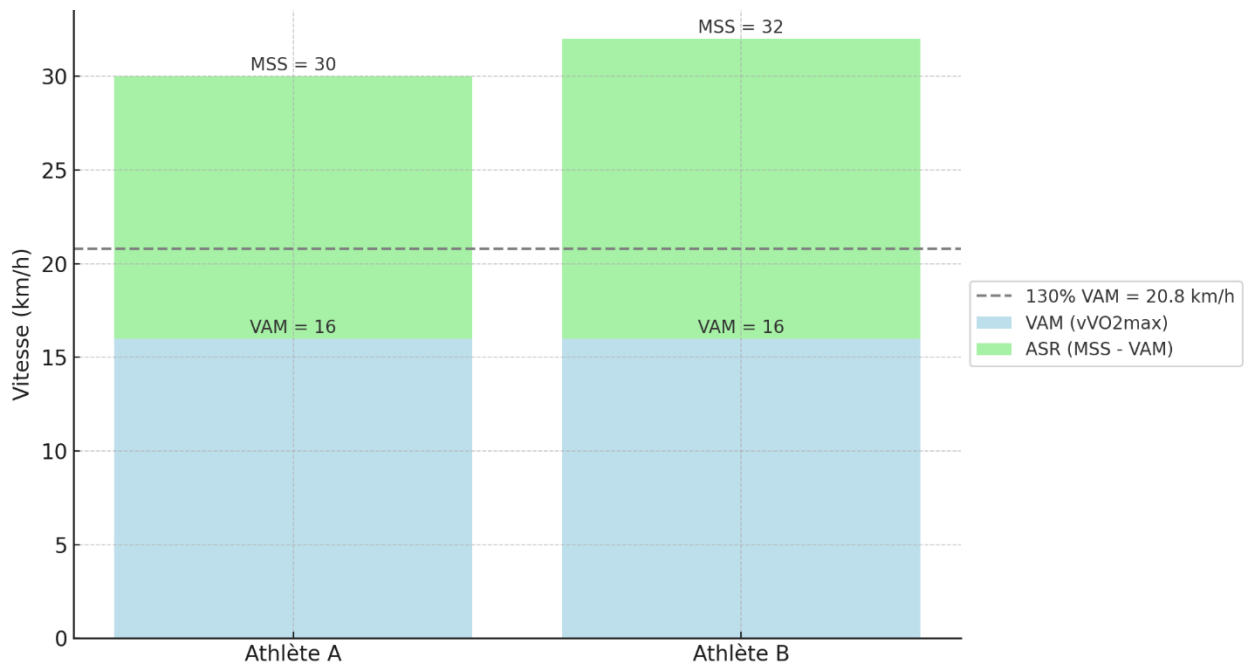


Figure 4. – Représentation graphique d’un effort à 130% de la VAM pour deux athlètes ayant une VAM identique, mais différentes MSS selon Blondel et al. (2001).

1.4.1. Vitesse maximale en hockey sur glace

Des simulations par ordinateurs grâce à des modèles biomécaniques démontrent que la modification du profil F-V a le plus grand impact sur la vitesse maximale (Miller et al., 2012). En améliorant celle-ci, la capacité des joueurs à fournir et maintenir des efforts à des vitesses supérieures à la VAM sera certainement renforcée. Le hockey sur glace est unique puisque la vitesse maximale peut être autant améliorée sur la glace qu’à l’extérieur. D’ailleurs, l’amélioration du sprint semble bien se transférer au patinage avant sur la glace chez de jeunes adolescents (Haukali & Tjelta, 2016). Dans les deux contextes, l’évolution de la vitesse en sprint est communément mesurée par des temps de passage grâce à des cellules photoélectriques, des systèmes vidéo ou différents types de radar. L’analyse du sprint est divisée en deux phases, soit l’accélération et la vitesse maximale. La phase d’accélération décrit l’augmentation de la vitesse jusqu’à l’atteinte de la vitesse maximale. Sur le terrain, cette phase est représentée par les temps de sprints sur des distances de moins de 20 m (Morin & Samozino, 2016). D’un point de vue

technique, cette phase est caractérisée par une inclinaison prononcée du tronc vers l'avant, un temps de contact au sol plus long et une distance et une fréquence de foulée inférieures (Hicks et al., 2020). Les foulées sont de 1,80 à 2,11m de longueur, ont une fréquence de 3,96 à 4,64 Hz et le temps de contact au sol est légèrement plus grand que 110ms (Manzer et al., 2016) La vitesse maximale peut être mesurée par des temps de passage à des distances où il est considéré que les participant(e)s ont atteint leur vitesse maximale. Sur le plan technique, on remarque un redressement du tronc, la pose du pied sous le CM, une légère augmentation de la fréquence et de la longueur des foulées (Hicks et al., 2020). Pour des sprinteurs élités, la vitesse maximale est souvent atteinte entre 50 et 60 m de distance (Toyoshima & Sakurai, 2016). Dans les sports d'équipes, les athlètes ont besoin de 30 à 40 m pour atteindre cette vitesse (Young et al., 2008). À vitesse maximale, des sprinteurs amateurs ont une longueur de foulée de 2,07 à 2,15 m en moyenne et une fréquence de foulée de 4,51 à 4,72 Hz (Toyoshima & Sakurai, 2016). Le temps de contact au sol durant cette phase est < 110 ms (Manzer et al., 2016).

Le patinage constitue la pierre angulaire d'une vaste majorité d'actions motrices au cœur de la performance en hockey sur glace (Stastny et al., 2023). Les caractéristiques biomécaniques sur la glace sont bien différentes du sprint hors glace, mais ont une nature similaire. Comme au sprint, on observe deux phases distinctes : une phase d'accélération souvent comparée à la course à pied et une phase de glisse (Budarick et al., 2020). La phase d'accélération regroupe généralement les trois à six premiers pas et se distingue du sprint en course à pied à cause de la faible friction entre les patins et la glace. Au niveau des amplitudes de mouvements, les hanches sont en abductions, en rotation externe et en extension afin de maximiser le contact entre les lames de patins et la glace (Renaud et al., 2017). Le temps de contact au sol est généralement plus long, allant de 300 à 400 ms (Thompson et al., 2022). On observe aussi un grand mouvement vertical du CM et une accélération positive dans le plan horizontal (Budarick et al., 2020). Les plus grandes accélérations ($5,89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ maximum, $3,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ moyenne) sont observées à des distances de zéro à sept mètres (Stastny et al., 2023). La phase de glisse est généralement séparée de la phase d'accélération par l'apparition d'accélérations négatives dans le plan horizontal oscillant entre 2 et -2 m/s^2 (Budarick et al., 2020). Les amplitudes de mouvements sont aussi bien différentes de l'accélération alors que le mouvement vertical du CM se stabilise avec une variation

de ± 1 centimètre. La glisse se caractérise aussi par l'atteinte de la vitesse maximale ($8,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ maximum, $6,76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ moyenne) qui est enregistrée entre 26 et 39 mètres (Stastny et al., 2023).

L'accélération et la vitesse sur glace sont des qualités qui progressent naturellement au cours de l'adolescence (Wagner et al., 2021). Cependant, le développement de ces qualités est accéléré par l'entraînement en résistance de différentes formes. Par exemple, Dietze-Hermosa et al. (2024) ont utilisé un programme de sprints résistés de huit semaines pour améliorer la vitesse de patinage de joueurs de 14 à 18 ans. De leur côté, Dæhlin et al. (2017) ont démontré qu'une combinaison d'entraînement en force et de pliométrie pouvait mener à de plus grandes améliorations de la performance sur glace à 10 et 35m. Glaser et al. (2020) ont comparé les effets d'un entraînement de sprints résistés sur la glace avec un entraînement de sauts latéraux à l'extérieur de la glace avec des joueuses de troisième division. Les deux méthodes ont mené à des adaptations positives et similaires sur la vitesse de patinage et joueuses universitaires. Dans tous les cas, les exemples précédents démontrent qu'une variété d'exercice peut mener à des adaptations positives au niveau des habiletés de patinage. Ces exercices ont des caractéristiques F-V distinctes qui, du point de vue individuel, ont le potentiel de mener à des réponses variées en fonction de l'individu.

Chapitre 2 – Problématique, objectifs et méthode générale

Au Québec, deux documents de références tracent une perspective historique de la pratique sportive dans la province, définissent les différents concepts du milieu et présentent une vision du développement du talent sportif qui mène les athlètes québécois(es) vers le haut niveau : Les fondements de la pratique sportive au Québec (Marier et al., 2019) et Développement du talent sportif (Marier & Pilote, 2019). Il est notamment question de *spécialisation appropriée* composée de deux dimensions importantes (Marier & Pilote, 2019). La première dimension considère les exigences du sport de haut niveau qui dictent la zone d'âge optimale pour la performance dans un sport donné. En exemple, Marier & Pilote (2019) discute de la gymnastique artistique où, depuis l'augmentation de l'âge minimal à 16 ans en 2016, les participantes dominantes sont passées de jeunes filles et adolescentes à de jeunes femmes. La deuxième dimension considère les principes scientifiques de croissance et de maturation. Le rythme de croissance est différent pour chaque individu et nécessite un ajustement approprié de l'intensité et du volume d'entraînement. À l'adolescence, la *spécialisation appropriée* commence dès l'entrée au secondaire, par les programmes Sport-Études reconnus qui offrent un encadrement adapté aux élèves-athlètes dans le but de faciliter la conciliation des objectifs sportifs et scolaires. En hockey, ces programmes sont appelés « franchises » et se retrouvent dans l'ensemble des régions administratives du Québec. Le passage des jeunes joueurs et joueuses dans ces programmes est la première marche vers l'accès aux niveaux supérieurs du sport.

2.1 Adolescence, puberté et qualités physiques

L'adolescence est une période critique dans le développement des jeunes joueurs et joueuses qui vivent un ensemble de changements biologiques, psychologiques et sociaux (Berenbaum et al., 2015). Au niveau biologique, la vitesse de croissance et l'apparition de poils sont des signes de changements métaboliques et neuromusculaires importants de la puberté qui varient de façon non uniforme et non linéaire (Thieschäfer & Büsch, 2022; Van Praagh, 2007). La croissance osseuse ainsi que le développement musculaire et cardiovasculaire affectent les performances physiques des adolescent(e)s. La croissance osseuse s'observe par un allongement rapide des

bras, des MI et du tronc modifiant la longueur des bras de levier et la position du centre de masse (CM) et créant une période de « maladresse » pour l'adolescent(e) en pleine puberté. Le développement de la masse musculaire, en réponse à l'augmentation des hormones associées à la synthèse protéique, contribue à l'augmentation de la section transversale du muscle et ainsi à ses capacités à produire de la force. Finalement, les changements cardiovasculaires, notamment l'augmentation du volume du cœur, l'augmentation du volume sanguin et l'augmentation du volume d'éjection systolique se reflètent par une augmentation significative de la capacité aérobie. Au niveau neuromusculaire, la maturation du système nerveux mène à d'importantes améliorations au niveau du contrôle moteur et des capacités de production de puissance et de vitesse. L'épaississement de la gaine de myéline et l'augmentation de la capacité à recruter un plus grand nombre d'unités motrices simultanément sont des exemples de ces changements qui expliquent aussi l'augmentation rapide de la force et de la puissance à l'adolescence (Van Praagh, 2007). Ces changements peuvent être identifiés par le suivi régulier des changements de la taille de l'individu (Albaladejo-Saura et al., 2021). Le début du processus est identifié par une accélération marquée du rythme de croissance de l'individu. Le milieu du processus est marqué par l'atteinte d'un pic du rythme maximal de croissance. La fin du processus est identifiée par un ralentissement de la croissance jusqu'à l'atteinte de la taille adulte.

Ces changements créent un contexte particulier où la prescription d'entraînement doit être adaptée à l'âge biologique de l'athlète afin de minimiser les risques de blessures et maximiser les gains en performance (Towson et al., 2021). Prédécesseur au plan de développement sportif du Québec (Marier et Pilote, 2019), le modèle de développement à long terme de l'athlète (DLTA) de Balyi et al. (2013) identifie justement des moments propices pour le développement des qualités métaboliques et neuromusculaires durant l'adolescence (Figure 4). Ces moments, autour du pic de croissance, représentent ceux où le corps répond mieux à certains types de stimuli. Par exemple, le développement de la souplesse est priorisé à l'enfance avant le début du processus de croissance où l'individu semble mieux répondre à de grands volumes d'étirements (Donti et al., 2022). Il y a aussi une première opportunité pour le développement de la vitesse associée au développement du système nerveux. À l'approche du pic de croissance, les compétences

motrices, la vitesse et l'endurance devraient être prioritaires. Après l'atteinte du pic de croissance, la force devient une priorité d'entraînement.

La présence de moments propices pour de qualités physiques spécifiques promue par le DLTA est régulièrement critiquée pour son approche simpliste de développement athlétique durant l'adolescence et l'absence d'évidences scientifiques pour soutenir cette idée (Donti et al., 2022; Ford et al., 2011; Lloyd & Oliver, 2012). Une alternative au DLTA est le modèle de développement physique des jeunes (YPD) développé par Lloyd and Oliver (2012) et présenté dans la Figure 4. Ces derniers proposent une adaptation du DLTA en ajustant et ajoutant des moments propices pour le développement des qualités jugées importantes. Le YPD élimine l'idée de moments propices pour le développement de la force et la vitesse citant une série d'études qui démontrent les bénéfices pour la performance à tout âge durant l'adolescence. Le YPD intègre aussi des habiletés et des qualités spécifiques comme l'hypertrophie, les mouvements fonctionnels fondamentaux (FMS), les habiletés sportives spécifiques (SSS), la puissance, l'agilité et la mobilité.

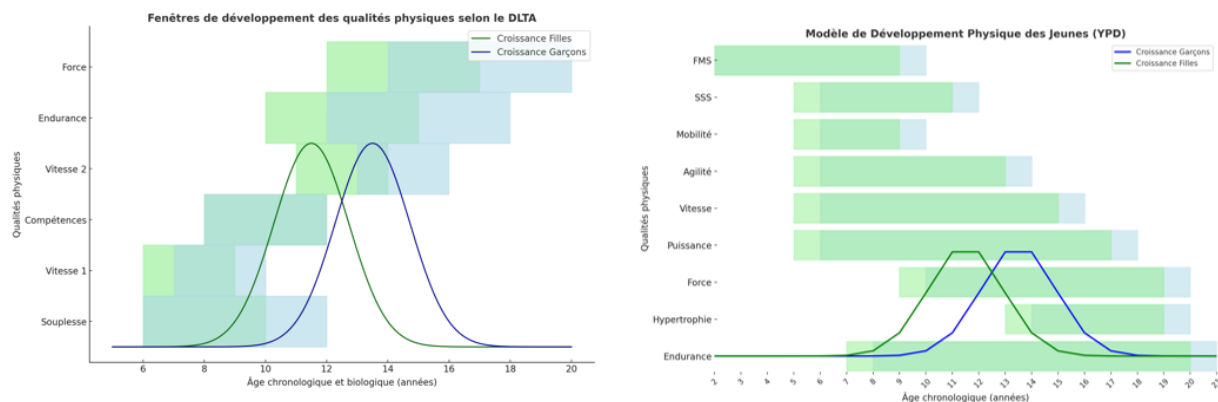


Figure 5. – Moments propices pour le développement des qualités physique adaptés de Balyi et al. (2013) et de Lloyd and Oliver (2012).

Bien que ces modèles soient intéressants pour guider les intervenant(e)s au niveau du choix des modalités d'entraînement à l'adolescence, il néglige des aspects fondamentaux de leur réalité sur le terrain. Le démarrage de la poussée de croissance montre jusqu'à cinq années d'écart entre deux individus du même âge chronologique (Mills et al., 2017). La très grande variabilité

interindividuelle dans la durée et le démarrage du processus de maturation physique chez les adolescent(e)s réduit la possibilité d'une recette unique adaptée à tous (Towlson et al., 2021). Dans un contexte, où les intervenant(e)s travaillent avec plusieurs adolescent(e)s à la fois, il peut devenir complexe de permettre à ceux-ci et celles-ci de profiter pleinement des moments propices pour le développement de leurs qualités physiques en fonction de leur âge biologique. Dans un effort de maximiser les gains de chacun, il existe un besoin pour des méthodes d'évaluation rapides et efficaces permettant de déterminer les capacités métaboliques et neuromusculaires à prioriser dans l'entraînement de chaque individu.

2.2. Individualisation de l'entraînement neuromusculaire

Les grandes différences interindividuelles entre les joueurs et les joueuses, au cours de la puberté, influencent grandement leurs réponses à l'entraînement (Barrera-Domínguez et al., 2023; Dalleck et al., 2016; Jiménez-Reyes, Samozino, Brughelli, et al., 2017). Cette réalité oblige les intervenant(e)s à structurer judicieusement leurs évaluations pour une implantation efficace et une communication inspirante avec les athlètes (Weakley et al., 2024). À travers les années, plusieurs méthodes ont fait leur apparition pour permettre aux intervenant(e)s d'individualiser objectivement et simplement la prescription d'entraînements. L'indice de force dynamique, le profil F-V vertical et le profil F-V horizontal sont des exemples précis de méthodes adaptées au contexte de l'entraînement neuromusculaire à l'adolescence.

2.2.1. L'indice de force dynamique

L'indice de force dynamique est un ratio entre la force générée durant un mouvement balistique et la force maximale durant un mouvement dynamique ou isométrique. Ainsi, il est considéré comme un reflet de la force dynamique de l'athlète relativement à sa force maximale isométrique (Sheppard et al., 2011). Les auteurs suggèrent que les athlètes ayant un indice de force dynamique $\leq 0,60$ répondent plus favorablement à des entraînements avec une plus forte proportion de mouvements balistiques pour améliorer la vitesse alors que les athlètes ayant un indice de force dynamique $\geq 0,80$ répondent favorablement aux entraînements orientés vers l'amélioration de la force maximale. Au niveau balistique, les sauts à contre-mouvement (CMJ) et les sauts statodynamiques (SJ) sont les plus utilisés. Pour la portion de force maximale, la force

maximale isométrique au squat ou la force de tirade maximale isométrique (IMTP) sont favorisées. Le ratio $\frac{CMJ}{IMTP}$ est généralement préféré au ratio $\frac{SJ}{IMTP}$ à cause de sa plus grande fiabilité (ICC de 0,92 vs. 0,74) (Comfort et al., 2018).

À ce jour, l'indice de force dynamique ne semble pas avoir été utilisé pour individualiser l'entraînement de hockeyeurs ou hockeyeuses. En revanche, des résultats prometteurs ont été observés avec des joueurs de basketball de différents niveaux (n=43, âge = 19,4 ± 2,9 ans) (Pleša, Ujaković, et al., 2024). Pour ce projet, 27 athlètes ont reçu un entraînement ajusté en fonction de leur indice de force dynamique alors que 16 athlètes composaient le groupe contrôle. Parmi les 27 athlètes assignés à l'intervention, 16 ont reçu un plan pour développer la force et 11 ont reçu un plan d'entraînement pour développer la vitesse. Les athlètes du groupe contrôle ont suivi un plan générique non individualisé. Chaque groupe a réalisé 10 séances en 5 semaines au cours de leur saison de compétition. À la fin de la période d'entraînement, les habiletés de sprint et de changement de direction se sont significativement améliorées pour les groupes ayant reçu des entraînements individualisés. Cependant, les effets étaient seulement présents pour le groupe ayant reçu l'entraînement en force. Pleša, Ujaković, et al. (2024) proposent que cette observation soit causée par l'attribution faite avec l'aide de l'indice de force dynamique. En effet, la force des participants du groupe ayant reçu un entraînement individualisé montrait une force maximale inférieure au début de l'expérience les prédisposant plus favorablement à une réponse positive à l'entraînement en force. Similairement, Suchomel et al. (2020) ont observé que l'IMTP expliquait 71,9% de la variance de l'indice de force dynamique contre seulement 8,8% pour le CMJ chez les hommes et 54,7% contre 9,8% chez les femmes. Ainsi, la force maximale mesurée par l'IMPT occupe une importance disproportionnée dans le calcul de l'indice de force dynamique. Ces résultats remettent en question la pertinence de la méthode alors que l'importance relative de la force maximale par rapport à la force balistique est trop grande. Le calcul du ratio est fondamentalement biaisé et limite son utilisation exclusive pour l'individualisation de l'entraînement.

2.2.2. Le profil force-vitesse vertical

Le profil F-V vertical est une autre méthode pour individualiser l'entraînement musculaire (Samozino et al., 2012). La méthode se distingue de l'indice de force dynamique par les bases théoriques et les techniques d'évaluation utilisées (Pleša, Kozinc, et al., 2024). Pour sa part, le profil F-V vertical vise à décrire l'ensemble de capacités mécaniques des membres inférieurs par le calcul de la relation linéaire F-V ainsi que la relation parabolique P-V (Samozino et al., 2012). La série d'équations présentée par Samozino et al. (2010) visait à décrire les propriétés mécaniques des membres inférieurs et l'identification des stratégies de coordination musculaires optimales pour la performance balistique. Le profil F-V vertical n'étant pas le sujet central de cette thèse, la série complète des équations utilisées pour calculer les contraintes mécaniques durant un saut ne sont pas présentées ici. Cependant, les intéressé(e)s sont invité(e)s à consulter Samozino et al. (2010) pour les explications détaillées de la méthode.

Ces équations permettent d'estimer la force et la vitesse générée durant un saut à partir de la hauteur atteinte, la distance parcourue durant la phase de poussée et la masse soulevée (Jiménez-Reyes, Samozino, Pareja-Blanco, et al., 2017). La hauteur de saut peut être estimée à partir de différentes techniques, mais les méthodes destinées aux intervenants sur le terrain prévoient l'utilisation de plateforme de force (Jiménez-Reyes, Samozino, Pareja-Blanco, et al., 2017), de tapis de contact, d'accéléromètres ou de séquences vidéo (Stanton et al., 2015). Dans un saut vertical, le travail effectué durant la poussée et la masse totale utilisée permettent le calcul de la force moyenne générée durant le saut. La distance de poussée est la différence entre la longueur de jambe avec la cheville en flexion plantaire et la hauteur du CM dans la position basse du saut. La masse totale est la somme de la masse de la personne et de la masse de la barre reposant sur les épaules durant le saut. Pour établir le profil F-V vertical, le participant exécute deux à trois répétitions pour quatre à six séries avec des charges progressives jusqu'à 60 à 80% de la masse corporelle. En plaçant les résultats de chaque saut sur un graphique avec la force en Y et la vitesse en X, il est possible de tracer une droite qui croise les deux axes (Figure 6). Les croisements avec les axes représentent respectivement la force maximale théorique (F_0) et la vitesse maximale théorique (V_0) du participant. La puissance, produit de la force et de la vitesse, a une forme parabolique et est calculée grâce à la formule :

$$P_{max} = \frac{F_0 \cdot V_0}{4} \quad [1]$$

Ensuite, la relation linéaire entre la force et la vitesse dans le cas de mouvements dynamiques (Samozino et al., 2016), permet de calculer le profil de l'athlète (S_{fv}) à partir de la pente de la relation force-vitesse :

$$S_{fv} = \frac{F_0}{V_0} \quad [2]$$

Parallèlement, Samozino et al. (2014) ont démontré la possibilité de calculer un profil théorique optimal (S_{fvopt}). Ce profil, calculé à partir de la P_{max} du participant, représente la combinaison optimale de force et vitesse pour cet individu. La comparaison du S_{fvopt} avec le S_{fv} du participant se fait par le calcul d'un pourcentage de déséquilibre (FV_{imb}) avec :

$$FV_{imb} = 100 \cdot \left| 1 - \frac{S_{fv}}{S_{fvopt}} \right| \quad [3]$$

La formule permet d'établir le profil du participant et cibler les exercices ayant le potentiel de favoriser des adaptations pour le participant. Un $FV_{imb} < 90\%$ suppose un manque de force et encourage l'utilisation d'exercices visant à améliorer la capacité à générer de la force rapidement (RFD). Inversement, un $FV_{imb} > 110\%$ suppose un manque de vitesse et encourage l'utilisation d'exercices qui obligent à générer de la force à de grandes vitesses comme la pliométrie ou les exercices de survitesse. Un FV_{imb} entre 90% et 110% représente un profil dit « équilibré » et exige une combinaison balancée des exercices proposés pour les deux autres profils.

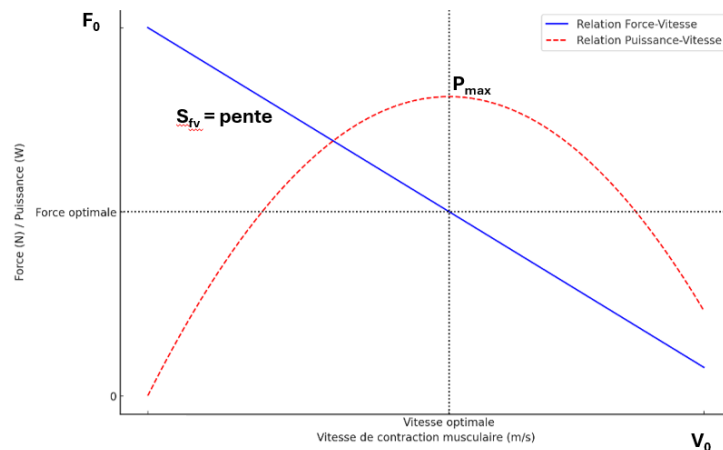


Figure 6. – Relations force-vitesse et puissance-vitesse théoriques adaptées de (Jaric, 2015)

Les résultats d'un entraînement individualisé à partir du profil F-V sont mitigés. Certains auteurs rapportent des résultats encourageants (Barrera-Domínguez et al., 2023; Jiménez-Reyes, Samozino, Brughelli, et al., 2017; Jiménez-Reyes, Samozino, et al., 2019) alors que d'autres n'ont pas observé de résultats supérieurs à un entraînement traditionnel (Lindberg et al., 2022; Zabaloy et al., 2020). Parmi les résultats supportant l'utilisation du profil F-V vertical, Jiménez-Reyes et al. (2017) ont observé une amélioration significative de la hauteur de saut d'athlètes semi-professionnels de soccer et de rugby (âge = $23,1 \pm 4,4$ ans). En raison du nombre élevé de participants ($n=84$), les chercheurs sont parvenus à créer cinq groupes expérimentaux : déficit en force, déficit en vitesse, équilibré, non optimisé et contrôle. Les effets de taille pour les trois premiers groupes étaient modérés ($\eta^2 = [0,70 ; 1,00]$) et négligeables pour le groupe non optimisé ($\eta^2 = 0,14$) et le groupe contrôle ($\eta^2 = -0,09$) supportant les bienfaits de la méthode. De leur côté, Barrera-Domínguez et al. (2023) ont vérifié l'effet de la méthode d'individualisation la hauteur de saut, la vitesse de sprint et l'habileté à changer de direction de 30 joueurs de basketball de niveau national (intervention : $n=15$, âge = $22,9 \pm 6,52$ ans ; contrôle : $n= 15$, âge = $22,7 \pm 4,93$ ans). Après l'intervention, les auteurs ont observé des améliorations de 21,2% pour le saut vertical, 5,9% pour le sprint et 5,7% pour les changements de direction comparativement au groupe contrôle. Parmi les résultats qui décourageant l'utilisation de la méthode, Lindberg et al. (2022) n'ont pas observé de gains significatifs par rapport à un entraînement traditionnel chez des hommes adultes en santé.

En hockey sur glace, la méthode n'a pas encore été utilisée pour individualiser l'entraînement en résistance des athlètes. Perez et al. (2021) ont toutefois mesuré le profil F-V vertical de 17 joueuses de l'équipe nationale française (âge = $21,6 \pm 3,4$ ans) dans le but de comparer les composantes mécaniques du saut avec celles du sprint et du patinage. Les auteurs ont observé que P_{max} était la seule variable du profil F-V vertical qui était significativement associée à la performance de patinage des joueuses. Ces résultats démontrent le caractère spécifique des caractéristiques mécaniques décrites par le profil F-V. Ainsi, la F_0 décrite par le profil F-V vertical ne sera pas nécessairement représentative de la F_0 décrite durant un profil F-V horizontal de patinage.

2.2.3. Le profil force-vitesse horizontal

Le profil F-V horizontal repose sur des bases théoriques communes au profil F-V vertical. Deux approches principales sont utilisées afin de dresser le profil F-V horizontal des athlètes dans le plan horizontal : la méthode avec essais multiples et la méthode sans résistance (Cross, Brughelli, et al., 2017). Au sprint, la résistance peut être manipulée grâce à des tapis spécialisés (Falk et al., 1996), des encodeurs linéaires spécialisés (Feser et al., 2022) ou des traîneaux avec résistance fixés à la taille (Cross et al., 2018). Dans chaque cas, la résistance est manipulée quatre à sept fois afin de décrire une relation F-V linéaire comme pour le profil F-V vertical (Figure 6). Les tapis instrumentés sont munis de moteurs pouvant appliquer de la résistance sur la ceinture du tapis et un point d'ancrage pour un harnais attaché aux hanches de l'athlète. Ces tapis sont rares et coûteux, ce qui rend leur utilisation peu plausible en contexte de sport de développement et encore moins en hockey sur glace (Cross, Brughelli, et al., 2017). Les encodeurs linéaires spécialisés sont des appareils plus accessibles, mais très coûteux. Les appareils sont constitués d'une corde solide qui peut être reliée à l'athlète, des capteurs de vitesse, de position et de force ainsi que d'un système motorisé pour appliquer et contrôler la résistance appliquée sur la corde afin d'enregistrer les composantes mécaniques du sprint (Feser et al., 2022). Finalement, les méthodes utilisant des traîneaux pour créer une résistance ont été développées pour contourner la nécessité de systèmes coûteux en misant sur du matériel abordable et accessible pour les intervenant(e)s. Pour ces méthodes, la résistance sur le traîneau est modifiée à chaque essai jusqu'à une diminution d'au moins 50 % de la vitesse maximale (Cross et al., 2018). La vitesse

maximale atteinte durant chaque essai est ensuite mise en relation avec la force générée pour établir le profil de l'athlète. Malgré tout, la méthode est plus complexe à réaliser, reposant sur l'estimation du coefficient de friction entre la surface de course et le traineau (Cross, Tinwala, et al., 2017).

La deuxième approche utilisée pour déterminer le profil F-V horizontal est l'analyse de sprints sans résistance. Cette approche consiste à analyser l'évolution de la vitesse du corps durant un effort maximal sur une distance de 30 à 40 mètres (Edwards et al., 2022). La méthode d'analyse de la performance des athlètes varie en fonction du type de méthode de mesure utilisée : des tapis roulants spécialisés (Morin et al., 2010), des pistes de course munies de plateformes de force, des encodeurs linéaires, des radars Doppler ou des systèmes de lasers, des cellules photoélectriques, des systèmes de positionnement (GPS ou LPS) et des caméras vidéo. Les deux premières méthodes sont généralement considérées comme les méthodes de référence. Les plateformes de force intégrées sous la ceinture du tapis roulant ou la surface de course permettent une description précise des caractéristiques temporelles de la production de force dans l'axe vertical, horizontal et latéral par rapport à la direction de course à chaque pas (Morin et al., 2010). Les méthodes mesurant plutôt les caractéristiques temporelles de la vitesse du corps c.-à-d. les encodeurs linéaires, les radars et les systèmes de positionnement, les caractéristiques mécaniques du sprint sont déduites à partir d'une approche de dynamique inverse appliquée au CM du corps (Samozino et al., 2016). Tous les postulats et fonctions présentés ci-bas ne considèrent pas les différences entre chaque pas et présentent des valeurs moyennes (temps de contact et phase d'envol). La vitesse durant la phase d'accélération (jusqu'à l'atteinte de la vitesse maximale) est décrite par une fonction mono-exponentielle de la vitesse horizontale (V_h) en fonction du temps (t) (Morin et al., 2006) :

$$V_h(t) = V_{h_{max}} \cdot (1 - e^{-t-0.3/\tau}) \quad [4]$$

où $V_{h_{max}}$ représente la vitesse maximale atteinte à la fin du sprint et τ la constante de temps d'accélération. Un délai de 0,3 seconde est ajouté à la formule pour corriger le bruit enregistré durant le départ du sprint par des mouvements involontaires du tronc améliorant la fidélité de la

méthode (Morin et al., 2019). Ensuite, la position (X_h) et l'accélération (A_h) de l'athlète dans le temps peuvent être estimées en dérivant et intégrant la fonction [4].

$$x(t) = V_{h_{max}} \cdot (t + \tau \cdot e^{-t/\tau}) - V_{h_{max}} \cdot \tau \quad [5]$$

$$A_h(t) = \left(\frac{V_{h_{max}}}{\tau}\right) \cdot e^{-t/\tau} \quad [6]$$

En appliquant les lois fondamentales de la dynamique, il est possible de calculer les forces de réaction au sol (GRF) appliquées au CM dans l'axe horizontal (F_H) en fonction du temps en utilisant :

$$F_h(t) = m \cdot A_h(t) + F_{aero}(t) \quad [7]$$

où m est la masse de l'athlète en kg et $F_{aero}(t)$ représente la résistance de l'air appliquée contre l'athlète lors d'un sprint. Cette force est calculée grâce à la formule :

$$F_{aero}(t) = k \cdot (V_h(t) - V_w)^2 \quad [8]$$

où k est le coefficient de friction de l'air et V_w la vitesse du vent (si présent). Le coefficient de friction de l'air peut être estimé par :

$$k = 0.5 \cdot \rho \cdot Af \cdot Cd \quad [9]$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{Pb}{760} \cdot \frac{273}{273 + ^\circ C} \quad [10]$$

$$Af = (0.2025 \cdot h^{0.725} \cdot m^{0.425}) \cdot 0.266 \quad [11]$$

où ρ est la densité de l'air en kg/m^3 , Af est la surface frontale du corps du coureur et Cd le coefficient de traînée fixé à 0.9. La densité de l'air est calculée grâce à la formule 7 où $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'air à 760 Torr et 273 °K, Pb est la pression barométrique (en Torr) et $^\circ C$ la température de l'air en degrés Celsius. La surface frontale du corps du coureur est donnée par la formule 11 où h est la hauteur du coureur (en m) et m sa masse (en kg). À partir du modèle biomécanique décrit par les formules précédentes, il devient possible de développer les caractéristiques mécaniques de l'athlète et les utiliser pour la prescription d'exercices. Les données brutes avant le départ et les données après l'atteinte de la vitesse maximale sont

éliminées. La formule 4 est ensuite utilisée pour lisser les données brutes par la méthode des moindres carrés et estimer la force horizontale produite durant toute l'accélération ($F_h(t)$).

Les variables calculées à partir de l'approche sont similaires à celles calculées pour le profil F-V vertical, soit : F_0 , V_0 , P_{\max} et S_{fv} . Ces variables sont identifiées en calculant l'abscisse et l'origine de la relation entre la force et la vitesse. Deux variables supplémentaires sont calculées et utilisées pour évaluer l'efficacité du sprint. La première est le ratio de force maximal (Rf_{\max}) qui est exprimé en % et correspond à la valeur maximale donnée par la fonction :

$$Rf(t) = \frac{F_h(t)}{\sqrt{F_h(t)^2 + F_v(t)^2}} \quad [12]$$

Le Rf_{\max} est généralement atteint durant le deuxième pas du sprint. Dans le cas du profil F-V horizontal, elle est estimée à partir du modèle pour $t > 0,3$ s. La deuxième variable d'efficacité technique est le taux de décroissance linéaire du ratio de force (D_{rf}) et est calculée par la pente des valeurs modélisée à partir de la formule 12.

En hockey sur glace, la fidélité des deux approches pour évaluer le profil F-V de patinage des joueurs et joueuses a été analysée. Pour la première approche, Perez et al. (2022) ont utilisé un encodeur linéaire (1080 Sprint, 1080 Motion, Suède) pour appliquer des résistances de 3 kg (résistance minimale du système) à 25%, 50% et 75% de la masse corporelle et l'équipement complet. Les distances de sprint étaient ajustées pour chaque charge afin de permettre aux athlètes d'atteindre leur vitesse maximale sans gaspiller de l'énergie. Les distances choisies étaient de 40m à 3 kg, 30m à 25 et 50% et 20m à 75%. Pour la deuxième approche, Perez et al. (2022) ont évalué la fidélité d'un radar Doppler positionné sur la glace trois mètres derrière le patineur. Ils ont conclu que la méthode avait un niveau acceptable de fidélité relative et absolue qui était amélioré par l'utilisation des valeurs moyennes de deux essais. Stenroth et al. (2020) ont utilisé une caméra GoPro 3 (GorPro Inc., États-Unis) positionnée perpendiculairement à 16m de la direction du sprint et à 15m de la ligne de départ. Des marqueurs étaient placés à des positions représentant 0, 2,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 25 et 30m de la ligne de départ (les distances réelles étaient de 0,94, 3,28, 5,63, 7,97, 10,31, 15, 19,69, 24,38 et 29,06m de la ligne de départ afin de corriger l'erreur de parallaxe). La fiabilité de la méthode pour l'estimation des variables F-

V en patinage a été confirmée par des coefficients de corrélation intraclasse (ICC) modérés (ICC 0,351-0,859). Les auteurs ont conclu que l'utilisation du radar tel que proposé par Perez et al. (2022) était plus fiable pour l'analyse du patinage avant.

2.2.4. Interprétation du profil force-vitesse horizontal

Le profil F-V horizontal à partir du suivi de la vitesse du CM représente une option attrayante pour les intervenant(e)s puisqu'il permet un classement des athlètes en fonction de leurs qualités neuromusculaires à partir d'un minimum de deux sprints maximaux de 30 à 40m (Baena-Raya et al., 2022; Samozino et al., 2016). Le protocole, moins énergivore en temps, présente des avantages intéressants pour une utilisation en contexte appliqué puisqu'il minimise potentiellement les impacts négatifs sur l'horaire d'entraînement des athlètes (Weakley et al., 2024). Le profil F-V horizontal a d'ailleurs été utilisé avec succès pour suivre l'état des athlètes à travers une saison complète dans le but d'identifier les risques de blessures aux ischio-jambiers (Mendiguchia et al., 2016) ou individualiser leurs entraînements (Lahti, Huuhka, et al., 2020; Lahti, Jiménez-Reyes, et al., 2020).

Dans un article de commentaire, Morin and Samozino (2016) font état de discussions avec des intervenant(e)s en sport qui ont relevé un besoin d'accompagnement dans la façon d'interpréter efficacement les résultats du profil F-V pour l'individualisation et la prescription spécifique d'entraînement. L'article, comme une partie de cette thèse, offre une définition des différentes variables obtenues, les méthodologies utilisées pour le profilage vertical et horizontal, une justification détaillée de leur potentiel pour la prescription individualisée d'exercices et un modèle illustrant les associations entre toutes les variables des profils.

Capacités de sprint et d'accélération

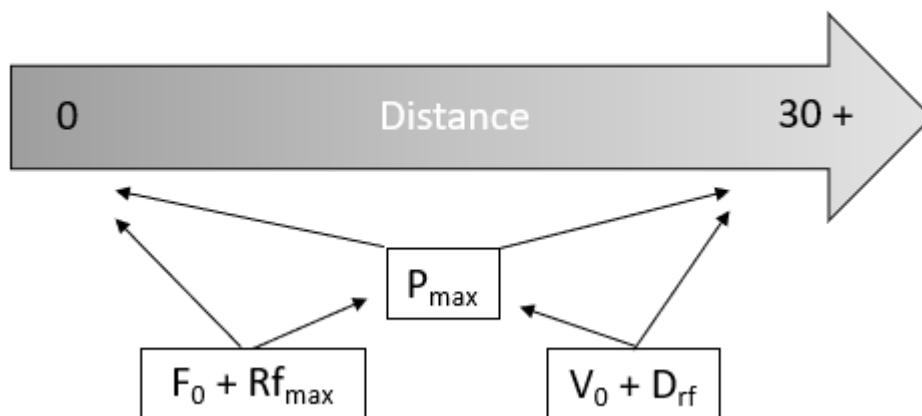


Figure 7. – Modèle adapté de Morin et Samozino (2016) pour interpréter les variables du profil force-vitesse horizontal.

La Figure 7, illustre les associations entre les variables du profil F-V horizontal et la performance au sprint. P_{max} est la variable la plus importante du modèle puisque la capacité à générer de la puissance dans l'axe horizontal est associée à la performance au sprint indépendamment de la distance parcourue. F_0 et Rf_{max} sont des variables intimement liées aux capacités d'accélération et généralement associées à des performances de moins de 20m. À l'inverse, V_0 et D_{rf} sont liées aux capacités de vitesse maximale et généralement associées aux performances au-delà de 20m.

2.3. Objectifs et hypothèses spécifiques

Au Québec, la route vers le sport de haut niveau passe par une spécialisation appropriée à l'adolescence où l'objectif est d'offrir des conditions de développement optimales aux jeunes athlètes. Ces conditions doivent tenir compte des très grandes différences interindividuelles dans le processus de maturation physique vécu par les adolescent(e)s à la puberté. En hockey sur glace, les travaux de Perez et al. (2021) démontrent bien les associations limitées entre les profils, c.-à-d. vertical, sprint et patinage. Ils recommandent simplement d'utiliser le profil F-V de patinage pour individualiser la prescription d'entraînement. Du point de vue de l'intervenant(e), ces conclusions peuvent paraître limitées puisqu'elles ne permettent pas de répondre à plusieurs

éléments de leur réalité dans l'encadrement de jeunes athlètes. Le modèle proposé par Morin and Samozino (2016) est un point de départ intéressant qui n'est pas adapté au contexte unique du joueur de hockey élite à l'adolescence. Le modèle ne tient pas compte de 1- la complémentarité des capacités neuromusculaires et métaboliques, 2- la présence de transfert de qualités développées hors glace aux composantes du profil F-V de patinage et 3- l'effet confondant de la puberté sur l'expression des composantes du profil F-V de patinage. Ainsi, l'objectif général de cette thèse est de documenter le profil F-V des joueurs et joueuses de hockey adolescent(e)s élites et comprendre ses liens avec différents indicateurs de performance afin de faciliter l'interprétation des résultats et la prescription individualisée d'exercice. Le premier objectif spécifique est d'explorer les associations entre le profil F-V au sprint de joueurs et joueuses adolescent(e)s élites, leur capacité anaérobie et leur capacité à répéter des sprints. Le deuxième objectif spécifique est d'évaluer les associations entre le profil F-V de patinage, la puissance des MI, l'habileté à changer de direction et la vitesse de sprint en course à pied. Le dernier objectif spécifique est d'évaluer les différences entre les variables du profil F-V chez des athlètes à différents stades de maturation physique.

2.3.1. Questions et hypothèses de recherche – Profil force-vitesse, capacités anaérobies et capacité à répéter des sprints

Les exigences physiques du hockey sur glace sont complexes et nécessitent le développement concomitant des capacités métaboliques et neuromusculaires (Vigh-Larsen & Mohr, 2024). Le modèle présenté par Morin et Samozino (2016) n'inclut pas les associations des différentes composantes du profil F-V avec les systèmes énergétiques, notamment le système anaérobie. Considérant que ce dernier couvre environ 69% des exigences énergétiques en hockey sur glace et que la performance initiale au sprint est déterminante dans la capacité à répéter des sprints, quels paramètres du profil F-V d'un joueur ou d'une joueuse de hockey permettent de maximiser ses performances pour cette filière énergétique? De plus, est-ce que les relations sont influencées par le sexe biologique des participant(e)s? En ligne avec l'étude de ces associations chez des joueurs adolescents élites en soccer, les hypothèses principales sont que : 1- P_{max} soit la variable la plus fortement associée aux performances anaérobies, 2- V_0 aurait une plus forte corrélation avec les capacités anaérobies mesurées au Wingate en raison du temps mis à atteindre la

puissance maximale (autour de 7 secondes) (Morin & Samozino, 2016) et F_0 aurait une plus grande association avec la capacité à répéter des sprints en raison du changement de direction utilisé durant le test (Baena-Raya et al., 2021). Le profil F-V horizontal chez les filles est généralement plus orienté vers la force que chez les garçons au soccer (Devismes et al., 2021; Haugen et al., 2020). Ainsi, l'hypothèse secondaire est que F_0 joue un rôle plus important dans la performance anaérobie chez les filles que chez les garçons.

2.3.2. Questions et hypothèses de recherche – Profil force-vitesse de patinage et qualités physiques hors glace.

La saison estivale est une période critique durant laquelle l'amélioration de la condition physique des joueurs de hockey peut permettre de maximiser la performance au retour sur la glace en automne (Haukali & Tjelta, 2016). Le modèle de Morin et Samozino (2016) indique que les variables d'accélération (F_0 et Rf_{max}) sont associées avec la performance au sprint sur de courtes distances (<20m) et les variables de vitesse (V_0 et D_{rf}) sont associées avec la performance au sprint sur de plus longues distances (>20m). Cependant, ce modèle, développé pour le sprint, n'a jamais été appliqué à la problématique du transfert de l'entraînement hors glace à l'entraînement sur glace vécu au hockey. Dans cette perspective, quelles qualités physiques, mesurées hors glace, ont le potentiel de se transférer à différentes composantes du profil F-V de patinage en hockey sur glace? De plus, est-ce que les relations sont influencées par le sexe biologique des participant(e)s? Les travaux de Wagner et al. (2021) démontrent bien l'importance des qualités physiques hors glace dans l'expression des qualités de patinage. Ainsi, la première hypothèse est que les associations observées soient en ligne avec le modèle de Morin et Samozino (2016) et que les exercices avec des vitesses de contraction plus lentes soient associés avec F_0 sur la glace alors que les exercices avec des vitesses de contraction plus rapides soient associés avec V_0 . Ensuite, les femmes ont généralement un profil F-V orienté vers la force comparativement aux hommes (Devismes et al., 2021; Haugen et al., 2020). Ainsi, la seconde hypothèse est que les associations observées pour F_0 soient plus grandes chez les filles que chez les garçons.

2.3.3. Questions et hypothèses de recherche – Profil force-vitesse de patinage et maturation physique

Troisièmement, la maximisation de la performance des athlètes à l'âge adulte passe par un développement optimal durant la puberté (Balyi et al., 2013; Lloyd & Oliver, 2012). Cette période est critique pour les jeunes qui vivent un processus de maturation physique marqué par des changements physiques et physiologiques importants (Towlson et al., 2021). Le modèle de Morin et Samozino (2016) a été développé avec des athlètes adultes ayant déjà y complété le processus de maturation. Il ne prend pas en compte les différents stades de maturation physique à l'adolescence. Des travaux en soccer ont mis en évidence des différences inconstantes entre les composantes du profil F-V au sprint à différents stades de maturation (Fernández-Galván et al., 2022). Dans ce contexte, quelles sont les différences entre les composantes du profil F-V de patinage aux différents stades de maturation physique de joueurs de hockey? Les travaux de Fernández-Galván et al. (2022) ont démontré que les différences entre les stades de croissances étaient plus importantes après le pic de croissance pour V_0 et avant l'atteinte de celui-ci pour F_0 . L'hypothèse pour cette section est que les différences observées en patinage soient similaires puisque l'accélération en course à pied et en patinage est similaire (Budarick et al., 2020).

2.4. Méthode générale

Une prétention importante de la méthodologie du profil F-V horizontal est son habileté à être utilisée facilement par les intervenant(e)s pour broser un portrait rapide et fiable des capacités mécaniques d'un(e) athlète. Avant les premiers travaux de cette thèse, il était nécessaire d'explorer les différentes options permettant de calculer le profil F-V horizontal. Les développeurs de la méthode ont mis à la disposition des intervenant(e)s des outils pour calculer ce profil à partir de temps de passage ou de données radars (Samozino et al., 2016). La première itération de l'outil était un fichier Excel configuré avec les différentes formules nécessaires pour établir le bilan mécanique de l'athlète (Figure 8). Le fichier, au moment de la rédaction de cette thèse, est disponible pour téléchargement sur le site personnel de l'auteur Jean-Benoit Morin (<https://jbmorin.net/downloads-%f0%9f%93%8a%f0%9f%93%88/>). Une courte vidéo explicative est aussi disponible pour guider les intéressé(e)s sur son bon fonctionnement. Pour l'utiliser, il

suffit d'inscrire les temps de passage collectés à partir de photocellules ou insérer les données brutes collectées à partir d'un radar. La configuration du fichier permet ensuite le calcul automatique des différents paramètres du profil F-V. Bien que ce fichier soit simple à utiliser, les essais faits au commencement de cette thèse ont découragé l'utilisation de cet outil. L'analyse des résultats demandait plusieurs heures à copier et coller les données dans le fichier faisant ressortir l'irréalisme de son utilisation pour les intervenant(e)s terrain.

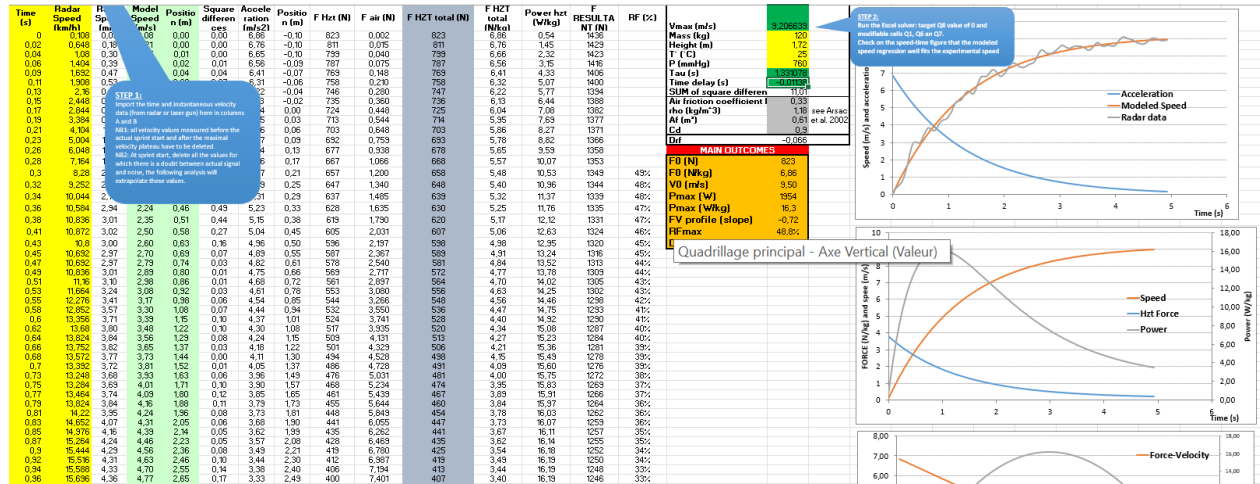


Figure 8. – Capture d'écran du fichier Excel rendu disponible par Jean-Benoit Morin au <https://jbmorin.net/downloads-%f0%9f%93%8a%f0%9f%93%88/>

Une seconde option était l'application mobile du nom de MySprint disponible dans la série MyJumpLab. Installée sur un téléphone intelligent, l'application utilise la vidéo de sprints filmés à 240 images par seconde et des marqueurs positionnés stratégiquement par rapport au coureur (Figure 9) pour calculer le profil F-V horizontal. Une fois le sprint enregistré, l'utilisateur peut identifier précisément le départ du sprint et la position du coureur ou de la coureuse par rapport aux marqueurs à intervalles réguliers. La position des marqueurs est ajustée pour corriger la parallaxe des images par rapport à la caméra du téléphone. Une fois chaque moment de croisement avec les marqueurs identifié, l'application calcule des temps de passage qui sont utilisés automatiquement pour le calcul du profil F-V horizontal. Son coût très faible (environ 20\$) et sa facilité d'utilisation sont des avantages indéniables. Toutefois, nous avons rencontré des problèmes similaires à l'utilisation du fichier Excel décrit ci-haut. L'analyse et l'identification de

chaque croisement du coureur ou de la coureuse avec les marqueurs sont chronophages et irréalistes dans le contexte d'évaluation avec de grands groupes d'athlètes.



Figure 9. – Capture d'écran de l'écran de l'interface de l'application MySprint

La solution alternative aux méthodes disponibles était donc le développement d'un outil pouvant être utilisé facilement par des intervenants pour analyser les données radar. L'outil développé en langage R et R Shiny a été utilisé pour réaliser les calculs de profil F-V présentés dans l'ensemble de cette thèse (Figure 10). Le radar a été priorisé pour ce projet puisqu'il est reconnu comme la meilleure alternative pour suivre la vitesse du coureur ou du patineur durant un sprint (Simperingham et al., 2019). L'application a été jugée simple d'utilisation et l'expérience acquise durant les années ont démontré que peu de connaissances du profil F-V horizontal étaient nécessaires pour procéder aux analyses facilement et rapidement. L'application web est hébergée gratuitement sur le serveur fourni par R Shiny rendant l'outil très accessible pour tous et toutes. Pour utiliser l'application, le fichier de données brutes du radar est téléchargé directement dans la plateforme. Il est ensuite possible de procéder au nettoyage des données avec la souris en encadrant les données avant le départ et après l'atteinte du plateau de vitesse maximale avec le curseur (tel que décrit dans Samozino et al. (2016)). Finalement, les données

anthropométriques et météorologiques sont ajoutées avant le traitement des données brutes. Le code source de l'application est fourni en annexe puisque cet outil a été utilisé pour les analyses de l'ensemble de cette thèse.

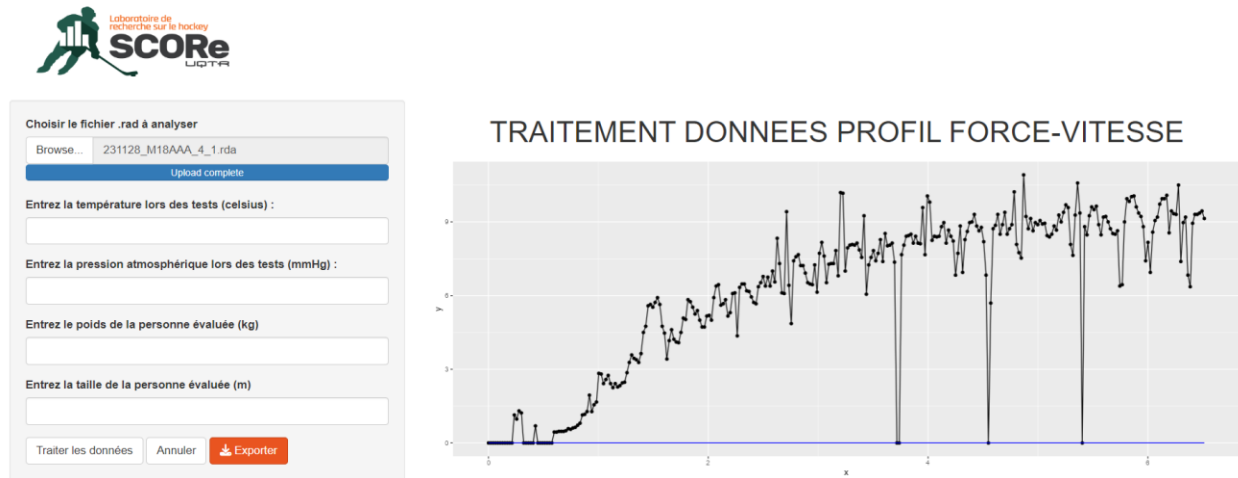


Figure 10. – Capture d'écran de l'outil développé en R et R Shiny pour le traitement des données radar.

Chapitre 3 – Associations entre les variables du profil force-vitesse, les capacités anaérobies et la capacité à répéter des sprints à l'extérieur de la glace.

3.1. Apport original de l'étudiant et contribution des co-auteurs

Ce troisième chapitre de thèse présente le premier article publié et intitulé : *Exploring associations between sprinting mechanical capabilities, anaerobic capacity, and repeated-sprint ability of adolescent ice hockey players*. Cet article, coécrit par Julien Glaude-Roy, Philippe Pharand, Jean-François Brunelle et Jean Lemoyne, est paru en 2023 dans le cadre du sujet de recherche *Hockey : Testing and Performance* du journal *Frontiers in Sports and Active Living* (vol. 5, 1258497).

Glaude-Roy, J., Pharand, P., Brunelle, J. F., & Lemoyne, J. (2023). Exploring associations between sprinting mechanical capabilities, anaerobic capacity, and repeated-sprint ability of adolescent ice hockey players. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5.

3.2. Résumé en français

Le sprint et les capacités anaérobies sont des variables déterminantes de la performance en hockey sur glace. Les travaux récents en sprint ont révélé l'existence de profils force-vitesse (F-V) distinct, mais le lien entre ces profils et les capacités anaérobies sont encore limitées. Cette étude explore les associations entre les variables du F-V et les capacités anaérobies de cohortes de joueurs de hockey sur glace adolescents hautement entraînés. Les données de 36 hommes (âge : $15,1 \pm 0,2$) et 34 femmes (âge : $16,5 \pm 0,7$) ont été acquises durant des camps hors-saison. Chaque athlète a complété un test de sprint de 30m, un Wingate (WAnT) and des sprints répétés (RSA). Les variables du F-V ont été calculées à partir du sprint de 30m. Des coefficients de corrélations partielles de Pearson pour l'ensemble des données et des coefficients de corrélations de Pearson pour les groupes individuels d'hommes et de femmes ont été calculés. Parmi les variables du F-V, la vitesse maximale théorique et la puissance étaient modérément à largement associées avec la performance au WAnT et au RSA ($|r| = [0,30; 0,70]$). La force maximale théorique était modérément associée avec le RSA ($r = [-0,32; -0,33]$). Les résultats indiquent l'importance pour les joueurs adolescents hautement entraînés d'être en mesure d'appliquer de la force à haute vitesse afin de maximiser leurs capacités anaérobies. Les différences importantes entre les hommes et les femmes suggèrent que les priorités d'entraînement puissent varier en fonction du sexe biologique.

Mots clés : force, vitesse, puissance, tests, profil force-vitesse, performance

3.3. Abstract

Sprinting ability and anaerobic capacities are determinant variables of ice hockey players' performance. Recent research in sprinting showed the existence of distinct force-velocity profiles (F-V), but the link between these profiles and anaerobic capacities is still limited. This study explores associations between F-V variables and anaerobic capacities among cohorts of highly trained adolescent ice hockey players. Data for 36 men (age: 15.1 ± 0.2) and 34 women (age: 16.5 ± 0.7) was collected during off-season camps. All athletes completed a 30-meter sprint test, a Wingate anaerobic test (WAnT) and a repeated-sprint anaerobic test (RSA). F-V variables were calculated from the 30-m sprint test. Partial Pearson correlation coefficients for pooled data and Pearson correlation coefficients for individual male and female data sets were calculated. Among F-V variables, maximal theoretical velocity and power were moderately to largely associated with WAnT and RSA performance ($|r| = [.30, .70]$). Maximal theoretical force was moderately associated with the RSA ($r = [-.32, -.33]$). Results indicate the importance for highly trained adolescent players to be able to apply force at high velocities to maximize anaerobic capacities. Important differences between male and female players suggest training priorities may differ according to sex.

Keywords: strength, speed, power, testing, force-velocity profile, performance

3.4. Introduction

With approximately 18% of effective playing time spent in high-intensity skating activities, performance in ice hockey is a combination of short bouts of explosive and powerful movements cumulating in high energetic demands (1). The ability to skate and accelerate at higher speeds distinguishes the best young players (2). Improving sprinting ability off the ice during off-season is important as it may improve skating performance in-season (3). Developing the anaerobic system is also important as this metabolic system assumes 69% of energy costs during competition (4). To develop both of these capacities, strength and conditioning coaches turn to combinations of various off-ice methods, such as strength exercises, heavy resisted sprints, repeated-sprints and high intensity training (5-9). However, the concurrent use of all these training methods during off-season presents periodization challenges that may hinder strength/power and anaerobic gains (10, 11).

In recent years, analysis of the sprint force-velocity profile (F-V) has gained popularity among researchers and practitioners who have turned towards this evaluation method to efficiently individualize training prescription (12, 13). The procedure gives an overall view of the strength/power/velocity capabilities of an athlete (defined in Table 1) during sprinting tasks by following the time-velocity curve of their center of mass (14). The mechanical capabilities evaluated using this method for a given athlete are compared with those of an optimal profile (12, 15). In fact, Morin and Samozino (15) have demonstrated that theoretical maximal force (F_0) translates to shorter distance sprint performance (<20m), whereas theoretical maximal velocity (V_0) translates to longer distance sprint performance (>30m).

Table 1. Definitions for F-V, WAnT and RSA test variables.

Test	Variable	Definition	Units
F-V	F_0	Maximal theoretical horizontal force relative to body mass	$N \cdot kg^{-1}$
	V_0	Maximal theoretical horizontal velocity	$M \cdot s^{-1}$
	P_{max}	Maximal theoretical horizontal power relative to body mass	$W \cdot kg^{-1}$
	S_{fv}	Slope of the force-velocity relationship applied to the center of mass	$N \cdot m \cdot s^{-1}$
	S_{fvopt}	Slope of the force-velocity relationship applied to the center of mass based on athletes' maximal theoretical horizontal power and best performance at 10 meters.	$N \cdot m \cdot s^{-1}$
	$FV_{imb.}$	Represents the relative difference between S_{fv} and S_{fvopt} computed as $100 \cdot \left(1 - \frac{S_{fv}}{S_{fvopt}}\right)$. A positive value is interpreted as a force deficit and a negative value as a velocity deficit.	%
	D_{RF}	Rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force to the corresponding resultant force	%
	RF_{max}	Maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force to the corresponding resultant force	%
Wingate	Peak power	Maximal average power recorded during one of the six 5-second windows	W
	Relative peak power	Maximal average power recorded during one of the six 5-second windows relative to body mass.	$W \cdot kg^{-1}$
	Average power	Sum of the six 5-second average power windows divided by total power output	W
	Relative average power	Sum of the six 5-second average power windows divided by total power output relative to body mass.	$W \cdot kg^{-1}$
	Anaerobic capacity	Sum of the six 5-second average power windows	W
	Anaerobic fatigue	Rate of decrease of power output.	%
RSA	Best time	Best time of first 2 repetitions in the RSA anaerobic sprint test	Seconds
	Total time	Time sum off all 6 sprints performed in the RSA anaerobic sprint test	Seconds
	Performance decrement score	Rate of performance decrease in sprint time.	%

Available research including ice hockey players focused mainly on associations between sprinting F-V, skating F-V, vertical jump performance and skating performance. Perez et al (16) explored the associations between both profiles and jumping, running or skating performance with 17 French national team female players (mean age, 21.6 ± 3.4 yrs). They demonstrated that

maximal theoretical power (P_{\max}) displayed the strongest associations with the three performance indicators ($|r|$ ranging from 0.81 to 0.92; $p < 0.001$). Other work including ice hockey players was used to confirm the validity and reliability of the method on the ice, this time with French elite female players and Finnish elite male junior players (17-19). To our knowledge, F-V data for highly trained adolescent ice hockey players has yet been published. As physical and physiological performance does not linearly change during the critical stage of adolescence (20-22), studying these age groups is important. Understanding the links between sprinting F-V and a wider set of physical or physiological markers such as anaerobic capacity could guide the decisions of the practitioners during off-season.

In other sports, some work has linked sprint mechanical capabilities to anaerobic capacities. The results with rugby sevens players and soccer players consistently showed that the ability to efficiently generate force at high velocities (e.g., V_0 and D_{rf}) was impaired while the ability to efficiently generate force at low speeds (e.g., F_0 and R_{fmax}) remained constant during repeated sprints (23, 24). In both cases, linear sprints were used during the repeated-sprint test even though team sports performance includes much shorter sprints and multiple changes of directions (25). In addition to such limitations, the links between mechanical capabilities during an independent maximal sprint test and repeated-sprint ability were not reported. Given the widespread use of anaerobic capacity tests during off-season testing of ice hockey players (25, 26), a better understanding of the associations between sprinting F-V and common anaerobic capacity tests could help practitioners narrow down preferred and most effective training methods during off-season. Hence, this study aimed to explore associations between sprinting F-V mechanical capabilities and anaerobic capacities of male and female 15- to 17-year-old ice hockey players.

Two specific objectives arise from this study. First, this study explores how the mechanical capabilities of sprinting F-V are related to variables from anaerobic tests used in ice hockey (e.g., the Wingate and a repeated-sprint ability test with a 180° turn). Second, this study explores differences between male and female players. Based on the previous results by Perez et al. (16), it was hypothesized that P_{\max} show the strongest associations with the different variables of both anaerobic tests. It was also believed V_0 shows stronger associations with the Wingate given the

time needed to reach peak power (around 7 s) and F_0 show stronger associations with the repeated-sprints due to the included change of direction in this study. Finally, given that female athletes tend to have more force-oriented profiles (27, 28), it was hypothesized that F_0 plays a more important role in anaerobic performance for this population.

3.5. Methods

3.5.1. Participants

Every spring, the Quebec Ice Hockey Federation invites the most promising players (men and women) to development camps. Invitations are based on the performance of players during the regular season. Among these invited players, the best will be part of the team competing at the national level. In the summer of 2022, 42 men and 42 women were invited to a summer camp launching off-season training for players. Various physical and physiological abilities were tested. Goaltenders were excluded from the study design given the unique nature and demands of their position (29). Injured players or players who were unable to complete the entire testing protocol were also excluded from the study. Finally, 36 men (age = 15.1 ± 0.2 years, stature = 177.5 ± 6.4 , mass = 70.6 ± 8.4) and 34 women (age = 16.5 ± 0.7 years, stature = 167.3 ± 5.5 , mass = 65.4 ± 7.0) participated in the study. Given their training status and preparation for national-level competitions, participants are classified as highly trained athletes (30). *Post hoc* power analysis for between-groups comparisons and correlations were computed using G*Power v.3.1.9.7. Statistical power for the smallest observed effect size (0.67) at a significance level of $\alpha = 0.05$ was 0.8 for both methods. This study was approved by the ethics board of the researchers' institution (CER-21-278-07.09). Following rules and regulations of our country and province only written consent from players was obtained. Article 21 of the Civil Code of the province of Quebec stipulates that "Consent to research that could interfere with the integrity of a minor may be given by the person having parental authority or the tutor. A minor 14 years of age or over, however, may give consent alone if, in the opinion of the competent research ethics committee, the research involves only minimal risk and the circumstances justify it."

3.5.2. Study design

Male and female players were tested on two separate consecutive days, following similar procedures (e.g., Day 1 = men, Day 2 = women). The players were divided into two subgroups alternating between physical testing and team meetings. The testing protocol of the camp consisted of anthropometric measurements, strength, speed, agility, power, anaerobic capacity and mobility. These physical parameters were collected via various tests: stature, mass, grip strength, chin-ups, bench press, standing long jump, counter movement jump, Wingate Anaerobic 30-s Test (WAnT), 30-m sprint, 5-10-5 shuttle run and repeated anaerobic sprints test with a 180° change of direction (RSA). The tests were divided in two sessions. For the morning session, players were divided into five groups alternating between one agility and five muscular tests. The WAnT was done at the end of the session. The players then had 3 h before the afternoon session. During this session, they completed the 30-m sprint followed 15 min later by the RSA.

3.5.3. Horizontal force-velocity profile

To determine the individual F-V of each player, the players ran two 30-m sprints. The method has an “acceptable” intraday and inter-day reliability [intraclass correlation coefficient (ICC) ≥ 0.75 and coefficient of variation (CV) $\leq 10\%$] (14). Before the sprints, the players started in a feet supported crouched position and stood still until instructed to run by the research assistant. They were given 3- to 4-min rest between trials. Instant velocity over the sprinting distance was collected at 46.875 Hz using a Stalker ATS II (Stalker Sport, Richardson, TX, USA). The radar was placed 3 m behind the starting line and 1 m aboveground approximately at the height of the center of mass of the players. Following protocols and guidelines established by Samozino et al. (14), raw velocity data were first imported into *R* studio. Then, data prior to the start and after the maximal velocity plateau were discarded. The remaining data were fitted with a mono-exponential function and mechanical variables were calculated (14, 18). An optimal profile at 10 m (Sf_{vopt}) was computed following proposed methods by Samozino et al. (31). To improve reliability, average values of both trials were used for further analyses (32, 33).

3.5.4. Wingate

To evaluate anaerobic capacity, the WAnT was used. The WAnT is a popular test that measures the power production of a player throughout a 30-s bout. The validity and reliability of the test to evaluate anaerobic capacity of ice hockey players were confirmed (34, 35). The test was completed on an air-braked cycle ergometer (Wattbike PRO/trainer, Nottingham, UK, 2022), which was also validated in a previous study (33). The test started with a 5-min warm up on a cycle ergometer with a resistance of 75 W and a cadence of 85 revolutions per minute (rpm). For the last 6 s of each minute, players were asked to sprint. A 3-min rest period was given before the start of the test. After the WAnT, a 2-min cool down was given. Peak power, relative peak power, average power (e.g., average power exerted during the test), relative average power, anaerobic capacity (e.g., sum of average values recorded in each of six 5-s blocks) and anaerobic fatigue (e.g., drop-off in power from the highest to the lowest 5-s block represented as a percentage) were extracted directly from the Wattbike cycle ergometer console and used for analysis.

3.5.5. Repeated-sprint ability

To evaluate players' anaerobic capacity in a more practical approach, a repeated-sprint anaerobic test with 180° change of direction (RSA) was designed. In practice, the available space was limited and imposed constraints for the chosen test format in line with guidelines by Kyles et al. (25). The players ran 20 m and then changed direction to run back 20 m. The players completed six sprints and had 30 s to complete a sprint and start the next. This procedure was validated previously with cohorts of soccer players (36) and chosen to introduce a change of direction component, which is important for performance in team sports such as ice hockey. Sprint times were collected using Swift (Swift Performance, Northbrook, IL, USA) single-beam laser timing gates placed on the starting line. Players started 30 cm behind the gates. The best time between first two sprints, total time and a fatigue index were used for analysis. The fatigue index was computed following the recommendations of Glaister et al. (37) by using the percentage decrement score [$100 \times (\text{total sprint time} \div \text{ideal sprint time}) - 100$], where the ideal sprint time = number of sprints \times fastest sprint time. The results for two female players and seven male players were excluded from final analysis as they did not perform their best sprint in the first two trials, which could indicate the use of a pacing strategy (24).

3.5.6. Statistical analysis

Descriptive statistics for sprinting F-V, Wingate and RSA are presented in Table 1. Normality assumptions for each variable were confirmed by verifying skewness and kurtosis of each distribution. To compare male and female players, independent Student t-test were computed with Cohen's D to estimate effect sizes. The reliability of F-V mechanical capabilities with adolescent ice hockey players was confirmed by computing intraclass correlation coefficients (ICC) and coefficients of variations (CV) for both trials. All variables had ICC values ≥ 0.90 and CV $\leq 10\%$ (38). To explore relations between the F-V and anaerobic capacity of the players while controlling for sex differences, partial Pearson correlation coefficients for pooled data and Pearson correlation coefficients for individual sex (e.g. men and women) were calculated. As recommended by Hopkins et al. (38), magnitude of Pearson's correlation coefficients (r) was considered trivial ($r < 0.10$), small ($r = 0.10-0.29$), moderate ($r = 0.30-0.49$), large ($r = 0.50-0.69$), very large ($r = 0.70-0.89$), nearly perfect ($r = 0.90-0.99$) and perfect ($r = 1.00$). Statistical analyses were conducted using SPSS version 28.0 (IBM Corporation, Armonk, NY).

Table 2. Male and female descriptive statistics and differences for F-V, WANt and RSA tests.

	Male	Female	p	ES \pm 95%
Position (n)	36	34	n/a	n/a
Age	15.1 \pm 0.2	16.5 \pm 0.7	< .001	-2.93 \pm 0.68
Stature (cm)	177.5 \pm 6.4	167.3 \pm 5.5	<.001	1.71 \pm 0.55
Mass (kg)	70.6 \pm 8.4	65.4 \pm 7.0	.007	0.67 \pm 0.48
F ₀ (N·kg ⁻¹)	7.30 \pm 0.65	6.68 \pm 0.80	<.001	0.85 \pm 0.49
V ₀ (m·s ⁻¹)	8.43 \pm 0.50	7.59 \pm 0.40	<.001	1.83 \pm 0.57
P _{max} (W·kg ⁻¹)	15.36 \pm 1.67	12.69 \pm 1.78	<.001	1.55 \pm 0.54
S _{fv} (N·m·s ⁻¹)	-0.87 \pm 0.09	-0.88 \pm 0.11	.608	0.12 \pm 0.47
S _{fvopt} (N·m·s ⁻¹)	-1.02 \pm 0.04	-0.96 \pm 0.04	<.001	-1.58 \pm 0.53
FV _{imb.} (%)	14.92 \pm 8.40	8.10 \pm 8.92	.002	0.79 \pm 0.49
RF _{max} (%)	42.38 \pm 3.01	39.27 \pm 4.26	<.001	0.85 \pm 0.5
DR _F (%)	-8.15 \pm 0.86	-8.38 \pm 0.96	.279	0.26 \pm 0.47
Peak power (W)	883.69 \pm 119.95	712.50 \pm 90.87	<.001	1.60 \pm 0.54
Relative peak power (W·kg ⁻¹)	8.79 \pm 0.47	6.90 \pm 0.70	<.001	3.17 \pm 0.72
Average power (W)	621.19 \pm 76.45	447.62 \pm 61.67	<.001	2.49 \pm 0.65

Relative average power ($W \cdot kg^{-1}$)	6.20 ± 0.47	4.36 ± 0.64	<.001	3.30 ± 0.73
Anaerobic capacity (W)	3672.61 ± 455.34	2676.29 ± 339.41	<.001	2.47 ± 0.63
Anaerobic fatigue (%)	47.69 ± 6.64	52.38 ± 7.35	.007	0.67 ± 0.48
Total time (s)	45.42 ± 1.40	48.73 ± 1.70	<.001	-2.01 ± 0.61
Best time (s)	7.31 ± 0.24	7.77 ± 0.28	<.001	-1.65 ± 0.58
Percentage decrement score (%)	3.53 ± 1.92	4.50 ± 1.84	.010	-0.68 ± 0.52

3.6. Results

3.6.1. Associations between F-V mechanical capabilities and anaerobic capacities

Partial Pearson's correlation coefficients suggest that F_0 had a small association with relative peak power ($r = .26$, $p = .049$) of the WAnT and was moderately associated with total time ($r = -.32$, $p = .012$) and best time ($r = -.33$, $p = .10$) of the RSA. V_0 and P_{max} were moderately associated with peak power ($r = .43$ and $.35$, $p < .001$ and $p = .006$), relative peak power ($r = .49$ and $.44$, $p < .001$), average power ($r = .30$ et $.30$, $p = .019$ and $.018$) and anaerobic capacity ($r = .37$ and $.32$, $p = .003$ and $.012$) of the WAnT and were largely associated with total time ($r = -.65$ and $-.57$, $p < .001$) and best time ($r = -.70$ and $-.60$, $p < .001$) of the RSA. Rf_{max} was moderately associated with relative peak power ($r = .33$, $p = .011$) of the WAnT and had small associations with total time ($r = -.26$, $p = .049$) and best time ($r = -.27$, $p = .035$) of the RSA. S_{fv} and D_{rf} were not associated with the WAnT or the RSA.

3.6.2. Differences between male and female players

As shown in Table 2, independent Student t-tests demonstrated that male players were taller and heavier and performed better than female players in all variables except for S_{fv} and D_{rf} . F_0 , S_{fv} and Rf_{max} of the male players were not associated with WAnT or RSA variables. V_0 was moderately associated with peak power ($r = .34$, $p = .037$) and relative peak power ($r = .34$, $p = .045$) in the WAnT and was largely associated with total time ($r = -.59$, $p < .001$) and best time ($r = -.64$, $p < .001$) in the RSA. P_{max} was not associated with variables from the WAnT, but was moderately

associated with total time ($r = -.41$, $p = .028$) and largely associated with the best time ($r = -.53$, $p = .003$) in the RSA. D_{rf} was moderately associated with total time ($r = -.39$, $p = .036$) in the RSA.

S_{fv} and D_{rf} of the female players were not associated with WAnT or RSA variables. F_0 was moderately associated with relative peak power ($r = .34$, $p = .047$), relative average power ($r = .34$, $p = .050$) of the WAnT and total time ($r = -.45$, $p = .010$) and best time ($r = -.40$, $p = .022$) of the RSA. V_0 was largely associated to relative peak power ($r = .62$, $p < .001$), moderately associated with peak power ($r = .47$, $p = .005$) and anaerobic capacity ($r = .39$, $p = .022$) of the WAnT, and largely associated with total time ($r = -.75$, $p < .001$) and best time ($r = -.78$, $p < .001$) of the RSA. P_{max} was largely associated with relative peak power ($r = .53$, $p = .001$) and moderately with relative average power ($r = .38$, $p = .026$) of the WAnT and largely associated with total time ($r = -.68$, $p < .001$) and best time ($r = -.66$, $p < .001$) of the RSA. Rf_{max} was moderately associated with relative peak power ($r = .48$, $p = .004$), relative average power ($r = .38$, $p = .025$) of the WAnT and with total time ($r = -.43$, $p = .013$) and best time ($r = -.45$, $p = .011$) of the RSA. Partial correlations and correlations for male and female players for F_0 and V_0 are illustrated in Figures 1 and 2 to express main differences between sexes.

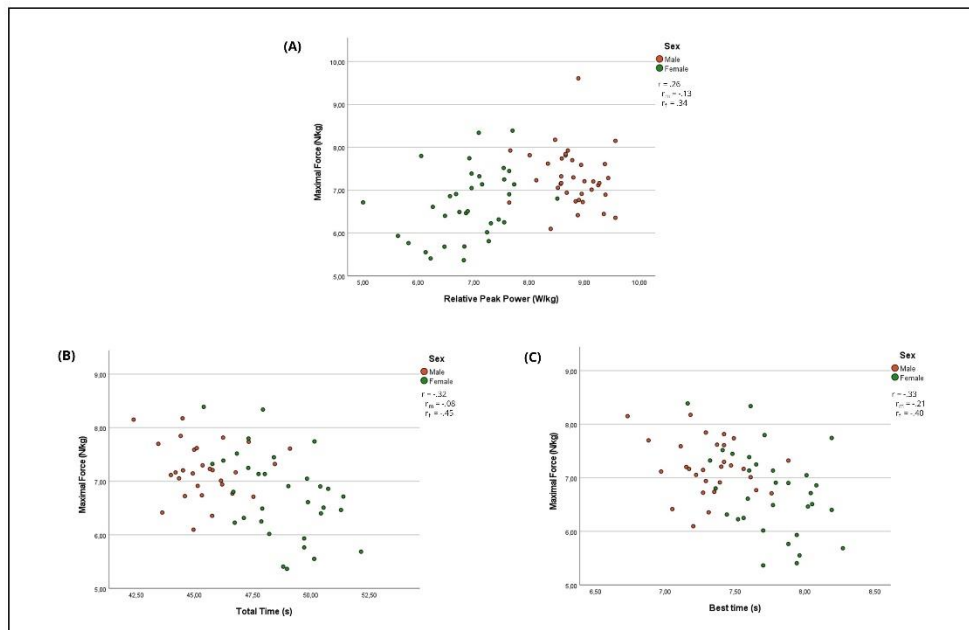


Figure 1. Partial correlation and correlations between maximal theoretical force (F_0) and relative peak power (panel A), total time (panel B) and best time (panel C) for pooled data and male and

female data respectively. r : Partial correlation, r_m : correlation for men, r_f : correlations for women.

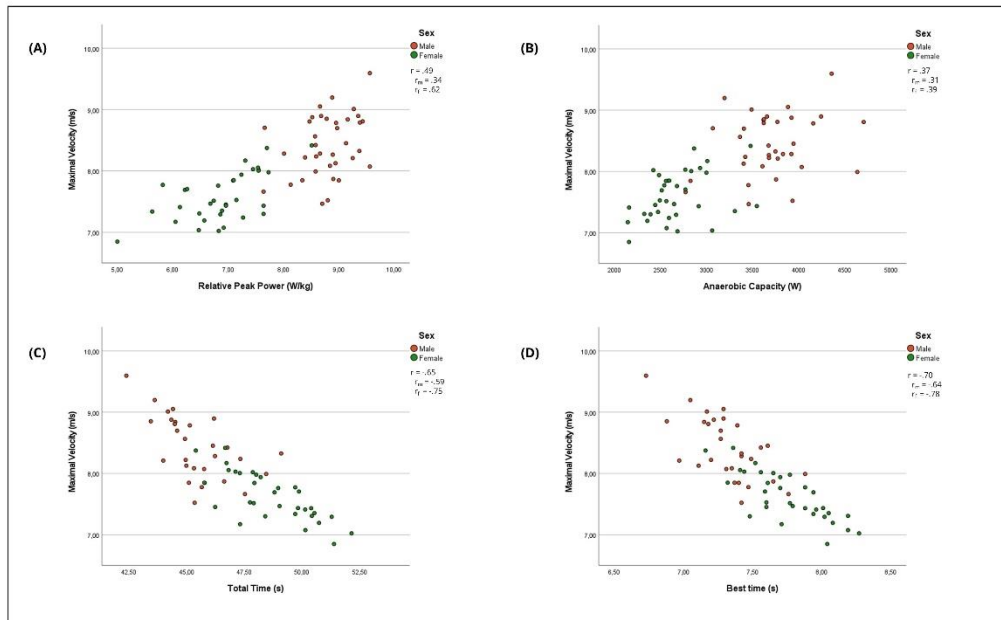


Figure 2. Partial correlation and correlations between maximal theoretical velocity (V_0) and relative peak power (panel A), anaerobic capacity (panel B), total time (panel C) and best time (panel D) for pooled data and male and female data respectively. r : Partial correlation, r_m : correlation for men, r_f : correlations for women.

3.7. Discussion

The relevance of F-V athlete profiling has emerged over the last decade. However, little is known about its associations with physical attributes that require high-intensity efforts, such as anaerobic capacities. Considering the importance of such qualities to excel in ice hockey, a deeper understanding of these associations is helpful for strength and conditioning coaches to optimize performance. This paper was the first to explore the associations between sprinting F-V mechanical capabilities and anaerobic capacities of highly competitive adolescent male and female ice hockey players. The general aim of this study was to widen current knowledge around sprinting F-V and its links with anaerobic capacities measured through common tests. Previous work analysing the sprinting F-V of ice hockey players was fairly limited focusing more on the validity and reliability of the method with a limited number of subpopulations, that is female French senior to junior national team and male players from elite Finnish leagues (16-19). The first objective of this study was to explore how the mechanical capabilities of sprinting F-V were

related to variables from common anaerobic tests such as the Wingate and repeated-sprint test. To provide a complete observation of these associations, three main hypotheses were proposed. The first hypothesis was that P_{max} would show the strongest associations with the different variables of both anaerobic tests, V_0 would show stronger associations with the cycling test and F_0 would show stronger associations with the repeated-sprints ability. When considering results for pooled data, P_{max} was associated to anaerobic power and anaerobic capacity in both tests yet appear stronger for the running test (moderate associations for peak power, relative peak power and average power in the WAnT vs. large associations for total time and best time in the RSA). Unlike initially hypothesized, V_0 showed the strongest associations with performance in both tests, correlating largely with the RSA and moderately with the WAnT. In contrast, F_0 showed few associations to the Wingate with a small association to relative peak power and moderate associations with the RSA. The initial hypothesis was based on the proposed interpretations of Morin and Samozino's (15) and only focused on an analysis of the tasks used in this study. However, these interpretations were majorly based on the observations with elite-level athletes. The different playing level and ages of participants from this study probably influenced the associations observed in this study.

The second objective of this study was to explore differences between male and female players. The hypothesis was that F_0 would exhibit stronger associations with performance in female athletes as they tend to have more force-oriented F-V profiles (27, 28). Our results confirmed this hypothesis as associations between F_0 and performance in both anaerobic tests were only present for the female players (see Figures 1, 2). The cycling performance and repeated-sprint performance of male players in this study was mainly determined by V_0 . Given their young age, F_0 may not have been fully developed at the moment of testing (22) and could explain the observed differences with female players. Previous work by Perez et al (16) highlighted the absence of associations between the actual F-V and performance of an athlete as observed in this study. To our knowledge, this study was the first to include the computation of S_{fvopt} and FV_{imb} in the evaluation of the sprinting F-V with ice hockey players. Looking at Figure 3, both groups show a force deficit which may explain the large associations between V_0 and RSA performance. The appearance of associations with F_0 for female players could be attributed to

the portion of players with a velocity deficit (bottom quartile of female box plot). Nonetheless, practitioners training sprint ability and anaerobic capacities concurrently should choose training methods according to sex of players. Highly trained female players may benefit from methods including explosive exercises at low and high velocities while highly trained male players in the age range of this study could focus more on developing maximal velocity. Jiménez-Reyes et al. (12) categorized exercises according to desired training focus for enhanced jumping performance. Similarly, practitioners could use resisted sprints for an emphasis on low velocities (5) and flying sprints to train at higher velocities to enhance sprint performance.

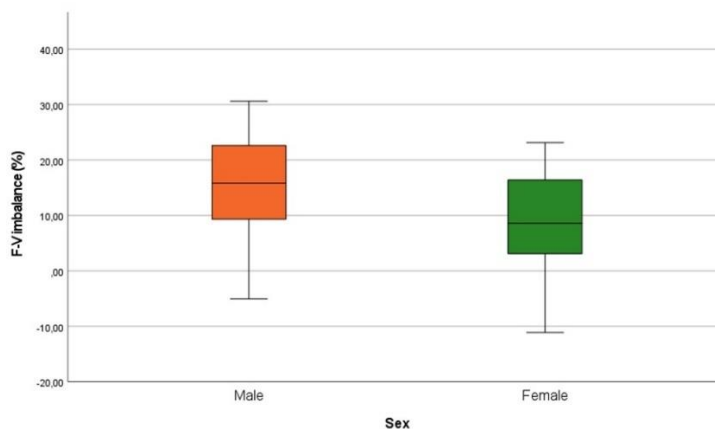


Figure 3. Box plot of F-V imbalances for male and female players.

Although this study adds to available knowledge regarding sprinting F-V profiling in ice hockey, certain limitations persist. First, while the reliability of the computation method by Samozino et al. (14) has been reported with youth athletes (22), no validation of the method has been published. The sprinting mechanics of teenage ice hockey players are different from elite adult sprinters. However, participants in this study have exhibited lower mechanical characteristics than higher-level athletes in previous studies (17-19). Given velocity follows the same mono-exponential function in youth (22) and aerodynamics included in the method adjust to the stature and mass of each individual (14), there are few reasons that the method should not be valid with this study population. Second, the observational design of this study does not confirm the causal effects of the different sprinting F-V variables on anaerobic performance. The

type and strength of associations could be explained by the theoretical basis presented by Morin and Samozino (15) and previous observations. However, further research should focus on interventions demonstrating the advantages of individualized training based on the F-V as this would yield the best practical applications (12, 39). Third, this study only considered off-ice data that were collected during off-season. Prediction of skating abilities from off-ice activities or the transfer of such activities to skating performance and anaerobic capacities on the ice remain unclear. For example, Perez et al. (16) demonstrated that sprinting and skating F-V were not correlated. Ultimately, the goal of ice hockey training is to maximise performance on the ice. In this regard, developing research designs that allow the evaluation of the transferability of off-ice attributes to on-ice performance is a key concern for stakeholders overseeing the development of highly competitive ice hockey players. Comparing the skating F-V and anaerobic capacities of players on the ice would allow for a better understanding of determinant indicators in ice hockey and designing efficient training programs.

3.8. Conclusion

This research provides a deeper understanding of underlying associations between the sprinting F-V and anaerobic capacities of highly trained adolescent male and female ice hockey players. Pooled data demonstrated that the ability to apply force at low and high velocities is determinant for anaerobic performance on a cycle ergometer and repeated-sprint ability including changes of direction. A separate analysis of male and female players demonstrated that determinant mechanical capabilities of sprinting vary according to sex. Specifically, cycling and repeated-sprint performance of younger male players could be mainly determined by the ability to apply force at high velocities, whereas the ability to generate force at slow speeds may be of added importance for female players. Practitioners must understand that determinant mechanical capabilities of sprinting for anaerobic performance may be different for male and female athletes and training priorities may change accordingly.

3.9. Statements and declarations

Conflict of Interest

Authors declare no conflict of interest with this research. This research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Funding

This project received funding. JL received a governmental grant from Ministère de l'Éducation du Québec [Initiative Projets Synergiques]. The project was also funded by the MITACS-Elevation (IT31707) between 2021 and 2023.

Acknowledgements

Authors wish to thank the players who participated in this study and the staff of Hockey Quebec for their collaboration during the planning and execution of testing.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

References

1. Brocherie F, Girard O, Millet GP. Updated Analysis of Changes in Locomotor Activities across Periods in an International Ice Hockey Game. *Biology of Sport* (2018) 35(3):261-7.
2. 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. *Journal of Strength and Conditioning Research* (2022) 36(7):1978-83.
3. Haukali E, Tjelta LI. Relationship between Off-Season Changes in Power and in-Season Changes in Skating Speed in Young Ice Hockey Players. *International Journal of Applied Sports Sciences* (2016) 28(2).
4. Burr JF, Jamnik RK, Baker J, Macpherson A, Gledhill N, McGuire E. Relationship of Physical Fitness Test Results and Hockey Playing Potential in Elite-Level Ice Hockey Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2008) 22(5):1535-43.
5. Matthews MJ, Comfort P, Crebin R. Complex Training in Ice Hockey: The Effects of a Heavy Resisted Sprint on Subsequent Ice-Hockey Sprint Performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2010) 24(11):2883-7.
6. Dæhlin TE, Haugen OC, Haugerud S, Hollan I, Raastad T, Rønnestad BR. Improvement of Ice Hockey Players' on-Ice Sprint with Combined Plyometric and Strength Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance* (2017) 12(7):893-900.
7. Lagrange S, Ferland P-M, Leone M, Comtois AS. ContrAS Training Generates Post-Activation Potentiation and Improves Repeated-sprint Ability in Elite Ice Hockey Players. *International Journal of Exercise Science* (2020) 13(6):183.
8. Naimo M, De Souza E, Wilson J, Carpenter A, Gilchrist P, Lowery R, et al. High-Intensity Interval Training Has Positive Effects on Performance in Ice Hockey Players. *International Journal of Sports Medicine* (2015) 36(01):61-6.

9. Brocherie, F., Perez, J., Guilhem, G. Effects of a 14-Day High-Intensity Shock Microcycle in High-Level Ice Hockey Players' Fitness. *Journal of Strength and Conditioning Research* (2022) 36(8):2247-2252.
10. Rønnestad BR, Øfsteng SJ, Ellefsen S. Block Periodization of Strength and Endurance Training Is Superior to Traditional Periodization in Ice Hockey Players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* (2019) 29(2):180-8.
11. Wilson JM, Marin PJ, Rhea MR, Wilson SM, Loenneke JP, Anderson JC. Concurrent Training: A Meta-Analysis Examining Interference of Aerobic and Resistance Exercises. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2012) 26(8):2293-307.
12. Jiménez-Reyes P, Samozino P, Brughelli M, Morin J-B. Effectiveness of an Individualized Training Based on Force-Velocity Profiling During Jumping. *Frontiers in Physiology* (2017) 7:677.
13. Lahti J, Jiménez-Reyes P, Cross MR, Samozino P, Chassaing P, Simond-Cote B, et al. Individual Sprint Force-Velocity Profile Adaptations to in-Season Assisted and Resisted Velocity-Based Training in Professional Rugby. *Sports* (2020) 8(5):74.
14. Samozino P, Rabita G, Dorel S, Slawinski J, Peyrot N, Saez de Villarreal E, et al. A Simple Method for Measuring Power, Force, Velocity Properties, and Mechanical Effectiveness in Sprint Running. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* (2016) 26(6):648-58.
15. Morin J-B, Samozino P. Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance* (2016) 11(2):267-72.
16. Perez J, Guilhem G, Hager R, Brocherie F. 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* (2021) 21(2):192-203.
17. Perez J, Guilhem G, Brocherie F. Ice Hockey Forward Skating Force-Velocity Profiling Using Single Unloaded Vs. Multiple Loaded Methods. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2022) 36(11):3229-33.

18. Perez J, Guilhem G, Brocherie F. Reliability of the Force-Velocity-Power Variables During Ice Hockey Sprint Acceleration. *Sports Biomechanics* (2019):1-15.
19. Stenroth L, Vartiainen P, Karjalainen PA. Force-Velocity Profiling in Ice Hockey Skating: Reliability and Validity of a Simple, Low-Cost Field Method. *Sports Biomechanics* (2020):1-16.
20. Leiter, J. R., Cordingley, D. M., MacDonald, P. B. Development of anaerobic fitness in top-level competitive youth ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2018) 32(9):2612-2615.
21. Cordingley, D. M., Sirant, L., MacDonald, P. B., Leiter, J. R. Three-year longitudinal fitness tracking in top-level competitive youth ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2019) 33(11):2909-2912.
22. Fernández-Galván, L. M., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., Casado, A. Sprint performance and mechanical force-velocity profile among different maturational stages in young soccer players. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (2022) 19(3):1412.
23. Jiménez-Reyes, P., Cross, M., Ross, A., Samozino, P., Brughelli, M., Gill, N., & Morin, J. B. Changes in mechanical properties of sprinting during repeated sprint in elite rugby sevens athletes. *European Journal of Sport Science* (2019) 19(5):585-594.
24. Hermosilla-Palma, F., Loro-Ferrer, J. F., Merino-Muñoz, P., Gómez-Álvarez, N., Bustamante-Garrido, A., Cerda-Kohler, H., ... Aedo-Muñoz, E. Changes in the mechanical properties of the horizontal force-velocity profile during a repeated sprint test in professional soccer players. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (2022) 20(1):704.
25. Kyles, A., Oliver, J. L., Cahill, M. J., Lloyd, R. S., Pedley, J. Linear and Change of Direction Repeated Sprint Ability Tests: A Systematic Review. *Journal of Strength & Conditioning Research* (2023) 37(8):1703-1717.

26. Nightingale, S. C., Miller, S., Turner, A. The usefulness and reliability of fitness testing protocols for ice hockey players: A literature review. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2013) 27(6):1742-1748.
27. Devismes M, Aeles J, Philips J, Vanwanseele B. Sprint force-velocity profiles in soccer players: impact of sex and playing level. *Sports biomechanics* (2021) 20(8):947-957.
28. Haugen T A, Breitschädel F, Seiler S. Sprint mechanical properties in soccer players according to playing standard, position, age and sex. *Journal of Sports Sciences* (2020) 38(9):1070-1076.
29. Marcotte-L'Heureux V, Charron J, Panenic R, Comtois AS. Ice Hockey Goaltender Physiology Profile and Physical Testing: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Exercise Science* (2021) 14(6):855.
30. McKay A K, Stellingwerff T, Smith E S, Martin D T, Mujika I, Goosey-Tolfrey V L, ... Burke L M. Defining training and performance caliber: a participant classification framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance* (2021) 17(2):317-331.
31. Samozino P, Peyrot N, Edouard P, Nagahara R, Jimenez-Reyes P, Vanwanseele B, Morin J B. Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* (2022) 32(3):559-575.
32. Simperingham KD, Cronin JB, Pearson SN, Ross A. Reliability of Horizontal Force–Velocity–Power Profiling During Short Sprint-Running Accelerations Using Radar Technology. *Sports Biomechanics* (2019) 18(1):88-99.
33. Edwards T, Banyard HG, Piggott B, Haff GG, Joyce C. Reliability and Minimal Detectable Change of Sprint Times and Force-Velocity-Power Characteristics. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2022) 36(1):268-72.
34. Bringhurst RF, Wagner DR, Schwartz S. Wingate Anaerobic Test Reliability on the Velotron with Ice Hockey Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2020) 34(6):1716-22.

35. Driller MW, Argus CK, Shing CM. The Reliability of a 30-S Sprint Test on the Wattbike Cycle Ergometer. *International Journal of Sports Physiology and Performance* (2013) 8(4):379-83.
36. Charron, J., Garcia, J. E. V., Roy, P., Ferland, P. M., & Comtois, A. S. Physiological Responses to Repeated Running Sprint Ability Tests: A Systematic Review. *International Journal of Exercise Science* (2020) 13(4):1190.
37. Glaister M, Howatson G, Pattison JR, McInnes G. The Reliability and Validity of Fatigue Measures During Multiple-Sprint Work: An Issue Revisited. *The Journal of Strength & Conditioning Research* (2008) 22(5):1597-601.
38. Hopkins W, Marshall S, Batterham A, and Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medecine & Science in Sports Exercise* (2009) 41: 3
39. Baena-Raya A, García-Mateo P, García-Ramos A, Rodríguez-Pérez MA, Soriano-Maldonado A. Delineating the Potential of the Vertical and Horizontal Force-Velocity Profile for Optimizing Sport Performance: A Systematic Review. *Journal of Sports Sciences* (2022) 40(3): 331-334.

Chapitre 4 – Associations entre la puissance des membres inférieurs, la vitesse de sprint et l’agilité mesurées à l’extérieur de la glace et les variables du profil force-vitesse en patinage.

4.1. Apport original de l’étudiant et contribution des co-auteurs

Ce quatrième chapitre de thèse présente le deuxième article publié intitulé : *Associations between skating mechanical capabilities and off-ice physical abilities of highly trained teenage ice hockey players*. Cet article, coécrit par Julien Glaude-Roy, Julien Ducas, Jean-François Brunelle et Jean Lemoyne est paru en 2024 dans le *European Journal of Sport Science*.

Glaude-Roy, J., Ducas, J., Brunelle, J. F., & Lemoyne, J. (2024). Associations between skating mechanical capabilities and off-ice physical abilities of highly trained teenage ice hockey players. *European Journal of Sport Science*, 24(10), 1414-1422.

4.2. Résumé en français

Cette étude examine les associations entre les caractéristiques de force et de vitesse du patinage avant et les habiletés hors glace de sprint, d'agilité et de la puissance des jambes de joueurs de hockey adolescents hautement entraînés. Les joueurs participants aux camps d'évaluations hors saison d'Équipe Québec ont été invités à participer à cette étude. L'échantillon final comprend 107 joueurs/joueuses hautement entraînés (hommes : $n= 38$; $13,83 \pm 0,38$ ans; femmes : $n= 69$; $14,75 \pm 0,90$ ans). Les profils individuels de force-vitesse (F-V) ont été déterminés grâce à un test de patinage vers l'avant de 44 mètres. La vitesse de sprint, l'agilité et la puissance ont été mesurés en utilisant : un test de sprint de 30m, le test de changement de direction 5-10-5 et un saut en longueur (SL). Les associations entre les variables du F-V et les tests hors glace ont été analysées grâce à des analyses corrélationnelles et une analyse multivariée de covariance (MANCOVA). Les résultats pour l'ensemble des données indiquent que les trois tests hors glace avaient des associations modérées avec F_0 et V_0 et large avec P_{\max} . Les associations avec $R_{f_{\max}}$, D_{rf} et S_{fv} étaient modérées à faible. F_0 avait des associations plus fortes avec la performance hors glace des femmes alors que V_0 était plus important chez les hommes. La MANCOVA a permis d'identifier le 5-10-5 comme meilleur prédicteur de F_0 alors que le résultat au sprint de 30m était un meilleur prédicteur de V_0 . Afin de maximiser le développement des habiletés mécaniques de patinage, les intervenants sont encouragés à se concentrer sur une préparation physique générale avec des joueurs de hockey adolescents hautement entraînés. La priorisation d'exercices qui misent sur les changements de direction ou l'accélération et la vitesse ligne droite devrait avoir des effets distincts sur F_0 et V_0 sur la glace.

Mots clés : profil force-vitesse, puissance, agilité, vitesse, sprint

Faits saillants :

- Une bonne préparation physique générale est importante pour des joueurs de hockey adolescents hautement entraînés puisque la vitesse maximale de sprint, l'habiletés à changer de direction et la puissance des jambes dans le plan horizontal sont fortement associés aux habiletés mécaniques du patinage avant.

- L'habileté à changer de direction tends à être associée avec l'habileté à générer de la force à basses vitesse sur la glace (F_0) alors que la vitesse maximale de sprint tend à être associée avec l'habileté à générer de la force à haute vitesse (V_0).
- Les habiletés hors glace sont associées plus fortement à l'habileté à générer de la force à basse vitesse (F_0) chez les joueuses de hockey adolescentes hautement entraînées que chez les joueurs de hockey adolescents hautement entraînés.

4.3. Abstract

This study examines the associations between force and velocity characteristics of forward skating and off-ice speed, agility, and power of highly trained teenage ice hockey players. Players attending the Quebec ice hockey federation's off-season evaluation camp were invited to participate in this study. Final sample consists of 107 highly trained teenage ice hockey players (Males: $n = 38$; 13.83 ± 0.38 years; Females: $n = 69$; 14.75 ± 0.90 years). Individual force–velocity profiles (F–V) were determined during a 44 m skating sprint. Off-ice speed, agility, and power were measured using 30 m sprint, 5-10-5 agility, and standing long jump. Associations between F–V mechanical capabilities and off-ice indicators were analyzed with correlational analyses and multivariate analysis of covariance (MANCOVA). Results of pooled data indicate that the three off-ice measures had moderate associations with F_0 and V_0 and large associations with P_{max} . Associations with $R_{f_{max}}$, D_{rf} , and S_{fv} were moderate to small. F_0 had stronger associations with off-ice performance in female players while V_0 was more important with male players. MANCOVA identified 5-10-5 times as the better predictor for F_0 while 30 m sprints times better predicted V_0 . To maximize physical attributes of skating ability, practitioners are encouraged to focus on a general physical preparation for highly trained teenage players. Prioritizing types of exercises that use change of direction or acceleration, and linear speed should have distinct effects on F_0 and V_0 on the ice.

Key words: force-velocity profile, power, agility, speed, sprinting

Highlights:

- A good general physical preparation is important for highly trained teenage ice hockey players as maximal running speed, change of direction ability and leg power in the horizontal plane are largely associated with mechanical capabilities during maximal skating performance.
- Change of direction ability tends to be associated with the ability to generate force at low velocities on the ice (F_0) while maximal running speed tends to be associated with the ability to generate force at high velocities on the ice (V_0).

- Off-ice abilities are more strongly associated to the ability to generate force at low velocities on the ice (F_0) in highly trained female players than in highly trained male players.

4.4. Introduction

Ice hockey is a team sport with intermittent bouts of high-intensity efforts interspersed with relatively short periods of recovery (Douglas & Kennedy, 2020). On average, players perform approximately 18 high-intensity activities per period including forward and backward sprints counting for roughly 20% of effective playing time (Brocherie et al., 2018). During off-season, strength and conditioning coaches devote substantial efforts to integrate approaches designed to improve acceleration, power and speed. With young ice hockey players, doing so appears to be associated with skating speed in the upcoming season (Haukali, 2016). Despite the multiple approaches (traditional training, contrast approaches, plyometrics, etc.) designed to improve players' functional performance, for a single training method or a specific physical quality, each individual's adaptation process is unique (Donskov, 2016). In line with this assumption, Jiménez-Reyes et al. (2017) recently proposed an original methodology for individualized strength and power training programs using athlete's force-velocity profile (F-V). According to these authors, F-V offers a practical and effective way to individualize training programs based on athletes' individual profiles by reinforcing qualities identified as “deficient” during the assessment.

In its initial stage of development, the sprinting F-V was validated using specialized treadmills and tracks with embedded force plates demonstrating that velocity of the center of mass as a function of time follows a mono-exponential function during maximal sprints (Morin et al., 2012; Rabita et al., 2015). Subsequently, simple practical field methods using split times or instant velocity were validated to accommodate practitioners in their purpose to optimize training programs (Samozino et al., 2016). F-V variables include maximal theoretical force relative to body mass (F_0), maximal theoretical velocity (V_0), maximal theoretical power relative to body mass (P_{max}), force velocity slope (S_{fv}), the ratio of the horizontal component of the resultant ground reaction force (RF_{max}) and rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force (D_{rf}) (see Table 1 for detailed definitions of mechanical variables and Perez et al. (2019) for detailed equations). Computed variables are then used to determine if athletes are more “force deficient” or “velocity deficient”.

Table 1. - Definitions of force-velocity mechanical variables

Variable	Definition	Units
F_0	Maximal theoretical horizontal force relative to body mass	$N \cdot kg^{-1}$
V_0	Maximal theoretical horizontal velocity	$m \cdot s^{-1}$
P_{max}	Maximal theoretical horizontal power relative to body mass	$W \cdot kg^{-1}$
D_{rf}	Rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force to the corresponding resultant force	%
Rf_{max}	Maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force to the corresponding resultant force	%
S_{FV}	Slope of the force-velocity relationship applied to the centre of mass	$N \cdot m \cdot s^{-1}$

Alternative methods such as 3D kinematics, 3D accelerometry or insole dynamics were also used to analyze ice hockey acceleration and skating speed and identify players strengths and deficiencies (Buckeridge, 2015; Budarick et al., 2020; Mazurek et al., 2023). These methods allowed for reliable and precise biomechanical analysis on the ice of forward skating. For example, collection of data allowed for the observation of differences in joint angles and muscle activation from a “running” phase corresponding to the first three steps and “gliding” phase at the sixth step (Budarick et al., 2020). Yet, they generally require expensive equipment or long set up times which may not be adequate in applied settings. In comparison, the approach developed by Samozino et al. (2016) has been shown to be reliable on the ice (Perez et al., 2019) and allows for the assessment of force and velocity characteristics on the ice. Considering the importance of strength and speed in ice hockey, this avenue can potentially lead to interesting developments to enhance skating performance.

In 2016, Morin and Samozino published guidelines to help practitioners with the interpretation of F-V mechanical variables. They suggested that in relation with athletes’ sprinting performance, short accelerations (< 20 m) are associated with higher values of F_0 and Rf_{max} while longer distances are associated to V_0 and D_{rf} (> 30 m). Recent research with other team sports are congruent with the proposed model. For example, Baena-Raya et al. (2021) explored associations

with change of direction ability demonstrating the stronger associations between 505 change of direction performance and F_0 . In a study with rugby athletes, assisted and resisted sprint training had opposite effects on the F-V with the magnitude of effects influenced by the initial F-V and assisted sprints correlating with V_0 (Lahti et al., 2020).

Research oriented towards ice hockey players' F-V using Samozino et al.'s (2016) methodology is fairly scarce with, to our knowledge, very few published articles (e.g., < 10). A majority of studies including this method established the reliability of various field methods including radars (Perez et al., 2019), multiple loaded methods (Perez et al., 2022) and a combination of split times and high-speed video cameras (Stenroth et al., 2020). Perez et al. (2019) led the work specific to ice-hockey demonstrating that skating velocity follows the same mono-exponential function as observed during running. Later, Perez et al. (2021) demonstrated the limited associations between skating and off-ice F-V which give distinct information on a player's mechanical abilities. These results provide limited guidelines to practitioners eager to prescribe and individualize training during off-season in order to maximize muscular components of skating performance. In fact, a better understanding of the associations from a more global or general perspective (e.g., off-ice) to sport-specific actions (e.g., on-ice sprints) is crucial in terms of optimizing performance in competitive ice hockey (Novák et al., 2019; Secomb et al. 2021)

When considering off-ice protocols or exercises possibly associated with on-ice performance, standing long jump, vertical jump, ≈ 36 m sprints, change of direction ability and maximal squats are the most frequently cited examples (Delisle-Houde et al., 2019; Henriksson et al., 2016; Janot et al., 2015; Novák et al., 2019). As mentioned, the associations between these tests and mechanical properties of forward skating have not been explored. Thus, this study aims to explore the associations between force and velocity characteristics of skating and off-ice speed, agility and leg power of highly trained teenage ice hockey players. Previous observations in sprinting demonstrated that female athletes tend to have more "force-oriented" profile than males (Devismes et al., 2021; Haugen, Breitschädel & Seiler, 2020). Hence, to take a deeper look in the associations between off-ice performance and skating force and velocity characteristics a second aim of this study is to explore the influence of biological sex in observed associations.

Identifying relationships between these variables should help practitioners target specific exercises in training and maximize desired changes to individual players' skating F-V.

4.5. Materials and methods

4.5.1. Context and participants

Each year, the province of Quebec' ice hockey federation (Canada) chooses the province's most promising male and female hockey players through a rigorous evaluation process based on their performance during regular season. These players are invited to an off-season (summer) development camp, where the best players are selected to compete at the national level. Despite the potential impact of physical deconditioning that tends to occur among competitive hockey players (Chiarlitti et al., 2021; Delisle-Houde et al., 2019), testing these players off-season was the most appropriate scenario for assessing athletes' abilities. Data was collected from a full testing protocol designed to identify players part of the selection process for males under 15 years old (U15) and females under 17 years old (U17). These players were classified as highly trained teenage athletes because of their high training loads and competition at the national level (McKay et al., 2021). A total of 199 players (86 males, 113 females) were invited to both camps. Goaltenders ($n = 18$; 50 % boys) were excluded from the study because of the unique nature of their position (Marcotte-L'Heureux et al., 2021). Injured players were also excluded from analysis given they could not complete all the sprint, agility or jumping tests. Incomplete data sets were also excluded from analysis (technical problems occurred with radar testing during data collection), which resulted in a final sample of 107 participants (38 males 13.83 ± 0.38 years, 69 females 14.75 ± 0.90 years). The project was approved by the ethics board of the researchers' institution (CER-21-278-07.29). Article 21 of the civil code of the province of Quebec stipulates: "Consent to research that could interfere with the integrity of a minor may be given by the person having parental authority or the tutor. A minor 14 years of age or over, however, may give consent alone if, in the opinion of the competent research ethics committee, the research involves only minimal risk and the circumstances justify it." Therefore, parents and players were informed of the research project and only written consent from the players was obtained. Written consent of parents for 11 players who were under 14 years of age was obtained.

4.5.2. Study design

In both development camps, the protocol consisted of off-ice fitness tests (n=6) and on-ice tests (n=2). The full testing protocol, which included tests measuring speed, agility, leg power, upper-body strength and power, cardiovascular endurance, mobility and anthropometric values (detailed description is available in: Lemoyne et al., 2022). Tests performed included a 30-m sprint test, the 5-10-5 shuttle run, counter-movement jump, standing long jump (SLJ), grip strength, the 20-m shuttle run and the Y-balance test. Sub-groups of 24 players were given 60 minutes to complete the tests in random order with the exception of the 20 m shuttle run, which had to be completed all at once in an additional 30-min period after the other tests. On-ice tests measured linear speed and agility. The 45-min session, started with an 8-min general warmup, followed by short skating accelerations. Then player completed the 44.8m maximal skating test first followed by an agility test. Assessments were conducted on two separate days (day-1= on-ice; day-2= off-ice). Only data for the skating F-V and 30-m sprint, 5-10-5 shuttle run and SLJ are provided in this article. Players' characteristics (anthropometric measures, age and biological sex) are presented in Table 2.

Table 2. Male and female descriptive statistics for skating force-velocity mechanical variables and performance indicators.

	Females				Males			
	Min	Max	Mean	SD	Min	Max	Mean	SD
Mass (kg)	45.00	86.50	62.02	8.74	46.60	80.70	63.08	7.97
Stature (cm)	145.00	178.00	164.84	5.89	157.50	185.00	171.23	7.10
F ₀ (N/kg)	3.01	5.00	3.79	0.35	3.87	5.73	4.65	0.41
V ₀ (m/s)	8.00	9.92	9.08	0.38	8.56	10.87	9.83	0.46
P _{max} (W/kg)	6.98	11.52	8.60	0.90	8.60	13.87	11.43	1.12
Rf _{max} (%)	18.93	36.76	27.62	3.06	25.70	39.46	33.40	3.29
D _{rf} (%)	-5.18	-3.22	-4.09	0.39	-5.61	-3.83	-4.56	0.43
S _{fv} (%)	-54.27	-32.44	-41.89	4.14	-59.25	-39.65	-47.48	4.79
30m sprint (s)	4.68	5.60	5.13	0.20	4.45	5.26	4.79	0.21
5-10-5 (s)	5.10	6.26	5.73	0.23	5.02	5.75	5.33	0.16
SLJ (cm)	160.00	224.00	193.93	15.81	194.00	258.00	226.45	14.72

SD: standard deviation, SLJ: Standing long jump

4.5.3. Skating force-velocity profile

Skating performance was assessed over a 44.8 m to allow players to reach maximal velocity (Stastny et al., 2023). To determine the skating F-V of each player, instant velocity was collected following the guidelines of Perez, Guilhem and Brocherie (Perez et al., 2019). The method shows “acceptable” inter-trial and test-retest reliability ($ICC \geq 0.75$ and coefficient of variation [CV] $\leq 10\%$) (Perez et al., 2019). Before each sprint, players were instructed to render maximal effort over the entire distance. They started in a crouched position while waiting for the evaluator’s signal to start. Each player had two trials to register their fastest sprint. Instant velocity and was

collected at 46.875 Hz using a Stalker Pro Radar II (Stalker Sport, Richardson, TX, USA). The radar was placed 3 m behind the starting line and 1 m above ground approximately at the height of players' center of mass. Mechanical capabilities were computed using a custom R script. For each trial, raw data were imported in R studio. Then, data prior to the start and after the maximal velocity plateau were discarded. Remaining data was fitted with a mono-exponential function and mechanical variables were calculated (Perez et al., 2019; Samozino et al., 2016). To improve reliability of F-V variables, the average value of both trials was used for analysis (Edwards et al., 2022; Perez et al., 2019; Simperingham et al., 2019).

4.5.4. Off-ice speed, agility and leg power

Sprints, change of direction ability and standing long jumps were tests chosen for the talent identification process as that are commonly associated with skating performance (Delisle-Houde et al., 2019; Henriksson et al., 2016; Janot et al., 2015; Novák et al., 2019). Off-ice linear speed was assessed with a 30-m sprint. Times were collected using Swift Speedlight photocells single beam laser timing gates placed on the start and finish lines (Swift Performance, Northbrook, IL, USA). Players adopted a standing stance inside the first gate and were instructed to give a maximal effort. The "steady" feature used was used to trigger the timing gates. This feature starts the timer when the players exits the laser beam. Players had two trials with three minutes rest between trials. Only the fastest sprint was used for analysis.

To assess off-ice agility, players ran a 5-10-5 shuttle utilizing the same timing gate system employed for the 30-m sprints. Three lines were positioned 5 m apart. Players initiated the run from the center line with one hand touching the ground. The run times were captured through a singular Swift timing gate positioned above the center line, incorporating the "steady" feature to initiate the timing gate. Upon instruction from the evaluator, participants 1- ran to one side, 2- touched the line with their hand, 3- ran to the opposite side, 4- touched the line with their hand and 5- ran back passed the center line as fast as possible. Each player had a single attempt on both sides, with only the fastest time retained for analysis (Lam et al., 2018).

Leg power in the horizontal plane was assessed with three SLJs. Players stood in a static position with both feet behind the take-off line. Using a countermovement and double-arm swing

they had to jump as far as possible landing without moving their feet or losing balance. Performance was the distance between the take-off line and closest heel. The longest jump was used for analysis.

4.5.5. Statistical analyses

Players' characteristics (age, mass and stature) and variables from skating F-V (F_0 , V_0 , P_{max} , Rf_{max} , D_{rf} and S_{fv}) and off-ice tests were processed using SPSS Statistics 28.0. Normality of distribution for each variable was confirmed by verifying skewness and kurtosis (values < 1 and < 2 respectively). Preliminary analyses revealed no violation of normality for each distribution. Descriptive statistics were computed to verify baseline measures. Reliability of F-V mechanical capabilities with adolescent ice hockey players was confirmed by computing intraclass correlation coefficients (ICC) and coefficients of variations (CV) for both trials. All variables had ICC values $\geq .90$ and $CV \leq 10\%$. Partial Pearson's correlation coefficients were calculated to explore the relations between players' skating F-V and off-ice performance while controlling for biological sex in order to account for differences between male and female players. Pearson's correlation coefficients were computed for male and female players in order to compare the differences in sexes. In order to verify the contribution of each off-ice tests as predictors of skating force and velocity characteristics, multivariate analysis of variance (MANCOVA) was conducted. F_0 and V_0 were introduced simultaneously as dependent variables, as they represent estimations of different parts of maximal skating ability (e.g., acceleration and maximal velocity). The three off-ice tests (e.g., SLJ, 30 m sprint time, 5-10-5 time) were set as covariables (Aliberti, D'Elia & Cherubini, 2023). Preliminary analyses demonstrated equal covariances matrices (Box's $M = 3.960$, $p = 0.276$) and equality of error variances for both dependent variables (Levene's test: $FF_0(1,105) = 3.184$, $p = 0.077$; $FV_0(1,105) = 1.066$, $p = 0.304$). As recommended by Hopkins, Marshall, Batterham and Hanin (2009), the magnitude of effect sizes was considered trivial ($r < 0.10$), small ($r = 0.10-0.29$), moderate ($r = 0.30-0.49$), large ($r = 0.50-0.69$), very large ($r = 0.70-0.89$), nearly perfect ($r = 0.90-0.99$) and perfect ($r = 1.00$).

4.6. Results

Descriptive statistics for male and female players are presented in table 2. Associations between off-ice variables and F_0 for pooled, female and male data are presented in Figure 1 and Figure 2 for V_0 . Pooled 30-m sprint times were moderately associated with F_0 ($r = -.39$, $p < .001$) and V_0 ($r = -.43$, $p < .001$), largely associated with P_{\max} ($r = -.53$, $p < .001$) and had a small association with Rf_{\max} ($r = -.25$, $p = .01$). The 5-10-5 times were moderately associated with F_0 ($r = -.39$, $p < .001$), V_0 ($r = -.33$, $p < .001$) and P_{\max} ($r = -.49$, $p < .001$) and had small, associations with S_{fv} ($r = .20$, $p = .038$) and Rf_{\max} ($r = -.24$, $p = .014$). SLJ was moderately associated with F_0 ($r = .42$, $p < .001$) and V_0 ($r = .39$, $p < .001$), largely associated with P_{\max} ($r = .54$, $p < .001$) and had small associations with S_{fv} ($r = -.21$, $p = .035$) and Rf_{\max} ($r = .28$, $p = .004$). None of the off-ice variables were significantly associated with D_{rf} .

Females' 30-m sprint time was largely associated with F_0 ($r = -.50$, $p < .001$) and P_{\max} ($r = -.52$, $p < .001$) and moderately associated with S_{fv} ($r = .37$, $p = .002$), Rf_{\max} ($r = -.30$, $p = .011$) and D_{rf} ($r = .35$, $p = .003$). 5-10-5 time was moderately associated with F_0 ($r = -.40$, $p < .001$), V_0 ($r = -.32$, $p = .007$) and P_{\max} ($r = -.48$, $p < .001$) and had a small association with S_{fv} ($r = .24$, $p = .044$). SLJ was moderately associated with F_0 ($r = .46$, $p < .001$), S_{fv} ($r = -.31$, $p = .008$), Rf_{\max} ($r = .30$, $p = .012$) and D_{rf} ($r = -.30$, $p = .012$), largely associated with P_{\max} ($r = .52$, $p < .001$) and had a small association with V_0 ($r = .27$, $p = .022$). Males' 30-m sprint time was very largely associated with V_0 ($r = -.71$, $p < .001$) and largely associated with P_{\max} ($r = -.55$, $p < .001$). 5-10-5 time was moderately associated with F_0 ($r = -.41$, $p = .010$), V_0 ($r = -.32$, $p = .044$) and Rf_{\max} ($r = -.32$, $p = .050$) and was largely associated with P_{\max} ($r = -.53$, $p < .001$). SLJ was moderately associated with F_0 ($r = .33$, $p = .041$) and was largely associated with V_0 ($r = .59$, $p < .001$) and P_{\max} ($r = .57$, $p < .001$).

In order to verify the contribution of each off-ice tests as predictors of skating force and velocity characteristics, MANCOVA was conducted simultaneously on F_0 and V_0 . For F_0 , a significant effect was observed: $F(3, 103) = 49.635$, $p < .001$, $\eta^2 = .59$. Performances in the long jump ($\beta = .010$, $p < .001$, $\eta^2 = .11$) and the change of direction tests ($\beta = -.600$, $p = .002$, $\eta^2 = .09$) were significantly associated with F_0 . For V_0 , a significant effect was also observed: $F(3, 103) =$

36.848, $p < .001$, $\eta^2 = .52$. Performances in the long jump ($\beta = .008$, $p = .007$, $\eta^2 = .07$) and in the 30-m sprint ($\beta = -.558$, $p = .025$, $\eta^2 = .05$) were significantly associated with V_0 .

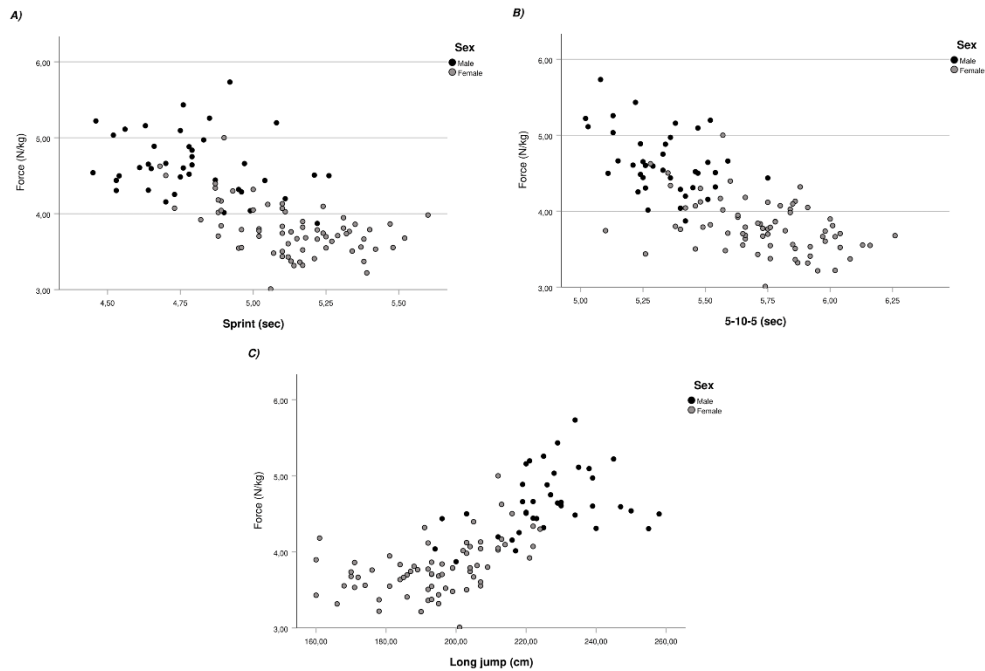


Figure 1. Associations between force and off-ice abilities. A) Association between force and sprint time $r_{\text{pooled}} = -.39$, $r_{\text{male}} = -.25$, $r_{\text{female}} = -.50$. B) Association between force and 5-10-5 time $r_{\text{pooled}} = -.39$, $r_{\text{male}} = -.41$, $r_{\text{female}} = -.40$. C) Association between force and standing long jump performance $r_{\text{pooled}} = .42$, $r_{\text{male}} = .33$, $r_{\text{female}} = .46$.

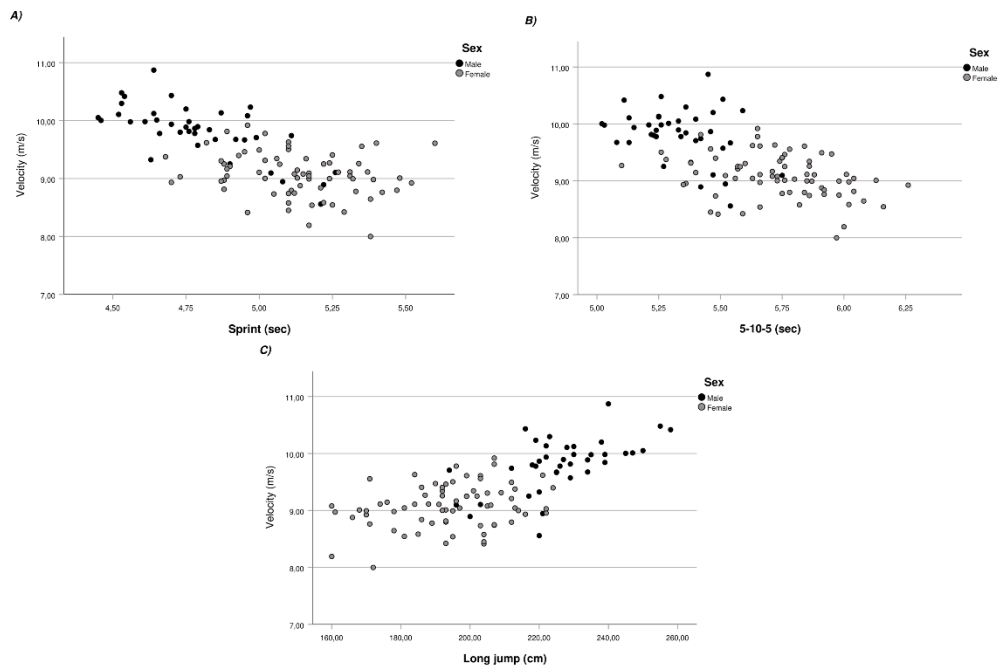


Figure 2. Associations between velocity and off-ice abilities. A) Association between velocity and sprint time $r_{\text{pooled}} = -.43$, $r_{\text{male}} = -.71$, $r_{\text{female}} = .22$. B) Association between velocity and 5-10-5 time $r_{\text{pooled}} = -.39$, $r_{\text{male}} = -.32$, $r_{\text{female}} = -.32$. C) Association between velocity and standing long jump performance $r_{\text{pooled}} = .39$, $r_{\text{male}} = .59$, $r_{\text{female}} = .27$.

4.7. Discussion

Acceleration and speed on the ice are crucial factors that determine the overall skating performance of teenage ice hockey players which can be optimized during off-season conditioning (Haukali, 2016). Recent developments in the analysis of sprinting capabilities using F-V profiling suggest distinct adaptations according to chosen training modalities (Lahti et al., 2020). In the unique context of ice hockey, associations between off-ice abilities and skating mechanical capabilities is still unknown. Perez et al. (2021) have explored agreement across different F-V methods (e.g. skating, sprinting and jumping) recommending to choose skating F-V for individualised training prescription. To our knowledge, this study is the first to explore associations between force and velocity characteristics of skating and off-ice speed, power and change of direction ability of highly trained teenage ice hockey players. When examining pooled

data in Figures 1 and 2, moderate to large associations were present between the mechanical properties (F_0 and V_0) and all off-ice abilities. Previous work had identified sprints, agility and SLJ as exercises associated with skating performance (Delisle-Houde et al., 2019; Henriksson et al., 2016; Janot et al., 2015; Novák et al., 2019). The present results are in line with these observations and emphasize the importance of general physical preparation for young competitive ice hockey players.

Results refine previous observations giving added information on how improvements off the ice may be associated with performance on the ice. Even though all off-ice measures used in this study contribute to force and velocity characteristics in skating, MANCOVA suggests distinct associations. SLJ performance and change of direction ability may translate more to F_0 while 30m sprint performance may translate to V_0 . Morin and Samozino (2016) have previously stated that sprints over short distances (< 20 m) are associated to F_0 while sprints over longer distances (> 20 m) be associated with V_0 . In a different study, Slavicek et al. (2022) have observed associations between off-ice change of direction and on-ice agility. Combined to the present results, the exercises performed during off-season training may translate to specific adaptations to skating performance at the start of the season, or during early season selection camps. Working on improving leg power and change of direction ability could lead to better improvements in skating acceleration and skating agility (as observed by Slavicek et al. [2022]) while improving sprinting performance could lead to improved maximal skating speed.

The second aim of this study, was to explore the influence of biological sex in observed associations between force and velocity characteristics of skating and off-ice performance. Comparing strength of associations for both groups individually in Figures 1 and 2 exposes these differences. In general, female players' off-ice performance showed large to moderate associations with F_0 and moderate to small associations with V_0 . In the contrary, male players' off-ice performance was moderate to small with F_0 but very large to moderate with V_0 . Previously, Perez et al. (2021) explored relationships between F-V profiles in skating, running and vertical jumping tasks and identified F_0 and P_{max} as strong predictors of skating performance for female players from the French national team. Even though the present results emanate from an entirely different context, the same variables (eg. F_0 and P_{max}) exhibited the strongest associations with

off ice-performance in highly trained female players. Interestingly, the associations were the opposite with male players for whom V_0 was the main parameter associated with off-ice performance. Previous work comparing the F-V capabilities of female and male teenage soccer players reported more “force-oriented” profiles for female players (Devismes et al., 2021; Haugen, Breitschädel & Seiler, 2020). The proposed explanation for these observations was based on the differences in distances traveled during match play where male players tend to sprint over longer distances than females. Gamble et al. (2022) have compared external load of varsity male and female players. They observed that male players skated roughly twice the distance above 24 km/h than female players. Higher training loads at these high speeds could lead male players to have an enhanced ability to generate force at high velocities (V_0) explaining in part the important associations observed in this study. Another explanation may lie in skeletal muscle fiber types differences between sexes. A meta-analysis by Nuzzo (2023) showed that males exhibited greater area percentage of all Type II muscle fibers which are associated with the ability to generate speed and power. Both explanations support the observed differences between male and female players from this study.

The design chosen for this study suggest interesting insights on associations between off-ice performance and mechanical capabilities during maximal forward skating, but certain limitations subsist. First, qualities were assessed in an off-season setting. Hence, athletes have more time to invest in their physical preparation process, which might lead to the attainment of higher scores in comparison with what would have been observed in season. In other words, participants might have performed better in off-season settings, diminishing the potential physical deconditioning (Chiarlitti et al., 2021) that occur during a competitive season. Taking a deeper look on how players perform in both contexts is necessary. Secondly, this study presents results for a very specific group of highly trained teenage ice hockey players. Because of their chronical age, it is possible that players, especially males, were at different maturational stages. Previous work by Fernández-Galván et al. (2022) demonstrated important changes in mechanical capabilities from pre to post peak height velocity for young soccer players which influenced training prescription. Considering maturational stage in ice hockey would certainly help to optimize player development. Thirdly, participants being part of a larger selection process only

allowed for the exploration of associations of three off-ice tasks. Secomb et al. (2021) demonstrated the importance of joint-angle-specific hip strength for skating acceleration and change of direction. Including leg strength in off-ice performance indicators would certainly influence results of multiple linear regression analysis and give further insight of associations with skating mechanical determinants. Fourthly, Samozino et al.'s method (2016) is based off radar measurements of speed which don't account for the specific nature of skating (e.g. ice friction and lateral pushing mechanics) or allow for precise detection of strides during skating. Validation of the method with 3D kinematics or insole dynamics would be advised. Finally, conclusions on associations of specific off-ice indicators with F_0 and V_0 should be considered with care because of the observational nature of this study. To our knowledge, effects of any off-ice intervention aimed at modifying or enhancing skating F-V have yet to be examined. Previous research in rugby demonstrated the importance of exercise selection for specific F-V adaptations (Lahti et al., 2020) and might serve as general guidelines for specific ice hockey interventions. The specific associations observed in this study lead us to believe that interventions comparing different training methods should also lead to specific adaptations on the ice, but remain to be explored.

4.8. Conclusion

This study explored associations between force and velocity characteristics of skating and off-ice speed, agility and leg power of highly trained adolescent ice-hockey players. Main results demonstrated strong correlations between all mechanical variables of the skating F-V and off-ice tasks identified in this study. Secondary results showed distinct associations for F_0 and V_0 . Both mechanical variables were associated with leg power but change of direction ability related more strongly to F_0 and speed related more strongly to V_0 . In light of these results, practitioners are encouraged to focus on a good general physical preparation to maximise acceleration and maximal speed on the ice with highly trained teenage players. Even though further research on the topic is necessary, they should also be aware that choices made in the weight room possibly have distinct effects on skating performance. Focusing training time to change of direction ability or acceleration and short sprinting drills should lead to improved acceleration on the ice while improving linear sprinting speed should help improve maximal skating speed.

4.9. Statements and declarations

Acknowledgments

The authors thank the management of Hockey Quebec: Mr. Marcel Patenaude (director, hockey department) for his collaboration on the research design, along with Mrs. Katerine Aubry-Hébert (female hockey development) and Mr. Jonathan Marcotte-Levasseur (male hockey development). We are also grateful to all players who completed the protocols and the coaches who collaborated in the study.

Funding

This project was funded by the province of Quebec's *Ministère de l'Éducation et de l'Enseignement Supérieur* under the *Projet Synergique* program. This project was possible due to the collaboration of *Hockey Quebec* and *l'Institut National du Sport du Québec*.

Conflict of interest statement

Authors declare no conflicts of interest with this research. This research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be constructed as potential conflicts of interest.

Data availability statement

Data that support the findings of this study are not publicly available. Data are available upon request from the corresponding author JGR.

References

- Aliberti, S., D'Elia, F., & Cherubini, D. (2023). Tips for statistical tools for research methods in exercise and sport sciences. *Physical Education Theory and Methodology*, 23(3), 470-477.
- Baena-Raya, A., Soriano-Maldonado, A., Conceição, F., Jiménez-Reyes, P., & Rodríguez-Pérez, M. A. (2021). Association of the vertical and horizontal force-velocity profile and acceleration with change of direction ability in various sports. *European Journal of Sport Science*, 21(12), 1659-1667.
- 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.
- 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.
- Budarick, A. R., Shell, J. R., Robbins, S. M., 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*. 19(5), 601-617.
- Chiarlitti, N. A., Crozier, M., Insogna, J. A., Reid, R. E., & Delisle-Houde, P. (2021). Longitudinal physiological and fitness evaluations in elite ice hockey: a systematic review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 35(10), 2963-2979.
- Delisle-Houde, P., Reid, R. E., Insogna, J. A., Chiarlitti, N. A., & Andersen, R. E. (2019). Seasonal changes in physiological responses and body composition during a competitive season in male and female elite collegiate ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(8), 2162-2169.
- Delisle-Houde, P., Chiarlitti, N. A., Reid, R. E., & Andersen, R. E. (2019). Predicting on-ice skating using laboratory-and field-based assessments in college ice hockey players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(9), 1184-1189.
- Devismes, M., Aeles, J., Philips, J., & Vanwanseele, B. (2021). Sprint force-velocity profiles in soccer players: impact of sex and playing level. *Sports Biomechanics*, 20(8), 947-957.
- Donskov, A. (2016). *Physical Preparation for Ice Hockey: Biological Principles and Practical Solutions*. AuthorHouse.
- Douglas, A. S., & Kennedy, C. R. (2020). Tracking in-match movement demands using local positioning system in world-class men's ice hockey. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(3), 639-646.

- Edwards, T., Banyard, H. G., Piggott, B., Haff, G. G., & Joyce, C. (2022). Reliability and minimal detectable change of sprint times and force-velocity-power characteristics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(1), 268-272.
- Fernández-Galván, L. M., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., & Casado, A. (2022). Sprint performance and mechanical force-velocity profile among different maturational stages in young soccer players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1412.
- Gamble, A. S., Bigg, J. L., Nyman, D. L., & Spriet, L. L. (2022). Local positioning system-derived external load of female and male varsity ice hockey players during regular season games. *Frontiers in Physiology*, 13, 831723.
- Haukali, E., & Tjelta, L. I. (2016). Relationship between off-season changes in power and in-season changes in skating speed in young ice hockey players. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 28(2).
- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Seiler, S. (2020). Sprint mechanical properties in soccer players according to playing standard, position, age and sex. *Journal of Sports Sciences*, 38(9), 1070-1076.
- 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. *Journal of Sports Medicine*, 81-88.
- Hopkins, W., Marshall, S., Batterham, A., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine & Science in Sports Exercise*, 41(1), 3.
- 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.
- 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.
- Lahti, J., Jiménez-Reyes, P., Cross, M. R., Samozino, P., Chassaing, P., Simond-Cote, B., Ahtiainen, J. P., & Morin, J.-B. (2020). Individual sprint force-velocity profile adaptations to in-season assisted and resisted velocity-based training in professional rugby. *Sports*, 8(5), 74.
- Lam, W. K., Qu, Y., Yang, F., Ma, R. Y., Liu, Z. L., & Yu, B. G. (2018). Number of trials necessary to achieve reliable change-of-direction measurement in amateur basketball players. *Cogent Education*, 5(1), 1428386.

- Lemoyne, J., Brunelle, J. F., Huard Pelletier, V., Glaude-Roy, J., & Martini, G. (2022). Talent identification in elite adolescent ice hockey players: the discriminant capacity of fitness tests, skating performance and psychological characteristics. *Sports*, *10*(4), 58.
- McKay, A. K., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., ... & Burke, L. M. (2021). Defining training and performance caliber: a participant classification framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *17*(2), 317-331.
- Marcotte L'Heureux, V., Charron, J., Panenic, R., & Comtois, A. S. (2021). Ice hockey goaltender physiology profile and physical testing: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Exercise Science*, *14*(6), 855.
- Mazurek, C. M., Pearsall, D. J., Renaud, P. J., & Robbins, S. M. (2023). Differences in inter-segment coordination between high-and low-calibre ice hockey players during forward skating. *Sports Biomechanics*, *22*(10), 1303-1318.
- 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.
- 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.
- Novák, D., Lipinska, P., Rocznik, 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.
- Nuzzo, J. L. (2023). Sex differences in skeletal muscle fiber types: A meta-analysis. *Clinical anatomy*, *37*(1), 81-91.
- 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., & Brocherie, F. (2022). Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *36*(11), 3229-3233.
- Perez, J., Guilhem, G., Hager, R., & Brocherie, F. (2021). 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*, *21*(2), 192-203.
- Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Sàez-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*(5), 583-594.

- 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(6), 648-658.
- Secomb, J. L., Dascombe, B. J., & Nimphius, S. (2021). Importance of joint angle-specific hip strength for skating performance in semiprofessional ice hockey athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(9), 2599-2603.
- 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.
- Slavicek, T., Stastny, P., Rocznio, R., & Musalek, M. (2022). Lower Limb Skeletal Robustness Determines the Change of Directional Speed Performance in Youth Ice Hockey. *Journal of Human Kinetics*, 85(1), 75-85.
- Stastny, P., Musalek, M., Rocznio, R., Cleather, D., & Novak, D. (2023). Testing distance characteristics and reference values for ice-hockey straight sprint speed and acceleration. A systematic review and meta-analyses. *Biology of Sport*, 40(3), 899-918.
- 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*, 1-16.
- Wagner, H., Abplanalp, M., von Duvillard, S. P., Bell, J. W., Taube, W., & Keller, M. (2021). The relationship between on-ice and off-ice performance in elite male adolescent ice hockey players—an observation study. *Applied Sciences*, 11(6), 2724.

Chapitre 5 – Associations entre les variables du profil force-vitesse sur la glace et la maturité physique des jeunes joueurs de hockey.

5.1. Apport original de l'étudiant et contribution des co-auteurs

Ce cinquième chapitre de thèse présente le dernier article intitulé : *Mechanical characteristics and skating performance of trained youth ice hockey players at different maturation stages*. Cet article, coécrit par Julien Glaude-Roy et Jean Lemoyne, est présentement en révision pour publication dans le Journal of Functional Morphology and Kinesiology.

5.2. Résumé en français

Objectif : Cette étude visait à examiner les caractéristiques mécaniques de la relation force-vitesse (F-V) en patinage chez des joueurs de hockey sur glace masculins entraînés, à différents stades de la puberté.

Devis : Un total de 52 athlètes masculins, évoluant dans des équipes compétitives U13 à U18, ont été classés en trois groupes de maturation, soit : Pré-, Mi- et Post-pic de vitesse de croissance (PHV). Ils ont été testés à l'automne avant le début de la saison compétitive.

Méthodes : Les participants ont réalisé deux sprints maximaux de 40 mètres sur glace, tandis que la vitesse était mesurée à l'aide d'un radar pour obtenir les paramètres F-V, incluant la force théorique maximale (F_0), la vitesse maximale théorique (V_0), la puissance maximale (P_{max}), ainsi que d'autres variables associées. L'écart en année estimé du pic de croissance a été établi à partir de l'âge, la taille et la grandeur assis des participants.

Résultats : Les résultats ont révélé des effets significatifs de la puberté sur la majorité des variables de performance. Des différences marquées ont été observées pour l'accélération (temps sur 0–10 m) et F_0 entre les stades Mi- et Post-PHV, tandis que V_0 et la vitesse maximale de sprint (temps sur 30–40 m) ont suivi une progression plus linéaire entre chaque stade de maturation.

Conclusion : Il s'agit de la première étude fournissant des valeurs de référence du profil F-V en patinage à travers la puberté chez des jeunes joueurs de hockey sur glace entraînés. Ces résultats appuient l'utilisation du profil F-V pour orienter les programmes d'entraînement individualisés en fonction du stade de maturation. Il est recommandé aux entraîneurs de prioriser l'accélération et la technique en début de puberté, et de mettre l'accent sur le développement de la force après le PHV. L'étude souligne également l'importance de recherches longitudinales pour mieux comprendre les changements liés à la maturation dans la performance sur glace.

Mots clés : accélération, vitesse, puberté, profil force-vitesse, biomécanique

5.3. Abstract

Objective: This study aimed to investigate the skating force-velocity (F-V) mechanical characteristics of trained youth ice hockey players at different stages of their maturational development.

Methods: A total of 52 male trained ice hockey players (14.6 ± 1.4 years) from U13, U15, U17 and U18 competitive teams of the same hockey program were classified into three maturation groups—Pre-, Mid-, and Post-peak height velocity (PHV). Participants performed two 40-meter maximal skating efforts while velocity data was collected using a radar device to derive F-V parameters (e.g., theoretical maximal force (F_0), velocity (V_0), power (P_{\max}), and related metrics). The maturation offset was computed using: $\text{Maturity offset} = -8.128741 + (0.0070346 \cdot (\text{Chronological age} \cdot \text{Sitting height}))$.

Results: Results revealed significant effects of puberty on most performance metrics (e.g., F-V parameters). Differences in acceleration (0–10m time) and F_0 improved markedly between mid- and post-PHV stages, while V_0 and maximal sprint velocity (30–40m time) improved constantly across maturation stages.

Conclusion: This is the first study to provide reference skating F-V profile values across puberty in trained youth male ice hockey players. These findings support the use of skating F-V profiling to guide individualized training programs based on the maturation stage. Coaches and practitioners are encouraged to prioritize acceleration and technique early during puberty and emphasize strength development or resisted skating after reaching peak height velocity. The study also highlights the need for longitudinal designs to better understand maturation-related changes in on-ice skating performance.

Key words: acceleration, speed, puberty, force-velocity profile, biomechanics

5.4. Introduction

Maximal forward skating abilities are determinant factors of ice hockey performance. Every match, players spend roughly 17.6% of effective playing time above 22km/h [1] with 300 to 900m meters above 24 km/h [2]. Hence, attaining high levels of speed and acceleration are crucial for players. Finding ways and techniques to maintain and improve maximal forward skating performance of ice hockey players is an important concern for strength and conditioning coaches. In this regard, choosing the appropriate training method for a given individual can become challenging as Olympic weightlifting, plyometrics, strength training, resisted sprints all appear to be approaches that have some potential to enhance maximal forward skating ability [3-6]. This is relevant with adolescent players, who are at a crucial stage of their athletic development going through many physiological and physical changes. The increased force and power production abilities caused by increased muscle mass, stature or testosterone levels contribute to positive changes in physical fitness [7]. As shown in few previous studies, each training method can have very different effects on their performance and maturation stage [7-9].

Samozino et al. [10] introduced a field method to analyze athletes' sprinting performance by the identification of their horizontal force-velocity profile (F-V). Using a smartphone, practitioners can obtain a detailed portrait of the sprint mechanical capabilities of their athletes making the approach very accessible with adolescent athletes. In general, the horizontal F-V allows for an estimation of ground reaction forces across the entire acceleration from displacement or velocity data [11]. These estimations allow the computation of the mechanical capabilities of athletes, such as: maximal theoretical force relative to body mass (F_0), maximal theoretical velocity (V_0), maximal theoretical power relative to body mass (P_{max}), force velocity slope (S_{fv}), maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force (RF_{max}) and rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force (D_{rf}) [10]. The S_{fv} can then be compared to an "optimal" profile (S_{fvopt}) to guide training prescription [12] and help practitioners in the selection of the optimal training method by identifying force or velocity deficits in athletes. The practical nature of the method and the importance of maximal forward skating in ice hockey make the horizontal F-V very interesting for individualized training in an applied setting.

Perez et al. [13] and Stenroth et al. [14] have demonstrated the reliability of the F-V for the analysis of skating sprints (ICC = [.79 – .92], CV = [1.4 – 5.2]). Yet, data specific to ice hockey players is very limited with less than 10 studies on the topic. Among the few studies, Perez et al. [15] explored associations between the sprinting, skating and jumping F-V of 17 female players from the French national team. Results highlighted that P_{max} had the strongest associations across testing modalities ($r = .72$ for sprinting and skating) while other variables only exhibiting small associations between sprinting and skating ($r = .31$). Only two studies investigated specifically ice hockey players' F-V during adolescence [16, 17]. Recently, Glaude-Roy et al. [16] explored associations between the sprinting F-V, repeated sprint ability and anaerobic capacity of 70 highly trained, adolescent ice hockey players. They found moderate to large associations between P_{max} , V_0 and anaerobic tests ($|r| = [.30-.70]$), and some small/moderate associations between F_0 and the anaerobic tests ($|r| = [.26-.33]$). In a second study, Glaude-Roy et al. [17] explored the associations between skating F-V and 30m sprint time, change of direction ability in a 5-10-5 tests and leg power measured by distance in the standing long jump of 107 highly trained adolescent ice hockey players. Correlation analyses revealed moderate associations between off-ice tests and F_0 or V_0 ($|r| = [.39-.43]$) and moderate to large associations with P_{max} ($|r| = [.49-.54]$). Multivariate analysis of covariance for F_0 , V_0 and off-ice tests suggested that change of direction and linear speed training may have distinct impacts on the development of F_0 and V_0 . Again, results stressed the importance of prioritizing a good general physical preparation at this stage. Both studies included homogenous groups (in terms of maturational development) which did not allow to consider the biological age of players.

This is especially important for youth players who, at puberty, go through a maturation process characterized by a growth spurt and increase in muscle mass leading to higher strength and power capacities [7]. In this regard, adolescent athletes might display large differences in terms of physical maturation, leading to discrepancies in terms of physical performance [18]. Hence, understanding how mechanical components of the F-V differ at different maturational stages is crucial. Fernández-Galván et al. [9] have explored the changes in sprint F-V mechanics of youth soccer players. They measured the sprint F-V of 62 players between 10 and 18 years old while estimating their maturational stage from age and sitting height. They observed distinct

differences between force and velocity at different maturational stages of players. Specifically, force appeared to develop earlier in the maturation process (pre- to mid-PHV) while velocity improved in a greater proportion later (mid- to post-PHV). Skating is a unique skill with clear distinction from sprinting. Skating can be decomposed in a running-like phase for the first three to seven steps followed by a gliding phase [19]. In contrast, sprinting is characterized by a gradual change in the trunk's forward incline [10]. There are also clear differences in hip, knee and ankle kinematics where skating requires more lateral movements [19]. Despite important differences in skating mechanics between high caliber and recreational adult ice hockey players [20] no research has focused on the skating mechanical capabilities of adolescent ice hockey players during puberty. Therefore, the aim of this study is to explore the differences in skating times and F-V mechanical capabilities of trained youth ice hockey player at different maturational stages. In line with observation by Fernández-Galván et al. [9] with soccer players, mechanical characteristics associated to force (e.g., acceleration and F_0) should exhibit larger differences between the early stages of maturation compared to velocity (e.g., maximal speed and V_0).

5.5. Methods

In this retrospective study, 80 players (20 for each team) from the same hockey program in the province of Quebec were invited to participate in this study. Players were on the under 13, 15, 17 and 18 years old competitive teams (U13, U15, U17 and U18 respectively) of their program. Injured players, goaltenders or players absent on testing day because of school were excluded from the final analysis. In the end, F-V mechanical characteristics and maximal skating times of 52 male ice hockey players were analyzed. A priori power analysis suggested the sample for three maturation sub-groups was sufficient ($\alpha = .05$; $P(1-\beta) = .80$; $ES = .50$). Players were tested after mid-season in the last week of November and first week of December 2024. Testing was performed at the beginning of regular on-ice training sessions on the first day of the week. The last game was played at least 48 hours before testing. Players were classified as trained athletes as they trained four times a week and compete at the provincial level [21]. These players are also rigorously supervised (adapted to their developmental level) by strength and conditioning coaches during the season. As players were under 14 years old, parents were informed about the purpose of the study objectives prior to giving their consent. Written and informed consent to

use testing data was obtained from players and parents of players under 14 years old. These practices are in line with norms and regulations regarding participation to research studies in the province of Quebec in Canada. This study was approved by the researchers' institution ethics committee (CER-25-320-07.10).

Table 1. Descriptive statistics of players' age, stature, mass, maturity offset, acceleration time, maximal speed time and skating F-V variables.

	Pre-PHV n = 5	Mid-PHV n = 28	Post-PHV n = 19
Age (years)	12.8 ± 0.5 [12.2, 13.4]	14.0 ± 1.0 [13.6, 14.4]	16.0 ± 0.7 [15.7, 16.3]
Stature (m)	1.48 ± 0.09 [1.36, 1.59]	1.69 ± 0.06 [1.66, 1.71]	1.72 ± 0.05 [1.70, 1.74]
Sitting height (m)	0.75 ± 0.05 [0.68, 0.82]	0.84 ± 0.04 [0.82, 0.85]	0.87 ± 0.02 [0.86, 0.88]
Mass (kg)	40.6 ± 3.0 [36.9, 44.3]	60.2 ± 9.1 [56.7, 63.7]	72.6 ± 4.6 [70.4, 74.8]
Maturity offset (years)	-1.38 ± 0.37 [-1.84, -0.93]	0.10 ± 0.58 [-0.13, 0.32]	1.63 ± 0.37 [1.45, 1.81]
0-10m time (sec)	2.20 ± 0.09 [2.08, 2.31]	2.11 ± 0.16 [2.05, 2.17]	1.84 ± 0.11 [1.79, 1.89]
30-40m time (sec)	1.39 ± 0.13 [1.24, 1.55]	1.22 ± 0.13 [1.17, 1.27]	1.07 ± 0.05 [1.05, 1.09]
F ₀ (N·kg ⁻¹)	4.43 ± 0.52 [3.79, 5.08]	4.71 ± 0.56 [4.49, 4.93]	5.44 ± 0.48 [5.21, 5.67]
V ₀ (m·sec ⁻¹)	8.60 ± 0.37	9.20 ± 0.61	10.32 ± 0.48

	[8.14, 9.06]	[8.97, 9.44]	[10.09, 10.55]
P_{\max} ($W \cdot kg^{-1}$)	9.53 ± 1.25	10.87 ± 1.89	14.03 ± 1.48
	[7.97, 11.08]	[10.14, 11.61]	[13.32, 14.75]
S_{fv} ($N \cdot m \cdot s^{-1}$)	-0.52 ± 0.06	-0.51 ± 0.05	-0.53 ± 0.05
	[-0.59, -0.44]	[-0.53, -0.49]	[-0.55, -0.50]
RF_{\max} (%)	31.6 ± 4.4	34.1 ± 3.9	37.0 ± 3.1
	[26.2, 37.0]	[32.6, 35.7]	[35.5, 38.4]
D_{rf} (%)	-5.0 ± 0.6	-4.9 ± 0.4	-5.0 ± 0.4
	[-5.7, -4.3]	[-5.1, -4.7]	[-5.2, -4.8]

Results are reported as average values, standard deviation and 95% confidence intervals. F_0 : Maximal theoretical force, V_0 : Maximal theoretical velocity, P_{\max} : Maximal theoretical power, S_{fv} : Force-velocity slope, RF_{\max} : Maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force, D_{rf} : Rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force

Players performed two 40m maximal skating efforts with five min rest between trials. This distance was based on Stastny et al.'s [22] recommendations to reach maximal velocity while skating. Prior to testing, players performed a 10-minute general warm-up combining general skating around the ice, specific skating drills, edge work and short accelerations. Skating times were measured using Swift single beam laser gates (Swift Performance, Northbrook, IL, USA) placed one meter above ground at 0, 10, 30 and 40 meters. A starting line was drawn 50 centimeters behind the first gate to minimize variation between trials due to variability in triggering patterns with such systems [22]. Players were instructed to start on the line while facing forward and instructed to give a maximal effort on both trials. When the system was ready, a previously trained research assistant indicated players to start skating when ready. Such testing methods are reliable with intraclass correlation coefficient (ICC) > 75% and a coefficient of variation (CV) < 5% [23, 24]. Average time to complete the first and last 10-meters were used for analysis and considered as acceleration (0-10m time) and maximal velocity (30-40m time).

Simultaneously, to follow instantaneous velocity, a Stalker ATS II radar (Stalker Sport, Richardson, TX, USA) was placed three meters behind the starting line and one meter above ground approximately at the height of players' center of mass. In previous research, this method showed acceptable reliability with ICC > 75% and CV < 10% for all variables [13, 14]. Following previous guidelines, raw velocity data were first imported in R studio and treated following previously published formulas for F-V parameters [10, 13]. Then, data prior to the skating start and after the maximal velocity plateau were discarded. Mechanical variables were calculated after remaining data was fitted with a mono-exponential function [10, 13]. Average values of both trials were used for further analyses [25, 26].

The equation from Moore et al. [27] was used to compute a maturity offset which represents the distance in years from age at PHV:

$$\text{Maturity offset} = -8.128741 + (0.0070346 \times (\text{Chronological age} \times \text{Sitting height})). \quad (1)$$

Players were classified as Pre-PHV, Mid-PHV or Post-PHV if their maturity offset were respectively < -1, between -1 and 1 or > 1. This simple computation method shows the closest estimates to actual age at PHV [28]. Players' mass, stature and sitting height were measured using a scale and a stadiometer to the closest 0.1 kg and 0.1 cm, respectively. Sitting height was calculated by setting a measuring tape to the wall with the zero value aligned with the box on which players were sitting.

Normality assumptions for each variable were confirmed with the Shapiro-Wilk test. Despite significant value for 30-40m times (SW = .858, $p < 0.001$), distribution values showed no major violations of normality, with acceptable scores of skewness and kurtosis (skewness = 1.0 SE = .33 ; kurtosis = -.076, SE = .65). Differences between maturation stages (e.g., Pre-PHV, Mid-PHV and Post-PHV), for skating F-V variables and skating times were determined using one-way ANOVAs. Post-hoc analysis using Fisher's LSD were conducted when significant effects of maturation were detected. Cohen's D were computed to estimate post-hoc effect sizes (η^2) and were interpreted as trivial <0.2; small = 0.2-0.6; moderate = 0.6-1.2; large = 1.2-2.0; very large = 2.0-4.0; and extremely large > 4.0 [29]. Statistical analyses were conducted using SPSS version 28.0 (IBM Corporation, Armonk, NY).

5.6. Results

Descriptive statistics of skating times and the skating F-V variables according to the maturational stage are presented in Table 1. Results for the one-way ANOVA analysis are presented in Table 2. There were significant differences between maturational stages for all variables but S_{fv} and D_{rf} . Effect sizes from post-hoc analysis are presented in Figure 1. Differences and 95% confidence intervals in skating times and skating F-V variables from pre- to mid-PHV (pre-mid), mid- to post-PHV (mid-post) and pre- to post-PHV are included.

Table 2. ANOVA results for differences in acceleration time, maximal speed time and F-V variables between pre-PHV, mid-PHV and post-PHV.

	$F_{(2,49)}$	p	η^2
0-10m time (sec)	26.61	<.001	.52
30-40m time (sec)	20.86	<.001	.46
F_0 ($N \cdot kg^{-1}$)	13.44	<.001	.35
V_0 ($m \cdot sec^{-1}$)	31.72	<.001	.56
P_{max} ($W \cdot kg^{-1}$)	24.83	<.001	.50
S_{fv} ($N \cdot m \cdot s^{-1}$)	.64	.53	.03
RF_{max} (%)	5.58	.007	.17
D_{rf} (%)	.35	.71	.01

F_0 : Maximal theoretical force, V_0 : Maximal theoretical velocity, P_{max} : Maximal theoretical power, S_{fv} : Force velocity slope, RF_{max} : Maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force, D_{rf} : Rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force

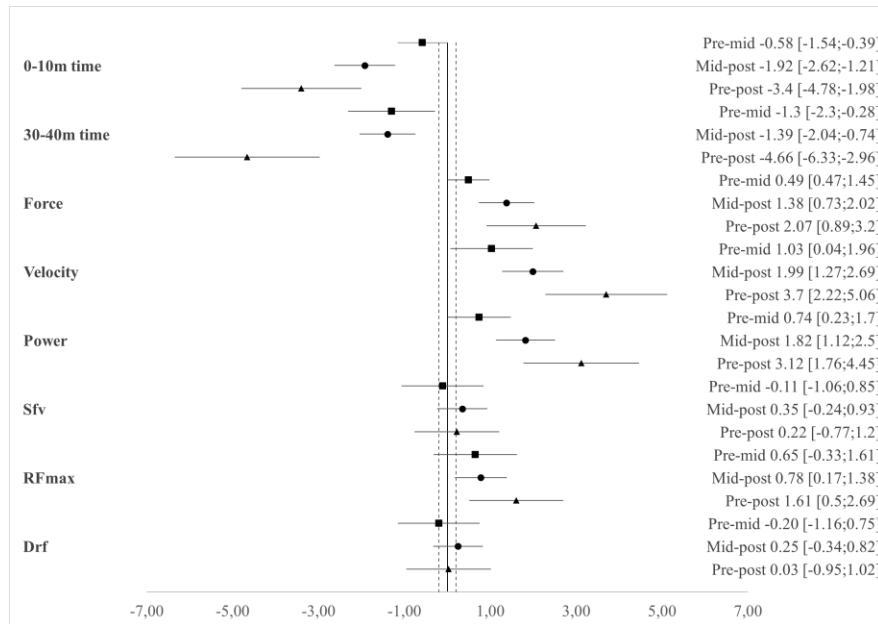


Figure 1 – Effect sizes with 95% confidence intervals of differences according to different maturation status.

5.7. Discussion

This study explored the differences in skating times and the skating F-V mechanical characteristics of trained adolescent ice hockey players at different maturational stages. Main effect sizes for differences between Pre-PHV and Mid-PHV and differences between Mid-PHV and Post-PHV demonstrate more important differences in acceleration capabilities (F0 and 0-10m time) latter during puberty whereas velocity capabilities (V0 and 30-40m time) were constantly higher between the maturational stages. These results are in contradiction with the initial hypothesis based on observations from Fernández-Galván et al. [9] with youth soccer players. While they represent maximal physiological abilities of athletes, maximal forward skating and sprinting are very different biomechanically. In skating, there is a clear change between a more running-like motion during the acceleration phase to a gliding phase after four to seven steps [19]. Ice friction may explain a good part differences in F-V between skating and sprinting. During the first steps, low ice friction causes poor blade-to-ice traction minimizing force application during acceleration [19]. At maximal velocity, the low ice friction helps skaters reach higher velocities by increasing

gliding distances. After the running phase, the crouched posing used to maximize lateral pushes with the blade and glide efficiently lead to large changes in the center of mass acceleration between each step [30]. In sum, the way players accelerate forward on the ice and glide at top speed are depicted by lower acceleration values and higher velocity values when compared to sprinting [16].

This study is the first to report the skating F-V of trained youth ice hockey players. Previous studies have reported values for highly trained male and female players [16, 17]. Values for the skating F-V mechanical characteristics were very similar to the Mid-PHV group from the present study (for example F0: 4.65 vs. 4.71 or V0: 9.83 vs. 9.20). This may be explained by the very similar chronological ages of players in both studies (14.0 vs. 13.8) and a large group of players with similar physical abilities in the province of Quebec. For example, Lemoyne et al. [31] showed that a global physical testing battery did not contribute to the selection process of 22 male players from a group of 80 invited to the provincial development camp. Players were selected from an approximate pool of 450 highly trained players between 15 and 18 years identified by the federation. It went on to show the very competitive field of youth male players in the province. This may explain why the Mid-PHV players from this study have very similar skating F-V to those previously reported. Nonetheless, the present results expand the current knowledge regarding the skating F-V of youth ice hockey players as it gives a complete portrait at different stages of puberty. The values can guide practitioners in setting training goals specific to the players development or maturation stage for an individualized training prescription (see Hicks et al. [32] for simple methods on doing so). Practitioners are encouraged to prioritize acceleration-focused drills during early puberty and focus on resisted skating once players have reached PHV.

While this study adds to current knowledge, several limitations should be considered. First, the Pre-PHV players were underrepresented (n=5) which undermines the robustness of comparisons and limits generalizability by increasing chances of type II errors. Adjustments to the sampling method which prioritized players from the same hockey program would be needed. However, such under representation of late born players (or late maturers) reflects the reality of the Canadian hockey ecosystem. The program is affiliated to a school and offers services for youth athletes playing in U13 to U18 categories. As the growth spurt can begin 12 years of age for males

[7], a portion of the U13 players were in the beginning of their maturation process placing them in the Mid-PHV group. In comparison, European soccer clubs are managed outside of the school system which allowed Fernández-Galván et al. [9] to recruit participants in younger teams. To improve the robustness and generalizability of the present results players from an U11 team is encouraged. Secondly, this study used a retrospective cross-sectional design. Data was arranged in different categories i.e. Pre-, Mid- and Post-PHV which were independent from each other. Yet, to completely understand the changes in skating F-V during puberty, prospective longitudinal studies are needed. Such studies should help refine our understanding of the mechanisms that underlie skating efficiency. Drawing individual curves for changes in the F-V during maturation would confirm (or infirm) the present observations. Moreover, as important differences in skating kinematics of adult players were observed [20], these should be tracked concurrently to further understand links with skating mechanical capabilities and maturation. Finally, the skating F-V measures used during this study have gone through reliability analysis for ice hockey [13, 14], but validity has yet to be confirmed. In its initial stages of development, the sprinting F-V was validated by using step average values of the ground reaction force on a specialized treadmill [33]. The large movement of the trunk during the running-like motion of the first steps of maximal skating efforts could lead to an underestimation of acceleration metrics (e.g., F_0 and Rf_{max}). Moreover, the method omits ice friction and only considers air friction which may also lead to an underestimation of these parameters. The use of plantar insole to measure force on each stride [34] could confirm the radar's validity.

5.8. Conclusion

This study provides a deeper look at the skating F-V mechanical characteristics of trained youth ice hockey players at different stages of maturation. Results demonstrate important changes later in the maturation process for acceleration variables whereas velocity changes at similar rates across the maturation process. Results also provide practitioners with reference values during adolescence to prescribe individualized, or age-adapted training prescription. The emphasis should be placed on acceleration- focused drills and skating technique with youth players during the first stages of maturation. Working on muscular strength should become important after puberty and developed with resisted skating or strength training.

5.8. Statements and declarations

Author Contributions: Both authors contributed equally in the conceptualization, methodology, formal analysis, writing—original draft preparation and writing—review and editing. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Ethics Committee of l'Université du Québec à Trois-Rivières (CER-25-320-07.10 approved July 4th 2025).

Informed Consent Statement: As players were minor, parents were informed of the study objectives prior to giving their consent. Written and informed consent to use testing data was obtained from players and parents of players under 14 years old. These practices are in line with norms and regulations regarding participation to research studies in the province of Quebec in Canada.

Data Availability Statement: The original contributions presented in this study are included in the article/supplementary material. Further inquiries can be directed to the corresponding author(s).

Acknowledgments: Authors wish to thank the players who participated in this study and the staff of *l'Académie les Estacades* for their collaboration during the planning and execution of testing.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

CV	Coefficient of variation
D_{rf}	Rate of decrease of the ratio of the horizontal component of the ground-reaction force
F-V	Force-velocity profile

F_0	Maximal theoretical force
PHV	Peak height velocity
P_{max}	Maximal theoretical power
RF_{max}	Maximal ratio of the horizontal component of the ground-reaction force
S_{fv}	Force-velocity slope
V_0	Maximal theoretical velocity

References

1. Brocherie, F., Girard, O., & Millet, G. P. Updated analysis of changes in locomotor activities across periods in an international ice hockey game. *Biol. Sport*, **2018**, *35(3)*, 261-267. doi: 10.5114/biolsport.2018.77826
2. Douglas, A. S., & Kennedy, C. R. Tracking in-match movement demands using local positioning system in world-class men's ice hockey. *Journal Strength Cond Res*, **2020**, *34(3)*, 639-646. doi: 10.1519/JSC.0000000000003414
3. Brocherie, F., Perez, J., & Guilhem, G. Effects of a 14-Day High-Intensity Shock Microcycle in High-Level Ice Hockey Players' Fitness. *Journal Strength Cond Res*, **2020**, *36(8)*, 2247-2252. doi: 10.1519/JSC.0000000000003769
4. Dæhlin, T. E., Haugen, O. C., Haugerud, S., Hollan, I., Raastad, T., & Rønnestad, B. R. Improvement of ice hockey players' on-ice sprint with combined plyometric and strength training. *Int. J. Sports Physiol. Perform*, **2017**, *12(7)*, 893-900. doi: 10.1123/ijsp.2016-0262
5. Lagrange, S., Ferland, P.-M., Leone, M., & Comtois, A. S. Contrast training generates post-activation potentiation and improves repeated sprint ability in elite ice hockey players. *Int. J. Exerc. Sci.*, **2017**, *13(6)*, 183. doi: 10.70252/ONUUV8208
6. Matthews, M. J., Comfort, P., & Crebin, R. Complex training in ice hockey: the effects of a heavy resisted sprint on subsequent ice-hockey sprint performance. *Journal Strength Cond Res*, **2010**, *24(11)*, 2883-2887. doi: 10.1519/JSC.0b013e318e7253c
7. Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., González-Gálvez, N., & Esparza-Ros, F. Relationship between biological maturation, physical fitness, and kinanthropometric variables of young athletes: A systematic review and meta-analysis. *IJERPH*, **2021**, *18(1)*, 328. doi: 10.3390/ijerph18010328
8. Dobbs, I. J., Oliver, J. L., Wong, M. A., Moore, I. S., & Lloyd, R. S. Effects of a 12-week training program on isometric and dynamic force-time characteristics in pre-and post-

peak height velocity male athletes. *Journal Strength Cond Res*, **2020**, *34*(3), 653-662. doi: 10.519/JSC00000000000003467

9. Fernández-Galván, L. M., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñañiel, V., & Casado, A. Sprint Performance and Mechanical Force-Velocity Profile among Different Maturational Stages in Young Soccer Players. *IJERPH*, **2022**, *19*(3), 1412. doi: 10.3390/ijerph19031412
10. Samozino, P., Rabita, G., Dorel, S., Slawinski, J., Peyrot, N., Saez de Villarreal, E., & Morin, J. B. A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running. *Scand J med Sci Sports*, **2016**, *26*(6), 648-658. doi: 10.1111/sms.12490
11. Morin, J.-B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M. R., & Nagahara, R. A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with improved design. *J. Biomech.*, **2019**, *94*, 82-87. doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.07.020
12. Samozino, P., Peyrot, N., Edouard, P., Nagahara, R., Jimenez-Reyes, P., Vanwanseele, B., & Morin, J. B. Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scand J med Sci Sports*, **2022**, *32*(3), 559-575. doi: 10.1111/sms.14097
13. Perez, J., Guilhem, G., & Brocherie, F. Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomech.*, **2022**, *21*(1), 56-70. doi: 10.1080/14763141.2019.1648541
14. Stenroth, L., Vartiainen, P., & Karjalainen, P. A. Force-velocity profiling in ice hockey skating: reliability and validity of a simple, low-cost field method. *Sports Biomech.*, **2023**, *22*(7), 874-889. doi:10.1080/14763141.2020.1770321
15. Perez, J., Guilhem, G., Hager, R., & Brocherie, F. Mechanical determinants of forward skating sprint inferred from off-and on-ice force-velocity evaluations in elite female ice hockey players. *Eur. J. Sport. Sci.*, **2021**, *21*(2), 192-203. doi: 10.1080/17461391.2020.1751304
16. Glaude-Roy, J., Pharand, P., Brunelle, J.-F., & Lemoyne, J. Exploring associations between sprinting mechanical capabilities, anaerobic capacity, and repeated-sprint ability of

- adolescent ice hockey players. *Front. Sports Act. Living*, **2023**, 5. doi: 10.3389/fspor.2023.1258497
17. Glaude - Roy, J., Ducas, J., Brunelle, J. F., & Lemoyne, J. Associations between skating mechanical capabilities and off - ice physical abilities of highly trained teenage ice hockey players. *Eur. J. Sport. Sci.*, **2024**, 24(10), 1414-1422. doi: 10.1002/ejsc.12184
 18. Pelletier, V. H., Trudeau F., & Lemoyne, J. Development of physiological, anthropometric and psychological parameters in adolescent ice hockey players. *Mov Sport Sci/Sci Mot*, **2025** doi: 10.1051/sm/2024032
 19. Budarick, A. R., Shell, J. R., Robbins, S. M., Wu, T., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. Ice hockey skating sprints: run to glide mechanics of high calibre male and female athletes. *Sports Biomech.*, **2020**, 19(5), 601-617. doi: 10.1080/14763141.2018.1503323
 20. Robbins, S. M., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. Principal component analysis identifies differences in ice hockey skating stride between high-and low-calibre players. *Sports Biomech.*, **2021**, 20(2), 131-149. doi: 10.1080/14763141.2018.1524510
 21. McKay, A. K., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J., & Burke, L. M. Defining training and performance caliber: a participant classification framework. *Int J Sports Physiol Perform*, **2021**, 17(2), 317-331. doi: 10.1123/ijsp.2021.0451
 22. Stastny, P., Musalek, M., Roczniok, R., Cleather, D., Novak, D., & Vagner, M. Testing distance characteristics and reference values for ice-hockey straight sprint speed and acceleration. A systematic review and meta-analyses. *Biol Sport*, **2023**, 40(3), 899-918. doi: 10.5114/biol sport.2023.122479
 23. Bond, C. W., Bennett, T. W., & Noonan, B. C. Evaluation of skating top speed, acceleration, and multiple repeated sprint speed ice hockey performance tests. *Journal Strength Cond Res*, **2018**, 32(8), 2273-2283. doi: 10.1519/JSC.0000000000002644

24. Sawczuk, T., Jones, B., Scantlebury, S., Weakley, J., Read, D., Costello, N., Darrall-Jones, J. D., Stokes, K., & Till, K. Between-day reliability and usefulness of a fitness testing battery in youth sport athletes: Reference data for practitioners. *MPEES*, **2018**, *22*(1), 11-18. doi: 10.1080/1091367X.2017.1360304
25. Edwards, T., Banyard, H. G., Piggott, B., Haff, G. G., & Joyce, C. Reliability and minimal detectable change of sprint times and force-velocity-power characteristics. *Journal Strength Cond Res*, **2022**, *36*(1), 268-272. doi: 10.1519/JSC.0000000000004161
26. Simperingham, K. D., Cronin, J. B., Pearson, S. N., & Ross, A. Reliability of horizontal force-velocity-power profiling during short sprint-running accelerations using radar technology. *Sports Biomech.*, **2019**, *18*(1), 88-99. doi:10.1080/14763141.2017.1386707
27. Moore, S. A., McKay, H. A., Macdonald, H., Nettlefold, L., Baxter-Jones, A. D., Cameron, N., & Brasher, P. M. Enhancing a somatic maturity prediction model. *Med Sci Sports Exerc.*, **2015**, *47*(8), 1755-1764. doi: 10.1249/MSS.0000000000000588
28. Sullivan, J., Roberts, S. J., Mckeown, J., Littlewood, M., McLaren-Towlson, C., Andrew, M., & Enright, K. Methods to predict the timing and status of biological maturation in male adolescent soccer players: A narrative systematic review. *PloS One*, **2023**, *18*(9), e0286768. doi: 10.1371/journal.pone.0286768
29. Hopkins, W., Marshall, S., Batterham, A., & Hanin, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*, **2009**, *41*(1), 3-13. doi: 10.1249/MSS.0b013e31818cb278
30. Buckeridge, E., LeVangie, M. C., Stetter, B., Nigg, S. R., & Nigg, B. M. An on-ice measurement approach to analyse the biomechanics of ice hockey skating. *PloS One*, **2015**, *10*(5), e0127324. doi: 10.1371/journal.pone.0127324
31. Lemoyne, J., Brunelle, J.-F., Huard Pelletier, V., Glaude-Roy, J., & Martini, G. Talent Identification in Elite Adolescent Ice Hockey Players: The Discriminant Capacity of Fitness Tests, Skating Performance and Psychological Characteristics. *Sports*, **2022**, *10*(4), 58. doi: 10.3390/sports10040058

32. Hicks, D. S., Drummond, C., Williams, K. J., Pickering, C., & van den Tillaar, R. Individualization of training based on sprint force-velocity profiles: a conceptual framework for biomechanical and technical training recommendations. *SCJ*, **2022**, *45*(6), 711-725.
33. Morin, J.-B., Bourdin, M., Edouard, P., Peyrot, N., Samozino, P., & Lacour, J.-R. Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. *Eur J Appl Physiol.*, **2012**, *112*(11), 3921-3930. doi: 10.1007/s00421-012-2379-8
34. Secomb, J. L., Davidson, D. W., & Compton, H. R. Relationships between sprint skating performance and insole plantar forces in national-level hockey athletes. *Gait Posture*, **2024**, *113*, 436-442. doi:10.1016/j.gaitpost.2024.07.297

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Chapitre 6 – Discussion générale

La popularité du hockey sur glace et le contexte de développement sportif du Québec créent un phénomène de spécialisation hâtive chez les adolescent(e)s québécois(es) où ils/elles participent rapidement à des entraînements en résistance. La prescription individualisée de l'entraînement constitue un enjeu majeur pendant la puberté, période durant laquelle les jeunes joueurs et joueuses vivent plusieurs changements biologiques qui affectent les adaptations aux stimuli d'entraînement. Les intervenant(e)s sont à la recherche de méthodes simples et rapides pour dresser le bilan des capacités neuromusculaires des joueurs et joueuses afin de guider leurs choix d'entraînement. La méthode du profil F-V horizontal développée par Samozino et al. (2016) présente un potentiel intéressant, jusqu'à maintenant, peu explorée dans le contexte du hockey sur glace. L'objectif général de cette thèse visait à documenter le profil F-V horizontal des joueurs et joueuses de hockey adolescent(e)s élites ainsi qu'à comprendre ses liens avec différents indicateurs de performance afin de faciliter l'interprétation des résultats pour les intervenant(e)s œuvrant auprès de cette population. Le profil F-V horizontal est une méthode qui prétend faciliter l'individualisation de l'entraînement par une approche jugée simple et accessible aux intervenant(e)s. Cette méthode a été adaptée au hockey sur glace pour évaluer les capacités de patinage des joueurs et joueuses et a démontré une fidélité jugée acceptable (Perez et al., 2022; Stenroth et al., 2020). Pour aider les praticien(ne)s à utiliser et interpréter les données du profil F-V, Morin and Samozino (2016) ont développé un modèle associant les différentes variables du profil F-V à différentes composantes de la performance au sprint. Les résultats de cette thèse contribuent à préciser ce modèle dans le contexte du hockey sur glace avec une population adolescente.

Le premier objectif spécifique de cette thèse était d'explorer les associations entre le profil F-V au sprint de joueurs et joueuses adolescent(e)s élites, leurs capacités anaérobies et leur capacité à répéter des sprints. La performance au sprint constitue un déterminant clé de la capacité anaérobie et la capacité à répéter des sprints (Blondel et al., 2001; Llanos-Lagos et al., 2024a; Llanos-Lagos et al., 2024b). Les résultats font ressortir l'importance, pour des joueurs et

joueuses de hockey adolescent(e)s élites, de pouvoir appliquer de la force à haute vitesse afin de maximiser les capacités anaérobies. De plus, des différences importantes entre les hommes et les femmes suggèrent que les priorités d'entraînement pourraient varier en fonction du sexe biologique.

Le deuxième objectif spécifique était d'évaluer les associations entre le profil F-V de patinage, la puissance des MI, l'habileté à changer de direction et la vitesse de sprint en course à pied. Un cycle d'entraînement normal en hockey sur glace prévoit une période de préparation générale à l'extérieur de la glace durant la saison estivale pendant laquelle les athlètes visent un développement optimal de leur condition physique (Haukali & Tjelta, 2016). Les résultats encouragent les intervenants œuvrant avec des joueurs et joueuses adolescent(e)s élites à privilégier une bonne préparation physique générale pour améliorer toutes les composantes du profil F-V de patinage. Des associations spécifiques entre les performances et les différentes composantes du profil F-V ont été observées. Les performances aux changements de direction ou au test d'accélération étaient associées aux composantes de patinage liées à l'accélération (F_0 et Rf_{max}) alors que la vitesse en ligne droite était associée aux composantes de patinage liées à la vitesse maximale (V_0 et D_{rf}). Les observations suggèrent que le choix des exercices effectués à l'extérieur de la glace pourrait influencer des composantes spécifiques de l'accélération en ligne droite sur la glace. Cependant, des devis expérimentaux visant à confirmer ces observations sont nécessaires.

Le troisième objectif spécifique de la thèse était d'évaluer les différences entre les variables du profil F-V chez des athlètes à différents stades de maturation physique. À l'adolescence, les joueurs vivent des changements physiques et physiologiques importants qui modulent leur sensibilité à certains types de stimuli à des moments précis durant les processus de maturation (Balyi et al., 2013; Lloyd & Oliver, 2012). Les résultats démontrent des différences plus importantes entre les variables associées aux capacités d'accélération (F_0 et temps 0-10m) à partir de la mi-puberté comparativement aux variables associées à la vitesse (V_0 et temps 30-40m) lesquelles présentent des différences constantes entre chaque stade de maturation physique. Les résultats suggèrent que les intervenant(e)s devraient concentrer leurs efforts sur l'amélioration de la technique de patinage et des exercices spécifiques d'accélération sur la glace

avant l'atteinte du pic de croissance. Les exercices de patinage avec résistance devraient être intégrés après la puberté. Cependant, des études expérimentales supplémentaires sont requises pour confirmer ces observations.

6.1. Profil force-vitesse et capacités anaérobies en hockey sur glace

Le développement et l'amélioration efficaces des systèmes énergétiques lors de l'entraînement estival constituent des éléments essentiels pour maximiser la performance de l'athlète puisque l'on observe régulièrement une diminution de ces capacités au cours de la saison en raison de l'horaire d'entraînement et de compétition chargé (Chiarlitti et al., 2021). Afin de maximiser le potentiel des interventions mises en œuvre durant la saison estivale, il est important de vérifier si le profil F-V horizontal est associé aux capacités anaérobies et l'habileté à répéter des sprints. Le premier projet de cette thèse s'est donc intéressé à cet enjeu et se déclinait en deux sous-objectifs : 1- observer les associations entre le profil F-V au sprint, la performance à un test maximal de 30 secondes sur ergocycle (Wingate) et la capacité à répéter des sprints dans un test incluant un changement de direction (RSA) de joueurs et joueuses de hockey adolescent(e)s élites et 2- observer les différences entre les garçons et les filles. Appuyé sur les observations de Perez et al. (2021), les premières hypothèses posaient que P_{max} serait la variable la plus fortement associée aux performances dans les deux autres tests, que V_0 aurait une plus forte corrélation avec le Wingate en raison du temps mis à atteindre la puissance maximale (autour de 7 secondes) (Morin & Samozino, 2016) et que F_0 aurait une plus grande association avec les résultats du RSA en raison du changement de direction (Baena-Raya et al., 2021).

Au regard de la première hypothèse, P_{max} présentait des corrélations modérées à fortes ($0,37 > |r| < 0,70$) avec les différentes variables issues des tests de capacité anaérobie. Les plus fortes associations étaient observées entre P_{max} , le temps du meilleur sprint ($r = -0,57$) et le temps total des sprints répétés ($r = -0,60$). Les résultats corroborent les études précédentes selon lesquelles P_{max} est la variable qui représente le mieux la performance générale au sprint (Baena-Raya et al., 2021). Les intervenant(e)s utilisant le profil F-V au sprint pour orienter leur prescription d'entraînement hors glace devraient prioriser des exercices visant d'abord une amélioration de P_{max} pour maximiser le développement concomitant de la capacité à répéter des

sprints et les capacités anaérobies. De plus, comme l'ont démontré Perez et al. (2021), la P_{max} est fortement associée à la puissance et la performance de patinage en ligne droite ($r = 0,72$). Une amélioration de cette variable pourrait se traduire par une amélioration de la performance de patinage.

La seconde hypothèse selon laquelle V_0 serait fortement associée à la puissance maximale n'a pu être confirmée par les résultats. En effet, V_0 était modérément associée à la puissance maximale sur ergocycle ($r = 0.43$). Les SAL et SAA sont les systèmes énergétiques les plus sollicités par l'ensemble des activités de moins de deux minutes à effort constant jusqu'à épuisement (Scott et al., 2021). À l'opposé, le profil F-V au sprint repose sur un modèle biomécanique développé pour décrire les capacités neuromusculaires d'un(e) athlète dans un contexte appliqué d'entraînement (Samozino et al., 2016). Ainsi, le modèle s'avère plus sensible au type d'activité évalué ainsi qu'aux capacités neuromusculaires de l'individu qu'à la puissance des systèmes anaérobie alactique ou lactique. Puisque les calculs de chaque variable du profil F-V sont dérivées de la même fonction mathématique, ils décrivent davantage la forme de la courbe d'accélération plutôt que les capacités neuromusculaires réelles ce qui explique la spécificité du profil F-V à l'activité d'évaluation (Ettema, 2024). Perez et al. (2021) ont d'ailleurs abordé cette question en comparant les profils F-V de sprint, de patinage et de saut chez des joueuses de l'équipe nationale féminine de France. À l'exception de P_{max} , les auteurs ont seulement observé des corrélations faibles à modérées entre les variables de chaque profil ($r < 0,31$). Les présents résultats devraient décourager les intervenant(e)s de considérer qu'un(e) athlète avec une V_0 plus élevée au sprint est synonyme de la même capacité lors du patinage avant.

La troisième hypothèse voulait que F_0 soit corrélé au test de RSA avec changement de direction en raison de la distance plus courte et l'alternance entre freinages et accélérations au sein du protocole. Les résultats démontrent une relation modérée avec le meilleur temps ($r = -0,33$) et le temps total ($r = -0,32$) du RSA. L'évolution des paramètres du profil F-V au sprint durant des tests de sprints répétés avait préalablement été étudiée avec des athlètes de soccer (Hermosilla-Palma et al., 2022; Jiménez-Reyes, García-Ramos, et al., 2019). Ces travaux avaient permis d'observer un maintien des capacités d'accélération (F_0 et $R_{f_{max}}$) et une diminution des capacités à générer de la force à haute vitesse (V_0 , D_{rf} et P_{max}). Les associations de la présente

étude entre le profil initial de l'athlète et la performance dans un test de sprints répétés s'inscrivent en continuité avec ces résultats. Bien que les capacités d'accélération soient associées à la capacité de changement de direction (Baena-Raya et al., 2022), elles demeurent secondaires par rapport à la capacité à générer de la force à haute vitesse lorsqu'une série d'efforts nécessitant une importante contribution du SAL.

L'objectif secondaire de cette section visait à examiner les différences liées au sexe biologique dans les associations observées entre le profil F-V au sprint et les capacités anaérobies. Les travaux précédents indiquent que le profil F-V horizontal des filles présente généralement une orientation plus axée sur la force que celui des garçons dans le cas spécifique du soccer (Devismes et al., 2021; Haugen et al., 2020). L'hypothèse était donc que F_0 exercerait une influence plus importante dans la performance anaérobie chez les filles par rapport aux garçons. Les résultats ont confirmé cette hypothèse. Les corrélations partielles entre F_0 , le meilleur sprint et le temps total étaient respectivement de $r = -0,40$ et $r = -0,45$ pour les filles alors qu'elles se sont avérées non significatives chez les garçons. Deux explications apparaissent plausibles. Premièrement, les garçons recrutés étaient significativement plus jeunes que les filles ($15,1 \pm 0,2$ contre $16,5 \pm 0,7$). La poussée de croissance qui marque le milieu du processus de maturation à l'adolescence survient plus tôt chez les filles que chez les garçons. Cette poussée a lieu autour de 9 à 15 ans chez les filles et 12 à 16 ans chez les garçons (Albaladejo-Saura et al., 2021). En soccer, Fernández-Galván et al. (2022) ont examiné les différences entre les composantes du profil F-V avant, pendant et après la poussée de croissance. Ils ont déterminé que les différences entre les différents stades de maturité pour F_0 étaient plus importantes du milieu à la fin de la poussée de croissance qu'au début de celle-ci. Ainsi, il est possible que les garçons, en période de puberté active, n'aient pas encore développé une F_0 suffisante pour contribuer significativement à la performance lors de sprints répétés. Deuxièmement, il est possible d'estimer un profil F-V de sprint optimal ($S_{FV_{opt}}$) pour une distance donnée et la puissance de l'athlète (Samozino et al., 2021). En comparant S_{FV} et $S_{FV_{opt}}$ il est possible de déterminer l'orientation de son déséquilibre (FV_{imb}). La comparaison de la distribution des FV_{imb} entre garçons et filles révèle qu'environ le quart des filles avaient un déficit en vitesse contrairement aux garçons qui avaient tous un déficit

en force. Cette différence dans la distribution du profil des athlètes pourrait donc expliquer les différences observées dans les corrélations partielles des filles par rapport aux garçons.

6.2. Transfert des habiletés hors glace aux habiletés mécaniques de patinage

Les horaires d'entraînement et de compétition particulièrement chargés limitent les athlètes dans leur capacité à maintenir un volume suffisant à la préparation physique durant la période de compétition, ce qui peut mener à un déconditionnement (Chiarlitti et al., 2021). La saison estivale représente une période clé de la préparation des athlètes désireux et désireuses de maximiser leur performance de patinage à leur retour sur la glace la saison suivante (Haukali & Tjelta, 2016). Dans la section précédente, il a été démontré que P_{max} et V_0 sont les variables associées aux capacités anaérobies et la capacité à répéter des sprints. Puisque la préparation estivale s'effectue principalement hors glace, la connaissance du type d'exercice susceptible de maximiser le développement des composantes spécifiques du profil F-V de patinage est essentielle. Le modèle présenté par Morin et Samozino (2016) propose des liens entre la distance de sprint et les profils F-V obtenu au sprint. Or, ces relations restent à être confirmées dans le contexte du transfert entre les exercices hors glace et la performance sur glace. Le deuxième objectif de cette thèse était donc d'évaluer les associations entre le profil F-V de patinage, la puissance des membres inférieurs, l'habileté à changer de direction et la vitesse de sprint en course à pied. Comme pour la section précédente, l'objectif secondaire était d'examiner les différences entre les garçons et les filles au regard des associations observées. Les sauts en longueur, les sauts verticaux, les sprints $\approx 36m$, les changements de direction et les squats maximaux constituent des exemples d'exercices associés à la performance sur glace (Delisle-Houde et al., 2019; Henriksson et al., 2016; Janot et al., 2015; Novák et al., 2019). Ainsi, la première hypothèse suggérait que les associations observées s'accordent avec le modèle de Morin et Samozino (2016) et que les exercices caractérisés par des vitesses de contraction plus lentes seraient associés avec F_0 sur la glace alors que les exercices caractérisés par des vitesses de contractions plus rapides seraient associés avec V_0 . Ensuite, il est connu que les femmes ont généralement un profil F-V plus orienté vers la force par rapport aux hommes (Devismes et al., 2021; Haugen et al., 2020). Ainsi, la

seconde hypothèse était que les associations observées pour F_0 seraient plus fortes chez les filles que chez les garçons.

Premièrement, les résultats ont partiellement confirmé la première hypothèse. Tous les tests hors glace ont présenté des associations modérées à fortes, avec F_0 et V_0 soulignant l'importance d'une bonne préparation physique générale à l'adolescence. Les analyses de covariance multivariées ont révélé des associations conformes au modèle proposé par Morin et Samozino (2016). En effet, le saut en longueur et le temps au test de changement de direction étaient significativement associés à F_0 , tandis que les résultats au sprint de 30m étaient associés à V_0 . Ainsi, les exercices favorisant un développement rapide de la puissance ou ciblant l'accélération pourraient contribuer à l'amélioration de l'accélération sur glace. À l'inverse, les exercices caractérisés par des temps de contacts au sol plus réduits et une production de force horizontale à des vitesses très élevées pourraient améliorer la vitesse maximale sur la glace. Ces constats sont cohérents avec les observations rapportées dans d'autres travaux de recherche portant sur le hockey sur glace.

Par exemple, Dietze-Hermosa et al. (2024) ont comparé les effets d'un entraînement de sprint avec résistance effectué hors glace à ceux d'un entraînement similaire réalisé sur la glace. Bien que l'entraînement sur glace se soit révélé supérieur pour améliorer la performance de patinage, l'entraînement hors glace a néanmoins conduit à des adaptations transférables sur la glace. Le groupe ayant fait les sprints avec résistance hors glace a amélioré son accélération et sa capacité à changer de direction sur la glace, sans modification de la vitesse maximale. L'utilisation de résistance lors du sprint, par l'intermédiaire de traîneaux tirés par les athlètes, est une méthode efficace pour augmenter le temps de contact au sol et la puissance générée à chaque foulée, favorisant ainsi une amélioration ciblée de l'accélération (Myrvang & van den Tillaar, 2024). De leur côté, Daehlin et al. (2017) ont comparé les effets de programmes d'entraînement en force incluant ou non des exercices de pliométrie sur la performance de patinage. Selon leurs résultats, les deux types de programme ont entraîné des améliorations supérieures de l'accélération sur la glace. Cependant, le programme intégrant la pliométrie a généré des améliorations supérieures de l'accélération et une tendance à l'amélioration de la vitesse maximale sur glace.

Les résultats de la présente section ont également confirmé la seconde hypothèse. L'analyse des corrélations partielles a montré que les tests hors glace étaient principalement associés à V_0 chez les garçons et à P_{max} et F_0 chez les filles. Des travaux menés en soccer ont déjà mis en évidence des profils plus orientés vers la force au sprint chez les filles (Devismes et al., 2021; Haugen et al., 2020). Cette tendance semble se transposer aux capacités mécaniques observées sur la glace. Les différences de style de jeu entre les sexes pourraient expliquer les divergences observées dans les associations observées. Gamble et al. (2022) ont précédemment montré qu'au niveau universitaire, les joueurs masculins parcouraient environ deux fois plus de distance au-dessus de 24 km/h. L'effet cumulatif du temps passé à des vitesses supérieures pourrait influencer le développement physique des joueurs amenés à générer plus fréquemment de la force à haute vitesse comparativement aux filles. Parallèlement, une méta-analyse de Nuzzo (2024) a démontré que les garçons présentent une proportion plus élevée de fibre de Type II qui est associée à la capacité de générer de la force à grande vitesse.

Finalement, cette section a permis d'établir les associations entre divers tests hors glace couramment utilisés chez de jeunes hockeyeurs et hockeyeuses et leur profil F-V de patinage. D'un point de vue pratique, les résultats soutiennent l'importance d'une bonne préparation physique générale pour optimiser le développement de toutes les composantes du profil F-V sur la glace. Cependant, certaines nuances méritent d'être prises en considération. L'utilisation d'exercices comme les sprints résistés ou les changements de direction, favorisant la génération de puissance à des vitesses plus faibles et mettant l'accent sur la capacité à accélérer rapidement, devrait favoriser l'amélioration de l'accélération sur la glace. Afin de faciliter l'interprétation du profil F-V horizontal chez les hockeyeurs et hockeyeuses, les associations observées dans les deux premières sections sont synthétisées à la Figure 11.

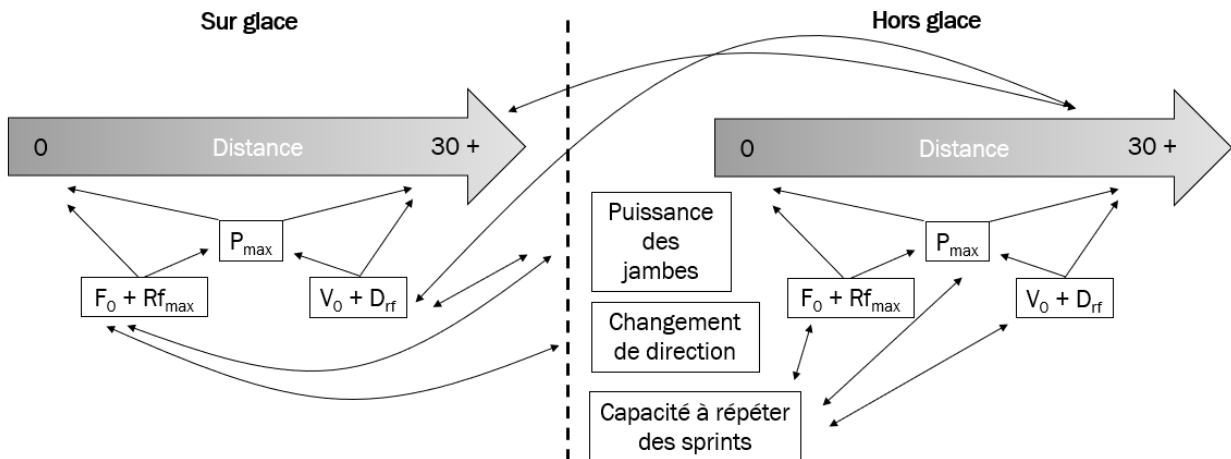


Figure 11. – Associations entre les paramètres hors glace et sur glace du profil force-vitesse à la conclusion de la thèse.

6.3. Profil force-vitesse et maturation physique

L'adolescence constitue une période critique dans le processus de développement des jeunes joueurs de hockey. En pleine puberté, ces derniers subissent de multiples transformations physiques et physiologiques susceptibles d'influencer leur performance sur la glace. Les différentes composantes du sprint et du profil F-V horizontal n'évoluent pas de façon linéaire au cours de la puberté (Fernández-Galván et al., 2022; Meyers et al., 2017). L'objectif de cette section était donc d'évaluer les différences entre les variables du profil F-V de patinage chez de jeunes joueurs de hockey élités à différents stades de maturation physique. L'hypothèse posait que les différences observées en patinage seraient comparables à celles rapportées par Fernández-Galván et al. (2022). En comparant les profils, il a été observé que les différences entre F_0 aux différents stades de maturité s'accroissaient substantiellement après l'atteinte du pic de croissance comparativement au début du processus de maturation physique. À l'inverse, les différences entre V_0 restaient constantes à chaque stade du processus. Pour les intervenant(e)s, ces résultats contribuent à une meilleure interprétation du profil F-V de patinage et à l'identification des qualités neuromusculaires à prioriser durant l'adolescence. Le développement de la capacité à générer de la force à vitesse élevée par des exercices de pliométrie ou de sprints, ainsi que l'amélioration de la technique de patinage, devrait être priorisé au début du processus

de maturation physique. À l'inverse, l'amélioration des capacités d'accélération et de la génération de force dans le plan horizontal par des exercices comme les sprints résistés devrait être priorisée seulement après l'atteinte du pic de croissance.

Dans la section précédente, il a été observé que les filles semblaient présenter un profil davantage orienté vers la force que les garçons. Puisque les filles étaient plus âgées que les garçons, il a été suggéré que les écarts de maturation physique puissent expliquer ces différences. Les résultats de la présente section appuient cette hypothèse alors que les capacités d'accélération c.-à-d. le temps 0-10m et F_0 , semblent se développer de manière plus marquée après l'atteinte du pic de croissance chez les garçons. Cette observation est aussi cohérente avec les constats du DLTA et YPD qui préconisent une attention accrue à cette qualité à ce stade de développement (Balyi et al., 2013; Lloyd & Oliver, 2012). L'augmentation de la masse musculaire et, par conséquent, de la section transversale du muscle pourrait expliquer cette tendance (Scott et al., 2021).

À notre surprise, aucune différence n'a été observée entre les variables d'efficacité mécanique c.-à-d. $R_{f_{max}}$ et D_{rf} , selon les stades de maturation physique. En théorie, ces variables reflètent l'efficacité avec laquelle la force est appliquée dans le plan horizontal (Samozino et al., 2016). Les changements métaboliques et neuromusculaires vécus durant l'adolescence sembleraient donc influencer principalement les qualités intrinsèques des muscles c.-à-d. F_0 , V_0 et P_{max} sans impacts sur l'efficacité technique. La forme du devis utilisé pour cette section ne prévoyait pas l'évaluation directe de l'efficacité technique de patinage, celle-ci étant estimée à partir du profil F-V. L'inclusion de mesures cinétiques et cinématiques des phases de course et de glisse du mouvement de patinage avant, obtenues grâce à des systèmes de capture vidéo permettrait de suivre simultanément les variations techniques. Cette avenue constituerait une piste intéressante pour confirmer la validité de la méthode alors que le modèle biomécanique proposé a été remis en question (Ettema, 2024).

6.4. Contributions, limites et perspectives

6.4.1. Contributions de la thèse

Les résultats de cette thèse ont permis de caractériser le profil F-V des joueurs et joueuses de hockey adolescent(e)s élités et de mieux comprendre ses liens avec différents indicateurs de performance afin de faciliter l'interprétation des résultats destinés à être utilisés pour la prescription individualisée d'exercices. Une force de cette thèse réside assurément dans l'inclusion d'un nombre important de participantes dans les deux premières sections (n = 103 au total). Costello et al. (2014) ont démontré la sous-représentation marquée des femmes (entre 20 et 40% selon le thème) dans les travaux de recherche en sciences du sport. Dix ans plus tard, malgré une augmentation notable de la participation féminine au sport, la représentation demeure faible, particulièrement en hockey sur glace, où les publications parues entre 2017 et 2021 incluant partiellement ou exclusivement des femmes ne représentent qu'environ 20% (Paul et al., 2023). Spécifiquement concernant le profil F-V, environ le tiers des études recensées par Baena-Raya et al. (2022) incluaient des participantes. Les protocoles mis en œuvre dans le cadre de cette thèse ont certainement favorisé la participation féminine. Cette inclusion constitue un atout important, considérant que la majorité des recommandations en sciences du sport demeurent fondées sur des résultats issus d'échantillons masculins (Elliott-Sale et al., 2021).

Une seconde force de cette thèse réside dans l'utilisation de méthodes simples et validées pour l'évaluation de la maturité physique chez les joueurs de hockey adolescents élités. Ces méthodes développées dans les années 1990 sont clairement décrites dans le DLTA (Balyi et al., 2013), mais demeurent peu exploitées dans le contexte de hockey sur glace. Très récemment, une étude rétrospective menée sur 20 ans auprès de 217 joueurs suédois ayant fait partie de l'équipe nationale M16 a mis en évidence l'importance de considérer la maturation physique des joueurs durant l'adolescence (Niklasson et al., 2024). Lorsque les chercheurs ont examiné la réussite au niveau junior, 30% des joueurs présentaient une maturation hâtive, contre seulement 19% avec une maturation tardive. En revanche, à l'âge adulte, 40% des joueurs avec une maturation tardive ont accédé à la LNH contre seulement 25% pour les joueurs ayant eu une maturation hâtive. Cette observation est importante puisqu'elle démontre la difficulté à prédire

le parcours vers le plus haut niveau en hockey sur glace. Un athlète perçu comme ayant un potentiel limité à l'adolescence peut très certainement atteindre la LNH à l'âge adulte. Il convient donc de lui offrir un encadrement et un entraînement adaptés à son profil biologique tout au long de son développement.

6.4.2. Limites

Les avancées de cette thèse s'accompagnent également de certaines limites qui méritent d'être prises en considération. Premièrement, la nature observationnelle des projets ne permet pas d'établir de relations causales claires entre les différentes variables étudiées. L'objectif principal était de nature appliquée et visait à faciliter l'interprétation du profil F-V de patinage des jeunes hockeyeurs et hockeyeuses. Une attention particulière a été portée aux variables couramment considérées par les intervenant(e)s sur le terrain c.-à.-d., les liens avec les capacités anaérobies, le transfert des capacités hors glace aux habiletés de patinage et l'effet de la maturité physique. Le modèle de recherche appliquée en science du sport proposé par Bishop (2008) illustre bien l'apport de devis observationnels dans les différentes étapes menant à l'implantation efficace d'approches innovantes en sciences du sport. Ce modèle débute par une phase descriptive visant à cerner plus clairement une problématique donnée. Au commencement des travaux de cette thèse, les connaissances disponibles sur le profil F-V de patinage chez les joueurs et joueuses de hockey étaient très limitées. Cette thèse aura permis, en examinant les associations avec les variables identifiées, de mieux définir les différents déterminants de la performance en hockey sur glace pouvant être reliés à la vitesse de patinage en ligne droite décrite par le profil F-V. Or, l'effet de l'entraînement des composantes hors glace sur l'amélioration des paramètres du profil F-V de patinage demeure à être vérifié expérimentalement.

Une seconde limite réside dans les critiques émergentes à l'égard du modèle biomécanique utilisé pour la description des profils F-V verticaux et horizontaux (Samozino et al., 2021; Samozino et al., 2012). Bobbert et al. (2023) ont examiné, au moyen de diverses simulations par ordinateurs, la capacité du profil F-V vertical à représenter les caractéristiques F-V intrinsèques des muscles telles que décrites par Hill (1938). Leurs simulations ont montré que le travail effectué durant la phase de poussée du saut ne dépend pas de la vitesse moyenne

observée pendant l'extension des MI. Pour des vitesses moyennes équivalentes, les jambes peuvent produire moins de travail effectif que lors d'une contraction isocinétique. En somme, les calculs nécessaires pour établir les paramètres du profil F-V vertical n'apportent aucune valeur ajoutée au simple traçage de la hauteur de saut ou la vitesse d'envol en rapport avec les charges externes utilisées (Bobbert et al. 2023). Les critiques émises par Ettema (2024) à l'égard du profil F-V horizontal sont similaires de nature similaire. Il insiste sur quatre points en particulier : 1- le profil F-V décrit-il les capacités de l'athlète ou son comportement?, 2- les intervenant(e)s ont-ils réellement besoin d'une description aussi détaillée des capacités mécaniques au sprint?, 3- le S_{fvopt} constitue-t-il un indicateur pertinent pour la prescription d'exercice? et 4- peut-on modifier F_0 ou V_0 sans altérer P_{max} ? Contrairement à Bobbert et al. (2023), l'auteur ne s'appuie sur aucune simulation pour justifier ou supporter les questions soulevées. Néanmoins, il émet des recommandations similaires, suggérant que l'utilisation de temps de références pour l'accélération et la vitesse ou la comparaison directe des courbes de vitesse seraient des solutions plus simples et appropriées. Dans tous les cas, l'un des principaux objectifs du profil F-V demeure de faciliter et d'améliorer le processus d'individualisation de l'entraînement en résistance. Comme mentionné précédemment, la méthode a démontré son utilité dans divers contextes (Baena-Raya et al., 2022), ce qui justifie les investigations menées dans cette thèse. Les solutions proposées par les critiques du modèle doivent encore être opérationnalisées et validées empiriquement.

6.4.3. Perspectives scientifiques

Un des principaux défis associés à l'utilisation du profil F-V horizontal réside dans l'interprétation des résultats par les intervenant(e)s sur le terrain pour apporter des modifications concrètes au plan d'entraînement. Les travaux de cette thèse ont permis d'identifier des relations entre plusieurs tests couramment utilisés par les intervenant(e)s sur le terrain et les différents paramètres du profil F-V de sprint et de patinage. Cependant, l'application du profil F-V à l'individualisation de l'entraînement n'a pas été examinée dans le cadre de cette thèse, puisqu'elle ne figurait pas parmi les objectifs principaux. Samozino et al. (2021) ont proposé une méthode permettant de calculer S_{fvopt} et établir un FV_{imb} à partir de la P_{max} des athlètes pour une

distance donnée. La difficulté de cette méthode réside dans l'obligation de choisir une distance pour laquelle l'intervenant(e) désire optimiser la performance dans le plan horizontal. Les distances parcourues à haute vitesse sur glace varient constamment selon les contextes et les exigences tactiques des séquences de jeu (Douglas & Kennedy, 2020; Douglas et al., 2022).

Une alternative intéressante à cette méthode est proposée par Hicks et al. (2022). Au lieu de calculer un FV_{imb} , ces chercheurs proposent d'organiser les données sous forme de cadrans (Figure 12C), dont les limites sont déterminées en fonction de la médiane du groupe ou selon des critères définis par l'intervenant(e). Cette organisation en cadrans rend les données de groupes plus lisibles et plus opérationnalisables comparativement à l'illustration traditionnelle utilisée par Samozino et al. (2016), présentée à la Figure 12A. Cette dernière représentation devient rapidement difficile à interpréter lorsqu'il s'agit de comparer simultanément plusieurs athlètes (Figure 12B). L'approche fondée sur les cadrans a le mérite de potentiellement rendre les données du profil F-V plus intuitives et accessibles pour les intervenant(e)s. Elle élimine la nécessité de calculer un S_{fvopt} et pourrait même permettre d'adresser les critiques fondamentales soulevées par Bobbert et al. (2023) et Ettema (2024). Ce système pourrait également être appliqué à des variables de performance simples à mesurer et à interpréter sur le terrain. Cette approche ouvre des perspectives de recherche prometteuses susceptibles d'être explorées comme alternative ou complément au profil F-V. La fiabilité du système, l'inclusion et la gestion de l'erreur de mesure (Figure 12D) et l'évaluation de l'efficacité de cette approche en comparaison à la prescription d'un programme d'entraînement générique représentent autant de pistes de recherche pertinentes.

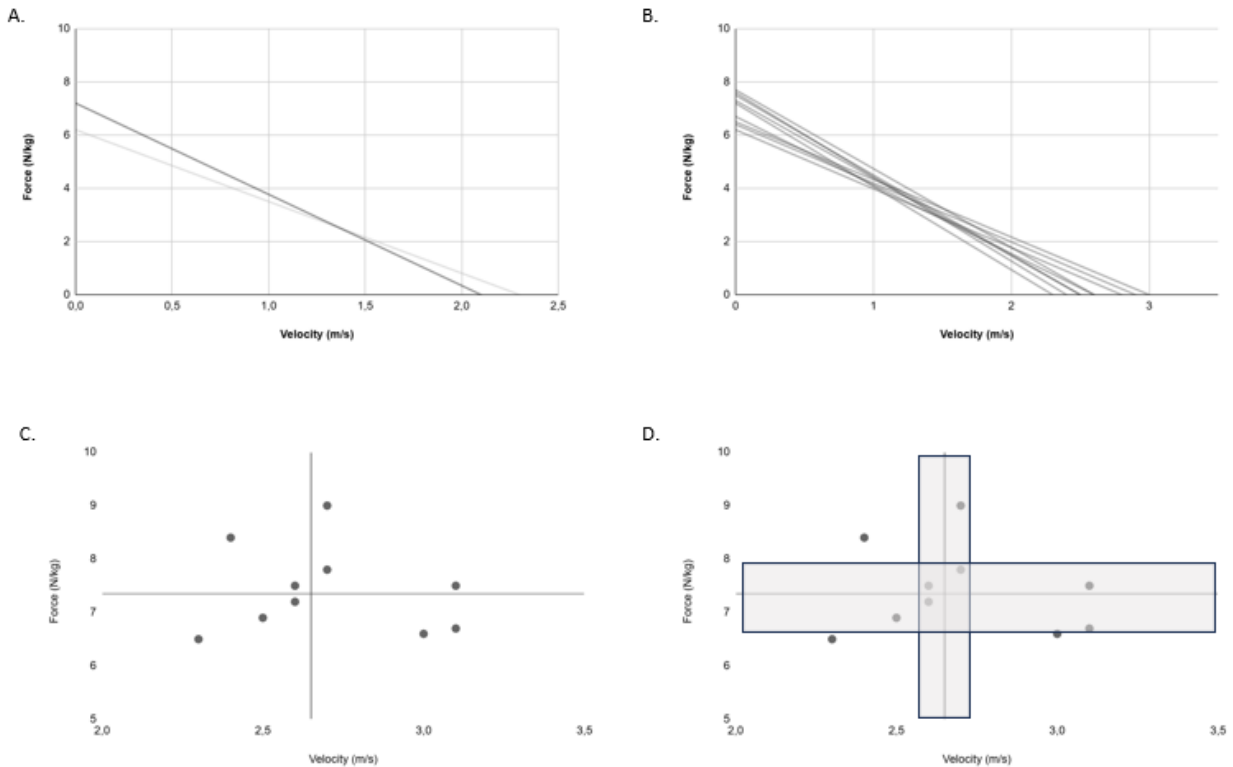


Figure 12. – Organisation sous forme de cadrans des résultats du profil force-vitesse telle que proposée par Hicks et al. (2022). A : Comparaison du profil F-V d'un individu avec le profil optimal, B : Comparaison simultanée des profils F-V de plusieurs athlètes, C : Illustration des profils F-V de plusieurs athlètes sous forme de cadrans, D : Inclusion de l'erreur de mesure dans l'illustration sous forme de cadrans.

6.4.4. Perspectives pratiques

Du point de vue des intervenant(e)s travaillant auprès de jeunes athlètes en pleine croissance, l'utilisation du profil F-V horizontal offre des perspectives d'application particulièrement intéressantes. Pour l'individualisation de l'entraînement, la méthode permet d'identifier les besoins neuromusculaires spécifiques de chaque athlète. Par exemple, un athlète présentant un profil « déficient en force » répondrait plus favorablement à des méthodes d'entraînements misant sur la capacité à accélérer et générer de la force rapidement, avec des temps de contact au sol plus longs (> 120 ms). Des méthodes comme les sprints résistés, effectués aussi bien hors glace (Matthews et al., 2010; Thompson et al., 2022) que sur glace (Dietze-Hermosa et al., 2024),

constituent des exemples d'interventions cohérentes avec cette approche et susceptibles d'améliorer la performance sur glace. Compte tenu de l'augmentation plus marquée observée à la fin de la puberté dans la troisième étude de cette thèse, un entraînement en force impliquant des charges équivalentes à 80 % du 1RM, ou supérieures à 70 % du poids corporel dans le cas des sauts (Jiménez-Reyes et al., 2017), sous supervision adéquate, pourrait également être utilisé pour améliorer la force après le pic de croissance. À l'inverse, un(e) athlète présentant un profil « déficient en vitesse » devrait se concentrer sur des exercices impliquant des vitesses de contraction très élevées et des temps de contacts au sol très courts (< 120 ms) (Jiménez-Reyes et al., 2017). Des exercices pliométriques comme, entre autres, les sauts en profondeur, les sauts de boîte, les sprints lancés ou les sprints avec assistance pourraient s'avérer particulièrement efficaces pour les athlètes présentant ce profil. Selon les résultats de cette thèse, les adolescents en début de puberté pourraient répondre plus favorablement à ce type d'entraînement.

En plus de fournir un aperçu rapide et général des capacités neuromusculaires en vue de l'individualisation de l'entraînement, le profil F-V horizontal peut constituer un outil pertinent pour le suivi et l'ajustement de la charge d'entraînement, dans le but d'optimiser la performance et de prévenir les blessures au fil de la saison. Les études de cas de Mendiguchia et al. (2016) ont permis d'observer des variations importantes de F_0 avant et après une blessure aux ischio-jambiers chez des sprinteurs élites. Ces variations notables de F_0 pourraient permettre aux intervenant(e)s de repérer rapidement les athlètes nécessitant un ajustement du volume d'entraînement. Étant dérivé du sprint, le profil F-V peut facilement être mesuré à intervalles réguliers au cours de la saison, notamment à la fin des échauffements. Au plus haut niveau, ces observations prennent une importance accrue, puisque plusieurs études démontrent la possibilité de déterminer le profil F-V d'athlètes à partir de systèmes de localisation portés par les athlètes pour le suivi de la charge d'entraînement (Alonso-Callejo et al., 2024; Clavel et al., 2022; Hoppe et al., 2018). Ces systèmes étant désormais largement répandus dans plusieurs sports de haut niveau (Cummins et al., 2013), les données récoltées pourraient être analysées sous la loupe du profil F-V horizontal afin d'améliorer la prise de décisions des intervenant(e)s.

Enfin, le profil F-V peut également contribuer à orienter les décisions relatives à la position optimale du joueur ou de la joueuse sur le terrain ou la glace. Dans la majorité de sports collectifs,

les profils et capacités physiques des joueurs et joueuses varient grandement en fonction de leurs responsabilités sur le jeu (Ben Hassen et al., 2023; Haugen et al., 2020; Hicks et al., 2022; Ransdell et al., 2013; Sheppard et al., 2009). Ces différences se reflètent également dans les caractéristiques mécaniques décrites par le profil F-V vertical ou horizontal. Par exemple, les attaquants ont généralement une P_{max} et une V_0 plus élevées que les défenseurs au soccer (Ben Hassen et al., 2023). De même, au football américain, les receveurs affichent des valeurs plus élevées pour ces deux composantes comparativement aux joueurs défensifs et aux joueurs de ligne (Hicks et al., 2022). En somme, la méthode du profil F-V offre plusieurs perspectives appliquées intéressantes et concrètes pour les intervenant(e)s sur le terrain.

6.5. Conclusion

Cette thèse facilite l'interprétation du profil F-V de patinage pour les intervenant(e)s désireux/désireuses d'utiliser cette méthode pour individualiser l'entraînement des joueurs et des joueuses de hockey adolescent(e)s élites. En plus de présenter les liens entre le profil F-V horizontal et différents paramètres pouvant influencer les choix à l'entraînement, ce travail prend également en compte les différences potentielles entre les garçons et les filles. Premièrement, les composantes du profil F-V au sprint sont associées à la capacité à répéter des sprints. L'application de force à haute vitesse dans le plan horizontal semble déterminante chez les garçons et les filles. Chez ces dernières, la capacité d'appliquer de la force à basse vitesse semble aussi jouer un rôle clé. Deuxièmement, une bonne préparation physique à l'adolescence devrait favoriser la maximisation des différentes caractéristiques du profil F-V de patinage. De plus, les filles tendent à présenter un profil davantage axé sur la force comparativement aux garçons. Finalement, les caractéristiques du profil F-V de patinage évoluent à des rythmes différents en fonction du niveau de maturation physique des garçons. Les caractéristiques associées à l'accélération sur la glace présentent des différences accrues après l'atteinte du pic de croissance alors que les différences entre les caractéristiques associées à la vitesse semblent constantes entre les différents stades de maturation.

Le profil F-V horizontal est un outil très attrayant pour les intervenant(e)s en raison de sa capacité à dresser rapidement un portrait des capacités neuromusculaires des athlètes. Malgré

les récentes critiques, il demeure un indicateur de performance pertinent dans le contexte des joueurs et des joueuses de hockey adolescent(e)s élites. Il peut être utilisé régulièrement au cours les différentes périodes d'entraînement avec des impacts minimaux sur la charge d'entraînement des athlètes. Pour avoir un impact réel dans le développement des jeunes athlètes, la méthode repose largement sur l'implication concertée des différent(e)s acteurs/actrices du milieu sportif. D'un côté, les intervenant(e)s doivent faire preuve de rigueur dans la planification des évaluations, l'interprétation des résultats et leur présentation aux athlètes. De l'autre, les chercheurs et chercheuses doivent continuer à explorer des approches visant à simplifier l'analyse des capacités métaboliques et neuromusculaires des athlètes. Les futures recherches sur le profil F-V horizontal doivent porter sur la validation d'indicateurs clés simples et migrer vers des devis expérimentaux ou quasi expérimentaux permettant de démontrer les bénéfices de l'individualisation de l'entraînement neuromusculaire par rapport à la prescription d'un entraînement générique.

Références bibliographiques

- Alba-Jiménez, C., Moreno-Doutres, D., & Peña, J. (2022). Trends Assessing Neuromuscular Fatigue in Team Sports: A Narrative Review. *Sports*, *10*(3), 33.
- Albaladejo-Saura, M., Vaquero-Cristóbal, R., González-Gálvez, N., & Esparza-Ros, F. (2021). Relationship between biological maturation, physical fitness, and kinanthropometric variables of young athletes: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(1), 328.
- Allard, P., Martinez, R., Deguire, S., & Tremblay, J. (2022). In-season session training load relative to match load in professional ice hockey. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *36*(2), 486-492.
- Alonso-Callejo, A., García-Unanue, J., Guitart-Trench, M., Majano, C., Gallardo, L., & Felipe, J. L. (2024). Validity and reliability of the acceleration-speed profile for assessing running kinematics' variables derived from the force-velocity profile in professional soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *38*(3), 563-570.
- Baena-Raya, A., García-Mateo, P., García-Ramos, A., Rodríguez-Pérez, M. A., & Soriano-Maldonado, A. (2022). Delineating the potential of the vertical and horizontal force-velocity profile for optimizing sport performance: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*, *40*(3), 331-344.
- Baena-Raya, A., Soriano-Maldonado, A., Conceição, F., Jiménez-Reyes, P., & Rodríguez-Pérez, M. A. (2021). Association of the vertical and horizontal force-velocity profile and acceleration with change of direction ability in various sports. *European Journal of Sport Science*, *21*(12), 1659-1667.
- Balsalobre-Fernández, C., Santos-Concejero, J., & Grivas, G. V. (2016). Effects of strength training on running economy in highly trained runners: a systematic review with meta-analysis of controlled trials. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *30*(8), 2361-2368.
- Balyi, I., Way, R., & Higgs, C. (2013). *Long-term athlete development*. Human Kinetics.
- Barrera-Domínguez, F. J., Almagro, B. J., Sáez de Villarreal, E., & Molina-López, J. (2023). Effect of individualised strength and plyometric training on the physical performance of basketball players. *European Journal of Sport Science*, *23*(12), 2379-2388.
- Ben Hassen, D., Zghal, F., Peyrot, N., Samozino, P., Rebai, H., & Rahmani, A. (2023). Jump and sprint force velocity profile of young soccer players differ according to playing position. *Journal of Sports Sciences*, *41*(21), 1915-1926.
- Berenbaum, S. A., Beltz, A. M., & Corley, R. (2015). The importance of puberty for adolescent development: conceptualization and measurement. *Advances in Child Development and Behavior*, *48*, 53-92.
- Bishop, D. (2008). An applied research model for the sport sciences. *Sports Medicine*, *38*(3), 253-263.
- Bishop, D., Girard, O., & Mendez-Villanueva, A. (2011) Repetead-sprint ability – Part II: Recommendations for training. *Sports Medicine*, *41*(9), 741-756.
- Blondel, N., Berthoin, S., Billat, V., & Lensel, G. (2001). Relationship between run times to exhaustion at 90, 100, 120, and 140% of vV O₂max and velocity expressed relatively to

- critical velocity and maximal velocity. *International Journal of Sports Medicine*, 22(01), 27-33.
- Bobbert, M. F., Lindberg, K., Bjørnsen, T., Solberg, P., & Paulsen, G. (2023). The force–velocity profile for jumping: what it is and what it is not. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 55(7), 1241.
- 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. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(6), 1619-1628.
- Bournival, M., Martini, G., Trudeau, F., & Lemoyne, J. (2023). The science and art of testing in ice hockey: a systematic review of twenty years of research. *Frontiers in Sports and Active Living*, 5.
- Bracko, M. R. (2001). On-ice performance characteristics of elite and non-elite women's ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 15(1), 42-47.
- 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.
- Buchheit, M., Hader, K., & Mendez-Villanueva, A. (2012). Tolerance to high-intensity intermittent running exercise: do oxygen uptake kinetics really matter? *Frontiers in Physiology*, 3, 406.
- Buchheit, M., & Mendez-Villanueva, A. (2014). Changes in repeated-sprint performance in relation to change in locomotor profile in highly-trained young soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 32(13), 1309-1317.
- Budarick, A. R., Shell, J. R., Robbins, S. M., Wu, T., Renaud, P. J., & Pearsall, D. J. (2020). Ice hockey skating sprints: run to glide mechanics of high calibre male and female athletes. *Sports Biomechanics*, 19(5), 601-617.
- Bundle, M. W., Hoyt, R. W., & Weyand, P. G. (2003). High-speed running performance: a new approach to assessment and prediction. *Journal of Applied Physiology*, 95(5), 1955-1962.
- Burr, J. F., Jamnik, R. K., Baker, J., Macpherson, A., Gledhill, N., & McGuire, E. (2008). Relationship of physical fitness test results and hockey playing potential in elite-level ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(5), 1535-1543.
- Byrkjedal, P. T., Luteberget, L. S., Bjørnsen, T., Ivarsson, A., & Spencer, M. (2022). Simulated game-based ice hockey match design (scrimmage) elicits greater intensity in external load parameters compared with official matches. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4.
- Carey, D. G., Drake, M. M., Pliego, G. J., & Raymond, R. L. (2007). Do hockey players need aerobic fitness? Relation between VO₂max and fatigue during high-intensity intermittent ice skating. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(3), 963-966.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011) Developing maximal neuromuscular power part 1: Biological basis of maximal power production. *Sports Medecine*, 41(1), 17-38.
- Chiarlitti, N. A., Crozier, M., Insogna, J. A., Reid, R. E., & Delisle-Houde, P. (2021). Longitudinal physiological and fitness evaluations in elite ice hockey: a systematic review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(10), 2963-2979.
- Clavel, P., Leduc, C., Morin, J. B., Owen, C., Samozino, P., Peeters, A., ... & Lacombe, M. (2022). Concurrent validity and reliability of sprinting force–velocity profile assessed with GPS devices in elite athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(10), 1527-1531.

- Cohen, J. N., Thompson, K. M., Jamnik, V. K., Gledhill, N., & Burr, J. F. (2022). Relationship of fitness combine results and national hockey league performance: a 25-year analysis. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *17*(6), 908-916.
- Comfort, P., Thomas, C., Dos'Santos, T., Jones, P. A., Suchomel, T. J., & McMahon, J. J. (2018). Comparison of methods of calculating dynamic strength index. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *13*(3), 320-325.
- Cordingley, D. M., Sirant, L., MacDonald, P. B., & Leiter, J. R. (2019). Three-year longitudinal fitness tracking in top-level competitive youth ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *33*(11), 2909-2912.
- Costello, J. T., Bieuzen, F., & Bleakley, C. M. (2014). Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine Research? *European Journal of Sport Science*, *14*(8), 847-851.
- 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.
- Cross, M. R., Samozino, P., Brown, S. R., & Morin, J.-B. (2018). 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.
- Cross, M. R., Tinwala, F., Lenetsky, S., Samozino, P., Brughelli, M., & Morin, J.-B. (2017). Determining friction and effective loading for sled sprinting. *Journal of Sports Sciences*, *35*(22), 2198-2203.
- Cummins, C., Orr, R., O'Connor, H., & West, C. (2013). Global positioning systems (GPS) and microtechnology sensors in team sports: a systematic review. *Sports Medicine*, *43*(10), 1025-1042.
- 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.
- Daigle, A.-P., Bélanger, S., Brunelle, J.-F., & Lemoyne, J. (2022). Functional performance tests, on-ice testing and game performance in elite junior ice hockey players. *Journal of Human Kinetics*, *83*(1), 245-256.
- Dalleck, L. C., Haney, D. E., Buchanan, C. A., & Weatherwax, R. M. (2016). Does a personalised exercise prescription enhance training efficacy and limit training unresponsiveness? A randomised controlled trial. *Journal of Fitness Research*, *5*(3), 15-27.
- Delisle-Houde, P., Chiarlitti, N. A., Reid, R. E., & Andersen, R. E. (2019). Predicting on-ice skating using laboratory-and field-based assessments in college ice hockey players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *14*(9), 1184-1189.
- Devismes, M., Aeles, J., Philips, J., & Vanwanseele, B. (2021). Sprint force-velocity profiles in soccer players: impact of sex and playing level. *Sports Biomechanics*, *20*(8), 947-957.
- Dietze-Hermosa, M. S., Montalvo, S., Gonzalez, M. P., & Dorgo, S. (2024). The Impact of an 8-Week Resisted Sprint Training Program on Ice Skating Performance in Male Youth Ice Hockey Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *38*(5), 957-965.
- Donti, O., Konrad, A., Panidi, I., Dinas, P. C., & Bogdanis, G. C. (2022). Is there a "window of opportunity" for flexibility development in youth? A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, *8*.

- Douglas, A. S., & Kennedy, C. R. (2020). Tracking in-match movement demands using local positioning system in world-class men's ice hockey. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(3), 639-646.
- Douglas, A. S., Rotondi, M. A., Baker, J., Jamnik, V. K., & Macpherson, A. K. (2022). A comparison of on-ice external load measures between subelite and elite female ice hockey players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(7), 1978-1983.
- Durocher, J. J., Jensen, D. D., Arredondo, A. G., Leetun, D. T., & Carter, J. R. (2008). Gender differences in hockey players during on-ice graded exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(4), 1327-1331.
- Edwards, T., Banyard, H. G., Piggott, B., Haff, G. G., & Joyce, C. (2022). Reliability and minimal detectable change of sprint times and force-velocity-power characteristics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(1), 268-272.
- Eihara, Y., Takao, K., Sugiyama, T., Maeo, S., Terada, M., Kanehisa, H., & Isaka, T. (2022). Heavy resistance training versus plyometric training for improving running economy and running time trial performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine - Open*, 8.
- Elliott-Sale, K. J., Minahan, C. L., de Jonge, X. A. J., Ackerman, K. E., Sipilä, S., Constantini, N. W., Lebrun, C. M., & Hackney, A. C. (2021). Methodological considerations for studies in sport and exercise science with women as participants: a working guide for standards of practice for research on women. *Sports Medicine*, 51(5), 843-861.
- Ettema, G. (2024). The Force–Velocity Profiling Concept for Sprint Running Is a Dead End. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 19(1), 88-91.
- Falk, B., Weinstein, Y., Dotan, R., Abramson, D., Mann-Segal, D., & Hoffman, J. (1996). A treadmill test of sprint running. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 6(5), 259-264.
- Ferland, P.-M., Marcotte-L'Heureux, V., Roy, P., Carey, V. D., Charron, J., Lagrange, S., Leone, M., & Comtois, A. S. (2021). Maximal oxygen consumption requirements in professional North American ice hockey. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(6), 1586-1592.
- Fernández-Galván, L. M., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., & Casado, A. (2022). Sprint Performance and Mechanical Force-Velocity Profile among Different Maturational Stages in Young Soccer Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1412.
- Feser, E., Lindley, K., Clark, K., Bezodis, N., Korfist, C., & Cronin, J. (2022). Comparison of two measurement devices for obtaining horizontal force-velocity profile variables during sprint running. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 17(6), 1455-1461.
- Ford, P., De Ste Croix, M., Lloyd, R., Meyers, R., Moosavi, M., Oliver, J., Till, K., & Williams, C. (2011). The long-term athlete development model: Physiological evidence and application. *Journal of Sports Sciences*, 29(4), 389-402.
- Gäbler, M., Prieske, O., Hortobágyi, T., & Granacher, U. (2018). The effects of concurrent strength and endurance training on physical fitness and athletic performance in youth: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, 9, 1057.
- Gamble, A. S., Bigg, J. L., Nyman, D. L., & Spriet, L. L. (2022). Local positioning system-derived external load of female and male varsity ice hockey players during regular season games. *Frontiers in Physiology*, 13.
- Gastin, P.B. (2001) Energy System Interaction and Relative Contribution During Maximal Exercise. *Sports Medicine*, 31(10), 725-741.

- Geithner, C. A. (2009). Predicting performance in women's ice hockey. *Advances in strength and conditioning research*. New York, NY: Nova Science Publishers, 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. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 20(3), 500-505.
- Girard, O., Mendez-Villanueva, A., & Bishop, D. (2011) Repeated-sprint ability – part I: factors contributing to fatigue. *Sports Medicine*, 41(8), 673-694.
- Glaser, M., Janot, J., Geiger, K., Baugher, A., & Bowker, T. (2020). The Effect of BungeeSkateTM Training vs Lateral Plyometric Jumps on On-Ice Acceleration and Speed. *Journal of Sport and Human Performance*, 8(1).
- Haugen, T. A., Breitschädel, F., & Seiler, S. (2020). Sprint mechanical properties in soccer players according to playing standard, position, age and sex. *Journal of Sports Sciences*, 38(9), 1070-1076.
- Haukali, E., & Tjelta, L. I. (2016). Relationship between off-season changes in power and in-season changes in skating speed in young ice hockey players. *International Journal of Applied Sports Sciences*, 28(2), 111-122.
- Heller, J., Vodicka, P., & Janek, M. (2019). Anaerobic performance in 30s Wingate test as one of the possible criteria for selection Czech hockey players into National Hockey League. *Physical Activity Review*(7), 57-62.
- 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, 81-88.
- Hermosilla-Palma, F., Loro-Ferrer, J. F., Merino-Muñoz, P., Gómez-Álvarez, N., Bustamante-Garrido, A., Cerda-Kohler, H., Portes-Junior, M., & Aedo-Muñoz, E. (2022). Changes in the mechanical properties of the horizontal force-velocity profile during a repeated sprint test in professional soccer players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 704.
- Hicks, D. S., Drummond, C., Williams, K. J., Pickering, C., & van den Tillaar, R. (2022). Individualization of training based on sprint force-velocity profiles: a conceptual framework for biomechanical and technical training recommendations. *Strength & Conditioning Journal*, 45(6), 711-725.
- Hicks, D. S., Schuster, J. G., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2020). Improving mechanical effectiveness during sprint acceleration: practical recommendations and guidelines. *Strength & Conditioning Journal*, 42(2), 45-62.
- 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.
- 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).
- Huard Pelletier, V., & Lemoyne, J. (2020). Exploring the impacts of early sport specialization among Québec's adolescent hockey players. *Journal of Expertise*, 3(1), 41-54.
- 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(09), 699-704.
- 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(4), 478-485.
- 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.
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., & Morin, J.-B. (2019). Optimized training for jumping performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics. *PLoS One*, 14(5).
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Pareja-Blanco, F., Conceição, F., Cuadrado-Peñafiel, V., González-Badillo, J. J., & Morin, J.-B. (2017). Validity of a simple method for measuring force-velocity-power profile in countermovement jump. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(1), 36-43.
- Keiner, M., Kierot, M., Stendahl, M., Brauner, T., & Suchomel, T. J. (2024). Maximum Strength and Power as Determinants of Match Skating Performance in Elite Youth Ice Hockey Players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 38(6), 1090-1094.
- Kierot, M., Stendahl, M., Warneke, K., Wirth, K., Konrad, A., Brauner, T., & Keiner, M. (2024). Maximum strength and power as determinants of on-ice sprint performance in elite U16 to adult ice hockey players. *Biology of Sport*, 41(1), 245-252.
- Kokinda, M., Kandráč, R., & Čech, P. (2020). Analysis of age-related changes of anaerobic power in ice hockey. *Journal of Physical Education and Sport*, 20(6), 3546-3552.
- Kyles, A., Oliver, J. L., Cahill, M. J., Lloyd, R. S., & Pedley, J. (2023). Linear and change of direction repeated sprint ability tests: a systematic review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 37(8), 1703-1717.
- Llanos-Lagos, C., Ramirez-Campillo, R., Moran, J., & Sáez de Villarreal, E. (2024a) The Effect of Strength Training Methods on Middle-Distance and Long-Distance Runners' Athletic Performance: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sports Medicine*, 54(7), 1801-1833.
- Llanos-Lagos, C., Ramirez-Campillo, R., Moran, J., & Sáez de Villarreal, E. (2024b) Effect of Strength Training Programs in Middle- and Long-Distance Runners' Economy at Different Running Speeds: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sports Medicine*, 54(4), 895-932.
- Lahti, J., Huuhka, T., Romero, V., Bezodis, I., Morin, J.-B., & Häkkinen, K. (2020). Changes in sprint performance and sagittal plane kinematics after heavy resisted sprint training in professional soccer players. *PeerJ*, 8.
- Lahti, J., Jiménez-Reyes, P., Cross, M. R., Samozino, P., Chassaing, P., Simond-Cote, B., Ahtiainen, J. P., & Morin, J.-B. (2020). Individual sprint force-velocity profile adaptations to in-season assisted and resisted velocity-based training in professional rugby. *Sports*, 8(5), 74.
- Lariviere, G. (1972). *Comparison Of The Efficiency Of Six Different Patterns Of Intermittent Ice Hockey Skating* [Dissertation, Florida State University] ProQuest Dissertations & Theses Global Closed Collection.

- Lariviere, G. (1968). *Relationship between skating velocity and length of stride, angle of forward inclination and angle of propulsion*. [Thesis, Oregon, Department of Physical Education].
- Leiter, J. R., Cordingley, D. M., & MacDonald, P. B. (2018). Development of anaerobic fitness in top-level competitive youth ice hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(9), 2612-2615.
- Leonetti, M., & Barkley, H. (1993). Hockey's golden era: stars of the original six. *Firefly Books – Warwick Publishing*
- Lindberg, K., Lohne-Seiler, H., Fosstveit, S. H., Sibayan, E. E., Fjeller, J. S., Løvold, S., Kolnes, T., Vårvik, F. T., Berntsen, S., & Paulsen, G. (2022). Effectiveness of individualized training based on force–velocity profiling on physical function in older men. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 32(6), 1013-1025.
- Lloyd, R. S., & Oliver, J. L. (2012). The youth physical development model: A new approach to long-term athletic development. *Strength & Conditioning Journal*, 34(3), 61-72.
- Malina, R. M., & e Silva, M. J. C. (2017). Physical activity, growth, and maturation of youth. Dans: H. C. Lukaski (Ed.), *Body Composition* (1st ed., pp. 69-88). CRC Press.
- Manzer, S., Mattes, K., & Holländer, K. (2016). Kinematic Analysis of Sprinting Pickup Acceleration versus Maximum Sprinting Speed. *Biology of Exercise*, 12(2).
- Marier, A., Couture-Légaré, & Pilote, É. (2019). Développement du talent sportif. https://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/publications/Developpement-du-talent_sportif.pdf
- Marier, A., & Pilote, É. (2019). Fondements de la pratique sportive au Québec. https://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/publications/Fondement-pratique-sportive-au-Quebec.pdf
- Martel, J. (2020). Origins of Ice Hockey. In *The Canadian Encyclopedia*. <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/origins-of-ice-hockey>
- Martini, G., Brunelle, J.-F., Lalande, V., & Lemoyne, J. (2022). Elite adolescent ice hockey players: analyzing associations between anthropometry, fitness, and on-ice performance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 8952.
- 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. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 2883-2887.
- McMahon, T. A. (1984). *Muscles, reflexes, and locomotion* (Vol. 10). Princeton University Press.
- Mendez-Villanueva, A., Hamer, P., & Bishop, D. (2008). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *European Journal of Applied Physiology*, 103(4), 411-419.
- Mendiguchia, J., Edouard, P., Samozino, P., Brughelli, M., Cross, M., Ross, A., Gill, N., & Morin, J.-B. (2016). Field monitoring of sprinting power–force–velocity profile before, during and after hamstring injury: two case reports. *Journal of Sports Sciences*, 34(6), 535-541.
- Meyers, R. W., Oliver, J. L., Hughes, M. G., Lloyd, R. S., & Cronin, J. B. (2017). Influence of age, maturity, and body size on the spatiotemporal determinants of maximal sprint speed in boys. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(4), 1009-1016.
- Miller, R. H., Umberger, B. R., & Caldwell, G. E. (2012). Limitations to maximum sprinting speed imposed by muscle mechanical properties. *Journal of Biomechanics*, 45(6), 1092-1097.

- Mills, K., Baker, D., Pacey, V., Wollin, M., & Drew, M. K. (2017). What is the most accurate and reliable methodological approach for predicting peak height velocity in adolescents? A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport, 20*(6), 572-577.
- Montgomery, D. L. (1988). Physiology of ice hockey. *Sports Medicine, 5*, 99-126.
- Montgomery, D. L. (2006). Physiological profile of professional hockey players-a longitudinal comparison. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 31*(3), 181-185.
- 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*(02), 158-165.
- 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.
- Morin, J.-B., Samozino, P., Bonnefoy, R., Edouard, P., & Belli, A. (2010). Direct measurement of power during one single sprint on treadmill. *Journal of Biomechanics, 43*(10), 1970-1975.
- Morin, J.-B., Samozino, P., Murata, M., Cross, M. R., & Nagahara, R. (2019). A simple method for computing sprint acceleration kinetics from running velocity data: Replication study with improved design. *Journal of Biomechanics, 94*, 82-87.
- Myrvang, S., & van den Tillaar, R. (2024). The Longitudinal Effects of Resisted and Assisted Sprint Training on Sprint Kinematics, Acceleration, and Maximum Velocity: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine - Open, 10*.
- Niklasson, E., Lindholm, O., Rietz, M., Lind, J., Johnson, D., & Lundberg, T. R. (2024). Who reaches the NHL? A 20-year retrospective analysis of junior and adult ice hockey success in relation to biological maturation in male Swedish players. *Sports Medicine, 54*(5), 1317-1326.
- Novák, D., Lipinska, P., Rocznik, 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.
- Nuzzo, J. L. (2024). Sex differences in skeletal muscle fiber types: A meta-analysis. *Clinical Anatomy, 37*(1), 81-91.
- Ogden, J., & Edwards, J. R. (2016). Are Canadian stakeholders resting on their laurels? A comparative study of the athlete pathway through the Swedish and Canadian male ice hockey systems. *Journal of Sport Management, 30*(3), 312-328.
- Paul, R. W., Sonnier, J. H., Johnson, E. E., Hall, A. T., Osman, A., Connors, G. M., Freedman, K. B., & Bishop, M. E. (2023). Inequalities in the evaluation of male versus female athletes in sports medicine research: a systematic review. *The American Journal of Sports Medicine, 51*(12), 3335-3342.
- Perez, J., Brocherie, F., Couturier, A., & Guilhem, G. (2022). International matches elicit stable mechanical workload in high-level female ice hockey. *Biology of sport, 39*(4), 857-864.
- Perez, J., Guilhem, G., & Brocherie, F. (2022). Ice hockey forward skating force-velocity profiling using single unloaded vs. multiple loaded methods. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 36*(11), 3229-3233.
- Perez, J., Guilhem, G., & Brocherie, F. (2022). Reliability of the force-velocity-power variables during ice hockey sprint acceleration. *Sports Biomechanics, 21*(1), 56-70.

- Perez, J., Guilhem, G., Hager, R., & Brocherie, F. (2021). 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*, 21(2), 192-203.
- Peterson, B. J., Fitzgerald, J. S., Dietz, C. C., Ziegler, K. S., Ingraham, S. J., Baker, S. E., & Snyder, E. M. (2015). Aerobic capacity is associated with improved repeated shift performance in hockey. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(6), 1465-1472.
- Petré, H., Psilander, N., & Rosdahl, H. (2023). Between-session reliability of strength-and power-related variables obtained during isometric leg press and countermovement jump in elite female ice hockey players. *Sports*, 11(5), 96.
- Pleša, J., Kozinc, Ž., Bishop, C., & Šarabon, N. (2024). Association Between Dynamic Strength Index Derived from Isometric Squat and Squat Jump or Countermovement Jump and Force-Velocity Profile. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 28(1), 57-65.
- Pleša, J., Ujaković, F., Ribič, A., Bishop, C., Šarabon, N., & Kozinc, Ž. (2024). Effectiveness of an Individualized Training Based on Dynamic Strength Index on Sprinting, Jumping and Change of Direction Performance in Basketball Players: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Sports Science & Medicine*, 23(3), 504-514.
- 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.
- Quinney, H., 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.
- Ransdell, L. B., & Murray, T. (2011). A physical profile of elite female ice hockey players from the USA. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(9), 2358-2363.
- 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. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(4), 875-884.
- Renaud, P. J., Robbins, S. M., 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.
- Roczniok, R., Stastny, P., Novak, D., Opath, L., Terbalyan, A., & Musalek, M. (2024). The Relation of On-Ice and Off-Ice Performance at Two Different Performance Levels in Youth Ice-Hockey Players. *Journal of Human Kinetics*, 93, 193-203.
- Roy, X., Gavrilu, S. E., & Sercia, P. (2023). Countermovement Jump Performance and Team Membership of Youth Female and Male Ice Hockey Players. *International Journal of Strength and Conditioning*, 3(1).
- Samozino, P., Edouard, P., Sangnier, S., Brughelli, M., Gimenez, P., & Morin, J.-B. (2014). Force-velocity profile: imbalance determination and effect on lower limb ballistic performance. *International Journal of Sports Medicine*, 35(06), 505-510.
- Samozino, P., Morin, J.-B., Hintzy, F., & Belli, A. (2010). Jumping ability: a theoretical integrative approach. *Journal of Theoretical Biology*, 264(1), 11-18.

- Samozino, P., Peyrot, N., Edouard, P., Nagahara, R., Jimenez-Reyes, P., Vanwanseele, B., & Morin, J. B. (2021). Optimal mechanical force-velocity profile for sprint acceleration performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *32*(3), 559-575.
- 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*(6), 648-658.
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A., & Morin, J.-B. (2012). Optimal force–velocity profile in ballistic. *Medecine & Science in Sports Exercise*, *44*(2), 313-322.
- Scott, K., Howley, E. T., & Quindry, J. (2021). *Exercise physiology: theory and application to fitness and performance*. McGraw-Hill.
- Scott, W., Stevens, J., & Binder–Macleod, S. A. (2001). Human skeletal muscle fiber type classifications. *Physical Therapy*, *81*(11), 1810-1816.
- Secomb, J. L., Dascombe, B. J., & Nimphius, S. (2021). Importance of joint angle-specific hip strength for skating performance in semiprofessional ice hockey athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *35*(9), 2599-2603.
- Seliger, V., Kostka, V., Grušová, D., Kováč, J., Machovcova, J., Pauer, M., Příbylová, A., & Urbankova, R. (1972). Energy expenditure and physical fitness of ice-hockey players. *Internationale Zeitschrift für Angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie*, *30*(4), 283-291.
- Sheppard, J. M., Chapman, D., & Taylor, K.-L. (2011). An evaluation of a strength qualities assessment method for the lower body. *Journal of Australian Strength and Conditioning*, *19*(2), 4-10.
- 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.
- 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.
- Stanton, R., Kean, C. O., & Scanlan, A. T. (2015). My Jump for vertical jump assessment. *British Journal of Sports Medicine*, *49*(17), 1157-1158.
- Stanula, A., & Rocznio, R. (2014). Game intensity analysis of elite adolescent ice hockey players. *Journal of Human Kinetics*, *44*(1), 211-221.
- Stanula, A., Rocznio, 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.
- Stanula, A. J., Gabrys, T. T., Rocznio, R. K., Szmatlan-Gabrys, U. B., Ozimek, M. J., & Mostowik, A. J. (2016). Quantification of the demands during an ice-hockey game based on intensity zones determined from the incremental test outcomes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *30*(1), 176-183.
- Stastny, P., Musalek, M., Rocznio, R., Cleather, D., Novak, D., & Vagner, M. (2023). Testing distance characteristics and reference values for ice-hockey straight sprint speed and acceleration. A systematic review and meta-analyses. *Biology of Sport*, *40*(3), 899-918.

- 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*, 22(7), 874-889.
- Suchomel, T. J., Sole, C. J., Bellon, C. R., & Stone, M. H. (2020). Dynamic strength index: Relationships with common performance variables and contextualization of training recommendations. *Journal of Human Kinetics*, 74(1), 59-70.
- Thieschäfer, L., & Büsch, D. (2022). Development and trainability of agility in youth: A systematic scoping review. *Frontiers in Sports and Active Living*, 4.
- Thompson, K. M., Safadie, A., Ford, J., & Burr, J. F. (2022). Off-ice resisted sprints best predict all-out skating performance in varsity hockey players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(9), 2597-2601.
- Towilson, C., Salter, J., Ade, J. D., Enright, K., Harper, L. D., Page, R. M., & Malone, J. J. (2021). Maturity-associated considerations for training load, injury risk, and physical performance in youth soccer: One size does not fit all. *Journal of Sport and Health Science*, 10(4), 403-412.
- Toyoshima, R., & Sakurai, S. (2016). Kinematic characteristics of high step frequency sprinters and long step length sprinters at top speed phase. *International Journal of Sport and Health Science*, 14, 41-50.
- Twist, P., & Rhodes, T. (1993). Exercise physiology: The bioenergetic and physiological demands of ice hockey. *Strength & Conditioning Journal*, 15(5), 68-70.
- Ufland, P., Ahmaidi, S., & Buchheit, M. (2013). Repeated-sprint performance, locomotor profile and muscle oxygen uptake recovery: effect of training background. *International Journal of Sports Medicine*, 34(10), 924-930.
- Van Praagh, E. (2007). *Physiologie du sport: Enfant et adolescent*. De Boeck Supérieur.
- Vigh-Larsen, J. F., Beck, J. H., Daasbjerg, A., Knudsen, C. B., Kvorning, T., Overgaard, K., Andersen, T. B., & Mohr, M. (2019). Fitness characteristics of elite and subelite male ice hockey players: A cross-sectional study. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 33(9), 2352-2360.
- Vigh-Larsen, J. F., Haverinen, M. T., Panduro, J., Ermidis, G., Andersen, T. B., Overgaard, K., Krustrup, P., Parkkari, J., Avela, J., & Kyröläinen, H. (2020). On-ice and off-ice fitness profiles of elite and U20 male ice hockey players of two different national standards. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(12), 3369-3376.
- Vigh-Larsen, J. F., & Mohr, M. (2024). The physiology of ice hockey performance: An update. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 34(1), e14284.
- Wagner, H., Abplanalp, M., von Duvillard, S. P., Bell, J. W., Taube, W., & Keller, M. (2021). The relationship between on-ice and off-ice performance in elite male adolescent ice hockey players—an observation study. *Applied Sciences*, 11(6), 2724.
- Weakley, J., Black, G., McLaren, S., Scantlebury, S., Suchomel, T. J., McMahon, E., Watts, D., & Read, D. B. (2024). Testing and profiling athletes: recommendations for test selection, implementation, and maximizing information. *Strength & Conditioning Journal*, 46(2), 159-179.
- Weyand, P. G., Lin, J. E., & Bundle, M. W. (2006). Sprint performance-duration relationships are set by the fractional duration of external force application. *American journal of physiology-Regulatory, Integrative and Comparative physiology*, 290(3), R758-R765.

- Wilson, G., Hedberg, A., & Association canadienne de hockey, a. (1976). *Physiology of ice hockey : a report*. C.A.H.A.
- Young, W., Russell, A., Burge, P., Clarke, A., Cormack, S., & Stewart, G. (2008). The use of sprint tests for assessment of speed qualities of elite Australian rules footballers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(2), 199-206.
- Zabaloy, S., Pareja-Blanco, F., Giráldez, J. C., Rasmussen, J. I., & González, J. G. (2020). Effects of individualised training programmes based on the force-velocity imbalance on physical performance in rugby players. *Isokinetics and Exercise Science*, 28(2), 181-190.
- Zeisler, L. (2012). *Historical Dictionary of Ice Hockey*. Scarecrow Press. <http://site.ebrary.com/id/10738581>

Annexe A – Code source pour l’application de traitement des données radar.

```
library(shiny)
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(nlstools)
library(rlang)
library(purrr)
library(tools)
library(lamW)

##### ----- fonction pour nettoyer les-----#####
nettoyerDonnees <- fonction(fichier1){

  #charge le fichier et le transformer pour obtenir données brutes
  myData <- read.table(fichier1, sep="\t",skip = 4)
  colnames(myData) <- c("speed")
  long = (nrow(myData)-1)/46.825
  myData$temps <- seq(from = 0, to = long, by = 1/46.825)
  myData$speed <- gsub(pattern = ",",replacement = ".", x = myData$speed)
  myData$temps <- as.double(myData$temps)
  myData$speed <- as.double(myData$speed)

  #transformer en m/s
  myData$metricspeed <- myData$speed/3.6
  myData$expModel <- 0

  return(myData)
}
```

```
#####-----fit-----#####
```

```
fitGraphique <- fonction(fichier2){
```

```
  myCleanData <- fichier2
```

```
  #replacer la courbe a 0
```

```
  myCleanData$temps <- myCleanData$temps - min(myCleanData$temps)
```

```
  # optimisation de la fonction
```

```
  variablesOptim <- nls(myCleanData$metricspeed~vmax*(1-exp(-(myCleanData$temps-  
deltaTemps)/tau)),myCleanData, start = list(vmax = 7, tau = 1, deltaTemps = 0.2))
```

```
  ns <- coef(variablesOptim)
```

```
  # affichage de la courbe sur le graphique
```

```
  vmax <- as.double(ns[1])
```

```
  tau <- as.double(ns[2])
```

```
  deltaTemps <- as.double(ns[3])
```

```
  myCleanData$temps2 <- myCleanData$temps + deltaTemps
```

```
  #premier model
```

```
  myCleanData$expModel <- predict(variablesOptim)
```

```
  # deuxieme model
```

```
  myCleanData$expModel2 <- vmax*(1-exp(-(myCleanData$temps2-deltaTemps)/tau))
```

```
  #calcul de l'accélération
```

```
  myCleanData$accel <- (vmax/tau)*exp(-(myCleanData$temps-deltaTemps)/tau)
```

```
  return(myCleanData)
```

```
}
```

```

##### ----- fonction pour traiter les donnees-----
#####
traitDonnees <- fonction(dataframe, nom, temperature, pression, poids, taille){
  #creer un nouveau dataframe avec les donnÃ©es
  myData2 <- dataframe

  #transformer texte en double
  taille <- as.double(taille)
  poids <- as.double(poids)
  temperature <- as.double(temperature)
  pression <- as.double(pression)

  #calculer la force horizontale
  myData2$fh <- myData2$accel*poids

  #calculer rho
  rho <- 1.293*pression/760*273/(273+temperature)

  #calculer af
  af <- (0.2025*taille^0.725*poids^0.425)*0.266

  #cd
  cd <- 0.9

  #calculer k
  k <- 0.5*rho*af*cd

  #force air
  myData2$fair <- k*myData2$expModel*myData2$expModel

  #calculer force horizontale totale
  myData2$fhtot <- myData2$fair + myData2$fh
}

```

```

#calculer de façon relative
myData2$fhtotrel <- myData2$fhtot/poids

#calculer puissance horizontale
myData2$phrel <- myData2$fhtotrel * myData2$expModel

#calculer force résultante
myData2$fres <- sqrt(myData2$fhtot^2 + (poids*9.81)^2)

#calculer RF
myData2$rf <- as.numeric(ifelse(myData2$temps < 0.3,"",myData2$fhtot/myData2$fres))

#F0
f0model <- lm(fhtot ~ expModel, myData2)
f0 <- f0model$coefficient[1]
f0 <- round(f0,2)

#F0 relatif
f0rel <- f0/poids
f0rel <- round(f0rel,2)

#Sfv
sfvmodel <- lm(fhtotrel ~ expModel, myData2)
sfv <- sfvmodel$coefficients[2]
sfv <- round(sfv,2)

#V0
v0 <- -f0rel/sfv
v0 <- round(v0,2)

#Pmax
pmax <- f0 * v0 / 4

```

```

pmax <- round(pmax,2)

#pmax relatif
pmaxrel <- pmax/poids
pmaxrel <- round(pmaxrel,2)

#calculer rfmax
rfmax <-max(myData2$rf, na.rm=T)
rfmax <- round(rfmax,2)

#drf
drfmodel <- lm(rf~expModel, myData2)
drf = drfmodel$coefficient[2]
drf <- round(drf,2)

#créer un nouveau dataframe avec valeurs théoriques de SFV
sfvTemporaire <- seq(from = -2, to = -0.2, by = 0.001)
dataTemporaire <-as.data.frame(sfvTemporaire)

#sigma2
dataTemporaire$sigma2 <- dataTemporaire$sfvTemporaire - 2 * 0.0038 * sqrt(-
(pmaxrel/dataTemporaire$sfv))

#sigma1
dataTemporaire$sigma1 <- 24.38 + (2 * sqrt(-pmaxrel *
dataTemporaire$sfvTemporaire))/dataTemporaire$sigma2^2

#vector pour formule de lambert
dataTemporaire$vec <- -exp(-(dataTemporaire$sigma2^2 *
dataTemporaire$sigma1)/(2*sqrt(-pmaxrel*dataTemporaire$sfvTemporaire)))

dataTemporaire$lambert <- lambertW0(dataTemporaire$vec)

```

```

dataTemporaire$temps <- -(dataTemporaire$lambert/dataTemporaire$sigma2) -
(dataTemporaire$sigma1*dataTemporaire$sigma2)/(2*sqrt(-
pmaxrel*dataTemporaire$sfvTemporaire))

```

```

index <- which.min(dataTemporaire$temps)
sfvOptimal <- dataTemporaire$sfvTemporaire[index]
sfvOptimal <- round(sfvOptimal,2)

```

```

#créer le vector avec tous les résultats
donnees <- c(nom,f0,pmax,f0rel,v0,pmaxrel,sfv,rfmax,drf,sfvOptimal)
return(donnees)

```

```

}

```

```

##### -----userinterface----- #####

```

```

ui <- fluidPage(
  #titre de la page
  titlePanel(img(src = "Logo_SCORE.png", height = 120, width = 300)),
  #####-----barre latérale avec infos-----#####
  sidebarLayout(
    sidebarPanel(
      #file input
      fileInput("fichier", "Choisir le fichier .rad à analyser",
        multiple = FALSE,
        accept = "text/plain"
      ),

      #temperature
      textInput("temperature", "Entrez la température lors des tests (celsius) : "),

      #pression atmosphérique

```

```

    textInput("pression", "Entrez la pression atmosphérique lors des tests (mmHg) :
  "),

  #poids
  textInput("poids","Entrez le poids de la personne évaluée (kg)"),

  #taille
  textInput("taille", "Entrez la taille de la personne évaluée (m)"),

  #déclencheur pour l'analyse
  actionButton("boutonTraiter", "Traiter les données"),

  #annuler dernière analyse
  actionButton("boutonAnnuler", "Annuler"),

  #extraire les données
  downloadButton("boutonExtraire", "Exporter",style="color: #fff; background-
color: #e95420; border-color: #c34113")
  ),

  ##### -----panneau pour affichage du graphique-----#####
  mainPanel(
    h1("TRAITEMENT DONNEES PROFIL FORCE-VITESSE", align = "center"),
    plotOutput("graphique", brush = brushOpts("plot_brush", resetOnNew = TRUE)),
    tableOutput("tableauResume")
  )
)
)

##### -----server side----- #####

server <- function(input,output,session){
  #reactive dataframe pour graphique

```

```

cleanData <- reactiveVal(NULL)

#nom du fichier importé
nom <- reactive(
  if(!is.null(input$fichier))
    return(input$fichier$name)
)

#reactive list
variables <- reactiveVal(NULL)

#nettoyage du fichier à l'importation et premier fit
observeEvent(input$fichier,{
  #s'Assurer que le fichier est dans le bon format
  fichier <- input$fichier
  validate(
    need(file_ext(fichier$name) == "rda","Mauvais format de fichier")
  )
  #nettoyer les données importées
  df <-nettoyerDonnees(input$fichier$datapath)
  #s'Assurer que la fonction marche

  cleanData(df)
})

#brush pour enlever les données abhérantes
observeEvent(input$plot_brush, {
  brushed <- brushedPoints(cleanData(),input$plot_brush, allRows = TRUE, xvar =
"temps", yvar = "metricspeed")
  cleanData(brushed[!brushed$selected_, names(brushed) != "selected_", drop = FALSE])
  tryCatch({
    df <- fitGraphique(cleanData())
  },
  },

```

```

warning = function(warn){
  showNotification(paste0(warn), type = 'warning')
},
error = function(err){
  showNotification(paste0(err), type = 'err')
})
cleanData(df)
})

#affichage du graphique dans l'interface
output$graphique <- renderPlot({
  x <- cleanData()$temps
  y <- cleanData()$metricspeed
  z <- cleanData()$expModel
  ggplot(cleanData(), aes(x)) +
  geom_point(y = y) +
  geom_line(aes(y=y))+
  geom_line(aes(y=z), col = "blue")
})

#reactive dataframe pour exportation des données
exportedData <- reactiveVal(NULL)

#traitement des données et ajout au tableau
observeEvent(input$boutonTraiter,{
  tryCatch({
    newrow <- traitDonnees(cleanData(),nom(),input$temperature,input$pression,
input$poids, input$taille)
  },
  warning = function(warn){
    showNotification(paste0(warn), type = 'warning')
  },

```

```

    error = function(err){
      showNotification(paste0(err), type = 'err')
    })
    df <- rbind(newrow,exportedData())
    colnames(df)
c("Nom", "F0", "Pmax", "F0rel", "V0", "Pmaxrel", "Sfv", "Rfmax", "Drf", "FV_Balance") <-
    exportedData(df)
  })

#affichage du tableau de resultats
output$tableauResume <- renderTable({exportedData()})

#téléchargement des données du tableau
output$boutonExtraire <- downloadHandler(
  filename = function(){
    paste("data_",Sys.Date(),".csv", sep = "")
  },
  content = function(file){
    write.csv(exportedData(),file)
  }
)

#retirer la derniere entree dans le tableau
observeEvent(input$boutonAnnuler,{
  df <- data.frame(exportedData())
  df <- df[-1,]
  exportedData(df)
})
}

```

```
shinyApp(ui = ui, server = server)
```

Annexe B - Certificats d'éthique



3737

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC DES ÊTRES HUMAINS

En vertu du mandat qui lui a été confié par l'Université, le Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains a analysé et approuvé pour certification éthique le protocole de recherche suivant :

Titre : Analyse du processus de sélection des Équipes Québec Hockey

Chercheur(s) : Jean Lemoyne
Département des sciences de l'activité physique

Organisme(s) : Hockey Québec (projet de commandite de recherche)

N° DU CERTIFICAT : CER-21-278-07.29

PÉRIODE DE VALIDITÉ : Du 09 juillet 2024 au 09 juillet 2025

En acceptant le certificat éthique, le chercheur s'engage à :

- Aviser le CER par écrit des changements apportés à son protocole de recherche avant leur entrée en vigueur;
- Procéder au renouvellement annuel du certificat tant et aussi longtemps que la recherche ne sera pas terminée;
- Aviser par écrit le CER de l'abandon ou de l'interruption prématurée de la recherche;
- Faire parvenir par écrit au CER un rapport final dans le mois suivant la fin de la recherche.

Me Richard LeBlanc
Président du comité

Fanny Longpré
Secrétaire du comité

Décanat de la recherche et de la création

Date d'émission : 08 juillet 2024