



**HAL**  
open science

# Blessure, environnement et performance de haut niveau

Amal Haïda

► **To cite this version:**

Amal Haïda. Blessure, environnement et performance de haut niveau. Sport. Université de Rouen, France, 2014. Français. NNT: . tel-01788566

**HAL Id: tel-01788566**

**<https://insep.hal.science/tel-01788566>**

Submitted on 9 May 2018

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

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

# THÈSE

Présentée par

**Amal HAIDA**

En vue de l'obtention du grade de :

**Docteur de Normandie Université**

Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives  
Discipline : Epidémiologie et Physiopathologie du Sport

Délivré par

**L'université de Rouen**

ECOLE DOCTORALE

« *HOMMES, SOCIÉTÉS, RISQUES ET TERRITOIRE* »

**Blessure, environnement et performance de haut niveau**

Soutenue le 18 Novembre 2014

Devant le jury composé de :

---

Pr Patricia THOREUX	PU-PH, hôpital Avicenne, Paris XIII (Rapporteur)
Pr Ruddy RICHARD	PU-PH, Faculté de Médecine, Clermont-Ferrand (Rapporteur)
Dr Philippe LE VAN	Médecin du sport, INSEP, CNOSF (Examineur)
Mr Christophe COZZOLINO	Kinésithérapeute du Sport, INSEP, CNOSF (Examineur)
Mr Nicolas COULMY	Directeur département Sportif et Scientifique, FFS (Examineur)
Pr Jean-François TOUSSAINT	PU-PH, directeur IRMES, Paris Descartes (Directeur)
Pr Claire TOURNY-CHOLLET	PU, CETAPS, Rouen (Co-directrice)

## Résumé

La thèse porte sur l'épidémiologie et la physiopathologie de la performance dans le sport de haut niveau (SHN). L'objectif principal est d'étudier l'impact de deux paramètres pouvant interférer avec les performances et leur développement au cours d'une carrière sportive : la blessure et les facteurs environnementaux.

Dans un premier temps, nous étudions l'impact de la rupture du Ligament Croisé Antérieur (LCA) sur les performances chez les meilleurs skieurs alpins en Equipe de France depuis 1980. A travers une étude transversale, nous analysons le retour à la performance après la rupture du LCA chez les skieurs et évaluons si cette blessure est un handicap en termes de performances post-rupture dans le ski alpin de compétition. Elle est aussi l'occasion de comparer les performances des meilleurs skieurs de l'équipe qui ont connu la rupture du LCA avec celles des skieurs qui n'ont jamais subi cette blessure au cours de leur carrière. Une deuxième étude longitudinale compare l'évolution des performances de l'ensemble de la population de l'Equipe de France en ski alpin sur les carrières complètes des athlètes avec rupture du LCA et des athlètes sans rupture depuis 1980.

En ski alpin, l'environnement est étroitement impliqué dans la survenue des blessures. Les conditions de la neige, les conditions météorologiques et la température sont des facteurs qui influencent la prévalence des blessures, notamment celles du genou. L'environnement et les contraintes qu'il exige vont aussi influencer la performance dans le SHN. Ainsi, dans une troisième étude nous avons évalué l'impact de la saisonnalité et de l'environnement dans les épreuves de sprint et de demi-fond. Cette étude est réalisée en athlétisme car il représente l'un des premiers sports olympiques avec une accessibilité des données permettant un recul historique des performances considérable.

La blessure et l'environnement sont deux paramètres indispensables à prendre en compte dans le cadre multifactoriel de l'optimisation de la performance dans le SHN.

**Mots clés :** Performance, rupture du Ligament Croisé Antérieur (LCA), âge, environnement, température, ski alpin, athlétisme.

## **Abstract**

The thesis deals with the epidemiology and physiopathology of performance in elite sport. The objective is to analyze the impact of two parameters that can affect performance and its development during a sports career: injury and environmental factors.

At first, we study the impact of the Anterior Cruciate Ligament (ACL) rupture on the performance of the best alpine skiers (1<sup>st</sup> decile of performance) in the French Team since 1980. Through a transversal study, we analyze the return to performance after an ACL injury and evaluate whether the injury is a handicap in post-rupture performance. It is also an opportunity to demonstrate and compare the performance of the best skiers who had a torn ACL with those who never suffered this injury during their career. Secondly, a second longitudinal study analyses the performance development of the entire alpine skiers in the French Team during their career in injured and non-injured athletes since 1980.

Moreover, in alpine skiing the environment plays a role in the occurrence of injuries. The snow conditions, weather conditions and temperature are all factors that influence the prevalence of injuries, including the ACL rupture. Thus, in a third study we evaluated the impact of seasonality and environment in the sprint and middle distance. This study was conducted in athletics because it represents one of the oldest Olympic sports with sufficient data available allowing a substantial historical perspective of performance.

Our studies describe the importance of taking into account the injury and the environment, particularly temperature, in the multifactorial context of performance optimization in elite sport.

**Keywords:** Performance, Anterior Cruciate Ligament (ACL) tear, age, environment, temperature, alpine skiing, athletics.

## **Intitulé et adresse du Laboratoire d'accueil :**

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse ont été effectués à l'**IRMES- Institut de Recherche bioMédicale et de l'Epidémiologie du Sport**- localisé au sein de l'INSEP-Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance.

L'IRMES est dirigé par le Pr. Jean-François Toussaint.

Adresse : 11 Avenue du Tremblay, 75012 Paris

Email : [irmes@insep.fr](mailto:irmes@insep.fr)

Tél : 01 41 74 41 29

## Remerciements

Avant tout, je souhaite m'excuser si ma mémoire a fait défaut en oubliant des personnes qui ont permis de mettre une pierre à cette thèse.

Je remercie tout d'abord la personne qui a accepté de m'encadrer, de m'intégrer dans l'équipe et d'avoir cru en mon travail, le **Pr. Jean-François Toussaint**.

Je tiens à remercier ma co-directrice, **Pr. Claire Tourny-Chollet** qui a su être présente et me conseiller aux moments où j'en avais besoin.

Merci à vous 2 de m'avoir facilité à trouver un équilibre de travail entre « directeur et co-directrice ».

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers tous les membres du jury, **Pr. Patricia THOREUX**, **Pr. Ruddy RICHARD**, **Dr. Philippe Le Van** et **Mr Christophe Cozzolino** d'avoir accepté de juger mon travail.

Je n'oublie pas l'équipe de la Fédération Française de Ski et particulièrement **Nicolas Coulmy** qui m'a accompagné tout au long de ce projet et qui a su être pragmatique dans les moments d'urgence. Merci aux **Dr. Marie-Philippe Rousseaux-Blanchi** et **Dr. Pierre Chambat**, sans lesquels ce travail n'aurait pu voir le jour. Merci aux **filles du Centre de Médecine du Sport de Haut Niveau d'Albertville** de m'avoir accueilli et donner de leur temps même durant les JO de Sotchi.

Merci au **Pr. Eric Matzner-Lober** et **Ngoc-Hang Khuc** d'avoir accepté de collaborer dans ce travail et pour leur précieuse aide statistique.

Merci à **Pascal Roussin** d'avoir gentiment apporté un regard expert de préparateur physique à cette thèse et pour tes conseils.

Merci à notre documentaliste, **Zohra Beddredine** pour tous nos échanges. Ta grande aide bibliographique, ta disponibilité et tes rires on su me faire relativiser durant les moments difficiles.

Merci à **Mme Catherine Godard**, secrétaire de l'Ecole Doctorale, pour sa clarté dans les nombreuses questions que tout doctorant se pose durant la gestion de sa soutenance. Votre disponibilité s'est naturellement transformée en un accompagnement durant cette thèse.

Je tiens également à remercier l'**INSEP** (Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance) et l'**ED HSRT** (Hommes, Sociétés, Risques et Territoire) qui m'ont donné les moyens de réaliser un tel travail.

**Hélène**, ta présence, tes précieux conseils, ta folie et ton humour m'ont été essentiels durant ces années de thèse, mais sache qu'ils le sont tout autant pour la convivialité de l'IRMES.

**Laurie-Anne**, ma petite poulette, je t'apprécie comme tu es: la pintade, le radar, l'ennervée, la grande curieuse... mais aussi les nombreux « délires » qu'on a pu partager ne peuvent être que uniques avec un rire pareil ! Je sais que je peux compter sur toi...

**Juliana**, ma pouletas chiquitas bananas, merci pour les moments où tu as su replacer les choses dans leur priorité. Le voyage d'Orlando était l'occasion de connaître ce côté sensible que tu ne montres pas tous les jours ; and ... yes, « We can do it » ! Je suis là pour la fin de ta thèse !

**Marion**, je peux juste dire que personne ne te remplace ici à l'IRMES. Merci pour tes encouragements permanents et ton aide sur R. Tu mérites ce que tu es aujourd'hui.

**Hala**, notre Zazou, le terme qui te qualifie le mieux c'est « humaine ». Cet accent chaleureux qui sonnait pendant nos débats m'a bien manqué durant mes 2 dernières années de thèse.

**Hala Alioua**, merci pour de m'avoir ouvert les yeux lorsque ç'a n'allait pas et de m'avoir autant conseillée durant cette thèse. Reste forte !

**Frédéric**, merci pour ton aide et ton regard critique qui a permis de faire avancer ce travail. Tu m'as appris à m' « interroger » et à savoir chercher les termes justes à travers les nombreux « par définition... ».

Aux garçons, **Adrien S.**, merci pour tes encouragements durant la rédaction et tes GO GO GO ! A **Andy**, mon sauveur à l'hydrospeed et à **Julien Shishi**. Désormais baptisée « *Tata kechkech Marra* » (malgré moi), j'ai passé de supers moments auprès de vous.

**Adrien M.**, derrière cette apparence de « yoyo sissiii ! », tu as su porter la veste du grand frère quand je perdais confiance en moi. Merci pour tous tes conseils ptit gars ! A moi de te dire : CROIS EN TOI !

**Geoffroy**, le papa de l'IRMES. Je te remercie pour ton calme et ta sérénité. Tu as bien su me transmettre ton expérience de doctorant et me faire relativiser durant les moments de panique.

**Sidy**, les gens humbles sont intérieurement, les plus grands. Merci

**Guillaume**, non, pas de surnom... Juste merci de ta gentillesse. Je te souhaite courage et persévérance pour tes débuts en doctorat. Tu verras, la soutenance c'est ... DEMAIN !

A **ma famille**, le pilier inébranlable...

A toi **papa**, à toi **maman**, c'est grâce à vous si je suis ce que je suis aujourd'hui. Vous nous avez toujours montré qu'il fallait travailler fort pour s'en sortir, vous nous avez appris à toujours respecter l'autre s'il on veut être bien avec soi-même. Merci pour l'éducation que vous nous avez offerte et que vous continuer à nous donner. Merci pour toutes ces invocations sacrées...

A notre dentiste **Rizlène**, notre chimiste **Jaouad**, notre business woman **Nora** et notre baby **Chaymae**. Mes chers frères et sœurs, je suis fière de vous !

A **Khalo**, **mes tontons italiens** et **Youss**, autres que mes grands frères, merci pour votre patience, votre générosité et pour nos longues discussions. Vous m'aviez épaulée à chaque instant et prouvée que vous étiez toujours à mes côtés. *"La vita è bella con voi ! Grazie per tutto"*.

A **Hamza**, à **Khalti**... je pense à vous chaque jour.

A celui qui me connaît par *cœur*...

Mon bien-aimé, **Tarik**.



## **Publications dans les revues scientifiques internationales à comité de lecture**

**Haïda, A.**, Dor, F., Guillaume, M., Quinquis, L., Marc, A., Marquet, L.-A., Antero-Jacquemin, J., Tourny-Chollet, C., Desgorces, F., Berthelot, G., Toussaint, J.-F., 2013. Environment and Scheduling Effects on Sprint and Middle Distance Running Performances. *PLoS ONE*, 8(11), e79548.

**Haïda, A.**, Coulmy, N., Dor, F., Antero-Jacquemin, J., Marck, A., Ledanois, T., Tourny-Chollet, C., Sedeaud, A., Rousseaux-Blanchi, M.-P., Chambat, P., Toussaint, J.-F., 2014. Return-to-the-Performance after an Anterior Cruciate Ligament Rupture among French Alpine Skiers between 1980 and 2013. *American Journal of Sports Medicine*; Under Review.

**Haïda, A.**, Marquet, L.-A., Antero-Jacquemin, J., Marck A., Schipman, J., Marc, A., Dor, F., Desgorces, F., Toussaint, J.-F., 2012. Petit Bilan de Sapiens au Relevé de ses Empreintes Londoniennes. *Regards Croisés sur la Performance Sportive Olympique et Paralympique*. p250-255.

Marc, A., Sedeaud, A., Guillaume, M., Rizk, M., Schipman, J., Antero-Jacquemin, J., **Haïda, A.**, Berthelot, G., Toussaint, J.-F., 2014. Marathon progress: demography, morphology and environment. *Journal of Sports Sciences*, 32(6), 524-532.

Kryger, K., Dor, F., Guillaume, M., **Haïda, A.**, Noirez, P., Montalvan, B., Toussaint, J.-F., 2014. Medical reasons behind leaves from male and female professional tennis competitions. *American Journal of Sports Medicine*; In press.

Sedeaud, A., Marc, A., Marck, A., Dor, F., Schipman, J., Dorsey, M., **Haïda, A.**, Berthelot, G., Toussaint, J.-F., 2014. BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLoS ONE*, 9(2), e90183.

Antero-Jacquemin, J., Desgorces, F., Dor, F., Sedeaud, A., **Haïda, A.**, LeVan, P., Toussaint, J.-F., 2014. Row For Your Life: A century of mortality follow-up of French Olympic Rowers. *PLoS ONE*; Under Review.

Sedeaud, A., Marc, A., Marck, A., Haïda, A., Schipman, J., Toussaint J.-F., 2014. Build Mass Optimization: a key for new records in women athletes?; *PLoS ONE*, Under Review.

## **Autres publications**

**Haïda, A.**, Dor, F., Guillaume, M., Marc, A., Marquet, L.-A., Antero-Jacquemin, J., Tourny-Chollet, C., Desgorces, F., Berthelot, G., Toussaint, J.-F., La météo londonienne peut-elle nuire à la progression des performances aux JO ? *Nouvel Observateur*, Août 2012.

**Haïda, A.**, Dor, F., Coulmy, N., Antero-Jacquemin, J., Chambat, P., Rousseaux-Blanchi, M.-P., Berthelot, G., Toussaint, J.-F., JO SOTCHI. La rupture du ligament en ski : une blessure grave mais dont on peut se relever. *Nouvel Observateur*, Février 2014.

## **Publication Pré-doctorat**

Duarte Freitas\*, P, **A Haïda\***, M Bousquet, L Richard, P Mauriège, et T Guiraud. « Short-term impact of a 4-week intensive cardiac rehabilitation program on quality of life and anxiety-depression ». *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 54, no 3 (mai 2011): 132-143.

\*Co-auteurs.

## Présentations orales dans les congrès

- VII<sup>ème</sup> Symposium de l'IRMES (Grenoble), Octobre 2012 : Impact de l'environnement et des calendriers de compétitions sur les performances en sprint et demi-fond.
- Journée de la Valorisation de la Recherche en Sport de Haut Niveau, INSEP : Impact des conditions environnementales et démographiques sur la performance sportive. Projet recherche 10-R-027 ; Décembre 2012.
- Quoi de Neuf Docteur, Emission Canal INSEP, Octobre 2013 : Impact de l'environnement et des calendriers de compétitions sur les performances en sprint et demi-fond.
- Colloque « 1<sup>ère</sup> journée de rééducation : le muscle », INSEP, Juin 2013 : Blessures musculaires: Enseignements des derniers J.O.
- VIII<sup>ème</sup> Symposium de l'IRMES (Strasbourg), Septembre 2013 : Impact de la rupture du Ligament Croisé Antérieur sur l'évolution de la performance des skieurs alpins français depuis 1980.
- IX<sup>ème</sup> Symposium de l'IRMES (Paris), Septembre 2014 : Retour à la performance des skieurs alpins après une rupture du ligament croisé antérieur entre 1980 et 2013.

## Présentation des Posters

- 5<sup>ème</sup> Congrès de la Société Française de Médecine et de l'Exercice du Sport (SFMES), Grenoble, 2012 : *Impact de l'environnement et des calendriers de compétitions sur les performances en sprint et demi-fond.*
- 6<sup>ème</sup> Congrès de Physiologie, de Pharmacologie et de Thérapeutique (P2T), Angers, 2013: *Retour à la performance des skieurs alpins après une rupture du ligament croisé antérieur entre 1980 et 2013.*
- 6<sup>ème</sup> Congrès de la Société Française de Médecine et de l'Exercice du Sport (SFMES) Strasbourg, 2013: *Impact de la rupture du Ligament Croisé Antérieur sur l'évolution de la performance des skieurs alpins français depuis 1980.*
- 62<sup>ème</sup> Meeting Annuel de l'American College of Sports Medicine (ACSM), Orlando (USA), 2014: *Return-to-the-Performance after an Anterior Cruciate Ligament Rupture among French Alpine Skiers between 1980 and 2013.*

## Doctoriales de Saint-Valéry-en-Caux

Obtention du **1<sup>er</sup> prix ex aequo** du projet innovant des Doctoriales de Normandie de 2013 : Alioua Hala, Gilles Sandrine, Bada Ndoye, Haida Amal, Trouillard Romain, Van De Look Julien, Zouabi Amira, 2013. « Sommeil d'or ». Doctoriales de Normandie®.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>15</b>
<b>PARTIE 1 : CADRE THEORIQUE.....</b>	<b>19</b>
EXPOSITION AUX RISQUES.....	20
CHAPITRE 1 : DEFINITION DE LA BLESSURE .....	20
VERS UNE DEFINITION CONSENSUELLE DE LA BLESSURE .....	21
Football .....	22
Rugby .....	23
Tennis.....	24
Ski.....	25
Recueil des données .....	26
Variables épidémiologiques clés.....	28
Sévérité .....	28
Incidence.....	30
Risque de la blessure .....	31
Prise de risque.....	31
<i>Chapitre 2 : Epidémiologie de la blessure dans le ski alpin .....</i>	<i>34</i>
Dans le ski alpin de loisir.....	35
Incidence des blessures .....	35
Localisation anatomique et type de blessure au ski.....	38
Membres supérieurs .....	40
Traumatismes crâniens et rachidiens.....	40
Membres inférieurs.....	41
Evolution du matériel et physiopathologie .....	43
Genou et rupture du LCA .....	46
Biomécanique du genou .....	46
Rupture du LCA .....	47
Dans le ski de compétition.....	50
Blessures au genou et rupture du LCA.....	52
Facteurs de risque.....	56
Facteurs de risque extrinsèques .....	56
Blessure, rupture du LCA et discipline.....	56
Facteurs de risque intrinsèques.....	60
Anatomique .....	60
Biomécanique .....	60
Le mécanisme du valgus interne-rotation externe : rotation externe de la jambe.....	62
Le mécanisme du tiroir antérieur .....	65
Le phénomène du « pied-fantôme ».....	66
Hormonal .....	67
Neuromusculaire.....	67
Age .....	68
<i>Chapitre 3 : Blessure sportive et performance .....</i>	<i>71</i>
Déterminants psychologiques de la blessure dans le sport.....	72
Modélisation des déterminants psychologiques d'une blessure sportive .....	72
Vulnérabilité physique perçue .....	72
La personnalité .....	73
Blessures antérieures.....	74
Blessure sportive et stress .....	74
Rôle du stress dans la pathogenèse en sport.....	74
Manifestations du stress et blessure sportive .....	75
Dispositions individuelles au stress et blessure sportive .....	75
Modèle liant le stress à la survenue d'une blessure : le stress-injury model.....	75

Performance après la blessure .....	78
Retour à la pratique après une rupture du LCA .....	79
Retour à la performance après une rupture du LCA dans le ski alpin .....	83
<b>CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES.....</b>	<b>84</b>
Chapitre 4 : Environnement dans le sport de haut niveau .....	84
Environnement et performance .....	85
Environnement et prévalence de la rupture du LCA.....	89
Conditions climatiques.....	89
Qualité de la neige et difficulté de la piste .....	89
Température et performance .....	90
Chapitre 5 : Objectifs de la thèse.....	92
<b>PARTIE 2 : CADRE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>97</b>
Chapitre 6 : Performance des skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013 .....	98
Introduction : le ski alpin .....	98
Descente (DH) .....	99
Super G (SG).....	99
Slalom (SL).....	100
Slalom Géant (GS) .....	101
Indicateurs de performance .....	101
Points FIS (Rules for the FIS Alpine points, 2014) .....	101
Classement international .....	102
Podiums .....	102
Description de la population générale.....	103
En fonction de la spécialité alpine .....	104
Description de la population avec rupture du LCA .....	105
Incidence.....	105
Répartition de la population en fonction de l'âge .....	107
Description des points FIS et du classement international (Indicateurs de performance 1 et 2) .....	109
Relation points FIS vs. classement international.....	109
Premier décile de performances des groupes LCA et NLCA.....	112
Ages des skieurs à la meilleure performance .....	114
Méthode 1 : moment de la blessure non pris en compte.....	114
Méthode 2 : moment de la blessure pris en compte .....	115
Podiums des skieuses et skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013 (Indicateur de performance 3).....	119
Podiums en fonction des groupes LCA et NLCA .....	119
Chapitre 7 : Après la rupture du LCA .....	122
Niveau de performance après rupture du LCA .....	123
Capital de performance en fonction de l'âge à la rupture .....	125
Podiums avant et après la rupture du LCA .....	127
Chapitre 8 : Etudes réalisées.....	133
Ethique.....	134
ETUDE 1 .....	135
Retour à la performance des skieurs alpins après une rupture du ligament croisé antérieur entre 1980 et 2013 .....	135
Résumé .....	136
Introduction .....	137
Méthodes.....	139
Résultats .....	141
Discussion .....	146
Conclusion.....	151
Lien entre l'étude 1 et l'étude 2 : .....	152
ETUDE 2 .....	153
Impact de la rupture du LCA sur l'évolution des performances dans l'ensemble de la carrière des skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013 .....	153

Résumé .....	154
Introduction .....	156
Méthodes.....	157
Résultats .....	160
Discussion .....	166
Conclusion.....	168
Lien entre l'étude 2 et l'étude 3.....	169
<b>ETUDE 3 .....</b>	<b>170</b>
Impact de l'environnement et du calendrier des compétitions sur les performances en sprint et demi-fond .....	170
Résumé .....	171
Introduction .....	172
Méthodes.....	173
Résultats .....	175
Discussion .....	179
Conclusion.....	182
Données supplémentaires .....	183
<b>DISCUSSION ET CONCLUSION GENERALES .....</b>	<b>189</b>
<b>INTERETS ET APPORTS DE LA THESE .....</b>	<b>190</b>
<b>PERSPECTIVES .....</b>	<b>194</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>226</b>

## INTRODUCTION GENERALE

### *Des bénéfices...*

L'activité physique (AP) constitue une stratégie efficace pour prévenir les maladies cardiovasculaires (MCV), les accidents vasculaires cérébraux (AVC), l'hypertension (HTA), l'obésité, le diabète de type 2 (DT2), la dépression, le cancer du sein, le cancer du côlon, l'ostéoporose et réduire la mortalité prématurée (Blair SN et al., 1989; Marijon et al., 2013; Sarna, Sahi, Koskenvuo, & Kaprio, 1993; Teramoto & Bungum, 2010). Les premières enquêtes portant sur les risques relatifs de mortalité en fonction du niveau de condition physique ont montré les bénéfices de l'AP. En 1989, une étude de suivi d'une durée de huit ans portant sur des hommes ( $n = 10\ 224$ ) et des femmes ( $n = 3\ 120$ ) ( $45,9 \pm 11,3$  ans) en bonne santé a analysé le risque relatif de mortalité en fonction de la condition physique. Cette étude a révélé que le taux de mortalité toutes causes confondues des sujets en moins bonne condition présentaient un risque de 3,4 (hommes) et de 4,7 (femmes) par rapport aux sujets en meilleure condition physique avec les taux les moins élevés de mortalité attribuable aux MCV et aux cancers (Blair SN et al., 1989).

Avec un taux de mortalité plus faible et une longévité plus importante ( $\text{gain de nombre d'année de vie}$ ), il est établi que les athlètes des sports d'endurance (aérobie) et des sports mixtes (aérobie et anaérobie) vivent plus longtemps que la population générale (Marijon et al., 2013; Sarna et al., 1993; Teramoto & Bungum, 2010). La raison de leur meilleur taux de survie est due à la baisse de la mortalité par MCV, cancers, maladies respiratoires et digestives (Marijon et al., 2013; Teramoto & Bungum, 2010). Le taux d'hospitalisation des athlètes ( $\text{de 36 à 94 ans}$ ) après leur carrière sportive est inférieur à celui de la population de référence notamment dû au faible taux de MCV, de maladies respiratoires et de cancer. Toutefois, les athlètes sont plus susceptibles d'être hospitalisés pour des troubles musculo-squelettiques ( $\text{classification internationale des maladies, CIM}$ ) (Marijon et al., 2013; Sarna et al., 1993). La question est de savoir si les bénéfices de l'AP sur la santé l'emportent sur le risque de blessures et les effets de long terme, surtout chez les athlètes de haut niveau (Ljungqvist et al., 2009).



Ainsi, la pratique de l'AP est connue pour avoir des avantages pour la santé générale et la longévité de l'individu mais l'envers de la médaille cache les effets néfastes du sport de haute intensité. La problématique principale d'une pratique intensive dans le sport de haut niveau (SHN) concerne les blessures et les conséquences sur la santé de l'athlète. En effet, les activités sportives l'exposent dans le même temps à un risque élevé de blessures (Willem van Mechelen, 1997; Sumilo & Stewart-Brown, 2006).

### *Aux risques*

Dans sa pédagogie du sport, le baron Pierre de Coubertin définit le sport comme « un culte volontaire et habituel de l'exercice musculaire intensif appuyé sur le désir de progrès et pouvant aller jusqu'au risque ». *Citius, Altius, Fortius*, la devise olympique prône d'ailleurs les limites et le dépassement de soi-même.

Le sport fascine et rassemble les foules. Rigueur, exemplarité, perfectionnisme, performance, il est régi par des normes et des codes qui le singularisent. Ses principes fondateurs qui suscitent le dépassement de soi, sont également des facteurs de risque pour le sportif. L'intensité des entraînements, le rythme accru lors des compétitions, la pression morale et psychologique qu'ils impliquent peuvent être la cause de blessures et de pathologies graves. Au seuil entre bénéfiques et risques, l'équilibre du sportif se déstabilise perpétuellement. La quête permanente du moindre détail peut provoquer un niveau d'insatisfaction rare même chez les plus grands champions.

Les sportifs sont soumis à des règles de vie et à des entraînements intensifs éprouvants. Faut-il souffrir pour être performant ? Les témoignages du judoka David Douillet et du rugbyman Serge Simon sont unanimes: « le milieu sportif intègre et banalise les sensations de douleur et de blessure. A force d'efforts et d'entraînements, la douleur devient même un indicateur de progrès : avoir mal, souffrir fait partie du contrat ». Reconnues comme normales, certaines blessures échappent à la prise en charge sanitaire. « Apprendre à se faire mal, la capacité à supporter la douleur pour faire la différence » font partie du discours de nombreux athlètes et entraîneurs. **Le SHN exige des entraînements intensifs et répétitifs, une concentration importante des compétitions, et amène souvent l'athlète à des**

**traumatismes, parfois graves** : « *ce n'est pas la peur de tomber mais la peur de se faire mal* » affirme Antoine Dénériaz, champion olympique de ski alpin après avoir été victime d'une violente chute qui le contraint de s'éloigner des pistes.

Dans les sports d'hiver, la blessure est particulièrement bien étudiée : facteurs de risque, nature de la blessure, localisations anatomiques les plus touchées ou encore retour à la pratique sportive (Ardern, Taylor, Feller, & Webster, 2012; Ardern, Webster, Taylor, & Feller, 2011a, 2011b; Heijne, Axelsson, Werner, & Biguet, 2008; Koehle, Lloyd-Smith, & Taunton, 2002; Ramesh, Arx, Azzopardi, & Schranz, 2005; Tjong, Murnaghan, Nyhof-Young, & Ogilvie-Harris, 2014). Dans le ski alpin de loisir comme de haut niveau, la blessure la plus commune est la rupture du ligament croisé antérieur (LCA). La recherche du compromis entre vitesse et précision, la prise de risque, l'évolution du matériel (**en particulier des bottes pour diminuer les risques d'entorses graves de la cheville, mais ont engendré une augmentation des blessures aux genoux**) ont toutes une part attribuable dans sa survenue. Dans le ski de loisir, la problématique de cette blessure réside dans la possibilité d'un retour à la pratique d'une AP. Dans le ski de haut niveau, la rupture du LCA est fréquente ; elle nécessite un temps de récupération considérable ; mais la qualité de sa prise en charge thérapeutique s'évalue avant tout lors du retour à la performance. Une blessure telle que la rupture du LCA, est-elle néfaste à la performance de long terme ? Cette lésion altère-t-elle la performance des skieurs alpins de haut niveau après reconstruction du LCA ?

Le retour à la pratique sportive après rupture du LCA a certes déjà été apprécié, mais, il existe un besoin d'analyse du retour à la performance dans le ski alpin de haut niveau. Pour cela, nous nous intéresserons dans cette thèse, à l'impact de la rupture du LCA sur la performance et la durée de carrière chez les skieurs alpins de haut niveau.

Si la prise en charge de la blessure est un élément essentiel pour l'optimisation de la performance, l'environnement et ses contraintes, sont tout aussi importants dans ce cadre multifactoriel. L'humidité, la pression atmosphérique, la température, impliquées dans la thermorégulation (El Helou et al., 2012), constituent des paramètres indispensables à prendre en compte. Cette thèse présente aussi l'impact de l'environnement sur les performances brèves (de quelques secondes à quelques minutes) en athlétisme.

La réflexion autour de l'environnement et de la blessure constitue enfin un point crucial pour la compréhension des performances des athlètes de haut niveau. Les apports épidémiologiques dans la compréhension de ces paramètres sont un outil nouveau extrêmement utile (El Helou, 2011).

## **PARTIE 1 : CADRE THEORIQUE**

## **Exposition aux risques**

<h3><b>Chapitre 1 : Définition de la blessure</b></h3>
--

## Vers une définition consensuelle de la blessure

Il subsiste de réelles difficultés dans la comparaison des blessures entre les différents sports mais aussi au sein d'un même sport du fait de la multitude de définitions de la blessure. Le « *National Athletic Injury/Illness Reporting System (NAIRS)* », créé aux États-Unis en 1974 pour recueillir des informations sur de larges populations d'athlètes signale une blessure lorsqu'elle limite toute participation sportive dès le jour qui suit sa survenue (Clarke, 1975; Levy, 1988). La définition de la blessure en termes de perte de temps caractérisée par l'absence à la compétition ou à l'entraînement est communément utilisée dans différents sports (R. Bahr & Bahr, 1997; Ekstrand & Gillquist, 1983; Faude, Junge, Kindermann, & Dvorak, 2005; Hawkins & Fuller, 1999; Stephenson, Gissane, & Jennings, 1996). Cependant, les blessures mineures ne vont pas forcément engendrer une absence à la compétition ou à l'entraînement mais **peuvent** provoquer des effets négatifs **pour une échéance précise mais aussi** à long-terme sur la santé du sportif (Drawer & Fuller, 2001; Marijon et al., 2013). Un aspect important à prendre en compte dans la définition de la blessure est la subjectivité. Pour une même blessure, un athlète participerait à une compétition ou à un entraînement pendant qu'un autre estimerait en être incapable (Noyes, Lindenfeld, & Marshall, 1988).

Se mettre d'accord sur une définition de la blessure universellement acceptable dans le monde du sport est une étape importante. Elle représente un défi dans la mesure où une blessure donnée dans un sport ne peut être considérée de la même manière dans un autre sport (D. C. Fuller & Drawer, 2004; Harrison & Price, 1991; Noyes et al., 1988). La nécessité d'un accord sur une définition universelle dans l'épidémiologie des blessures sportives est essentielle pour obtenir des données fiables et des résultats comparables (D. C. F. Finch, 1997; Astrid Junge & Dvorak, 2000; Willem van Mechelen, Hlobil, & Kemper, 1992; P. W. H. Meeuwisse & Love, 1997; Noyes et al., 1988).

Le manque de consensus dans les études épidémiologiques sur la blessure dans le sport est essentiellement dû aux nombreuses variations dans la conception et dans les différentes méthodes de recueil des informations. Ces divergences donnent naissance à de réelles difficultés dans la comparaison des résultats entre les différentes études et par conséquent

freinent les éventuelles avancées au sujet de la blessure dans le sport, en particulier dans le SHN.

Le football, le rugby ou encore le tennis sont des sports où des consensus sur la définition de la blessure ont été élaborés et publiés (C. W. Fuller et al., 2006; Colin W. Fuller et al., 2007; Orchard et al., 2005; Pluim et al., 2009).

### **Football**

Le consensus sur la définition des blessures au football a été réalisé par un groupe composé d'experts impliqués dans la recherche épidémiologique et organisé par l'Association Médicale de la Fédération Internationale de Football (F-MARC). Normaliser la définition, la méthodologie et les normes de recueil des données dans le football, mais aussi fournir une conception pour les études sur différents sports d'équipe étaient les objectifs de ces groupes d'experts (Colin W. Fuller et al., 2006). Le football est l'un des premiers sports à s'intéresser aux blessures chez le sportif et à développer les procédures de surveillance nécessaires (Tourny, Sangnier, Cotte, Langlois, & Coquart, 2014). L'« *UEFA Football Safety Protect* » a opté en 2005, pour le développement d'un modèle d'étude des blessures dans le football professionnel. Hägglund et ses collaborateurs rapportent que ce projet a été réalisé en 3 étapes (Hägglund, Waldén, Bahr, & Ekstrand, 2005):

- (i) Discussion et consensus au sein du comité médical de l'UEFA : aspects méthodologiques
- (ii) Etudes pilotes : 2 études pilotes ont été conduites en ligue professionnelle en Suède et au Danemark dans le but de tester la conception des études et la forme de recueil des données
- (iii) Approbation de la méthodologie par les équipes médicales participantes.

Enfin, le travail de Hägglund et al (2005) a permis de discuter des failles que présentent les différentes études épidémiologiques au sujet de la blessure dans le sport et d'établir de

nouvelles orientations et méthodes de contrôle afin de servir de normes pour les études à venir dans le football professionnel (tableau 1).

Tableau 1. Points cruciaux pour les études épidémiologiques sur la blessure au football : le modèle de l'UEFA

Study design	Prospective cohort study
Exposure factor	Individual participation time recorded
Study period	One (or several) full football season(s)
Data collection forms	Baseline form with anthropometrics Attendance record (exposure factor) Injury card (short, one page)
Study manual	Including definitions, fictive cases and scenarios
Contact person	Medical staff record exposure and injuries
Inclusion/exclusion	All players with a first team contract included
Definition of injury	Time loss from participation, only injuries occurring during team activities
Injury severity	Based on absence from participation: slight (1–3 days), minor (4–7 days), moderate (8–28 days), major (>28 days)
Definition of reinjury	Identical injury within two months
Rehabilitation	Player is injured until given clearance by medical staff to participate fully in team training and match play
Definition of a training session	Coach directed physical activities carried out with the team
National teams, reserve teams	Participation with national teams, reserve or youth teams included

D'après Häggglund et al (Häggglund et al., 2005).

Aujourd'hui, nombreuses sont les études sur les blessures dans le football professionnel, mais montrent qu'il n'existe pas encore d'unité dans les protocoles méthodologiques (Alonso et al., 2009; Silvers et al., 2014; Steffen et al., 2013).

### **Rugby**

La démarche de consensus de la définition de la blessure réalisée au football a été examinée, révisée pour l'adapter au rugby. L'International Rugby Board (IRB) a mis en place un Groupe pour un Consensus de la blessure au Rugby (RICG) afin de parvenir à un accord sur la définition et les méthodologies appropriées pour normaliser les enregistrements des



blessures dans le rugby (Colin W. Fuller et al., 2007). Le RICG a examiné les consentements des définitions et des méthodologies publiés pour le football afin d'évaluer leur pertinence pour une application éventuelle de ces méthodes dans le Rugby. Une réunion des différents membres a permis de finaliser les procédures méthodologiques et les définitions et tous les auteurs ont confirmé leur accord avec la déclaration du consensus. Le consensus a été présenté et approuvé par le Conseil International de Rugby. Cet accord a été établi pour plusieurs paramètres : récurrence, sévérité, temps d'exposition, localisation anatomique, nature, diagnostic et étiologie et permet une comparaison significative entre les sports. De cette façon, le rugby a adopté une méthodologie similaire à celle proposée par le football (Colin W. Fuller et al., 2007).

Pour les clubs du Top 14, le recueil des données a été réalisé à l'aide d'un questionnaire recensant les informations relatives à toute blessure survenue en match. La blessure en match de rugby a été définie en conformité avec la définition établie par plusieurs études à savoir « la survenue d'une lésion acquise durant un match en compétition ayant empêché le joueur de s'entraîner ou de participer à une compétition et ayant fait l'objet d'un avis médical » (C. W. Fuller et al., 2007; Pluim et al., 2009). Les données étaient recueillies par un membre de l'équipe médicale (MédiRugby, 2008). En 2003, la ligue nationale de basketball français (LNB) a aussi mis en place un système de déclaration et de données médicales concernant les joueurs professionnels de 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> division (pro A et pro B) (J. W. Owona 2008).

L'Association Internationale des Fédérations d'Athlétisme (IAAF) et le Comité Olympique International (CIO) ont également affirmé que les déclarations de consensus développés pour les sports d'équipe sont possibles pour les sports individuels (Alonso et al., 2009; A Junge et al., 2008).

### **Tennis**

Récemment, la Fédération Internationale de Tennis est parvenue à un consensus, établi à partir des propositions du football et du rugby tenant compte des spécificités de jeu (Pluim et al., 2009). De la même manière que le football et le rugby, l'incidence, la gravité et la nature des blessures rapportées dans le tennis varient considérablement entre les études. Tandis que certaines de ces variations peuvent s'expliquer par les tailles d'échantillon, les

principales raisons sont aussi liées à des définitions et des méthodologies différentes entre les études. La déclaration d'un consensus sur les études épidémiologiques dans le tennis analysé par Pluim et al. vise à examiner les accords existant pour la surveillance des blessures afin d'établir une définition, des méthodes et des procédures de communication applicables aux exigences spécifiques du tennis. Les définitions et méthodologies proposées pour l'enregistrement des blessures et des maladies subies au cours des jeux et des entraînements va permettre des données plus cohérentes et comparables. Cette récente étude assure que les procédures de surveillance présentées ici peuvent également s'appliquer à d'autres sports de raquette (Pluim et al., 2009).

### ***Ski***

La définition d'un accident de ski ou de snowboard diffère d'une étude à l'autre. Quelques études de ski et de snowboard en compétition ont utilisé une définition de la blessure en termes de temps perdu **à l'entraînement et à la compétition** (Dowling, 1982; Torjussen & Bahr, 2005), d'autres incluent la gravité de la blessure : elles la considèrent comme sévère lorsqu'elle engendre une absence à l'entraînement ou à la compétition de plus de 20 jours (Margreiter, Raas, & Lugger, 1976). Une autre enregistre une blessure dès lors qu'il y a un besoin de transport ou un traitement par l'équipe médicale (Bergstrøm, Bergstrøm, & Ekeland, 2001). La plupart du temps, la définition de la blessure utilisée dans le ski et le snowboard requiert une attention médicale (Arne Ekeland & Rødven, 2006; Greenwald, Nesshoever, & Boynton, 2000; Robert J. Johnson, Ettlinger, & Shealy, 1997; Langran & Selvaraj, 2002; Laporte, Binet, & Constans, 2000). Cependant, certaines études utilisent la méthode de l'auto-évaluation de la blessure (Jørgensen, Fredensborg, Haraszuk, & Crone, 1998; Oliver & Allman, 1991). Il n'y a pas eu de consensus pour l'enregistrement des blessures dans le ski et le snowboard et par conséquent, il est difficile de comparer directement les résultats et les études entre elles. Par ailleurs, lors de la mise en place du système de surveillance des blessures par la Fédération Internationale de Ski (FIS), le consensus réalisé par le football a été choisi pour définir et rapporter les blessures au cours des épreuves de la FIS. **Les études différencient les blessures au genou (tendinites, déchirures de ménisque, atteintes des ligaments : externe, interne et croisé...) des ruptures complètes du LCA (T W Flørenes et al., 2009; Pujol et al., 2007).**

## Recueil des données

Pour valider et comparer les possibilités d'enregistrement des blessures en ski de compétition, Florenes et al, (T W Flørenes, Nordsletten, Heir, & Bahr, 2011) ont étudié 3 systèmes d'enregistrement des blessures subies au cours de la Coupe du Monde de la saison 2006-2007 : enregistrement prospectif des blessures par des équipes médicales, enregistrement prospectif des blessures par les délégués techniques de la FIS et entretiens rétrospectifs avec les athlètes et les entraîneurs à la fin de la saison de compétition. Sur les 602 skieurs participant à la coupe du monde, 100 lésions aiguës sont survenues : 91% ont été enregistrées lors des entretiens avec les athlètes, 47% par l'équipe médicale et 27% par les délégués techniques. Seulement 20% des blessures ont été identifiées similairement par les trois méthodes. Par ailleurs, un total de 64 blessures engendrant un arrêt d'entraînement ou de compétition ont eu lieu au cours de cette Coupe du Monde. Les entretiens en ont rapporté 60 (94%), l'équipe médicale 39 (61%) et les délégués techniques 23 (36%), tandis que 18 (28%) ont été enregistrées par les trois systèmes.

On constate donc que les entretiens rétrospectifs avec les athlètes et les entraîneurs concernant les blessures au cours des 6 derniers mois ont donné l'image la plus complète des blessures des skieurs et des snowboarders durant la Coupe du Monde. De ce fait, avant de constituer un système d'enregistrement des blessures, il paraît essentiel de tenir compte des caractéristiques des différentes équipes intervenantes et de définir celle responsable de ce type d'intervention dans tous les sports.

Une étude récente pose le problème de la définition de la blessure. Timpka et al, rapportent que dans le SHN, l'identification des blessures est complexe notamment parce qu'elle est réalisée depuis différents milieux. Les professionnels de la santé qui rendent compte d'exams cliniques, les institutions sportives mettant en avant le "temps-perdu" à l'entraînement et à la compétition et l'auto-évaluation de la blessure par les athlètes considérant la blessure comme un traumatisme (tableau 2) (Timpka et al., 2014).

---

**Clinical examination***Sports injury*

Loss or abnormality of bodily structure or functioning resulting from an isolated exposure to physical energy during sports training or competition that following examination is diagnosed by a clinical professional as a medically recognized injury

*Sports disease (overuse syndrome)*

Loss or abnormality of bodily structure or functioning resulting from repeated bouts of physical load without adequate recovery periods in association with sports training or competition that following examination is diagnosed by a clinical professional as a medically recognized disease or syndrome

**Athlete self-report***Sports trauma*

An immediate sensation of pain, discomfort, or loss of functioning associated, by an athlete, with an isolated exposure to physical energy during sports training or competition having an intensity and quality making the sensation being interpreted by the athlete as discordant with normal body functioning

*Sports illness*

A progressively developing sensation of pain, discomfort or loss of functioning associated, by an athlete, with repeated bouts of physical load during sports training or competition without a adequate recovery periods that reach an intensity and quality making the sensation being interpreted by the athlete as discordant with normal body functioning

**Sports performance***Sports incapacity*

Sidelining of athlete by a sports authority (the athlete her/himself, coach, manager, sports committee) due to reduced ability to perform a planned sports activity following an isolated exposure to physical energy during sports training or competition

*Sports sickness*

Sidelining of athlete by a sports authority (the athlete her/himself, coach, manager, sports committee) due to reduced ability to perform a planned sports activity following repeated bouts of physical load without adequate recovery periods in association with sports training or competition

---

Tableau 2. Recueil des données et observations des blessures : examen clinique (équipes médicales), auto-évaluation (athlètes et entraîneurs), incapacité sportive (institutions sportives). D'après Timpka et al (Timpka et al., 2014).

## **Variables épidémiologiques clés**

Les études épidémiologiques de Van Mechelen et ses collaborateurs mettent en évidence 2 variables clés : la sévérité (ou gravité) et l'incidence de la blessure. En termes de prévention, ces facteurs sont indispensables car ils permettent d'évaluer l'ampleur du problème des blessures dans le SHN (Willem van Mechelen, 1997; Willem van Mechelen et al., 1992).

### ***Sévérité***

Définir la sévérité (ou la gravité) de la blessure permet d'apprécier les paramètres nécessaires pour la prévention de la blessure dans le SHN. La sévérité est également importante pour faire remonter les blessures graves en priorité (Willem van Mechelen, 1997). Van Mechelen et al., recommandent de décrire la gravité de la blessure en se basant sur 6 critères tous étroitement liés : (i) la nature de la blessure, (ii) la durée et la nature du traitement, (iii) le temps perdu à l'entraînement et en compétition, (iv) le temps perdu au travail, (v) les séquelles et (vi) les coûts de la prise en charge (Willem van Mechelen et al., 1992).

Le NAIRS définit la gravité des blessures sur la base de la durée de temps perdu à la participation sportive (entraînement et compétition) (Clarke, 1975):

- Blessure mineure : arrêt < 1 semaine
- Blessure modérée : arrêt de 1 à 3 semaine(s)
- Blessure grave : arrêt > 3 semaines

Au football, la gravité des blessures est estimée par rapport au temps perdu jusqu'au retour à l'entraînement et à la compétition. Elle est décrite de la manière suivante : très faible (0 jour), bénigne (1-3 jour(s)), légère (4-7 jours), modérée (8-28 jours), grave (> 28 jours) (C. W. Fuller et al., 2006).

Les définitions consensuelles de la gravité des blessures au rugby et au tennis utilisent la même forme que le football avec des modifications mineures pour répondre aux besoins spécifiques de chaque sport (Colin W. Fuller et al., 2007; Pluim et al., 2009).

En ski alpin de compétition, au ski acrobatique et au snowboard, la gravité a été classée selon la définition de NAIRS (Torjussen & Bahr, 2005) et le Score de Sévérité de la Blessure (Injury Severity Score : ISS) (Bergstrøm et al., 2001) avec une durée d'absence > 20 jours pour une blessure sévère (Arne Ekeland, Nordsletten, Lystad, & Lereim, 1997; Margreiter et al., 1976; Raas, 1982).

Pour mieux comprendre l'ISS, une étude de Baker et ses collaborateurs ont utilisé cet outil afin d'analyser le lien entre la sévérité des blessures et la mortalité. Leur étude comprend 2128 automobilistes, piétons et autres usagers de la route dont les blessures ont entraîné une hospitalisation ou un décès. Dans leur méthodologie, l'ISS représente un système de notation mathématique développé pour l'évaluation des patients atteints de traumatismes multiples. Il est basé sur une échelle de 1 à 75 et plus le score est élevé, plus la blessure est grave (S. P. Baker, O'Neill, Haddon, & Long, 1974). La figure 1 comprend tous les décès causés par les blessures et mesure le temps entre la blessure et le décès en fonction de l'ISS. L'association entre la gravité des blessures et le temps jusqu'au décès montre que les patients avec un ISS < 50 ont un taux de survie plus important que ceux avec un ISS > 50. On constate aussi que plus le score ISS augmente et plus les chances de survie s'amenuisent. La majorité des patients avec un ISS < 50 étaient encore en vie une heure après l'accident alors que la majorité des patients avec un ISS > 50 ne survivent pas une heure après l'accident.

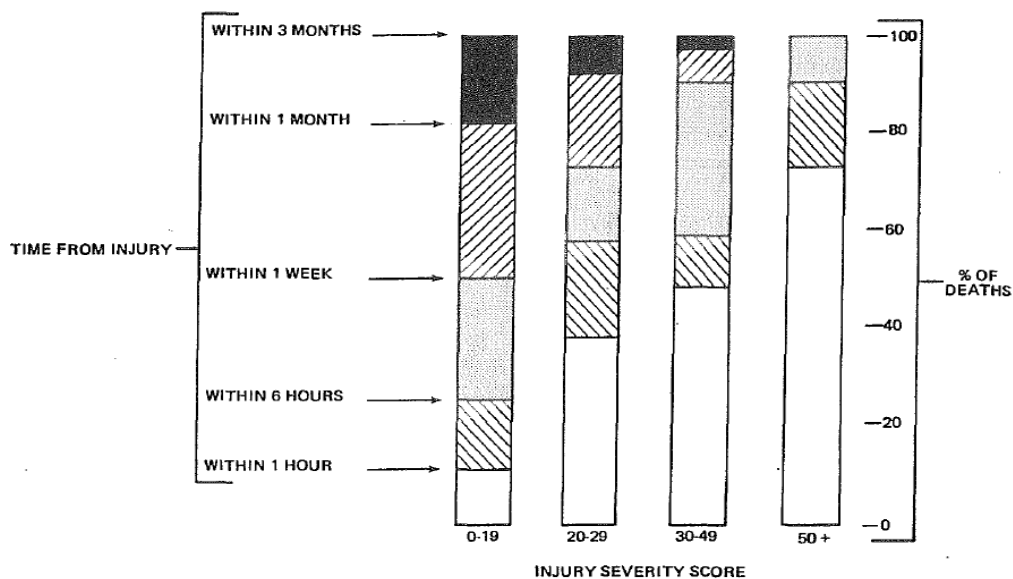


Figure 1. Temps entre le moment de la blessure et le décès en fonction du Score de Sévérité de la Blessure (ISS) de tous les décès (S. P. Baker et al., 1974).

Les études épidémiologiques chez les skieurs et snowboarders de loisir évaluent la gravité des blessures en se basant sur l'ISS de Baker et al (S. P. Baker et al., 1974). La classification uniforme du degré de sévérité est nécessaire pour homogénéiser les résultats et faciliter les comparaisons entre les études épidémiologiques (Bergstrøm et al., 2001; McBeth, Ball, Mulloy, & Kirkpatrick, 2009).

### ***Incidence***

L'incidence est une autre variable cruciale dans les études épidémiologiques des blessures (Willem van Mechelen et al., 1992). Elle est définie par le nombre de nouvelles lésions dans une population donnée sur une période de temps déterminée et donne également une estimation du risque. Dans le sport de haut niveau, l'incidence est définie comme le nombre de nouvelles blessures sportives à un moment précis, divisé par le nombre de personnes (sportifs de l'équipe de France de Ski Alpin, dans notre étude) sur une période donnée (Kirkwood & Sterne, 2003; Willem van Mechelen et al., 1992).

Le taux des blessures dans le ski dépend de (i) la définition de la blessure, (ii) la source des données et (iii) la définition du temps d'exposition. Ainsi, les études qui se basent sur la déclaration propre des skieurs vont enregistrer des taux de blessures plus importants que ceux rapportés par les patrouilles de ski, suivis de ceux rapportés par les médecins et enfin ceux basés sur des données hospitalières. La différence de l'incidence est donc liée au type et à la source des données.

L'unité la plus utilisée pour rapporter le taux de blessures est le nombre de blessures par skieur par jour pour 1000 journées-skieurs (JS) ou visites-skieurs (VS). Or, dans de nombreuses études épidémiologiques en ski et en snowboard de compétition, l'incidence est souvent décrite de différentes manières : nombre de blessures pour 1000 parcours (Bergstrøm et al., 2001; A. Ekeland, Dimmen, Lystad, & Aune, 1996; Torjussen & Bahr, 2005), pour 1000 coureurs (Arne Ekeland & Holm, 1985), pour 100 saisons de skieurs (Pujol, Blanchi, & Chambat, 2007) ou pour 1000 JS (Dowling, 1982; Wright, Hixson, & Rand, 1986). La problématique de l'incidence des blessures pour 1000 courses est que seules les blessures qui se produisent dans les compétitions peuvent être enregistrées.

### ***Risque de la blessure***

L'estimation du risque de la blessure peut être déterminée (Loës, 1997):

- sur une population totale incluant les personnes actives et inactives : enquête communautaire,
- par participant : basée sur une population active à risque,
- par unité de temps : temps d'exposition.

La dernière méthode (estimation du risque par unité de temps) est la plus valorisée dans les études épidémiologiques. Pour optimiser les efforts de prévention et améliorer la comparaison des études en épidémiologie sur les blessures sportives, il est non seulement important de trouver un consensus sur les questions de définition, mais aussi d'homogénéiser les outils méthodologiques. La question du temps d'exposition est un élément crucial. Le nombre de participants et le temps de pratique sportive, des athlètes blessés et non blessés, sont des variables épidémiologiques essentielles et permettent l'expression des taux d'incidence pour 1000 ou 10 000 heures d'exposition (Loës, 1997). Le risque de la blessure est étroitement lié à la prise de risque des athlètes durant leur pratique sportive : « *Je pense que nous quittons notre cerveau, quelque part au début avant de commencer la course* », Anja Parsson, Mars 2010. A travers cette expression, l'ancienne championne du monde dans toutes les disciplines de ski alpin, manifeste une envie d'inhiber tous les éléments pouvant freiner la prise de risque.

### **Prise de risque**

Dans le contexte sportif de haut niveau, peu d'études ont examiné l'influence intrinsèque de l'individu dans l'adoption de comportements sains ou à risque et leurs implications dans la pathogenèse. La plupart ont considéré la recherche de sensations comme le facteur le plus décisif dans l'identification des sportifs vulnérables. En engageant la personne dans une recherche d'aventure et de danger (« Thrill and Adventure Seeking », TAS), cette disposition l'entraîne parfois à participer volontairement à des activités excitantes et objectivement dangereuses (ex : alpinisme) afin de se stimuler. (Cronin, 1991; Freixanet, 1991; Rossi &



Cereatti, 1993). Il a été démontré que la recherche de sensations fortes influence le degré de prise de risque. Les individus les plus en recherche de sensations sont les plus exposés aux accidents. Ces sensations permettent à ces individus de contrôler leur corps pour répondre aux exigences de l'environnement (pente neigeuse, masse d'air, altitude, vague...) (Lafollie, 2007). Les skieurs de haut niveau ont un score de TAS sur l'échelle de Zuckerman (Zuckerman, 1983) plus élevé comparés à la population générale. Ils montrent un désir de s'engager dans des activités et des sports à risque offrant des sensations inhabituelles plus important que la population générale. Il est aussi rapporté que ce score est plus important chez les skieurs ayant eu une blessure par rapport aux skieurs n'en ayant jamais connu. La prise de risque, surtout chez les skieurs de descente est un facteur de risque important de la blessure (Lex M. Bouter, Knipschild, Feij, & Volovics, 1988). Les athlètes qui ont subi un taux de blessures élevé ont rapporté avoir des préférences pour les environnements stimulants et la recherche de sensations fortes (Osborn, Blanton, & Schwebel, 2009). La qualité psychologique des athlètes est un déterminant qui permet de faire face aux exigences de l'environnement. Une étude a rapporté que les athlètes des sports à haut risque (dont le ski alpin) ont une plus faible prévalence de troubles d'anxiété-dépression que les athlètes des sports à faible risque (Schaal et al., 2011).

Certains travaux ont mis en évidence qu'une des premières causes des accidents en sport repose souvent sur l'adoption de certains types de comportements. Souvent, les sportifs blessés ne portent pas d'équipements permettant de les protéger contre les dangers propres à leur pratique physique (Benson BW, Mohtadi NH, Rose M, & Meeuwisse WH, 1999; Spaite, Murphy, Criss, Valenzuela, & Meislin, 1991). Benson et al. (1999) ont par exemple constaté que des hockeyeurs portant des casques ne protégeant que partiellement leur visage étaient 2,3 à 9,9 fois plus susceptibles de se blesser à la tête que ceux dont le casque couvrait entièrement le visage. Par ailleurs, sur les 5 morts et les 8648 patineurs sur route blessés aux États-Unis entre août 1992 et mai 1994, aucun d'entre eux ne portait de casque et seulement un patineur sur 44 portait des protections aux poignets (Deroche, Stephan, Lecocq, & Le Scanff, 2007). Deroche et ses collaborateurs rapportent que de nouvelles recherches sur l'influence de la personnalité dans l'adoption de comportements pathogènes dans le contexte sportif semblent cependant nécessaires afin de vérifier s'il existe d'autres dispositions individuelles susceptibles d'expliquer ce qui pousse des sportifs à

se protéger ou à agir dangereusement et à se blesser (Deroche et al., 2007). Récemment, Ruedl et al. ont observé que les comportements à risque sur les pistes de ski sont associés à un âge jeune, une expérience plus avancée, au sexe masculin, un indice de masse corporelle faible et à des vitesses plus élevées. Le port du casque n'est pas associé à des comportements plus risqués sur les pentes (G. Ruedl et al., 2010).

## **Chapitre 2 : Epidémiologie de la blessure dans le ski alpin**

## **Dans le ski alpin de loisir**

### ***Incidence des blessures***

Au ski comme au snowboard, le taux de blessures dépend de la définition de la blessure mais aussi de la source de l'information et du temps d'exposition. Contrairement au ski de compétition, le ski alpin de loisir a largement été étudié. En raison de son développement, l'incidence des blessures a considérablement variée au cours des années. Dans ce même sport, les blessures ont diminué en passant d'une incidence de 7,6 pour 1000 journées-skieurs entre 1952 et 1957 à 2,6 pour 1000 journées-skieurs entre 1975 et 1976 (rapportées par l'équipe médicale) (Earle, Moritz, Saviers, & Ball, 1962; Moritz, 1959; Tapper & Moritz, 1974).

Dans une autre étude, Johnson et ses collaborateurs ont réalisé une analyse prospective sur des blessures recueillies depuis 1972 à partir d'une station de ski dans le Vermont (USA). Ils ont décrit une diminution de 44% de toutes les blessures entre 1972 et 1994 avec un taux d'accidents de 4,7 pour 1000 journées-skieurs en 1972 et de 2,5 en 1994 (Robert J. Johnson et al., 1997). Ainsi, le taux de blessures dans le ski alpin a considérablement diminué au cours des 50 dernières années (Tableau 3).

Tableau 3. Evolution de l'incidence des blessures au cours des 50 dernières années dans le ski de loisir

<b>Etudes</b>	<b>Design</b>	<b>Déclarée par</b>	<b>Incidence pour 1000 JS</b>	<b>Nation</b>
(Haddon, Ellison, & Carroll, 1962)	P	Médecins	5,9	USA
(Mcalister et al., 1965)	R	Patrouilles de ski	7,3	USA
(Tapper & Moritz, 1974)	R	Données hospitalières	5,1 en 1969/1970 3,2 en 1971/1972	USA
(L. R. Young, Oman, Crane, Emerton, & Heide, 1976)	P	Patrouilles de ski	4,2 en 1966/1967 2,8 en 1973/1974	USA
(Requa, Toney, & Garrick, 1976)	R	Auto-évaluation	9,3	USA
(Korbel & Zelcer, 1982)	P	Patrouilles de ski/Médecins	1,4	Australie
(Ascherl, Schlemmer, Lechner, & Bluemel, 1982)	P	Données hospitalières	2,4	Allemagne
(Dubravcik, Szpilberg, & Maistrelli, 1982)	P	Médecins	2,2 en 1978/1979 2,7 en 1979/1980	Canada
(Lystad, 1989)	P	Médecins	5 en 1971 0,9 entre 1982 et 1986	Norvège
(Robert J. Johnson, Mote, & Binet, 1989)	P	Médecins	2,5	USA
(Sherry & Fenelon, 1991)	R	Données hospitalières	3,2	Australie
(Laurence R. Young & Lee,	P	Patrouilles de ski	3,4	USA

---

1991)

(Oliver & Allman, 1991)	R	Auto-évaluation	24 3,6 (pour ceux vus pas des patrouilles de ski ou des physiciens)	USA
(Robert J. Johnson, Mote, & Zelcer, 1993)	P	Médecins	5 en 1973 2,5 en 1990	USA
(Jasper E. Shealy & Ettliger, 1996)	P	Médecins	2,2 (hommes) 3,4 (femmes)	USA
(Molinari, Bertoldi, & Zucco, 1996)	R	Données hospitalières	0,9	Italie
(Warme, Feagin, King, Lambert, & Cunningham, 1995)	P	Médecins	3,7	USA
(Langran, Jachacy, & MacNeill, 1996)	P	Médecins	2,4	Scotland
(Robert J. Johnson et al., 1997)	P	Médecins	2,5	USA
(Deibert, Aronsson, Johnson, Ettliger, & Shealy, 1998)	P	Médecins	2,8	USA
(Jørgensen et al., 1998)	R	Auto-évaluation	33,6	Danemark

La revue épidémiologique de Koehle et ses collaborateurs (2002) regroupe tous les travaux de 1989 à 2002 sur les blessures dans le ski alpin et leur prévention (Koehle et al., 2002). Le ski alpin est un sport qui engendre des risques de blessures sévères de manière significative. L'épidémiologie est au centre de toute approche concernant les blessures dans

ce sport. Les statistiques de tous les travaux réalisés les 50 dernières années mettent en avant des changements considérables au niveau de la pratique en tant que telle et de la technologie avec l'arrivée de nouveaux équipements. Avant les années 1970, le taux de blessures était estimé à environ 5 à 8 pour 1000 journées-skieurs (Ellison, 1977; R. J. Johnson, Pope, & Ettlinger, 1974). Cette incidence a diminué ensuite la décennie qui suit avec 3 à 6 pour 1000 journées-skieurs (Warme et al., 1995) et atteint 2 à 3 pour 1000 journée-skieurs les dix dernières années (Deibert et al., 1998; C. F. Ettlinger, Johnson, & Shealy, 1995; Warme et al., 1995). La cause majeure de cette diminution significative de l'incidence est due à l'évolution et l'amélioration de l'équipement de ski (en particulier des chaussures et des fixations). Aujourd'hui les bottes en cuir sont remplacées par des chaussures en plastique plus rigides et plus lourdes améliorant ainsi la protection de la cheville et de la partie inférieure de la jambe ; cependant, elle ne résout pas la forte incidence de blessures concernant le genou (Koehle et al., 2002).

#### **Localisation anatomique et type de blessure au ski**

Dans toutes les études présentées dans le tableau 3, les blessures au niveau des membres inférieurs et du genou sont les plus fréquentes suivies par celles des membres supérieurs. Dans la littérature au sujet du ski et du snowboard, les blessures rapportées sont principalement des blessures graves. Pour établir une estimation actuelle, les études des 10 dernières années ont été rapportées pour les skieurs et snowboarders de loisirs (tableau 4).

Tableau 4. Localisation des blessures (%) des différentes études sur le Ski Alpin de loisirs au cours des 15 dernières années. Tableau tiré de Florenes (Tonje Wåle Flørenes, 2010)

	Head/neck	Upper extremity	Shoulder/ clavicle	Wrist/ Hand	Lower extremity	Knee	Lower leg	Ankle	Abdomen/ chest	Spine/ back
<i>Medical clinic/hospital</i>										
(Boldrino & Furian 1999)										
USA, 1997 (n=160)	14	20	5	9	44	21	13		11	6
(Xiang et al., 2005)										
USA, 2002 (n=77300)	15.7	33.2	15.6	11.0	37.6	22.7		8.7		6.1
(Sasaki et al., 1999)										
Japan, 1991-1997 (n=10977)	15.5	25.9	12.5	9.4	52.5	31.0	7.5	8.7		6.1
(Dohjima et al., 2001)										
Japan, 1988-2000 (n=5048)	10	26			40					
(Matsumoto et al., 2002)										
Japan, 1995-2000 (n=2243)	29	19			35				17 (trunk)	6.1
(Corra et al., 2004)										
Italy, 2001-2002 (n=1003)	17	24			31				10	13
<i>Ski patrol/local clinic</i>										
(Langran & Selvaraj 2002)										
Scotland, 1999-2000 (n=480)	15.7	24.2	6.9	14.8	53.1	36.7	4.8	8.1	3.2	
(Bridges et al., 2003)										
Canada, 1999-2000 (n=823)	19	25	12	10	48	30	7	6	1	6
(Ekeland & Rødven 2009a)										
Norway, 2004-2006 (n=4575)	18	29	11	12	44	24	10	6	3	7

n=number of injuries



## Membres supérieurs

Les traumatismes au niveau des membres supérieurs représentent 19 à 33 % de toutes les blessures au ski et les plus courantes touchent essentiellement l'épaule et le pouce. Les lésions de l'épaule représentent 5 à 16 % de toutes les blessures. Les hommes ont deux fois plus de blessures à l'épaule que les femmes (Arne Ekeland et al., 2008; Jasper E. Shealy & Ettlinger, 1996). Les blessures les plus récurrentes affectent les tendons de la coiffe des rotateurs (24%) (avec 22% de subluxations et de dislocations gléno-humérale antérieures, 20% de disjonctions acromio-claviculaires) et concernent 11% de fractures claviculaires (Kocher & Feagin, 1996). La fracture la plus fréquente chez les skieurs alpins est la fracture de la clavicule (Kocher & Feagin, 1996). Les blessures au pouce représentent 4 à 10% de tous les accidents de ski (Davidson & Lalot, 1996; Robert J. Johnson et al., 1997; Langran & Selvaraj, 2002) et sont spécifiques du ski connues sous le terme de " pouce du skieur ". il s'agit d'une lésion aiguë de la première articulation métacarpo-phalangienne (MCP) avec un étirement du ligament collatéral ulnaire (Lamont, 1991; Mogan & Davis, 1982). La plupart des blessures de pouce au ski sont des entorses (86%) (Carr, Johnson, & Pope, 1981).

## Traumatismes crâniens et rachidiens

Les traumatismes médullaires ne sont pas les blessures les plus communes dans le ski alpin (0,01 pour 1000 journée-skieurs) (Tarazi, Dvorak, & Wing, 1999). Tarazi et al ont démontré que le taux de traumatismes médullaires dans le snowboard est 4 fois plus important qu'en ski. Soixante-dix-sept pourcents des blessures médullaires (Tarazi et al., 1999) et 30% des blessures au niveau de la tête (Fukuda, Takaba, Saito, & Endo, 2001) sont enregistrés dans le snowboard résultant de l'importance des sauts et réceptions spécifiques à la pratique.

Sulheim et ses collaborateurs (2006) ont rapporté que près de 25% des blessures à la tête enregistrées par la patrouille de ski ont été référées à un médecin ou à l'hôpital pour une évaluation ou un traitement (accidents potentiellement graves). Les blessures à la tête sont principalement des commotions cérébrales (Sulheim, Holme, Ekeland, & Bahr, 2006). Les traumatismes médullaires représentent environ 6% de toutes les blessures alpines et les plus fréquents enregistrés à l'hôpital sont les fractures et plus particulièrement les tassements

vertébraux. La plupart des fractures se trouvent au niveau de la colonne thoraco-lombaire (Tarazi et al., 1999).

Dans le snowboard, en ski-cross ou encore en ski acrobatique, Furrer et al rapportent une augmentation des blessures au niveau de la tête passant de 12% en 1984-1988 à 19% en 1989-1992 (Furrer et al., 1995). Dans leur évaluation des blessures dans le ski aux USA entre 1993 et 1997, le *Consumer Product Safety Commission (CPSC)* a noté que les blessures au niveau de la tête représentaient 14% de toutes les blessures dans le ski et le snowboard regroupés et sont responsables de plus de la moitié des morts (US Consumer Product Safety Commission, 1999).

Dans le ski alpin, les blessures au niveau de la tête ont diminué durant les dernières décennies mais restent responsables de plus de la moitié des accidents mortels dans le ski alpin (ex: morts de Sonny Nono et de Michael Kennedy en 1998 suite à un traumatisme crânien).

La base de données des décès de la CPSC enregistre 188 décès au ski et au snowboard de 1990 à 1997 équivalents à 24 décès par année. Ces données ont été étudiées afin d'identifier la part des traumatismes crâniens dans ces décès. L'examen a révélé 108 blessures médullaires (plus de la moitié) et 84 décès ont été attribués uniquement à un traumatisme crânien.

A partir de là, des mesures de prévention ont été mises en place et un des premiers changements concerne le port systématique du casque chez les skieurs et les snowboarders dans le but de réduire les traumatismes.

### Membres inférieurs

De toutes les blessures subies par les skieurs alpins de loisirs, 31 à 53% touchent les membres inférieurs (tableau 4). Le genou est la partie la plus souvent blessée du corps avec 21 à 37% de toutes les blessures. Dans les blessures au genou, on note 0,3 ruptures du LCA pour 1000 journée-skieurs (Robert J. Johnson et al., 2008). Le taux d'incidence des blessures pour les membres inférieurs a diminué de 50% depuis la fin des années 1970 (Robert J.

Johnson, Zucco, & Shealy, 2000) avec la plus forte baisse (83%) au niveau des jambes. Cette réduction est particulièrement due à l'amélioration du matériel et des équipements sportifs (Deibert et al., 1998; C. Ettlinger, Johnson, Shealy, & Dean, 2006; Hart Hauser, 1989; Robert J. Johnson et al., 1997).

Dans l'étude sur les blessures dans le Vermont (USA), Johnson et al. (1997) ont montré une diminution de 90% des blessures liées à la torsion de la jambe (en dessous du genou). Ils notent également une diminution de 83% des blessures au niveau de la jambe (fractures du tibia). Les entorses de la cheville ont diminué de 92%. Les fractures au niveau inférieur de la jambe représentent actuellement 3,5% de toutes les blessures (A Ekeland, Sulheim, & Rodven, 2005; Langran & Selvaraj, 2002), mais cette proportion est beaucoup plus élevée chez les enfants par rapport aux adolescents et aux adultes (Deibert et al., 1998; A Ekeland et al., 2005; Arne Ekeland, Holtmoen, & Lystad, 1993; Laporte et al., 2000; Ungerholm, Gierup, Lindsjö, & Magnusson, 1985). Les fractures distales de la jambe ou du segment jambier sont jusqu'à neuf fois plus fréquentes chez les enfants de moins de 10 ans que chez les adultes (Arne Ekeland et al., 1993).

Bien que le taux de blessures des membres inférieurs ait diminué de manière significative ( $p < 0,05$ ), les entorses graves du genou, impliquant généralement la rupture du LCA a doublé des années 1970 aux années 1990 (Robert J. Johnson et al., 2000). D'autre part, il est rapporté une augmentation de 268% des ruptures du LCA entre les années 1990 et 2006 (Robert J. Johnson et al., 2008). Dans une étude prospective sur la période 1972 à 1994 à Sugarbush Ski Resort à Vermont, Deibert et al. (1998) ont rapporté une réduction de 43% de l'ensemble des blessures, de 89% de fractures tibiales et une augmentation de 280% de ruptures du LCA (Deibert et al., 1998).

Le système de surveillance national de la blessure du CPSC a enregistré 84 200 urgences hospitalières en 1997 dues aux accidents au ski et ce chiffre a nettement diminué depuis 1993 où 114 400 urgences hospitalières ont été comptabilisées pour cette seule année. Plus de la moitié de cette baisse est due à la réduction des blessures au niveau de la cheville, de la jambe et du genou. Au cours de cette même période, les accidents de snowboard ont presque triplé passant de 12 600 en 1993 à 37 600 urgences en 1997. Dans les 2 cas, les évolutions sont statistiquement significatives (Figure 2).

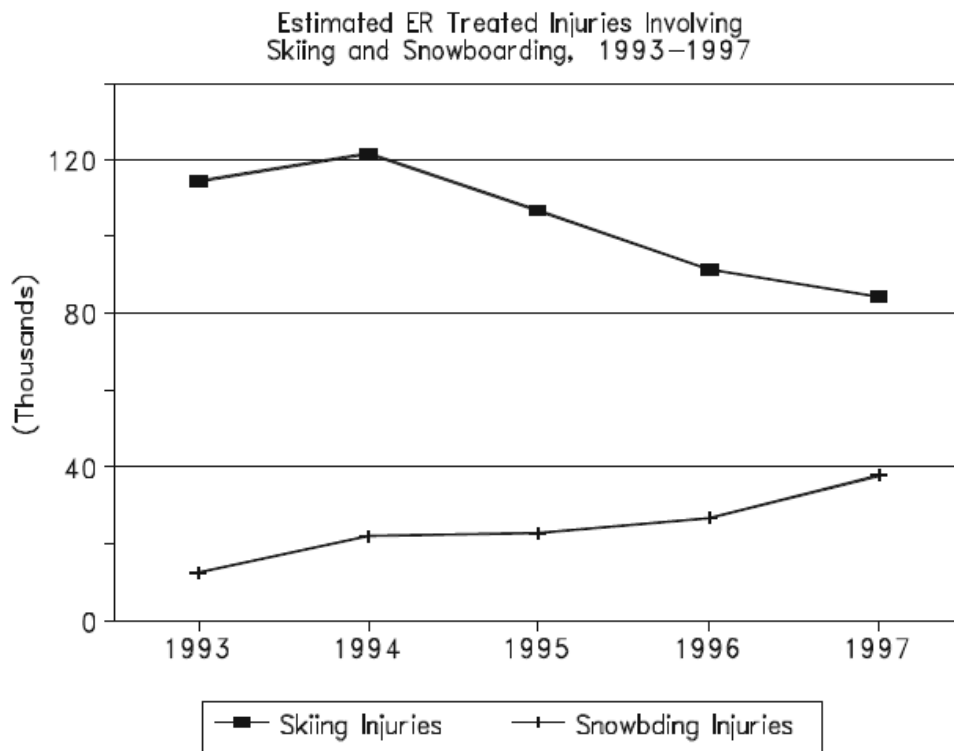


Figure 2. Estimation des blessures impliquant des urgences hospitalières au ski et snowboard de 1993 à 1997. Figure d’après CPSC (US Consumer Product Safety Commission, 1999)

### *Prévention*

La bonne condition physique est vivement recommandée pour une prévention des blessures (Hunter, 1999; Kocher, Dupré, & Feagin Jr, 1998; Natri, Beynon, Ettlinger, Johnson, & Shealy, 1999). Natri et al. ont rapporté que l'augmentation de la force musculaire réduit la pression sur le LCA pendant une rotation interne du tibia par rapport au fémur (Natri et al., 1999). Le travail sur l’agilité et la flexibilité permet de diminuer l’incidence et la gravité de la blessure (Kocher et al., 1998).

### **Evolution du matériel et physiopathologie**

Nombreuses sont les études sur la blessure dans le ski alpin qui ont montré une relation entre l’entorse du genou et les problèmes liés au blocage des fixations (Natri et al, 1999).

Pour chaque chute, les risques de blessures des membres inférieurs augmentent de 2,3 fois si un ski présente des soucis de libération des fixations et 3,3 fois si les deux skis restent fixés (Bouter et al, 1989).

Depuis les années 1970, le taux de blessures en ski alpin a considérablement baissé. Les atteintes de la jambe et de la cheville ont diminué, alors que les lésions ligamentaires du genou sont de plus en plus fréquentes. Les variations des taux de traumatologie du membre inférieur ont notamment été impactées par l'évolution du matériel (Forster & Strohmenger, 1984; Koehle et al., 2002).

Dans le ski alpin, l'utilisation des bâtons expose les ligaments de la métacarpo-phalangienne du pouce à des contraintes latérales particulières. Dans les années 1990, les bâtons de ski sans dragonne engendraient des lésions du pouce à cause de la forme des poignées qui comportaient un moulage spécifique de sorte à emprisonner le pouce. Ce mécanisme d'emprisonnement demande une extension du pouce qui le rend particulièrement vulnérable en cas de chute (Primiano, 1985).

L'étude de Burtscher et ses collaborateurs a tenté de déterminer si l'introduction des skis paraboliques a modifié le taux et/ou la localisation anatomique des blessures en ski alpin (Martin Burtscher et al., 2008). Durant la saison 1997-1998, 1,43 blessures pour 1000 journées-skieurs ont été enregistrées. Sur les 17 914 skieurs alpins blessés, 29,5% d'hommes, et 53,0% de femmes ont subi des blessures au genou. Cinq ans plus tard avec l'introduction des skis paraboliques, le taux global de blessures a diminué de 9%, mais la différence du taux de blessures spécifiques au genre n'a pas changé (Martin Burtscher et al., 2008). Ruedl et al. ont observé que les femmes utilisant plus fréquemment une fixation nouvellement réglée ( $\leq 1$  an) ont tendance ( $p = 0,082$ ) à se blesser plus que les hommes (Gerhard Ruedl et al., 2011).

Johnson et al. ont rapporté que des skieurs utilisant des skis paraboliques dont la taille est inférieure à 75% de leur taille augmentent leur risque de rupture du LCA (R. J. Johnson, Ettliger, & Shealy, 2005).

D'autres études ont montré que le risque de lésions du genou et notamment de ruptures du LCA est plus élevé chez les skieurs utilisant des skis traditionnels par rapport aux skis

paraboliques (Köhne, Kusche, Schaller, & Gutsfeld, 2007; Merkur, Whelan, Kuah, & Choo, 2003). Une étude allemande de 2007 rapporte 11,4% de ruptures du LCA chez les skieurs ayant utilisé des skis paraboliques contre 14,3% pour ceux utilisant des skis traditionnels (Köhne et al., 2007).

Le réglage théorique chaussure-fixation pour chaque skieur est un compromis entre le risque d'accident par l'ouverture intempestive de la fixation et le risque de lésion par blocage de celle-ci. Cependant, il est rapporté que même si ces normes sont respectées, de nouvelles innovations techniques sur le matériel de ski seront nécessaires pour viser une diminution des atteintes du genou (C. F. Finch & Kelsall, 1998).

L'évolution du matériel en ski alpin concernant les chaussures et les fixations des skis dans les dernières années a permis de diminuer le nombre de blessures de la cheville et du tibia chez les skieurs de haut niveau (White & Johnson, 1993).

Or, cette réduction considérable est dans le même temps accompagnée d'une croissance des taux de ruptures du LCA. Plusieurs études ont mis en évidence cette corrélation entre la diminution des blessures au niveau de la cheville et du tibia et l'augmentation du nombre de ruptures du LCA due à l'évolution du matériel (Natri et al., 1999; Urabe, Ochi, Onari, & Ikuta, 2002).

L'apparition des fixations déclenchables est responsable de cette réduction des blessures à la cheville et au tibia. Ce mécanisme a permis de limiter les transferts de contraintes, telles que les torsions, sur la jambe inférieure du skieur. L'arrivée des fixations de sécurité a donc joué un rôle indéniable dans la prévention des fractures de jambe ou encore des entorses de cheville (Plaweski, Huboud-Peron, Faure, & Merloz, 1997).

L'avènement des bottes en plastique thermoformé dans les années 1970 permettant une meilleure tenue du pied et de la cheville ont favorisé le déplacement progressif de la blessure de la jambe vers le genou. La hauteur et la rigidité de la tige des chaussures assurent le blocage des mouvements éventuels de varus/valgus de la cheville. Or, ce blocage diminue les capacités d'amortissement de la cheville et une transmission directe des contraintes au niveau du genou se crée (Plaweski et al., 1997).

L'apparition des ruptures du LCA à partir de la moitié des années 1970 s'expliquerait par un meilleur déclenchement des fixations (dans plusieurs axes de l'espace) mais aussi par l'apparition des chaussures de ski à tige haute et rigide (Saragaglia, Diemer, Peron, Kirchmeier, & Vouillat, 2001).

### **Genou et rupture du LCA**

#### **Biomécanique du genou**

La stabilité du genou doit être assurée dans trois directions : frontale, sagittale et rotatoire (Figure 3).

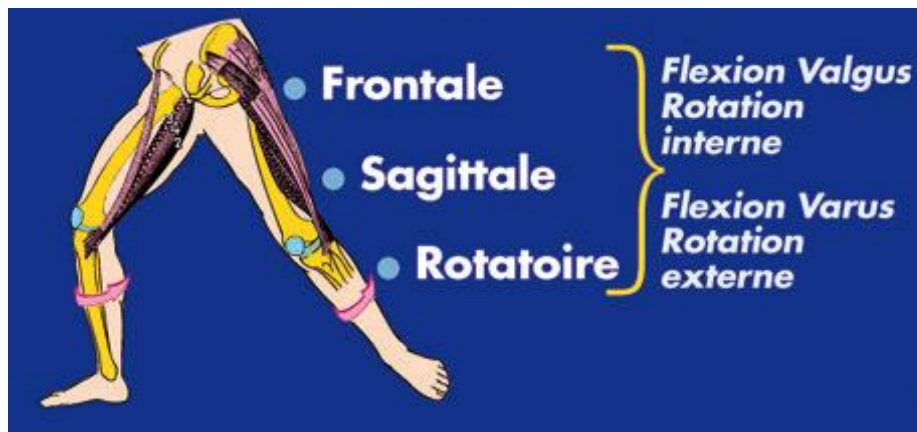
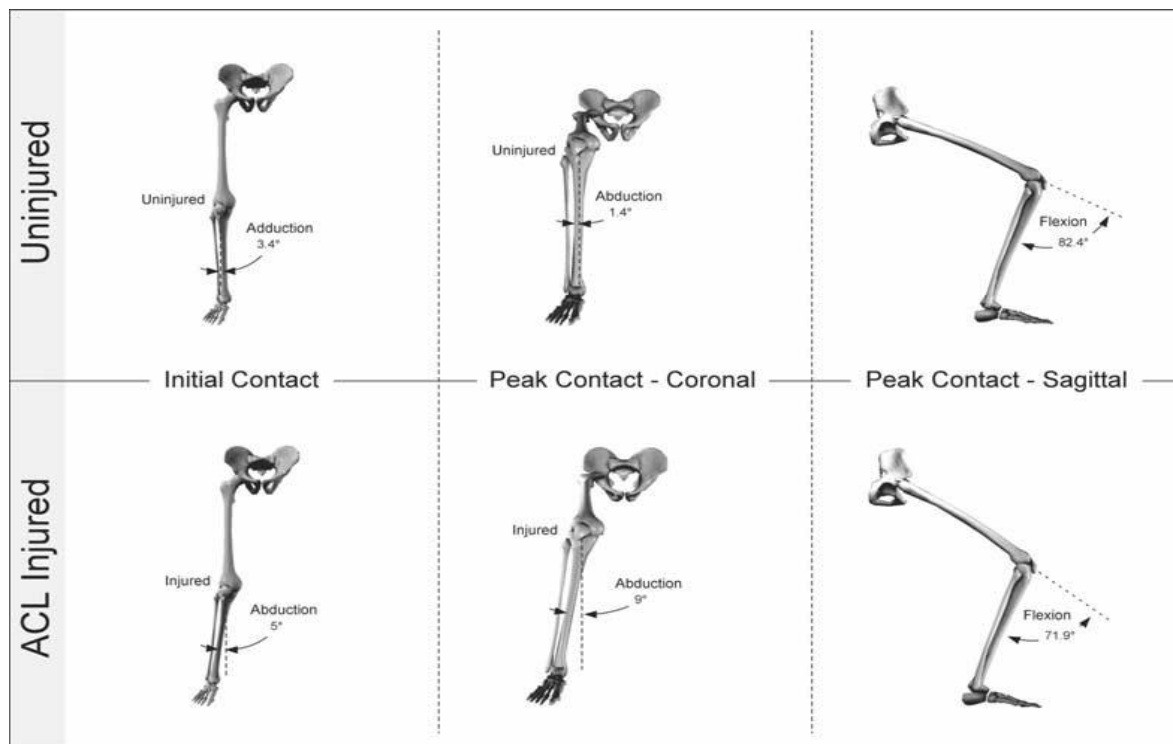


Figure 3. Schéma expliquant les particularités et mécanismes de stabilité du genou.

Hewett et ses collaborateurs montrent la cinématique du genou dans différents axes chez des skieurs ayant subi une rupture du LCA et chez des skieurs avec un genou sain (Figure 4).



**Figure 4.** Modèle biomécanique représentant la cinématique articulaire du genou au cours d'une chute verticale au moment de la réception dans le groupe des skieurs ayant subi une rupture du LCA et des skieurs n'en ayant pas eu (n = 9 genoux et n = 390 genoux, respectivement (Hewett et al., 2005).

### Rupture du LCA

La rupture du LCA est l'une des lésions du sportif les plus fréquentes. Sa fréquence aux Etats-Unis est de 250 000 cas par an (Flynn et al., 2005). Le coût lié pour ces lésions pour la santé publique est très important puisqu'il représente 17 000 dollars par ligament rompu (Cumps, Verhagen, Annemans, & Meeusen, 2007). Aux Pays-Bas, plus de 5000 ligamentoplasties ont été réalisées en 2008, soit une rupture du LCA pour 3200 habitants. En France, 35 000 ruptures ont été opérées en 2007 soit une rupture du LCA pour 1900 habitants (« Site de



l'agence technique de l'information sur l'hospitalisation (ATIH) », s. d.). En Suisse, il y a environ 81 lésions du LCA pour 100 000 individus par an et en Allemagne, 70 lésions du LCA pour 100 000 individus par an (Lobenhoffer, 1999).

La participation sportive des hommes comme des femmes, a augmenté depuis 1972 (National federation of state high school association) (« National Federation of state High School Associations », s. d.). Avec cette augmentation, l'exposition aux traumatismes et donc aux blessures ont également augmenté.

Les femmes, participant dans des sports de pivot, ont un risque de lésion du LCA plus grand que les hommes. De nombreuses études ont montré un risque 4 à 7 fois plus important que les hommes au même niveau sportif (Agel, Arendt, & Bershadsky, 2005; Arendt & Dick, 1995; Myklebust, Maehlum, Holm, & Bahr, 1998; Toth & Cordasco, 2001). La plupart des lésions du LCA chez les athlètes féminines se produisent au cours d'un accident de pivot sans contact, généralement pendant la décélération, un pivotement (changement de direction) ou une réception de saut. La définition d'un accident de pivot sans contact a été établie par Marshall et al. (S. Marshall, Padua, & McGrath, 2007) comme étant « une force appliquée sur le genou au moment de l'accident, mouvement propre à l'athlète sans contact avec un autre athlète ou objet » (« *forces applied to the knee at the time of injury resulted from the athlete's own movements and did not involve contact with another athlete or object* »). Différentes théories tente d'expliquer cette différence de sex-ratio. L'une d'entre elles serait une théorie anatomique mais qui, à elle seule, ne peut pas expliquer cette différence. D'autres auteurs ont rapporté un déséquilibre de contrôle neuromusculaire. Enfin, les variations des hormones sexuelles du cycle menstruel pourraient avoir une part de responsabilité (Beynnon et al., 2006; M. Burtscher, Sommersacher, Ruedl, & Nachbauer, 2009; Wojtys, Huston, Lindenfeld, Hewett, & Greenfield, 1998).

Dans la population générale de ski, les femmes subissent plus d'entorses du genou que les hommes. Dans le haut niveau, contrairement à de nombreux sports tels que le Football ou encore le Basketball, le risque élevé d'avoir une rupture du LCA chez la femme par rapport aux hommes n'est pas démontré chez les skieurs alpins (Greenwald, France, Rosenberg, & Toelcke, 1996; Macnab & Cadman, 1996).

La littérature nous offre une bonne représentation de la répartition des blessures dans le ski alpin. Avec les progrès techniques en matière d'équipement de sécurité du skieur, le taux d'incidence des blessures dans le ski alpin a considérablement diminué durant les 50 dernières années en ski de loisir. Cependant, cette diminution s'accompagne d'une élévation des entorses graves du genou impliquant généralement la rupture du LCA (Earle et al., 1962; T W Flørenes, Bere, Nordsletten, Heir, & Bahr, 2009; Tapper & Moritz, 1974).

## Dans le ski de compétition

Peu d'études se sont penchées sur l'épidémiologie des blessures chez les skieurs alpins de compétition. Dans le ski de haut niveau, Margreiter et al. ont rapporté en 1976 que 79% (31/40) des skieuses et 87,7% (65/74) des skieurs de l'équipe Allemande ont eu au moins une blessure sérieuse (durée d'absence > 20 jours) durant leur carrière et que la plupart de ces blessures ont lieu en descente. L'occurrence de ces blessures était 25 fois plus élevée en compétition par rapport à l'entraînement. Raas et al. ont rapporté que 83% des 148 coureurs ont souffert de blessures au cours des 3 années précédentes et que 2/3 de ces blessures survenaient en descente comparativement au slalom avec 23% et en slalom Géant avec 11% des blessures. Bergstrom et al. ont observé 8,3 blessures pour 1000 courses chez les skieurs de 15 à 19 ans en descente dans les championnats du monde Junior et Ekeland et al. ont noté 1,1 pour 1000 courses en descente dans les Jeux Olympiques d'hiver de 1994 à Lillehammer (Norvège). Seule cette étude a analysé l'incidence de la blessure durant une saison entière et décrit le risque de blessures en descente à plus de 10 fois par rapport au slalom (Ekeland et Holm, 1985) (tableau 6).

Tableau 6. Etudes épidémiologiques sur les incidences des blessures chez les skieurs de compétition. Tableau tiré de Florenes (Tonje Wåle Flørenes, 2010)

Reference	Population	Exposure	No of all injuries	Injury recording and definition	Injury incidence (per 1000 runs)	Injury incidence (other)
<i>Alpine skiing</i> (Bergström et al., 2001)	Participants in one Junior World Championship (1995) (n=998) 15-19 years	Calculated from race completion rates	4	Medical report of skiers transported or treated by the medical team for injuries with an ISS from 1 to 75	4.0 Downhill 8.3	
(Ekeland et al., 1996)	Alpine skiers participating in the winter Olympic Games 1994 (n=555)	Calculated from race completion rates	3	Medical report of all injuries during official training and competition	1.9 Downhill 1.1	
(Pujol et al., 2007)	Athletes in the national, reserve, or rookie teams for the French Alpine ski team during 1980-2005 (n=379)	Estimated as injuries per 100 skier season	157	Review of the French Ski Federation database and medical report from one surgeon serving the team during the hole period for ACL injuries		8.5 ACL ruptures per 100 skier season (Prevalence of re-injury 19%, bilateral rupture 30.5%)
(Ekeland & Holm 1985)	Norwegian skiers competing in 251 national competitions during 1981-82 season (n=25446)	Not estimated	40	Injury report (A referee appointed by the Norwegian Ski Association for each competition recorded any injuries occurring during the race)		1.6 injuries per 1000 participating racers (downhill 10.3, giant slalom 0.7, slalom 0.8)
(Stevenson et al., 1998) Vermont, USA	Competitive skiers in one geographic area (n=404)	Not estimated	110	Self-reported questionnaire sent out of previous knee injuries while skiing		Female-male ratio 2.3 (ACL 3.1)

### ***Blessures au genou et rupture du LCA***

Comme le montre le tableau 7, le genou représente à lui seul 67,9% (57) de toutes les blessures articulaires et ligamentaires. La nature de la blessure la plus fréquente est donc **les lésions ligamentaires** du genou et la rupture du LCA est le principal diagnostic médical (T W Flørenes et al., 2009). En 2007, il est de 8,5 pour 100 skieurs-saison (Pujol et al., 2007) et de 9,8 pour 1000 courses en 2009 (T W Flørenes et al., 2009).

Tableau 7. Distribution des blessures enregistrées en fonction de la localisation anatomique au cours des saisons 2006-2007 et 2007-2008 en Coupe du Monde de ski alpin. Tableau tiré de Florenes et al. (T W Flørenes et al., 2009)

Body part	Fractures and bone stress	Joint and ligament	Muscle and tendon	Contusions	Lacerations and skin lesions	Nervous system/ concussion	Other	Total (%)
Head, face	2			1	2	11		16 (8.4)
Neck, cervical spine								
Shoulder, clavicle	2	8	2	1				13 (6.8)
Upper arm	1							1 (0.5)
Elbow		3						3 (1.6)
Forearm	1							1 (0.5)
Wrist	2	1						3 (1.6)
Hand, finger, thumb	11	4	1	1				17 (8.9)
Chest (sternum, ribs, upper back)	1			3				4 (2.1)
Abdomen								
Lower back, pelvis, sacrum	1	2	7	6	1	4	1	22 (11.5)
Hip, groin			2		1		1	4 (2.1)
Thigh			4					4 (2.1)
Knee	3	57	2	3	3			68 (35.6)
Lower leg, Achilles tendon	8	2	2	8			2	22 (11.5)
Ankle	3	7						10 (5.2)
Foot, heel, toe	1						2	3 (1.6)
<b>Total</b>	<b>36</b>	<b>84</b>	<b>20</b>	<b>23</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>191 (100)</b>

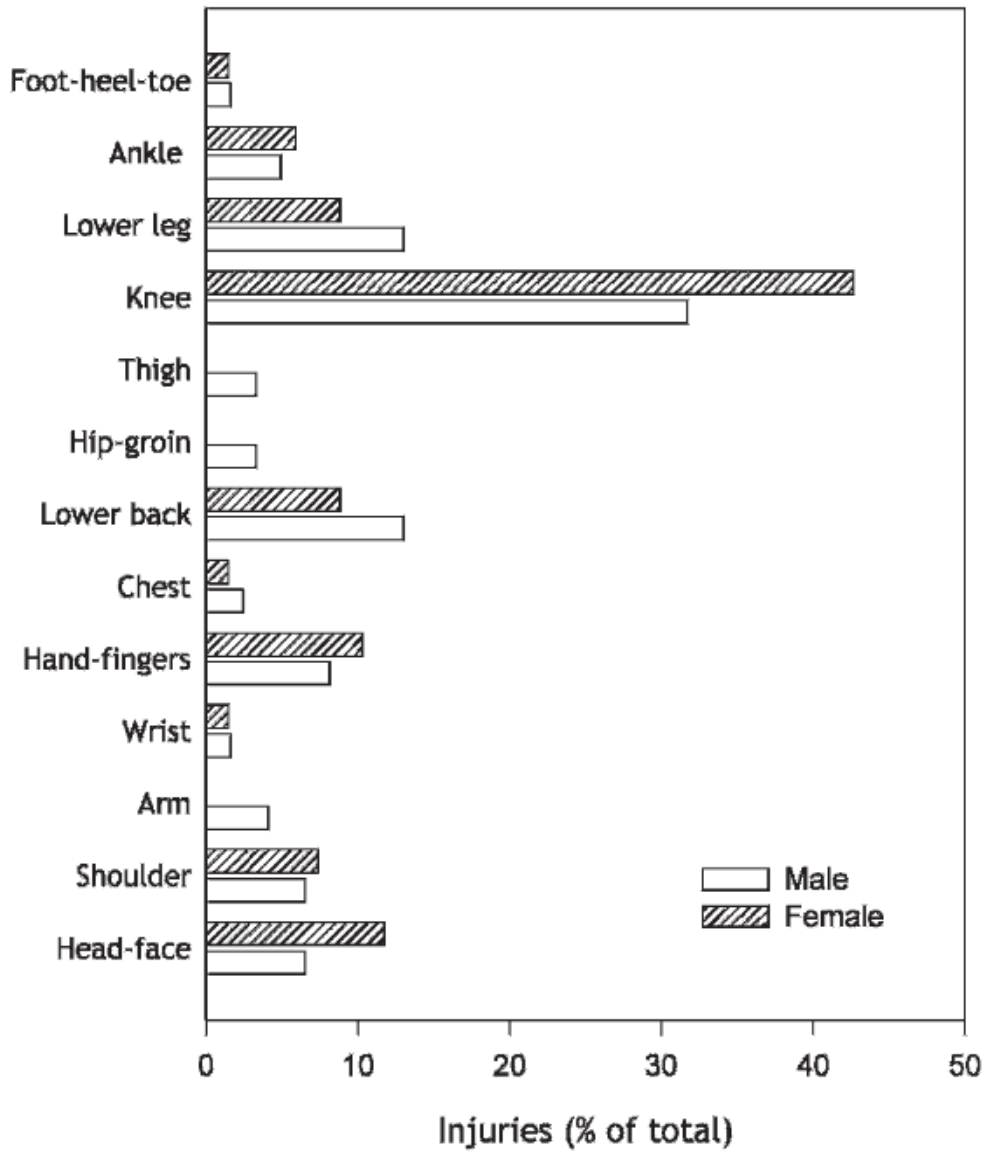


Figure 5. Distribution des blessures par localisation anatomique en Coupes du Monde et Championnats du Monde des saisons 2006-2007 et 2007-2008 exprimée en pourcentage chez les skieurs (bâtonnets blancs) et les skieuses (bâtonnets hachurés). Figure d'après Florenes et al. (T W Flørenes et al., 2009)

La figure 5 présente la distribution des blessures chez les hommes et chez les femmes lors des Coupes du Monde et des Championnats du Monde des saisons 2006 à 2008. Il n'existe pas de différence sexuelle du taux de blessures aux genoux (RR 1.06, 95% IC 0.65 à 1.71) (T W Flørenes et al., 2009). La nature de la blessure la plus récurrente dans le ski alpin est la lésion articulaire et ligamentaire (44,0%) suivie par la fracture (18,8%). La majorité de ces blessures a été enregistrée comme étant des traumatismes sévères (42,9% pour les lésions articulaires et ligamentaires et 41,7% concernant les fractures osseuses) (T W Flørenes et al., 2009).

Florenes et ses collaborateurs affirment que même si le ski alpin est un sport qui se développe en permanence, notamment au travers de son matériel, sa technologie et ses équipements, on ignore si l'incidence des blessures en compétition a augmenté au cours de la décennie précédente. Comme dans le ski alpin de loisir, le traumatisme au genou impliquant la rupture du LCA restent la localisation la plus touchée dans le ski alpin de compétition (T W Flørenes et al., 2009).



## **Facteurs de risque**

### ***Facteurs de risque extrinsèques***

#### **Blessure, rupture du LCA et discipline**

Plusieurs études rapportent la part des blessures par discipline en ski alpin de haut niveau et notent une incidence plus élevée en descente qu'en slalom chez les skieurs de compétition. L'étude allemande menée par Raas et ses collaborateurs estime que 83% de la population étudiée a présenté une blessure grave pendant les trois dernières années et les 2/3 se sont déroulées en descente (contre 23% en slalom et 11% en géant) (Raas, 1982). Ekeland et al. ont étudié la traumatologie au niveau national en Norvège et ont décrit un risque de blessure en descente 10 fois plus élevé qu'en slalom (descente 10,3, slalom 0,8 pour 1000 skieurs) (Arne Ekeland & Holm, 1985).

Margreiter et al. ont montré que la descente est le plus souvent mise en cause dans les accidents de ski alpin (Margreiter et al., 1976).

Dans l'étude de Florenes et al. (2009) sur les blessures chez les skieurs et skieuses durant les coupes du monde des saisons 2006-2007 et 2007-2008 (T W Flørenes et al., 2009), le risque relatif du nombre de blessures pour 1000 courses dans chaque discipline a été estimé. Parmi les 521 skieurs alpins interrogés, 8734 passages ont été enregistrés au cours de deux saisons de coupe du monde. L'incidence des blessures enregistrées par discipline est représentée dans la figure 6. Celle-ci s'élève avec l'augmentation de la vitesse (slalom : 4,9 blessures pour 1000 courses ; IC 95% 2,5 à 7,4 ; slalom géant : 9,2 ; 5,1 à 13,3 ; super-G : 11,0 ; 5,2 à 16,8 ; descente 17,2 ; 11,6 à 22,7). Le taux de blessures en descente (1,1 à 8,3 pour 1000 courses) est plus important que le taux de blessures toutes disciplines confondues (1,4 à 4,0 pour 1000 courses) (Bergstrøm et al., 2001; A. Ekeland et al., 1996).

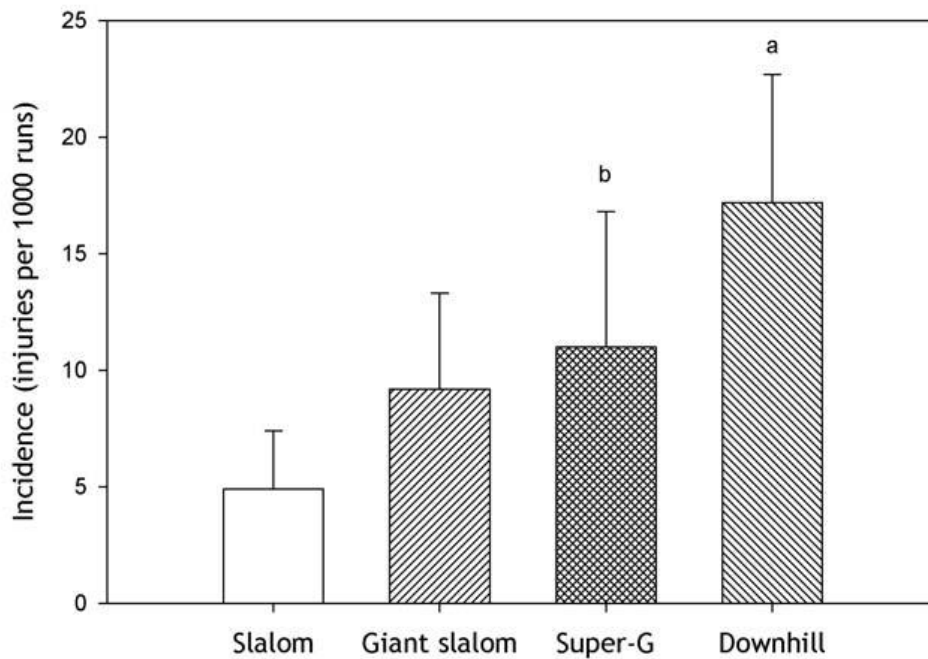


Figure 6. Incidence des blessures exprimée pour 1000 courses dans les différentes disciplines du ski alpin de compétition (avec des intervalles de confiance à 95%) durant 2 coupes du monde (saisons d’hiver 2006-2007 et 2007-2008).<sup>a</sup> La descente compte un taux d'accidents supérieur à celui de slalom et slalom géant. <sup>b</sup> Super- G compte un taux d'accidents supérieur à celui de slalom. Figure d’après Florenes (T W Flørenes et al., 2009).

Florenes et ses collaborateurs ont observé que sur toutes les blessures, la plus grande incidence enregistrée concerne la descente suivie du super-G et du slalom géant, tandis que le slalom montre la plus faible incidence des blessures. La différence de l’incidence est significative entre la descente (RR 3,48 ; IC 95%, 1,93 à 6,25) et le super-G (RR 2,23, IC 95%, 1,09 à 4,56) par rapport au slalom, ainsi que pour la descente par rapport au slalom géant (RR 1,87, IC 95%, 1,7 à 3,25). Le slalom était la seule discipline où il y avait une différence significative du taux relatif de blessures (tout type confondu) entre les hommes et les femmes (RR 5,16, IC 95%: 1,17 à 22,7). Cependant, il n’y avait pas de différence dans le taux relatif de blessures au genou entre les hommes et les femmes et ce, dans toutes les disciplines. Concernant les blessures au genou, de la même manière que les blessures globales, l’incidence de la blessure augmente avec la vitesse de la discipline. En effet, chez les hommes l’incidence est, pour 1000 courses, de 8,5 en descente et de 1,1 blessures au

genou en slalom. Chez les femmes, elle est de 4,6 en descente alors qu'elle diminue à 0,7 blessures en slalom (tableau 8). La vitesse de la discipline est aussi responsable des blessures au genou, dont les ruptures du LCA, en ski alpin de haut niveau (T W Flørenes et al., 2009).

Tableau 8. Nombre de blessures pour 1000 courses en ski alpin de haut niveau dans les différentes disciplines au cours des coupes du monde et championnats du monde (T W Flørenes et al., 2009).

Table 5 Number of all injuries (n = 86) and exposure (the total number of runs, n = 8734) in the different disciplines during World Cup/World Ski Championship competitions

Discipline	Injuries (n)		Exposure (runs)		Incidence (injuries per 1000 runs)			Relative risk	Knee injury incidence (injuries per 1000 runs)			Relative risk
	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Total	Males vs females	Male	Female	Total	Males vs females
Downhill	25	12	1292	863	19.3 (11.8 to 26.9)	13.9 (6.0 to 21.8)	17.2 (11.6 to 22.7)	1.39 (0.70 to 2.77)	8.5 (3.5 to 13.5)	4.6 (0.1 to 9.2)	7.0 (3.4 to 10.5)	1.84 (0.59 to 5.77)
Super-G	9	5	620	653	14.5 (5.0 to 24.0)	7.7 (0.9 to 14.4)	11.0 (5.2 to 16.8)	1.90 (0.64 to 5.66)	1.6 (-1.5 to 4.8)	1.5 (-1.5 to 4.5)	1.6 (-0.6 to 3.7)	1.05 (0.07 to 16.8)
Giant slalom	14	5	1090	977	12.8 (6.1 to 19.6)	5.1 (0.6 to 9.6)	9.2 (5.1 to 13.3)	2.51 (0.90 to 6.97)	3.7 (0.1 to 7.3)	4.1 (0.1 to 8.1)	3.9 (1.2 to 6.6)	0.90 (0.22 to 3.58)
Slalom	14	2	1864	1375	7.5 (3.6 to 11.4)	1.5 (-0.6 to 3.5)	4.9 (2.5 to 7.4)	5.16 (1.17 to 22.7)	1.1 (-0.4 to 2.6)	0.7 (-0.7 to 2.2)	0.9 (-0.1 to 2.0)	1.48 (0.13 to 16.3)
Total	62	24	4866	3868	12.7 (9.6 to 15.9)	6.2 (3.7 to 8.7)	9.8 (7.8 to 11.9)	2.05 (1.28 to 3.29)	3.7 (2.0 to 5.4)	2.6 (1.0 to 4.2)	3.2 (2.0 to 4.4)	1.43 (0.66 to 3.10)

Injury incidence is shown for all injuries (n = 86) in the different disciplines among male and female skiers as well as for knee injuries only (n = 28), and the relative risk for males versus females.

Les sports impliquant le contact physique, les réceptions de sauts, les accélérations, les décélérations brusques et les rotations sont tout autant de mouvements qui provoquent la rupture du LCA. Cependant, même dans les sports de non-contact, les lésions du LCA sont importantes et d'autres facteurs sont responsables de leurs survenues.

### ***Facteurs de risque intrinsèques***

#### **Anatomique**

Ramesh et al. ont noté que les lésions du LCA sont plus fréquentes chez les patients ayant une hyperlaxité globale des articulations et en particulier des genoux. 42,6% ont une hyperlaxité des articulations dans le groupe des patients ayant subi une rupture du LCA contre 21,5% dans le groupe contrôle. Autrement, l'hyperlaxité des genoux est significativement plus importante dans le groupe des blessés par rapport au groupe contrôle (Ramesh et al., 2005).

Myer et al. ont étudié de manière prospective la laxité de jeunes filles afin d'évaluer le risque de lésion du LCA chez les athlètes féminines. Le but de cette étude était de déterminer si celles avec une plus grande laxité des articulations et surtout des genoux étaient plus exposées aux lésions du LCA. Cette analyse biomécanique et épidémiologique a permis de vérifier l'hypothèse que l'hyperlaxité des genoux augmente le risque de rupture du LCA (Myer, Ford, Paterno, Nick, & Hewett, 2008). L'anatomie de l'échancrure intercondylienne (partie centrale du genou, lieu d'insertion des ligaments croisés) est différente chez la femme et chez l'homme. En effet, elle est plus étroite et le LCA est plus petit chez la femme et représente aussi un facteur de risque anatomique de la rupture du LCA (Griffin et al., 2006).

#### **Biomécanique**

Les ruptures du LCA se produisent la plupart du temps lors d'une réception de saut, d'un changement de direction ou d'une décélération. Olsen et al. ont rapporté qu'un valgus de l'axe jambier associé à une rotation externe ou interne du genou est la cause des entorses

du LCA (Olsen, Myklebust, Engebretsen, & Bahr, 2004). Des études récentes ont montré que les forces prédominantes qui influent sur la tension du LCA sont les forces antérieures appliquées sur le tibia, soit par des mécanismes externes tels une chute ou une réception sur le membre inférieur, soit par des mécanismes internes tels que la contraction dominante du quadriceps avec le genou proche de l'extension. La combinaison d'une translation tibiale antérieure et d'un valgus sont la cause la plus importante du mécanisme de blessure chez les athlètes. Le genou proche de l'extension complète, la contraction du quadriceps et la force résultante développée dans le tendon rotulien entraînent un tiroir antérieur sur la partie proximale du tibia avec une mise en tension du LCA. La force du tiroir antérieur crée le plus de tension sur le LCA avec un effet augmenté par le varus, le valgus ou la rotation interne et externe du genou (Berns, Hull, & Patterson, 1992).

Les lésions du LCA représentent une des blessures les plus étudiées dans le sport. Au ski, il existe 3 mécanismes principaux qui décrivent la rupture du LCA (Figures 7, 9, 10 et 11) (C. F. Ettliger et al., 1995; Järvinen, Natri, Laurila, & Kannus, 1994; R. J. Johnson, 1988; Robert J. Johnson et al., 1997).

Le mécanisme du valgus interne-rotation externe : rotation externe de la jambe



Figure 7. Mécanisme de valgus interne-rotation externe du genou dans le ski. Figure d'après Järvinen et al (Järvinen et al., 1994).

Ce mécanisme est considéré par de nombreux chercheurs sur les blessures dans le ski comme étant le premier mécanisme de rupture du LCA chez les skieurs alpins utilisant des skis paraboliques modernes. Il a lieu lorsque la partie antérieure de la pointe du ski est prise

par la neige engendrant une rotation du genou en valgus-latéral (Robert J. Johnson, Pope, Weisman, White, & Ettlinger, 1979; J. R. Marshall, Warren, & Fleiss, 1975). Le skieur chute vers l'avant et le bas de jambe subi une rotation extérieure par rapport à la cuisse. De plus, le ski agit comme un bras de levier et amplifie cette rotation. Ce mécanisme conduit essentiellement à une rupture du ligament collatéral medial suivie d'une rupture du LCA. Le skieur qui subit une rotation externe du genou peut aussi avoir des contusions osseuses présentent aussi dans toutes les entorses graves du genou (Johnson, 1988).

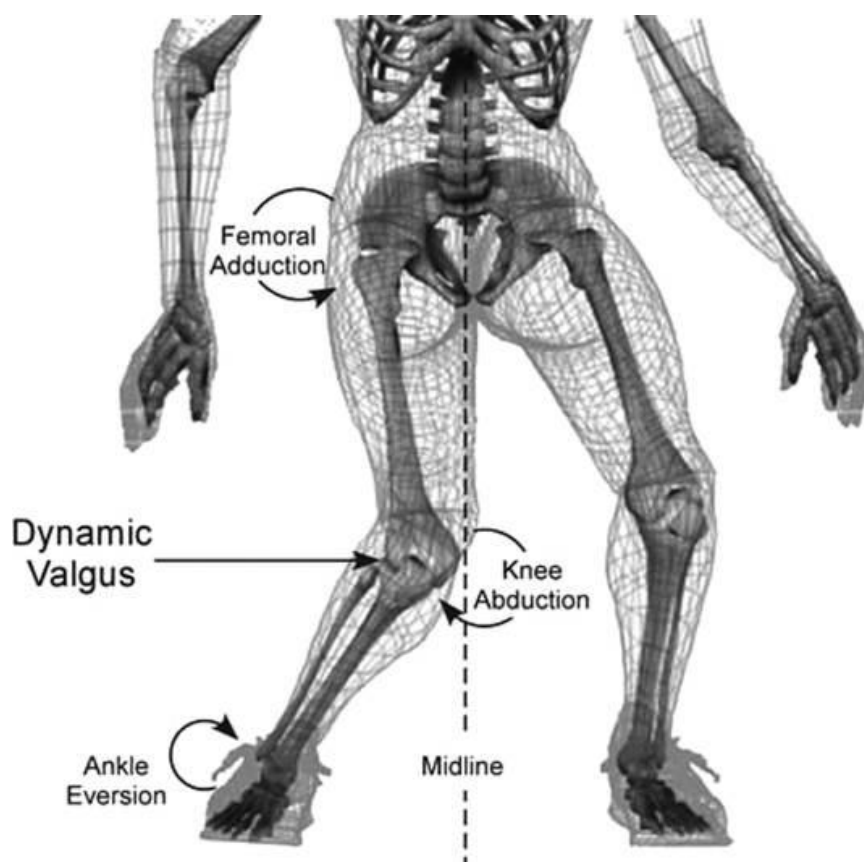


Figure 8. Exemple du mécanisme de valgus interne-rotation externe du membre inférieur. Une combinaison de mouvements et de rotations au niveau des 3 articulations du membre inférieur. Elle inclut potentiellement l'adduction et la rotation interne de la hanche, l'abduction du genou (tibia), la rotation externe du tibia et de la translation antérieure et l'éversion de la cheville. Figure d'après Hewett et al, 2010 (Hewett, Ford, Hoogenboom, & Myer, 2010).



La figure 8 illustre le valgus interne-rotation externe qui est responsable de la rupture du LCA. Il se manifeste par un mouvement excessif latéral du tronc ou un manque de contrôle neuromusculaire du tronc dans le plan frontal. La problématique est que la force de réaction du sol se dirige vers le centre de masse du skieur passant par l'articulation du genou et force la jambe inférieure en position d'abduction (position de valgus du genou). La figure 9 ci-dessous propose une séquence de vidéo originale (image du haut) et un modèle représentatif de la chute (image du bas) d'un descendeur au moment où il se rompt le LCA du genou gauche (Krosshaug, Slauterbeck, Engebretsen, & Bahr, 2007).

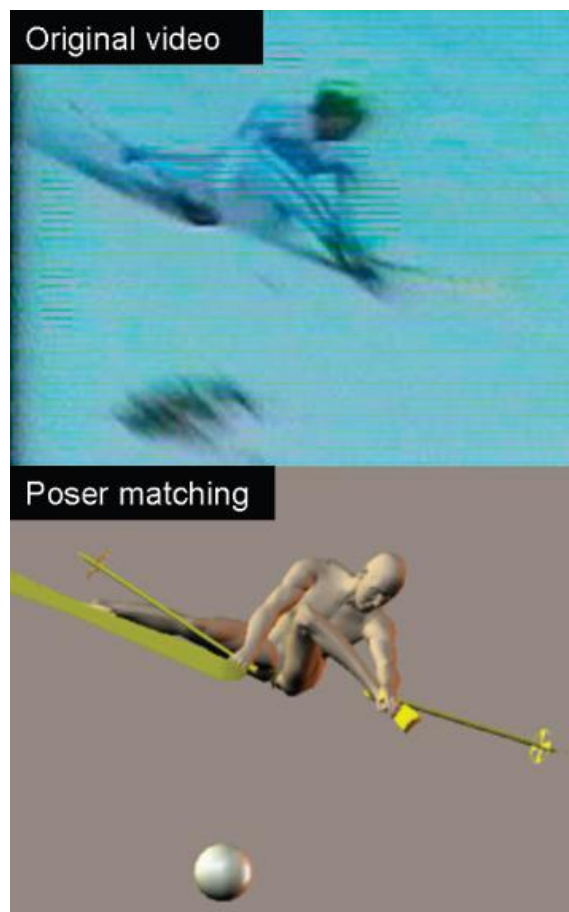
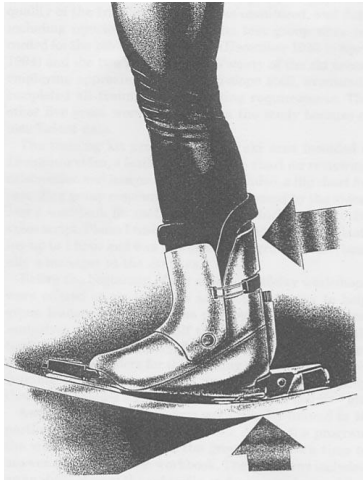


Figure 9. Séquence vidéo et modèle représentatif d'une situation de chute au moment de la rupture du LCA du genou gauche du descendeur d'après Krosshaug et al (Krosshaug et al., 2007).

## Le mécanisme du tiroir antérieur



Il se produit lorsque le skieur tombe sur le talon lors d'une réception brutale avec une perte d'équilibre, un genou en pleine extension et le bras controlatéral tourné vers le haut et l'arrière (C. F. Ettlinger et al., 1995). La partie supérieure de la chaussure de ski pousse le tibia vers l'avant par rapport au fémur, ce qui conduit à un phénomène de tiroir entre le tibia et le fémur provoquant ainsi une rupture isolée du LCA (Figure 10). Un mécanisme similaire se produit quand un skieur stationnaire est frappé par derrière sur la jambe (en général par un autre skieur ou snowboarder). Une pression soudaine est appliquée à l'arrière du mollet, forçant le tibia vers l'avant. Le phénomène de tiroir se crée de manière similaire à la situation précédente résultant une rupture du LCA. Ce mécanisme est connu pour être commun entre freestyle et ski alpin de haut niveau (C. F. Ettlinger et al., 1995).

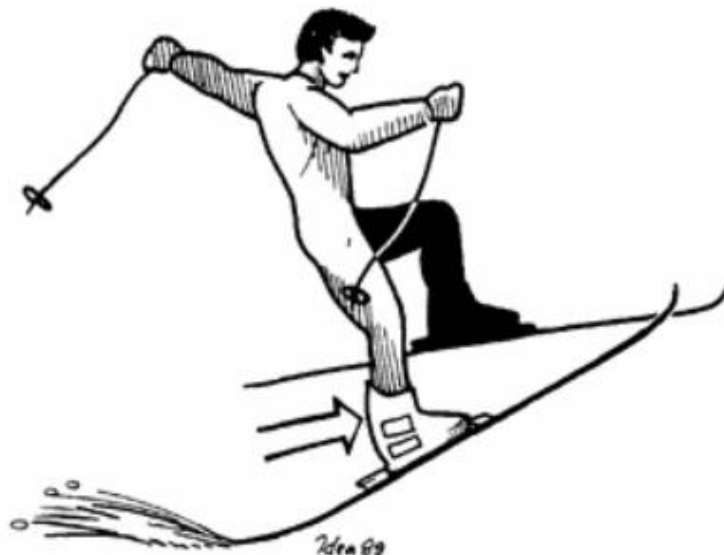


Figure 10. Mécanisme du tiroir antérieur au ski. Figure d'après Järvinen et al (Järvinen et al., 1994).

## Le phénomène du « pied-fantôme »

Ce phénomène se produit lorsque le skieur perd l'équilibre, tombe vers l'arrière et tente de reprendre le contrôle (C. F. Ettlinger et al., 1995; R. J. Johnson, 1988). Ce profil a été identifié et nommé par Carl Ettlinger et ses collègues dans le Vermont au milieu des années 1990 avant l'avènement des skis paraboliques modernes (C. F. Ettlinger et al., 1995). Ce phénomène a lieu lorsque le talon du ski (agissant comme un "pied fantôme") crée une sorte de levier et entraîne une rotation interne forcée de la jambe positionnant le genou en hyperflexion, ce qui entraîne une lésion du LCA.



Figure 11. Phénomène du « pied-fantôme » en ski alpin

## Hormonal

Le taux élevé de blessures du LCA chez les athlètes femmes est un problème croissant auquel font face les femmes, les entraîneurs, les administrateurs et à la communauté entière de médecine du sport (Wojtys et al., 1998). Nombreuses sont les études rapportant une différence des taux de blessures au genou entre les hommes et les femmes. Chez les skieuses de loisirs, l'incidence de la blessure au genou est 2 fois plus importante par rapport aux skieurs et le risque de rupture du LCA est 3 fois plus élevé chez les femmes (M. Burtscher et al., 2009; Stevenson, Webster, Johnson, & Beynnon, 1998).

Les hormones telles que l'œstrogène, la relaxine, ou encore la progestérone, ont un effet sur le métabolisme et les propriétés mécaniques du LCA (Dragoo, Lee, Benhaim, Finerman, & Hame, 2003; Faryniarz, Bhargava, Lajam, Attia, & Hannafin, 2006). La progestérone diminue considérablement la tension du collagène et la relaxine provoque l'assouplissement de plusieurs organes et la relaxation des ligaments. L'expression des récepteurs de la relaxine se fait sous le contrôle de l'œstrogène et cette hormone augmente la réponse des organes cibles de la relaxine (Dragoo et al., 2003).

Wojtys et al. ont montré de manière significative une plus grande prévalence de ruptures du LCA chez les athlètes femmes durant la phase pré-ovulatoire du cycle menstruel (Wojtys et al., 1998). Plus récemment, Beynnon et al. ont dosé la concentration sérique de la progestérone et de l'œstradiol pour dater la période du cycle menstruel au moment de l'entorse. Les entorses graves à la phase pré-ovulatoire (74%) ont été significativement plus importantes que celles durant la phase post-ovulatoire (26%) (Beynnon et al., 2006).

## Neuromusculaire

Le déséquilibre neuromusculaire, entre les ischio-jambiers (IJ) et le quadriceps (Q), est impliqué dans les mécanismes de la rupture du LCA. Dans leur schéma corporel, les femmes ont un quadriceps dominant par rapport aux hommes. Il existe une différence notable de développement musculaire entre hommes et femmes après la puberté : le ratio IJ/Q des hommes augmente de 0,63 (pré-puberté) à 0,68 (post-puberté), alors que celui des femmes diminue de 0,58 (pré-puberté) à 0,49 (post-puberté). Le recrutement des ischio-jambiers est

significativement plus élevé chez l'homme que chez la femme. Une forte contraction excentrique du quadriceps est une des causes principales de rupture du LCA (Boden, Dean, Feagin, & Garrett, 2000). L'évaluation des forces isocinétiques des ischio-jambiers et des quadriceps a permis de fournir des indicateurs de fonctionnalité (Aagaard, Simonsen, Magnusson, Larsson, & Dyhre-Poulsen, 1998; Aagaard, Simonsen, Trolle, Bangsbo, & Klausen, 1995). Tourny et al. ont rapporté que la co-activation (activation simultanée des muscles agoniste/antagoniste) des ischio-jambiers est un facteur déterminant pour maintenir la stabilité articulaire du genou (Tourny-Chollet, Leroy, Léger, & Beuret-Blanquart, 2000). La co-activation musculaire va limiter l'amplitude des mouvements et augmenter la précision. Lorsque le rapport de force entre le muscle agoniste et le muscle antagoniste est déséquilibré, le risque de dommages ligamentaires augmente (Tourny-Chollet et al., 2000).

## Age

En ski alpin de compétition, il n'existe pas d'étude montrant que l'âge est un facteur de risque de la rupture du LCA. En revanche, dans le ski alpin de loisir, Sulheim et ses collaborateurs ont récemment observé que le risque de blessures global est plus élevé chez les enfants (Odds Ratio (OR) 2,72; 2,12 à 3,47) et les adolescents (OR 2,16; 1,72 à 2,66) comparativement aux adultes (Sulheim, Holme, Rødven, Ekeland, & Bahr, 2011). Ils rapportent que les skieurs alpins (OR 2,65; 1,47 à 4,80), les débutants (OR 2,50; 1,61 à 3,85) et les adolescents (OR 4,17; 2,44 à 7,14) ont un taux de fractures à la jambe plus important et les blessures aux genoux sont plus élevés parmi les skieurs alpins (OR 1,82; 1,39 à 2,38) **par rapport aux snowboarders** (Sulheim et al., 2011). **Dans l'étude de Sulheim et al, le groupe des skieurs adultes ayant eu une fracture du plateau tibial a montré une relation entre l'âge et la survenue de la blessure. Les adolescents, ont eux un risque élevé de fracture de la jambe.** Les préoccupations à l'égard des blessures liées à l'âge et les stratégies possibles de prévention sont des problématiques d'actualité. Shealy et al. ont observé que la seule blessure dans le ski alpin lié à l'âge était la fracture du plateau tibial (J. E. Shealy, Ettlinger, & Johnson, 2010).

La compréhension étiologique des blessures sportives peuvent être résumées par le modèle qui suit proposé par Bahr et Krosshaug, 2005:

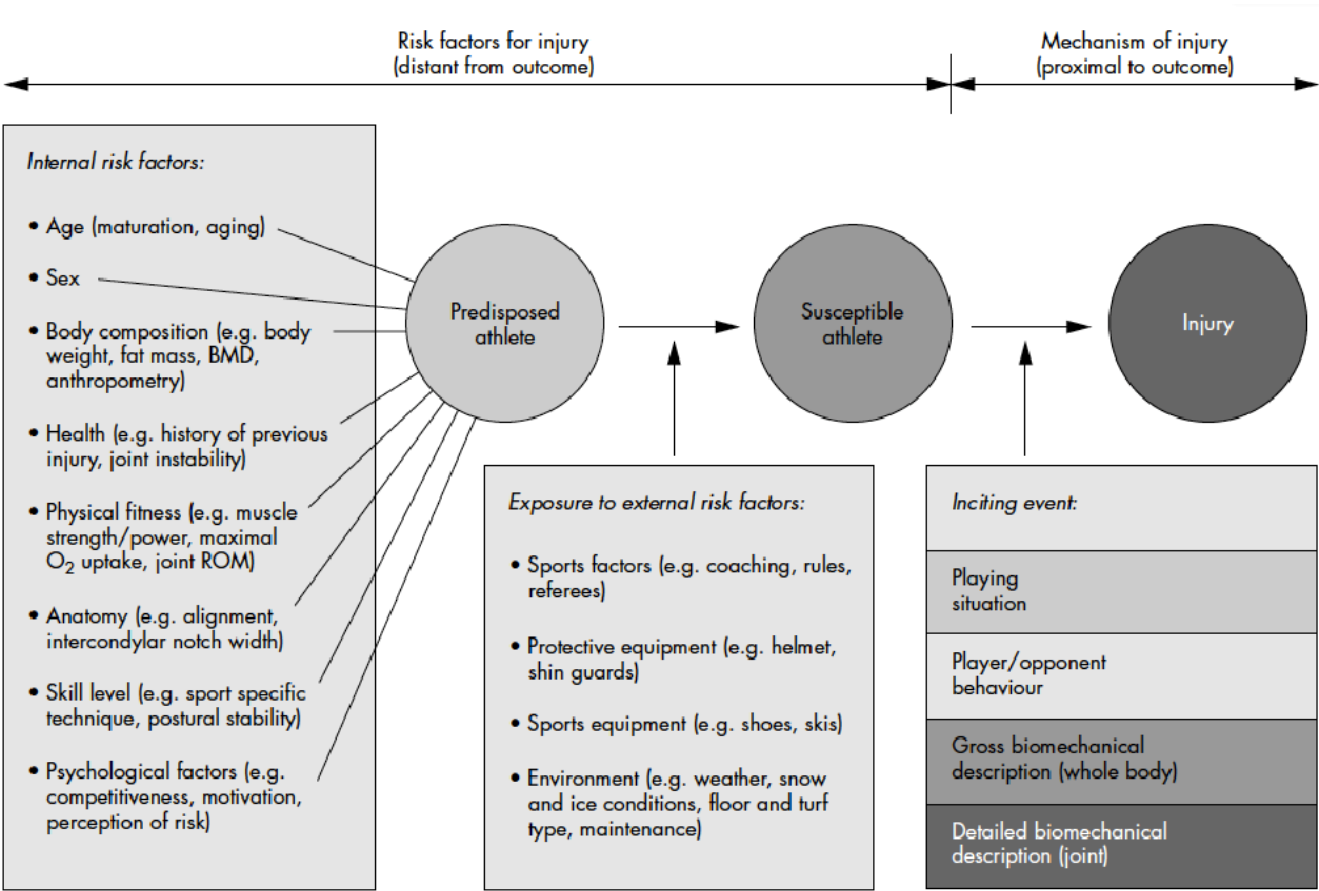


Figure 12. Modèle étiologique des blessures sportives (Roald Bahr & Krosshaug, 2005)

Basé sur le modèle épidémiologique de Meeuwisse (Figure 12) (W. H. Meeuwisse, Tyreman, Hagel, & Emery, 2007), Bahr et al ont développé un modèle complet pour comprendre les causes liées à la blessure (Roald Bahr & Krosshaug, 2005). Passant par la description des mécanismes de la blessure, les auteurs suggèrent que l'analyse étiologique des blessures sportives doit comprendre non seulement un point de vue biomécanique mais doit aussi mettre l'accent sur les caractéristiques du sport en question. Ce modèle est décrit comme une boucle dynamique qui intègre les conséquences de la participation répétée dans le sport, à la fois avec et sans blessure. Les facteurs de risque intrinsèques et extrinsèques peuvent être impliqués de plusieurs manières. Il est possible que la lésion du LCA soit plus susceptible de se produire sur des sols à haute friction (facteur de risque extrinsèque) ou pour les athlètes ayant un faible contrôle neuromusculaire (facteur de risque intrinsèque). Pour bien comprendre les causes de la blessure, il a récemment été déclaré qu'il est tout aussi important de se demander pourquoi une blessure ne s'est pas produite et comprendre le "mécanisme d'absence de blessure". S'il existe une distinction entre le « mécanisme d'absence de blessure » et le « mécanisme de la blessure », alors il serait possible d'évaluer la composante essentielle de l'événement déclencheur qui provoque une blessure (W. H. Meeuwisse, 2009).

## **Chapitre 3 : Blessure sportive et performance**



## **Déterminants psychologiques de la blessure dans le sport**

### ***Modélisation des déterminants psychologiques d'une blessure sportive***

La revue de littérature proposée par Deroche et al. explique les différents paramètres psychologiques pouvant influencer la survenue de la blessure dans le sport (Deroche et al., 2007). Les travaux effectués dans divers domaines de la santé sur l'influence pathogène des conduites à risque et le rôle protecteur de comportements de prévention permettent d'envisager la construction d'un modèle concernant les déterminants psychologiques d'une blessure sportive. Ce modèle est basé sur une application des modèles issus des approches sociocognitives de la santé et souligne le rôle de la vulnérabilité perçue dans l'adoption de l'une des deux modalités comportementales, pouvant aboutir soit à la contraction, soit à l'évitement d'une blessure (Figure 13).

### ***Vulnérabilité physique perçue***

Dans ce modèle, l'existence d'une situation sportive potentiellement risquée constitue le déclencheur du processus pathogène. Cette situation ne concerne pas exclusivement l'engagement volontaire de personnes dans des pratiques sportives objectivement dangereuses (e.g. alpinisme, rugby). Il semble que le réengagement dans une pratique compétitive à la suite de la contraction d'une blessure dans l'année soit également un facteur de risque (Kucera, Marshall, Kirkendall, Marchak, & Garrett, 2005). Engagées dans ces situations, certaines personnes pourraient dès lors décider de se protéger en adoptant des comportements de santé, quand d'autres, à l'inverse, s'aventureraient dans des comportements mettant en péril leur intégrité physique. Cette décision reposerait en premier lieu sur un processus essentiellement lié à l'évaluation par la personne de sa propre vulnérabilité physique (Williams-Avery & Mackinnon, 1996). Ainsi, un sportif, qui se considère comme susceptible de se blesser, chercherait à se protéger à l'inverse d'un sportif qui minimise cette probabilité.

## La personnalité

La personnalité pourrait être également déterminante dans cette décision (Gerend, Aiken, & West, 2004; Hampson, Andrews, Barckley, Lichtenstein, & Lee, 2000; Vollrath, Knoch, & Cassano, 1999). Il a été effectivement démontré que les dispositions personnelles influencent à la fois l'engagement d'une personne dans une situation dangereuse (Freixanet, 1991), l'appréciation par cette personne du risque physique généré par la situation (Gerend et al., 2004) et les comportements adoptés suite à cette évaluation (Hampson et al., 2000; Vollrath et al., 1999). Hampson et al. (2000) ont ainsi observé un effet modérateur du caractère consciencieux d'une personne dans la relation entre les perceptions du risque et l'adoption de comportements sains. Un niveau faible sur ce facteur de personnalité semble être une barrière dans l'adoption de ces comportements, même si la personne perçoit un risque élevé. Le modèle proposé suggère qu'au final l'engagement d'un sportif, dans des comportements dangereux, dans une situation elle-même potentiellement risquée, serait à l'origine de l'apparition d'une blessure.

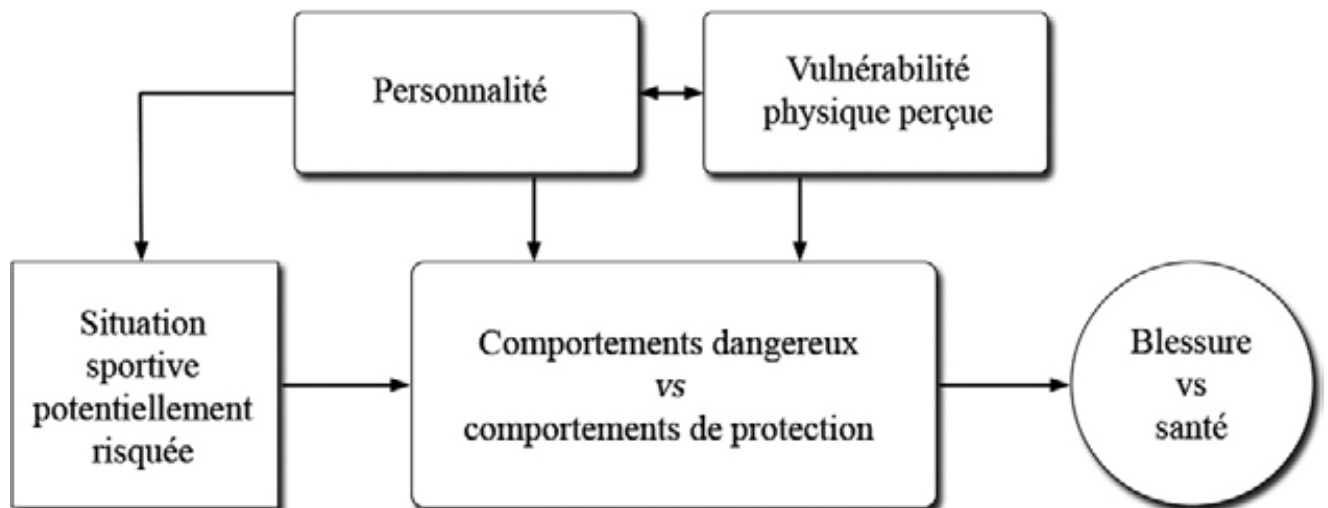


Figure 13. De la prise de risque à la blessure. Figure d'après Deroche et al (Deroche et al., 2007).

## ***Blessures antérieures***

L'expérience antérieure de blessures sportives peut également constituer un événement négatif propice à l'apparition de nouvelles blessures. De nombreuses recherches épidémiologiques prospectives, mettent effectivement en évidence une relation significative entre l'existence de blessures antérieures et le risque actuel de blessure (Kucera et al., 2005; W. Van Mechelen et al., 1996). Dans leur modèle, Williams et Andersen (1998) supposent que les blessures passées pourraient avoir des retentissements psychologiques importants, et être notamment à l'origine d'un stress pathogène. L'expérience individuelle de la blessure serait responsable d'une anxiété accrue et de cognitions négatives au moment du retour à la pratique sportive.

Toutefois, si le lien entre l'existence de blessures passées et le risque de nouvelles blessures a été établi, aucune étude ne s'est intéressée aux processus médiateurs pouvant être impliqués dans cette relation.

## **Blessure sportive et stress**

### ***Rôle du stress dans la pathogenèse en sport***

Les recherches consacrées à l'identification des déterminants psychologiques de la blessure sportive ont principalement envisagé l'influence pathogène du stress et de ses corrélations. Dans la plupart de ces recherches, l'impossibilité de participer aux entraînements ou aux compétitions quand une blessure se manifeste constitue le critère permettant de distinguer les sportifs blessés des sportifs en bonne santé, au-delà parfois de la réalité du dommage corporel lié à cette blessure (Flint, 1998). Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, la durée de cette indisponibilité ou de cette absence (entraînements ou compétitions) traduit la gravité de la blessure (National Athletic Injury/Illness Reporting System, NAIRS, Coddington et Troxel, 1980) (Clarke, 1975).

### ***Manifestations du stress et blessure sportive***

De nombreux travaux expérimentaux ont établi que la confrontation d'une personne à des situations stressantes est responsable de déficits attentionnels de la vision périphérique et de la vision centrale (Kahneman, 1973; Rogers, Alderman, & Landers, 2003; Williams, Tonymon, & Andersen, 1990). Sur la base de ces travaux, quelques chercheurs ont suggéré que ces troubles attentionnels se traduiraient par des difficultés pour les sportifs à identifier et à réagir promptement aux indices environnementaux les alertant d'un danger pour leur intégrité physique, ce qui aurait pour conséquence de les fragiliser physiquement (Rogers & Landers, 2005; Williams & Andersen, 1997, 1998). À notre connaissance, seules deux études ont été menées afin de vérifier cette suggestion (Andersen & Williams, 1999; Rogers & Landers, 2005). Toutes les deux démontrent l'existence d'une relation significative entre la diminution de la vision périphérique dans une situation stressante et l'apparition d'une blessure sportive. Les perturbations attentionnelles liées au stress sont à l'origine d'une blessure dans le contexte sportif.

### ***Dispositions individuelles au stress et blessure sportive***

Des études menées en psychologie du sport mettent en évidence l'influence de l'anxiété compétitive dans la survenue de blessures sportives (Hanson, McCullagh, & Tonymon, 1992; Kolt & Kirkby, 1994; Lavallée & Flint, 1996; Petrie, 1993a). D'autres recherches démontrent une plus grande fragilité des sportifs qui présentent un locus de contrôle externe, c'est-à-dire considérant qu'ils n'ont pas de contrôle sur les événements qu'ils vivent ou qui se caractérisent par un profil de personnalité ressentant en permanence la pression du temps, leur tendance à la concurrence, leur hostilité envers autrui, leur soumission à un effort de rendement dans leurs différentes activités (Fields, Delaney, & Hinkle, 1990).

### ***Modèle liant le stress à la survenue d'une blessure : le stress-injury model***

Étant donné l'influence du stress sur la pathogenèse dans une activité sportive, Andersen et Williams (1988) ont décidé de formaliser un modèle théorique multifactoriel : le stress-injury model. Ce modèle suggère qu'un sportif placé dans une situation potentiellement stressante (par exemple : compétition sportive, entraînement intensif) est davantage susceptible de

percevoir la situation comme menaçante et, par conséquent, de se blesser. D'autres paramètres vont accentuer la survenue de blessures ; par exemple, si le sportif a :

- vécu précédemment des événements de vie qu'il a perçus comme défavorables ;
- une personnalité caractéristique d'une vulnérabilité au stress ;
- peu de ressources personnelles et sociales lui permettant de faire face à cette situation stressante.

La prise en considération des interactions possibles entre ces différentes ressources personnelles et sociales permettent de mieux caractériser les sportifs à risque (Maddison & Prapavessis, 2005; Smith, Smoll, & Ptacek, 1990). Dans une étude récente, Maddison et Prapavessis (2005) montrent qu'un faible soutien social et l'utilisation préférentielle de stratégies d'évitement pour faire face au stress sont deux facteurs agissant conjointement pour amplifier l'impact pathogène des événements stressants. L'inclusion de facteurs complémentaires (e.g. anxiété, perturbations de la concentration, blessures passées, statut des joueurs), dans ce type d'analyse, peut amplifier la relation entre le stress et la blessure (Maddison & Prapavessis, 2005; Petrie, 1993b). Le « stress-injury model » considère les interactions possibles entre ces trois construits psychosociologiques : personnalité, expérience personnelle, ressources personnelles et sociales (Figure 14).

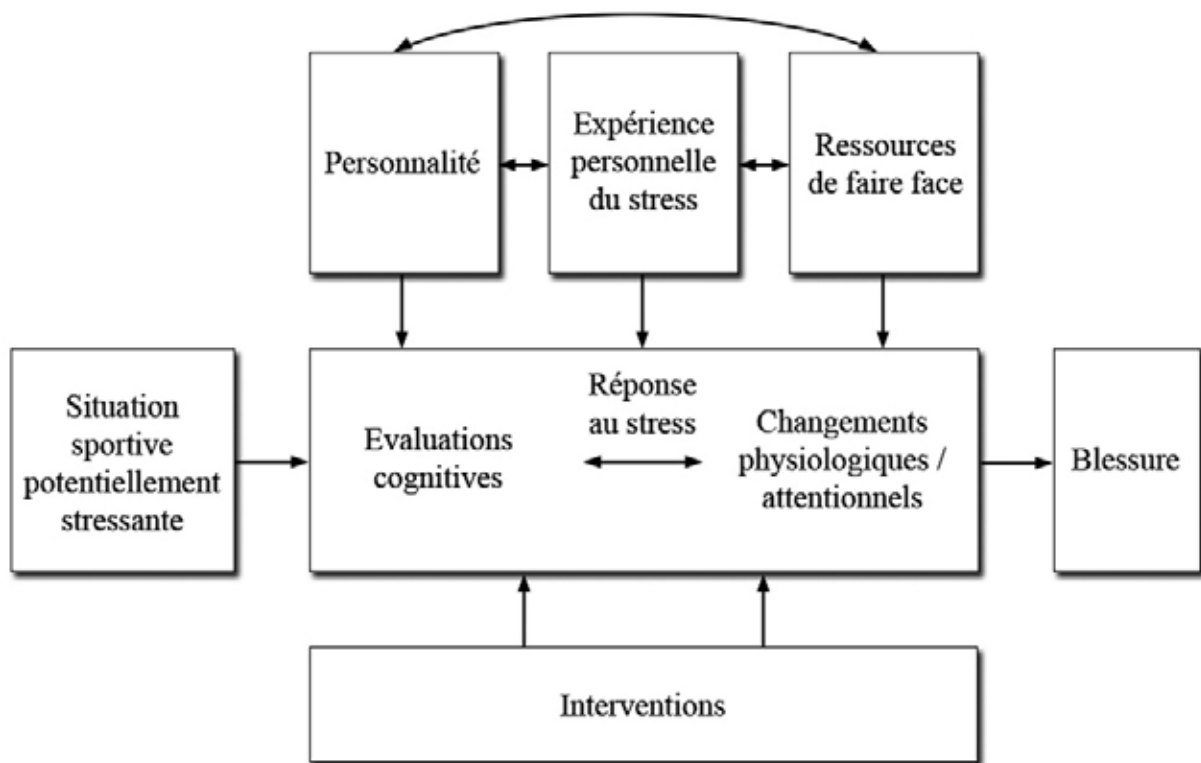


Figure 14. Version révisée du stress-injury model. Adapté d'après Williams et Andersen (1998). Figure d'après Deroche et al (Deroche et al., 2007)

L'étude de la blessure continue cependant de poser certaines difficultés méthodologiques. La nature invalidante d'une blessure dépend de la spécificité de l'activité sportive et de facteurs individuels comme la tolérance à la douleur (Flint, 1998). Le développement de critères fiables et objectifs permettant d'appréhender plus précisément les dommages corporels révélant l'existence d'une blessure reste un enjeu majeur pour conclure définitivement sur l'influence pathogène de certains facteurs dans le cadre d'une pratique sportive.

Ces difficultés et enjeux méthodologiques n'excluent pas la nécessité d'une connaissance des différents processus pathogènes. Cette connaissance est en effet importante pour envisager des démarches cliniques dont l'objectif serait de prévenir les accidents et blessures auprès des sportifs. Des programmes de prévention destinés à l'acquisition des ressources et compétences nécessaires pour faire face aux effets nocifs du stress sur la santé

physique (Cupal, 1998) ont déjà fait la preuve de leur efficacité (Davis, 1991; R. J. Johnson et al., 2005; Perna, Antoni, Baum, Gordon, & Schneiderman, 2003).

Fragilisé psychologiquement après une blessure sportive, le sportif serait ainsi davantage susceptible de se blesser (Williams & Andersen, 1998). Or, nous allons voir dans la partie suivante que le retour à la pratique physique dépend d'une multitude de paramètres.

### **Performance après la blessure**

La littérature scientifique est exhaustive en ce qui concerne le retour à la pratique sportive après une blessure. En revanche, elle est souvent sujette au milieu médical et met en lumière les différents moyens qui permettent de prendre les meilleures décisions pour un retour au sport efficace (Giuliani, Burns, Svoboda, Cameron, & Owens, 2011; Matheson et al., 2011). Nombreuses sont les études apportant des éléments pouvant améliorer la prise de décision pour autoriser un athlète à reprendre sa pratique ou non (Herbert, 2007; Laker, 2011; Purcell, 2009). La prise de décision semble complexe (Cantu & Register-Mihalik, 2011; Clanton, Matheny, Jarvis, & Jeronimus, 2012; Ellis & Gottlieb, 2007; Standaert, Herring, & Cantu, 2007) et demande de considérer plusieurs facteurs (Sarraf, Sadri, Thevendran, & Vedi, 2010; Shultz et al., 2007). Les équipes de recherche médicales sont systématiquement dans la quête de nouveaux facteurs pouvant améliorer une prise de décision optimale : quels sont les paramètres clés (Jagoda, 2010), les critères objectifs (Legnani, Terzaghi, Borgo, & Ventura, 2011; Mayers, 2008), les recommandations (Creighton, Shrier, Shultz, Meeuwisse, & Matheson, 2010), les directives (B. J. McCullough & Jarvik, 2011; Putukian, 2006, 2011; Spindler et al., 2004) pour favoriser un retour optimal, sain et sécuritaire à la pratique sportive sont les problématiques de cette large littérature scientifique (Cantu, Li, Abdulhamid, & Chin, 2013; Colunno, Harrast, & Herring, 2012; Harmon et al., 2013; Harston, Nyland, Brand, McGinnis, & Caborn, 2012; Jamault & Duff, 2013; Rihn et al., 2009; Taylor, 2012; Wikstrom, Tillman, Chmielewski, & Borsa, 2006).

### ***Retour à la pratique après une rupture du LCA***

La chirurgie pour la reconstruction du LCA est **le choix thérapeutique** le plus communément réalisé, en particulier pour les athlètes qui souhaitent revenir à leur niveau de compétition après une blessure **du** LCA. En effet, pour les patients visant à revenir à leur niveau pré-traumatisme, il est rapporté que l'opération chirurgicale (tous types d'interventions) du LCA est recommandée afin d'**optimiser** la récupération, en particulier pour le retour à la compétition et pour tous les sports de pivots (Daniel et al., 1994; Roos, Ornell, Gärdsell, Lohmander, & Lindstrand, 1995; Webb, Corry, Clingeleffer, & Pinczewski, 1998). Le but de l'opération est de maximiser la stabilité et la capacité fonctionnelle du genou ayant subi une rupture du LCA, facilitant ainsi le retour à des niveaux d'activité physique identiques à celui d'avant traumatisme (Cole, Ernlund, & Fu, 1999).

Ardern et ses collaborateurs ont analysé le taux de retour au sport au niveau pré-blessure après une reconstruction du LCA (Ardern et al., 2011b).

Sur les 1201 participants, 503 patients étaient à un niveau de compétition (loisir, lycée/université, professionnel) avant la rupture du LCA. Tous les patients ont subi une autogreffe aux ischio-jambiers et le retour complet au sport de compétition est autorisé à 9 mois après l'opération. Plusieurs sports sont inclus dans cette étude : football, football australien, basketball et netball.

Le taux de retour au sport 12 mois après l'opération était seulement de 33% en compétition à niveau équivalent avant la blessure et 67% sont retournés au sport de façon à continuer à participer à une AP (entraînement ou compétition adaptée, « allégée »). On note aussi que les hommes sont plus susceptibles de retourner à un niveau pré-rupture du LCA que les femmes. Aussi, la relation entre la fonction du genou après opération et le retour au sport n'est pas concluante. Il a été démontré que les patients qui présentaient une bonne récupération fonctionnelle du genou n'étaient pas plus susceptibles de retourner de manière complète à la compétition 12 mois après la chirurgie, par rapport aux patients qui ont une faible récupération fonctionnelle (RR 1,5, 95% IC, 0,86 à 2,50).



Dans une nouvelle étude, Ardern et al. se sont intéressés au taux de retour au sport sur un plus long terme : non pas 12 mois après la chirurgie comme nous l'avions expliqué auparavant mais 2 à 7 ans après la rupture du LCA (Ardern et al., 2012). Ce travail leur a permis d'observer que moins de 50% de l'échantillon était retourné à la pratique du sport à leur niveau de pré-blessure ou à la participation au sport de compétition 2 à 7 ans après la reconstruction du LCA. Ils ont rapporté que le retour à un niveau de pratique pré-blessure 12 mois après l'opération n'était pas prédictif de la participation au niveau pré-blessure 2 ou 7 ans après. Ce constat suggère que les personnes qui parviennent à retourner au sport dans les 12 mois après la reconstruction du LCA ne maintiennent pas forcément leur participation aux sports sur le long terme (Ardern et al., 2012).

Les facteurs influençant le retour au sport après la blessure ont été étudiés (Ardern et al., 2011b; Tjong et al., 2014). L'étude qualitative de Tjong et al. (2014) (Tjong et al., 2014) analyse le taux de retour à la pratique sportive et les facteurs qui affectent la reprise du sport après la reconstruction du LCA. **Ils démontrent que seulement 36% des patients sont retournés à leur niveau de participation pré-blessure.**

Dans cette même étude, **la décision de retourner au sport dépend de plusieurs paramètres** : la peur (de se re-blesser, d'être affaibli, de la charge financière et de reprendre le sport lui-même) (Brophy et al., 2012; Chmielewski et al., 2008; Lee, Karim, & Chang, 2008; K. A. McCullough et al., 2012; Tripp, Stanish, Ebel-Lam, Brewer, & Birchard, 2011) le changement de priorité et de style de vie (raisons familiales) (Podlog & Eklund, 2006) et la personnalité (manque de confiance en soi, prudence) (Pizzari, McBurney, Taylor, & Feller, 2002; Podlog & Eklund, 2006; Ryan & Deci, 2000). D'ailleurs, pour ce dernier facteur, plusieurs analyses affirment que le retour au sport et la probabilité de retourner à son niveau de sport pré-blessure dépend plus de la personnalité du patient que de la reconstruction fonctionnelle du genou (Ardern et al., 2012; Eastlack, Axe, & Snyder-Mackler, 1999; Heijne et al., 2008).

La méta-analyse d'Ardern et ses collaborateurs regroupe 48 études et 5770 participants. Elle met en avant les taux de retour à la pratique de manière générale (tous sports confondus), le taux de retour à un niveau de pratique pré-blessure et le taux de retour à la compétition (Ardern et al., 2011a). Les résultats de cette revue sur le retour au sport après la reconstruction du LCA montrent que 82% (n=3163) des participants sont retournés à une

certaines formes de participation aux AP et que le pourcentage total de participants qui retournent à leur niveau de participation pré-blessure était de 63%. Concernant la reprise de la compétition, les études de cette revue rapportent que 44% des participants étaient retournés au sport de compétition à une moyenne de 36,7 mois après l'opération et le temps moyen entre la chirurgie et la reprise du sport était de 7,3 mois (Bak, Jørgensen, Ekstrand, & Scavenius, 2001; Colombet et al., 2002; Marcacci, Zaffagnini, Iacono, Neri, & Petitto, 1995; Mikkelsen, Werner, & Eriksson, 2000; Nakayama, Shirai, Narita, Mori, & Kobayashi, 2000; Sandberg & Balkfors, 1988; Shelbourne & Gray, 1997; Shelbourne & Urch, 2000; Zaffagnini et al., 2008). Daniel et al (Daniel et al., 1994) ont rapporté le nombre d'heures de participation sportive par personne par an avant et après rupture du LCA et intervention chirurgicale. Les auteurs observent une moyenne de 274,5 heures de pratique post-opératoire par personne et par an contre 491 heures par personne et par an avant la blessure.

Une récente méta-analyse de Ardern et al (2014) regroupe toutes les études sur le retour au sport après une rupture du LCA (tableau ci-dessous) :

Return to sport rate (articles contributing to meta-analyses: any, preinjury, competitive sport)*	Sports performance level	
	Elite (6, 11, 9)	Non-elite (51, 42, 19)
Return to any sport (%), (mean, 95% CI)	85 (71 to 95)	80* (72 to 86)
Return to preinjury level sport (%) (mean, 95% CI)	79 (70 to 86)	60** (53 to 67)
Return to competitive level sport (%) (mean, 95% CI)	81 (70 to 90)	42** (33 to 49)

\*p<0.05, \*\*p<0.01.

Tableau a. Taux de retour au sport après une rupture du LCA (d'après Ardern et al, 2014)

Les sportifs de haut niveau reprennent le sport significativement plus que les sportifs amateurs. La différence entre les 2 groupes est plus importante lorsqu'il s'agit du retour à la compétition.

D'autres études ont quantifié le retour à la performance dans le SHN. Au football américain, Carey et ses collaborateurs (Carey, Huffman, Parekh, & Sennett, 2006) rapportent que la performance des joueurs est diminuée d'un tiers après une rupture du LCA. En 2010, Shah et al. (Shah, Andrews, Fleisig, McMichael, & Lemak, 2010) ont démontré, dans le Football américain, que plus les athlètes ont un niveau de performance élevé et plus ils ont des chances de retrouver leurs performances pré-blessure (leur niveau de performance étant défini par le nombre de match joué par athlète). Au basketball, Busfield et al. (Busfield, Kharrazi, Starkey, Lombardo, & Seegmiller, 2009) ont montré que 22% des sportifs n'ont pas repris la compétition après la rupture du LCA et parmi les 78% restants, plusieurs profils sont observés : 15% ont retrouvé des performances meilleures, 19% ont montré un niveau identique et 44% avait un niveau de performance plus bas par rapport à celui d'avant la rupture.

### ***Retour à la performance après une rupture du LCA dans le ski alpin***

En ski alpin de loisir, la littérature est riche en termes d'incidence, de la nature, de la localisation anatomique de la blessure mais pas autant dans le ski alpin d'élite. D'autre part, le retour au sport (autre que le ski alpin) après une rupture du LCA a déjà été évalué à travers des paramètres tels que les intentions de reprendre le même sport, à un même niveau, de pratiquer un autre sport que celui d'avant la blessure ou au contraire d'abandonner la pratique sportive ou de reprendre la compétition (Ardern et al., 2012, 2011a; Heijne et al., 2008). En revanche, le retour à la performance après une rupture du LCA dans le ski alpin de haut niveau n'a encore jamais été étudié. Il est donc nécessaire d'étudier l'impact de la rupture du LCA sur la performance de plus près, de comprendre les facteurs qui influencent le retour et le temps nécessaire pour retrouver un meilleur niveau de performance possible après la rupture du LCA.

## **Contraintes environnementales**

### **Chapitre 4 : Environnement dans le sport de haut niveau**

## Environnement et performance

En santé publique, les études ont permis de révéler des intervalles de protection à travers des relations dites en U, ou U-inversées, voire des valeurs optimales pour lesquelles les risques sont minorés. Dans la performance sportive de haut niveau, une relation exponentielle croissante puis décroissante est observée dans de nombreux sports (Berthelot et al., 2012; Guillaume et al., 2011) permettant l'expression d'un pic ou d'un plateau de performance. Ces analyses ont été faites sur des disciplines normées, chiffrées et facilement mesurables (athlétisme et natation, figure de gauche (Berthelot et al., 2012)), mais elles permettent aussi une réelle appréciation dans des sports d'opposition individuels comme le tennis, figure de droite (Guillaume et al., 2011) (Figure 15).

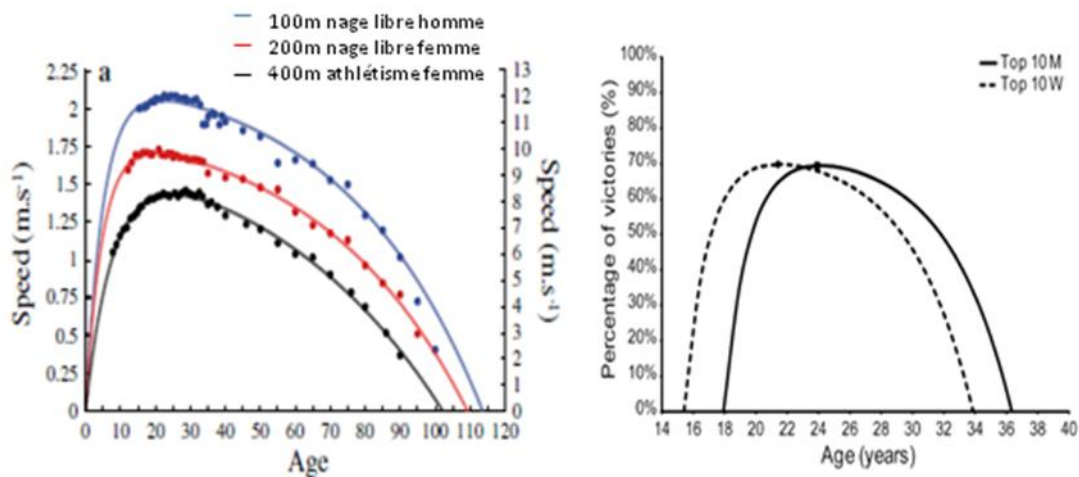


Figure 15 : Age et performance en athlétisme, natation (figure gauche) et tennis pour le top 10 masculin et féminin (figure droite). Figures d'après Berthelot et al et Guillaume et al.

L'IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport) a appliqué ce modèle dans de nombreux sports afin de déterminer des optima ou pics de performance en fonction de l'âge. Cette relation issue du travail de Moore (Moore, 1975) caractérise de nombreux autres paramètres tels que la force (figure 16 gauche) (Mitchell et al., 2012), le volume respiratoire (Stanojevic et al., 2008), le volume des capillaires pulmonaires (Aguilaniu, Maitre, Glénet, Gegout-Petit, & Guénard, 2008), les performances cognitives

(Park & Reuter-Lorenz, 2009), ou encore les naissances (figure 16 droite) (Kühnert & Nieschlag, 2004).

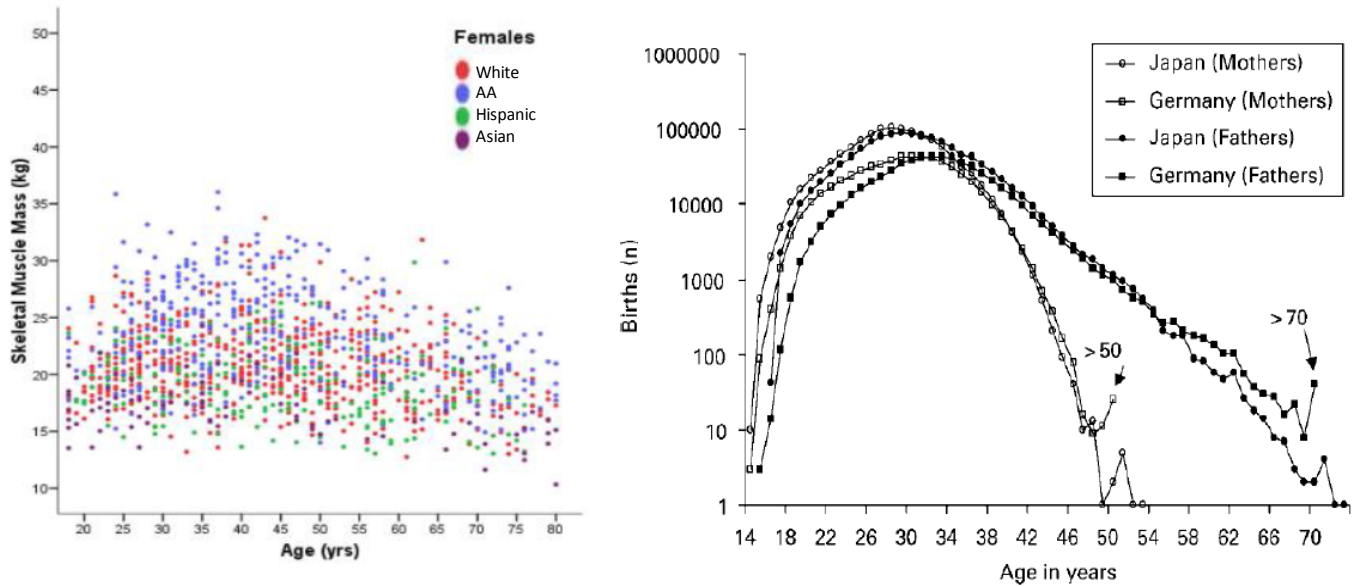


Figure 16. A gauche : Masse musculaire de 1280 femmes mesurée par DXA ; A droite : Nombre de naissance en fonction de l'âge.

Dans une étude portant sur 1 791 972 participants finissant les marathons de Paris, Londres, Berlin, Boston, Chicago, New York entre 2001-2010, furent recueillies les données de température, humidité, pression atmosphérique et concentration atmosphérique de polluants (NO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub> et PM<sub>10</sub>) (El Helou et al., 2012). Les auteurs ont non seulement montré une corrélation significative entre la performance et la température ambiante selon une fonction polynomiale du 2nd degré (courbe en U), mais aussi une température optimale pour la réalisation des meilleures performances (figure 17).

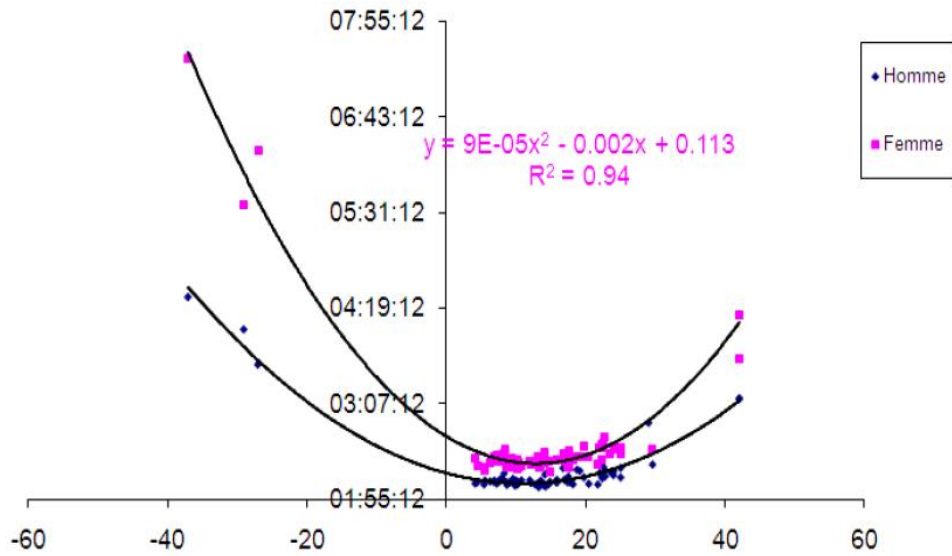


Figure 17. Relation entre la température de l'air et le temps de course au Marathon chez les hommes et les femmes. Figure d'après El Helou et al (El Helou et al., 2012).

El Helou et ses collaborateurs déterminent un pic de température optimale de 9,9°C au Marathon. De part et d'autre de ces températures, les performances diminuent. Cet optimum thermique favorable à la performance au marathon rappelle les relations entre température et mortalité (figure 18) détaillées par Besancenot dans le programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (GICC) (Besancenot, 2003).



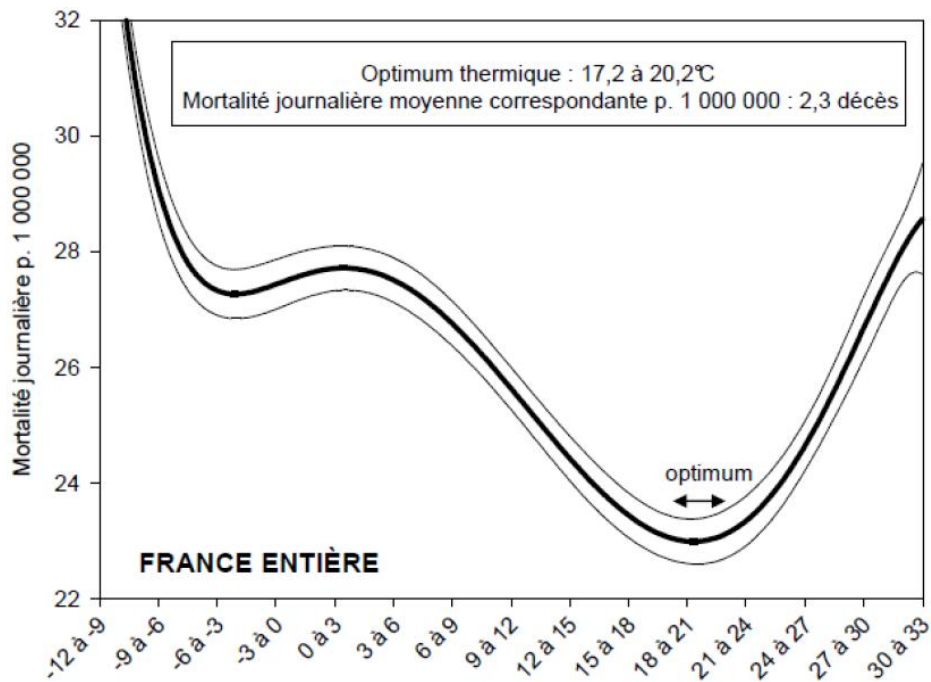


Figure 18. Relation entre température et mortalité en France au pas de temps journalier (courbe en trait gras et intervalle de confiance à 95%. Figure d'après Besancenot (Besancenot, 2003).

On retient que les risques de mortalité sont augmentés en dehors des intervalles de protection établis par les études de santé publique. L'environnement joue un rôle indéniable dans l'atteinte des performances optimales mais il est aussi directement lié aux risques de survenue des blessures.

## **Environnement et prévalence de la rupture du LCA**

Les facteurs environnementaux comme les conditions de météorologie, la difficulté des pentes, et les conditions de la neige influencent le risque des blessures au genou dans le ski alpin (M. Burtscher et al., 2009; Martin Burtscher et al., 2008; Demirag, Oncan, & Durak, 2004; Järvinen et al., 1994; Urabe et al., 2002).

### ***Conditions climatiques***

Aschauer et al. (2007) ont rapporté un risque plus élevé de blessure de 1,12% (10 blessés sur 13 421 courses) pendant une forte chute de neige comparativement à 0,55% (60 blessés dans 167 045 pistes) dans des conditions ensoleillées (Aschauer, Ritter, Resch, Thoeni, & Spatzenegger, 2007). Ainsi, la faible visibilité et les mauvaises conditions de luminosité pendant les chutes de neige augmentent le risque de blessure au genou (G. Ruedl et al., 2012). Selon Järvinen et ses collaborateurs, leurs résultats dévoilent que les raisons principales de la rupture du LCA sont les mauvaises conditions des pistes de ski (Järvinen et al., 1994). Engstrom et al (1991) (Engström, Johansson, & Tornkvist, 1991) ont étudié l'influence de la température sur la survenue des blessures dans le football et rapportent qu'il n'existe pas de lien significatif entre ces 2 paramètres contrairement à Ruedl et al (2012) dans le ski alpin.

### ***Qualité de la neige et difficulté de la piste***

Une étude récente de Ruedl et ses collaborateurs ont analysé l'impact des facteurs environnementaux sur les blessures au genou chez les skieurs de loisir. La neige, les pentes des pistes, les conditions de météorologie aussi bien que l'altitude et la température représentent des facteurs qui influencent la prévalence des blessures au genou. Plus de 93% des blessures au genou ont eu lieu sur des pentes raides (à haut niveau de difficulté) (G. Ruedl et al., 2012).

Les facteurs environnementaux contribuent à la survenue des ruptures du LCA dans le ski alpin (Järvinen et al., 1994; Urabe et al., 2002). Urabe et ses collaborateurs rapportent que 40% des ruptures du LCA sont dûes à des facteurs techniques : excès de vitesse, fatigue,

collision, hypokinésie ; 35% au matériel et équipement : absence de libération des fixations et 25% aux facteurs environnementaux : neige mouillée, piste irrégulière, déformée, dure, glissante (Demirag et al., 2004; Järvinen et al., 1994; Urabe et al., 2002).

### **Température et performance**

Il a été montré que le risque de la blessure est relié à une faible température (Aschauer et al., 2007; L. M. Bouter, Knipschild, & Volovics, 1989; M. Burtscher et al., 2009). En effet, la majorité des blessures au genou chez les skieuses ont eu lieu durant des jours à faible température (-6,3°C) comparé aux jours à température plus élevée (+1,2°C) (M. Burtscher et al., 2009). Dans l'étude de Ruedl et al. (2012), les températures sont rapportées au moment précis de la blessure. La figure 19 met en avant le lien entre la température et la prévalence des blessures au genou. Plus la température est faible et plus cette prévalence augmente. Chez les skieuses, une dépendance significative entre la température et l'incidence des blessures au genou a donc été démontrée (G. Ruedl et al., 2012).

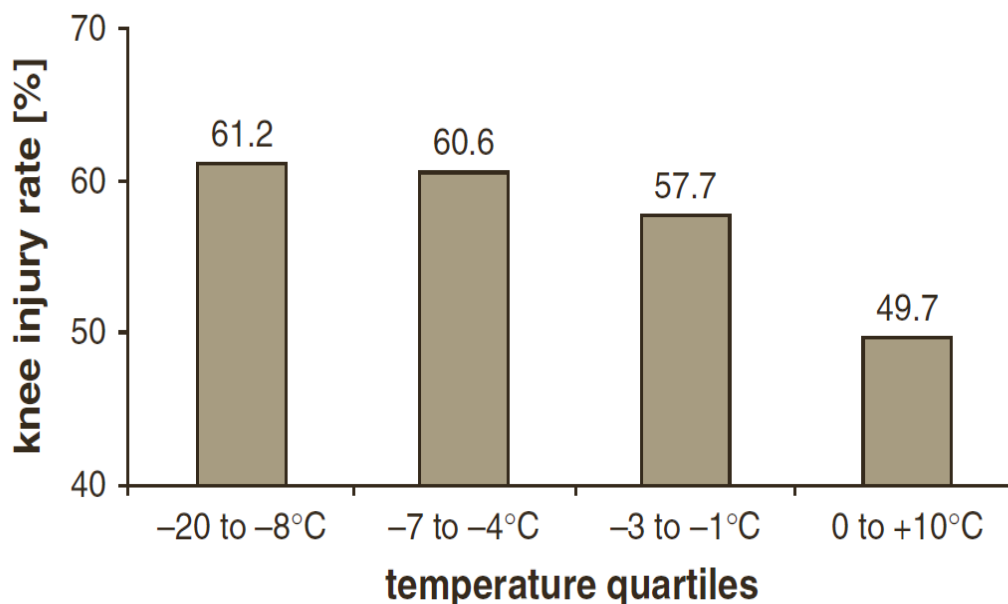


Figure 19. Taux de blessures au genou chez les skieuses selon les quartiles de température.

Graphique tiré de Ruedl et al. (G. Ruedl et al., 2012)

Dans le ski alpin, les muscles et les articulations semblent être affectés à faible température ambiante. Becher et al. (2008) (Becher, Springer, Feil, Cerulli, & Paessler, 2008) ont observé que la peau et la température intra-articulaire du genou chutent considérablement après 60 minutes de ski. De plus, un faible niveau de refroidissement est suffisant pour diminuer la performance du muscle et augmenter le risque de la blessure (Oksa, Rintamäki, & Rissanen, 1997).

Le refroidissement augmente le temps de latence du réflexe myotatique du muscle soléaire, mécanisme important dans le contrôle moteur de la jambe inférieure (Dewhurst, Riches, Nimmo, & De Vito, 2005). Dewhurst et al. (2010) ont montré que la vitesse de conduction des fibres musculaires du genou était beaucoup plus lente avec le refroidissement de la température ambiante (Dewhurst et al., 2010).

Tous ces facteurs contribuent à la survenue de la blessure au genou en relation avec la température. Ruedl et ses collaborateurs ont rapporté une double prévalence de blessures au genou pendant les chutes de neige. Ils ont récemment signalé un risque accru de rupture du LCA en ski alpin durant de mauvaises conditions de visibilité (G. Ruedl et al., 2012).

**Les ruptures ligamentaires et lésions myotendineuses** sont causées avec une température ambiante basse qui va donc avoir un impact direct sur la performance des skieurs alpins (Lloyd, 1994).

## **Chapitre 5 : Objectifs de la thèse**

*Plus vite, plus haut, plus fort*, la devise olympique prône encore et toujours les limites et le dépassement de soi-même. C'est une perpétuelle recherche de l'amélioration des capacités physiques et physiologiques. La contribution aux performances optimales représente un enjeu multifactoriel : la technologie (Berthelot et al., 2010; Neptune, McGowan, & Fiandt, 2009), l'économie, la géopolitique (Guillaume et al., 2009), la génétique (Eynon et al., 2011; Yang et al., 2003), la fourniture d'énergie primaire (Berthelot, 2014) ou encore la morphologie (Sedeaud, 2013) (Figure 20a).

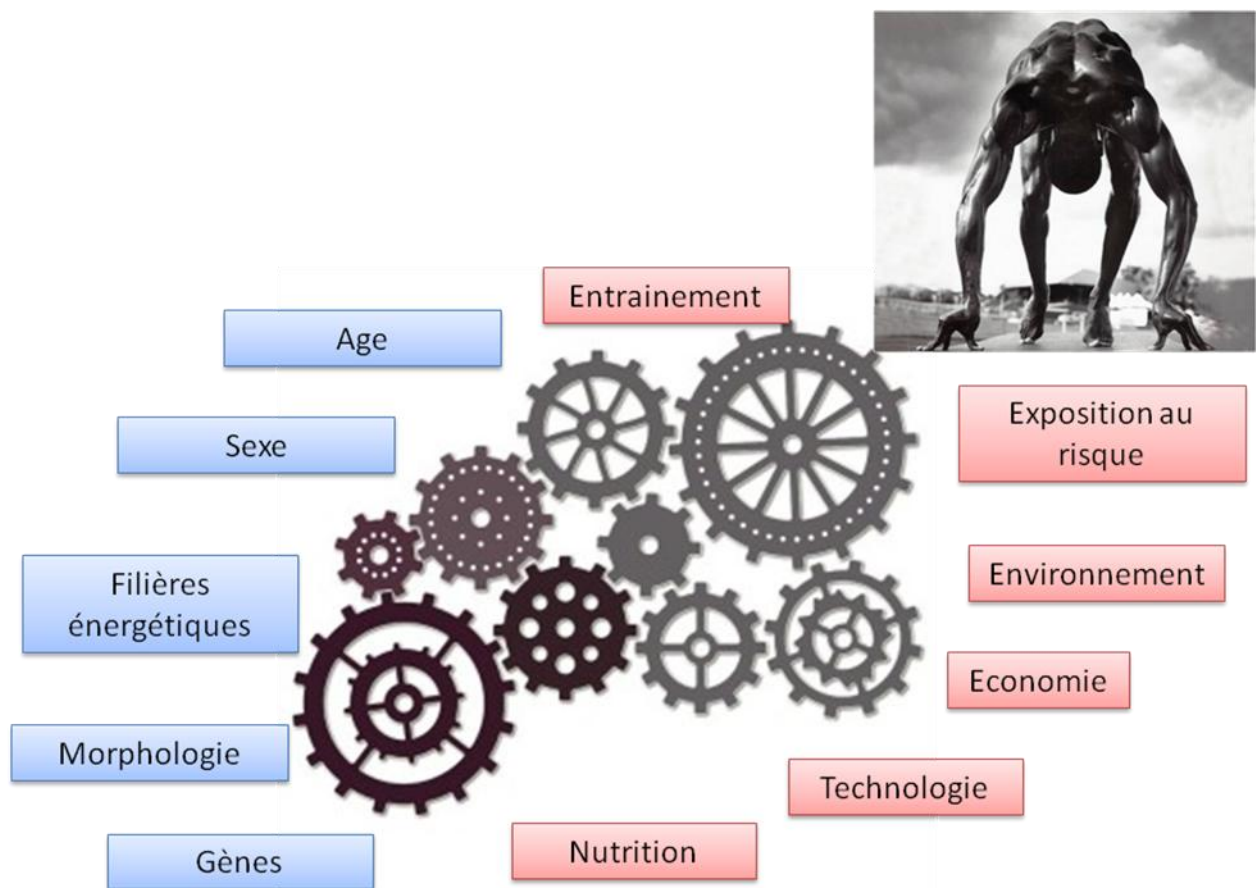


Figure 20a. La performance de haut niveau : un enjeu multifactoriel

Dans le SHN, l'optimisation de la performance passe aussi par un compromis entre les exigences de l'environnement et, la prévention et la gestion de la blessure. Cette interaction peut être illustrée de la manière suivante :

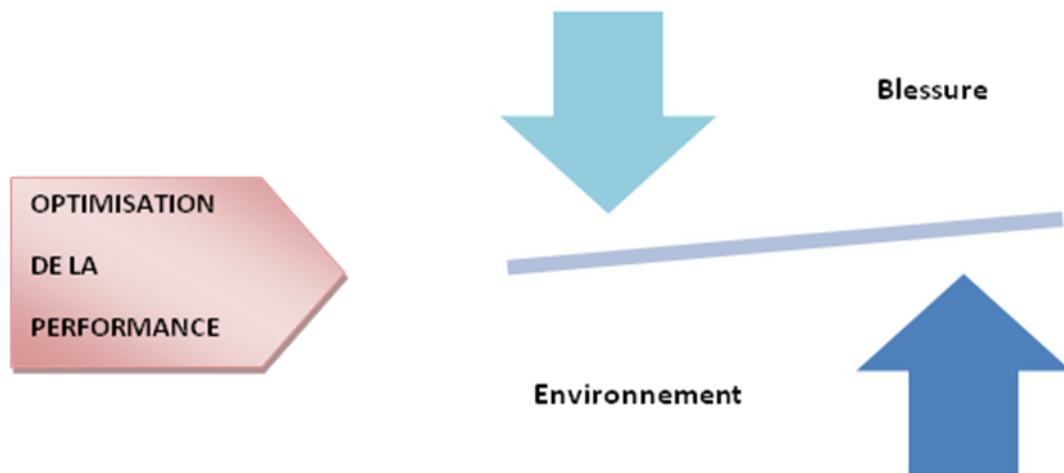


Figure 20b. Compromis blessure-environnement pour l'optimisation de la performance dans le sport de haut niveau

Notre première partie sur le contexte général nous a permis de nous rendre compte dans un premier temps que le retour à la pratique sportive après une blessure a certes déjà été étudié en loisir mais le retour à la performance post-rupture du LCA n'a pas encore été analysé dans un sport où cette blessure représente une sérieuse problématique : le ski alpin.

Pour cela, nous allons décrire de manière générale notre population d'étude puis étudier de manière précise l'impact de la rupture du LCA sur la performance chez les skieurs alpins en équipe de France de 1980 à 2013. L'objectif de notre première étude sera d'évaluer l'influence de cette blessure sur les performances des skieurs **chez les meilleurs et quels sont les paramètres qui influencent le retour à la compétition** (ETUDE 1). Nous analyserons ensuite l'évolution des performances sur l'ensemble de la carrière des skieurs alpins français de haut niveau de 1980 à 2013 **chez toute la population de l'Equipe de France** (ETUDE 2).

Pour ces 2 études, nous avons émis les hypothèses suivantes :

La rupture du LCA pourrait :

- empêcher de retrouver de meilleures performances de retour à la compétition ;
- avoir un effet négatif sur l'évolution de carrière du sportif ;
- interrompre ou écourtée une carrière sportive contrairement aux skieurs qui n'ont pas eu de rupture du LCA.

Dans un deuxième temps, l'étude de la blessure dans le SHN dépend non seulement de la spécificité du sport, des facteurs anatomiques, neuromusculaires, biomécaniques, hormonaux ou encore de l'âge mais aussi des facteurs environnementaux. L'environnement s'avère être un paramètre important à prendre en compte dans la probabilité de survenue de la blessure mais aussi dans la quête des performances optimales.

Une dernière partie sera donc consacrée à l'impact de l'environnement et des calendriers en sprint et au demi-fond. Cette étude compte plus de 26 000 performances au total avec un recul historique depuis le début de l'ère olympique moderne. Elle analyse les températures et les dates de réalisation des meilleures performances du 100m au 1500m (ETUDE 3).

Dans cette étude, notre hypothèse principale est que l'environnement a une part attribuable pour la réalisation des meilleures performances sportives.



Ainsi, notre travail de recherche s'articule autour de la réflexion entre l'exposition aux risques (blessure) et les contraintes environnementales (environnement).

## **PARTIE 2 : CADRE EXPERIMENTAL**

## Chapitre 6 : Performance des skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013

### Introduction : le ski alpin (Règlement FIS, 2013)

Le ski alpin est représenté par quatre épreuves olympiques : le slalom, le slalom géant, le super géant et la descente. Ces épreuves peuvent être regroupées en deux groupes ou spécialités :

- la vitesse (descente et super G ou super géant). Les compétitions se déroulent en une seule manche.
- la technique (slalom et slalom géant). Les compétitions se déroulent en deux manches effectuées le même jour.

Concernant les compétitions, la Coupe du monde a lieu chaque année et détermine au final le skieur le plus régulier sur environ 14 événements organisés pour chaque épreuve. Les Championnats du monde se déroulent tous les 2 ans et les Jeux Olympiques tous les 4 ans couronnent leurs vainqueurs sur une seule course dans chacune des épreuves.

**Tableau 9 : vitesses et temps des différentes disciplines de ski alpin (Règlement FIS, 2013)**

Epreuve	Slalom	Slalom géant	Super G	Descente
Vitesse moyenne (Km/h)	20-50	20-60	80-90	90-100
Vitesse maximale (Km/h)	< 60	< 75	95	145
Temps moyen (Sec.)	45-60	60-90	75-90	90-140

La plupart des skieurs alpins ne pratiquent qu'une seule discipline **quelques uns** sont polyvalents et participent aux compétitions de plusieurs disciplines. Les épreuves se disputent chaque année du mois de novembre au mois de mars dans différentes compétitions : Coupe du monde, Coupe d'Europe, Courses de la Fédération Internationale de Ski (FIS), Jeux Olympiques et Championnats du Monde. Ce sont des courses de rapidité où

le skieur déclenche lui-même, au départ, le chronomètre par l'ouverture du portillon et l'arrête au franchissement d'une cellule photoélectrique à l'arrivée. Ces épreuves **diffèrent** par leur dénivelé, le terrain, la vitesse, la largeur des virages et la distance entre les virages.

### ***Descente (DH)***

Cette discipline a été créée par Arnold Lunn en 1911 à Montana en Suisse. La descente est la plus vieille discipline sportive du ski alpin. Il s'agit d'une épreuve de vitesse. Le parcours est le plus long de toutes les disciplines et les portes sont peu nombreuses et très espacées. Le parcours dure entre 90 et 140 secondes. La vitesse moyenne est de 90-100 km/h et peut atteindre 145 km/h dans les sections les plus raides. Chez les hommes, le dénivelé est de 800-1100 mètres pour les courses de plus haut niveau, 550-1100 mètres pour les coupes continentales (Europe, Amérique du Nord) et 450-1100 mètres pour les courses FIS. Chez les femmes, il est de 450-800 mètres pour toutes les compétitions. La course se déroule en une seule manche, mais les skieurs s'entraînent plusieurs fois sur le parcours auparavant **et sur plusieurs jours** (« official training »). L'official training est obligatoire. Les portes sont très larges, matérialisées par deux banderoles soutenues par des piquets. Il n'y a pas de règles spécifiques pour le tracé, il doit suivre et respecter le relief naturel du terrain.

Le règlement de la FIS stipule dans les particularités générales de la piste qu'« Une descente se caractérise par les six composantes suivantes: technique, courage, vitesse, prise de risque, condition physique et détermination. Il doit être possible de skier sur la piste de descente à des vitesses variées du départ à l'arrivée. Le concurrent adapte sa vitesse et sa prestation à ses capacités techniques en fonction de sa propre détermination. »

### ***Super G (SG)***

Le super G a été couru pour la première fois en 1982. Il s'agit, comme la descente, d'une discipline de vitesse. C'est un compromis entre la descente et le slalom géant, ce qui le rend plus technique que la descente et plus rapide que le géant. La course dure entre 75 et 90 secondes et la vitesse peut atteindre 95 km/h. Chez les hommes, le dénivelé est de 400-650 mètres pour les compétitions de plus haut niveau, 350-650 mètres pour les courses FIS. Chez

les femmes, il est respectivement de 400-600 mètres et de 350-600 mètres. Le super G se déroule en une seule manche, mais les skieurs ne peuvent pas tester la piste avant la course officielle, contrairement à la descente. Ils se contentent d'une reconnaissance préalable. La piste a une largeur d'au moins 30 mètres. Les portes sont constituées d'une paire de piquets munie d'une banderole. La largeur des portes doit être de 6-8 mètres pour les portes horizontales et 8-12 mètres pour les portes verticales. L'écart entre les piquets-pivots de deux portes successives ne doit pas être inférieur à 25 mètres, ou 15 mètres en cas de combinaisons de portes. Le tracé doit donc utiliser le terrain de façon optimale en alternant judicieusement de grands et de moyens virages.

### ***Slalom (SL)***

Le premier slalom (anciennement appelé slalom spécial) a vu le jour en 1922 à Mürren. C'est l'épreuve la plus technique. C'est une discipline spectaculaire, elle demande de la vivacité, de la technique, de l'agilité et de la précision. Les portes sont nombreuses (40 à 75), étroites et très rapprochées (4 à 15 mètres), obligeant à réaliser des appuis brefs et des virages serrés. Le parcours dure entre 45 et 60 secondes et la vitesse moyenne varie entre 20 et 50 km/h. Chez les hommes, le dénivelé est de 180-220 mètres pour toutes les compétitions de haut niveau (JO, Championnats du Monde et Coupe du Monde). Il est de 140-220 mètres pour les courses FIS. Chez les femmes, il est respectivement de 140-220 mètres et 120-200 mètres. La largeur de la piste est d'environ 40 mètres. Une porte est composée de deux piquets simples de couleur rouge ou bleue montés sur rotule. La distance entre deux piquets-pivots (piquet autour duquel s'effectue un changement de direction) de deux portes successives varie entre 6 et 13 mètres. L'épreuve du slalom comporte deux manches courues le même jour, avec un parcours différent pour les deux manches. L'ordre de départ de la deuxième manche se fait dans l'ordre inverse d'arrivée de la première manche pour les 30 premiers. Le vainqueur est celui qui obtient le meilleur temps cumulé des deux manches.

## ***Slalom Géant (GS)***

Le slalom géant est apparu aux Championnats du Monde de ski alpin à Aspen en 1950. Il s'agit d'une discipline technique comme le slalom, mais la piste est plus longue et les portes sont plus espacées. Il requiert une grande précision. Le parcours dure en moyenne 60 à 90 secondes. La vitesse moyenne est de 20 à 60 km/h et dépasse rarement 75 km/h. Le dénivelé est de 250-400 mètres pour les courses majeures et maximum 300 mètres pour les courses FIS, chez les hommes comme chez les femmes. Les portes sont composées de deux piquets reliés par une banderole de couleur bleue ou rouge. Le tracé comporte au moins 30 portes distantes les unes des autres d'au moins 10 mètres. L'écart entre les piquets-pivots de deux portes successives ne doit pas être inférieur à 10 mètres. Les portes doivent avoir une largeur comprise entre 4 et 8 mètres. Comme pour le slalom, le géant se déroule en deux manches le même jour et sur des tracés différents. L'ordre de départ de la deuxième manche se fait dans l'ordre inverse d'arrivée de la première manche pour les 30 premiers. Le vainqueur est celui qui obtient le meilleur temps cumulé des deux manches. La largeur de la piste est d'au moins 40 mètres.

## **Indicateurs de performance**

### ***Points FIS (Rules for the FIS Alpine points, 2014)***

Le calcul des points FIS prend en compte plusieurs paramètres. Il représente la somme entre les points de course et la pénalité de chaque course pour un skieur donné :

$$\text{Points FIS} = \text{points de course (1)} + \text{pénalité (2)}$$

(1) Points de course :

$$P = \left( \frac{T_x}{T_0} - 1 \right) \times F$$

Avec :  $T_x$  = temps du concurrent (seconde) ;

$T_0$  = temps du vainqueur (seconde) ;

F = facteur externe (conditions extérieures). Ce facteur est une valeur fixe pour chacune des discipline : Descente = 1250, Slalom = 720, Slalom géant = 980 et Super-G = 1080.

## *(2) Pénalité :*

Elle correspond au calcul suivant :

Points FIS des 5 meilleurs partants + Points FIS des 5 meilleurs parmi les 10 premiers classés + Points de course des 5 meilleurs parmi les 10 premiers classés) / 10

Plus les points FIS sont proches de zéro, plus l'athlète est performant. Cette cotation en points FIS ne débute que pour des skieurs à partir de 15 ans (niveau cadet) participant aux compétitions internationales.

Les meilleurs points FIS par discipline durant toutes les saisons de chaque skieur en Equipe de France, ont été collectés sur le site de la Fédération Internationale de Ski (FIS) (International Ski Federation website, s. d.). Le site de la FIS ne répertorie les points FIS qu'à partir de 1995.

## ***Classement international***

Les meilleurs classements par discipline, durant toutes les saisons de chaque skieur ont aussi été collectés sur le site de la Fédération Internationale de Ski (FIS) (International Ski Federation website, s. d.). Le site de la FIS ne répertorie les classements qu'à partir de 1995.

## ***Podiums***

Tous les podiums des championnats du Monde, Coupes du Monde et Jeux olympiques ont été collectés. Le site de la FIS rend accessible ces données depuis 1980. Seules les compétitions de niveau mondial ont été retenues.

## Description de la population générale

De la saison 1980-1981 à la saison 2012-2013, la Fédération Française de Ski compte 477 athlètes de haut niveau.

Tableau 10a. Nombre (%) de skieurs en fonction du sexe et de leur groupe (LCA : avec rupture du LCA et NLCA : sans rupture du LCA) de 1980 à 2013.

Groupe	Femmes	Hommes	Total général
	N	N	
LCA	81	67	148
NLCA	157	172	329
<b>Total général</b>	<b>238</b>	<b>239</b>	<b>477</b>

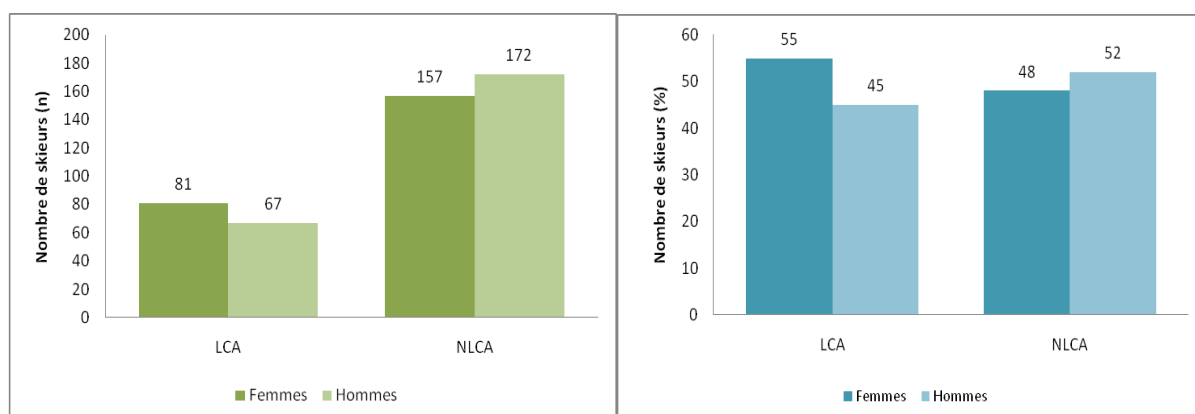


Figure 21. Nombre et pourcentage de skieurs et skieuses avec et sans rupture du LCA

En regardant par sexe, on constate que 55% de femmes et 45% d'hommes ont eu une rupture du LCA. Or, cette différence **n'est pas** statistiquement significative ( $p\text{ value}>0,05$ ).



### En fonction de la spécialité alpine

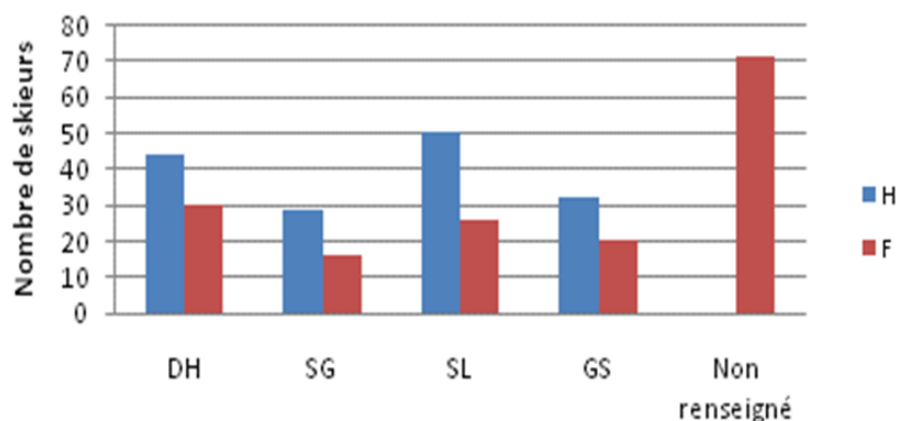


Figure 22. Répartition des skieurs et skieuses de l'Equipe de France en fonction de leur discipline alpine

On notera le nombre important de données manquantes chez les skieuses : la spécialité de 70 skieuses sur 163 n'est pas renseignée. Cependant la spécialité par discipline : Technique (SL, GS) ou Vitesse (DH, SG) est renseignée pour tous les skieurs et toutes les skieuses (Figure 23). Seuls 9 skieurs (5 femmes et 4 hommes) sont polyvalents.

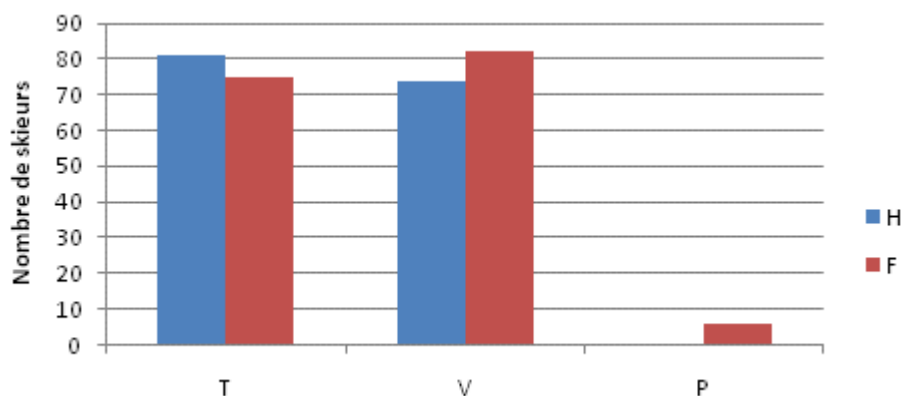


Figure 23. Répartition des skieurs et skieuses de l'Equipe de France en fonction des disciplines de vitesse (DH, SG) et techniques (SL, GS)

## Description de la population avec rupture du LCA

### *Incidence*

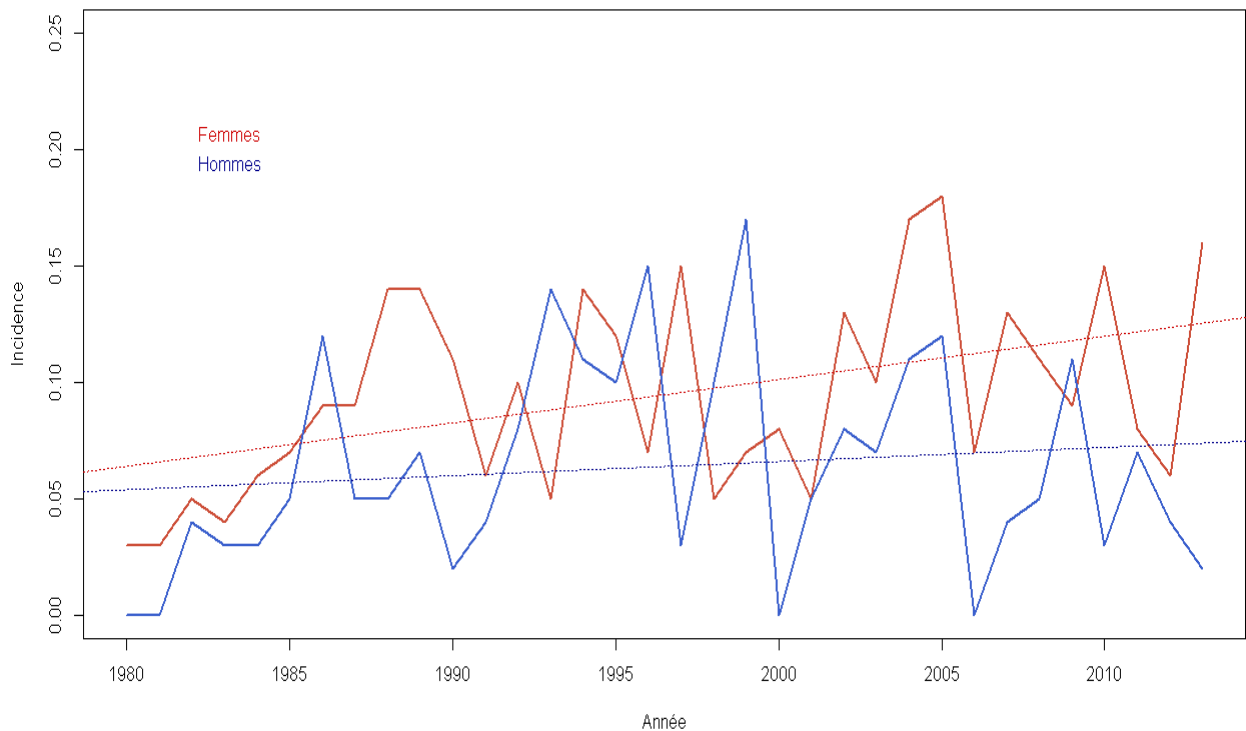


Figure 24. Incidence ( $i$ =nombre de rupture du LCA/nombre de skieurs-année) de 1980 à 2013

L'incidence entre le nombre de rupture du LCA et le nombre de skieurs-année est de 0,08 (0,06 pour les hommes,  $r^2=0,22$  ; 0,09 pour les femmes,  $r^2=0,27$ ) de 1980 à 2013 (Figure 24).

Cette incidence augmente significativement au cours de la période d'observation pour les femmes ( $p$ -value < 0,05) mais pas pour les hommes ( $p$ -value > 0,05).

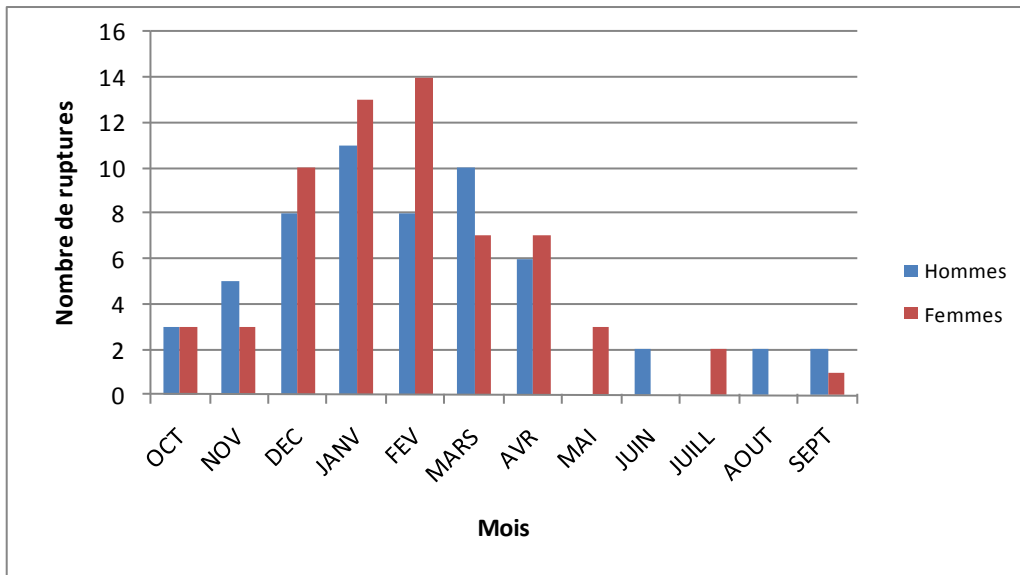


Figure 25. Répartition mensuelle du nombre de ruptures du LCA

La répartition mensuelle du nombre de ruptures du LCA (figure 25) suit la dynamique de la saison sportive. Le nombre de rupture du LCA se produit pendant les mois de compétition les plus intenses.

Chez les skieurs blessés, 54,5% (n=66) ont eu une seule rupture, 33,1% (n=40) en ont eu 2 et 10,7% (n=13) ont eu 3 ruptures du LCA. Un skieur (0,8%) en a subi 4 et un autre (0,8%) 5 au cours de leur carrière.

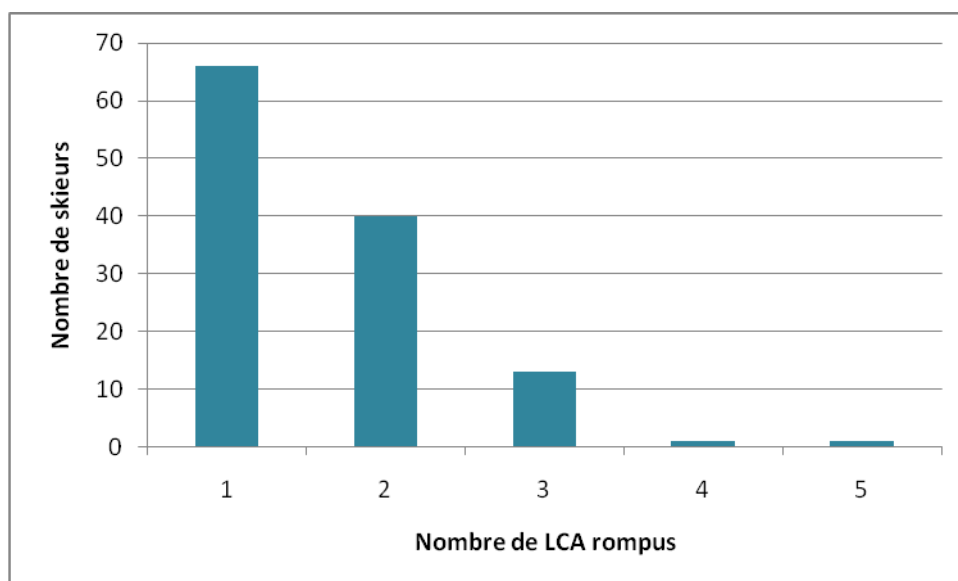


Figure 26. Répartition des skieurs en fonction du nombre de LCA rompus

## Répartition de la population en fonction de l'âge

Tableau 11. Ages moyens d'entrée et de sortie des skieurs en Equipe de France

Population totale	LCA	NLCA	Total
Age entrée	17,43 ± 2,03	17,61 ± 1,99	17,54 ± 2,40
Age sortie	25,56 ± 4,50*	22,68 ± 3,82*	23,80 ± 2,82

La différence d'âge de sortie entre le groupe LCA et NLCA est statistiquement significative (\*p-value<0,05).

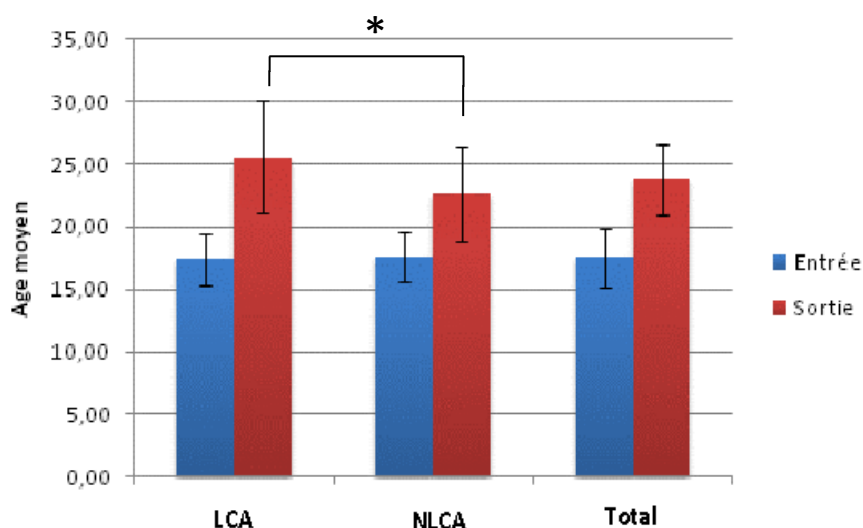


Figure 27. Ages moyens d'entrée et de sortie des skieurs en Equipe de France (âge de sortie : \*p-value<0,05)

Tableau 12. Ages moyens d'entrée et de sortie des skieurs en Equipe de France chez les skieurs et les skieuses

	Hommes			Femmes		
	LCA	NLCA	Total	LCA	NLCA	Total
Age entrée	18,20 ± 2,16	18,41 ± 1,84	18,34 ± 1,95	16,80 ± 1,66	16,78 ± 1,80	16,79 ± 1,75
Age sortie	27,16 ± 4,5*	23,58 ± 3,9*	24,86 ± 4,46	24,06 ± 3,94*	21,70 ± 3,50*	22,88 ± 3,95

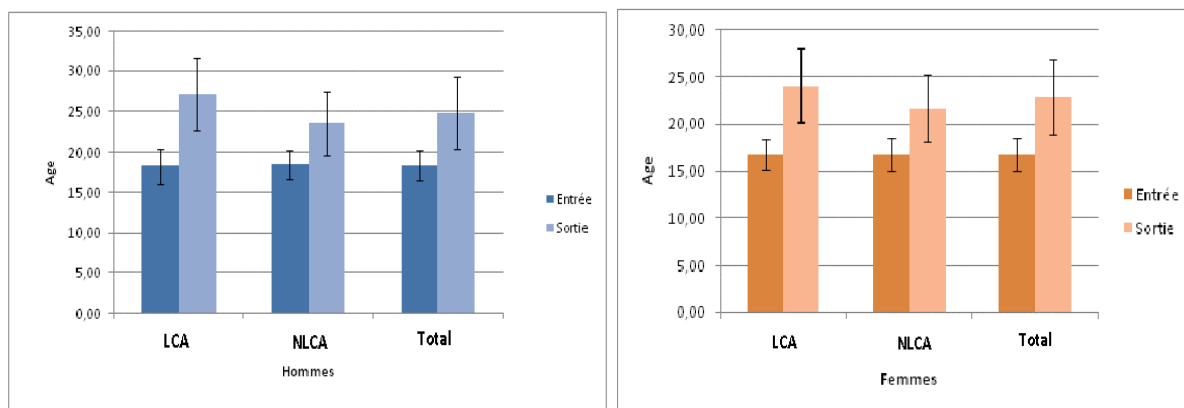


Figure 28. Ages moyens d'entrée et de sortie des skieurs en Equipe de France chez les skieurs et les skieuses

Les femmes LCA rentrent et sortent de l'équipe de France significativement plus tôt que les hommes (entrée et sortie :  $p < 0,05$ ). Les femmes NLCA rentrent et sortent de l'équipe de France significativement plus tôt que les hommes ( $p < 0,05$  pour l'entrée et  $p < 0,05$ ).

Tableau 13. Age moyen lors de la 1<sup>ère</sup> rupture du LCA

	Hommes	Femmes	Population totale	<i>p-value</i>
<b>Age moyen</b>	<b>22,6 ± 4,1</b>	<b>19,9 ± 3,5</b>	<b>21,1 ± 4,0</b>	<b>&lt; 0,0001</b>

Les femmes rentrent en Equipe de France plus tôt que les hommes et connaissent la rupture du LCA significativement plus tôt que les hommes (19,9 ± 3,5 ans pour les femmes vs. 22,6 ± 4,1 ans pour les hommes ;  $p\text{-value} < 0,0001$ ). En ajustant sur l'âge à l'entrée, il ya une différence d'âge à la rupture selon le sexe avec  $p\text{-value} < 0,05$ .

## Description des points FIS et du classement international (Indicateurs de performance 1 et 2)

Concernant l'analyse des points FIS, le site de la Fédération Internationale de Ski ne répertorie cet indicateur qu'à partir de 1995. Le tableau ci-dessous met en avant le nombre de skieurs et skieuses pour qui les points FIS avec les points FIS.

Tableau 14. Nombre de skieurs et skieuses avec les points FIS

Groupe	F	H	Total
LCA	64	57	121
NLCA	98	98	196
Total	162	155	<b>317</b>

### *Relation points FIS vs. classement international*

Dans cette partie, on s'est intéressé à la relation qui existe entre le point FIS et le classement international. Nous allons voir qu'elle permet de nous renseigner sur la volatilité du point FIS.

- Totalité des points FIS

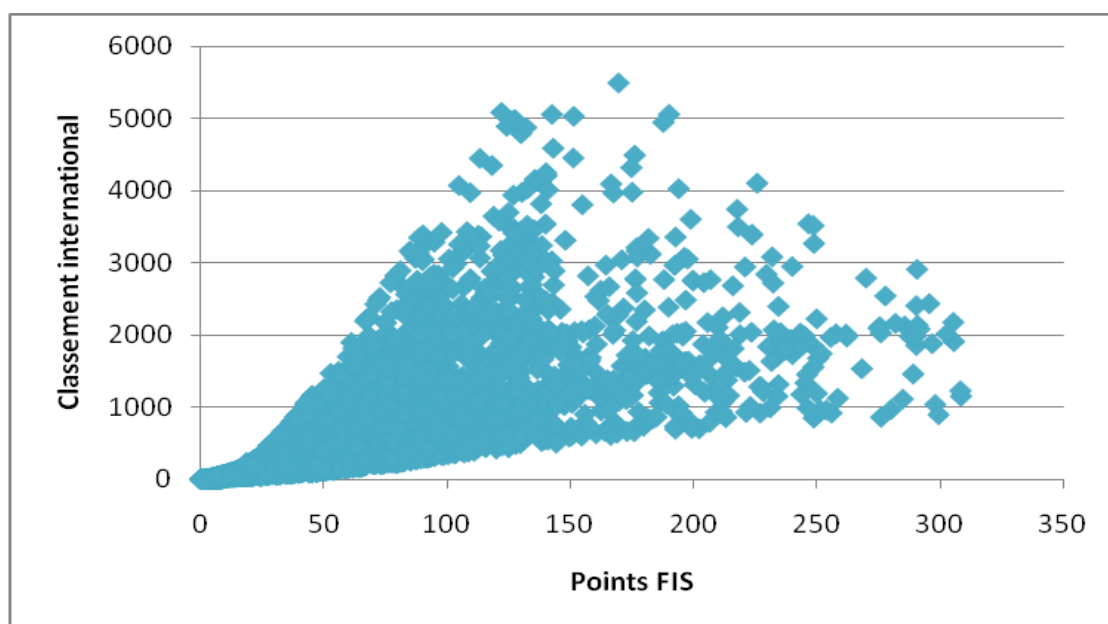


Figure 29. Lien entre les points FIS et les classements internationaux

Pour avoir une meilleure vision du lien qui existe entre le point FIS et le classement international, nous avons observé ce lien par intervalles de points.

- Entre 0 et 30 points FIS

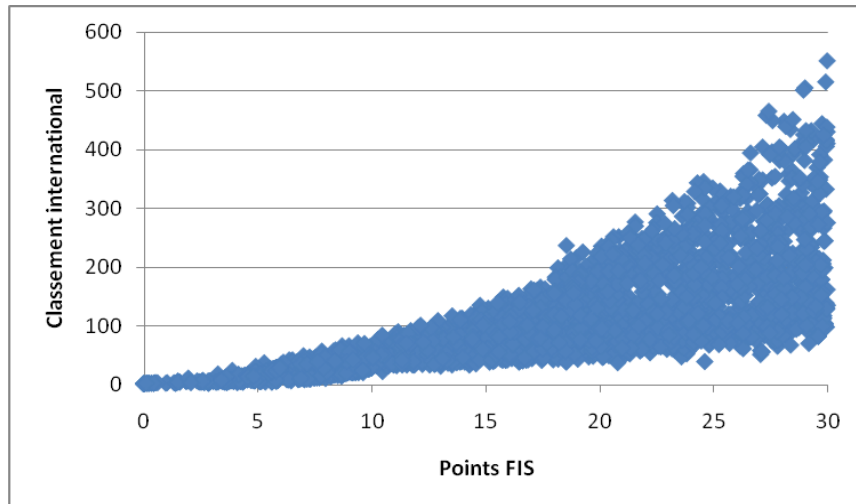


Figure 30. Lien entre les points FIS (de 0 à 30 points) et les classements internationaux

De 0 à 30 points FIS, le classement oscille entre la 1<sup>ère</sup> et la 550<sup>ème</sup> place. En séparant les disciplines de vitesse des disciplines techniques on constate qu'en vitesse, le ranking oscille entre la 1<sup>ère</sup> et la 250<sup>ème</sup> place et en technique, elle oscille entre la 1<sup>ère</sup> et la 550<sup>ème</sup> place (figure 31).

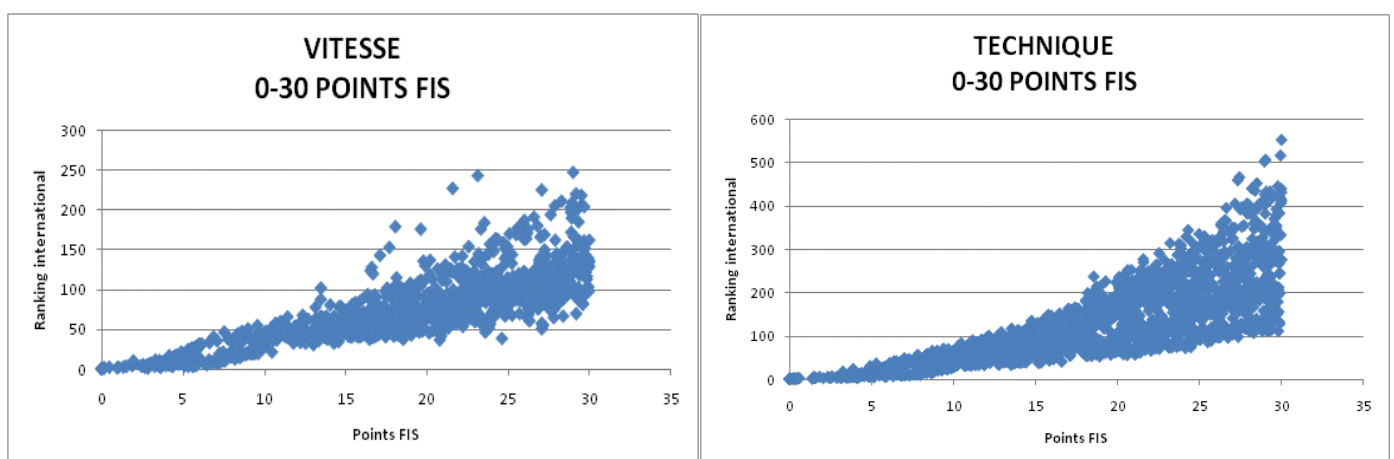


Figure 31. Lien entre les points FIS (de 0 à 30 points) et les classements internationaux en vitesse et en technique

- Entre 0 et 5 points FIS

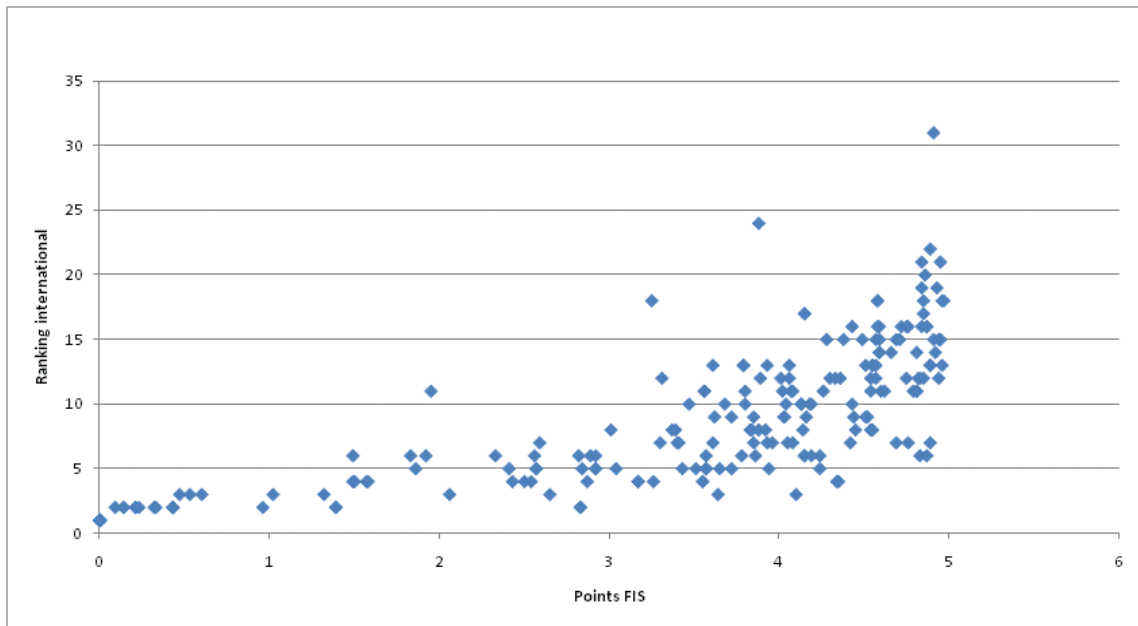


Figure 32. Lien entre les points FIS (de 0 à 5 points) et les classements internationaux

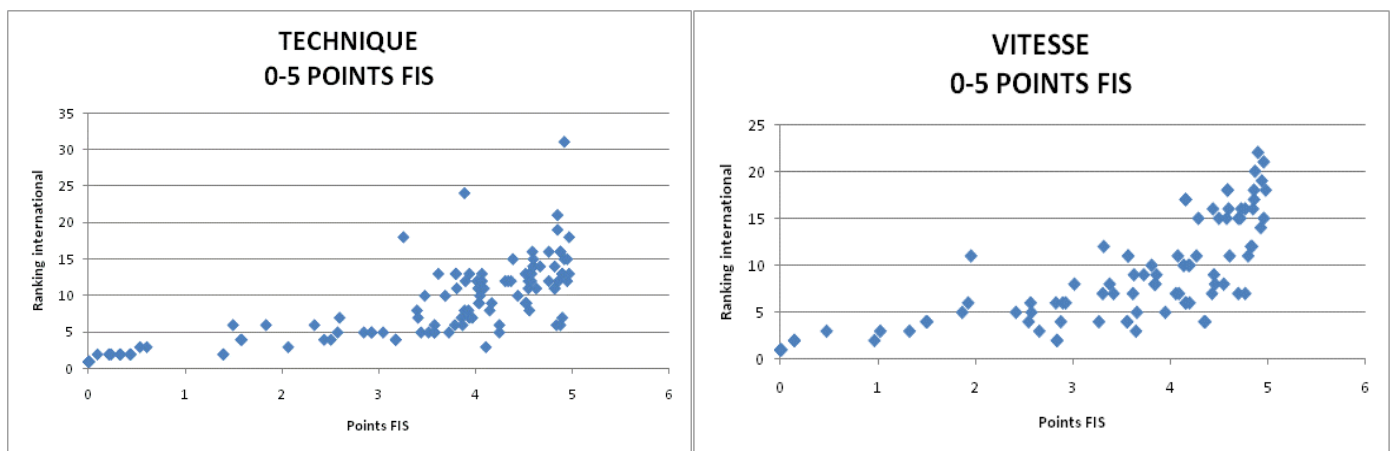


Figure 33. Lien entre les points FIS (De 0 à 5 points) et les classements internationaux en vitesse et en technique

On peut constater à travers ces représentations graphiques la volatilité que prend le point FIS au regard du classement international : plus les points FIS diminuent, plus l'écart de ranking va se réduire. En effet de 0 à 5 points FIS, le classement du skieur va de la 1<sup>ère</sup> à la 31<sup>ème</sup> place alors (figure 32) qu'il va de la 1<sup>ère</sup> à la 550<sup>ème</sup> place de 0 à 30 points FIS (figure 30). Et cet écart s'agrandit avec l'augmentation du point FIS.



### **Premier décile de performances des groupes LCA et NLCA**

La description des points FIS et des classements internationaux a été réalisée par décile de performances. Cette observation permet de comprendre la variation des classements et des points FIS dans le 1<sup>er</sup> décile et de percevoir la volatilité que montre le point FIS par rapport au classement (par exemple : une 2<sup>ème</sup> place peut aller de 0,09 à 2,83 points).

Tableau 14. Premiers déciles du classement international et des points FIS en fonction du groupe LCA ou NLCA, des disciplines (vitesse ou technique) et du sexe.

	<b>Classement</b>	<b>Points FIS</b>	<b>Nombre</b>
1er décile (population générale)	26	8,11	1021
1er décile Vitesse	28,3	9,6	504
1er décile technique	26	6,77	517
1er décile technique homme	26	6,46	259
1er décile technique femme	27,4	7,62	258
1er décile vitesse homme	23	8,89	251
1er décile vitesse femme	36,2	10,65	253
1er décile vitesse LCA	16	5,70	202
1er décile vitesse NLCA	40	12,35	302
1er décile technique LCA	12	5,3	204
1er décile technique NLCA	37,4	9,04	313
1er décile vitesse homme LCA	15,6	5,03	97
1er décile vitesse femme LCA	21,4	9,22	105
1er décile vitesse homme NLCA	37,9	10,95	154
1er décile vitesse femme NLCA	42,1	14,62	148
1er décile technique homme LCA	9,7	4,09	98
1er décile technique femme LCA	15,5	5,75	106
1er décile technique homme NLCA	33	7,58	161
1er décile technique femme NLCA	51,8	12,61	152

La construction des déciles de performances nous permet de constater plusieurs points. Tout d'abord, le groupe des athlètes ayant eu une rupture du LCA (groupe LCA) ont de

meilleurs points FIS et de meilleurs classements que le groupe des NLCA et ce, dans les disciplines de vitesse comme dans les disciplines techniques. En vitesse, le 1<sup>er</sup> décile de performances du groupe LCA montre un classement à la 16<sup>ème</sup> place et 5,704 points FIS alors que celui du groupe NLCA montre un classement à la 40<sup>ème</sup> place et 12,352 points FIS. De même dans les disciplines techniques, on peut constater que le 1<sup>er</sup> décile du groupe LCA indique un classement à la 12<sup>ème</sup> place et 5,3 points FIS alors que pour le groupe NLCA, le classement grimpe au-delà pour atteindre la 37,4<sup>ème</sup> place et 9,036 points FIS.

Un autre résultat concerne les différences de performances entre les hommes et les femmes. En effet, dans les deux groupes (LCA et NLCA) et dans toutes es disciplines, les hommes ont de meilleurs classements et de meilleurs points FIS que les femmes. Enfin, une troisième observation concernant le 1<sup>er</sup> décile de performances est que les skieurs et skieuses parviennent à obtenir de meilleures performances en disciplines techniques qu'en disciplines de vitesse. Dans l'ensemble de la population, en technique, on peut noter un classement à la 26<sup>ème</sup> place et 6,77 points FIS pendant que dans les disciplines de vitesse on note un classement à la 28,3<sup>ème</sup> place et 9,58 points FIS.

## Ages des skieurs à la meilleure performance

### **Méthode 1 : moment de la blessure non pris en compte**

Il a déjà été démontré dans plusieurs sports, qu'il existait un âge pour lequel la performance est optimale. Basées sur la loi de Moore (Moore, 1975), les meilleures performances au tennis, en natation ou encore en athlétisme ont été analysées au sein de l'Institut de Recherche bioMédicale et de l'Epidémiologie du Sport (IRMES) (Berthelot et al., 2012; Guillaume et al., 2011). Ces études ont permis de mettre en évidence l'existence d'un âge au pic de performance. Dans notre cas, au ski alpin, nous avons étudié l'âge au pic de performance à partir de différents angles compte tenu du moment de la survenue de la blessure.

Nous avons appelé « Méthode 1 » l'analyse de l'âge à la meilleure performance sans prendre en compte le moment (l'âge) de la blessure. Dans cette première méthode, un skieur ou une skieuse qui a eu une rupture du LCA est considéré(e) blessé(e) (groupe LCA) du début jusqu'à la fin de sa carrière. Un skieur ou une skieuse n'ayant pas connu cette blessure est inclus(e) dans le groupe des NLCA tout au long de sa carrière en Equipe de France. Les âges à la meilleure performance dans les 4 disciplines alpines sont représentés dans les graphiques et le tableau ci-dessous. Ces résultats sont exprimés en fonction du groupe (LCA et NLCA) et du sexe.

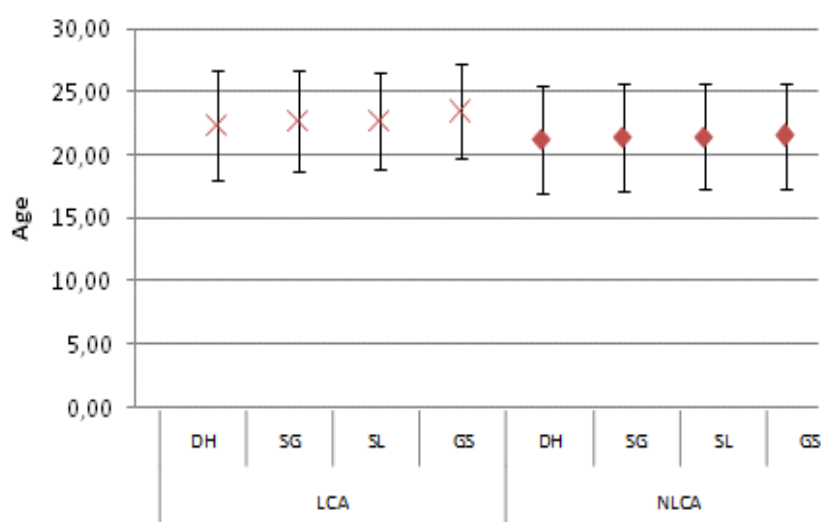


Figure 34. Age moyen (+ET) au pic de performance dans les 4 disciplines alpines en fonction des groupes LCA et NLCA chez les skieuses en Equipe de France (Méthode 1).

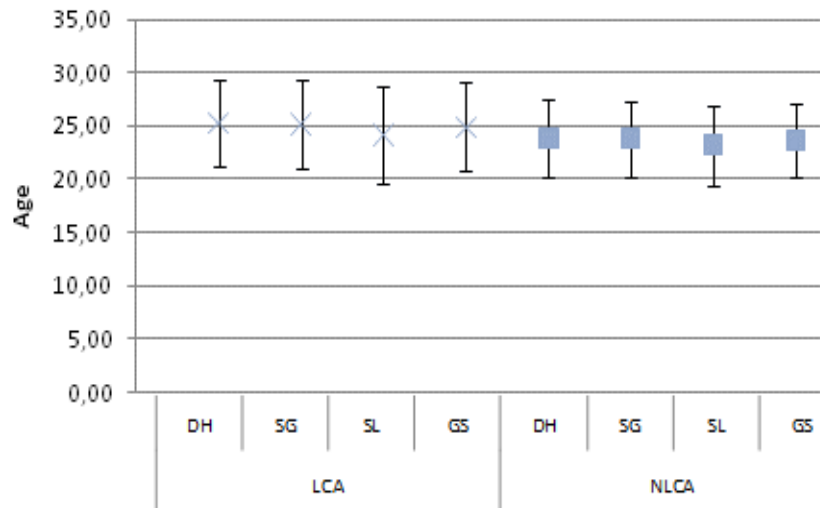


Figure 35. Age moyen (+ET) au pic de performance dans les 4 disciplines alpines en fonction des groupes LCA et NLCA chez les skieurs en Equipe de France (Méthode 1).

Tableau 15. Ages moyens ( $\pm$  ET) à la meilleure performance des groupes LCA et NLCA dans les 4 disciplines alpines chez les femmes et les hommes selon la « Méthode 1 ».

Age $\pm$ ET	LCA				NLCA			
	DH	SG	SL	GS	DH	SG	SL	GS
Femmes	22,4 $\pm$ 4,4	22,72 $\pm$ 4,1	22,68 $\pm$ 3,9	23,48 $\pm$ 3,8	21,22 $\pm$ 4,3	21,45 $\pm$ 4,3	21,44 $\pm$ 4,2	21,5 $\pm$ 4,2
Hommes	25,3 $\pm$ 4,0	25,2 $\pm$ 4,2	24,2 $\pm$ 4,6	24,9 $\pm$ 4,2	23,9 $\pm$ 3,7	23,8 $\pm$ 3,6	23,2 $\pm$ 3,8	23,6 $\pm$ 3,5

A travers cette analyse, on peut constater que quelle que soit la discipline, le groupe LCA atteint son pic de performance plus tard que le groupe NLCA (Tableau 15 et graphiques 34 et 35).

### **Méthode 2 : moment de la blessure pris en compte**

L'autre méthode, « Méthode 2 » va prendre en compte le moment (ou l'âge) de la survenue de la blessure. Ici, le groupe des non blessés (NLCA) comprend tous les skieurs et skieuses sans rupture du LCA et celles et ceux ayant connu cette blessure mais avant qu'ils ne soient blessé(e)s. Puis, le groupe des blessés (LCA) inclut lui, tous les skieurs et skieuses ayant connu la rupture du LCA mais uniquement après la blessure. Cette « Méthode 2 » permet de ne pas inscrire un athlète ayant eu une rupture du LCA blessé dès le début de sa carrière en Equipe de France.

Tableau 16. Ages moyens ( $\pm$  ET) à la meilleure performance des groupes LCA et NLCA dans les 4 disciplines alpines chez les femmes et les hommes selon la « Méthode 2 ».

Age $\pm$ ET	LCA				NLCA			
	DH	SG	SL	GS	DH	SG	SL	GS
Femmes	23,5 $\pm$ 4,3	23,7 $\pm$ 3,9	23,6 $\pm$ 3,4	24,1 $\pm$ 3,5	20,8 $\pm$ 4,8	20,5 $\pm$ 4,1	20,6 $\pm$ 4,1	20,6 $\pm$ 4,1
Hommes	26,0 $\pm$ 4,0	26,4 $\pm$ 3,8	26,8 $\pm$ 3,7	26,2 $\pm$ 4,1	20,1 $\pm$ 4,9	21,0 $\pm$ 4,9	21,0 $\pm$ 4,9	21,8 $\pm$ 4,4

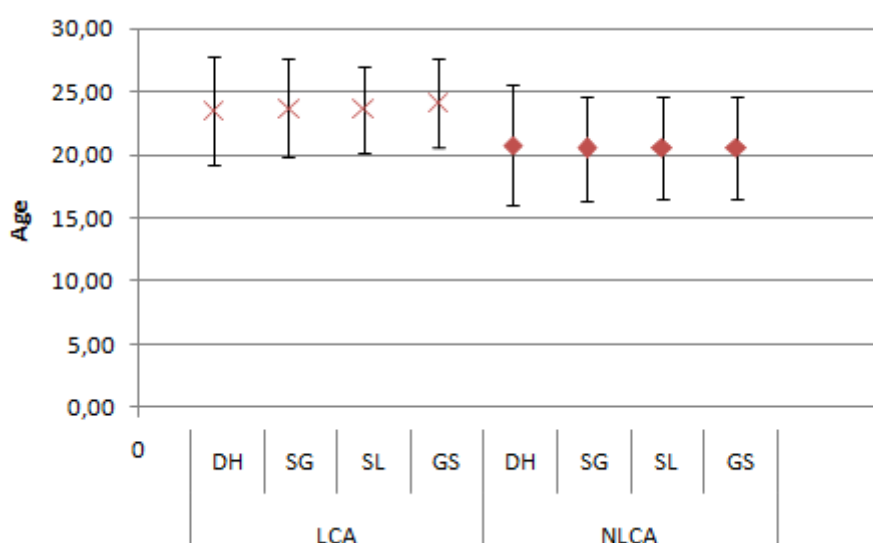


Figure 36. Age moyen (+ET) au pic de performance dans les 4 disciplines alpines en fonction des groupes LCA et NLCA chez les skieuses en Equipe de France (Méthode 2).

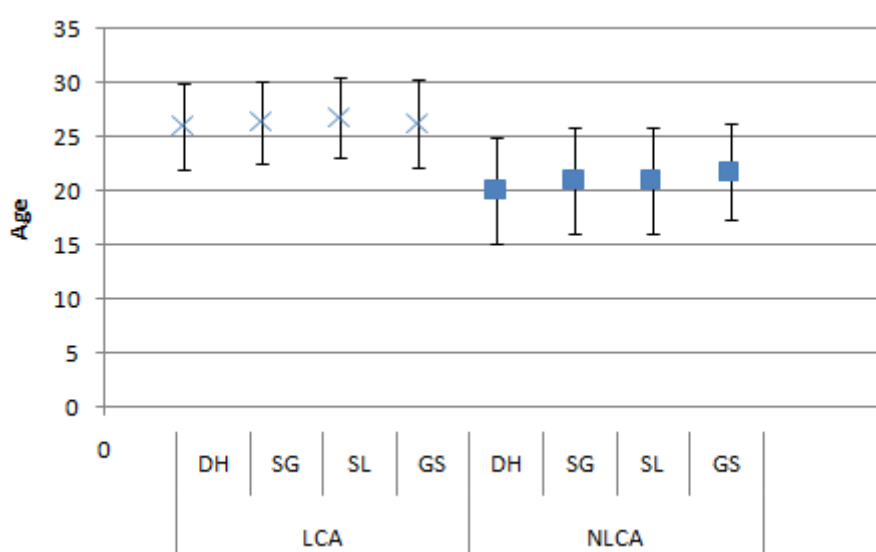


Figure 37. Age moyen (+ET) au pic de performance dans les 4 disciplines alpines en fonction des groupes LCA et NLCA chez les skieurs en Equipe de France (Méthode 2).

Comme pour la méthode 1, on observe que l'âge au pic de performance est plus tardif pour le groupe LCA par rapport au groupe NLCA. Suite à ces résultats, nous avons émis l'hypothèse qu'après la rupture du LCA, le retour à la meilleure performance (pic de performance) se ferait plus tardivement chez les athlètes qui ont subi plusieurs ruptures du LCA.

*Hypothèse : le retour à la meilleure performance se ferait plus tardivement avec le nombre de ruptures du LCA.*

Pour vérifier notre hypothèse, nous avons regardé l'âge à la meilleure performance des skieuses et skieurs avec 1 rupture du LCA uniquement (Graphiques 38 et 39 et tableau 17).

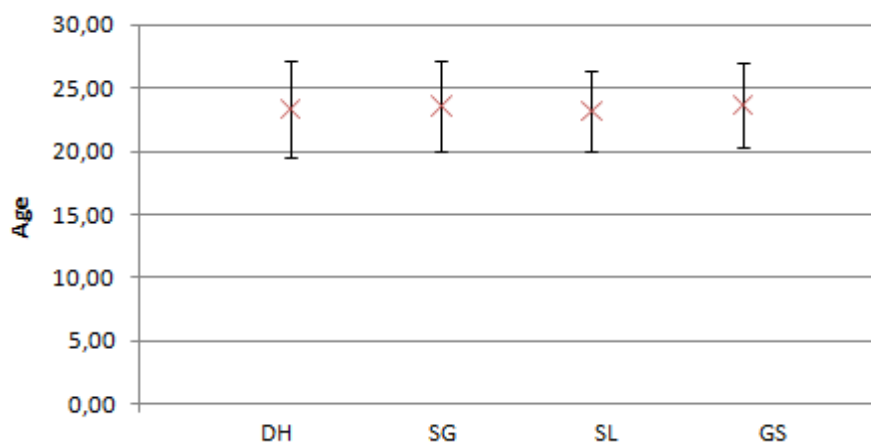


Figure 38. Age moyen (+ET) au pic de performance après la blessure chez les skieuses avec 1 seule rupture du LCA en Equipe de France dans les 4 disciplines alpines.

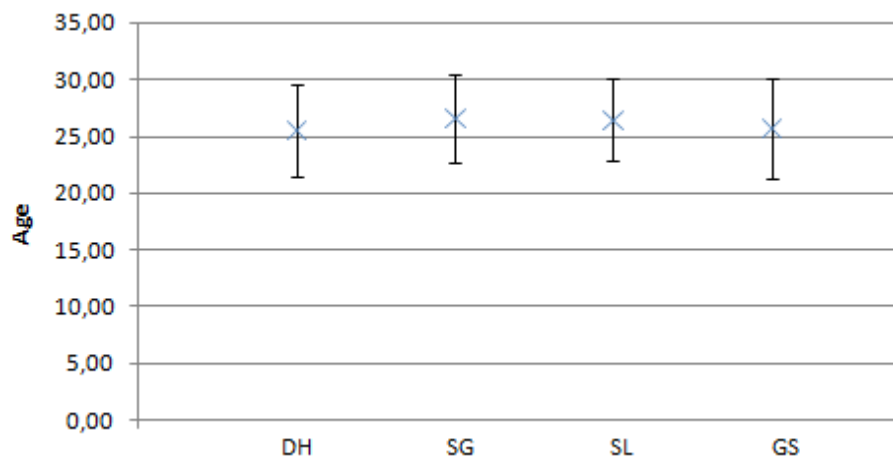


Figure 39. Age moyen (+ET) au pic de performance après la blessure chez les skieurs avec 1 seule rupture du LCA en Equipe de France dans les 4 disciplines alpines.

Tableau 17. Age moyen à la meilleure performance après la blessure chez les femmes et les hommes avec une seule rupture du LCA en Equipe de France de ski alpin dans les 4 disciplines.

Age $\pm$ ET	Après la rupture du LCA			
	DH	SG	SL	GS
Femmes	23,3 $\pm$ 3,8	23,6 $\pm$ 3,7	23,2 $\pm$ 3,2	23,6 $\pm$ 3,4
Hommes	25,5 $\pm$ 4,1	26,6 $\pm$ 3,9	26,5 $\pm$ 3,6	25,7 $\pm$ 4,4

Pour les athlètes avec une seule rupture comme pour les athlètes avec plusieurs ruptures du LCA, il n’y a pas de différence significative de l’âge à la meilleure performance après la blessure ( $p > 0,05$ ). En moyenne, pour les femmes avec une rupture du LCA, l’âge au pic de performance est de 23,4  $\pm$  3,5 ans et pour celles avec plusieurs ruptures de 23,7  $\pm$  3,7 ans. Les hommes avec une seule rupture atteignent leur pic de performance en moyenne à 26,1  $\pm$  3,9 ans et à 26,3  $\pm$  3,8 ans pour ceux avec plusieurs ruptures du LCA.

On observe donc 2 points : 1) Les skieurs et skieuses ayant connu cette blessure ont un âge au pic de performance plus tardif que celles et ceux qui n’ont pas eu ce type de blessure au cours de leur carrière de haut niveau. 2) On ne voit pas de changement significatif de l’âge au pic de performance lié au nombre de rupture. Un skieur ou une skieuse avec une seule rupture du LCA va atteindre son pic de performance aussi tardivement qu’un skieur ou une skieuse qui en a subi plusieurs au cours de sa carrière.

L’âge est un point déterminant en termes de retour à la performance en raison de la relation établie entre ces deux facteurs (A. B. Baker & Tang, 2010; Moore, 1975). Elle se caractérise par une première phase de progression reflétant le développement des capacités physiques, une deuxième phase correspondant aux performances optimales incluant le pic de performance, et une troisième phase de régression au cours de laquelle les performances diminuent. Berthelot et al. (2012) ont démontré que l’âge au pic de performance des meilleurs mondiaux était de 26,0 ans en athlétisme et de 21,0 ans en natation (Berthelot et al., 2012). Celui du Top 10 mondial des joueuses et joueurs de Tennis est respectivement de 21,5 ans et 24,1 ans (Guillaume et al., 2011). Concernant notre population, l’âge au pic de performance du Top 10 français est à 25,1 ans chez les hommes et 25,3 chez les femmes.

## Podiums des skieuses et skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013 (Indicateur de performance 3)

### Podiums en fonction des groupes LCA et NLCA

Tableau 18. Nombre d'athlètes avec et sans rupture du LCA ayant réalisé des podiums au moins une fois dans leur carrière en Equipe de France aux JO, Championnats du Monde et Coupe du Monde.

	LCA			NLCA			Population totale		
	Hommes	Femmes	Total	Hommes	Femmes	Total	Hommes	Femmes	Total
<b>Avec podium</b>	17	17	34	12	15	27	29	32	61
<b>Sans podium</b>	50	64	114	160	142	302	210	206	416
<b>Total</b>	67	81	148	172	157	329	239	238	<b>477</b>

Sur les 477 skieuses et skieurs alpins français (LCA et NLCA), 12,8% (61/477) ont eu au moins un podium (JO et/ou Championnats du Monde et/ou Coupe du Monde) au cours de leur carrière et 87,2% n'ont pas eu de podium (figure 40 et tableau 18).

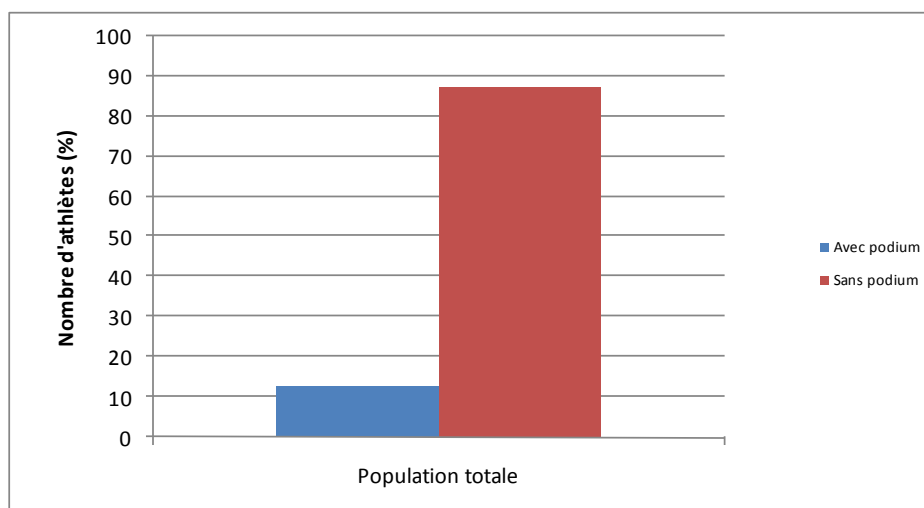


Figure 40. Nombre d'athlètes (%) français en ski alpin de 1980 à 2013 avec et sans podium au cours de leur carrière.



### **Skieuses et skieurs avec podium**

Sur les 61 athlètes ayant réalisé au moins un podium au cours de leur carrière, 44,3% n'ont pas eu de rupture du LCA et 55,7% en ont eu (figure 41).

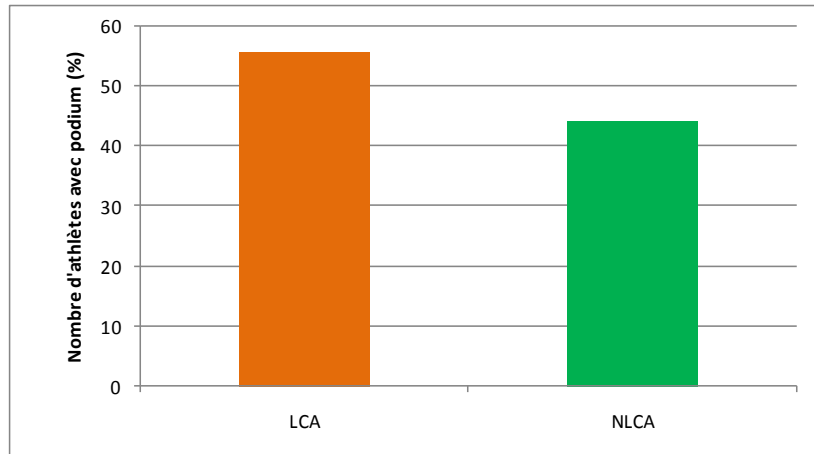


Figure 41. Nombre d'athlète (%) ayant réalisé au moins un podium au cours de leur carrière par groupe (LCA et NLCA)

### **Podiums au sein de chacun des 2 groupes : LCA et NLCA**

Parmi les skieurs et skieuses qui réalisent un podium au sein de chaque catégorie (LCA et NLCA, n=61), 8,2% au sein du groupe NLCA et 23,0% parmi les athlètes du groupe LCA font au moins un podium. Les athlètes du groupe LCA ont presque 3 fois plus de chance de décrocher un podium durant leur carrière que ceux du groupe NLCA (figure 42).

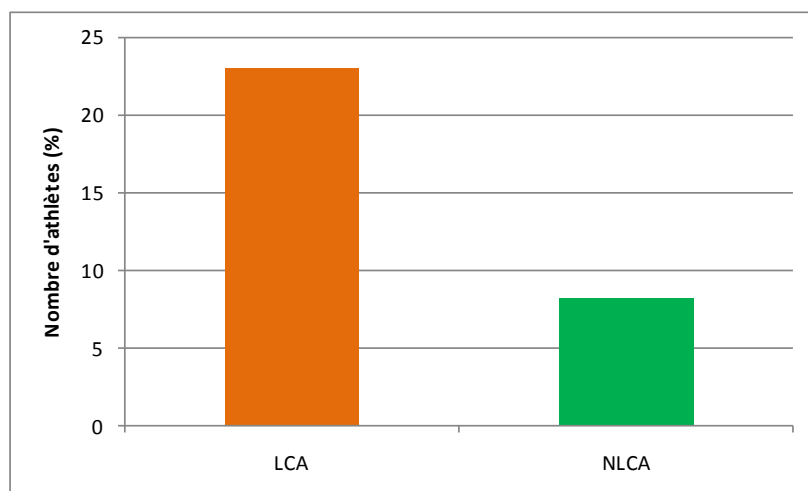


Figure 42. Nombre d'athlètes (%) au sein du groupe LCA et au sein du groupe NLCA ayant réalisé au moins un podium au cours de leur carrière.

Chez les skieurs hommes, 25,4% du groupe LCA et 7,0% du groupe NLCA ont effectué au moins un podium durant leur carrière. Chez les femmes, 21,0% du groupe LCA et 9,6% du groupe NLCA ont réalisé un podium (toutes compétitions confondues) (figure 43).

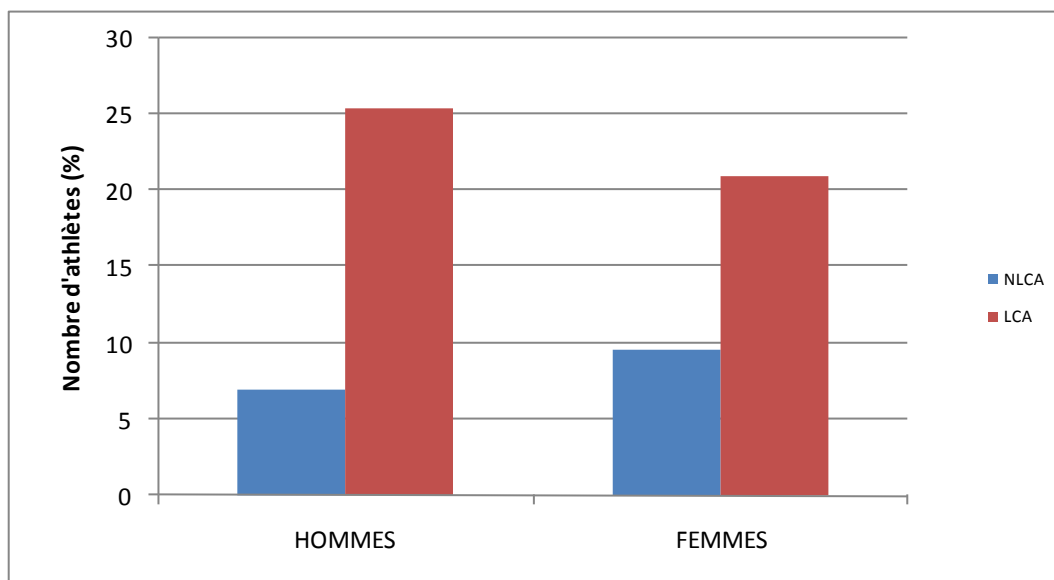


Figure 43. Nombre d'athlètes avec podium par sexe et par groupe (LCA et NLCA)

## **Chapitre 7 : Après la rupture du LCA**

## Niveau de performance après rupture du LCA

Dans cette partie, nous avons réalisé un suivi des performances du début à la fin de carrière des skieurs alpins en Equipe de France, **en utilisant les points FIS**. Pour cela, nous avons mesuré la part des athlètes ayant une amélioration, une détérioration ou pas de changement des performances après une rupture du LCA. L'évolution ou la variation des performances est définie par la différence entre les meilleures performances avant la rupture du LCA et les meilleures performances après la rupture du LCA.

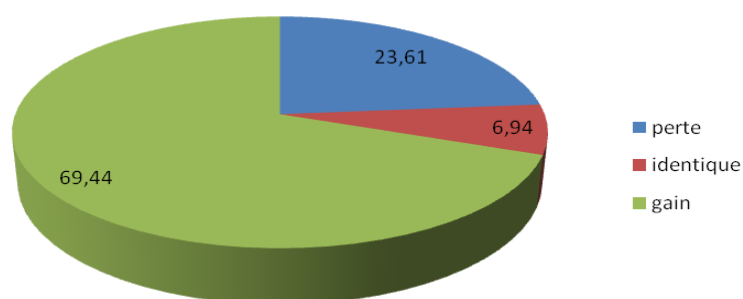


Figure 44. Part des skieurs et skieuses (%) toutes disciplines confondues ayant de moins bonnes performances (perte), de meilleures performances (gain) ou des performances inchangées (identiques) après la rupture du LCA

Pour les 2 sexes, on constate que la majorité des skieurs obtient de meilleures performances après la blessure (69,44% qui ont de meilleures performances contre 23,61% qui connaissent une détérioration de leurs performances et 6,94% sans variation).

### Ruptures bilatérales ou re-ruptures

Chez les femmes qui trouvent un meilleur niveau après la blessure, 7 ont eu une (ou des) re-rupture(s) et 9 ont eu (une ou des) rupture(s) bilatérale(s). Chez les hommes, 5 ont eu une (ou des) re-rupture(s) et 7 ont eu (une ou des) rupture(s) bilatérale(s).

Pour les femmes qui ont un niveau de performance plus faible post-blessure 2 ont eu une (ou des) re-rupture(s) et 4 ont eu (une ou des) rupture(s) bilatérale(s). Concernant les hommes, 3 ont eu une (ou des) re-rupture(s) et 2 ont eu (une ou des) rupture(s) bilatérale(s).

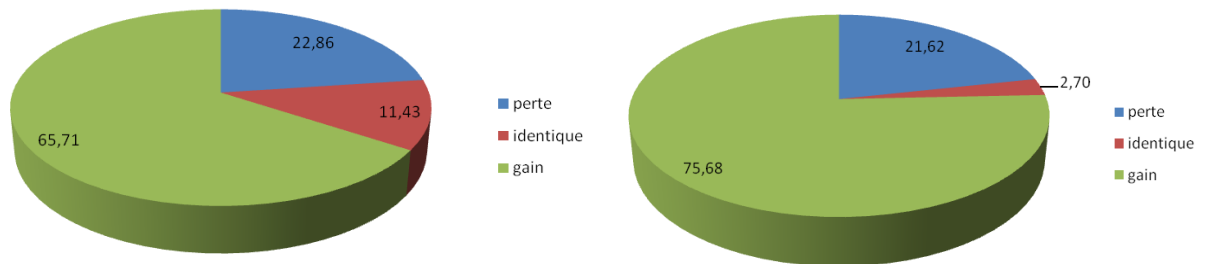


Figure 45. Part des skieurs (à gauche) et skieuses (à droite) (%) toutes disciplines confondues ayant de moins bonnes performances (perte), de meilleures performances (gain) ou des performances inchangées (identiques) après la rupture du LCA

S'il on différencie les hommes et les femmes, on observe que les skieuses parviennent à obtenir de meilleures performances après la rupture du LCA plus que leurs compatriotes masculins (respectivement, 75,68% vs. 65,71%). Or, cette observation met en lumière la part des skieurs et skieuses ayant amélioré ou détérioré leurs performances mais ne permet pas d'apprécier de quelle manière se fait la variation des performances notamment par rapport à l'âge. En effet, le retour à de performances meilleures n'est-il pas du à l'âge à la rupture du LCA ?

Nous allons pour cela regarder les gains et les pertes des performances en fonction de l'âge par l'intermédiaire de l'accroissement relatif.

## Capital de performance en fonction de l'âge à la rupture

Le capital de performance est calculé à l'aide de l'accroissement relatif :  $AR = (V2 - V1) / V1$ , avec V1 : Meilleure performance avant rupture du LCA et V2 : Meilleure performance après rupture.

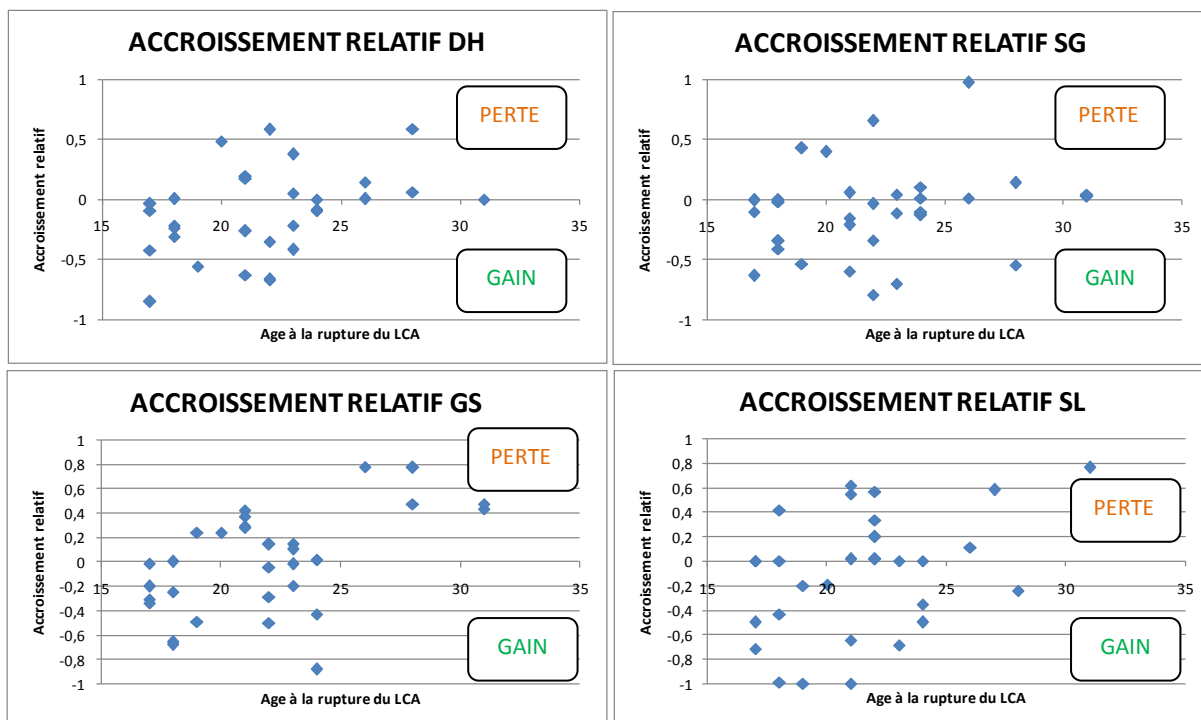


Figure 50. Accroissement relatif des performances en fonction de l'âge à la rupture chez les skieurs dans les 4 disciplines alpines

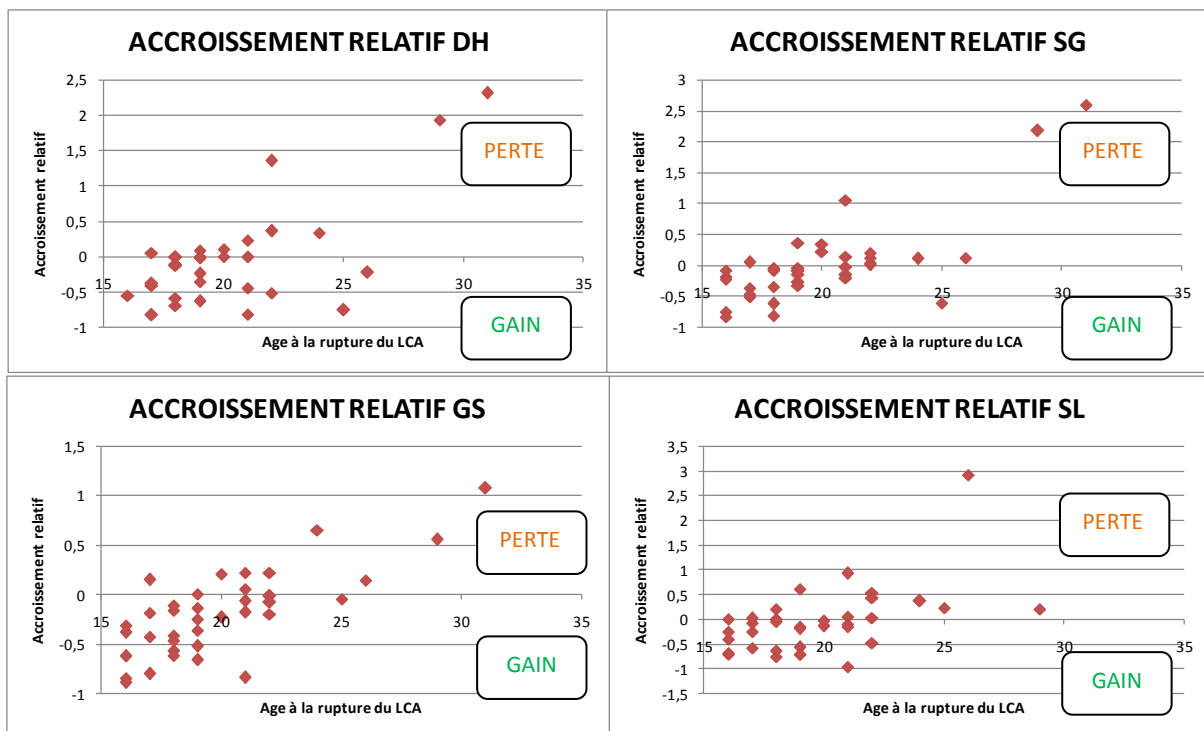


Figure 51. Accroissement relatif des performances en fonction de l'âge à la rupture chez les skieuses dans les 4 disciplines alpines

Rappelons que plus le point FIS est bas et meilleure est la performance. Par conséquent, si l'accroissement relatif est positif, alors il s'agit d'une détérioration de la performance (Perte). Inversement, si l'accroissement relatif est négatif, la performance est améliorée (Gain).

Chez les femmes, au même titre que chez les hommes, plus la rupture survient tardivement et plus il est difficile de revenir à son niveau de performance après cette blessure. Pour les 2 sexes, on constate que les athlètes ont plus de chance de perdre en performance lorsque la rupture a lieu **après** 25 ans.

Une analyse plus précise concernant le retour à la performance en fonction de l'âge à la rupture est réalisée dans l'étude 1.

## Podiums avant et après la rupture du LCA

Le tableau 19 répertorie le nombre de skieurs ayant réalisé des podiums : (i) seulement avant la rupture du LCA, (ii) seulement après la rupture du LCA, (iii) avant et après la rupture du LCA. Dix skieurs et skieuses réalisent au moins un podium exclusivement avant la blessure et 37 exclusivement après. Six athlètes décrochent un podium non seulement avant mais aussi après la survenue de la blessure.

Tableau 19. Nombre de skieurs ayant réalisé des podiums exclusivement avant, exclusivement après, avant et après la rupture du LCA chez les hommes et les femmes dans 3 types de compétition (Coupe du Monde : Cp M, championnat du Monde : Ch M, jeux olympiques : JO).

	Avant				Après				Avant et après			
	Cp M	Ch M	JO	Total	Cp M	Ch M	JO	Total	Cp M	Ch M	JO	Total
<b>Hommes</b>	4	0	1	<b>5</b>	10	6	4	<b>20</b>	3	1	0	<b>4</b>
<b>Femmes</b>	4	0	1	<b>5</b>	11	4	2	<b>17</b>	2	0	0	<b>2</b>
<b>Total</b>	8	0	2	<b>10</b>	21	10	6	<b>37</b>	5	1	0	<b>6</b>

On peut ainsi observer que **parmi** les skieurs et skieuses qui ont fait des podiums au cours de leur carrière, la majorité d'entre eux sont capables de réaliser des podiums après la rupture du LCA. La représentation graphique ci-dessous (figure 52) illustre le nombre d'athlètes avec LCA ayant fait des podiums avant et/ou après la blessure dans les 3 types de compétition. De la même manière, on note un nombre d'athlètes avec podiums après la rupture du LCA plus important que celui avant la blessure.

En coupe du monde, chez les hommes, 41,2% réalisent au moins un podium avant la blessure vs. 76,5% après. Chez les femmes, 35,3% avant vs. 76,5% après. En championnat du monde, chez les hommes, on note 5,9% d'athlète qui réalisant au moins un podium avant la blessure vs. 41,2% après et chez les femmes, toutes réalisent leur podium après leur blessure. Aux JO, 5,9% des hommes font leur podium avant vs. 23,5% après et chez les femmes, 5,9% d'entre elles font au moins un podium avant vs. 11,8% après la rupture du LCA.



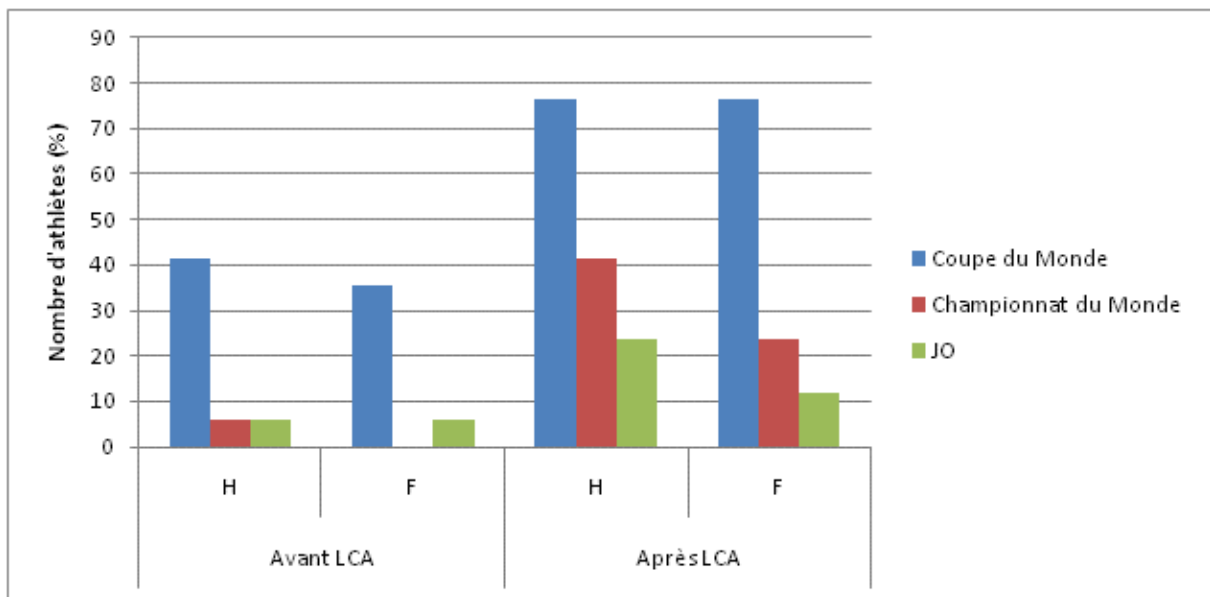


Figure 52. Répartition (%) des skieurs qui réalisent leur podium avant et/ou après leur LCA en fonction du sexe et du type de compétition.

Il faut savoir que le nombre de podiums en coupe du monde est toujours plus important qu'en championnat du monde et qu'aux JO car la coupe du monde a lieu chaque année. Elle détermine au final le skieur le plus régulier sur environ 14 événements organisés pour chaque épreuve. Les Championnats du monde se déroulent tous les 2 ans et les Jeux Olympiques tous les 4 ans couronnent leurs vainqueurs sur une seule course dans chacune des épreuves.

L'analyse de la capacité des athlètes à aller jusqu'aux podiums après la rupture du LCA est exprimée aussi par la répartition du nombre de podium par athlète (nombre de podium/ nombre d'athlète) avant et après la blessure (Figure 53). Pour une meilleure visibilité nous avons séparé les podiums des coupes du monde de ceux des championnats du monde et des JO.

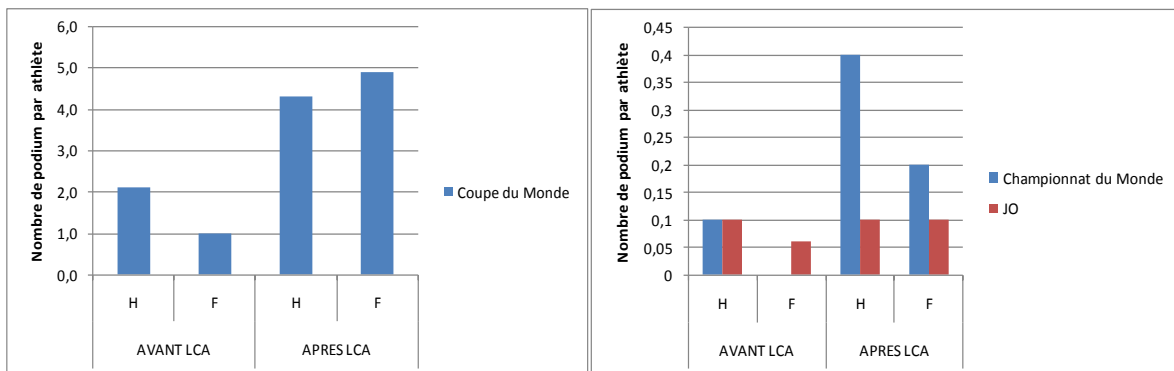
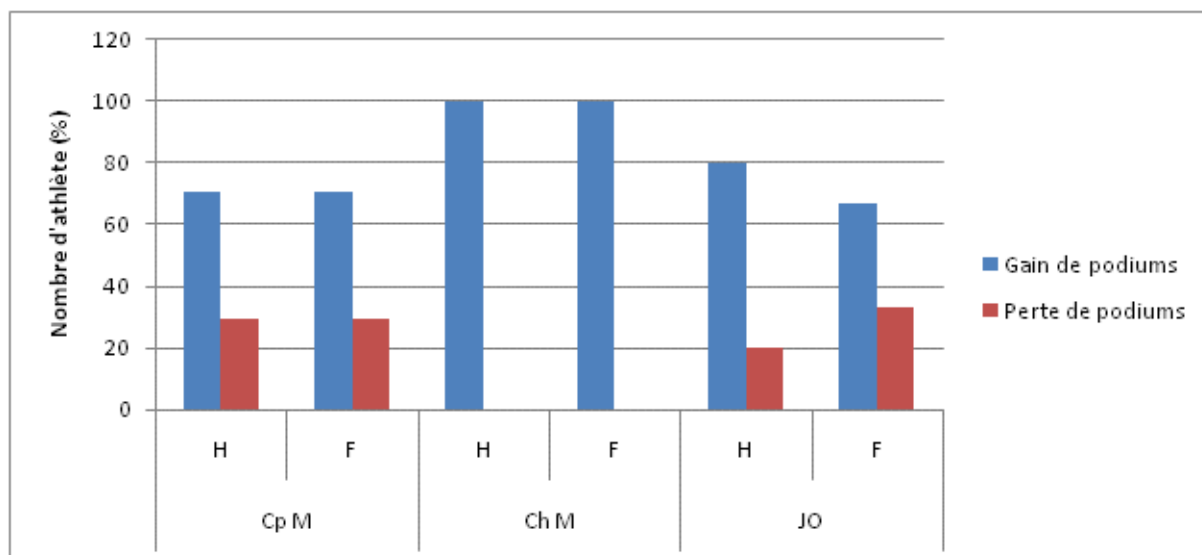


Figure 53. Répartition du nombre de podium par athlète (nombre de podium/ nombre d'athlète) avant et après la rupture du LCA en fonction du sexe et du type de compétitions.

En coupe du monde, les hommes réalisent environ 2 fois plus de podiums après la blessure et les femmes presque 4 fois plus. Concernant les championnats du monde, les hommes font plus de podiums après la blessure d'un facteur 4 et les femmes réalisent tous leurs podiums après la rupture du LCA. Aux JO, les hommes font autant de podiums avant qu'après la blessure et les femmes en font presque 2 fois plus après la survenue de la rupture du LCA. Ces résultats montrent que si un athlète a les compétences et les capacités pour atteindre un ou des podium(s) au cours de sa carrière, la rupture du LCA ne semble pas être un événement néfaste à son niveau de performance.

#### Après la rupture du LCA : gain ou perte en nombre de podiums ?

Nous nous sommes ici intéressés au nombre de podiums gagnés et perdus après la rupture du LCA chez les skieurs et skieuses alpins en Equipe de France.



Cp du Mde	APRES LCA		Total
	GAIN DE PODIUM	PERTE DE PODIUM	
HOMMES	12	5	17
FEMMES	12	5	17
Ch Mde			
HOMMES	6	0	6
FEMMES	4	0	4
JO			
HOMMES	4	1	5
FEMMES	2	1	3

Figure 54. Nombre d'athlète (%) ayant gagné ou perdu en nombre de podiums après la rupture du LCA en fonction des compétitions (Coupe du monde : Cp M, championnat du monde : Ch M, jeux olympiques : JO). **Nombre d'athlète en valeur absolue ayant gagné ou perdu en nombre de podiums après la rupture du LCA**

En coupe du Monde et aux JO, les athlètes gagnent en nombre podium (respectivement, 70,6% et 80% de skieurs ; 70,6% et 66,7% de skieuses) plus qu'ils n'en perdent (respectivement 29,9% et 20% de skieurs ; 29,4% et 33,3% de skieuses). Aux Championnats du Monde, tous les hommes et toutes les femmes ont été capables de décrocher de nouveaux podiums après la rupture du LCA.

S'il on note un nombre de podiums après la rupture du LCA plus important que celui d'avant, n'y a-t-il pas là encore un effet de l'âge au moment de la blessure ? En d'autres termes, chez les skieurs et skieuses qui ne reviennent pas à leur niveau de performance après la rupture du LCA, n'est-ce pas dû à un âge avancé au moment de la blessure ?

Pour répondre à ce questionnement, nous avons calculé la moyenne des âges à la rupture des skieurs ayant réalisé leur podium avant blessure et de ceux ayant réalisé leur podium après la blessure toutes compétitions confondues.

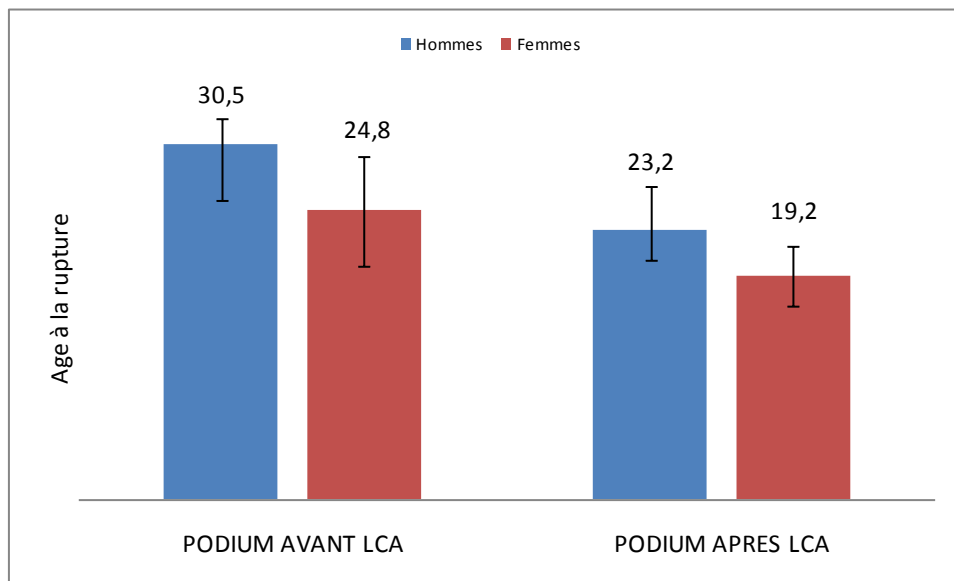


Figure 55. Ages moyens ( $\pm$  ET) des athlètes ayant réalisé leur podium exclusivement avant et des athlètes ayant réalisé leur podium exclusivement après la rupture du LCA en fonction du sexe.

Les skieurs hommes et femmes réalisant des podiums avant la rupture du LCA se blessent plus tard que les athlètes hommes et femmes qui décrochent des podiums après la rupture du LCA. Cela signifie qu'ils se blessent tard pour réaliser des podiums après leur blessure alors que ceux qui se blessent tôt ont encore le temps et les capacités physiques d'atteindre des podiums après une rupture du LCA.

Tous les résultats décrits précédemment font l'objet d'une description globale de la population des skieurs en Equipe de France de 1980 à 2013. Or, d'autres paramètres peuvent encore être analysés pour comprendre si une blessure telle que la rupture du LCA peut altérée ou modifiée le niveau de performance des athlètes. On peut en effet se demander comment se définit la performance des blessés par rapport aux non blessés : en termes de points FIS ? de classement mondial ? de podiums ? la durée de carrière est-elle affectée par ce type de blessure ? est-il possible de réaliser de meilleures performances après la reconstruction du LCA ? quelle est ou quelles sont les caractéristiques influençant un retour à une performance meilleure qu'avant la blessure ? Les études 1 et 2 présentées dans le chapitre suivant permettent de répondre à ces interrogations.

## **Chapitre 8 : Etudes réalisées**

## **Ethique**

Les études proposées dans la thèse présentée s'appuient sur des protocoles de recherche qualifiés de non-interventionnels, dans lesquels « ...tous les actes sont pratiqués de manière habituelle, sans aucune procédure supplémentaire ou inhabituelle de diagnostic ou de surveillance » (article L1121-1 du Code de Santé Publique). Conformément à la loi, leurs approbations ne tombent donc pas sous la responsabilité d'un Comité de protection des personnes (CPP). Aussi l'obtention d'un consentement éclairé de la part des athlètes évalués n'est pas nécessaire. L'ensemble des études réalisées dans cette thèse ont été suivies et validées par le comité scientifique de l'IRMES.

## ETUDE 1

# Retour à la performance des skieurs alpins après une rupture du ligament croisé antérieur entre 1980 et 2013

Amal Haïda<sup>1,2</sup>, Nicolas Coulmy<sup>3</sup>, Frédéric Dor<sup>1</sup>, Juliana Antero-Jacquemin<sup>1,5</sup>, Adrien Marck<sup>1</sup>, Thibaut Ledanois<sup>1</sup>, Claire Tourny-Chollet<sup>2</sup>, Adrien Sedeaud<sup>1</sup>, Marie-Philippe Rousseaux-Blanchi<sup>3</sup>, Pierre Chambat<sup>3</sup>, Jean-françois Toussaint<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup> IRMES (biomedical Research Institute of Sports Epidemiology, Paris, France), INSEP (Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance), Paris, France,

<sup>2</sup> Université de Rouen, Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique CETAPS (Centre d'Etude Transformations des Activités Physiques et Sportives), Mont-Saint-Aignan, France,

<sup>3</sup> French Ski Federation, Annecy, France,

<sup>4</sup> Paris Descartes University, Sorbonne, Paris Cité, Paris, France,

<sup>5</sup> Hôtel-Dieu Hospital, CIMS (Centre d'Investigations en Médecine du Sport), AP-HP (Assistance Publique-Hôpitaux de Paris), Paris, France

### Corresponding Author

Miss Amal HAIDA  
IRMES, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France  
Email : [amal.haida@insep.fr](mailto:amal.haida@insep.fr)  
Tel : 00.33.1.41.74.42.73  
Fax : 00.33.1.41.74.41.75



## **Résumé**

**Background:** Le retour à la performance après une rupture du Ligament Croisé Antérieur (LCA) est peu connu chez les skieurs alpins de haut niveau.

**Objectif:** Analyser l'influence de la rupture du LCA sur les performances et la carrière des skieurs de l'Equipe de France de ski alpin entre 1980 à 2013.

**Study Design:** Etude épidémiologique rétrospective transversale.

**Méthodes:** La population comprend les skieurs (n=239) et skieuses (n=238), ayant intégré au moins une saison l'Equipe de France de ski alpin entre 1980 et 2013 dans les épreuves de vitesse (descente et super-G) et les épreuves techniques (slalom géant et slalom). Deux groupes ont été constitués. Le groupe LCA incluant les athlètes ayant eu une rupture du LCA et le groupe NLCA comprenant les athlètes n'ayant jamais eu de rupture du LCA. Trois indicateurs de performance, ont été retenus : points FIS, classement international FIS et podiums (coupe du monde, championnats du monde et jeux olympiques).

**Résultats:** Les 1<sup>ers</sup> déciles des points FIS et des classements mondiaux ont montré que les skieurs du groupe LCA ont obtenu de meilleures performances que les skieurs du groupe NLCA. Les durées de carrière moyennes du groupe LCA (hommes :  $7,9 \pm 4,7$  ans ; femmes :  $7,1 \pm 4,1$  ans) sont plus longues que celles du groupe NLCA (hommes :  $4,5 \pm 3,3$  ans ; femmes :  $4,2 \pm 3,5$  ans). 12,8% (61/477) des skieurs ont eu au moins un podium au cours de leur carrière : 23,0% (34/148) dans le groupe LCA et 8,3% (27/329) dans le groupe NLCA. La moyenne d'âge à la rupture est de  $22,6 \pm 4,1$  ans pour les hommes et de  $19,9 \pm 3,5$  pour les femmes. Dans le groupe LCA, 55 podiums ont été réalisés avant et 176 après la rupture du LCA, toutes compétitions confondues. Les skieurs montrant une amélioration des performances post-rupture sont significativement plus jeunes (hommes :  $22,2 \pm 3,0$  ans ; femmes :  $18,7 \pm 2,2$  ans) ( $p$ -value < 0,0001) au moment de la blessure que ceux montrant une détérioration des performances post-rupture (hommes :  $25,3 \pm 4,2$  ans; femmes :  $22,4 \pm 4,0$  ans).

**Conclusion:** Les résultats principaux montrent qu'il est possible de retrouver un niveau pré-blessure voire un meilleur niveau après la rupture du LCA et que l'âge est l'élément principal qui guide la récupération post-chirurgicale.

**Key Terms :** Ski alpin, rupture du LCA, âge, retour à la performance.

## ***Introduction***

Le ski alpin est le sport d'hiver le plus populaire dans le monde et s'avère responsable de nombreux traumatismes (Pujol, Blanche, & Chambat, 2007). Des études récentes issues de données du Système de Surveillance de la Fédération Internationale de Ski (FIS) ont montré que le risque de blessure en ski alpin est élevé (Bere et al., 2011; T W Flørenes et al., 2009, 2011). Les membres inférieurs représentent la localisation la plus fréquemment touchée avec 58,1% des blessures. La partie du corps la plus touchée est le genou avec 35,6% des traumatismes dont 54,4% sont des blessures sévères engendrant une absence > 28 jours à l'entraînement et à la compétition (T W Flørenes et al., 2009). Cette traumatologie du genou est aussi fréquente chez les skieurs professionnels que chez les skieurs de loisirs et le diagnostic majoritaire est la rupture du ligament croisé antérieur (LCA) (T W Flørenes et al., 2009; Hunter, 1999).

Selon Florenes (T W Flørenes et al., 2009), les épreuves de vitesse sont plus traumatisantes que les épreuves technique avec respectivement des incidences de 17,2 et 4,9 blessures et 7,0 et 0,9 blessures au genou pour 1000 courses.

Le retour à la performance chez les skieurs de haut niveau n'a encore jamais été étudié en épidémiologie du sport. Après une rupture du LCA, les études publiées concernent le retour à la pratique sportive de la population générale active (Arden et al., 2011b; Eastlack et al., 1999; Heijne et al., 2008; Tjong et al., 2014). Les intentions de retour au sport, le niveau de participation (reprise ou non de la compétition) et les facteurs déterminants la reprise du sport post-rupture ont été analysés dans la littérature (Arden et al., 2011b; Tjong et al., 2014). Enfin, plusieurs études affirment que le retour au sport et la probabilité de retourner à son niveau de sport pré-blessure dépend plus de la personnalité du patient que de la reconstruction fonctionnelle du genou (Arden et al., 2012; Eastlack et al., 1999; Heijne et al., 2008).

Dans ce contexte, l'objet de cette étude épidémiologique rétrospective est d'analyser l'influence de la rupture du LCA sur les performances et la carrière des skieurs de l'équipe de France de ski alpin entre 1980 à 2013.

## ***Méthodes***

### ***Population et période d'étude***

La population étudiée comprend tous les athlètes, hommes (n=239) et femmes (n=238), ayant intégré l'Equipe de France de ski alpin au moins une saison complète entre 1980 et 2013, dans toutes les épreuves: descente et super-G (épreuves de vitesse), slalom-Géant et slalom spécial (épreuves technique). Les skieurs sont répartis en deux groupes selon la survenue ou non d'une rupture du LCA. Ainsi, un premier groupe (groupe LCA) inclut les athlètes ayant subi une (ou plusieurs) rupture(s) du LCA. Le deuxième groupe (groupe NLCA) rassemble les athlètes n'ayant jamais eu de rupture du LCA au cours de leur carrière. Les skieurs ont tous une discipline de prédilection (vitesse, technique ou polyvalent). Aucune autre blessure n'est considérée dans cette étude.

### ***Compétitions***

Seules les compétitions de niveau mondial ont été retenues. La Coupe du monde a lieu chaque année et détermine au final le skieur le plus régulier sur environ 14 événements organisés pour chaque épreuve. Les Championnats du monde se déroulent tous les 2 ans et les Jeux Olympiques tous les 4 ans couronnent leurs vainqueurs sur une seule course dans chacune des épreuves.

### ***Données recueillies***

#### ***Caractéristiques des skieurs***

Les bases de données de la Fédération Française de Ski (FFS) ont permis de recueillir les informations suivantes : nom, prénom, sexe, année de naissance, années d'entrée et de sortie en Equipe de France, survenue ou non d'une rupture du LCA, date de cette survenue.

#### ***Indicateurs de performance***

Plusieurs indicateurs de performance ont été sélectionnés

- Points FIS

Le meilleur point FIS annuel de chaque skieur, pour chacune des épreuves et pour chacune des saisons a été collecté sur le site de la Fédération Internationale de Ski (International Ski Federation website, s. d.). Ce site répertorie les performances à partir de 1995. Le calcul du

point FIS est établi après chaque course : il représente la somme du point obtenu lors de la course du jour et d'un coefficient dit de « pénalité » obtenu à partir des courses précédentes. Plus les points FIS sont proches de zéro, plus l'athlète est performant. Cette cotation en points FIS ne débute que pour des skieurs à partir de 15 ans (niveau cadet) participant aux compétitions internationales.

L'âge à la rupture du LCA des skieurs qui ont amélioré ou détérioré leurs performances post-rupture est calculé pour le meilleur point FIS par athlète avant et après la blessure.

- Classement international FIS

Pour chaque skieur, pour chaque épreuve et chacune des saisons, le meilleur classement FIS a été retenue comme valeur de référence, collecté à partir du site de la FIS (International Ski Federation website, s. d.).

- Podiums

Tous les podiums des Coupes du Monde, Championnats du Monde et Jeux olympiques ont été collectés sur le site de la FIS (International Ski Federation website, s. d.) de 1980 à 2013.

### ***Analyses statistiques***

Une régression linéaire a été réalisée pour décrire l'évolution de l'incidence des ruptures du LCA ( $i = \text{nombre de rupture du LCA} / \text{nombre de skieurs-année}$ ) de 1980 à 2013. La distribution des performances (points FIS et classement mondiaux FIS) est établie en décile. Le 1<sup>er</sup> décile est décrit en fonction des groupes LCA et NLCA, du sexe et des épreuves. Concernant l'âge au pic de performance du top 10 français des skieurs, on a modélisé le classement en fonction de l'âge. La moyenne du meilleur classement par âge est fitté par une fonction polynomiale du 2<sup>nd</sup> degré. Un test de Student a été utilisé pour comparer les moyennes des durées de carrière des groupes LCA et NLCA dans chaque épreuve et pour comparer les moyennes d'âge des skieurs qui améliorent et qui détériorent leurs performances post-rupture. Le seuil de significativité a été fixé à  $p\text{-value} < 0,05$ .

## Résultats

### Population

De la saison 1980-1981 à la saison 2012-2013, 477 skieurs et skieuses ont intégré l'équipe de France. Parmi eux, 148 skieurs (67 hommes et 81 femmes) ont subi une rupture du LCA (71 en épreuve de vitesse, 76 en épreuve technique et 1 polyvalent) et 329 (172 hommes et 157 femmes) n'en ont pas eu au cours de leur carrière (164 en épreuve de vitesse, 157 en épreuve technique et 8 polyvalents).

### Incidence

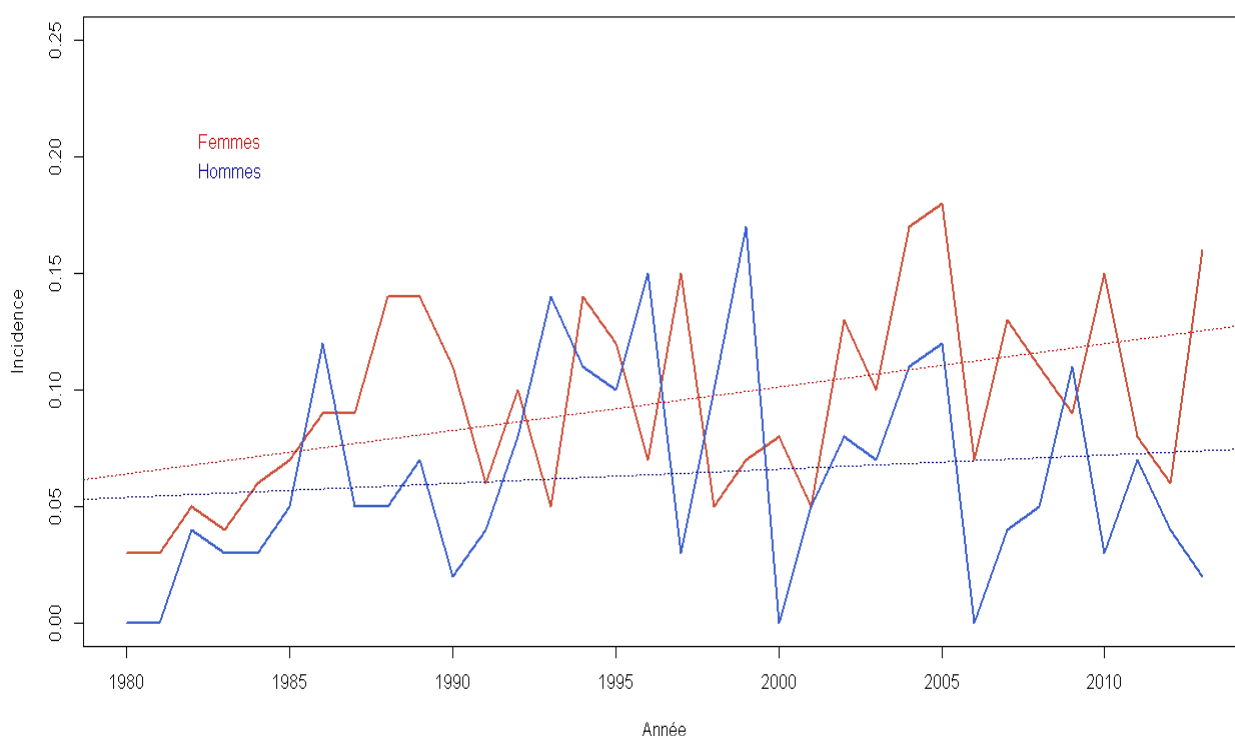


Figure 1. Incidence ( $i$ =nombre de rupture du LCA/nombre de skieurs-année) de 1980 à 2013

L'incidence entre le nombre de rupture du LCA et le nombre de skieurs-année est de 0,08 (0,06 pour les hommes,  $r^2=0,22$  ; 0,09 pour les femmes,  $r^2=0,27$ ) de 1980 à 2013 (Figure 24).

Cette incidence augmente significativement au cours de la période d'observation pour les femmes ( $p$ -value < 0,05) mais pas pour les hommes ( $p$ -value > 0,05).

### Durée de carrière

**Tableau 1.** Durées de carrière moyennes ( $\pm$  écart-type) des groupe LCA et NLCA par sexe et par épreuve

Epreuves	Groupe LCA	Groupe NLCA	P Value
Technique Hommes	7,0 $\pm$ 4,5	4,9 $\pm$ 3,5	< 0,01
Vitesse Hommes	8,8 $\pm$ 4,8	4,2 $\pm$ 3,2	< 0,001
Total	7,9 $\pm$ 4,7	4,5 $\pm$ 3,3	< 0,001
Technique Femmes	7,3 $\pm$ 4,1	4,4 $\pm$ 3,7	< 0,001
Vitesse Femmes	6,9 $\pm$ 4,2	4,2 $\pm$ 3,3	< 0,001
Total	7,1 $\pm$ 4,1	4,2 $\pm$ 3,5	< 0,001

De 1980 à 2013, la durée de carrière moyenne des athlètes du groupe LCA est significativement plus longue que celle des athlètes du groupe NLCA. Cette différence est notée chez les 2 sexes, dans les épreuves techniques et dans les épreuves de vitesse. Dans les 2 groupes, les femmes débutent et terminent leur carrière en Equipe de France significativement plus tôt que les hommes ( $p$ -value < 0,01). La différence entre les hommes et les femmes n'est pas significative ( $p$ -value > 0,05).

### Age à la rupture

L'âge moyen à la 1<sup>ère</sup> rupture du LCA est à 21,1  $\pm$  4,0 ans. Les femmes se blessent significativement plus tôt avec un âge moyen de 19,9  $\pm$  3,5 ans comparativement aux hommes qui se blessent à 22,6  $\pm$  4,1 ans ( $p$ -value < 0,0001).

### Performances des groupes LCA et NLCA

#### Podiums

Sur les 477 skieurs et skieuses alpins français, 61 (12,8%) ont eu au moins un podium aux JO et/ou aux Championnats du Monde et/ou en Coupe du Monde au cours de leur carrière. Sur les 148 athlètes du groupe LCA, 34 (23,0%) ont réalisé au moins un podium et sur les 329 athlètes du groupe NLCA, 27 (8,3%) ont décroché au moins un podium dans leur carrière.

#### Points FIS et Classement mondial FIS

L'analyse du 1<sup>er</sup> décile des performances porte sur les skieurs et skieuses présents dans tous les classements depuis 1995. Le classement international moyen dans le 1<sup>er</sup> décile des skieurs en Equipe de France, tous sexes et toutes épreuves confondues, progresse de la 1<sup>ère</sup>

à la 26<sup>ème</sup> place et de 0 à 8,11 points FIS. Le classement et le nombre de points FIS sont meilleurs chez les hommes que chez les femmes quelle que soit l'épreuve.

Dans les épreuves de vitesse comme dans les épreuves techniques, les athlètes du groupe LCA ont de meilleurs classements et de meilleurs points FIS que les athlètes du groupe NLCA (Tableau 2). Concernant le 1<sup>er</sup> décile des épreuves techniques, dans le groupe LCA, les hommes ont de meilleurs classements et points FIS que les femmes (respectivement, 9,7<sup>ème</sup> place et 4,09 points FIS vs. 15,5<sup>ème</sup> place et 5,75 points FIS). Cette tendance est la même pour le groupe NLCA (Hommes : 33<sup>ème</sup> place et 7,58 points FIS vs. Femmes : 51,8<sup>ème</sup> place et 12,61 points FIS). L'âge au pic de performance du top 10 français est à 25,1 ans pour les hommes et à 25,3 ans pour les femmes.

**Tableau 2.** Description du classement mondial FIS et des points FIS en fonction du sexe, de l'épreuve et des groupes LCA et NLCA.

Indicateur de performance	Classement mondial FIS		Points FIS	
	Homme	Femme	Homme	Femme
<b>Sexe</b>				
<b>1<sup>er</sup> décile vitesse (LCA)</b>	15,6	21,4	5,03	9,22
<b>1<sup>er</sup> décile vitesse (NLCA)</b>	37,9	42,1	10,9	14,62
<b>1<sup>er</sup> décile technique (LCA)</b>	9,7	15,5	4,09	5,75
<b>1<sup>er</sup> décile technique (NLCA)</b>	33	51,8	7,58	12,61

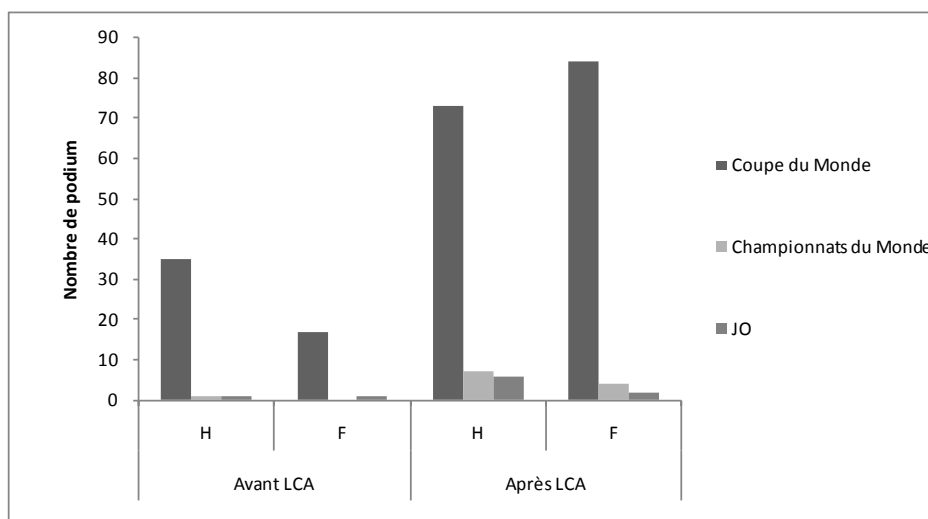
## Retour à la performance après rupture du LCA

### *Podiums*

Dans le groupe LCA, 34 athlètes ont réalisé au moins un podium au cours de leur carrière. Au total, 55 podiums sont réalisés avant et 176 après la rupture du LCA. Dans toutes les compétitions confondues, les hommes ont fait 37 podiums avant contre 86 après la rupture du LCA et chez les femmes, 18 podiums sont réalisés avant contre 90 après.

En Coupe du Monde, on note 52 podiums avant et 157 après la survenue de l'accident. En Championnats du Monde, 1 podium est réalisé avant contre 11 après et aux JO, 2 podiums sont décrochés avant contre 8 après la rupture du LCA (Figure 2).

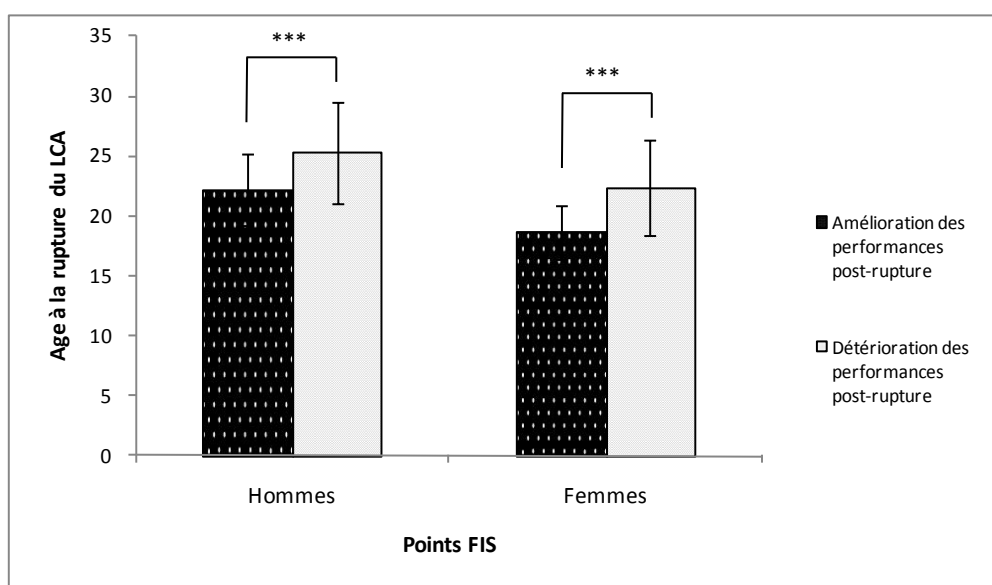




**Figure 2.** Nombre de podiums avant et après la rupture du LCA, du sexe et du type de compétition.

### Points FIS et classement mondial FIS

Les skieurs et skieuses qui parviennent à améliorer leurs performances après le LCA sont significativement ( $p\text{-value} < 0,0001$ ) plus jeunes au moment de la rupture (hommes :  $22,2 \pm 3,0$  ans ; femmes :  $18,7 \pm 2,2$  ans) que celles et ceux qui ont de moins bonnes performances après cette blessure (hommes :  $25,3 \pm 4,2$  ans; femmes :  $22,4 \pm 4,0$  ans) (Figure 3).



**Figure 3.** Age au moment de la rupture du LCA en fonction de l'amélioration et de la détérioration des performances post-rupture chez les hommes et les femmes ( $***p\text{-value} < 0,0001$ ). Les skieurs ayant amélioré leurs performances post-rupture se sont blessés plus tôt que les skieurs qui n'ont pas réussi à améliorer leurs performances post-rupture.

De même, au niveau du classement mondial FIS, les skieurs hommes dont le classement post-rupture s'améliore sont plus jeunes au moment de la survenue de la blessure ( $22,0 \pm 3,0$  ans) que ceux dont le classement post-rupture se détériore ( $25,7 \pm 4,0$  ans) ( $p\text{-value} < 0,0001$ ). On note la même tendance chez les femmes concernant le classement mondial FIS avec un âge moyen à la rupture du LCA de  $18,8 \pm 2,3$  ans pour les skieuses qui améliorent leur classement après la blessure et de  $22,1 \pm 4,0$  ans pour celles qui ont un classement moins bon de retour après la blessure ( $p\text{-value} < 0,0001$ ).

Pour les skieurs qui s'améliorent, la meilleure performance est obtenue en moyenne  $3,8 \pm 3,1$  ans après pour les hommes et  $3,1 \pm 2,5$  ans après pour les femmes.

## ***Discussion***

Cette étude est la première à analyser l'impact de la rupture du LCA sur le retour à la performance. Les résultats principaux montrent qu'il est possible de retrouver un niveau de performance meilleur que celui d'avant la rupture du LCA. Ce niveau dépend de l'âge auquel elle survient.

### *Rupture du LCA et niveau de performance*

Dans la présente étude, les skieurs et skieuses ayant connu une rupture du LCA ont de meilleurs classements mondiaux que les skieurs n'ayant pas eu ce type de blessure au cours de leur carrière. A leur meilleur niveau, les skieurs du groupe LCA ont plus de podiums et de meilleurs points FIS que les skieurs du groupe NLCA. Ces résultats confirment ceux publiés par Pujol et al (2007) qui rapportent que l'incidence de la rupture du LCA était liée au niveau de performance avec un taux de rupture du LCA plus important dans le top 30 mondial (Pujol et al., 2007). Une hypothèse expliquant un niveau meilleur chez les athlètes ayant connu une rupture du LCA est le temps de récupération après la blessure. Durant la période de la reconstruction du LCA, les skieurs arrêtent tous les entraînements intensifs et toutes les compétitions mais restent soumis à une récupération active. Cette récupération améliore les paramètres physiques et physiologiques des athlètes permettant ainsi l'optimisation du retour au niveau de performance après un arrêt de pratique sportive de haute intensité (Greenwood, Moses, Bernardino, Gaesser, & Weltman, 2008; Heyman, DE Geus, Mertens, & Meeusen, 2009). La qualité psychologique des athlètes est un déterminant qui permet de faire face aux exigences de l'environnement. Une étude a rapporté que les athlètes des sports à haut risque (dont le ski alpin) ont une plus faible prévalence de troubles d'anxiété-dépression que les athlètes des sports à faible risque (Schaal et al., 2011). Il a été démontré que les individus les plus en recherche de sensations sont les plus exposés aux accidents (pente neigeuse, masse d'air...) (Lafollie, 2007). La prise de risque, surtout chez les skieurs de descente est un facteur de risque important de la blessure (Lex M. Bouter et al., 1988). Les skieurs de haut niveau ont un score de « Thrill and Adventure Seeking » (défini par un désir de s'engager dans des activités et des sports à risque et d'aventure offrant des sensations inhabituelles) sur l'échelle de Zuckerman (Zuckerman, 1983) plus élevé comparés à la

population générale. Il est aussi rapporté que ce score est plus important chez les skieurs ayant eu une blessure par rapport aux skieurs n'en ayant jamais connu (Lex M. Bouter et al., 1988). Les athlètes qui ont subi un taux de blessures important ont rapporté avoir des préférences pour les environnements stimulants et la recherche de sensations fortes (Osborn et al., 2009).

### *Retour à la performance et âge*

Les résultats de notre étude montrent que les skieurs ayant subi une rupture du LCA parviennent à décrocher des podiums (figure 2) post-rupture mais cela dépend de l'âge à la blessure. Les skieurs et skieuses qui parviennent à améliorer leurs performances (points FIS et classement mondial FIS) après la rupture du LCA se blessent significativement plus jeunes que celles et ceux qui ont de moins bonnes performances post-rupture. Les femmes subissent une rupture du LCA à l'âge moyen de  $19,9 \pm 3,5$  ans, 3,1 ans après leur entrée en Equipe de France. Les hommes se blessent à l'âge moyen de  $22,6 \pm 4,1$  ans, 4,7 ans après leur début en Equipe de France. L'âge est un point crucial en termes de retour à la performance en raison de la relation établie entre ces deux facteurs (A. B. Baker & Tang, 2010; Moore, 1975). Elle se caractérise par une première phase de progression reflétant le développement des capacités physiques, une deuxième phase correspondant aux performances optimales incluant le pic de performance, et une troisième phase de régression au cours de laquelle les performances diminuent. Berthelot et al. (2012) ont démontré que l'âge au pic de performance des meilleurs mondiaux était de 26,0 ans en athlétisme et de 21,0 ans en natation (Berthelot et al., 2012). Celui du Top 10 mondial des joueuses et joueurs de Tennis est respectivement de 21,5 ans et 24,1 ans (Guillaume et al., 2011). Concernant notre population, l'âge au pic de performance du Top 10 français est à 25,1 ans chez les hommes et 25,3 chez les femmes. Les skieurs et skieuses qui ont amélioré leurs performances après rupture du LCA étaient jeunes n'avaient pas encore atteint l'âge du pic de performance. Ceci explique leur plus grande probabilité d'obtenir de meilleures performances après cette blessure. Chez les hommes qui parviennent à obtenir de meilleurs points FIS après la blessure ont connu la rupture du LCA à  $22,2 \pm 3,0$  ans en moyenne. Chez les femmes, les skieuses ayant amélioré leurs performances (points FIS) se sont rompu le LCA à  $18,7 \pm 2,2$  ans en moyenne. A l'inverse, les skieurs qui ne parviennent pas à retrouver

le niveau de performances d'avant blessure ont connu une rupture du LCA plus tardive diminuant ainsi les probabilités d'atteindre des performances optimales.

### *Rupture du LCA par sexe et par épreuve*

Après le basketball, le ski est le sport le plus à risque pour les femmes concernant la rupture du LCA (Wojtys et al., 1998). Le ratio femmes/hommes des incidences de rupture du LCA en Equipe de France est de 1,3. Les femmes ont donc un risque 30% plus élevé de rupture du LCA que les hommes. Nombreuses sont les études rapportant une différence des taux de blessures au genou entre les hommes et les femmes. Chez les skieuses de loisirs comme chez les skieuses de compétition, l'incidence de la blessure au genou est 2 fois plus importante par rapport aux skieurs et le risque de rupture du LCA est 3 fois plus élevé chez les skieuses (Martin Burtscher et al., 2008; Robert J. Johnson et al., 2000; Stevenson et al., 1998). Les raisons expliquant cette différence homme-femme sont liées d'une part à des facteurs extrinsèques comme le conditionnement physique et la force musculaire (Huston & Wojtys, 1996; Viola, Steadman, Mair, Briggs, & Sterett, 1999) et d'autre part à des facteurs intrinsèques tels que la largeur du bassin, la rotation tibiale, la laxité ligamentaire ou encore les effets des hormones, en particulier de l'œstrogène chez la femme (Hutchinson & Ireland, 1995; Lund-Hanssen et al., 1994; Viola et al., 1999). Si Florenes et ses collaborateurs rapportent que les blessures au genou s'élèvent avec l'augmentation de la vitesse (environ 50% des blessures au genou en descente contre 6% en slalom spécial) (T W Flørenes et al., 2009), il n'existe pas de différence du taux de survenue de ruptures du LCA entre les épreuves techniques et les épreuves de vitesse chez les skieurs français alpins de haut niveau. Chez les hommes, les incidences entre le nombre de ruptures du LCA et le nombre de skieurs-année en épreuves techniques et en épreuves de vitesse sont identiques ( $i_{\text{technique}} = i_{\text{vitesse}} = 3\%$ ). Chez les femmes, on constate une incidence un peu plus élevée dans les épreuves de vitesse ( $i_{\text{vitesse}} = 5\%$ ) par rapport aux épreuves technique ( $i_{\text{technique}} = 4\%$ ). Ce résultat montre qu'il existe une vitesse maximale intrinsèque de la discipline (tant dans les épreuves techniques que dans les épreuves de vitesse) conduisant les skieurs à être régulièrement à la limite s'ils veulent être au top niveau mondial. Il faut noter que les incidences de blessures au genou rapporté par Florenes et ses collaborateurs incluent tous types de blessures et non seulement les ruptures du LCA (T W Flørenes et al., 2009).

### *Durée de carrière*

De 1980 à 2013, la durée de carrière des skieurs alpins français est différente en fonction des groupes LCA et NLCA. En effet, la durée de carrière moyenne des skieurs du groupe LCA est plus longue que celle des skieurs du groupe NLCA. La même tendance est notée chez les femmes avec une durée de carrière plus longue pour les skieuses du groupe LCA par rapport à celles du groupe NLCA. Ces résultats confirment ceux rapportés par Pujol et al. (2007) qui montrent que la durée de carrière des skieurs ayant eu une rupture du LCA est nettement plus longue que celle des skieurs qui n'ont pas subi cette blessure (Pujol et al., 2007). Ce résultat pourrait, en partie, s'expliquer par le temps nécessaire à la récupération et la reconstruction du LCA des skieurs blessés allongeant ainsi leur durée de carrière en équipe de France. Après le temps d'arrêt, les entraîneurs mettent en place une régulation nécessaire du volume et de la charge d'entraînement de retour après la blessure. On note dans notre cohorte une durée de carrière encore plus importante ( $9,1 \text{ ans} \pm 4,6 \text{ ans}$ ) chez les skieurs ayant eu plusieurs ruptures du LCA par rapport à ceux n'en ayant connu qu'une seule ( $7,2 \pm 4,5 \text{ ans}$ ). La gestion de carrière aujourd'hui, et donc sa durée, demande de considérer ces récurrences notamment en raison de l'association de l'âge avec la 2<sup>ème</sup> rupture (Webster, Feller, Leigh, & Richmond, 2014).

### *Rupture du LCA et retour à la pratique sportive*

D'autres paramètres ont été évalués après la reconstruction du LCA telles que les intentions de reprendre le même sport, à un même niveau, de pratiquer un autre sport que celui d'avant la blessure ou au contraire d'abandonner la pratique sportive (Arden et al., 2012; Heijne et al., 2008). De plus, les facteurs qui influencent le retour post-opératoire après la rupture du LCA ont eux aussi été étudiés (Arden et al., 2011b; Tjong et al., 2014). La mesure fonctionnelle du genou est aussi prise en compte. Dans l'étude d'Arden et al (2012) (Arden et al., 2012), ces paramètres ont été mesurés dans plusieurs sports : football, football Australien, netball et basketball. Quarante cinq pourcent ont repris le sport au même degré de participation que celui d'avant blessure et 29% ont repris la compétition. Dans une autre étude, Arden et al. (2011) (Arden et al., 2011b) ont montré que 67% ne sont pas retournés au sport de compétition et seul 33% ont tenté de reprendre la compétition 12 mois après l'opération du LCA. Nos résultats montrent que le délai des skieurs pour atteindre de

meilleures performances post-rupture est en moyenne de 3,8 ans pour les hommes et de 3,1 ans pour les femmes. Les skieurs des épreuves de vitesse reviennent plus rapidement que les skieurs des épreuves techniques (respectivement, hommes : 3,6 vs 4,1 ans ; femmes : 2,9 vs 3,3 ans). L'étude qualitative de Tjong et al. (2014) (Tjong et al., 2014) analyse le taux de retour à la pratique sportive et les facteurs qui affectent la reprise du sport après la reconstruction du LCA. Ils démontrent que 64% des patients ne sont pas retournés à leur niveau de participation pré-blessure et seulement 36% y sont retournés. De plus, il n'existe pas de lien entre la récupération fonctionnelle du genou et le taux de retour à un niveau de participation ou de compétition pré-rupture du LCA (Ardern et al., 2012, 2011b). Enfin, quelle que soit la pratique sportive, les hommes ne sont pas plus susceptibles de la reprendre après un LCA que les femmes (Ardern et al., 2012).

### **Considérations méthodologiques**

C'est une étude exhaustive car elle prend en compte la totalité des skieurs français depuis 1980. Elle représente la première étude épidémiologique qui utilise les points FIS, le classement mondial FIS et les podiums pour analyser l'influence de la rupture du LCA dans le ski alpin de haut niveau. Le point FIS, indicateur de performance principal de l'étude, est régulier et homogène depuis 1995. Cependant, les skieurs peuvent avoir subi d'autres types de blessures au cours de leur carrière autre que la rupture du LCA. Les 4 disciplines ont été catégorisées par épreuves de vitesse (descente et super-G) et épreuves techniques (slalom-géant et slalom) afin d'augmenter le nombre des échantillons. Enfin, nous n'avons pas les performances (points FIS et classement FIS) avant 1995 (analyse réalisée pour n= 317 athlètes) contrairement aux podiums qui sont répertoriés depuis 1980 (analyse réalisée pour l'ensemble des athlètes de l'Equipe de France, n=477).

### **Conclusion**

Les skieurs alpins sont capables de réaliser de meilleurs points FIS, de meilleurs classements mondiaux et plus de podiums après une rupture du LCA. Les skieurs ayant connu la rupture du LCA ont obtenu de meilleures performances par rapport à leurs homologues sans cette blessure. Le moment de la rupture du LCA au cours de la carrière détermine le retour à la performance.

### **Acknowledgment**

Nous remercions l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP), le Ministère des Droits des Femmes de la ville, de la jeunesse et des Sports la Fédération Française de Ski et l'ED 556 HSRT de Rouen pour leur intérêt dans ce travail. Nous remercions aussi le professeur d'anglais Emilie Janton pour sa lecture critique.

### **Conflit d'intérêt**

Aucun



### ***Lien entre l'étude 1 et l'étude 2 :***

Le premier article est une étude épidémiologique transversale. Elle évalue les meilleures performances (1<sup>er</sup> décile) des skieurs alpins français de haut niveau avec et sans rupture du LCA. Elle permet aussi de déterminer si l'âge à la blessure a une influence sur le retour à la performance et de comparer les durées de carrière des skieurs ayant subi une rupture du LCA à ceux n'en ayant jamais connu.

Dans la continuité, nous avons réalisé une analyse longitudinale des performances des skieurs alpins français de haut niveau de 1980 à 2013 et jugé l'impact d'une rupture du LCA sur l'ensemble de leur carrière.

## ETUDE 2

### **Impact de la rupture du LCA sur l'évolution des performances dans l'ensemble de la carrière des skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013**

Amal Haïda<sup>1, 2</sup>, Nicolas Coulmy<sup>3</sup>, Eric Matzner<sup>4</sup>, Guillaume Saulière<sup>1</sup>, Adrien Marck<sup>1</sup>, Claire Tourny-Chollet<sup>2</sup>, Marie-Philippe Rousseaux-Blanchi<sup>3</sup>, Pierre Chambat<sup>3</sup>, Jean-françois Toussaint<sup>1, 4, 5</sup>

<sup>1</sup> IRMES (biomedical Research Institute of Sports Epidemiology, Paris, France), INSEP (Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance), Paris, France,

<sup>2</sup> Université de Rouen, Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique CETAPS (Centre d'Etude Transformations des Activités Physiques et Sportives), Mont-Saint-Aignan, France,

<sup>3</sup> French Ski Federation, Annecy, France,

<sup>4</sup> Université de Rennes 2, France,

<sup>5</sup> Paris Descartes University, Sorbonne, Paris Cité, Paris, France,

<sup>6</sup> Hôtel-Dieu Hospital, CIMS (Centre d'Investigations en Médecine du Sport), AP-HP (Assistance Publique-Hôpitaux de Paris), Paris, France

#### **Corresponding Author**

Miss Amal HAIDA

IRMES, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

Email : [amal.haida@insep.fr](mailto:amal.haida@insep.fr)

Tel : 00.33.1.41.74.42.73

Fax : 00.33.1.41.74.41.75

## **Résumé**

**Objectifs :** Analyser l'évolution des performances sur l'ensemble de la carrière des skieurs alpins français de haut niveau de 1980 à 2013 et évaluer l'impact d'une rupture éventuelle du LCA sur les performances.

**Study design :** Etude épidémiologique longitudinale

**Méthodes :** La population étudiée comprend 142 skieurs et 133 skieuses ayant intégré l'Equipe de France de ski alpin au moins une saison complète entre 1980 et 2013 dans les 4 disciplines (descente, super-G, slalom-géant, slalom). Les skieurs sont répartis en deux groupes selon la survenue ou non d'une rupture du LCA (Hommes : 49 avec rupture du LCA et 93 sans rupture ; femmes : 55 avec rupture du LCA et 78 sans rupture). Un premier groupe inclut les athlètes ayant subi une (ou plusieurs) rupture(s) du LCA : groupe LCA. Le deuxième groupe rassemble les athlètes n'ayant jamais eu de rupture du LCA au cours de leur carrière : groupe NLCA. *Critères d'exclusion :* Pour une analyse correcte de l'évolution des performances, les skieurs et skieuses ayant une durée de carrière inférieure à 3 ans ont été exclus. L'analyse des performances est réalisée par la mesure des points FIS.

### *Analyses statistiques*

L'analyse des performances des skieurs alpins est réalisée sous le logiciel R par âge, par sexe, par discipline, dans les groupes LCA et NLCA. L'évolution des points FIS par rapport à l'âge est étudiée par l'intermédiaire de 2 outils. Le premier représente l'évolution des performances par carrière avec l'évolution des performances moyenne pour l'ensemble des skieurs alpins dans les 4 disciplines: « dynamique de carrières ». Le deuxième représente la performance en fonction de l'âge par des box plots. Pour tester la différence des performances entre les groupes LCA et NLCA, un modèle mixte à effet aléatoire a été utilisé.

**Résultats :** Dans toutes les disciplines, il existe une variabilité importante des trajectoires de carrières. L'évolution moyenne des performances du groupe LCA est significativement meilleure que celle du groupe NLCA ( $p < 0,05$ ) dans les disciplines de vitesse (DH et SG). Elle est comparable dans les autres disciplines, chez les hommes et les femmes ( $p < 0,05$ ). La part des skieurs blessés augmente avec le niveau de performance (Hommes : 90% de LCA dans le

Top 10 vs. 26% dans Top 100 ; Femmes : 70% de LCA dans le Top 30 vs. 50% dans le Top 50 et 26% dans Top 100).

**Conclusion :** La rupture du LCA n'influence pas de manière négative l'évolution des performances chez les skieurs alpins français de haut niveau au cours de leur carrière. De plus, la fréquence **de la rupture** du LCA est corrélée avec le niveau de performance.

## ***Introduction***

Le retour à la performance est peu étudié dans le sport de haut niveau. La probabilité de retour à la pratique sportive est une problématique que soulèvent plusieurs études épidémiologiques dans le sport de loisir (Ardern et al., 2011b; Eastlack et al., 1999; Heijne et al., 2008; Tjong et al., 2014). Dans le football professionnel, Engström et al (1990) ont montré que seule une minorité des joueurs ayant subi une rupture du LCA retournent à un même niveau de compétition au cours de la même année (Engström, Forssblad, Johansson, & Tornkvist, 1990). Dans une autre étude, Roos et ses collaborateurs ont rapporté que ¼ des joueurs ont retrouvé le même niveau professionnel. De plus, 7 ans après la survenue de la blessure, ils ont constaté un **taux d'abandon** 2 fois plus important chez les footballeurs ayant connu cette blessure par rapport à ceux n'en ayant jamais subi au cours de leur carrière (Roos et al., 1995).

L'impact de la rupture du LCA sur la vitesse et la qualité du retour à la pratique sportive a été analysé dans le sport de loisir mais peu dans le sport élite. En revanche, l'impact de cet accident sur l'évolution de carrière dans le sport de haut niveau est mal connu dans le ski alpin. Pour cela, une analyse complémentaire à celle de notre premier article (ETUDE 1) a été réalisée pour étudier l'influence de la rupture du LCA sur l'évolution des performances tout au long de la carrière des membres de l'équipe de France.

**Objectifs** : Analyser l'évolution des performances sur l'ensemble de la carrière des skieurs alpins français de haut niveau de 1980 à 2013. Evaluer l'impact d'une rupture éventuelle du LCA sur les performances.

## ***Méthodes***

### ***Population étudiée***

La population étudiée comprend 142 skieurs (49 avec rupture du LCA et 93 sans rupture) et 133 skieuses (55 avec rupture du LCA et 78 sans rupture), ayant intégré l'Equipe de France de ski alpin au moins une saison complète entre 1980 et 2013. Les skieurs sont répartis en deux groupes selon la survenue ou non d'une rupture du LCA. Ainsi, un premier groupe inclut les athlètes ayant subi une (ou plusieurs) rupture(s) du LCA : groupe LCA. Le deuxième groupe rassemble les athlètes n'ayant jamais eu de rupture du LCA au cours de leur carrière : groupe NLCA.

*Critères d'exclusion* : Afin d'obtenir une évolution des performances représentative, les skieurs et skieuses ayant une durée de carrière inférieure à 3 ans ont été exclus.

### ***Compétitions***

Seules les compétitions de niveau mondial ont été retenues. La Coupe du monde a lieu chaque année et détermine au final le skieur le plus régulier sur environ 14 événements organisés pour chaque épreuve. Les Championnats du monde se déroulent tous les 2 ans et les Jeux Olympiques tous les 4 ans couronnent leurs vainqueurs sur une seule course dans chacune des épreuves. Les points FIS sont obtenus sur l'ensemble de ces épreuves.

### ***Collecte des données***

Les bases de données de la Fédération Française de Ski (FFS) ont permis de recueillir les informations suivantes : nom, prénom, sexe, année de naissance, années d'entrée et de sortie en Equipe de France, survenue ou non d'une rupture du LCA, date de cette survenue.

### ***Indicateurs de performance : Points FIS***

Le meilleur point FIS annuel de chaque skieur, pour chacune des épreuves et pour chacune des saisons a été collecté sur le site de la Fédération Internationale de Ski (International Ski Federation website, s. d.). Ce site répertorie les performances à partir de 1995. Le calcul du point FIS est établi après chaque course : il représente la somme du point obtenu lors de la course du jour et d'un coefficient dit de « pénalité » obtenu à partir des courses précédentes. Plus les points FIS sont proches de zéro, plus l'athlète est performant. Cette

cotation en points FIS ne débute que pour des skieurs à partir de 15 ans (niveau cadet) participant aux compétitions internationales.

### *Analyses statistiques*

L'analyse des performances des skieurs alpins est réalisée sous le logiciel R par âge, par sexe, et par discipline, dans les groupes LCA et NLCA. L'évolution des points FIS par rapport à l'âge est étudiée par l'intermédiaire de 2 outils. Le premier représente l'évolution des performances durant toute la carrière des skieurs alpins dans les 4 disciplines chez les hommes et les femmes dans les groupes LCA (courbe noire) et NLCA (courbe rouge). Les points noirs précisent l'âge au moment de la rupture du LCA. Nous avons appelé cette première approche « dynamique de carrières ». Dans cette représentation, la courbe moyenne des points FIS du groupe LCA (courbe noire en gras) et du groupe NLCA (courbe rouge en gras) est indiquée pour les 4 disciplines, chez les hommes et les femmes. La deuxième approche représente les points FIS en fonction de l'âge par des box plots. Les boîtes rouges caractérisent les skieurs sans rupture du LCA et les grises caractérisent les skieurs avec rupture du LCA. Les box plots représentent la médiane, les 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartiles, les observations minimales et maximales avec 1,5 x l'écart interquartile.

Un modèle mixte à mesures répétées a été utilisé pour comparer les performances moyennes par âge entre les groupes LCA et NLCA. Le modèle inclut la variable à expliquer : « performane », les effets fixes : « rupture du LCA ou pas de rupture et âge » et l'effet aléatoire : « skieur ». L'équation du modèle est la suivante :

$$Y_{i,j,k} = \mu + \alpha_i + \beta_j + c_{ik} + e_{ijk}$$

Avec  $Y$  = variable à expliquer « performance »,  $\alpha$  = effet fixe « rupture du LCA ou pas de rupture »,  $\beta$  = effet fixe « âge » et  $c$  = effet aléatoire « skieur ».

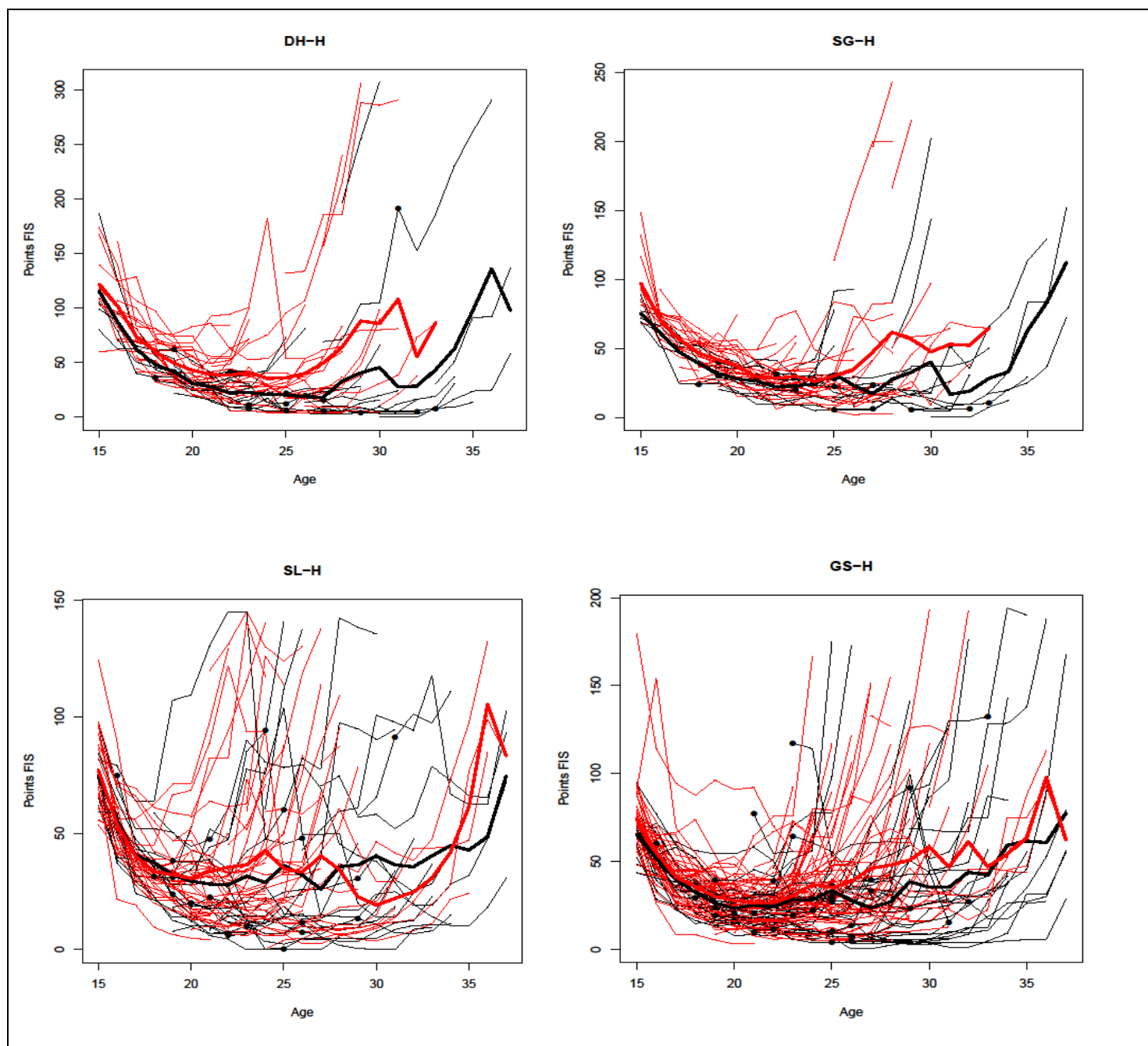
Ce test est réalisé pour comparer l'évolution moyenne des performances entre 15 et 30 ans (nombre de performances dans le groupe LCA, hommes: DH=410, SG=428, SL=410, GS=428 ; femmes : DH=435, SG=473, SL=469, GS=456 ; nombre de performances dans le groupe NLCA, hommes : DH=757, SG=771, SL=782, GS=788, femmes : DH=559, SG=585, SL=576, GS=581).

Au-delà, peu de performances sont enregistrées (nombre de performances dans le groupe LCA, hommes: DH=99, SG=109, SL=108, GS=96 ; femmes : DH=34, SG=34, SL=34, GS=34 ; nombre de performances dans le groupe NLCA, hommes : DH=33, SG=43, SL=36, GS=43, femmes : DH=8, SG=9, SL=8, GS=9).

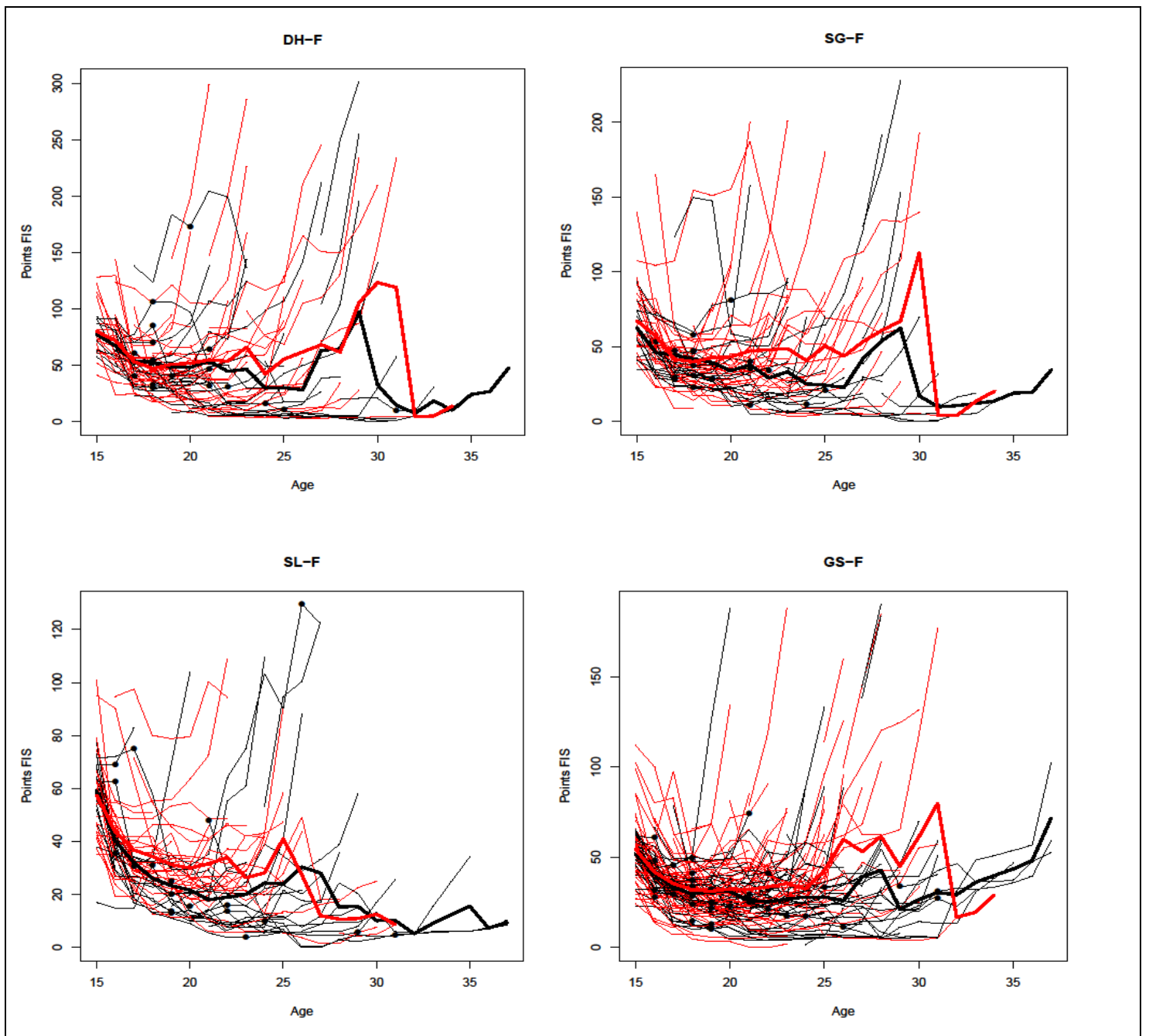


## Résultats

### 1. Dynamique de carrière : vision individuelle



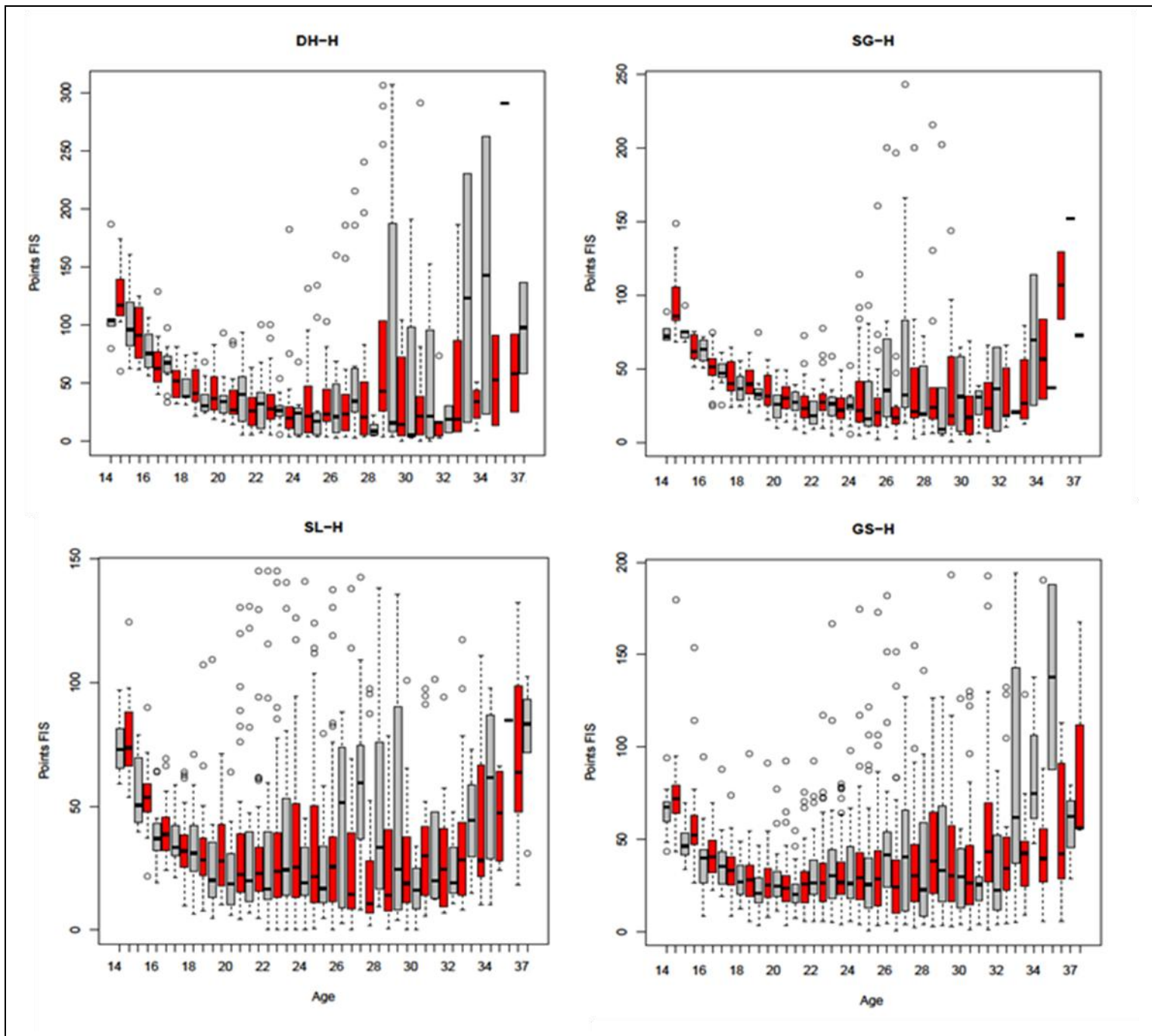
Graphique 1. Evolution des points FIS par âge en descente (DH), super G (SG), slalom géant (GS) et slalom (SL) chez les skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013.



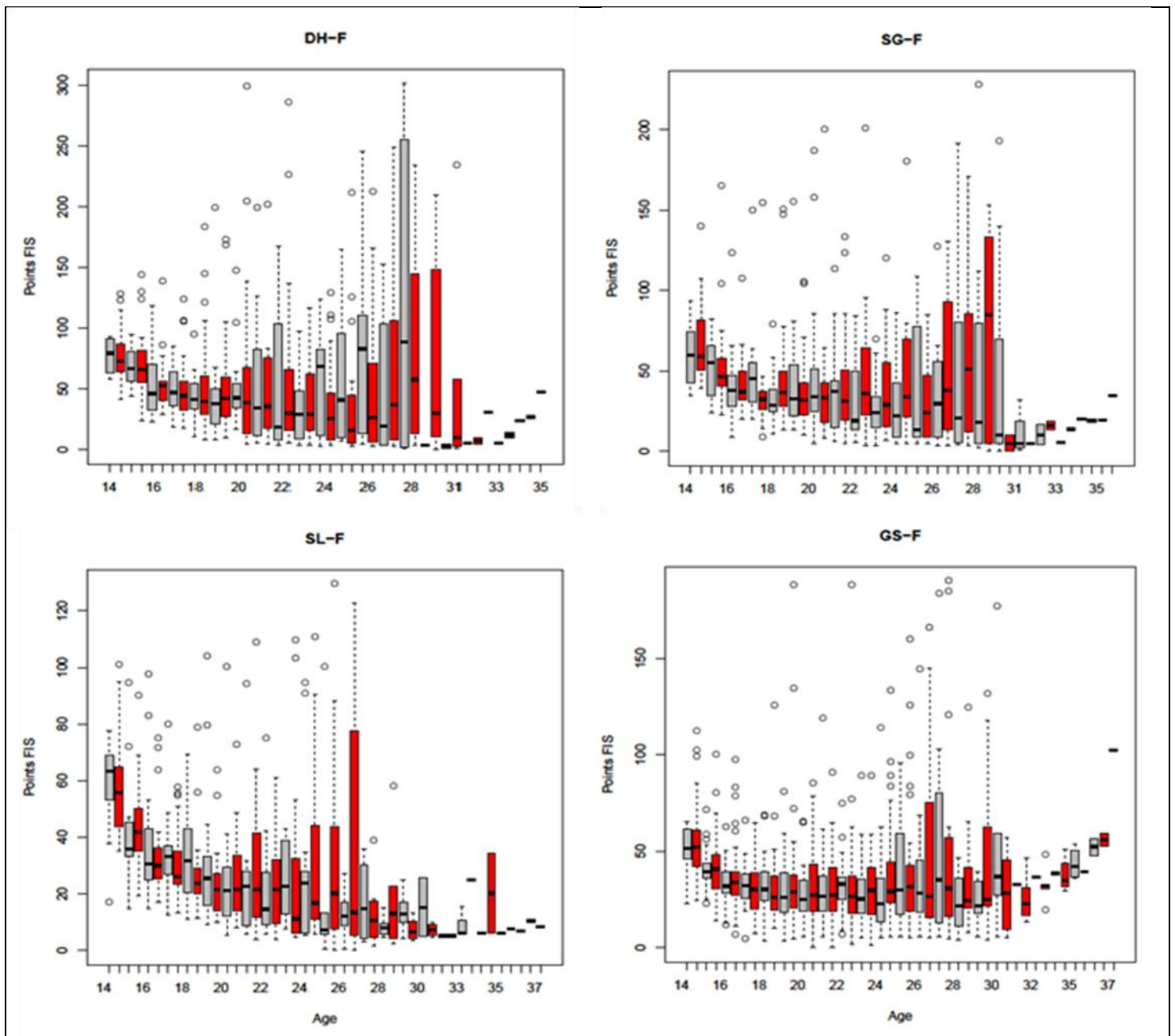
Graphique 2. Evolution des points FIS par âge en descente (DH), super G (SG), slalom géant (GS) et slalom (SL) chez les skieuses alpines en Equipe de France de 1980 à 2013.

Les graphiques 1 et 2 représentent les dynamiques de carrières de l'ensemble des skieurs alpins. Dans les 4 disciplines, elles montrent qu'il existe des variabilités de trajectoires au sein des athlètes, chez les hommes et chez les femmes. Dans les disciplines de vitesse (DH et SG), la moyenne des performances par âge est statistiquement différente dans les groupes LCA et NLCA. Elle est significativement meilleure dans le groupe LCA par rapport au groupe NLCA ( $p < 0,05$ ). Dans les disciplines techniques et dans toutes les disciplines féminines, l'évolution des performances par âge est comparable entre les 2 groupes de population ( $p > 0,05$ ).

## 2. Box plot : vision globale



Graphique 3. Dispersion des points FIS en fonction de l'âge en descente (DH), super G (SG), slalom géant (GS) et slalom (SL) chez les skieurs alpins en Equipe de France de 1980 à 2013.



Graphique 4. Dispersion des points FIS en fonction de l'âge en descente (DH), super G (SG), slalom géant (GS) et slalom (SL) chez les skieuses alpines en Equipe de France de 1980 à 2013.

Chez les hommes, en DH (DH-H), la médiane de l'ensemble des skieurs est de 51,7 (Q1=25,9 ; Q3=91,7) pour le groupe LCA et de 61,4 (Q1=31,7 ; Q3=97,8) pour le groupe NLCA. En SG (SG-H), la médiane est respectivement de 36,5 (Q1=22,3 ; Q3=61,7) et 46,6 (Q1=27,3 ; Q3=74,2). En SL (SL-H), elle est de 43,8 (Q1=17,7 ; Q3= 85,4) pour le groupe LCA et 37,8 (Q1=21,2 ; Q3=75,0) pour le groupe NLCA. En GS (GS-H), la médiane est, respectivement, équivalente à 28,3 (Q1=15,2 ; Q3=43,1) et 33,3 (Q1= 22,5 ; Q3=48,9).

Chez les femmes, en DH (DH-F), la médiane totale dans les groupes LCA et NLCA est respectivement de 59,1 (Q1=30,4 ; Q2=107,0) et de 56,7 (Q1=35,2 ; Q3=90,0) alors qu'en SG (SG-F) elle est de 38,8 (Q1=23,3 ; Q3=66,2) et de 42,5 (Q1=30,7 ; Q3=62,3). En SL (SL-F) elle représente 31,0 (Q1=14,7 ; Q3=67,0) et 39,4 (Q1=26,3 ; Q3=67,2) et en GS (GS-F) 29,4 (Q1=19,1 ; Q3=39,9) et 33,3 (Q1=24,2 ; Q3=46,2).

## ***Discussion***

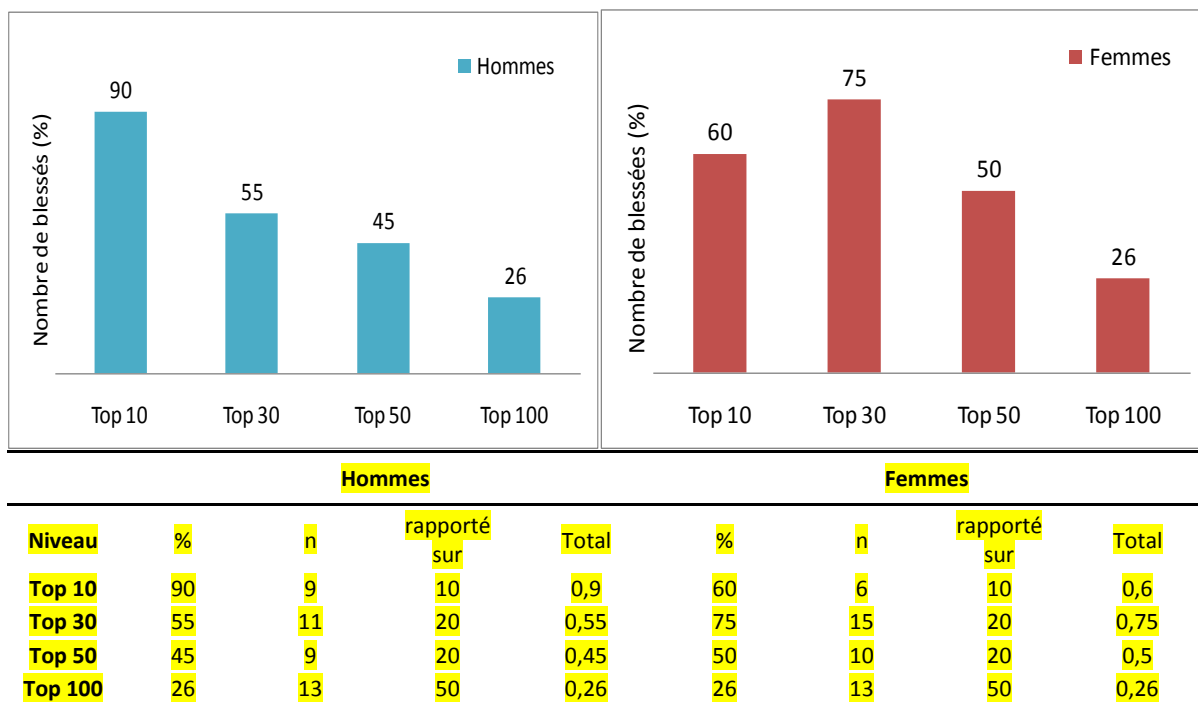
Dans la continuité de la première étude, cette analyse complémentaire permet d'apprécier l'évolution des performances de l'ensemble des skieurs depuis le début jusqu'à leur fin de carrière en équipe de France.

Les résultats principaux nous montrent qu'au-delà de la variabilité des trajectoires de carrières, les évolutions moyennes des performances dans les disciplines de vitesse sont meilleures chez les skieurs qui ont eu une rupture du LCA par rapport à ceux sans cette lésion ( $p < 0,05$ ). Elles sont en revanche similaires dans les disciplines techniques masculines et dans toutes les disciplines féminines (Graphiques 1 et 2).

Par ailleurs, dans la majorité des disciplines (DH-H, SG-H, GS-H et SL-F, SG-F, GS-F) on constate que la médiane des performances est plus petite dans le groupe LCA par rapport au groupe NLCA, et que la différence la plus importante concerne les disciplines de vitesse masculines (DH-H, SG-H).

Les évolutions des performances représentées par les box-plot (Graphiques 3 et 4) montrent une relation dite en U (Berthelot et al., 2012; Guillaume et al., 2011). Dans la performance sportive de haut niveau, une relation exponentielle croissante puis décroissante est observée dans de nombreux sports (Berthelot et al., 2012; Guillaume et al., 2011). Ces analyses ont été faites en athlétisme et en natation (Berthelot et al., 2012) et permettent aussi une réelle appréciation dans les sports d'opposition comme le tennis (Guillaume et al., 2011). Dans l'étude 1, nous avons vu que l'âge au pic de performance du Top 10 des skieurs alpins est de 25,1 ans pour les skieurs et 25,3 ans pour les skieuses.

L'IRMES a appliqué ce modèle dans de nombreux sports afin de déterminer des optima ou pics de performance en fonction de l'âge. Cette relation, issue du travail de Moore (Moore, 1975), caractérise de nombreux autres paramètres tels que la force (Mitchell et al., 2012), le volume respiratoire (Stanojevic et al., 2008), le volume des capillaires pulmonaires (Aguilaniu et al., 2008), les performances cognitives (Park & Reuter-Lorenz, 2009) ou encore le taux des naissances (Kühnert & Nieschlag, 2004).



Graphique 5. Nombre (%) et valeurs absolues de skieurs et skieuses ayant subi une rupture du LCA en fonction du niveau de performance.

Dans l'article 1, l'analyse par décile de performances (points FIS et classement mondial) nous montre que, dans les épreuves de vitesse comme dans les épreuves techniques, les athlètes du groupe LCA ont de meilleurs classements et de meilleurs points FIS que les athlètes du groupe NLCA. Ces résultats concernent le 1<sup>er</sup> décile de performance qui donc représente les 10% des meilleurs skieurs et skieuses. Lorsque l'on s'intéresse à la population totale (Graphiques 1 à 4), les évolutions moyennes des performances sont significativement meilleures dans le groupe LCA par rapport à celui des NLCA, seulement dans les disciplines de vitesse masculines.

Les résultats du graphique 5 permettent d'expliquer les performances meilleures dans le 1<sup>er</sup> décile du groupe LCA et les performances comparables dans les 2 groupes (LCA et NLCA) au niveau de la population générale. En effet, on constate qu'au meilleur niveau de performance (Top 10), la part des skieurs avec une rupture du LCA est plus importante que celle sans rupture du LCA. Chez les skieurs, cette part se réduit régulièrement avec la diminution du niveau de performance (Top 10 : 90% ; Top 30 : 55% ; Top 50 : 45% ; Top 100 : 26%). Chez les femmes, le nombre de blessées décroît aussi avec la baisse du niveau de



performance avec 70% de skieuses ayant subi une rupture du LCA dans le Top 30 contre 50% dans le Top 50 et 26% dans le Top 100. En d'autres termes, le niveau de performance est corrélé avec la fréquence de la rupture du LCA. Pujol et al ont d'ailleurs montré en 2007 que le taux de rupture du LCA dans le ski alpin est plus important dans le Top 30 mondial par rapport au reste de la population (Pujol et al., 2007).

### ***Conclusion***

Dans un premier temps, cette approche nous montre que l'incidence de la blessure est liée au niveau de performance dans la mesure où la part des skieurs qui ont subi une rupture du LCA est plus importante dans le Top 10 et le Top 30 par rapport au Top 50 et au Top 100. De plus, cette nouvelle analyse permet d'affirmer que quelque soit le niveau de performance la rupture du LCA n'est pas un élément perturbateur sur l'évolution de la performance au cours de la carrière d'un skieur alpin de haut niveau.

### ***Lien entre l'étude 2 et l'étude 3***

L'optimisation de la performance est un enjeu multifactoriel et est influencée par plusieurs paramètres. L'exposition aux risques de la blessure est une problématique à part entière dans ce processus mais elle n'est pas la seule. L'environnement et les contraintes qu'il implique est aussi un facteur fondamental dans la quête des performances optimales. Pour mieux comprendre les effets de l'environnement sur la performance dans le SHN, nous avons étudié 26 544 performances et analysé les températures des meilleures performances du 100m au 1500m de 2002 à 2008 (ETUDE 3).

## ETUDE 3

### Impact de l'environnement et du calendrier des compétitions sur les performances en sprint et demi-fond

Amal Haïda<sup>1,2\*</sup>, Frédéric Dor<sup>1</sup>, Marion Guillaume<sup>1</sup>, Laurent Quinquis<sup>1</sup>, Andy Marc<sup>1</sup>, Laurie-Anne Marquet<sup>1</sup>, Juliana Antero-Jacquemin<sup>1</sup>, Claire Tourny-Chollet<sup>2</sup>, François Desgorces<sup>1,3</sup>, Geoffroy Berthelot<sup>1,3</sup>, Jean-François Toussaint<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> IRMES (biomedical Research Institute of Sports Epidemiology, Paris, France), INSEP, 11 Avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

<sup>2</sup> Université de Rouen, Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique EA 3832 CETAPS, boulevard Siegfried, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

<sup>3</sup> Paris Descartes University, Sorbonne, Paris Cité, Paris, France

<sup>4</sup> Hôtel-Dieu Hospital, CIMS, AP-HP, 1 parvis Notre Dame, 75004 Paris, France

**Citation :** Haida A, Dor F, Guillaume M, Quinquis L, Marc A, et al. (2013). Environment and scheduling effects on sprint and middle distance running performances

#### **\*Corresponding author:**

Miss Amal HAIDA

IRMES, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

Email : [amal.haida@insep.fr](mailto:amal.haida@insep.fr)

Tel : 00.33.1.41.74.42.73

Fax : 00.33.1.41.74.41.75

## **Résumé**

**Objectif :** La réalisation des performances des athlètes est liée à plusieurs facteurs dont l'environnement, la physiologie et les cycles institutionnels où les caractéristiques physiques sont impliquées. L'objectif de cette étude est d'analyser la performance réalisée en sprint et en course de demi-fond (100 m à 1500 m) en fonction de l'organisation du calendrier annuel des épreuves d'athlétisme et des conditions environnementales.

**Méthodes :** De 2002 à 2008, toutes les performances des 50 meilleurs athlètes internationaux du 100m au 1500m (hommes et femmes) sont collectées. La série historique de records du monde et les 10 meilleures performances annuelles de ces épreuves, depuis 1891, sont également inclus dans l'étude. Au total, 26 544 performances ont été collectées.

**Résultats :** Deux périodes de pic de performances sont observées. Le premier pic se produit autour de la 27,15<sup>ème</sup> ± 0,21 semaine (première semaine de Juillet) et le second pic autour de la 34,75<sup>ème</sup> ± 0,14 semaine (quatrième semaine d'Août). Le second pic représente le moment des compétitions internationales (Jeux Olympiques, Championnats du Monde et Championnats d'Europe) et pourrait être considéré comme un moment institutionnel. Le premier, cependant, correspond à un environnement optimal et a été mesuré par la réduction de l'intervalle de température avec une température autour de 23,25 ± 3,26°C pour les meilleures performances.

**Conclusion :** Les deux aspects : institutionnel et écophysiological, contribuent à la réalisation des meilleures performances dans les épreuves du 100m au 1500m et définit les contours des possibilités humaines. Les institutions sportives devraient tenir compte de l'aspect environnemental afin de fournir des conditions idéales pour atteindre de nouveaux records.

Mots-clés: athlétisme, sprint et demi-fond, calendrier, température.

## ***Introduction***

Depuis le début de l'ère olympique moderne (1896), les meilleures performances sont dans un processus de croissance exponentielle qui semble avoir atteint ses limites (Berthelot et al., 2008). La performance est souvent définie comme un terme très large qui implique de nombreux composants tels que: les capacités psychomotrices, la flexibilité et la raideur des articulations, la force et la puissance musculaire (Greg Atkinson & Drust, 2005). Les sportifs, comme tout organisme vivant, dépendent de régulations physiologiques qui respectent les cycles biologiques nyctéméraux (Magnanou, Attia, Fons, Boeuf, & Falcon, 2009). Cette rythmicité saisonnière a été démontrée pour certains facteurs tels que l'humeur (Boivin et al., 1997), la fonction pulmonaire (Spengler & Shea, 2000) et la température centrale du corps. Elle a également été observée pour l'activité physique en la population générale qui tend à être plus élevée en été par rapport aux autres saisons (Chan, Ryan, & Tudor-Locke, 2006; Hamilton, Clemes, & Griffiths, 2008; McCormack, Friedenreich, Shiell, Giles-Corti, & Doyle-Baker, 2010). Chan et ses collègues (2006) (Chan et al., 2006) ont constaté un changement significatif de l'activité physique en population générale, en observant que le nombre de pas par jour était lié à la température, aux précipitations et à la vitesse du vent.

Les études concernant les effets de la saisonnalité dans le sport et sur les performances des athlètes de sprint et de demi-fond sont limitées. Pourtant, le calendrier annuel des événements semble être un facteur contribuant à la performance. En athlétisme, les records du monde (WR) montrent que les meilleures performances sont plus importantes en été. L'influence des paramètres environnementaux sur la physiologie (écophysiologie) détermine en partie l'évolution de la performance humaine (Desgorces et al., 2008; Marino, Lambert, & Noakes, 2004). Des performances optimales au Marathon sont réalisées à une température autour de 10°C. Cette performance dépendante de la température ne s'applique pas seulement pour les athlètes d'élite mais aussi pour tous les participants (Chevront & Haymes, 2001; El Helou et al., 2012; Kenefick, Chevront, & Sawka, 2007).

L'objectif de cette étude est de comparer la date et la température des meilleures performances en sprint et demi-fond (100m à 1500m) chez les hommes et les femmes pendant le calendrier annuel des compétitions internationales, et d'observer leur évolution

au cours de l'ère olympique pour évaluer les effets de l'environnement et du calendrier sur les performances de sprint et de demi-fond.

## ***Méthodes***

### **Collecte des données**

De 2002 à 2008, toutes les performances des 50 meilleurs athlètes internationaux des épreuves de courses allant du 100m au 1500m pour les hommes et les femmes ont été collectées sur le site officiel de l'Association Internationale des Fédérations d'Athlétisme (IAAF) (« iaaf.org - International Association of Athletics Federations », s. d.).

Pour chaque épreuve, la collecte de données comprend: le nom et le prénom de l'athlète, la date de la performance et le lieu de la compétition: 23 746 représentations ont été répertoriées, 11 813 pour les hommes et 11 933 pour les femmes. Les performances sont divisées en cinq catégories. Chacune d'entre elles représentent un pourcentage par rapport à la meilleure performance obtenue lors de l'épreuve. Les catégories de pourcentage (PC) utilisées sont : [95-96% [, [96-97% [, [97-98% [, [98-99% [, [99-100%]. Dans chaque groupe, les performances ont été collectées en fonction du type de compétition : (i) compétitions majeures (Jeux Olympiques (JO), Championnats du monde (CM), Championnats d'Europe (CE) et sélections américaines (US)), (ii) circuit international représenté par la Golden League et (iii) autres meetings.

Pour les mêmes épreuves, la date, le lieu et le nom de l'athlète ayant réalisé les records du monde entre 1952 et 2010 ont été collectés (181 records du monde). Les performances du top 10 des hommes et des femmes du 100m ont été rassemblées de 1891 à 2008, ce qui représente un total de 2617 performances.

Les températures de chaque ville où a lieu la compétition, ont été enregistrées pour les PC de 97 à 100% dans les épreuves du 100m, 200m, 400m, 800m et 1500m. Afin d'améliorer la résolution, les PC sont divisées de moitié pour étudier la densité de température: [97 à 97,5% [, [97,5 à 98% [, [98 à 98,5% [, [98,5 à 99% [, [99 à 99,5% [, [99,5 à 100%]. Les températures ont été collectées à partir du site « Weather Underground » (« Weather Forecast & Reports - Long Range & Local | Wunderground | Weather Underground », s. d.).

Le nombre total de performances collectées pour cette étude est de 26544.

## **Analyse statistique**

### *Distribution des performances par catégorie de pourcentage (PC)*

Les performances de 2002 à 2008 sont distribuées par semaine de l'année en fonction de la PC et du type de compétition: la modélisation a été réalisée sous le logiciel Matlab. Pour estimer les deux dates où ont eu lieu le plus grand nombre de performances, deux fonctions ont été ajustées selon une régression non-linéaire (méthode des moindres carrés): la fonction "double gaussienne" et la fonction "double Lorentzienne". Pour chaque PC, la fonction qui s'ajuste le mieux aux données est sélectionnée sur la base du  $R^2$  ajusté et de l'erreur quadratique moyenne (mean square error : RMSE) (Voir les données supplémentaires : figure S1, tableaux S1 et S2). Les deux dates où les pics de performances apparaissent ont été estimées en utilisant le meilleur modèle pour chaque PC (Insert Figure 1). La proportion de performances dans les deux pics a été estimée en calculant l'aire sous la courbe (proportion de performances) de chaque modèle choisi et pour chaque PC (Voir les données supplémentaires, Figure S2, tableau S2).

### *Distribution des records du monde*

La taille d'effet de l'ANOVA à un facteur est exprimée à l'aide du  $d$  de Cohen et est évaluée selon les critères conventionnels (Field, 2009). Elle est utilisée pour étudier la stabilité des dates moyennes par décennies des records du monde (1952-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2010). La significativité statistique est considérée à  $p < 0,05$ .

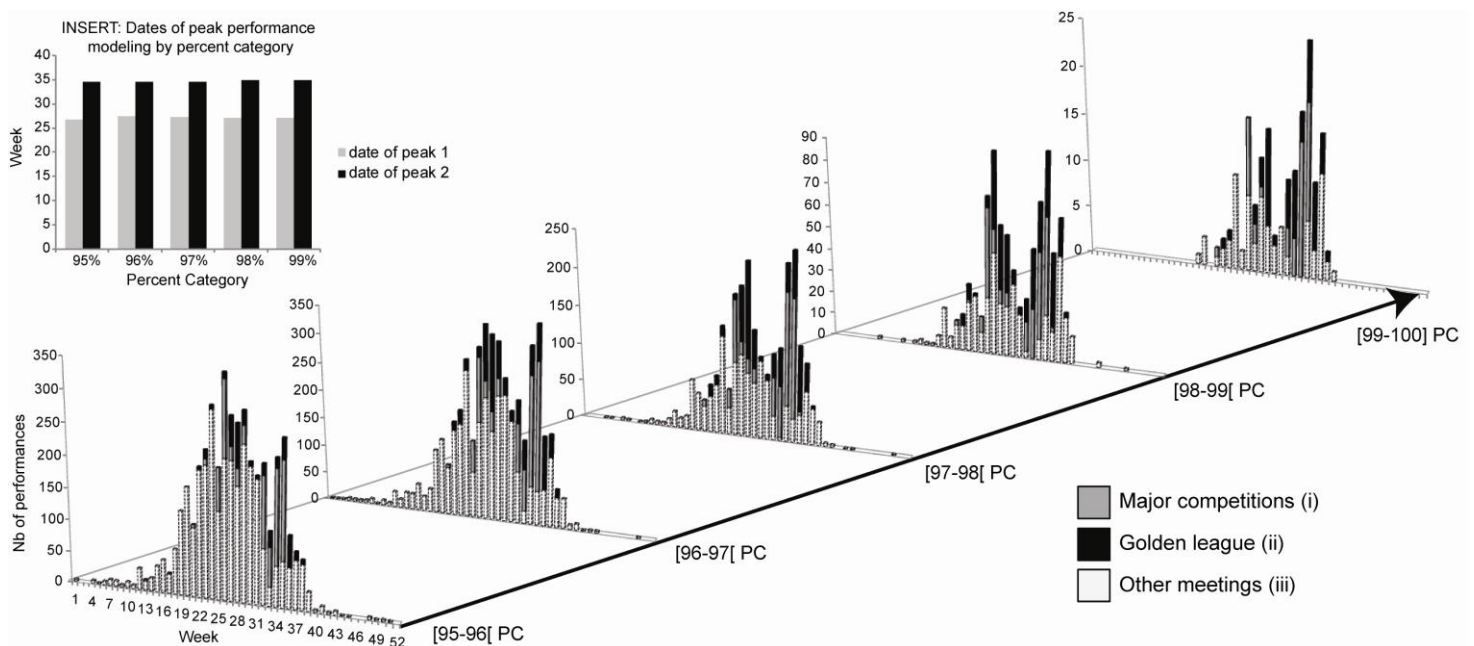
### *Température*

Pour la température, les analyses statistiques ont été effectuées sur R, version 3.0.0 (R Core Team, Vienna, Austria, 2013) et les résultats sont exprimés en moyenne  $\pm$  écart-type. Le test de Fisher est utilisé pour comparer les dispersions entre les différents PC avec une valeur de  $p < 0,05$  considérée comme significative. Nous estimons la densité des degrés de température pour chaque PC sur un maillage homogène de  $5 \times 6$  nœuds. La résolution utilisée est de  $7,5^\circ\text{C}$  sur l'abscisse  $x$  (température) et 0,59 pourcent sur l'ordonnée  $y$  (PC).

## Résultats

### Distribution des performances en fonction des PC et des compétitions

La répartition des performances hebdomadaires pour chaque PC (95 à 100 PC) sur le calendrier des compétitions montre deux périodes de haute fréquence de performances (Figure 1). Les dates estimées des deux pics de performances sont constants dans tous les PC (en moyenne, le 1<sup>er</sup> pic a lieu à la 27,15<sup>ème</sup>  $\pm$  0,21 et à la 34,75<sup>ème</sup>  $\pm$  0,14 semaine pour le 2<sup>ème</sup> pic) (Figure 1, Insert).



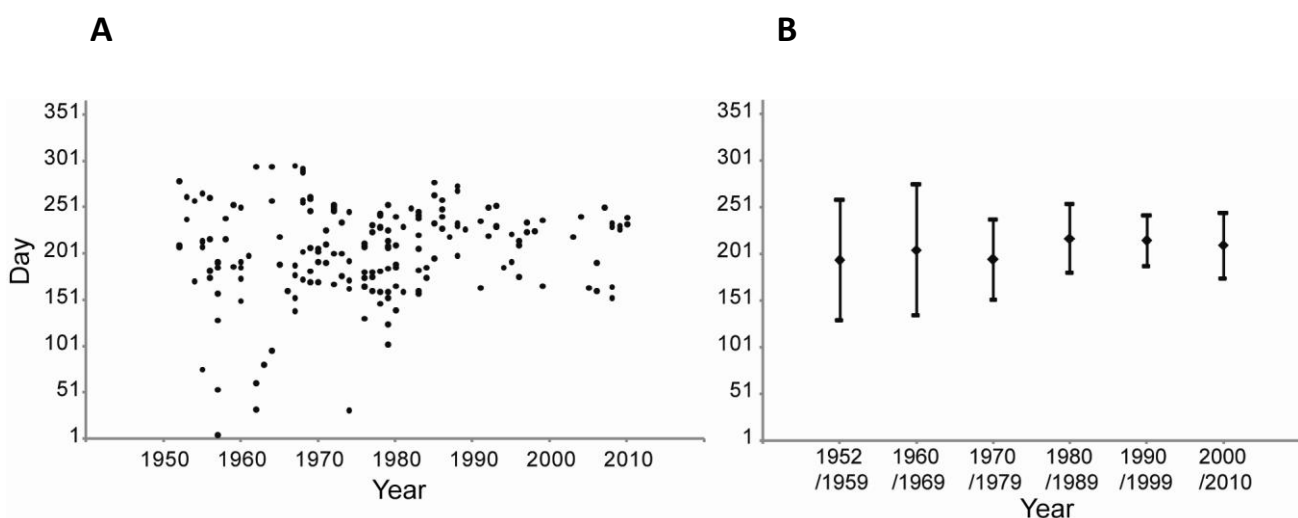
**Figure 1.** Nombre de performances hebdomadaires en fonction des catégories de pourcentage (PC) et (i) des compétitions majeures (Jeux Olympiques, Championnats du Monde, sélections américaines et Championnats d'Europe), (ii) de la Golden League et (iii) des autres meetings. INSERT : Modélisation des dates (en semaine) des pics de performances en fonction des PC.

Le nombre de performances lors des compétitions majeures (JO/CM/US/CE) augmente de 16,7% pour la PC de 95 à 25,7% pour la PC de 99. Les performances enregistrées au cours de la Golden League augmentent de 7,7% pour la PC de 95 à 29,1% pour la PC de 99. A l'inverse, le nombre de performances dans les autres meetings diminuent de 75,6% à 45,1% (Figure 1) (Voir données supplémentaires, tableau S3).



### *Distribution des records du monde*

La distribution moyenne de la date des records du monde par décennie de 1952 à 2010 est concentrée autour du 206,09<sup>ème</sup> ± 46,17 jour. La variabilité de la date des records du monde diminue considérablement. Dans la première période (1952-1959), la déviation standard est de 64,34 et dans la dernière période (2000-2010), elle est de 35,09. Cependant le jour moyen reste stable tout au long de la période ( $p = 0,29$ ) (Figure 2), avec une grande taille de l'effet ( $d = 0,98$ ).



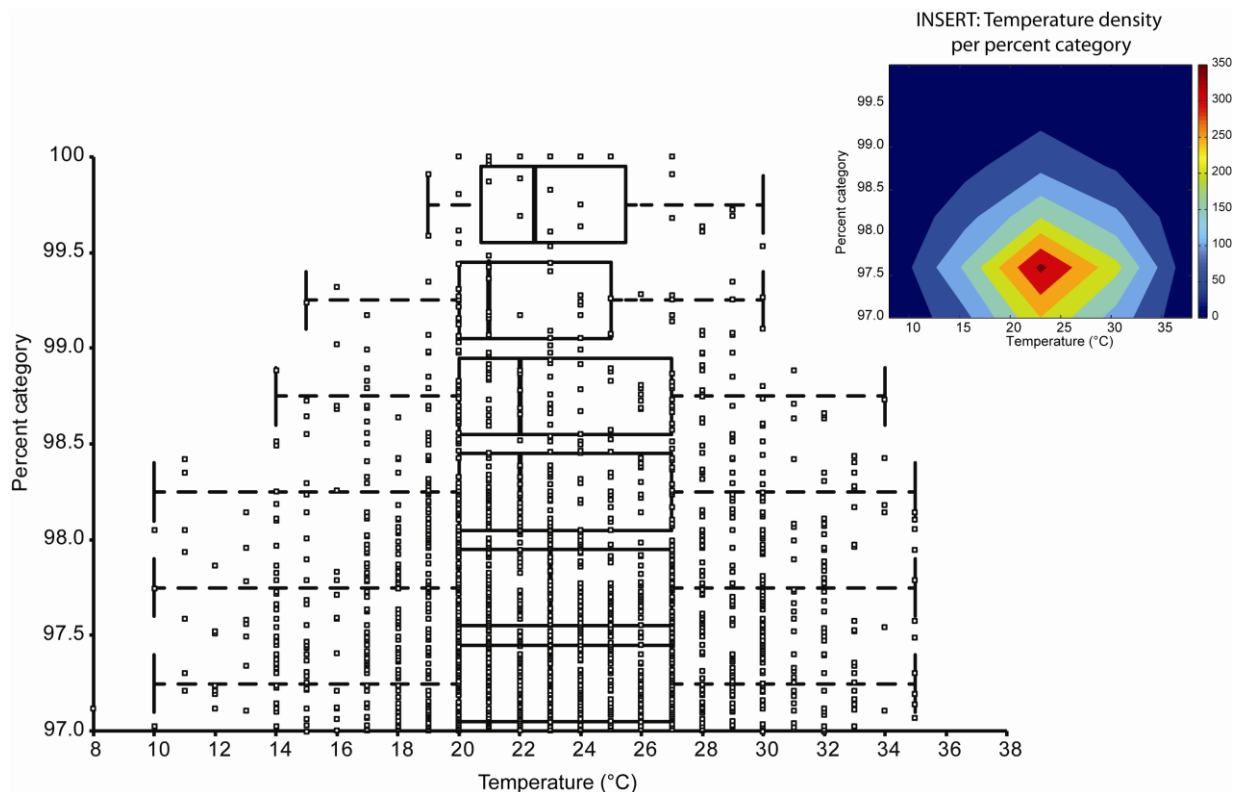
**Figure 2. A.** Distribution des dates (jours) des records du monde aux épreuves du 100m, 200m, 400m, 800m and 1500m de 1952 à 2010. **B.** Distribution moyenne de la date (jours) des records du monde aux épreuves du 100m, 200m, 400m, 800m and 1500m par décennie de 1952 à 2010.

### *Influence de la température sur la performance*

L'analyse de la distribution de PC selon la température indique une restriction de l'intervalle thermique avec l'augmentation du niveau de performance. Cet intervalle se réduit de 10-32°C à la PC de 97 à 20-27°C à la PC de 100, avec une température moyenne de 23,23 ± 4,75°C. En sous-divisionnant les PC, la température moyenne est de 23,13 ± 4,80°C pour la PC [97 à 97,5 [, 23,49 ± 4,88°C pour la PC [97,5 à 98 [, 23,23 ± 4,92°C pour la PC [98 à 98,5 [, 22,89 ± 4,56°C pour la PC [98,5 à 99 [, 22,63 ± 3,72°C pour la PC [99 à 99,5 [ et 23,25 ± 3,26°C pour la

PC [99,5 à 100]. La figure 3 met en évidence le rétrécissement de l'intervalle de température au niveau des meilleures performances.

La valeur pic du maillage de densité se situe à 23°C (97.59%) pour 362 valeurs. La densité décroît dans les 2 dimensions (températures et PC) à partir de ce pic, confirmant la valeur moyenne des températures citée auparavant (Insert, Figure 3).

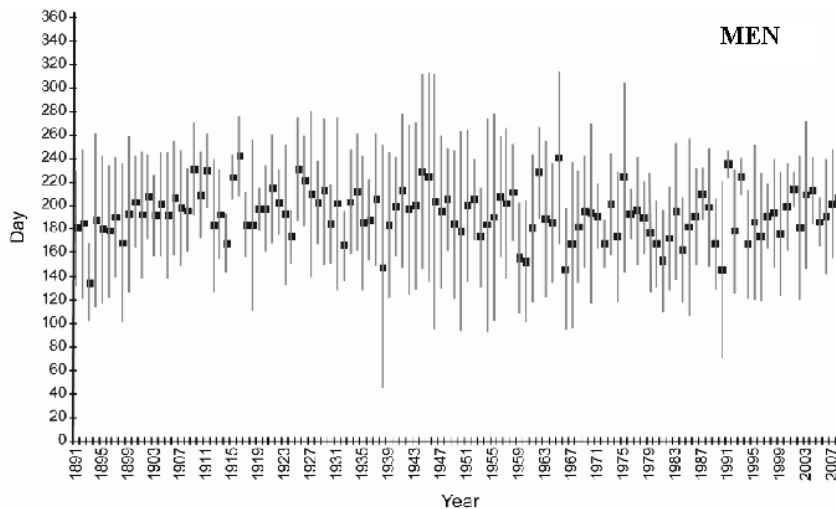


**Figure 3.** Catégories de pourcentage (PC) en fonction de la température : comparaison des températures aux différents niveaux de la PC 97 à la PC 100 aux épreuves de 100m, 200m, 400m, 800m et 1500m. Respectivement, pour chaque demie PC, la température moyenne est de: 23.12°C, 23.49°C, 23.23°C, 22.89°C, 22.63°C et 23.25°C et la médiane de 23.00°C, 23.00°C, 22.00°C, 22.00°C, 21.00°C and 22.50°C. INSERT : la densité de température (i.e. nombre de températures enregistrées) par PC est calculée sur un maillage. La densité maximale est située à 23°C et 97.59% et diminue progressivement avec l'augmentation du PC (du à la diminution du nombre de performances) et avec l'augmentation et la diminution de la température (effet de la température sur la performance).

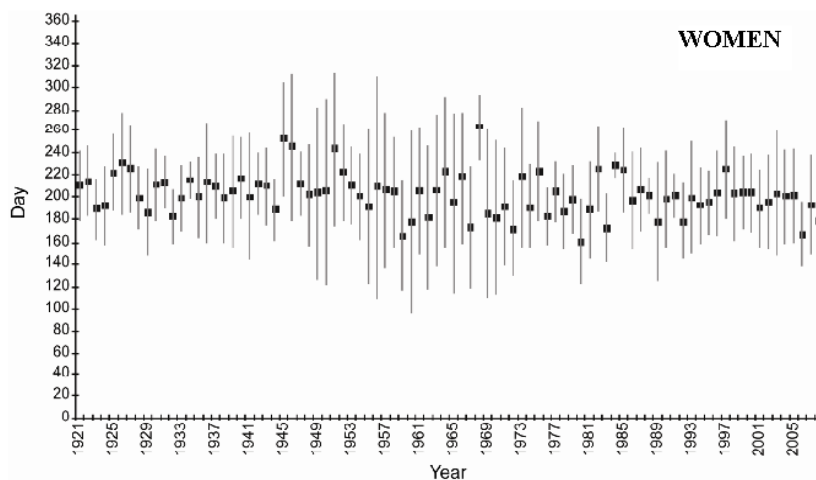
### Top 10 au sprint de 1891 à 2008

Il n'y a aucune tendance évolutive de la date moyenne de la réalisation des performances au 100m tout au long de l'ère olympique moderne. Depuis 1891, les hommes accomplissent leur meilleure performance autour du 10 Juillet ( $\pm 50$  jours) *id est* au cours de la 28<sup>ème</sup> semaine et depuis 1921, les femmes réalisent leurs meilleurs résultats aux alentours du 20 Juillet ( $\pm 44$  jours) *id est* au cours de la 29<sup>ème</sup> semaine (Figure 4).

**A**



**B**



**Figure 4. A.** Jour moyen de la réalisation de la performance du Top 10 au 100m hommes depuis 1891. En moyenne, la réalisation des performances toutes années confondues se déroule le 192.76<sup>ème</sup>  $\pm$  49.77 jour. **B.** Jour moyen de la réalisation de la performance du Top 10 au 100m femmes depuis 1921. En moyenne, la réalisation des performances toutes années confondues se déroule le 202.52<sup>ème</sup>  $\pm$  44.0 jour.

## **Discussion**

Des études antérieures ont analysé la saisonnalité des rythmes de la vie quotidienne (Greg Atkinson & Drust, 2005; Foster & Roenneberg, 2008) ou encore chez les marathoniens (El Helou et al., 2012) mais aucune étude n'a démontré les effets de la saisonnalité à travers les conditions environnementales ou institutionnelles sur la performance en sprint.

Deux pics de performance annuels ont été observés à tous les niveaux dans cette étude. Le premier pic correspond à la 27<sup>ème</sup> semaine de l'année (première semaine de Juillet) montrant un optimum environnemental pour les épreuves de sprint. Le deuxième pic se produit à la 34<sup>ème</sup> semaine (quatrième semaine d'Août) qui est lié aux grands événements sportifs tels que les : Jeux Olympiques, Championnats du Monde et Championnats d'Europe. Comme on le voit sur l'insert de la figure 1, les deux dates des pics de performance sont stables dans toutes les catégories de performance.

### **Pic de performances à la 34<sup>ème</sup> semaine**

L'impact des grandes compétitions internationales correspond au pic de performance qui a lieu au mois d'Août. La planification du calendrier des Championnats du Monde ou des Jeux Olympiques peut être considérée comme un attracteur institutionnel. Les compétitions de l'IAAF se déroulent en « outdoor » entre février et octobre. Les compétitions majeures telles que les Championnats du Monde, les Championnats d'Europe et les Jeux Olympiques sont généralement programmées en Août alors que le circuit international de la Golden League couvre l'ensemble de la période entre Juin et Septembre. Les fédérations nationales planifient leurs propres calendriers proposant des compétitions permettant à leurs athlètes de se qualifier pour les grandes compétitions.

Cette étude met en évidence l'existence d'un pic culturel (deuxième pic) survenant à la même période que les grands événements internationaux. Globalement, les meilleurs athlètes se concentrent sur le même objectif: être le plus compétent physiquement et mentalement pour cette période de l'année. Ce second pic correspond à la propre planification de l'athlète pour les grandes compétitions, résultant d'un entraînement de long

terme, d'analyse technique, de choix stratégiques, de prise de conscience des limites physiques et psychologiques (Costill et al., 1991; Mujika, 2010; Steinacker et al., 2000).

### **Pic de performances à la 27<sup>ème</sup> semaine**

L'analyse des records du monde (Figure 2) et du Top 10 du 100m (hommes et femmes) illustre le premier pic de performances (Figure 4). De nombreuses études ont démontré les effets des conditions environnementales sur la performance des marathoniens (Ely, Martin, Cheuvront, & Montain, 2008; Montain, Ely, & Cheuvront, 2007).

Le Marathon est une discipline qui requiert un certain nombre de conditions environnementales appropriées pour la thermorégulation du coureur, élite ou amateur. L'humidité, la pression atmosphérique, le point de rosée et la température sont essentiels dans la quête de la réalisation de performances optimales (Ely, Cheuvront, Roberts, & Montain, 2007).

Une étude récente a analysé l'impact des paramètres environnementaux sur la performance au Marathon. Une distribution des performances en fonction de la température, quel que soit le niveau de l'athlète a été établie. Cette fonction de distribution définit les limites du champ des possibilités humaines (El Helou et al., 2012). L'impact de la température et des saisons sur les paramètres biologiques est largement documentée dans la littérature (G Atkinson & Reilly, 1996; Ely et al., 2007; Galloway & Maughan, 1997).

Dans la présente étude, les résultats montrent une distribution pour les meilleures performances en sprint et en demi-fond où l'intervalle de température diminue avec le niveau de performance (10-32°C pour les performances les plus basses (PC de 97) et 20-27°C pour les meilleures performances (PC de 100)) (Figure 3). Les compétitions sont organisées principalement dans l'hémisphère nord. L'intervalle de températures récoltées dans les différentes villes où les compétitions ont eu lieu était large: de 10 à 38°C, mais la température moyenne lors de la réalisation des meilleures performances est de 23,23°C ± 4,75. Les écarts types diminuent progressivement avec l'augmentation du niveau de performance, mais toutes les catégories restent centrées sur une valeur de température de 23,23°C. Cela détermine un processus réglementé à tous les niveaux de performance.

### *Les effets de la température sur les paramètres biologiques*

Toutes les structures et tous les processus biologiques (humains ou non) sont affectés par la température (Somero, 2002). La performance dépend des réponses physiologiques en interaction entre la température du corps et la température de l'environnement (G Atkinson & Reilly, 1996). La performance diminue progressivement à mesure que les contraintes thermiques augmentent (Galloway & Maughan, 1997). Comme pour d'autres procédés biologiques, la fonction musculaire est fortement influencée par la température. Plus précisément, le taux de contraction du muscle (forces de contraction et de relâchement) est accéléré avec l'augmentation de la température chez les vertébrés comme chez les invertébrés (Bennett, 1985; Josephson, 1984). Les fonctions biologiques fondamentales comme l'activité métabolique se synchronisent avec les phases rythmiques des changements environnementaux dont la température. Dans les exercices aérobiques à intensité croissante, la concentration plasmatique de certains ions (K, Ca) et de l'acide lactique réagit différemment lorsque l'exercice musculaire se déroule dans un environnement thermique neutre (21°C) par rapport à un exercice réalisé à une température ambiante de 0°C (Therminarias, Quirion, & Pellerei, 1987).

A la saison favorable, la température corporelle, le taux métabolique basal et le taux de croissance augmentent. La croissance des mammifères de même que la structure de leurs os dépend des variations saisonnières (Koehler et al., 2012). Les climats et les saisons ont une influence marquée sur la biologie humaine (Foster & Roenneberg, 2008) notamment sur les capacités mentales (Magnusson, 2000), l'activité sexuelle (Régnier-Loilier & Rohrbasser, 2011) ou encore les conflits territoriaux (Hsiang, Meng, & Cane, 2011).

### *Température et mortalité*

De nombreux aspects de la santé dépendent des cycles saisonniers et de la température. Les troubles affectifs sont plus importants durant les mois d'automne et d'hiver et, inversement, montrent une réduction durant les mois de printemps et d'été (Magnusson, 2000). Des études sur des populations à grande échelle ont montré des variations saisonnières des taux de mortalité dans les différentes parties du monde avec un pic pendant les mois d'hiver

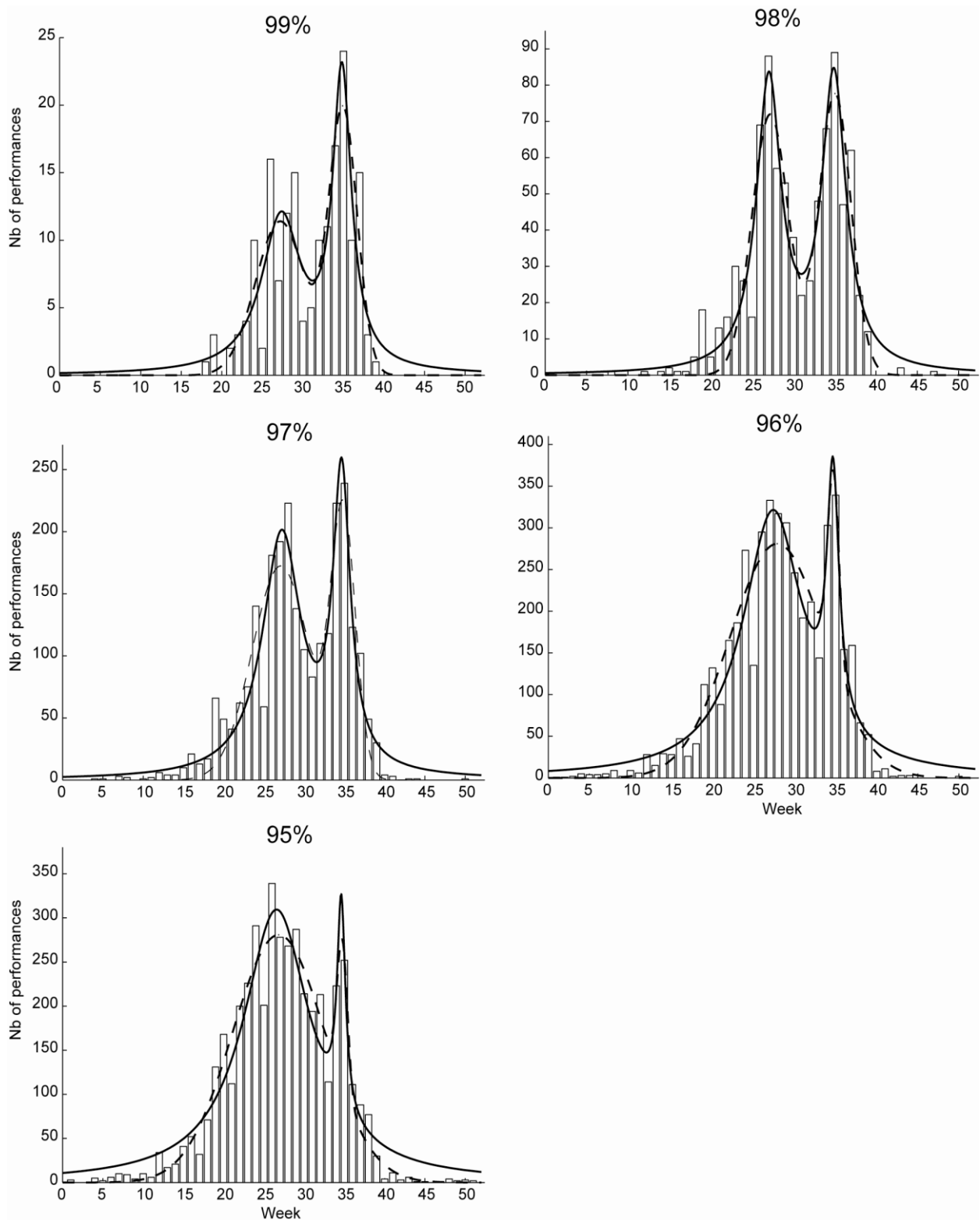
(Healy, 2003; The Eurowinter Group, 1997). Les relations entre la mortalité et les maladies cardiovasculaires (MCV) durant les mois d'hiver ont été observées dans de nombreux pays et pourraient être en partie expliquées par les variations saisonnières des facteurs de risque. La mortalité cardiaque dépend de la saison, même en tenant compte des facteurs de risque que sont l'âge, le cholestérol, la tension artérielle et l'indice de masse corporelle (Ghebre et al., 2012; The Eurowinter Group, 1997). Plusieurs études ont rapporté l'existence d'intervalles optimaux de la température ambiante (Ballester, Corella, Pérez-Hoyos, Sáez, & Hervás, 1997; Rocklöv & Forsberg, 2008). Plus précisément, il a été démontré que le froid était associé à un risque accru de mortalité causée par les MCV et les infections respiratoires (Barnett, Sans, Salomaa, Kuulasmaa, & Dobson, 2007; Eccles, 2002; Rocklöv & Forsberg, 2008). Le taux de mortalité est plus faible les jours où les températures maximales varient entre 20 et 25°C (Ballester et al., 1997). Cela signifie que le taux de survie est le plus élevé dans cette tranche de température.

Nos résultats montrent une température moyenne de  $23,23 \pm 4,75^{\circ}\text{C}$  pour les meilleures performances et **convergent avec celle où** les taux de mortalité sont les plus faibles. Par conséquent, la capacité de survie et les capacités physiologiques de l'Homme sont optimales entre 20 et 25°C. Les deux pics de performance changent leur distribution en fonction du niveau de performance (Voir les données supplémentaires, figures S1 et S2). Toutefois, le premier pic persiste même au plus haut niveau de compétition. Cela démontre que malgré la présence d'un attracteur institutionnel, représenté par les grandes compétitions, l'attracteur environnemental reste omniprésent avec une période de température idéale pour des performances maximales.

### ***Conclusion***

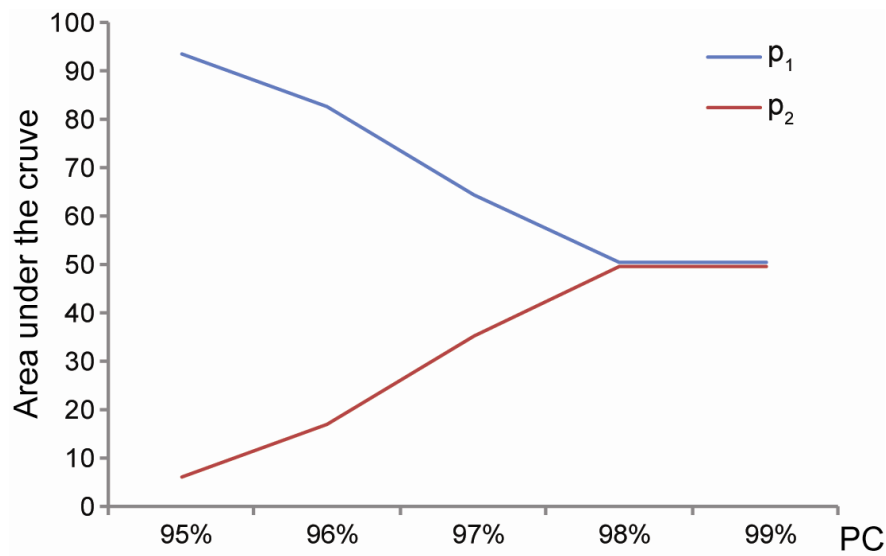
Le champ des combinaisons possibles de ces éléments environnementaux et institutionnels est réduit pour les plus performants. Dans les épreuves de sprint et de demi-fond, lors de la progression vers les plus hauts niveaux de performance, l'importance de la composante institutionnelle augmente, régulièrement équilibrée par la composante environnementale chez les plus performants. L'organisation des compétitions majeures devraient tenir compte de cette double tendance afin d'augmenter la probabilité de battre de nouveaux records.

## Données supplémentaires



**Figure S1. Modélisation des dates de pic de performances des catégories 95% à 99%.** Les fonctions "double gaussienne" (ligne discontinue) et "double Lorentzienne" (ligne continue) sont ajustées pour chaque PC. Bien que les deux modèles diffèrent dans l'estimation de la queue, ils fournissent à peu près les mêmes estimations de  $x_{01}$  et  $x_{02}$  (la différence maximale est de 0,5 semaine).





**Figure S2. Aire sous la courbe de la fonction sélectionnée selon la PC dans les 2 pics de performances (p<sub>1</sub> et p<sub>2</sub>).** L'aire sous la courbe des 2 pics de performances converge à travers une même valeur avec l'augmentation de la PC (=50%). Proportion des performances : l'estimation de l'aire sous la courbe des 2 pics montre que, lorsque la PC augmente, la proportion des performances de chaque pic converge vers la même valeur : de 93.67% (pic 1) vs. 6.33% (pic 2) pour la PC 95 à 50.65% (pic 1) vs. 49.35% (pic 2) pour la PC 99.

	Double Gaussian (DG)	Double Lorenz (DL)
95% <b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	<b>0,9516</b>	0,9305
<b>rMSE</b>	<b>22,7891</b>	27,3043
<b>sse</b>	<b>23889,8006</b>	34294,2
96% <b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	0,9291	<b>0,9296</b>
<b>rMSE</b>	29,5593	<b>29,439</b>
<b>sse</b>	40192,7026	<b>39866</b>
97% <b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	0,9	<b>0,9333</b>
<b>rMSE</b>	21,6801	<b>17,7025</b>
<b>sse</b>	21621,279	<b>14415,4</b>
98% <b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	0,893	<b>0,9133</b>
<b>rMSE</b>	8,1656	<b>7,348</b>
<b>sse</b>	3067,1187	<b>2483,7</b>
99% <b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	<b>0,832</b>	0,8242
<b>rMSE</b>	<b>2,3597</b>	2,4138
<b>sse</b>	<b>256,141</b>	268

**Table S1. Statistiques des 2 modèles.** Pour chaque catégorie de pourcentage, le R<sup>2</sup> ajusté et l'erreur quadratique moyenne (mean square error : RMSE) sont précisés. Les statistiques de la fonction sélectionnée sont mentionnées en gras.

**95%**

<b>Estimations</b>	<b>DG</b>	<b>DL</b>
$x_{01}$ (date)	<b>26,8351</b>	26,5746
$x_{02}$ (date)	<b>34,6752</b>	34,5948
$f(x_{01})$	<b>280,7254</b>	309,4273
$f(x_{02})$	<b>276,1141</b>	327,4228
Aire sous la courbe	<b>4302,7845</b>	4737,4484
$P_1$ (%)	<b>93,6664</b>	90,3258
$P_2$ (%)	<b>6,3336</b>	9,6742

**96%**

$x_{01}$ (date)	27,8848	<b>27,3995</b>
$x_{02}$ (date)	34,6783	<b>34,6435</b>
$f(x_{01})$	280,9383	<b>321,5128</b>
$f(x_{02})$	369,4804	<b>385,7318</b>
Aire sous la courbe	4430,1672	<b>4738,1772</b>
$P_1$ (%)	90,8454	<b>82,7868</b>
$P_2$ (%)	9,1546	<b>17,2132</b>

**97%**

$x_{01}$ (date)	27,0853	<b>27,2493</b>
$x_{02}$ (date)	34,7478	<b>34,6277</b>
$f(x_{01})$	172,4108	<b>201,6900</b>
$f(x_{02})$	225,5263	<b>259,8931</b>
Aire sous la courbe	2332,2075	<b>2551,2424</b>

$P_1$ (%)	65,7555	<b>64,5186</b>
$P_2$ (%)	34,2445	<b>35,4814</b>
<b>98%</b>		
$x_{01}$ (date)	27,2077	<b>27,0652</b>
$x_{02}$ (date)	35,0370	<b>34,8905</b>
$f(x_{01})$	71,9553	<b>83,8032</b>
$f(x_{02})$	77,6709	<b>84,8193</b>
Aire sous la courbe	778,2088	<b>858,3401</b>
$P_1$ (%)	51,4414	<b>50,4806</b>
$P_2$ (%)	48,5586	<b>49,5194</b>
<b>99%</b>		
<b>Estimations</b>	<b>DG</b>	<b>DL</b>
$x_{01}$ (date)	<b>27,2122</b>	27,3908
$x_{02}$ (date)	<b>34,8983</b>	34,8036
$f(x_{01})$	<b>11,4049</b>	12,1392
$f(x_{02})$	<b>19,9517</b>	23,2029
Aire sous la courbe	<b>172,2617</b>	188,3966
$p_1$ (%)	<b>50,6497</b>	51,9671

**Table S2. Résultats des 2 modèles.** Pour les PC et les modèles, la date du pic estimée ( $x_{01}$ ,  $x_{02}$ ), la valeur du pic ( $f(x_{01})$ ,  $f(x_{02})$ ), la proportion totale de performance (aire sous la courbe) et  $p_1$ ,  $p_2$  sont précisés. Les résultats de la fonction sélectionnée sont indiqués en gras.

Type de compétition	Catégorie de pourcentage (PC)	95%		96%		97%		98%		99%	
		n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Compétitions majeures	JO, CM, US, CE	712	16.7	826	18.4	576	23.0	188	22.4	45	25.7
	Golden League	461	7.7	743	16.5	591	23.6	247	29.4	51	29.1
Autres meetings		3309	75.6	2930	65.1	1336	53.4	405	48.2	79	45.1

**Table 3.** Nombre de performances en fonction du type de compétition et des catégories de pourcentages (PC). N est le nombre de performances pour chaque PC et son équivalent en pourcentage.

## Discussion et conclusion générales

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'impact de la blessure et des contraintes environnementales sur la performance sportive de haut niveau, deux paramètres essentiels dans la recherche d'une performance maximale. L'exposition aux risques de rupture du LCA dans le ski alpin français et l'impact de l'environnement sur les performances en athlétisme sont des points cruciaux impliqués dans l'optimisation des performances.

Dans cette thèse, seule la rupture du LCA, prise comme modèle d'interaction, a été étudiée pour évaluer l'impact de la blessure sur la performance. Il est donc nécessaire de prendre en compte nos résultats en restant conscient que ces athlètes pourraient également avoir subi d'autres types de blessures (fracture de l'épaule, entorse de la cheville, fracture de la main...) qui n'ont pas été analysés dans ce travail mais qui devront l'être par la suite. Il n'en reste pas moins que si les données sur la rupture du LCA ont été aussi exhaustives, grâce au travail de la Fédération Française de Ski, c'est parce que ce traumatisme est le plus fréquent et qu'il demande une prise en charge et un temps de récupération suffisamment longs pour l'étudier en priorité.

Dans la littérature, le retour à une pratique sportive en sport de loisir est bien documenté : intentions de reprendre le même sport, à un même niveau, de reprendre la compétition, de pratiquer un autre sport, ou d'abandonner la pratique sportive (Arden et al., 2012, 2011a; Heijne et al., 2008). Les facteurs influençant le retour au sport après blessure ont aussi été étudiés (Arden et al., 2011b; Tjong et al., 2014). L'étude qualitative de Tjong et al. (2014) (Tjong et al., 2014) analysant le taux de retour à la pratique sportive étudie les facteurs qui affectent la reprise du sport après la reconstruction du LCA : la peur (de se re-blesser, d'être affaibli, de la charge financière et de reprendre le sport lui-même), le changement de priorité et de style de vie (raisons familiales) et la personnalité (manque de confiance en soi, prudence).

En revanche, il existe un manque concernant l'impact de la rupture du LCA sur le retour à la performance en ski alpin de haut niveau, qui justifie ce travail.

## Intérêts et apports de la thèse

Par un double regard épidémiologique et écophysio­logique, cette thèse analyse les relations environnement - blessure - performance, et montre les voies d'optimisation de la performance. Grâce à la collaboration de la Fédération Française de Ski et l'exhaustivité des bases de données créées au sein de notre laboratoire, cette thèse révèle des niveaux de démonstration pertinents.

Dans le premier volet du travail : physiopathologie dans le SHN, nous avons émis plusieurs hypothèses au cours de l'élaboration de notre projet. La rupture du LCA pourrait :

- empêcher de retrouver de meilleures performances de retour à la compétition ;
- avoir un effet négatif sur l'évolution de carrière du sportif ;
- interrompre la carrière contrairement aux skieurs qui n'ont pas eu de rupture du LCA.

Dans un premier temps, le retour à une performance meilleure est possible après une rupture du LCA dans le ski alpin de haut niveau mais dépend essentiellement de l'âge au moment de l'accident. L'âge est en effet un élément crucial en termes de retour à la performance en raison de la relation qui existe entre ces 2 paramètres. Basée sur la loi de Moore (Moore, 1975), la relation entre l'âge et la performance se caractérise par une première phase de progression reflétant le développement des capacités physiques, une deuxième phase correspondant aux performances optimales incluant le pic de performance, et une troisième phase de régression au cours de laquelle les performances diminuent. Au sein de notre laboratoire (IRMES), plusieurs études ont montré qu'il existait un lien entre l'âge et la performance dans le SHN. Berthelot et al. (2012) ont démontré que l'âge au pic de performance des meilleurs mondiaux était de 26,0 ans en athlétisme et de 21,0 ans en natation (Berthelot et al., 2012). Celui du Top 10 mondial des joueuses et joueurs de Tennis est respectivement de 21,5 ans et 24,1 ans (Guillaume et al., 2011). Concernant notre population de skieurs, l'âge au pic de performance du Top 10 français est de 25,1 ans chez les hommes de 25,3 chez les femmes. Les skieurs et skieuses qui ont amélioré leurs performances après la rupture du LCA étaient jeunes n'avaient pas encore atteint l'âge du pic de performance. Ceci explique leur plus grande probabilité d'obtenir de meilleures

performances après cette blessure. Chez les skieurs qui parviennent à de meilleures performances post-rupture, le délai est en moyenne de 3,8 ans pour les hommes et de 3,1 ans pour les femmes. A l'inverse, les skieurs qui ne parviennent pas à retrouver le niveau de performances d'avant blessure ont connu une rupture du LCA plus tardive diminuant ainsi les probabilités d'atteindre des performances optimales au cours de leur carrière.

Cette première étude transversale (Etude 1) nous a donc permis de mettre en évidence que le retour à la haute performance après une rupture du LCA était réalisable chez les skieurs en Equipe de France. Les athlètes qui connaissent cette blessure en début de carrière ont toutes les possibilités d'atteindre des performances meilleures lors de leur retour à la compétition. C'est le moment de la rupture au cours de la carrière qui détermine le niveau retrouvé après la blessure : la possibilité de retrouver son niveau pré-blessure voire un meilleur niveau après la rupture du LCA existe donc mais est sensiblement liée à l'âge, qui représente l'élément principal guidant la récupération post-chirurgicale.

Un autre niveau de démonstration est que sur l'ensemble des skieurs de l'Equipe de France, les évolutions de carrières de ceux qui ont subi une rupture du LCA et de ceux qui n'en ont pas eu sont statistiquement comparables. De ce fait, contrairement à notre 2<sup>ème</sup> hypothèse, la rupture du LCA n'est pas un facteur perturbateur sur l'évolution des performances dans une carrière de skieurs de haut niveau.

Contrairement à la première étude qui prend en compte les meilleurs athlètes (1<sup>er</sup> décile de performance), cette analyse longitudinale vise les meilleures performances de l'ensemble de la population en Equipe de France de 1980 à 2013. Elle permet d'apprécier de manière plus large l'évolution des performances en fonction de la survenue d'une rupture du LCA. Par ailleurs, nous avons noté que la fréquence des ruptures est corrélée avec le niveau de performance et pourrait s'expliquer par une prise de risque plus importante chez les meilleurs athlètes. Finalement, ces études permettent d'affirmer que, quelque soit le niveau de performance, la rupture du LCA n'a pas d'impact négatif sur l'évolution de la performance au cours de la carrière d'un skieur alpin de haut niveau.

D'autre part, si nous avons pour hypothèse que la rupture du LCA pourrait interrompre la carrière contrairement aux skieurs qui n'ont pas eu de rupture du LCA, nos



résultats nous démontrent l'inverse. En effet, l'étude 1 met en lumière que la durée de carrière moyenne des skieurs du groupe LCA est significativement plus longue que celle des skieurs du groupe NLCA. Ce résultat pourrait, en partie, s'expliquer par le temps nécessaire à la récupération et la reconstruction du LCA des skieurs blessés allongeant ainsi leur durée de carrière en équipe de France. De plus, lorsqu'on regarde à la durée de carrière en fonction du nombre de ruptures, on constate alors qu'elle est encore plus importante ( $9,1 \text{ ans} \pm 4,6 \text{ ans}$ ) chez les skieurs ayant eu plusieurs ruptures du LCA par rapport à ceux n'en ayant connu qu'une seule ( $7,2 \pm 4,5 \text{ ans}$ ). Une autre explication serait que les athlètes qui ont eu une rupture du LCA, qui se trouvent être les plus performants, resteraient plus longtemps en Equipe par rapport à leurs homologues en raison de leur niveau de performance. Autre hypothèse expliquant cette différence de durée de carrière est que les skieurs avec rupture du LCA, qui se trouvent être meilleurs par rapport à ceux sans cette lésion, resteraient plus longtemps en Equipe de France du fait de leur talent sportif.

Cette thèse nous a donc permis d'enrichir les connaissances sur l'impact de la rupture du LCA sur l'évolution des performances des athlètes de l'Equipe de France de ski alpin et d'aboutir à plusieurs niveaux de démonstration.

Concernant le second volet de cette thèse (écophysio) si la blessure est aussi influencée par l'environnement, par la qualité de la neige et des pistes ou encore de la température, ce paramètre environnemental est aussi impliqué dans le champ de l'optimisation de la performance de haut niveau. Une étude réalisée en athlétisme permet un recul historique considérable depuis 1891. Nous avons étudié l'impact de l'environnement et du calendrier des compétitions sur la performance à travers plus de 26 000 performances de haut niveau en sprint et en demi-fond (ETUDE 3). Cet article met en lumière que l'intervalle des combinaisons possibles entre les éléments environnementaux et institutionnels (compétitions) se réduit pour les plus performants. Si la composante institutionnelle représente un phénomène attracteur des meilleures performances, la composante environnementale reste un enjeu majeur pour les plus performants (>99% de la meilleure performance). Dans les épreuves de sprint et de demi-fond, lors de la progression vers les plus hauts niveaux, l'importance de la composante institutionnelle augmente, mais

elle reste néanmoins équilibrée par la composante environnementale. Evalué par les valeurs de température extérieure, ce déterminant est omniprésent à tous les niveaux. S'il a été démontré qu'il existe une température optimale dans le marathon, autour de 10°C, cette étude montre que la température optimale est d'environ 23°C pour les épreuves de sprint qui s'explique par des différences d'adaptation en fonction des seuils thermiques.

En physiopathologie, il a été montré que dans le ski alpin, la température représentait un facteur de risque des blessures et que plus elle était faible et plus la prévalence des lésions augmentait (Aschauer et al., 2007; L. M. Bouter et al., 1989; M. Burtscher et al., 2009). Chez les skieuses, une dépendance significative entre la température et l'incidence des blessures au genou a été démontrée (G. Ruedl et al., 2012).

Enfin, la puissance des résultats réside dans la vaste période des études (1980 à 2013) et dans l'utilisation de plusieurs indicateurs de performance pour juger de l'impact de la blessure sur la qualité de la carrière sportive et sur le retour à la compétition. Par ailleurs, une autre force de ce travail est liée au type d'intervention chirurgicale qui est identique pour tous les skieurs (Kenneth Jones). Elle est de plus réalisée par le même chirurgien avec une prise en charge et un suivi par la même équipe médicale pour l'ensemble des skieurs de l'Equipe de France au cours de notre période d'étude.

Même si la blessure dans le SHN rime souvent avec douleur, épreuve mentale, rééducation longue, impatience et isolement, les travaux de cette thèse ont permis de montrer que le retour à une performance meilleure après une rupture du LCA est possible et très fréquent et que la qualité de ce retour est essentiellement dépendante de l'âge au moment de l'accident. La fréquence des ruptures du LCA augmente avec le niveau de performance et s'explique par une prise de risque plus importante chez les meilleurs. Enfin, lorsqu'on constate que l'évolution des performances durant l'ensemble des carrières des skieurs ayant subi la rupture du LCA est comparable à celle des skieurs sans cette blessure, nous pouvons affirmer que ce type de lésion n'est pas un élément perturbateur de la performance dans le ski alpin de haut niveau.

Dans notre population, tous les skieurs ayant subi une rupture du LCA ont été soumis à un arrêt d'au moins de 6 mois pour la récupération et la reconstruction du LCA. Une des interrogations que soulevait la Fédération Française de Ski était la suivante : est ce que la performance est altérée si un skieur était arrêté pour une période donnée ? Les travaux de cette thèse permettent de répondre à cette demande dans la mesure où l'on constate que même les skieurs qui ont subi une rupture du LCA (donc un arrêt de 6 mois) sont capables de parvenir à des performances meilleures une fois de retour à la compétition.

Le nouvel apport de cette thèse réside aussi dans l'élargissement des études vers une approche reliant facteurs environnementaux et performance de haut niveau. Les athlètes ont des capacités biologiques différentes qui résultent de l'interaction entre leur génome et leur environnement. Les travaux de la présente thèse dévoilent qu'en sprint, comme au marathon, les meilleures performances humaines se développent et s'expriment dans un intervalle de conditions environnementales restreint. Notre travail montre que la température reste très impliquée dans la réalisation de performances optimales. De ce fait, il serait intéressant que les organisateurs des compétitions majeures tiennent compte de cet « attracteur thermique » afin d'augmenter la probabilité de battre de nouveaux records.

### Considérations méthodologiques

Les informations cliniques et fonctionnelles ne sont pas exhaustives pour l'ensemble des skieurs, qui par ailleurs ont tous été arrêtés au moins 6 mois après une chirurgie, et ne fait pas l'objet d'analyse dans ce travail de thèse.

## Perspectives

Après nos travaux de recherche, il serait intéressant d'étudier les paramètres psychologiques des skieurs alpins afin d'apprécier s'il existe des facteurs responsables de la survenue d'une blessure ou à l'inverse comprendre si l'absence de blessure s'expliquerait par certains paramètres psychologiques. Cela permettrait aussi d'apprécier de quelle manière ils interviendraient dans la survenue des blessures mais également dans l'accélération de la récupération de ces facultés physiques.

Autre point intéressant à étudier pour mieux comprendre l'occurrence d'une blessure dans le SHN est la prise de risque. En effet, évaluer la prise de risque de nos skieurs, au travers d'outils fiables et reproductibles, pour réaliser des comparaisons entre les skieurs ayant subi une rupture du LCA, voire même toute autre blessure, et ceux n'en ayant pas connu au cours de leur carrière. Cette analyse permettrait aussi d'évaluer si la prise de risque est dépendante de l'existence de blessures antérieures. Enfin, on pourrait aller au-delà des travaux de cette thèse et se demander quelle est la qualité de vie post-carrière de ces skieurs qui ont subi une rupture du LCA, des entraînements et des compétitions intenses ?

Des analyses en fonction des laxités potentielles après rupture du LCA, des modalités de traitement ainsi que les délais de reprise après traumatisme seraient intéressantes.

## Bibliographie

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Magnusson, S. P., Larsson, B., & Dyhre-Poulsen, P. (1998). A new concept for isokinetic hamstring: quadriceps muscle strength ratio. *The American journal of sports medicine*, *26*(2), 231-237.
- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Trolle, M., Bangsbo, J., & Klausen, K. (1995). Isokinetic hamstring/quadriceps strength ratio: influence from joint angular velocity, gravity correction and contraction mode. *Acta physiologica Scandinavica*, *154*(4), 421-427. doi:10.1111/j.1748-1716.1995.tb09927.x.
- Agel, J., Arendt, E. A., & Bershadsky, B. (2005). Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *The American journal of sports medicine*, *33*(4), 524-530. doi:10.1177/0363546504269937.
- Aguilaniu, B., Maitre, J., Glénet, S., Gegout-Petit, A., & Guénard, H. (2008). European reference equations for CO and NO lung transfer. *European Respiratory Journal*, *31*(5), 1091-1097. doi:10.1183/09031936.00063207.
- Alonso, J. M., Junge, A., Renström, P., Engebretsen, L., Mountjoy, M., & Dvorak, J. (2009). Sports injuries surveillance during the 2007 IAAF World Athletics Championships. *Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, *19*(1), 26-32. doi:10.1097/JSM.0b013e318191c8e7.
- Andersen, M. B., & Williams, J. M. (1999). Athletic injury, psychosocial factors and perceptual changes during stress. *Journal of Sports Sciences*, *17*(9), 735-741.
- Arderm, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (2012). Return-to-sport outcomes at 2 to 7 years after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *The American journal of sports medicine*, *40*(1), 41-48. doi:10.1177/0363546511422999.
- Arderm, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., & Feller, J. A. (2011a). Return to sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: a systematic review and meta-analysis of the state of play. *British journal of sports medicine*, *45*(7), 596-606. doi:10.1136/bjism.2010.076364.
- Arderm, C. L., Webster, K. E., Taylor, N. F., & Feller, J. A. (2011b). Return to the preinjury level of competitive sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery: two-thirds of patients have not returned by 12 months after surgery. *The American journal of sports medicine*, *39*(3), 538-543. doi:10.1177/0363546510384798.

- Arendt, E., & Dick, R. (1995). Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *The American journal of sports medicine*, 23(6), 694-701.
- Aschauer, E., Ritter, E., Resch, H., Thoeni, H., & Spatzenegger, H. (2007). [Injuries and injury risk in skiing and snowboarding]. *Der Unfallchirurg*, 110(4), 301-306.
- Ascherl, R., Schlemmer, H., Lechner, F., & Bluemel, G. (1982). A ten year survey of skiing injuries. *Ski Trauma and Skiing Safety IV*, 153-163.
- Atkinson, G, & Reilly, T. (1996). Circadian variation in sports performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 21(4), 292-312.
- Atkinson, Greg, & Drust, B. (2005). Seasonal rhythms and exercise. *Clinics in sports medicine*, 24(2), e25-34, xii-xiii. doi:10.1016/j.csm.2004.11.001.
- Bahr, R., & Bahr, I. A. (1997). Incidence of acute volleyball injuries: a prospective cohort study of injury mechanisms and risk factors. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 7(3), 166-171. doi:10.1111/j.1600-0838.1997.tb00134.x.
- Bahr, Roald, & Krosshaug, T. (2005). Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. *British journal of sports medicine*, 39(6), 324-329.
- Bak, K., Jørgensen, U., Ekstrand, J., & Scavenius, M. (2001). Reconstruction of anterior cruciate ligament deficient knees in soccer players with an iliotibial band autograft. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 11(1), 16-22.
- Baker, A. B., & Tang, Y. Q. (2010). Aging performance for masters records in athletics, swimming, rowing, cycling, triathlon, and weightlifting. *Experimental aging research*, 36(4), 453-477. doi:10.1080/0361073X.2010.507433.
- Baker, S. P., O'Neill, B., Haddon, W., & Long, W. B. (1974). The injury severity score: a method for describing patients with multiple injuries and evaluating emergency care. *The Journal of Trauma*, 14(3), 187-196.
- Ballester, F., Corella, D., Pérez-Hoyos, S., Sáez, M., & Hervás, A. (1997). Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993. *International journal of epidemiology*, 26(3), 551-561.
- Barnett, A. G., Sans, S., Salomaa, V., Kuulasmaa, K., & Dobson, A. J. (2007). The effect of temperature on systolic blood pressure. *Blood pressure monitoring*, 12(3), 195-203. doi:10.1097/MBP.0b013e3280b083f4.

- Becher, C., Springer, J., Feil, S., Cerulli, G., & Paessler, H. H. (2008). Intra-articular temperatures of the knee in sports—An in-vivo study of jogging and alpine skiing. *BMC musculoskeletal disorders*, *9*(1), 46.
- Bennett, A. F. (1985). Temperature and muscle. *The Journal of experimental biology*, *115*, 333-344.
- Benson BW, Mohtadi NH, Rose M, & Meeuwisse WH. (1999). HEad and neck injuries among ice hockey players wearing full face shields vs half face shields. *JAMA*, *282*(24), 2328-2332. doi:10.1001/jama.282.24.2328.
- Bere, T., Flørenes, T. W., Krosshaug, T., Koga, H., Nordsletten, L., Irving, C., Muller, E., et al. (2011). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in World Cup alpine skiing: a systematic video analysis of 20 cases. *The American Journal of Sports Medicine*, *39*(7), 1421-1429. doi:10.1177/0363546511405147.
- Bergstrøm, K. A., Bergstrøm, A., & Ekeland, A. (2001). Organisation of safety measures in an Alpine World Junior Championship. *British Journal of Sports Medicine*, *35*(5), 321-324.
- Berns, G. S., Hull, M. L., & Patterson, H. A. (1992). Strain in the anteromedial bundle of the anterior cruciate ligament under combination loading. *Journal of Orthopaedic Research*, *10*(2), 167-176. doi:10.1002/jor.1100100203.
- Berthelot, G. (2014). The phenotypic expansion and its boundaries. *arXiv preprint arXiv:1401.7474*.
- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., El Helou, N., Escolano, S., Guillaume, M., et al. (2010). Technology & swimming: 3 steps beyond physiology. *Materials Today*, *13*(11), 46-51.
- Berthelot, G., Len, S., Hellard, P., Tafflet, M., Guillaume, M., Vollmer, J.-C., Gager, B., et al. (2012). Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, *34*(4), 1001-1009. doi:10.1007/s11357-011-9274-9.
- Berthelot, G., Thibault, V., Tafflet, M., Escolano, S., El Helou, N., Jouven, X., Hermine, O., et al. (2008). The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PloS One*, *3*(2), e1552. doi:10.1371/journal.pone.0001552.
- Besancenot, J.-P. (2003). La mortalité selon le contexte thermique. *Réalité présente et scénarios pour le XXIème siècle. Le cas de la France. GICC, Paris*, 1-54.

- Beynon, B. D., Johnson, R. J., Braun, S., Sargent, M., Bernstein, I. M., Skelly, J. M., & Vacek, P. M. (2006). The Relationship Between Menstrual Cycle Phase and Anterior Cruciate Ligament Injury A Case-Control Study of Recreational Alpine Skiers. *The American Journal of Sports Medicine*, *34*(5), 757-764. doi:10.1177/0363546505282624.
- Blair SN, Kohl HW, III, Paffenbarger RS, Jr, Clark DG, Cooper KH, et al. (1989). Physical fitness and all-cause mortality: A prospective study of healthy men and women. *JAMA*, *262*(17), 2395-2401. doi:10.1001/jama.1989.03430170057028.
- Boden, B. P., Dean, G. S., Feagin, J. A., Jr, & Garrett, W. E., Jr. (2000). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*, *23*(6), 573-578.
- Boivin, D. B., Czeisler, C. A., Dijk, D. J., Duffy, J. F., Folkard, S., Minors, D. S., Totterdell, P., et al. (1997). Complex interaction of the sleep-wake cycle and circadian phase modulates mood in healthy subjects. *Archives of general psychiatry*, *54*(2), 145-152.
- Bouter, L. M., Knipschild, P. G., & Volovics, A. (1989). Personal and environmental factors in relation to injury risk in downhill skiing. *International journal of sports medicine*, *10*(04), 298-301.
- Bouter, Lex M., Knipschild, P. G., Feij, J. A., & Volovics, A. (1988). Sensation seeking and injury risk in downhill skiing. *Personality and Individual Differences*, *9*(3), 667-673. doi:10.1016/0191-8869(88)90164-X.
- Brophy, R. H., Schmitz, L., Wright, R. W., Dunn, W. R., Parker, R. D., Andrich, J. T., McCarty, E. C., et al. (2012). Return to play and future ACL injury risk after ACL reconstruction in soccer athletes from the Multicenter Orthopaedic Outcomes Network (MOON) group. *The American journal of sports medicine*, *40*(11), 2517-2522.
- Burtscher, M., Sommersacher, R., Ruedl, G., & Nachbauer, W. (2009). Potential risk factors for knee injuries in alpine skiers. *Journal of ASTM International*, *6*(1), 73-76.
- Burtscher, Martin, Gatterer, H., Flatz, M., Sommersacher, R., Woldrich, T., Ruedl, G., Hotter, B., et al. (2008). Effects of modern ski equipment on the overall injury rate and the pattern of injury location in Alpine skiing. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *18*(4), 355-357.
- Busfield, B. T., Kharrazi, F. D., Starkey, C., Lombardo, S. J., & Seegmiller, J. (2009). Performance Outcomes of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in the National Basketball Association. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, *25*(8), 825-830. doi:10.1016/j.arthro.2009.02.021.



- Cantu, R. C., Li, Y. M., Abdulhamid, M., & Chin, L. S. (2013). Return to play after cervical spine injury in sports. *Current sports medicine reports*, 12(1), 14-17.
- Cantu, R. C., & Register-Mihalik, J. K. (2011). Considerations for return-to-play and retirement decisions after concussion. *PM&R*, 3(10), S440-S444.
- Carey, J. L., Huffman, G. R., Parekh, S. G., & Sennett, B. J. (2006). Outcomes of Anterior Cruciate Ligament Injuries to Running Backs and Wide Receivers in the National Football League. *The American Journal of Sports Medicine*, 34(12), 1911-1917. doi:10.1177/0363546506290186.
- Carr, D., Johnson, R. J., & Pope, M. H. (1981). Upper extremity injuries in skiing. *The American journal of sports medicine*, 9(6), 378-383.
- Chan, C. B., Ryan, D. A. J., & Tudor-Locke, C. (2006). Relationship between objective measures of physical activity and weather: a longitudinal study. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 3, 21. doi:10.1186/1479-5868-3-21.
- Chevront, S. N., & Haymes, E. M. (2001). Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(10), 743-762.
- Chmielewski, T. L., Jones, D., Day, T., Tillman, S. M., Lentz, T. A., & George, S. Z. (2008). The association of pain and fear of movement/reinjury with function during anterior cruciate ligament reconstruction rehabilitation. *journal of orthopaedic & sports physical therapy*, 38(12), 746-753.
- Clanton, T. O., Matheny, L. M., Jarvis, H. C., & Jeronimus, A. B. (2012). Return to Play in Athletes Following Ankle Injuries. *Sports Health: A Multidisciplinary Approach*, 1941738112463347.
- Clarke, K. S. (1975). Premises and pitfalls of athletic injury surveillance. *The American Journal of Sports Medicine*, 3(6), 292-295. doi:10.1177/036354657500300606.
- Cole, B. J., Ernlund, L. S., & Fu, F. H. (1999). Soft tissue problems of the knee. *Orthopaedic surgery: The essentials*. New York: Thieme Medical Publishers Inc, 551-60.
- Colombet, P., Allard, M., Bousquet, V., de Lavigne, C., Flurin, P.-H., & Lachaud, C. (2002). Anterior cruciate ligament reconstruction using four-strand semitendinosus and gracilis tendon grafts and metal interference screw fixation. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 18(3), 232-237.

- Colonna, D. V., Harrast, M. A., & Herring, S. A. (2012). Overview of spinal interventions. *Clinics in sports medicine*, 31(3), 409-422.
- Costill, D. L., Thomas, R., Robergs, R. A., Pascoe, D., Lambert, C., Barr, S., & Fink, W. J. (1991). Adaptations to swimming training: influence of training volume. *Medicine and science in sports and exercise*, 23(3), 371-377.
- Creighton, D. W., Shrier, I., Shultz, R., Meeuwisse, W. H., & Matheson, G. O. (2010). Return-to-play in sport: a decision-based model. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 20(5), 379-385.
- Cronin, C. (1991). Sensation seeking among mountain climbers. *Personality and Individual Differences*, 12(6), 653-654. doi:10.1016/0191-8869(91)90264-C.
- Cumps, E. dr, Verhagen, E., Annemans, L., & Meeusen, R. (2007). Injury risk and socio-economic costs resulting from sports injuries in Flanders. Data derived from Sports Insurance Statistics 2003. *British Journal of Sports Medicine*. doi:10.1136/bjism.2007.037937.
- Cupal, D. D. (1998). Psychological interventions in sport injury prevention and rehabilitation. *Journal of Applied Sport Psychology*, 10(1), 103-123.
- Daniel, D. M., Stone, M. L., Dobson, B. E., Fithian, D. C., Rossman, D. J., & Kaufman, K. R. (1994). Fate of the ACL-injured patient. A prospective outcome study. *The American journal of sports medicine*, 22(5), 632-644.
- Davidson, T. M., & Laliotis, A. T. (1996). Alpine skiing injuries. A nine-year study. *Western journal of medicine*, 164(4), 310.
- Davis, J. O. (1991). Sports injuries and stress management: An opportunity for research. *The Sport Psychologist*.
- Deibert, M. C., Aronsson, D. D., Johnson, R. J., Ettlinger, C. F., & Shealy, J. E. (1998). Skiing injuries in children, adolescents, and adults. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 80(1), 25-32.
- Demirag, B., Oncan, T., & Durak, K. (2004). An evaluation of knee ligament injuries encountered in skiers at the Uludağ Ski Center. *Acta orthopaedica et traumatologica turcica*, 38(5), 313-316.
- Deroche, T., Stephan, Y., Lecocq, G., & Le Scanff, C. (2007). Les déterminants psychologiques de la blessure physique du sportif : une revue de littérature. *Psychologie Française*,

- Psychologie de la santé et activités physiques et sportives, 52(4), 389-402.  
doi:10.1016/j.psfr.2007.05.005.
- Desgorces, F.-D., Berthelot, G., El Helou, N., Thibault, V., Guillaume, M., Tafflet, M., Hermine, O., et al. (2008). From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PloS one*, 3(11), e3653.  
doi:10.1371/journal.pone.0003653.
- Dewhurst, S., Macaluso, A., Gizzi, L., Felici, F., Farina, D., & De Vito, G. (2010). Effects of altered muscle temperature on neuromuscular properties in young and older women. *European journal of applied physiology*, 108(3), 451-458.
- Dewhurst, S., Riches, P. E., Nimmo, M. A., & De Vito, G. (2005). Temperature dependence of soleus H-reflex and M wave in young and older women. *European journal of applied physiology*, 94(5-6), 491-499.
- Dowling, P. A. (1982). Prospective study of injuries in United States Ski Association freestyle skiing-1976-77 to 1979-80. *The American journal of sports medicine*, 10(5), 268-275.
- Dragoo, J. L., Lee, R. S., Benhaim, P., Finerman, G. A. M., & Hame, S. L. (2003). Relaxin Receptors in the Human Female Anterior Cruciate Ligament. *The American Journal of Sports Medicine*, 31(4), 577-584.
- Drawer, S., & Fuller, C. W. (2001). Propensity for osteoarthritis and lower limb joint pain in retired professional soccer players. *British Journal of Sports Medicine*, 35(6), 402-408.  
doi:10.1136/bjism.35.6.402.
- Dubravicik, P., Szpilberg, M., & Maistrelli, G. (1982). Pattern of skiing injuries at Mount Tremblant: a changing dimension. *Ski Trauma and Skiing Safety IV*, 171-177.
- Earle, A. S., Moritz, J. R., Saviers, G. B., & Ball, J. D. (1962). Ski injuries. *JAMA*, 180(4), 285-288.
- Eastlack, M. E., Axe, M. J., & Snyder-Mackler, L. (1999). Laxity, instability, and functional outcome after ACL injury: copers versus noncopers. *Medicine and science in sports and exercise*, 31(2), 210-215.
- Eccles, R. (2002). An explanation for the seasonality of acute upper respiratory tract viral infections. *Acta oto-laryngologica*, 122(2), 183-191.
- Ekeland, A, Sulheim, S., & Rodven, A. (2005). Injury Rates and Injury Types in Alpine Skiing, Telemarking, and Snowboarding. *Journal of ASTM International*, 2(5), 12526.  
doi:10.1520/JAI12526.

- Ekeland, A., Dimmen, S., Lystad, H., & Aune, A. K. (1996). Completion rates and injuries in alpine races during the 1994 Olympic Winter Games. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 6(5), 287-290.
- Ekeland, Arne, & Holm, A. (1985). Injury and race completion rates in alpine competitions. Johnson RJ, Mote JR CD, eds. *Skiing trauma and safety: 5th International Symposium, ASTM STP* (Vol. 860, p. 293-301).
- Ekeland, Arne, Holtmoen, A., & Lystad, H. (1993). Lower extremity equipment-related injuries in alpine recreational skiers. *The American Journal of Sports Medicine*, 21(2), 201-205. doi:10.1177/036354659302100207.
- Ekeland, Arne, Nordsletten, L., Lystad, H., & Lereim, I. (1997). Previous skiing injuries in alpine Olympic racers. *Skiing trauma and safety: Eleventh Volume, ASTM STP*, 1289, 7-13.
- Ekeland, Arne, & Rødven, A. (2006). Injuries in Norwegian ski resorts 2002–2004. *Journal of ASTM international*, 3(8).
- Ekeland, Arne, Rødven, A., Johnson, R. J., Shealy, J., Langran, M., & Dean, S. W. (2008). Injury Trends in Norwegian Ski Resorts in the 10 Year Period 1996–2006. *Journal of ASTM International*, 5(6), 101620. doi:10.1520/JAI101620.
- Ekstrand, J., & Gillquist, J. (1983). Soccer injuries and their mechanisms: a prospective study. *Med Sci Sports Exerc*, 15(3), 267-270.
- El Helou, N. (2011). *Evolution des performances sportives: apport de l'épidémiologie pour l'analyse des performances sportives et des influences physiologiques, technologiques, génétiques et environnementales sur les progressions humaines au cours de l'ère olympique*. Thèse. Paris 5.
- El Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., Hausswirth, C., et al. (2012). Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS one*, 7(5), e37407. doi:10.1371/journal.pone.0037407.
- Ellis, J. L., & Gottlieb, J. E. (2007). Return-to-play decisions after cervical spine injuries. *Current sports medicine reports*, 6(1), 56-61.
- Ellison, A. E. (1977). Skiing injuries. *Clinical Symposia (Summit, N.J.: 1957)*, 29(1), 1-40.
- Ely, M. R., Cheuvront, S. N., Roberts, W. O., & Montain, S. J. (2007). Impact of weather on marathon-running performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(3), 487-493. doi:10.1249/mss.0b013e31802d3aba.

- Ely, M. R., Martin, D. E., Cheuvront, S. N., & Montain, S. J. (2008). Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Medicine and science in sports and exercise*, 40(9), 1675-1680. doi:10.1249/MSS.0b013e3181788da9.
- Engström, B., Forssblad, M., Johansson, C., & Tornkvist, H. (1990). Does a major knee injury definitely sideline an elite soccer player? *The American journal of sports medicine*, 18(1), 101-105.
- Engström, B., Johansson, C., & Tornkvist, H. (1991). Soccer injuries among elite female players. *The American Journal of Sports Medicine*, 19(4), 372-375. doi:10.1177/036354659101900408.
- Ettliger, C. F., Johnson, R. J., & Shealy, J. E. (1995). A method to help reduce the risk of serious knee sprains incurred in alpine skiing. *The American Journal of Sports Medicine*, 23(5), 531-537.
- Ettliger, C., Johnson, R., Shealy, J., & Dean, S. (2006). Functional and Release Characteristics of Alpine Ski Equipment. *Journal of ASTM International*, 3(7), 100408. doi:10.1520/JAI100408.
- Eynon, N., Ruiz, J. R., Oliveira, J., Duarte, J. A., Birk, R., & Lucia, A. (2011). Genes and elite athletes: a roadmap for future research. *The Journal of physiology*, 589(13), 3063-3070.
- Faryniarz, D. A., Bhargava, M., Lajam, C., Attia, E. T., & Hannafin, J. A. (2006). Quantitation of estrogen receptors and relaxin binding in human anterior cruciate ligament fibroblasts. *In vitro cellular & developmental biology. Animal*, 42(7), 176-181. doi:10.1290/0512089.1.
- Faude, O., Junge, A., Kindermann, W., & Dvorak, J. (2005). Injuries in Female Soccer Players A Prospective Study in the German National League. *The American Journal of Sports Medicine*, 33(11), 1694-1700. doi:10.1177/0363546505275011.
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS*. SAGE Publications.
- Fields, K. B., Delaney, M., & Hinkle, J. S. (1990). A prospective study of type A behavior and running injuries. *The Journal of family practice*.
- Finch, C. F., & Kelsall, H. L. (1998). The effectiveness of ski bindings and their professional adjustment for preventing alpine skiing injuries. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 25(6), 407-416.

- Finch, D. C. F. (1997). An Overview of Some Definitional Issues for Sports Injury Surveillance. *Sports Medicine*, 24(3), 157-163. doi:10.2165/00007256-199724030-00002.
- Flint, F. A. (1998). Integrating sport psychology and sports medicine in research: The dilemmas. *Journal of applied sport psychology*, 10(1), 83-102.
- Flørenes, T W, Bere, T., Nordsletten, L., Heir, S., & Bahr, R. (2009). Injuries among male and female World Cup alpine skiers. *British journal of sports medicine*, 43(13), 973-978. doi:10.1136/bjism.2009.068759.
- Flørenes, T W, Nordsletten, L., Heir, S., & Bahr, R. (2011). Recording injuries among World Cup skiers and snowboarders: a methodological study. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(2), 196-205. doi:10.1111/j.1600-0838.2009.01048.x
- Flørenes, Tonje Wåle. (2010). *Injury surveillance in World Cup skiing and snowboarding* (Thesis of Medicine). University of Oslo.
- Flynn, R. K., Pedersen, C. L., Birmingham, T. B., Kirkley, A., Jackowski, D., & Fowler, P. J. (2005). The familial predisposition toward tearing the anterior cruciate ligament: a case control study. *The American journal of sports medicine*, 33(1), 23-28.
- Forster, H., & Strohmenger, U. (1984). [The changing picture of ski accidents. Evaluation of ski injuries during the 1981/1982 Winter in Bavaria]. *Aktuelle Traumatologie*, 14(1), 1-4.
- Foster, R. G., & Roenneberg, T. (2008). Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycles. *Current biology: CB*, 18(17), R784-R794. doi:10.1016/j.cub.2008.07.003.
- Freixanet, M. G. (1991). Personality profile of subjects engaged in high physical risk sports. *Personality and Individual Differences*, 12(10), 1087-1093. doi:10.1016/0191-8869(91)90038-D.
- Fukuda, O., Takaba, M., Saito, T., & Endo, S. (2001). Head Injuries in Snowboarders Compared with Head Injuries in Skiers A Prospective Analysis of 1076 patients from 1994 to 1999 in Niigata, Japan. *The American journal of sports medicine*, 29(4), 437-440.
- Fuller, C. W., Ekstrand, J., Junge, A., Andersen, T. E., Bahr, R., Dvorak, J., Hägglund, M., et al. (2006). Consensus statement on injury definitions and data collection procedures in studies of football (soccer) injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 40(3), 193-201. doi:10.1136/bjism.2005.025270.

- Fuller, Colin W., Ekstrand, J., Junge, A., Andersen, T. E., Bahr, R., Dvorak, J., Hägglund, M., et al. (2006). Consensus statement on injury definitions and data collection procedures in studies of football (soccer) injuries. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 16(2), 97-106.
- Fuller, Colin W., Molloy, M. G., Bagate, C., Bahr, R., Brooks, J. H. M., Donson, H., Kemp, S. P. T., et al. (2007). Consensus statement on injury definitions and data collection procedures for studies of injuries in rugby union. *British Journal of Sports Medicine*, 41(5), 328-331. doi:10.1136/bjism.2006.033282.
- Fuller, D. C., & Drawer, S. (2004). The Application of Risk Management in Sport. *Sports Medicine*, 34(6), 349-356. doi:10.2165/00007256-200434060-00001.
- Furrer, M., Erhart, S., Frutiger, A., Bereiter, H., Leutenegger, A., & Ruedi, T. (1995). Severe skiing injuries: a retrospective analysis of 361 patients including mechanism of trauma, severity of injury, and mortality. *Journal of Trauma-Injury, Infection, and Critical Care*, 39(4), 737-741.
- Galloway, S. D., & Maughan, R. J. (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(9), 1240-1249.
- Gerend, M. A., Aiken, L. S., & West, S. G. (2004). Personality factors in older women's perceived susceptibility to diseases of aging. *Journal of personality*, 72(2), 243-270.
- Ghebre, M. A., Wannamethee, S. G., Rumley, A., Whincup, P. H., Lowe, G. D. O., & Morris, R. W. (2012). Prospective study of seasonal patterns in hemostatic factors in older men and their relation to excess winter coronary heart disease deaths. *Journal of thrombosis and haemostasis: JTH*, 10(3), 352-358. doi:10.1111/j.1538-7836.2012.04617.x
- Giuliani, J. R., Burns, T. C., Svoboda, S. J., Cameron, K. L., & Owens, B. D. (2011). Treatment of meniscal injuries in young athletes. *The Journal of Knee Surgery*, 24(2), 93-100.
- Greenwald, R. M., France, E. P., Rosenberg, T. D., & Toelcke, T. (1996). Significant gender differences in Alpine skiing injuries: a five-year study. *ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION*, 1266, 36-44.
- Greenwald, R. M., Nesshoever, M., & Boynton, M. D. (2000). Ski injury epidemiology: a short-term epidemiology study of injuries with skiboards. *ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION*, 1397, 119-126.

- Greenwood, J. D., Moses, G. E., Bernardino, F. M., Gaesser, G. A., & Weltman, A. (2008). Intensity of exercise recovery, blood lactate disappearance, and subsequent swimming performance. *Journal of Sports Sciences, 26*(1), 29-34. doi:10.1080/02640410701287263.
- Griffin, L. Y., Albohm, M. J., Arendt, E. A., Bahr, R., Beynon, B. D., DeMaio, M., Dick, R. W., et al. (2006). Understanding and Preventing Noncontact Anterior Cruciate Ligament Injuries A Review of the Hunt Valley II Meeting, January 2005. *The American Journal of Sports Medicine, 34*(9), 1512-1532. doi:10.1177/0363546506286866.
- Guillaume, M., El Helou, N., Nassif, H., Berthelot, G., Len, S., Thibault, V., Tafflet, M., et al. (2009). Success in developing regions: world records evolution through a geopolitical prism. *PLoS One, 4*(10), e7573.
- Guillaume, M., Len, S., Tafflet, M., Quinquis, L., Montalvan, B., Schaal, K., Nassif, H., et al. (2011). Success and decline: top 10 tennis players follow a biphasic course. *Medicine and science in sports and exercise, 43*(11), 2148-2154. doi:10.1249/MSS.0b013e31821eb533.
- Haddon, W., Ellison, A. E., & Carroll, R. E. (1962). Epidemiologic study. *Public Health Reports, 77*(11), 975-985.
- Häggglund, M., Waldén, M., Bahr, R., & Ekstrand, J. (2005). Methods for epidemiological study of injuries to professional football players: developing the UEFA model. *British Journal of Sports Medicine, 39*(6), 340-346. doi:10.1136/bjsm.2005.018267.
- Hamilton, S. L., Clemes, S. A., & Griffiths, P. L. (2008). UK adults exhibit higher step counts in summer compared to winter months. *Annals of Human Biology, 35*(2), 154-169. doi:10.1080/03014460801908058.
- Hampson, S. E., Andrews, J. A., Barckley, M., Lichtenstein, E., & Lee, M. E. (2000). Conscientiousness, perceived risk, and risk-reduction behaviors: A preliminary study. *Health Psychology, 19*(5), 496.
- Hanson, S. J., McCullagh, P., & Tonymon, P. (1992). The relationship of personality characteristics, life stress, and coping resources to athletic injury. *Journal of Sport and Exercise Psychology, 14*(3), 262-272.
- Harmon, K. G., Drezner, J. A., Gammons, M., Guskiewicz, K. M., Halstead, M., Herring, S. A., Kutcher, J. S., et al. (2013). American Medical Society for Sports Medicine position statement: concussion in sport. *British Journal of Sports Medicine, 47*(1), 15-26.



- Harrison, E. L., & Price, C. J. (1991). Sports injury/illness reporting at major sporting events: development and implementation of a data collection system. *Physiotherapy Canada. Physiotherapie Canada*, 44(4), 19-22.
- Harston, A., Nyland, J., Brand, E., McGinnis, M., & Caborn, D. N. M. (2012). Collagen meniscus implantation: a systematic review including rehabilitation and return to sports activity. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 20(1), 135-146. doi:10.1007/s00167-011-1579-9.
- Hart, Hauser, W. (1989). Experimental prospective skiing injury study. *Skiing Trauma and Safety: Seventh International Symposium* (Vol. 1022, p. 18). ASTM International.
- Hawkins, R. D., & Fuller, C. W. (1999). A prospective epidemiological study of injuries in four English professional football clubs. *British Journal of Sports Medicine*, 33(3), 196-203. doi:10.1136/bjism.33.3.196.
- Healy, J. D. (2003). Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *Journal of epidemiology and community health*, 57(10), 784-789.
- Heijne, A., Axelsson, K., Werner, S., & Biguet, G. (2008). Rehabilitation and recovery after anterior cruciate ligament reconstruction: patients' experiences. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 18(3), 325-335. doi:10.1111/j.1600-0838.2007.00700.x
- Herbert, D. L. (2007). Medical-legal issues of mild traumatic brain injury. *Current sports medicine reports*, 6(1), 20-24.
- Hewett, T. E., Ford, K. R., Hoogenboom, B. J., & Myer, G. D. (2010). Understanding and preventing acl injuries: current biomechanical and epidemiologic considerations - update 2010. *North American Journal of Sports Physical Therapy: NAJSPT*, 5(4), 234-251.
- Hewett, T. E., Myer, G. D., Ford, K. R., Heidt, R. S., Jr, Colosimo, A. J., McLean, S. G., van den Bogert, A. J., et al. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *The American journal of sports medicine*, 33(4), 492-501. doi:10.1177/0363546504269591.
- Heyman, E., DE Geus, B., Mertens, I., & Meeusen, R. (2009). Effects of four recovery methods on repeated maximal rock climbing performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 41(6), 1303-1310. doi:10.1249/MSS.0b013e318195107d.

- Hsiang, S. M., Meng, K. C., & Cane, M. A. (2011). Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature*, 476(7361), 438-441. doi:10.1038/nature10311.
- Hunter, R. E. (1999). Skiing Injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(3), 381-389.
- Huston, L. J., & Wojtys, E. M. (1996). Neuromuscular Performance Characteristics in Elite Female Athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(4), 427-436. doi:10.1177/036354659602400405.
- Hutchinson, M. R., & Ireland, M. L. (1995). Knee injuries in female athletes. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 19(4), 288-302.
- iaaf.org - International Association of Athletics Federations. (s. d.). Consulté septembre 26, 2012, de <http://www.iaaf.org>
- International Ski Federation website. (s. d.). Consulté de <http://data.fis-ski.com/alpine-skiing/biographies.html>.
- Jagoda, A. S. (2010). Mild traumatic brain injury: key decisions in acute management. *Psychiatric Clinics of North America*, 33(4), 797-806.
- Jamault, V., & Duff, E. (2013). Adolescent concussions: When to return to play. *The Nurse Practitioner*, 38(2), 16-22.
- Järvinen, M., Natri, A., Laurila, S., & Kannus, P. (1994). Mechanisms of anterior cruciate ligament ruptures in skiing. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 2(4), 224-228.
- Johnson, R. J. (1988). Prevention of cruciate ligament injuries. *The Crucial Ligaments*. New York, Churchill Livingstone, 349-356.
- Johnson, R. J., Ettliger, C. F., & Shealy, J. F. (2005). Injury trends, risk factors involving ACL injuries in alpine skiing. *Keynote Lecture during the 16th International Symposium on Ski Trauma and Skiing Safety* (Vol. 17, p. 22).
- Johnson, R. J., Pope, M. H., & Ettliger, C. (1974). Ski injuries and equipment function. *The Journal of Sports Medicine*, 2(6), 299-307.
- Johnson, Robert J., Ettliger, C. F., & Shealy, J. E. (1997). Skier injury trends: 1972 to 1994. *Skiing trauma and safety: eleventh volume, ASTM STP*, 1289, 37-48.
- Johnson, Robert J., Ettliger, C. F., Shealy, J. E., Johnson, R. J., Shealy, J., Langran, M., & Dean, S. W. (2008). Update on Injury Trends in Alpine Skiing. *Journal of ASTM International*, 5(10), 102046. doi:10.1520/JAI102046.

- Johnson, Robert J., Mote, C. D., & Binet, M.-H. (1989). *Skiing Trauma and Safety: Seventh International Symposium*. ASTM International.
- Johnson, Robert J., Mote, C. D., & Zelcer, J. (1993). *Skiing Trauma and Safety: Ninth International Symposium*. ASTM International.
- Johnson, Robert J., Pope, M. H., Weisman, G., White, B. F., & Ettliger, C. (1979). Knee injury in skiing A multifaceted approach. *The American journal of sports medicine*, 7(6), 321-327.
- Johnson, Robert J., Zucco, P., & Shealy, J. E. (2000). *Skiing Trauma and Safety: Thirteenth volume*. ASTM International.
- Jørgensen, U., Fredensborg, T., Haraszuk, J. P., & Crone, K.-L. (1998). Reduction of injuries in downhill skiing by use of an instructional ski-video: a prospective randomised intervention study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 6(3), 194-200. doi:10.1007/s001670050098.
- Josephson, K. R. (1984). Contraction dynamics of flight and stridulatory muscles of tettigoniid insects. *J. Exp. Biol.*, 108, 77-96.
- Junge, A, Engebretsen, L., Alonso, J. M., Renström, P., Mountjoy, M., Aubry, M., & Dvorak, J. (2008). Injury surveillance in multi-sport events: the International Olympic Committee approach. *British journal of sports medicine*, 42(6), 413-421. doi:10.1136/bjism.2008.046631.
- Junge, Astrid, & Dvorak, J. (2000). Influence of Definition and Data Collection on the Incidence of Injuries in Football. *The American Journal of Sports Medicine*, 28(suppl 5), S-40-S-46. doi:10.1177/28.suppl\_5.S-40.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Citeseer.
- Kenefick, R. W., Chevront, S. N., & Sawka, M. N. (2007). Thermoregulatory function during the marathon. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(4-5), 312-315.
- Kirkwood, B. R., & Sterne, J. A. (2003). Medical statistics. *Medical statistics*.
- Kocher, M. S., Dupré, M. M., & Feagin Jr, J. A. (1998). Shoulder injuries from alpine skiing and snowboarding. *Sports medicine*, 25(3), 201-211.
- Kocher, M. S., & Feagin, J. A. (1996). Shoulder Injuries During Alpine Skiing. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(5), 665-669. doi:10.1177/036354659602400517.

- Koehle, M. S., Lloyd-Smith, R., & Taunton, J. E. (2002). Alpine Ski Injuries and Their Prevention. *Sports Medicine*, 32(12), 785-793. doi:10.2165/00007256-200232120-00003.
- Koehler, K., Braun, H., Achtzehn, S., Hildebrand, U., Predel, H.-G., Mester, J., & Schänzer, W. (2012). Iron status in elite young athletes: gender-dependent influences of diet and exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 112(2), 513-523. doi:10.1007/s00421-011-2002-4.
- Köhne, G., Kusche, H., Schaller, C., & Gutsfeld, P. (2007). Ski accidents—changes since introduction of carving ski. *Sportorthopädie Sporttraumatologie*, 23, 63-67.
- Kolt, G. S., & Kirkby, R. J. (1994). Injury, anxiety, and mood in competitive gymnasts. *Perceptual and motor skills*, 78(3), 955-962.
- Korbel, P. J., & Zelcer, J. (1982). A controlled study of skiing injuries in Australia. *Ski Trauma and Skiing Safety IV*, 178-183.
- Krosshaug, T., Slauterbeck, J. R., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2007). Biomechanical analysis of anterior cruciate ligament injury mechanisms: three-dimensional motion reconstruction from video sequences. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 17(5), 508-519. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00558.x
- Kucera, K. L., Marshall, S. W., Kirkendall, D. T., Marchak, P. M., & Garrett, W. E. (2005). Injury history as a risk factor for incident injury in youth soccer. *British journal of sports medicine*, 39(7), 462-462.
- Kühnert, B., & Nieschlag, E. (2004). Reproductive functions of the ageing male. *Human Reproduction Update*, 10(4), 327-339. doi:10.1093/humupd/dmh030
- Lafollie, D. (2007). [Detection of high-risk personalities in risky sports]. *L'Encéphale*, 33(2), 135-141.
- Laker, S. R. (2011). Return-to-play decisions. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 22(4), 619-634.
- Lamont, M. K. (1991). Ski injury statistics-what changes. *Skiing trauma and safety: eighth international symposium, ASTM STP* (Vol. 1104, p. 158-63).
- Langran, M., Jachacy, G. B., & MacNeill, A. (1996). SKI Injuries in Scotland a Review of Statistics from Cairngorm SKI Area Winter 1993/94. *Scottish Medical Journal*, 41(6), 169-172. doi:10.1177/003693309604100605.

- Langran, M., & Selvaraj, S. (2002). Snow sports injuries in Scotland: a case-control study. *British journal of sports medicine*, 36(2), 135-140.
- Laporte, J.-D., Binet, M.-H., & Constans, D. (2000). Evolution of ACL ruptures in French ski resorts 1992-1999. *ASTM special technical publication*, 1397, 95-107.
- Lavallée, L., & Flint, F. (1996). The relationship of stress, competitive anxiety, mood state, and social support to athletic injury. *Journal of athletic training*, 31(4), 296.
- Lee, D. Y., Karim, S. A., & Chang, H. C. (2008). Return to Sports After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction--A Review of Patients with Minimum 5-year Follow-up. *Annals Academy of Medicine Singapore*, 37(4), 273.
- Legnani, C., Terzaghi, C., Borgo, E., & Ventura, A. (2011). Management of anterior cruciate ligament rupture in patients aged 40 years and older. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 12(4), 177-184.
- Levy, I. M. (1988). Formulation and sense of the NAIRS athletic injury surveillance system. *The American Journal of Sports Medicine*, 16 Suppl 1, S132-133.
- Ljungqvist, A., Jenoure, P. J., Engebretsen, L., Alonso, J. M., Bahr, R., Clough, A. F., de Bondt, G., et al. (2009). The International Olympic Committee (IOC) Consensus Statement on Periodic Health Evaluation of Elite Athletes, March 2009: *Clinical Journal of Sport Medicine*, 19(5), 347-365. doi:10.1097/JSM.0b013e3181b7332c.
- Lloyd, E. L. (1994). ABC of sports medicine. Temperature and performance. I: Cold. *BMJ: British Medical Journal*, 309(6953), 531-534.
- Lobenhoffer, P. (1999). [Injuries of the knee ligaments. II. Surgical therapy of anterior and posterior knee instability]. *Der Chirurg; Zeitschrift für alle Gebiete der operativen Medizen*, 70(3), 326-338.
- Loës, D. M. de. (1997). Exposure Data. *Sports Medicine*, 24(3), 172-175. doi:10.2165/00007256-199724030-00005.
- Lund-Hanssen, H., Gannon, J., Engebretsen, L., Holen, K. J., Anda, S., & Vatten, L. (1994). Intercondylar notch width and the risk for anterior cruciate ligament rupture. A case-control study in 46 female handball players. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 65(5), 529-532.
- Lystad, H. (1989). A five-year survey of skiing injuries in Hemsedal, Norway. *Skiing Trauma and Safety: Seventh International Symposium. Philadelphia, American Society for Testing and Materials* (p. 32-40).

- Macnab, A. J., & Cadman, R. (1996). Demographics of alpine skiing and snowboarding injury: lessons for prevention programs. *Injury Prevention: Journal of the International Society for Child and Adolescent Injury Prevention*, 2(4), 286-289.
- Maddison, R., & Prapavessis, H. (2005). A psychological approach to the prediction and prevention of athletic injury. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 27(3), 289.
- Magnanou, E., Attia, J., Fons, R., Boeuf, G., & Falcon, J. (2009). The timing of the shrew: continuous melatonin treatment maintains youthful rhythmic activity in aging *Crocidura russula*. *PloS One*, 4(6), e5904. doi:10.1371/journal.pone.0005904.
- Magnusson, A. (2000). An overview of epidemiological studies on seasonal affective disorder. *Acta psychiatrica Scandinavica*, 101(3), 176-184.
- Marcacci, M., Zaffagnini, S., Iacono, F., Neri, M. P., & Petitto, A. (1995). Early Versus Late Reconstruction for Anterior Cruciate Ligament Rupture Results After Five Years of Followup. *The American journal of sports medicine*, 23(6), 690-693.
- Margreiter, R., Raas, E., & Luggler, L. J. (1976). The risk of injury in experienced Alpine skiers. *The Orthopedic Clinics of North America*, 7(1), 51-54.
- Marijon, E., Tafflet, M., Antero-Jacquemin, J., El Helou, N., Berthelot, G., Celermajer, D. S., Bougouin, W., et al. (2013). Mortality of French participants in the Tour de France (1947-2012). *European Heart Journal*, 34(40), 3145-3150. doi:10.1093/eurheartj/eh347.
- Marino, F. E., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2004). Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 96(1), 124-130. doi:10.1152/jappphysiol.00582.2003.
- Marshall, J. R., Warren, R., & Fleiss, D. J. (1975). Ligamentous injuries of the knee in skiing. *Clinical orthopaedics and related research*, 108, 196-199.
- Marshall, S., Padua, D., & McGrath, M. (2007). *Understanding and Preventing Noncontact ACL Injuries*. Human Kinetics.
- Matheson, G. O., Shultz, R., Bido, J., Mitten, M. J., Meeuwisse, W. H., & Shrier, I. (2011). Return-to-play decisions: are they the team physician's responsibility? *Clinical Journal of Sport Medicine*, 21(1), 25-30.
- Mayers, L. (2008). Return-to-play criteria after athletic concussion: a need for revision. *Archives of neurology*, 65(9), 1158-1161.

- Mcalister, R., Brody, J. A., Hammes, L. M., Feltz, E. T., Duncan, D. L., & Williams, M. L. (1965). Epidemiology of ski injuries in the anchorage area. *Archives of Environmental Health*, *10*, 910-914.
- McBeth, P. B., Ball, C. G., Mulloy, R. H., & Kirkpatrick, A. W. (2009). Alpine ski and snowboarding traumatic injuries: incidence, injury patterns, and risk factors for 10 years. *The American Journal of Surgery*, Papers from the North Pacific Surgical Association Presented at the 95th Annual Meeting held in Seattle, Washington, November 14 & 15, 2008, *197*(5), 560-564. doi:10.1016/j.amjsurg.2008.12.016.
- McCormack, G. R., Friedenreich, C., Shiell, A., Giles-Corti, B., & Doyle-Baker, P. K. (2010). Sex- and age-specific seasonal variations in physical activity among adults. *Journal of Epidemiology and Community Health*, *64*(11), 1010-1016. doi:10.1136/jech.2009.092841.
- McCullough, B. J., & Jarvik, J. G. (2011). Diagnosis of concussion: the role of imaging now and in the future. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, *22*(4), 635-652.
- McCullough, K. A., Phelps, K. D., Spindler, K. P., Matava, M. J., Dunn, W. R., Parker, R. D., Reinke, E. K., et al. (2012). Return to High School—and College-Level Football After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction A Multicenter Orthopaedic Outcomes Network (MOON) Cohort Study. *The American journal of sports medicine*, *40*(11), 2523-2529.
- Mechelen, Willem van. (1997). The Severity of Sports Injuries. *Sports Medicine*, *24*(3), 176-180. doi:10.2165/00007256-199724030-00006.
- Mechelen, Willem van, Hlobil, H., & Kemper, H. C. G. (1992). Incidence, Severity, Aetiology and Prevention of Sports Injuries. *Sports Medicine*, *14*(2), 82-99. doi:10.2165/00007256-199214020-00002.
- Meeuwisse, P. W. H., & Love, E. J. (1997). Athletic Injury Reporting. *Sports Medicine*, *24*(3), 184-204. doi:10.2165/00007256-199724030-00008.
- Meeuwisse, W. H. (2009). What is the Mechanism of No Injury (MONI)? *Clinical Journal of Sport Medicine*, *19*(1), 1-2.
- Meeuwisse, W. H., Tyreman, H., Hagel, B., & Emery, C. (2007). A dynamic model of etiology in sport injury: the recursive nature of risk and causation. *Clinical Journal of Sport Medicine*, *17*(3), 215-219.

- Merkur, A., Whelan, K. M., Kuah, E., & Choo, P. (2003). The effect of ski shape on injury occurrence in downhill skiing. *ASTM special technical publication, 1440*, 129-139.
- Mikkelsen, C., Werner, S., & Eriksson, E. (2000). Closed kinetic chain alone compared to combined open and closed kinetic chain exercises for quadriceps strengthening after anterior cruciate ligament reconstruction with respect to return to sports: a prospective matched follow-up study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 8*(6), 337-342.
- Mitchell, W. K., Williams, J., Atherton, P., Larvin, M., Lund, J., & Narici, M. (2012). Sarcopenia, Dynapenia, and the Impact of Advancing Age on Human Skeletal Muscle Size and Strength; a Quantitative Review. *Frontiers in Physiology, 3*. doi:10.3389/fphys.2012.00260.
- Mogan, J. V., & Davis, P. H. (1982). Upper extremity injuries in skiing. *Clinics in sports medicine, 1*(2), 295-308.
- Molinari, M., Bertoldi, L., & Zucco, P. (1996). Epidemiology of skiing injuries in a large Italian ski resort during 1988-1992. *ASTM special technical publication, 1266*, 87-97.
- Montain, S. J., Ely, M. R., & Cheuvront, S. N. (2007). Marathon performance in thermally stressing conditions. *Sports medicine (Auckland, N.Z.), 37*(4-5), 320-323.
- Moore, D. H., 2nd. (1975). A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature, 253*(5489), 264-265.
- Moritz, J. R. (1959). Ski injuries. *American Journal of Surgery, 98*, 493-505.
- Mujika, I. (2010). Intense training: the key to optimal performance before and during the taper. *Scandinavian journal of medicine & science in sports, 20 Suppl 2*, 24-31. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01189.x.
- Myer, G. D., Ford, K. R., Paterno, M. V., Nick, T. G., & Hewett, T. E. (2008). The Effects of Generalized Joint Laxity on Risk of Anterior Cruciate Ligament Injury in Young Female Athletes. *The American Journal of Sports Medicine, 36*(6), 1073-1080. doi:10.1177/0363546507313572.
- Myklebust, G., Maehlum, S., Holm, I., & Bahr, R. (1998). A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. *Scandinavian journal of medicine & science in sports, 8*(3), 149-153.



- Nakayama, Y., Shirai, Y., Narita, T., Mori, A., & Kobayashi, K. (2000). Knee functions and a return to sports activity in competitive athletes following anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Nippon Medical School*, 67(3), 172-176.
- National Federation of state High School Associations. (s. d.). <http://www.nfhs.org>. High school participation survey.
- Natri, A., Beynnon, B. D., Ettlinger, C. F., Johnson, R. J., & Shealy, J. E. (1999). Alpine ski bindings and injuries. *Sports medicine*, 28(1), 35-48.
- Neptune, R. R., McGowan, C. P., & Fiandt, J. M. (2009). The influence of muscle physiology and advanced technology on sports performance. *Annual review of biomedical engineering*, 11, 81-107.
- Noyes, F. R., Lindenfeld, T. N., & Marshall, M. T. (1988). What determines an athletic injury (definition)? Who determines an injury (occurrence)? *The American Journal of Sports Medicine*, 16 Suppl 1, S65-68.
- Oksa, J., Rintamäki, H., & Rissanen, S. (1997). Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different levels of cold exposure. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 75(6), 484-490.
- Oliver, B. C., & Allman, F. L. (1991). Alpine skiing injuries: an epidemiological study. *Skiing Trauma and Safety: 8th International Symposium, ASTM STP* (Vol. 1104, p. 164-169).
- Olsen, O.-E., Myklebust, G., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Injury Mechanisms for Anterior Cruciate Ligament Injuries in Team Handball A Systematic Video Analysis. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(4), 1002-1012. doi:10.1177/0363546503261724.
- Orchard, J., Newman, D., Stretch, R., Frost, W., Mansingh, A., & Leipus, A. (2005). Methods for injury surveillance in international cricket. *Journal of Science and Medicine in Sport / Sports Medicine Australia*, 8(1), 1-14.
- Osborn, Z. H., Blanton, P. D., & Schwebel, D. C. (2009). Personality and injury risk among professional hockey players. *Journal of injury & violence research*, 1(1), 15-19. doi:10.5249/jivr.v1i1.8.
- Owona, J. W. (2008). Le basketball professionnel masculin en France: analyse des données médicales de la ligue nationale de basketball.

- Park, D. C., & Reuter-Lorenz, P. (2009). The Adaptive Brain: Aging and Neurocognitive Scaffolding. *Annual Review of Psychology*, 60, 173-196. doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093656.
- Perna, F. M., Antoni, M. H., Baum, A., Gordon, P., & Schneiderman, N. (2003). Cognitive behavioral stress management effects on injury and illness among competitive athletes: a randomized clinical trial. *Annals of Behavioral Medicine: A Publication of the Society of Behavioral Medicine*, 25(1), 66-73.
- Petrie, T. A. (1993a). Coping skills, competitive trait anxiety, and playing status: Moderating effects on the life stress-injury relationship. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 15, 261-261.
- Petrie, T. A. (1993b). The moderating effects of social support and playing status on the life stress-injury relationship. *Journal of Applied Sport Psychology*, 5(1), 1-16.
- Pizzari, T., McBurney, H., Taylor, N. F., & Feller, J. A. (2002). Adherence to anterior cruciate ligament rehabilitation: a qualitative analysis. *Journal of Sport Rehabilitation*, 11(2), 90-103.
- Plaweski, S., Huboud-Peron, A., Faure, C., & Merloz, P. (1997). Traumatologie des sports d'hiver: Etude épidémiologique rétrospective à propos de 260 blessés. *Journal de traumatologie du sport*, 14(3), 129-135.
- Pluim, B. M., Fuller, C. W., Batt, M. E., Chase, L., Hainline, B., Miller, S., Montalvan, B., et al. (2009). Consensus statement on epidemiological studies of medical conditions in tennis, April 2009. *British Journal of Sports Medicine*, 43(12), 893-897. doi:10.1136/bjism.2009.064915.
- Podlog, L., & Eklund, R. C. (2006). A longitudinal investigation of competitive athletes' return to sport following serious injury. *Journal of applied sport psychology*, 18(1), 44-68.
- Primiano, G. A. (1985). Skiers' thumb injuries associated with flared ski pole handles. *The American journal of sports medicine*, 13(6), 425-427.
- Pujol, N., Blanchi, M. P. R., & Chambat, P. (2007). The Incidence of Anterior Cruciate Ligament Injuries Among Competitive Alpine Skiers A 25-year Investigation. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(7), 1070-1074. doi:10.1177/0363546507301083.
- Purcell, L. (2009). What are the most appropriate return-to-play guidelines for concussed child athletes? *British journal of sports medicine*, 43(Suppl 1), i51-i55.

- Putukian, M. (2006). Repeat mild traumatic brain injury: How to adjust return to play guidelines. *Current sports medicine reports*, 5(1), 15-22.
- Putukian, M. (2011). Neuropsychological testing as it relates to recovery from sports-related concussion. *PM&R*, 3(10), S425-S432.
- Raas, E. (1982). Some aspects of injuries in competitive skiers. *Ski Trauma and Skiing Safety IV: Proceedings of the Fourth Conference Held in Italy 1981* (TUEV Edition., p. 202-206). Munich.
- Ramesh, R., Arx, O. V., Azzopardi, T., & Schranz, P. J. (2005). The risk of anterior cruciate ligament rupture with generalised joint laxity. *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume*, 87-B(6), 800-803. doi:10.1302/0301-620X.87B6.15833
- Règlement FIS. (2013). Les règlements des concours internationaux du ski (RIS). Consulté août 5, 2014, de [http://www.fis-ski.com/mm/Document/documentlibrary/AlpineSkiing/03/29/73/RIS\\_03.08.13.clean\\_Neutral.pdf](http://www.fis-ski.com/mm/Document/documentlibrary/AlpineSkiing/03/29/73/RIS_03.08.13.clean_Neutral.pdf).
- Régnier-Loilier, A., & Rohrbasser, J.-M. (2011, janvier). Y-a-t-il une saison pour faire des enfants? *Population & sociétés*, p. 1-4.
- Requa, R. K., Toney, J. M., & Garrick, J. G. (1976). Parameters of injury reporting in skiing. *Medicine and science in sports*, 9(3), 185-190.
- Rihn, J. A., Anderson, D. T., Lamb, K., Deluca, P. F., Bata, A., Marchetto, P. A., Neves, N., et al. (2009). Cervical spine injuries in American football. *Sports medicine*, 39(9), 697-708.
- Rocklöv, J., & Forsberg, B. (2008). The effect of temperature on mortality in Stockholm 1998-2003: a study of lag structures and heatwave effects. *Scandinavian journal of public health*, 36(5), 516-523. doi:10.1177/1403494807088458.
- Rogers, T. J., Alderman, B. L., & Landers, D. M. (2003). Effects of life-event stress and hardiness on peripheral vision in a real-life stress situation. *Behavioral Medicine*, 29(1), 21-26.
- Rogers, T. J., & Landers, D. M. (2005). Mediating effects of peripheral vision in the life event stress/athletic injury relationship. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 27, 271-288.
- Roos, H., Ornell, M., Gärdsell, P., Lohmander, L. S., & Lindstrand, A. (1995). Soccer after anterior cruciate ligament injury--an incompatible combination? A national survey of

- incidence and risk factors and a 7-year follow-up of 310 players. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 66(2), 107-112.
- Rossi, B., & Cereatti, L. (1993). The sensation seeking in mountain athletes as assessed by Zuckerman's Sensation Seeking Scale. *International Journal of Sport Psychology*, 24(4), 417-431.
- Ruedl, G., Fink, C., Schranz, A., Sommersacher, R., Nachbauer, W., & Burtscher, M. (2012). Impact of environmental factors on knee injuries in male and female recreational skiers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(2), 185–189. doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01286.x
- Ruedl, G., Pocecco, E., Sommersacher, R., Gatterer, H., Kopp, M., Nachbauer, W., & Burtscher, M. (2010). Factors associated with self-reported risk-taking behaviour on ski slopes. *British Journal of Sports Medicine*, 44(3), 204-206. doi:10.1136/bjism.2009.066779.
- Ruedl, Gerhard, Webhofer, M., Linortner, I., Schranz, A., Fink, C., Patterson, C., Nachbauer, W., et al. (2011). ACL injury mechanisms and related factors in male and female carving skiers: a retrospective study. *International journal of sports medicine*, 32(10), 801.
- Rules for the FIS Alpine points. (2014). *FIS-SKI*. Consulté août 5, 2014, de [http://www.fis-ski.com/mm/Document/documentlibrary/AlpineSkiing/02/06/69/FisptsEdition1415\\_v5\\_10714\\_English.pdf](http://www.fis-ski.com/mm/Document/documentlibrary/AlpineSkiing/02/06/69/FisptsEdition1415_v5_10714_English.pdf).
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American psychologist*, 55(1), 68.
- Sandberg, R., & Balkfors, B. (1988). Reconstruction of the anterior cruciate ligament A 5-year follow-up of 89 patients. *Acta Orthopaedica*, 59(3), 288-293.
- Saragaglia, D., Diemer, C., Peron, A. H., Kirchmeier, M., & Vouillat, H. (2001). Évolution de la traumatologie du ski alpin : comparaison de deux études réalisées à 20 ans d'intervalle à Grenoble (1968-1976 et 1990-1997). *Rhumatologie* (Vol. 53, p. 34-45).
- Sarna, S., Sahi, T., Koskenvuo, M., & Kaprio, J. (1993). Increased life expectancy of world class male athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 25(2), 237.
- Sarraf, K. M., Sadri, A., Thevendran, G., & Vedi, V. (2010). Approaching the ruptured anterior cruciate ligament. *Emergency Medicine Journal*.

- Schaal, K., Tafflet, M., Nassif, H., Thibault, V., Pichard, C., Alcotte, M., Guillet, T., et al. (2011). Psychological balance in high level athletes: gender-based differences and sport-specific patterns. *PloS one*, 6(5), e19007. doi:10.1371/journal.pone.0019007.
- Sedeaud, A. (2013). *Caractéristiques anthropométriques et performances de haut niveau: évolutions, indicateurs et optimisations*. Paris 5.
- Shah, V. M., Andrews, J. R., Fleisig, G. S., McMichael, C. S., & Lemak, L. J. (2010). Return to Play After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in National Football League Athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(11), 2233-2239. doi:10.1177/0363546510372798.
- Shealy, J. E., Ettlinger, C. F., & Johnson, R. J. (2010). Aging trends in Alpine skiing. *Journal of ASTM International (JAI)*, 7(4), JAI102875. doi:10.1520/JAI102875.
- Shealy, Jasper E., & Ettlinger, C. F. (1996). Gender-related injury patterns in skiing. *ASTM special technical publication*, 1266, 45-57.
- Shelbourne, K. D., & Gray, T. (1997). Anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon graft followed by accelerated rehabilitation A two-to nine-year followup. *The American journal of sports medicine*, 25(6), 786-795.
- Shelbourne, K. D., & Urch, S. E. (2000). Primary anterior cruciate ligament reconstruction using the contralateral autogenous patellar tendon. *The American journal of sports medicine*, 28(5), 651-658.
- Sherry, E., & Fenelon, L. (1991). Trends in skiing injury type and rates in Australia. A review of 22,261 injuries over 27 years in the Snowy Mountains. *The Medical Journal of Australia*, 155(8), 513-515.
- Shultz, S. J., Shimokochi, Y., Nguyen, A.-D., Schmitz, R. J., Beynon, B. D., & Perrin, D. H. (2007). Measurement of varus–valgus and internal–external rotational knee laxities in vivo—Part II: relationship with anterior–posterior and general joint laxity in males and females. *Journal of Orthopaedic Research*, 25(8), 989-996. doi:10.1002/jor.20398
- Silvers, H. J., Mandelbaum, B. R., Adeniji, O., Insler, S., Bizzini, M., & Dvorak, J. (2014). The Efficacy Of The Fifa 11+ Injury Prevention Program In The Collegiate Male Soccer Player. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 2(2 suppl), 2325967114S00082.
- Site de l'agence technique de l'information sur l'hospitalisation (ATIH). (s. d.). *Les données du PMSI du traitement des ruptures du ligament croisé*. <http://www.atih.sante.fr>. Consulté juin 16, 2014.

- Smith, R. E., Smoll, F. L., & Ptacek, J. T. (1990). Conjunctive moderator variables in vulnerability and resiliency research: life stress, social support and coping skills, and adolescent sport injuries. *Journal of Personality and Social Psychology*, *58*(2), 360-370.
- Somero, G. N. (2002). Thermal Physiology and Vertical Zonation of Intertidal Animals: Optima, Limits, and Costs of Living. *Integrative and Comparative Biology*, *42*(4), 780-789. doi:10.1093/icb/42.4.780.
- Spaite, D. W., Murphy, M., Criss, E. A., Valenzuela, T. D., & Meislin, H. W. (1991). A prospective analysis of injury severity among helmeted and nonhelmeted bicyclists involved in collisions with motor vehicles. *The Journal of Trauma*, *31*(11), 1510-1516.
- Spengler, C. M., & Shea, S. A. (2000). Endogenous circadian rhythm of pulmonary function in healthy humans. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *162*(3 Pt 1), 1038-1046.
- Spindler, K. P., Kuhn, J. E., Freedman, K. B., Matthews, C. E., Dittus, R. S., & Harrell, F. E. (2004). Anterior cruciate ligament reconstruction autograft choice: Bone-tendon-bone versus hamstring does it really matter? a systematic review. *The American Journal of Sports Medicine*, *32*(8), 1986-1995.
- Standaert, C. J., Herring, S. A., & Cantu, R. C. (2007). Expert opinion and controversies in sports and musculoskeletal medicine: concussion in the young athlete. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, *88*(8), 1077-1079.
- Stanojevic, S., Wade, A., Stocks, J., Hankinson, J., Coates, A. L., Pan, H., Rosenthal, M., et al. (2008). Reference Ranges for Spirometry Across All Ages. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, *177*(3), 253-260. doi:10.1164/rccm.200708-1248OC.
- Steffen, K., Meeuwisse, W. H., Romiti, M., Kang, J., McKay, C., Bizzini, M., Dvorak, J., et al. (2013). Evaluation of how different implementation strategies of an injury prevention programme (FIFA 11+) impact team adherence and injury risk in Canadian female youth football players: a cluster-randomised trial. *British journal of sports medicine*, bjsports-2012-091887.
- Steinacker, J. M., Lormes, W., Kellmann, M., Liu, Y., Reissnecker, S., Opitz-Gress, A., Baller, B., et al. (2000). Training of junior rowers before world championships. Effects on

- performance, mood state and selected hormonal and metabolic responses. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 40(4), 327-335.
- Stephenson, S., Gissane, C., & Jennings, D. (1996). Injury in rugby league: a four year prospective survey. *British Journal of Sports Medicine*, 30(4), 331-334. doi:10.1136/bjism.30.4.331.
- Stevenson, H., Webster, J., Johnson, R., & Beynnon, B. (1998). Gender differences in knee injury epidemiology among competitive alpine ski racers. *The Iowa Orthopaedic Journal*, 18, 64-66.
- Sulheim, S., Holme, I., Ekeland, A., & Bahr, R. (2006). Helmet use and risk of head injuries in alpine skiers and snowboarders. *Jama*, 295(8), 919-924.
- Sulheim, S., Holme, I., Rødven, A., Ekeland, A., & Bahr, R. (2011). Risk factors for injuries in alpine skiing, telemark skiing and snowboarding – case-control study. *British Journal of Sports Medicine*, bjsports-2011-090407. doi:10.1136/bjsports-2011-090407.
- Sumilo, D., & Stewart-Brown, S. (2006). The causes and consequences of injury in students at UK institutes of higher education. *Public health*, 120(2), 125-131.
- Tapper, E. M., & Moritz, J. R. (1974). Changing patterns in ski injuries. *Phys Sportsmed*, 2, 39-47.
- Tarazi, F., Dvorak, M. F. S., & Wing, P. C. (1999). Spinal Injuries in Skiers and Snowboarders. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(2), 177-180.
- Taylor, A. M. (2012). Neuropsychological evaluation and management of sport-related concussion. *Current opinion in pediatrics*, 24(6), 717-723.
- Teramoto, M., & Bungum, T. J. (2010). Mortality and longevity of elite athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13, 410-416. doi:10.1016/j.jsams.2009.04.010.
- The Eurowinter Group. (1997). Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. *Lancet*, 349(9062), 1341-1346. doi:10.1016/S0140-6736(96)12338-2.
- Therminarias, A., Quirion, A., & Pellerei, E. (1987). Effets de l'exposition au froid sur les variations plasmatiques du lactate et des ions induites par un exercice musculaire aérobie intense. *Science & Sports*, 2(1), 1-8. doi:10.1016/S0765-1597(87)80039-4.

- Timpka, T., Jacobsson, J., Bickenbach, J., Finch, C. F., Ekberg, J., & Nordenfelt, L. (2014). What is a sports injury? *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(4), 423-428. doi:10.1007/s40279-014-0143-4.
- Tjong, V. K., Murnaghan, M. L., Nyhof-Young, J. M., & Ogilvie-Harris, D. J. (2014). A Qualitative Investigation of the Decision to Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction To Play or Not to Play. *The American Journal of Sports Medicine*, 42(2), 336-342. doi:10.1177/0363546513508762.
- Torjussen, J., & Bahr, R. (2005). Injuries among competitive snowboarders at the national elite level. *The American journal of sports medicine*, 33(3), 370-377.
- Toth, A. P., & Cordasco, F. A. (2001). Anterior cruciate ligament injuries in the female athlete. *The journal of gender-specific medicine: JGSM: the official journal of the Partnership for Women's Health at Columbia*, 4(4), 25-34.
- Tourny, C., Sangnier, S., Cotte, T., Langlois, R., & Coquart, J. (2014). Epidemiologic study of young soccer player's injuries in U12 to U20. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 54(4), 526-535.
- Tourny-Chollet, C., Leroy, D., Léger, H., & Beuret-Blanquart, F. (2000). Isokinetic knee muscle strength of soccer players according to their position. *Isokinetics and Exercise Science*, 8(4), 187-193.
- Tripp, D. A., Stanish, W., Ebel-Lam, A., Brewer, B. W., & Birchard, J. (2011). Fear of reinjury, negative affect, and catastrophizing predicting return to sport in recreational athletes with anterior cruciate ligament injuries at 1 year postsurgery.
- Ungerholm, S., Gierup, J., Lindsjö, U., & Magnusson, A. (1985). Skiing injuries in children: lower leg fractures. *International journal of sports medicine*, 6(05), 292-297.
- Urabe, Y., Ochi, M., Onari, K., & Ikuta, Y. (2002). Anterior cruciate ligament injury in recreational alpine skiers: analysis of mechanisms and strategy for prevention. *Journal of Orthopaedic Science: Official Journal of the Japanese Orthopaedic Association*, 7(1), 1-5. doi:10.1007/s007760200000.
- US Consumer Product Safety Commission. (1999). Skiing helmets: an evaluation of the potential to reduce head injury. *Washington, DC: US Government Printing Office*.
- Van Mechelen, W., Twisk, J., Molendijk, A., Blom, B., Snel, J., & Kemper, H. C. (1996). Subject-related risk factors for sports injuries: a 1-yr prospective study in young adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 28(9), 1171-1179.



- Viola, R. W., Steadman, J. R., Mair, S. D., Briggs, K. K., & Sterett, W. I. (1999). Anterior Cruciate Ligament Injury Incidence Among Male and Female Professional Alpine Skiers. *The American Journal of Sports Medicine*, 27(6), 792-795.
- Vollrath, M., Knoch, D., & Cassano, L. (1999). Personality, risky health behaviour, and perceived susceptibility to health risks. *European Journal of Personality*, 13(1), 39-50.
- Warne, W. J., Feagin, J. A., King, P., Lambert, K. L., & Cunningham, R. R. (1995). Ski Injury Statistics, 1982 to 1993, Jackson Hole Ski Resort. *The American Journal of Sports Medicine*, 23(5), 597-600. doi:10.1177/036354659502300514.
- Weather Forecast & Reports - Long Range & Local | Wunderground | Weather Underground. (s. d.). Consulté septembre 26, 2012, de <http://www.wunderground.com>.
- Webb, J. M., Corry, I. S., Clingeffer, A. J., & Pinczewski, L. A. (1998). Endoscopic reconstruction for isolated anterior cruciate ligament rupture. *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume*, 80-B(2), 288-294.
- Webster, K. E., Feller, J. A., Leigh, W. B., & Richmond, A. K. (2014). Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction. *The American journal of sports medicine*, 42(3), 641-647. doi:10.1177/0363546513517540.
- White, A. T., & Johnson, S. C. (1993). Physiological aspects and injury in elite Alpine skiers. *Sports medicine (Auckland, NZ)*, 15(3), 170-178.
- Wikstrom, E. A., Tillman, M. D., Chmielewski, T. L., & Borsa, P. A. (2006). Measurement and evaluation of dynamic joint stability of the knee and ankle after injury. *Sports medicine*, 36(5), 393-410.
- Williams, J. M., & Andersen, M. B. (1997). Psychosocial influences on central and peripheral vision and reaction time during demanding tasks. *Behavioral Medicine*, 22(4), 160-167.
- Williams, J. M., & Andersen, M. B. (1998). Psychosocial antecedents of sport injury: Review and critique of the stress and injury model'. *Journal of applied sport psychology*, 10(1), 5-25.
- Williams, J. M., Tonymon, P., & Andersen, M. B. (1990). Effects of life-event stress on anxiety and peripheral narrowing. *Behavioral Medicine*, 16(4), 174-181.
- Williams-Avery, R. M., & Mackinnon, D. P. (1996). Injuries and use of protective equipment among college in-line skaters. *Accident Analysis & Prevention*, 28(6), 779-784.

- Wojtys, E. M., Huston, L. J., Lindenfeld, T. N., Hewett, T. E., & Greenfield, M. L. V. H. (1998). Association Between the Menstrual Cycle and Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female Athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 26(5), 614-619.
- Wright, J. R., Hixson, E. G., & Rand, J. J. (1986). Injury patterns in nordic ski jumpers A retrospective analysis of injuries occurring at the Intervale ski jump complex from 1980 to 1985. *The American journal of sports medicine*, 14(5), 393-397.
- Yang, N., MacArthur, D. G., Gulbin, J. P., Hahn, A. G., Beggs, A. H., Easteal, S., & North, K. (2003). ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *American Journal of Human Genetics*, 73(3), 627-631. doi:10.1086/377590.
- Young, L. R., Oman, C. M., Crane, H., Emerton, A., & Heide, R. (1976). The etiology of ski injuries: an eight year study of the skier and his equipment. *The Orthopedic Clinics of North America*, 7(1), 13-29.
- Young, Laurence R., & Lee, S. M. (1991). Alpine Injury Pattern at Waterville Valley—1989 Update. *Skiing Trauma and Safety: Eighth International Symposium, ASTM STP* (Vol. 1104, p. 125-132).
- Zaffagnini, S., Bruni, D., Russo, A., Takazawa, Y., Lo Presti, M., Giordano, G., & Marcacci, M. (2008). ST/G ACL reconstruction: double strand plus extra-articular sling vs double bundle, randomized study at 3-year follow-up. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 18(5), 573-581.
- Zuckerman, M. (1983). Sensation seeking and sports. *Personality and Individual Differences*, 4(3), 285-292. doi:10.1016/0191-8869(83)90150-2.

## **Annexes**

### Annexe 1

#### **Environment and Scheduling Effects on Sprint and Middle Distance Running Performances**

Amal Haïda, Frédéric Dor, Marion Guillaume, Laurent Quinquis, Andy Marc, Laurie-Anne Marquet, Juliana Antero-Jacquemin, Claire Tourny-Chollet, François Desgorces, Geoffroy Berthelot, Jean-François Toussaint

### Annexe 2

#### **Return-to-the-Performance after an Anterior Cruciate Ligament Rupture among French Alpine Skiers between 1980 and 2013**

Amal Haïda, Nicolas Coulmy, Frédéric Dor, Juliana Antero-Jacquemin, Adrien Marck, Thibaut Ledanois, Claire Tourny-Chollet, Adrien Sedeaud, Marie-Philippe Rousseaux-Blanchi, Pierre Chambat, Jean-François Toussaint

### Annexe 3

#### **Marathon progress: demography, morphology and environment**

Andy Marc, Adrien Sedeaud, Marion Guillaume, Melissa Rizk, Julien Schipman, Juliana Antero-Jacquemin, Amal Haïda, Geoffroy Berthelot & Jean-François Toussaint

### Annexe 4

#### **Medical reasons behind leaves from male and female professional tennis competitions**

Karine Kryger, Frederic Dor, Marion Guillaume, Amal Haïda, Philippe Noirez, Bernard Montalvan, and Jean-François Toussaint

### Annexe 5

#### **BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement**

Adrien Sedeaud, Andy Marc, Adrien Marck, Frédéric Dor, Julien Schipman, Maya Dorsey, Amal Haïda, Geoffroy Berthelot, Jean-François Toussaint

### Annexe 6

#### **Row For Your Life: A century of mortality follow-up of French Olympic Rowers**

Juliana Antero-Jacquemin, François Desgorces, Frédéric Dor, Adrien Sedeaud, Amal Haïda, Philippe LeVan, Jean-François Toussaint

Annexe 7

**Build Mass Optimization: a key for new records in women athletes?**

Adrien Sedeaud, Andy Marc, Adrien Marck, Juliana Antero-Jacquemin, Amal Haïda,  
Julien Schipman, Jean-François Toussaint

# Environment and Scheduling Effects on Sprint and Middle Distance Running Performances

Amal Haïda<sup>1,2\*</sup>, Frédéric Dor<sup>1</sup>, Marion Guillaume<sup>1</sup>, Laurent Quinquis<sup>1</sup>, Andy Marc<sup>1</sup>, Laurie-Anne Marquet<sup>1</sup>, Juliana Antero-Jacquemin<sup>1</sup>, Claire Tourny-Chollet<sup>2</sup>, François Desgorces<sup>1,3</sup>, Geoffroy Berthelot<sup>1,3</sup>, Jean-François Toussaint<sup>1,3,4</sup>

**1** IRMES (biomedical Research Institute of Sports Epidemiology, Paris, France), INSEP (Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance), Paris, France, **2** Université de Rouen, Faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique CETAPS (Centre d'Etude Transformations des Activités Physiques et Sportives), Mont-Saint-Aignan, France, **3** Paris Descartes University, Sorbonne, Paris Cité, Paris, France, **4** Hôtel-Dieu Hospital, CIMS (Centre d'Investigations en Médecine du Sport), AP-HP (Assistance Publique-Hôpitaux de Paris), Paris, France

## Abstract

**Purpose:** Achievement of athletes' performances is related to several factors including physiological, environmental and institutional cycles where physical characteristics are involved. The objective of this study is to analyse the performance achieved in professional sprint and middle-distance running events (100 m to 1500 m) depending on the organization of the annual calendar of track events and their environmental conditions.

**Methods:** From 2002 to 2008, all performances of the Top 50 international athletes in the 100 m to 1500 m races (men and women) are collected. The historical series of world records and the 10 best annual performances in these events, amounted to a total of 26,544 performances, are also included in the study.

**Results:** Two periods with a higher frequency of peak performances are observed. The first peak occurs around the 27.15<sup>th</sup> ±0.21 week (first week of July) and the second peak around 34.75<sup>th</sup> ±0.14 week (fourth week of August). The second peak tends to be the time of major international competitions (Olympic Games, World Championships, and European Championships) and could be characterized as an institutional moment. The first one, however, corresponds to an environmental optimum as measured by the narrowing of the temperature range at the highest performance around 23.25 ± 3.26°C.

**Conclusions:** This is the first study to demonstrate that there are two performance peaks at a specific time of year (27th and 34th weeks) in sprint and middle distance. Both institutional and ecophysiological aspects contribute to performance in the 100 m to 1500 m best performances and define the contours of human possibilities. Sport institutions may take this into account in order to provide ideal conditions to improve the next records.

**Citation:** Haïda A, Dor F, Guillaume M, Quinquis L, Marc A, et al. (2013) Environment and Scheduling Effects on Sprint and Middle Distance Running Performances. PLoS ONE 8(11): e79548. doi:10.1371/journal.pone.0079548

**Editor:** Alejandro Lucia, Universidad Europea de Madrid, Spain

**Received:** July 19, 2013; **Accepted:** September 23, 2013; **Published:** November 20, 2013

**Copyright:** © 2013 Haïda et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Funding:** The authors thank the Centre National de Développement du sport and the Ministry of Health, Youth and Sports for financial assistance. The funders had no role in study design, data gathering, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript. The corresponding author had full access to all data in the study and had final responsibility for the decision to submit for publication.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

\* E-mail: amal.haida@insep.fr

## Introduction

Since the beginning of the modern Olympic era (1896), the best performance (BP) are in a process of exponential growth which now seems to have reached its limits [1]. Performance is often understood as a very broad term which involves many components such as : psychomotor abilities, flexibility and joint stiffness, muscle strength and power [2]. Athletes, like any living organism, depend on physiological regulations that respect the nycthemeral, seasonal or vital cycles [3]. There are variations in physiological factors such as maximum oxygen consumption (VO<sub>2</sub> max) or concentrations of melatonin on the basis of seasonal rhythms [4]. This seasonal rhythmicity has been demonstrated for certain factors such as mood [5], lung function [6] and the core body temperature. It is also observed in the physical activity of the

general population, which tends to be higher during summer [7–9]. Chan and colleagues (2006) [9] found a significant change in physical activity in the general population, as number of steps walked per day being related to temperature, precipitation and wind speed.

There is a limited amount of research that has investigated effects of seasonality in sports on sprint athletes' performances. Yet the annual schedule of events seems to be a contributing factor to performance. Comparison of track and field world records (WR) shows that performance prevails in summertime. The influence of environmental parameters on physiology (ecophysiology) partly determines the evolution of human performance [10,11]. Marathon optimal performances are set at a temperature around 10°. This performance dependency on

temperature occurs not only for elite-standard athletes but for all participants also [12–14].

The objective of this study is to compare the date and temperature of the BP in sprint and middle distance races (100 m to 1500 m) for men and women during the annual calendar of international competitions, and observe their evolution over the Olympic era in order to assess the environment and scheduling effects on sprint and middle distance running performances.

## Methods

### Data Collection

From 2002 to 2008, all performances of the Top 50 international athletes in running events ranging from 100 m to 1500 m races for men and women were collected from the official website of the International Association of Athletics Federations (IAAF) [15]. For each event, data collection includes: full name of the athlete, the completion date and place of the competition: 23,746 performances are collected, 11,813 from males and 11,933 from females. Performances are divided into five categories defining the performance as a percentage in relation to the BP obtained at the event. The percent categories (PC) used were: [95–96%], [96–97%], [97–98%], [98–99%], [99–100%]. Within each group, performances were collected according to the competition type: (i) major competitions (the Olympic Games (OG), World Championships (WC), European Championships (EC) and American selections (US)), (ii) the international circuit represented by the Golden League and (iii) other meetings.

Date, place and name of the athlete when WR were set for the same distances between 1952 and 2010 are collected (181 WR) and the performances of the top 10 male and female 100 m race are gathered from 1891 to 2008, representing 2,617 performances.

Temperatures for each city, at the time of the competition, are recorded from 97 to 100 PC in 100 m, 200 m, 400 m, 800 m and 1500 m. In order to improve resolution, half PC are defined to study temperature density: [97–97.5%], [97.5–98%], [98–98.5%], [98.5–99%], [99–99.5%], [99.5–100%]. Temperature data are collected from the weather underground website [16].

The total number of performances collected for this study is 26,544.

### Statistical Analysis

**Distribution of performance by PC.** The performance data from 2002 to 2008 is based on the distribution of performance per week of the year depending on the PC and the type of competition: mathematical analysis and modeling are done using Matlab. To estimate the two dates when the greatest numbers of performances occur, two functions are adjusted using the least squares method: the double Gaussian and double Lorentzian functions. For each PC, the best-fitted function is selected on the basis of adjusted  $R^2$  and the mean square error (RMSE) (See Materials and Methods S1, Figure S1, Tables S1 and S2). The two dates of peak performance are estimated using the elected model for each PC (Inert Figure 1). The proportion of performances in the two peaks is estimated by computing the area under the curve (proportion of performances) of each elected model and for each PC (See Materials and Methods S1, Figure S2, Table S2).

### Distribution of WR

Effect size for One-Way ANOVA is Cohen's  $d$  and is evaluated with Cohen's conventional criteria [17]. It is used to study the stability of the WR mean date by decades (1952–1959, 1960–

1969, 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2010). Statistical significance is considered at  $p < 0.05$ .

### Temperature

For the temperature, the statistical analyses are done on R, Version 3.0.0 (R Core Team, Vienna, Austria, 2013) and results are expressed as a mean  $\pm$  standard deviation. Fisher test is used to compare the dispersions between the different PC with a value of  $p < 0.05$  considered significant.

We estimate the density of temperature degrees for each of the PC over a homogeneous mesh of  $5 \times 6$  nodes. The resolution used is of  $7.5^\circ\text{C}$  in the x-axis (temperature) and 0.59 percent in the y-axis PC.

## Results

### Distribution of Performance by PC and Competition

The distribution of weekly performances for each PC (95 to 100 PC) over the competition calendar shows two high frequency periods (Figure 1). The estimated dates of the two peak performances are constant within all PC (on mean  $27.15^{\text{th}} \pm 0.21$  week for peak 1 and  $34.75^{\text{th}} \pm 0.14$  for peak 2) (Figure 1, Inset).

Reaching the highest level, the areas under the curves of both peaks converge toward the same 50% value (See Figure S2).

The number of performances during major competitions (OG/WC/US/EC) increases from 16.7% for the 95 PC to 25.7% for the 99 PC. The performances recorded during the Golden League increase from 7.7% for the 95 PC to 29.1% for the 99 PC. Conversely, the number of performances in the other competitions decreases from 75.6% to 45.1% (Figure 1) (See Table S3).

### Distribution of WR

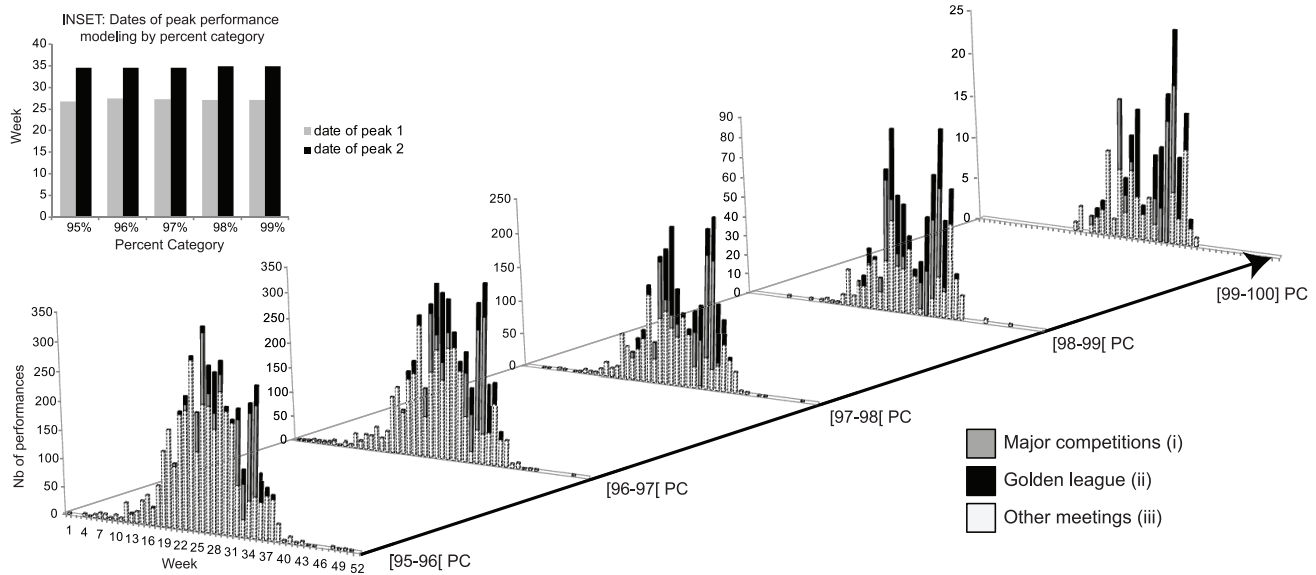
The mean distribution of WR date by decade from 1952 to 2010 is concentrated at the  $206.09^{\text{th}} \text{ day} \pm 46.17$ . The variability of WR date decreases considerably. In the first period (1952–1959), SD is 64.34, in the last period (2000–2010), SD is 35.09. However the mean day remains stable throughout the period ( $p = 0.29$ ) (Figure 2), with a large effect size ( $d = 0.98$ ).

### Influence of Temperature on Performance

The analysis of the distribution of PC according to temperature shows a restriction in the thermal interval when reaching the highest performance level. This interval narrows from  $10\text{--}32^\circ\text{C}$  at 97 PC of the BP to  $20\text{--}27^\circ\text{C}$  for the 100 PC with a mean temperature of  $23.23 \pm 4.75^\circ\text{C}$ . Subdividing the data into PC, the mean temperature is  $23.13 \pm 4.80^\circ\text{C}$  for the PC [97 to 97.5],  $23.49 \pm 4.88^\circ\text{C}$  for the PC [97.5 to 98],  $23.23 \pm 4.92^\circ\text{C}$  for the PC [98 to 98.5],  $22.89 \pm 4.56^\circ\text{C}$  for the PC [98.5 to 99],  $22.63 \pm 3.72^\circ\text{C}$  for the PC [99 to 99.5] and  $23.25 \pm 3.26^\circ\text{C}$  for the BP [99.5 to 100]. Figure 3 highlights the narrowing of the temperature range at the BP interval. The peak value of the density mesh is 362 temperature values at  $23^\circ\text{C}$  and at 97.59%. The density decreases in both dimensions (temperature and PC) from this point confirming the mean temperature value stated above (Inset, Figure 3).

### Top 10 Sprinters from 1891 to 2008

There is no evolutionary trend in the completion date on the 100 m performances throughout the modern Olympic era. Since 1891, men accomplish their best performance around July  $10^{\text{th}}$  ( $\pm 50$  days) *id est* during the  $28^{\text{th}}$  week and since 1921, women perform best around July  $20^{\text{th}}$  ( $\pm 44$  days) *id est* during the  $29^{\text{th}}$  week (Figure 4).



**Figure 1. Number of performances per week and per percent category (PC) by (i) major competitions (Olympic Games (OG), World Championships (WC), American selections (US), European championships (EC)), (ii) Golden League and the others meetings (iii).** INSET: Dates (week) of peaks performance modeling by PC. doi:10.1371/journal.pone.0079548.g001

**Discussion**

Our study is the first to our knowledge to analyze the exhaustiveness of the best performers in sprint and middle distance races in relation to temperature.

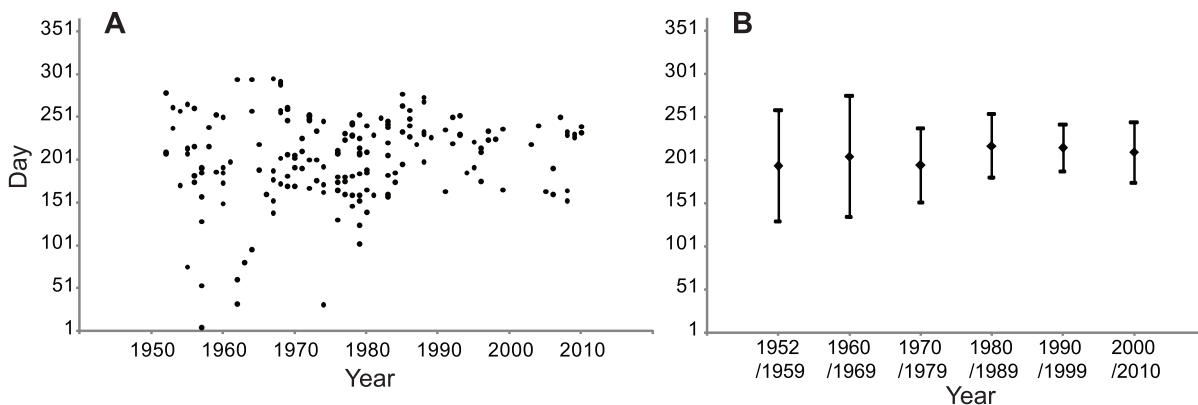
Previous studies have mostly analysed seasonality in the rhythms of daily life [2,18] or in marathon runners [12] but no studies have demonstrated effects of seasonality through environmental or institutional conditions on performance in sprint.

Two yearly performance peaks are observed for all levels in this study. The first peak corresponds to the 27<sup>th</sup> week of the year (first week of July) suggesting an environmental optimum for sprint events. The second peak occurs at the 34<sup>th</sup> week (fourth week of August), which is related to the main sporting events such as: Olympic Games, European and World Championships. As seen in Figure 1, both peak dates are stable throughout all performance categories.

**Cultural Peak at the 34<sup>th</sup> Week**

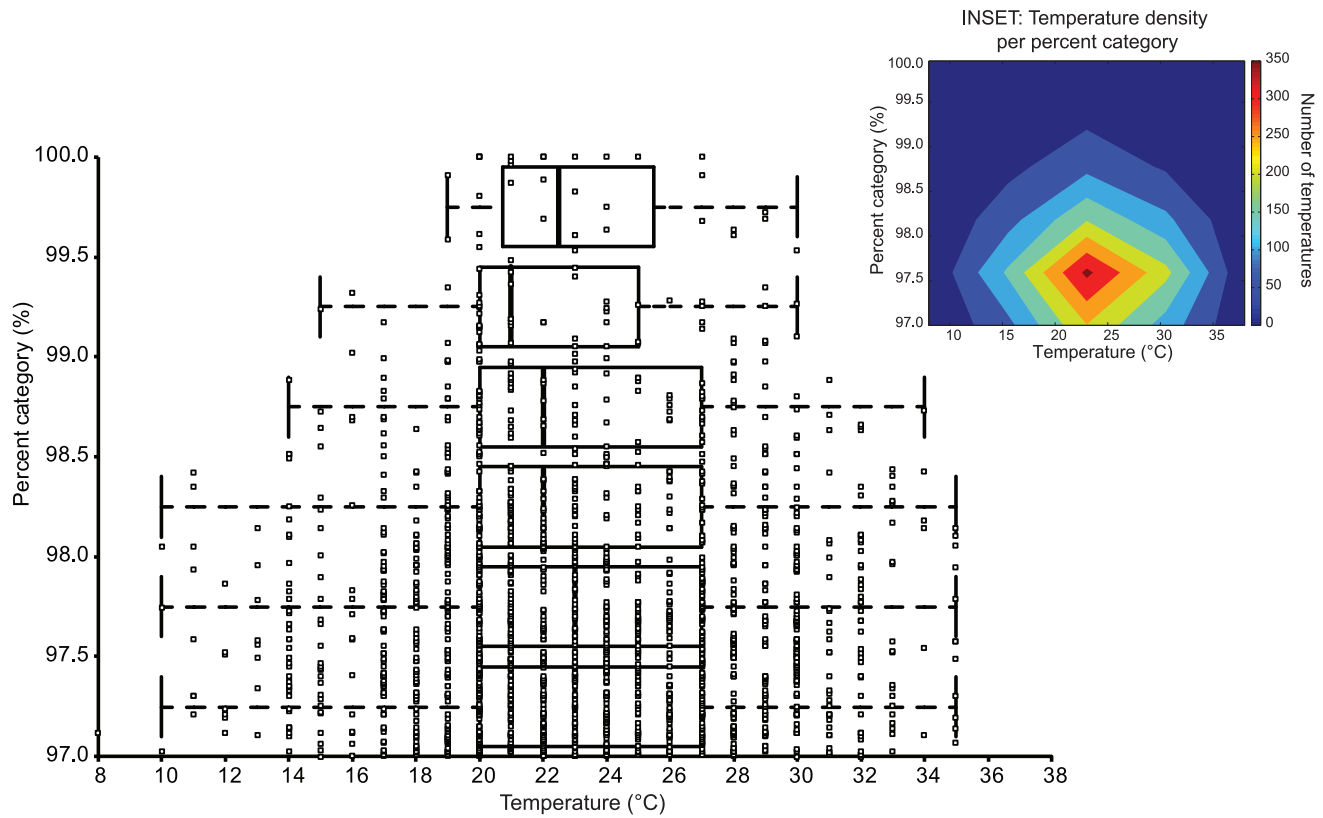
The impact of major international competitions corresponds to the performance peak in August. The calendar scheduling for world championships or Olympic Games can be considered as an institutional attractor. IAAF hosts competitions taking place outdoor between February and October. Major competitions such as the World Championships, European championships and Olympic Games are usually scheduled in August whereas the international circuit of the Golden League covers the whole period between June and September. National federations plan their own schedules proposing competitions that allow their athletes to qualify for the major competitions.

This study highlights the existence of a cultural peak (second peak) occurring at the same times as the major international events. Globally, top athletes focus on the same goal: to be the most physically and mentally fit for this time of the year (Figure 1). This second peak corresponds to the athlete’s own planning for major competitions, which is a result of long term training,



**Figure 2. A. Distribution of world records (WR) date (day) in 100 m, 200 m, 400 m, 800 m and 1500 m running events from 1952 to 2010. B. Mean distribution of world records (WR) date (day) in 100 m, 200 m, 400 m, 800 m and 1500 m running events by decade from 1952 to 2010. The mean date is: 206,09 th day.** doi:10.1371/journal.pone.0079548.g002





**Figure 3. Percent category (PC) depending on temperature: comparison of temperature at different level from 97 PC to 100 PC in 100 m, 200 m, 400 m, 800 m and 1500 m.** Respectively, in each half PC the mean are 23.12°C, 23.49°C, 23.23°C, 22.89°C, 22.63°C and 23.25°C and the median are 23.00°C, 23.00°C, 22.00°C, 22.00°C, 21.00°C and 22.50°C. INSET: Temperature density (ie. number of recorded temperatures) per PC computed over a mesh. The maximal density is computed at 23°C and 97.59% and progressively decreases as PC increase (due to the decrease in performance number). The density decreases as temperature increases or decreases from the maximal density (due to the effect of temperature on performance).  
doi:10.1371/journal.pone.0079548.g003

technical analysis, strategic choice, awareness of physical and psychological limits [19–21].

Although, training and preparation are essential to reach a BP at a specific moment, environmental factors will allow the achievement of the highest level of performance.

### Thermal Peak at the 27<sup>th</sup> Week

The analysis of WR (Figure 2) and the top 10 BP in 100 m sprint (men and women) illustrates this first peak (Figure 4). Numerous studies have demonstrated effects of environmental conditions on the performance of marathon runners [22,23].

Marathon requires a number of appropriate environmental conditions for thermoregulation of any runner, elite or amateur. The humidity, barometric pressure, dew point, and temperature are all essential in the quest of achieving optimal performance [24].

A recent study analysed the impact of environmental parameters on the performance of marathon running. It established a distribution of performances depending on temperature, observed regardless of the athlete’s level. This distribution function defines the field limits of the human possibilities [12]. The impact of temperature and season on biological parameters is largely documented in the literature [24–26].

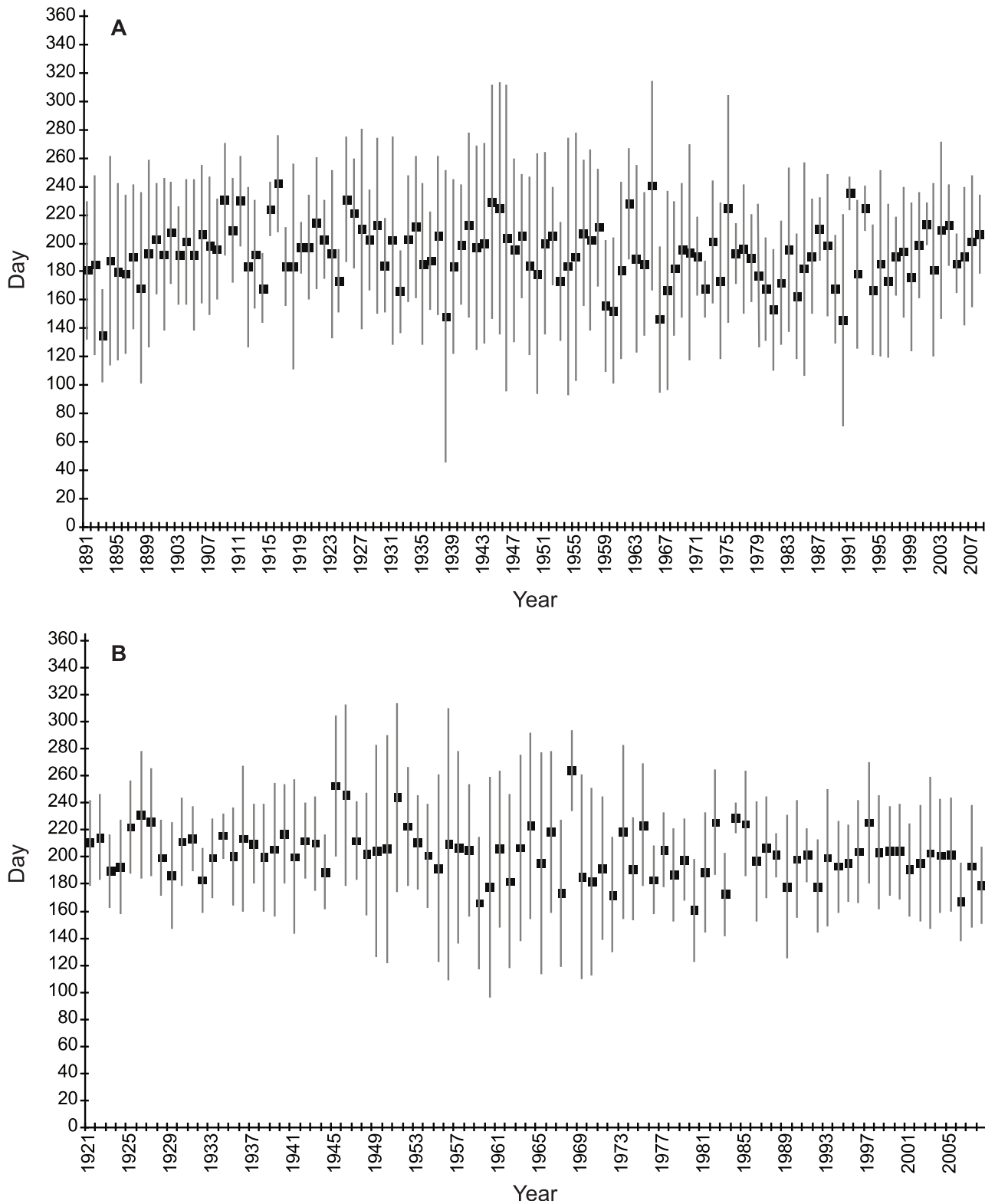
In this present study, the results show a distribution for top performance in sprint and middle-sprint where the effective temperature range decreases with performance level (10–32°C at the bottom (97 PC of the BP); 20–27°C at the top (100 PC of the

BP)) (Figure 3). Competitions are mainly organized in the northern hemisphere. The range of temperatures collected from the different host cities was large: ranging from 10 to 38°C but the mean temperature when achieving the BP is  $23.23 \pm 4.75^\circ\text{C}$ .

The standard deviations decrease progressively with increasing level, but all categories remain centered on the 23.23°C value. This suggests a very regulated process at all performance levels.

**The effects of temperature on biological parameters.** All biological structures and processes (human or not) are affected by temperature in thermodynamical regulations [27]. Performance depends on physiological responses to exercise performance in an interaction between body temperature and environmental temperature [26]. Performance decreases progressively as the environmental heat stress increases [25]. As with other biological rate processes, muscle function is strongly influenced by temperature. Specifically, muscle contraction rates (the rates of both force development and relaxation) are accelerated by an increase in temperature in both invertebrates and vertebrates [28,29]. Fundamental biological functions like metabolic activity synchronize with the rhythmic phases of environmental change such as temperature. For gradually intensity increasing aerobic exercise the plasma concentration of certain ions ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and lactic acids appear differently when muscular exercise takes place at thermal neutrality (21°C) in comparison to exercise performed at 0°C [30].

At the favorable season, body temperature and metabolic rates increase and so does growth rate. Mammal growth depends on



**Figure 4. Relation between day of the performance and year in men and women. A.** Average day of the achievement of the performance in the top 10 at the 100 m men since 1891. For all years combined, the average day is the 192.76<sup>th</sup> ± 49.77. **B.** Average day of the achievement of the performance in the top 10 at the 100 m women since 1921. For all years combined, the average day is the 202.52<sup>th</sup> ± 44.0. doi:10.1371/journal.pone.0079548.g004

seasonal variation even for their bones structure [31]. Climates and seasons have a marked influence on human biology [18] including mental abilities [32], sexual activity [33] or territorial conflicts [34].

**Temperature and mortality.** Many chronobiological health aspects depend on season and temperature cycles. Affective disorders show a predictable onset in the fall/winter months and, reversely, a reduction in the spring/summer period [32]. Large-scale population studies have shown seasonal variations in mortality rates in different parts of the world peaking during the cold winter months [35,36]. Relations between mortality and cardiovascular disease (CVD) in the winter months have been reported for many countries and might be partly explained by seasonal changes of risk factors. Cardiac death also depend on the season even after adjustment for age, cholesterol, blood pressure, and body mass index [36,37]. Several studies have reported the existence of optimal ranges of air temperatures [38,39]. Specifically, cold weather has been reported to be associated with increased risk of death from cardiovascular causes and respiratory infections [39–41]. The mortality rate is lower on days in which the maximum temperatures range between 20–25°C [38]. This means that survival rate is highest at this temperature range.

Our results show a mean temperature of  $23.23 \pm 4.75^\circ\text{C}$  for the BP which is converging with the temperature of the lowest mortality rates. Therefore, both survival capability and physiological capacities of the human are optimal at 20–25°C.

The two peaks of performance change its distribution in function of the performance level (See Figures S1 and S2). However, the first peak which corresponds to a “thermal peak” persists even at the highest level of competition. This demonstrates that despite the presence of an institutional attractor, represented by the major competitions, the environmental attractor remains omnipresent with an ideal temperature period for maximal performance. The adequacy of the thermal peak is as important as the cultural peak at the highest level.

## Conclusion

The range of possible combinations of environmental and institutional components is narrowed for the top performers. For sprint and middle-sprint races, when progressing toward the highest levels of performance, the importance of the institutional component regularly increases with a balanced effect for the top performers.

The novelty of this study is that, environmental conditions must be taken into account in order to achieve maximal speed. This field of possibilities reveals an ideal temperature to achieve optimal performance.

Calendars for major competitions should take this into account in order to increase the probability of breaking the next records.

## Supporting Information

**Figure S1 Date of peak performance modeling for 95% to 99% categories.** The Double Lorentzian (continuous line) and Double Gaussian functions (broken line) are adjusted to each

## References

- Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, et al. (2008) The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE* 3: e1552. doi:10.1371/journal.pone.0001552.
- Atkinson G, Drust B (2005) Seasonal rhythms and exercise. *Clin Sports Med* 24: e25–34, xii–xiii. doi:10.1016/j.csm.2004.11.001.
- Magnanou E, Attia J, Fons R, Boeuf G, Falcon J (2009) The timing of the shrew: continuous melatonin treatment maintains youthful rhythmic activity in aging *Crocicidura russula*. *PLoS ONE* 4: e5904. doi:10.1371/journal.pone.0005904.
- Lincoln GA, Johnston JD, Andersson H, Wagner G, Hazlerigg DG (2005) Photorefractoriness in mammals: dissociating a seasonal timer from the circadian-based photoperiod response. *Endocrinology* 146: 3782–3790. doi:10.1210/en.2005-0132.
- Boivin DB, Czeisler CA, Dijk DJ, Duffy JF, Folkard S, et al. (1997) Complex interaction of the sleep-wake cycle and circadian phase modulates mood in healthy subjects. *Arch Gen Psychiatry* 54: 145–152.

percent category. Although the two models differ in the estimate of the tails, they roughly provide the same estimates of  $x_{01}$  and  $x_{02}$  (maximum difference is around 0.5 week). (EPS)

**Figure S2 Area under the curve (AUC) for the elected functions and both peaks in each PC.** Equations (10) and (11) are used to estimate  $p_1$  and  $p_2$ . The AUC of both peaks converge toward a unique value as the PC increase (50%). **The proportion of performances:** The estimation of the area under the curve for the two peaks shows that, when increasing the PC, the proportion of performances in each peak progressively converge to the same value, from 93.67% (peak 1) vs. 6.33% (peak 2) for PC = 95% to 50.65% (peak1) vs. 49.35% (peak2) with PC = 99% (Figure S2). (EPS)

**Table S1 Statistics of the two models.** For each percent category, the adjusted  $R^2$ , rMSE and sse are given. Statistics of the elected function are mentioned in bold. (DOC)

**Table S2 Results of the two models.** For percent category and model, the estimated date of peak ( $x_{01}$ ,  $x_{02}$ ), value of peak ( $f(x_{01})$ ,  $f(x_{02})$ ), the total proportion of performance (area under the curve), and  $p_1$ ,  $p_2$  are given. Results of elected function are given in bold. (DOC)

**Table S3 Number of performances per depending on the type of competition and the percent category.** N is the number for different percent category (PC) and its equivalent percentage. On the overall performance analyzed, 2,347 were conducted during major competitions and 2,093 during the Golden League. The other 8,079 performances were done in other competitions (OG: Olympic Games; WC: World championships; US: American selections; EC: European Championships). (DOC)

**Materials and Methods S1 The two models (double Gaussian and double Lorentzian functions) are presented.** The methods for estimating the dates of the two peaks and the area under the curve are described. (PDF)

## Acknowledgments

We thank the Centre National de Développement du sport and the Ministry of Health, Youth and Sports for financial assistance. We thank the National Institute of Sports Expertise and Performance teams for their full support. We thank Mrs Katrine Okholm Kryger and Ms Maya Dorsey for their helpful comments for their critical reading of the Article.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: JFT AH F. Dor GB LQ F. Desgorces. Analyzed the data: F. Dor MG GB AH AM. Wrote the paper: AH F. Dor GB JFT. Reviewed the paper: KOK MD LAM JAJ CTC JFT.

6. Spengler CM, Shea SA (2000) Endogenous circadian rhythm of pulmonary function in healthy humans. *Am J Respir Crit Care Med* 162: 1038–1046.
7. McCormack GR, Friedenreich C, Shiell A, Giles-Corti B, Doyle-Baker PK (2010) Sex- and age-specific seasonal variations in physical activity among adults. *J Epidemiol Community Health* 64: 1010–1016. doi:10.1136/jech.2009.092841.
8. Hamilton SL, Clemes SA, Griffiths PL (2008) UK adults exhibit higher step counts in summer compared to winter months. *Ann Hum Biol* 35: 154–169. doi:10.1080/03014460801908058.
9. Chan CB, Ryan DAJ, Tudor-Locke C (2006) Relationship between objective measures of physical activity and weather: a longitudinal study. *Int J Behav Nutr Phys Act* 3: 21. doi:10.1186/1479-5868-3-21.
10. Desgorces F-D, Berthelot G, El Helou N, Thibault V, Guillaume M, et al. (2008) From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS ONE* 3: e3653. doi:10.1371/journal.pone.0003653.
11. Marino FE, Lambert MI, Noakes TD (2004) Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol* 96: 124–130. doi:10.1152/jappphysiol.00582.2003.
12. El Helou N, Tafflet M, Berthelot G, Tolaini J, Marc A, et al. (2012) Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS ONE* 7: e37407. doi:10.1371/journal.pone.0037407.
13. Cheuvront SN, Haymes EM (2001) Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports Med* 31: 743–762.
14. Kenefick RW, Cheuvront SN, Sawka MN (2007) Thermoregulatory function during the marathon. *Sports Med* 37: 312–315.
15. International Association of Athletics Federations. Available: <http://www.iaaf.org/>. Accessed 26 September 2012.
16. Weather Underground website. Internet weather service. Available: <http://www.wunderground.com/history/>. Accessed 26 September 2012.
17. Field A (2009) *Discovering Statistics Using SPSS*. SAGE Publications. 857 p.
18. Foster RG, Roenneberg T (2008) Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycles. *Curr Biol* 18: R784–R794. doi:10.1016/j.cub.2008.07.003.
19. Steinacker JM, Lormes W, Kellmann M, Liu Y, Reissnacker S, et al. (2000) Training of junior rowers before world championships. Effects on performance, mood state and selected hormonal and metabolic responses. *J Sports Med Phys Fitness* 40: 327–335.
20. Costill DL, Thomas R, Robergs RA, Pascoe D, Lambert C, et al. (1991) Adaptations to swimming training: influence of training volume. *Med Sci Sports Exerc* 23: 371–377.
21. Mujika I (2010) Intense training: the key to optimal performance before and during the taper. *Scand J Med Sci Sports* 20 Suppl 2: 24–31. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01189.x.
22. Ely MR, Martin DE, Cheuvront SN, Montain SJ (2008) Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1675–1680. doi:10.1249/MSS.0b013e3181788da9.
23. Montain SJ, Ely MR, Cheuvront SN (2007) Marathon performance in thermally stressing conditions. *Sports Med* 37: 320–323.
24. Ely MR, Cheuvront SN, Roberts WO, Montain SJ (2007) Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 39: 487–493. doi:10.1249/mss.0b013e31802d3aba.
25. Galloway SD, Maughan RJ (1997) Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1240–1249.
26. Atkinson G, Reilly T (1996) Circadian variation in sports performance. *Sports Med* 21: 292–312.
27. Somero GN (2002) Thermal physiology and vertical zonation of intertidal animals: optima, limits, and costs of living. *Integr Comp Biol* 42: 780–789. doi:10.1093/icb/42.4.780.
28. Bennett AF (1985) Temperature and muscle. *J Exp Biol* 115: 333–344.
29. Josephson KR (1984) Contraction dynamics of flight and stridulatory muscles of tettigoniid insects. *J Exp Biol* 108: 77–96.
30. Therminarias A, Quirion A, Pellere E (1987) Effets de l'exposition au froid sur les variations plasmatiques du lactate et des ions induites par un exercice musculaire aérobie intense. *Science & Sports* 2: 1–8. doi:10.1016/S0765-1597(87)80039-4.
31. Koehler K, Braun H, Achtzehn S, Hildebrand U, Predel H-G, et al. (2012) Iron status in elite young athletes: gender-dependent influences of diet and exercise. *Eur J Appl Physiol* 112: 513–523. doi:10.1007/s00421-011-2002-4.
32. Magnusson A (2000) An overview of epidemiological studies on seasonal affective disorder. *Acta Psychiatr Scand* 101: 176–184.
33. Régnier-Loilier A, Rohrbasser J-M (2011) Y-a-t-il une saison pour faire des enfants? Population & sociétés: 1–4.
34. Hsiang SM, Meng KC, Cane MA (2011) Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature* 476: 438–441. doi:10.1038/nature10311.
35. Healy JD (2003) Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *J Epidemiol Community Health* 57: 784–789.
36. The Eurowinter Group (1997) Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. *Lancet* 349: 1341–1346. doi:10.1016/S0140-6736(96)12338-2.
37. Ghebre MA, Wannamethee SG, Rumley A, Whincup PH, Lowe GDO, et al. (2012) Prospective study of seasonal patterns in hemostatic factors in older men and their relation to excess winter coronary heart disease deaths. *J Thromb Haemost* 10: 352–358. doi:10.1111/j.1538-7836.2012.04617.x.
38. Ballester F, Corella D, Pérez-Hoyos S, Sáez M, Hervás A (1997) Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991–1993. *Int J Epidemiol* 26: 551–561.
39. Rocklöv J, Forsberg B (2008) The effect of temperature on mortality in Stockholm 1998–2003: a study of lag structures and heatwave effects. *Scand J Public Health* 36: 516–523. doi:10.1177/1403494807088458.
40. Eccles R (2002) An explanation for the seasonality of acute upper respiratory tract viral infections. *Acta Otolaryngol* 122: 183–191.
41. Barnett AG, Sans S, Salomaa V, Kuulasmaa K, Dobson AJ (2007) The effect of temperature on systolic blood pressure. *Blood Press Monit* 12: 195–203. doi:10.1097/MBP.0b013e3280b083f4.

1 **Return-to-the-Performance after an Anterior Cruciate Ligament Rupture among**  
2 **French Alpine Skiers between 1980 and 2013**

3

4 **Corresponding Author**

5 Ms. Amal HAIDA

6 IRMES, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

7 Email : [amal.haida@insep.fr](mailto:amal.haida@insep.fr)

8 Tel : 00.33.1.41.74.42.73

9 Fax : 00.33.1.41.74.41.75

10

11 *Abstract*

12 **Background:** Return-to-the-performance after ACL tear is little known among high-level  
13 alpine skiers.

14 **Purpose:** To analyze the influence of the ACL tear on the performance and career of the  
15 French alpine skiers from 1980 to 2013.

16 **Study Design:** Descriptive epidemiology and retrospective study.

17 **Methods:** The population includes men (n = 239) and women (n = 238) skiers who integrated  
18 the national French alpine ski team at least one season between 1980 and 2013 in the speed  
19 disciplines (Downhill and Super-G) and technical disciplines (giant slalom and slalom). Two  
20 groups were formed. Group G1 includes athletes who suffered an ACL rupture and group G2  
21 includes athletes who never had any ACL rupture. Three performance indicators were  
22 selected: FIS points, international FIS ranking and podiums (World Cup, World  
23 Championships and Olympic Games).

24 **Results:** The 1st decile FIS points and international FIS ranking showed that G1 skiers  
25 obtained better performance than the G2 skiers. G1 skiers' mean career length (men:  $7.9 \pm 4.7$   
26 years, women:  $7.1 \pm 4.1$  years) was longer than G2 skiers' (men:  $4.5 \pm 3.3$  years; women  $4.2 \pm$   
27  $3.5$  years). 12.8% (61/477) of the skiers got at least a podium during their career: 23.0%  
28 (34/148) in G1 and 8.3% (27/329) in G2. The mean age at ACL rupture was  $22.6 \pm 4.1$  years  
29 old for men and  $19.9 \pm 3.5$  years old for women. In G1, 55 podiums were achieved before and  
30 176 after ACL rupture in all competitions. Skiers who improved their performance post-ACL  
31 rupture were significantly younger (men:  $22.2 \pm 3.0$  years old, women:  $18.7 \pm 2.2$  years old)  
32 (p-value<0.0001) at the time of injury than those showing a performance deterioration post-  
33 ACL rupture (men:  $25.3 \pm 4.2$  years old, women:  $22.4 \pm 4.0$  years old).

34 **Conclusion:** The main results show that it is possible to go back to pre-injury level or even a  
35 higher level after an ACL rupture and that the age is the main element that guides post-  
36 surgical recovery.

37 **Key Terms:** Alpine skiing, ACL, return-to-the-performance.

38 **What is known about the subject:** After an ACL rupture, the intentions of returning to the  
39 sport and the factors which affect the return-to-sport in the overall active population have  
40 been studied in the literature.

41 **What this study adds to existing knowledge:** Influence of return-to-the performance after an  
42 ACL rupture on the French alpine skiers' and a description about determinants of  
43 performance level after ACL rupture.

## 44 INTRODUCTION

45 Alpine skiing is the most popular winter sport in the world and its practitioners are  
46 exposed to a high injury risks.<sup>21</sup> Recent studies from Data Surveillance System of the  
47 International Ski Federation (FIS) have shown that the risk of injury in alpine skiing is high.<sup>8,9</sup>  
48 The lower limbs are the most commonly affected with 58.1% of total injuries. The part of the  
49 body mostly affected is the knee with 35.6%, of which 54.4% are severe injuries causing an  
50 absence > 28 days in training and competition.<sup>8</sup> Knee trauma is common among professional  
51 and recreational skiers and the most common diagnosis is the rupture of the anterior cruciate  
52 ligament (ACL).<sup>8,12</sup> According to Florenes,<sup>8</sup> speed disciplines are more traumatic than  
53 technical disciplines with respectively an incidence of 17.2 and 4.9 injuries over 1000 runs  
54 and 7.0 and 0.9 knee injuries per 1000 runs.

55 Return-to-the-performance in elite athletes has never been studied in sport  
56 epidemiology. After an ACL rupture, the literature investigates return-to-sport in the overall  
57 active population.<sup>2,7,11,24</sup> Intentions of returning to the sport, the level of participation (return  
58 to the competition or not) and the factors which affect the return-to-sport after ACL  
59 reconstruction have been analyzed in scientific literature.<sup>2,24</sup> Finally, several studies have  
60 suggested that the return-to-sport and the probability of returning to pre-injury level depended  
61 more on the patient's personality than the functional knee reconstruction.<sup>1,7,11</sup>

62 In this context, the purpose of this retrospective epidemiological study is to analyze  
63 the influence of the ACL rupture on the French alpine skiers' post-injury performance from  
64 1980 to 2013.



## 65 **MATERIALS AND METHODS**

### 66 **Population and period**

67 The study population includes all athletes, male (n = 239) and female (n = 238), who  
68 integrated the national French alpine skiing team for at least one full season between 1980 and  
69 2013 in all events: Downhill and Super G (speed disciplines), Giant Slalom and Slalom  
70 (technical disciplines). Skiers are divided into two groups according to the occurrence or non-  
71 occurrence of an ACL tear. Thus, a first group (G1) includes athletes who have suffered one  
72 (or more) ACL rupture(s). The second group (G2) includes athletes who have never  
73 undergone any ACL tear in their career. All skiers have a specialty (speed, technique or  
74 polyvalent). No other injury is considered in this study.

### 75 **Competitions**

76 Only world level competitions are taken into account. The World Cup takes place every year  
77 and determines the most regular skier of the year in each discipline. About 14 events are run  
78 in each discipline throughout the season. The World Championships are held every two years  
79 and the Olympics Games every 4 years and winners are rewarded for one race in each  
80 discipline.

81

### 82 **Data collection**

#### 83 *Skiers' characteristics*

84 Databases of the French Ski Federation (FFS) were used to collect the following information:  
85 name, gender, year of birth, years they joined and left the French Team, occurrence or not of  
86 ACL tear and occurrence date.

87

88

89 *Performance indicators*

90 Several performance indicators were selected:

91 - FIS points

92 The best annual FIS point of each skier, for each discipline and for each season during their  
93 time in the French Team, was collected on the International Ski Federation (FIS) website.<sup>15</sup>

94 This website identifies FIS points starting from 1995. FIS point calculation is established after  
95 each race: it represents the sum of FIS points obtained during the race of the day and a  
96 coefficient called "penalty" obtained from previous racing. The closer FIS points get to zero,  
97 the more performing the athlete. This FIS points quotation starts only for skiers over 15 years  
98 of age and participating in international competitions. Age at the moment of ACL rupture of  
99 skiers who improved or deteriorated performance post-rupture is calculated for the best  
100 athlete FIS point obtained before and after the injury.

101 - FIS International ranking

102 For each skier in each discipline and in each season in the French Team, their best  
103 international FIS ranking was collected on the FIS website.<sup>15</sup>

104 - Podiums

105 All World Cups, World Championships and Olympics Games podiums achieved by French  
106 Team skiers alpine were collected on the FIS website.<sup>15</sup> Podiums are available on the FIS  
107 website from 1980 to 2013.

108 **Statistical Analysis**

109 A linear regression was performed to describe the evolution of the ACL ruptures incidence  
110 ( $i$ =number of ACL/number of skiers-year) from 1980 to 2013. Performance distribution (FIS  
111 points and international FIS ranking) was determined by decile. The first decile is described in  
112 function of groups G1 and G2, sex and discipline. Concerning the French Top 10 performance  
113 data, performance modeling of FIS was constructed as a function of age. The best  
114 performance by age is fitted by a 2nd degree polynomial function. Student-t test was used to  
115 compare the mean career length of groups G1 and G2 in each discipline and for each sex. The  
116 same test was performed to compare the mean age at the moment of ACL rupture of skiers  
117 who improved and skiers who deteriorated their performance post-ACL tear. The level of  
118 significance was set at  $p$ -value  $<0.05$ .

119

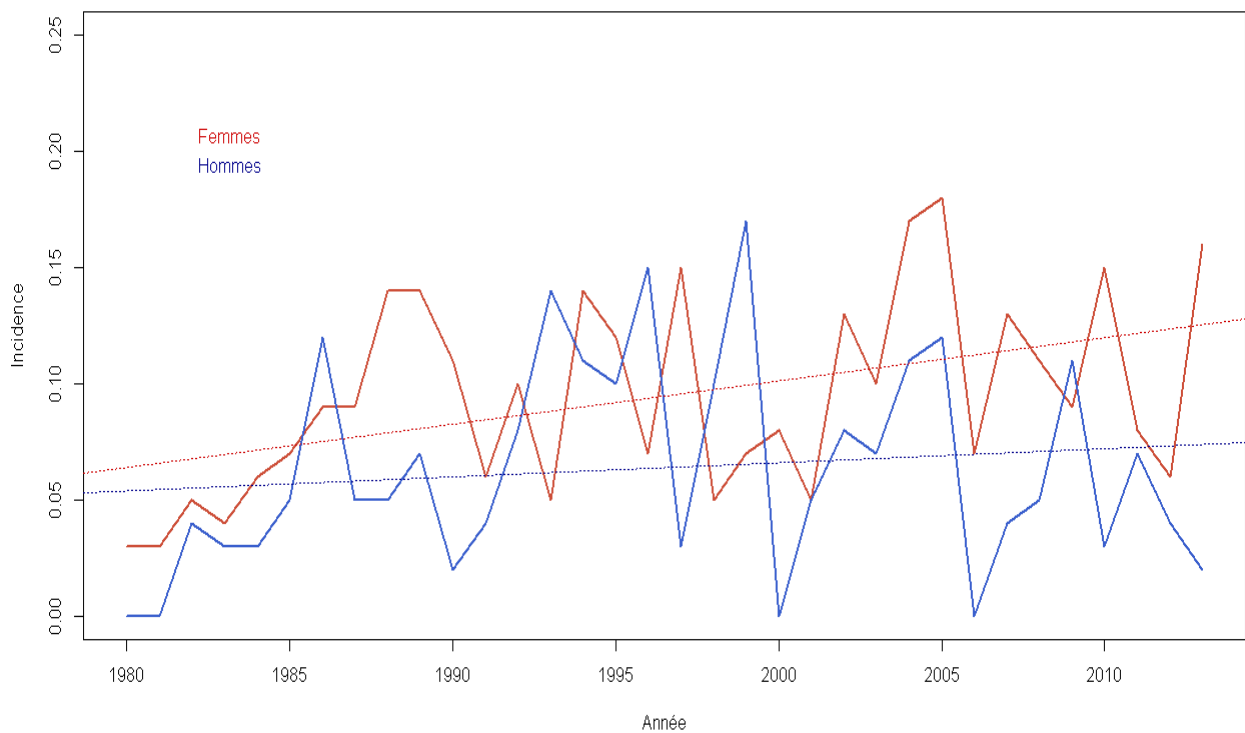
120

121 **RESULTS**

122 **Population**

123 From the 1980-1981 season to the 2012-2013 season, 477 alpine skiers joined the French  
124 alpine ski team for at least one year. Among them, 148 skiers (67 men and 81 women)  
125 suffered an ACL rupture (71 in speed disciplines, 76 in technical disciplines and 1 polyvalent)  
126 and 329 (172 men and 157 women) did not have any ACL rupture in their careers (164 in  
127 speed disciplines, 157 in technical disciplines and 8 polyvalent).

128 *Incidence*



129 **Figure 1.** Incidence (number of ACL rupture/number of skiers-year) from 1980 to 2013.  
130

131 The incidence of the number of ACL ruptures and the number of skiers-year is 0.08 (0.06 for  
132 men,  $r^2 = 0.22$ , 0.09 for women,  $r^2 = 0.27$ ) from 1980 to 2013 (Figure 1). This incidence  
133 increases significantly over the period of observation for the women (p-value <0.05) but not  
134 for the men (p-value > 0.05).

135 *Career length*

136 **Table 1.** Mean career length ( $\pm$  Standard Deviation) in groups G1 and G2 by discipline and  
137 by sex

<b>Disciplines</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>P Value</b>
<b>Technical Men</b>	7.0 $\pm$ 4.5	4.5 $\pm$ 3.3	< 0.01
<b>Speed Men</b>	8.8 $\pm$ 4.8	4.2 $\pm$ 3.2	< 0.001
<b>Total</b>	7.9 $\pm$ 4.7	4.5 $\pm$ 3.3	< 0.001
<b>Technical Women</b>	7.3 $\pm$ 4.1	4.4 $\pm$ 3.7	< 0.001
<b>Speed Women</b>	6.9 $\pm$ 4.2	4.2 $\pm$ 3.3	< 0.001
<b>Total</b>	7.1 $\pm$ 4.1	4.2 $\pm$ 3.5	< 0.001

138

139 From 1980 to 2013, the mean career length for G1 athletes is significantly longer than G2  
140 athletes. This difference is noted in the 2 sexes, and in technical and speed disciplines. In G1  
141 and G2, women begin and end their careers in French Team significantly earlier than men (p-  
142 value <0.01).

143

144 *Age at the time of ACL rupture*

145 The mean age at the first ACL tear is 21.1  $\pm$  4.0 years. Women appear to suffer the injury  
146 significantly earlier, with a mean age of 19.9  $\pm$  3.5, compared to men with a mean age of 22.6  
147  $\pm$  4.1 (p-value <0.0001).

148

149 **G1 and G2 performances**

150 *Podiums*

151 Among the 477 French alpine skiers, 61 (12.8%) had at least one podium at the Olympics  
152 Games and/or World Championships and/or World Cup during their career. From 148 athletes

153 in G1, 34 (23.0%) achieved at least one podium and from 329 athletes in G2, 27 (8.3%) got at  
 154 least one podium in their career.

155

156 *FIS points and international FIS ranking*

157 The analysis of the 1<sup>st</sup> decile of performance shows that the international FIS ranking of skiers  
 158 in the French national Team (both sexes and disciplines included) gets no higher than the 26<sup>th</sup>  
 159 rank and maximum FIS points is 8.11. The international FIS ranking and the FIS points are  
 160 better for men than women regardless of disciplines. In speed as in technical disciplines, G1  
 161 athletes ranked better and had better FIS points than G2 athletes (Table 2). The 1<sup>st</sup> decile of  
 162 technical disciplines in G1 shows that men ranked better and had better FIS points than  
 163 women (respectively 9.7<sup>th</sup> rank and 4.09 FIS points vs. 15.5<sup>th</sup> place and 5.75 FIS points). The  
 164 same trend is noted in G2 (Men: 33<sup>rd</sup> rank and 7.58 FIS points vs. Women: 51.8<sup>st</sup> rank and  
 165 12.61 FIS points).

166

167 **Table 2.** Description of FIS points and international FIS ranking by sex, discipline and group

Performance indicators	International FIS ranking		FIS points	
	Men	Women	Men	Women
<b>1<sup>st</sup> decile of performance</b>				
<b>Speed disciplines G1</b>	15.6	21.4	5.03	9.22
<b>Speed disciplines G2</b>	37.9	42.1	10.9	14.62
<b>Technical disciplines G1</b>	9.7	15.5	4.09	5.75
<b>Technical disciplines G2</b>	33	51.8	7.58	12.61

168

169

170

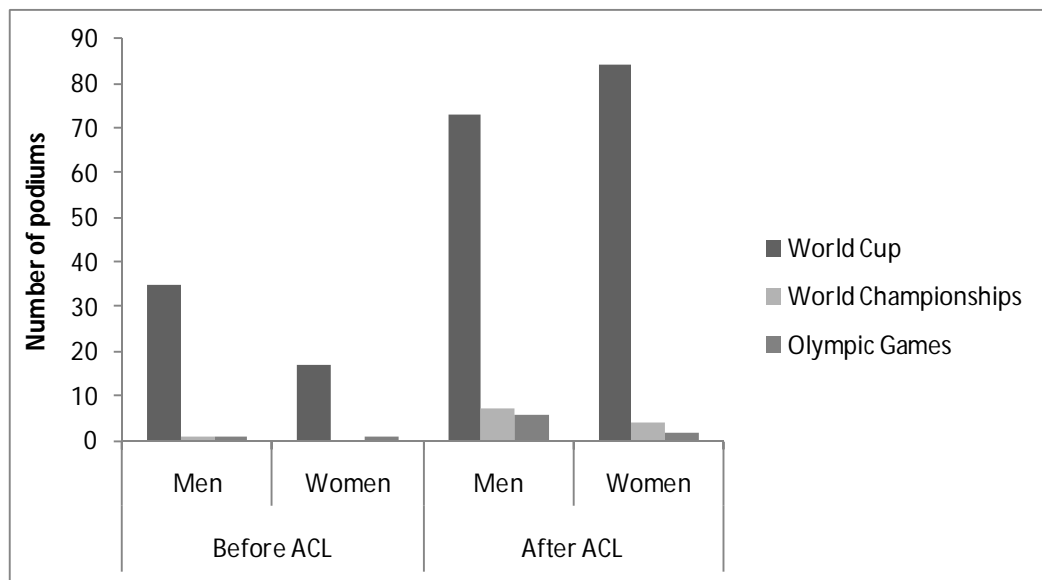
171

172 **Return-to-the-performance after ACL rupture**

173

174 *Podiums*

175 In G1, 34 athletes got at least one podium in their career. On the whole, 55 podiums were  
176 achieved before and 176 after ACL rupture. In all competitions, men got 37 podiums before  
177 ACL rupture against 86 after it, and as for women, 18 podiums were achieved before the  
178 injury against 90 after it. In the World Cup, 52 podiums are noted before and 157 after ACL  
179 tear. In the World Championships, 1 podium was performed before and 11 after it. In OG, 2  
180 podiums are reached before ACL rupture against 8 after it (Figure 2).



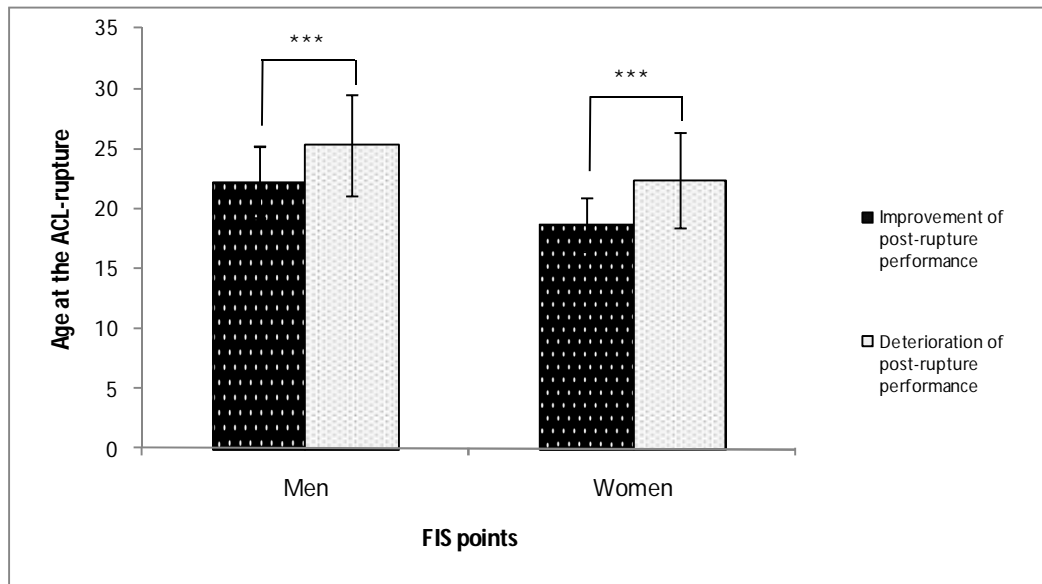
181

182 **Figure 2.** Number of podiums before and after ACL rupture, by sex and competition.

183

184 *FIS Points and International FIS Ranking*

185 The skiers who improve their performance after the ACL rupture were significantly (p-value  
186 <0.0001) younger at the time of ACL tear (men: age  $22.2 \pm 3.0$ , women: age  $18.7 \pm 2.2$ ) than  
187 those with lower post-injury performance (men: age  $25.3 \pm 4.2$ , women: age  $22.4 \pm 4.0$ )  
188 (Figure 3).



189

190 **Figure 3.** Age at the ACL rupture according to the improvement and deterioration of post-  
 191 rupture performance in men and women (\*\*\*) p-value <0.0001).

192 Similarly, in the international FIS ranking, men who improved their ranking post-ACL  
 193 rupture were younger at the time of injury ( $22.0 \pm 3.0$  years old) than those with lower post-  
 194 ACL rupture ranking ( $25.7 \pm 4.0$  years old) (p-value <0.0001). The same trend is noted among  
 195 women with a mean age at the ACL rupture of  $18.8 \pm 2.3$  for women who improved their  
 196 ranking after the injury and of  $22.1 \pm 4.0$  years old for those whose post-injury ranking  
 197 dropped (p-value <0.0001). For skiers who are improving after an ACL rupture, the best  
 198 performance is achieved on average after  $3.8 \pm 3.1$  years for men and  $3.1 \pm 2.5$  years for  
 199 women after the ACL tear.



200 **DISCUSSION**

201 This study is the first to analyze the impact of the ACL on the return-to-the-performance.

202 The main results show that it is possible to find better performances after an ACL tear.

203 This level depends on the age when the ACL rupture occurs.

204

205 *ACL rupture and performance level*

206 In this study, the G1 group has better FIS points and better international FIS ranking than the  
207 G2 group. At their best, G1 skiers have more podiums and better FIS points than G2 skiers.

208 Our results confirm those reported by Pujol et al. (2007) in which the incidence of ACL  
209 rupture was related to the performance level. The French skiers in the international Top 30  
210 were the ones who had more ACL ruptures than their counterparts.<sup>21</sup> One hypothesis to

211 explain a higher level in athletes who suffered an ACL rupture is the recovery time after this  
212 injury. During the ACL reconstruction, skiers stop all intensive trainings and competitions but  
213 remain under active recovery. This recovery may improve physical and physiological  
214 parameters of athletes optimizing their return to the performance level while resting from  
215 intense training.<sup>11,13</sup> The psychological quality of the athletes is crucial to meet the

216 requirements of the environment. One study reported that high-risk sports athletes (including  
217 alpine skiers) have a lower prevalence of anxiety or depression disorders than athletes in low-  
218 risk sports.<sup>22</sup> It is demonstrated that athletes who seek extreme sensations are more liable to  
219 accidents (slope snow, air mass ...).<sup>17</sup> Risk-taking, especially in Downhill, is a major risk

220 factor of injury.<sup>5</sup> High level skiers have a higher "Thrill and Adventure Seeking" score  
221 (defined by a desire to engage in activities and sports of risk and adventure with unusual  
222 sensations) on the scale of Zuckerman<sup>28</sup> than the general population. It is also reported that  
223 this score is higher among skiers who have had an injury compared to skiers who have never

224 undergone any.<sup>5</sup> Athletes with a significant injury rate have reported preferences for  
225 stimulants and thrill-seeking environments.<sup>20</sup>

226

### 227 *Return-to-the-performance and age*

228 The results show that skiers who suffered ACL tear were able to achieve podium success  
229 (Figure 3) after injury but it depended on their age at the time of the ACL rupture. Similarly,  
230 skiers who were able to improve their performance (FIS points and international FIS ranking)  
231 after an ACL injury were significantly younger than those who did not improve their  
232 performance after the injury. Women suffered an ACL tear at  $19.9 \pm 3.5$  on average, 3.1 years  
233 after their entry in high career French Team and men were injured at  $22.6 \pm 4.1$  on average,  
234 4.7 years after their entry in high career French Team. Age is a crucial point in terms of  
235 return-to-the-performance due to the relationship between it and performance.<sup>3,19</sup> It is  
236 characterized by an initial phase of exponential growth reflecting the development of physical  
237 abilities, a second phase corresponding to the optimal performance including peak  
238 performance, and a third phase of regression in which performance decreases. Berthelot et al.  
239 (2012) showed that the age of peak performance of the best world athletes is 26.0 years old in  
240 athletics and 21.0 years old in swimming.<sup>4</sup> The age at peak performance of the Top 10 tennis  
241 players is 21.5 years old for women and 24.1 for men.<sup>10</sup> In our population, age of peak  
242 performance in French Top 10 is 25.1 for men and 25.3 for women. The skiers who improved  
243 their performance after ACL rupture were young and had not reached the age of peak  
244 performance yet. This explains their higher probability to reach better performance after their  
245 injury. Men who manage to get better FIS points after injury have known ACL tear on  
246 average at  $22.2 \pm 3.0$ . In women, skiers who improved performance (FIS points) suffered  
247 ACL rupture on average at  $18.7 \pm 2.2$ . Conversely, skiers who do not find a better post-injury

248 level of performance had an ACL tear later, thereby reducing the probabilities of reaching  
249 optimal performance after ACL rupture.

250

### 251 *ACL rupture by sex and discipline*

252 After basketball, skiing is the highest risk sport for women in the number of ACL rupture  
253 occurrences.<sup>27</sup> The female/male ratio of ACL tear incidences is 1.3. Therefore, women's risk  
254 of ACL rupture is 30% higher than men's. Many studies report a difference in rates of knee  
255 injuries between men and women. In recreational as well as professional skiers, the incidence  
256 of knee injury is twice as high for women, and their risk of ACL injury is 3 times as  
257 high.<sup>6,16,23</sup> The reasons for the difference between men and women are related to extrinsic  
258 factors on the one hand, such as level of conditioning, neuromuscular factors or muscle  
259 strength,<sup>13,25</sup> and to intrinsic factors on the other hand, such as pelvis width, tibial rotation,  
260 physiological laxity and the effects of hormones, especially estrogen.<sup>14,18,25</sup> Though Florenes  
261 et al. reported that the incidence of injuries in alpine skiing is higher with increased speed  
262 (50% of knee injuries in Downhill vs. 6% in slalom),<sup>8</sup> there is no difference in the occurrence  
263 rate of ACL tears between technical and speed disciplines in the alpine skiers French national  
264 Team. In men, incidences between the number of ACL injuries and the number of skiers-year  
265 in technical and speed disciplines are the same ( $i_{\text{speed}} = i_{\text{technical}} = 3\%$ ). In women, there is a  
266 little higher incidence in speed disciplines ( $i_{\text{speed}} = 5\%$ ) compared to technical disciplines ( $i_{\text{technical}} = 4\%$ ). This result shows that there is a maximum speed intrinsic to the discipline  
267 (whether technical or speed) leading skiers to regularly reach the limit if they want to be at the  
268 top world level. It should be noted that the incidences of knee injuries reported by Florenes  
269 and his collaborators include all types of injuries and not only ACL tears.<sup>8</sup>

271

272

273 *Career length*

274 From 1980 to 2013, the career length of French alpine skiers is different in G1 from G2. In  
275 fact, the mean career length of G1 skiers is longer than that of G2 skiers. The same trend is  
276 observed in women with a longer career length for G1 skiers compared to G2. These results  
277 confirm those reported by Pujol et al. (2007) which show that career length for skiers who  
278 have suffered an ACL tear is significantly longer than for those who have not.<sup>21</sup> This could be  
279 explained in part by the time required for the recovery and reconstruction of the ACL injured  
280 skiers, which extends their career length in the French national Team. Furthermore, after the  
281 time of recovery, trainers establish a necessary regulation of the volume and load training for  
282 skiers in return after injury. In our cohort, a longer career ( $9.1 \pm 4.6$  years) is noted among  
283 skiers who have had multiple ACL tears compared to those who have had only one ( $7.2 \pm 4.5$   
284 years). Today, career management and therefore its duration requires considering these  
285 recurrences in particular because of the association of age with the recurrence.<sup>26</sup>

286

287 *ACL rupture and return-to-sport*

288 Other parameters were evaluated after ACL reconstruction such as intentions to return to the  
289 same sport, same level, playing a different sport (other than pre-injury), or otherwise stopping  
290 any sport participation.<sup>1,11</sup> In addition, factors influencing post-operative return-to-sport after  
291 an ACL rupture have also been studied.<sup>2,24</sup> The functional measurement of the knee was also  
292 taken into account. Arden et al. (2012)<sup>1</sup> measured these parameters in several sports: soccer,  
293 Australian football, netball and basketball. Forty-five percent returned to sport at the same  
294 level of participation than before injury and 29% returned to competition. In another study,  
295 Arden et al. (2011) showed that 67% did not return to competitive sport and only 33% tried  
296 to return to competition 12 months after ACL surgery.<sup>2</sup> Our results show that the time  
297 necessary to achieve better performance post-ACL rupture is on average 3.8 years for men

298 and 3.1 years for women. Skiers in speed disciplines come back faster than skiers in technical  
299 disciplines (men: 3.6 vs. 4.1 years; women: 2.9 vs. 3.3 years).

300 The qualitative study of Tjong et al. (2014) analyzes the rate of the return-to-sport and the  
301 factors affecting this return after an ACL reconstruction.<sup>24</sup> They show that 64% of patients  
302 have not returned to their pre-injury level and only 36% have. Moreover, there is no link  
303 between the functional recovery of the knee and the rate of return to the same participation  
304 level or competition level than pre-ACL rupture.<sup>1,2</sup> Finally, in all sports, men were not more  
305 likely to return-to-sport after an ACL tear than women.<sup>1</sup>

306

### 307 **Methodological Considerations**

308 This is an exhaustive study because it takes into account all French skiers since 1980. It  
309 represents the first epidemiological study using FIS points, the World FIS Ranking and  
310 podiums to analyze the influence of the ACL in competitive alpine skiing. The FIS point  
311 representing the main performance indicator of the study has been regular and consistent since  
312 1995. However, skiers may have suffered other injuries during their career than the ACL  
313 rupture. The 4 specialties were categorized by speed disciplines (Downhill and Super-G) and  
314 technical disciplines (Giant Slalom and Slalom) to have a more important number of subjects  
315 by samples. Finally, we do not have the FIS points and World FIS Ranking before 1995.

316

### 317 **CONCLUSION**

318 Skiers are able to achieve better FIS points, better world rankings and more podiums after an  
319 ACL tear. Skiers who have suffered an ACL rupture achieve better performance compared to  
320 their counterparts without this injury. The moment when the ACL rupture occurs during the  
321 career determines the return-to-the-performance. The probability of obtaining better  
322 performance after this injury is higher if the rupture occurs before peak performance.

323

324 **ACKNOWLEDGMENT**

325 We thank the Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) and the  
326 Ministère des Droits des Femmes de la ville, de la jeunesse et des Sports for financial  
327 assistance. We thank the National Institute of Sports Expertise and Performance teams for  
328 their full support. We thank the Fédération Française de Ski and ED 556 HSRT for their great  
329 interest in this work. We thank Ms. Emilie Janton for her helpful comments for her critical  
330 reading of the Article.

331 **CONFLICT OF INTEREST**

332 There are no issues of conflict of interest arising from the personal or professional  
333 associations of any of the authors.

334

335 **REFERENCES**

- 336 1. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA, Webster KE. Return-to-sport outcomes at 2 to 7 years  
337 after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *Am J Sports Med.* 2012;40:41-48.
- 338 2. Ardern CL, Webster KE, Taylor NF, Feller JA. Return to the preinjury level of  
339 competitive sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery: two-thirds of  
340 patients have not returned by 12 months after surgery. *Am J Sports Med.* 2011;39:538-  
341 543.
- 342 3. Baker AB, Tang YQ. Aging performance for masters records in athletics, swimming,  
343 rowing, cycling, triathlon, and weightlifting. *Exp Aging Res.* 2010;36:453-477.
- 344 4. Berthelot G, Len S, Hellard P, et al. Exponential growth combined with exponential  
345 decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age.*  
346 2012;34:1001-1009.
- 347 5. Bouter LM, Knipschild PG, Feij JA, Volovics A. Sensation seeking and injury risk in  
348 downhill skiing. *Personality and Individual Differences.* 1988;9:667-673.
- 349 6. Burtcher M, Gatterer H, Flatz M, et al. Effects of modern ski equipment on the overall  
350 injury rate and the pattern of injury location in Alpine skiing. *Clinical Journal of Sport*  
351 *Medicine.* 2008;18:355–357.
- 352 7. Eastlack ME, Axe MJ, Snyder-Mackler L. Laxity, instability, and functional outcome  
353 after ACL injury: copers versus noncopers. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31:210-215.
- 354 8. Flørenes TW, Bere T, Nordsletten L, Heir S, Bahr R. Injuries among male and female  
355 World Cup alpine skiers. *Br J Sports Med.* 2009;43:973-978.

- 356 9. Flørenes TW, Nordsletten L, Heir S, Bahr R. Recording injuries among World Cup  
357 skiers and snowboarders: a methodological study. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21:196-  
358 205.
- 359 10. Guillaume M, Len S, Tafflet M, et al. Success and decline: top 10 tennis players follow a  
360 biphasic course. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43:2148-2154.
- 361 11. Greenwood JD, Moses GE, Bernardino FM, Gaesser GA, Weltman A. Intensity of  
362 exercise recovery, blood lactate disappearance, and subsequent swimming performance.  
363 *Journal of Sports Sciences*. 2008;26:29-34.
- 364 12. Heijne A, Axelsson K, Werner S, Biguet G. Rehabilitation and recovery after anterior  
365 cruciate ligament reconstruction: patients' experiences. *Scand J Med Sci Sports*.  
366 2008;18:325-335.
- 367 13. Heyman E, DE Geus B, Mertens I, Meeusen R. Effects of four recovery methods on  
368 repeated maximal rock climbing performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;41:1303-  
369 1310.
- 370 14. Hunter RE. Skiing Injuries. *Am J Sports Med*. 1999;27:381-389.
- 371 15. Huston LJ, Wojtys EM. Neuromuscular Performance Characteristics in Elite Female  
372 Athletes. *Am J Sports Med*. 1996;24:427-436.
- 373 16. Hutchinson MR, Ireland ML. Knee injuries in female athletes. *Sports Med*. 1995;19:288-  
374 302.
- 375 17. International Ski Federation website. Available at: [http://data.fis-ski.com/alpine-](http://data.fis-ski.com/alpine-skiing/biographies.html)  
376 [skiing/biographies.html](http://data.fis-ski.com/alpine-skiing/biographies.html).



- 377 18. Johnson RJ, Zucco P, Shealy JE. *Skiing Trauma and Safety: Thirteenth volume*. ASTM  
378 International; 2000.
- 379 19. Lafollie D. [Detection of high-risk personalities in risky sports]. *Encephale*.  
380 2007;33:135-141.
- 381 20. Lund-Hanssen H, Gannon J, Engebretsen L, Holen KJ, Anda S, Vatten L. Intercondylar  
382 notch width and the risk for anterior cruciate ligament rupture. A case-control study in  
383 46 female handball players. *Acta Orthop Scand*. 1994;65:529-532.
- 384 21. Moore DH 2nd. A study of age group track and field records to relate age and running  
385 speed. *Nature*. 1975;253:264-265.
- 386 22. Osborn ZH, Blanton PD, Schwebel DC. Personality and injury risk among professional  
387 hockey players. *J Inj Violence Res*. 2009;1:15-19.
- 388 23. Pujol N, Rousseaux-Blanchi MP, Chambat P. The incidence of anterior cruciate  
389 ligament injuries among competitive Alpine skiers: a 25-year investigation. *Am J Sports*  
390 *Med*. 2007;35:1070-1074.
- 391 24. Schaal K, Tafflet M, Nassif H, et al. Psychological balance in high level athletes:  
392 gender-based differences and sport-specific patterns. *PLoS ONE*. 2011;6:e19007.
- 393 25. Stevenson H, Webster J, Johnson R, Beynnon B. Gender differences in knee injury  
394 epidemiology among competitive alpine ski racers. *Iowa Orthop J*. 1998;18:64-66.
- 395 26. Tjong VK, Murnaghan ML, Nyhof-Young JM, Ogilvie-Harris DJ. A Qualitative  
396 Investigation of the Decision to Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament  
397 Reconstruction To Play or Not to Play. *Am J Sports Med*. 2014;42:336-342.

- 398 27. Viola RW, Steadman JR, Mair SD, Briggs KK, Sterett WI. Anterior Cruciate Ligament  
399 Injury Incidence Among Male and Female Professional Alpine Skiers. *The American*  
400 *Journal of Sports Medicine*. 1999;27:792-795.
- 401 28. Webster KE, Feller JA, Leigh WB, Richmond AK. Younger patients are at increased  
402 risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament  
403 reconstruction. *Am J Sports Med*. 2014;42:641-647.
- 404 29. Wojtys EM, Huston LJ, Lindenfeld TN, Hewett TE, Greenfield MLVH. Association  
405 Between the Menstrual Cycle and Anterior Cruciate Ligament Injuries in Female  
406 Athletes. *Am J Sports Med*. 1998;26:614-619.
- 407 30. Zuckerman M. Sensation seeking and sports. *Personality and Individual Differences*.  
408 1983;4:285-292.
- 409

410 **Figure legends**

411 **Figure 1.** Incidence (number of ACL rupture/number of skiers-year) from 1980 to 2013

412 **Figure 2.** Number of podiums before and after ACL rupture by sex and competition

413 **Figure 3.** Age at the ACL-rupture according to the improvement and deterioration of post-  
414 rupture performance in men and women (\*\*\*) p-value <0.0001)

415

416 **Table legends**

417 **Table 1.** Mean career length ( $\pm$  Standard Deviation) in groups G1 and G2 by discipline and  
418 by sex.

419 **Table 2.** Description of FIS points and international FIS ranking by sex, discipline and group.

420

This article was downloaded by: [INSEP]

On: 15 September 2014, At: 09:04

Publisher: Routledge

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



## Journal of Sports Sciences

Publication details, including instructions for authors and subscription information:  
<http://www.tandfonline.com/loi/rjsp20>

### Marathon progress: demography, morphology and environment

Andy Marc<sup>a</sup>, Adrien Sedeaud<sup>ab</sup>, Marion Guillaume<sup>a</sup>, Melissa Rizk<sup>a</sup>, Julien Schipman<sup>a</sup>, Juliana Antero-Jacquemin<sup>a</sup>, Amal Haida<sup>a</sup>, Geoffroy Berthelot<sup>ab</sup> & Jean-François Toussaint<sup>abc</sup>

<sup>a</sup> Irmes (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), Insep (Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance), Paris, France

<sup>b</sup> Université Paris Descartes Sorbonne Paris Cité, Paris, France

<sup>c</sup> CIMS, Hôtel-Dieu, Paris, France

Published online: 05 Nov 2013.

To cite this article: Andy Marc, Adrien Sedeaud, Marion Guillaume, Melissa Rizk, Julien Schipman, Juliana Antero-Jacquemin, Amal Haida, Geoffroy Berthelot & Jean-François Toussaint (2014) Marathon progress: demography, morphology and environment, *Journal of Sports Sciences*, 32:6, 524-532, DOI: [10.1080/02640414.2013.835436](https://doi.org/10.1080/02640414.2013.835436)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2013.835436>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

## Marathon progress: demography, morphology and environment

ANDY MARC<sup>1</sup>, ADRIEN SEDEAUD<sup>1,2</sup>, MARION GUILLAUME<sup>1</sup>, MELISSA RIZK<sup>1</sup>,  
JULIEN SCHIPMAN<sup>1</sup>, JULIANA ANTERO-JACQUEMIN<sup>1</sup>, AMAL HAIDA<sup>1</sup>,  
GEOFFROY BERTHELOT<sup>1,2</sup>, & JEAN-FRANÇOIS TOUSSAINT<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>*Irmes (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), Insep (Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance), Paris, France,* <sup>2</sup>*Université Paris Descartes Sorbonne Paris Cité, Paris, France,* and <sup>3</sup>*CIMS, Hôtel-Dieu, Paris, France*

(Accepted 13 August 2013)

### Abstract

As opposed to many other track-and-field events, marathon performances still improve. We choose to better describe the reasons for such a progression. The 100 best marathon runners archived from January 1990 to December 2011 for men and from January 1996 to December 2011 for women were analysed. We determined the impact of historical, demographic, physiological, seasonal and environmental factors. Performances in marathons improve at every level of performance (deciles). In 2011, 94% of the 100 best men athletes were African runners; among women athletes they were 52%. Morphological indicators (stature, body mass and Body Mass Index (BMI)) have decreased. We show a parabolic function between BMI and running speed. The seasonal distribution has two peaks, in spring (weeks 14 to 17) and autumn (weeks 41 to 44). During both periods, the average temperature of the host cities varies close to optimal value for long distance race. African men and women runners are increasingly dominating the marathon and pushing its record, through optimal eco-physiological conditions.

**Keywords:** *Marathon, performance, demography, morphology, environment*

### Introduction

Completion of a marathon in less than 2 h is yet to occur. Joyner, Ruiz, and Lucia (2011) estimated that this time limit might be broken by about 2021, with an improvement of 10 s per year until then. The quest to break this record has been on in all five continents for some 40 years. During this time there has been a marked increase in the number of races that occur annually (644 in 1990 to 2820 in 2011) and the number of participants (234,000 registered in 1990 and 1.48 million in 2011) have also increased (Association of Road Racing Statisticians ARRS, s. d.). Coincidentally, new world records in track-and-field have become scarcer. For example, 64% of track-and-field events have had no new records since 1993 (Berthelot et al., 2010). A new world marathon record was set in September 2011 in Berlin by Patrick Makau, a Kenyan runner, in 2 h 3 min and 38 s.

Individual performance depends on endogenous factors such as anthropometric, genetic and physiological characteristics (Lippi, Favaloro, & Guidi, 2008; Macarthur & North, 2005) and environmental

factors that affect all athletes (El Helou et al., 2012; Ely, Chevront, Roberts, & Montain, 2007; Galloway & Maughan, 1997; Vihma, 2010). Globally, the number of participants has increased and so presented a larger genetic diversity in this event. However, the best performances are mainly achieved by runners originating from East Africa who possess physiological characteristics that allow higher standards of performance. Furthermore, the marathon is a track-and-field discipline that is affected by environmental conditions such as temperature, humidity, pollutants, atmospheric pressure and winds. Among these factors, temperature appears to have most influence on performance (El Helou et al., 2012). Because of cultural, media-related and commercial reasons, prestigious international competitions such as the Olympic Games and World Championships, are held in the summer (July and August), under warm and less favourable conditions. The objective of this study is to identify factors that influence best performances in the marathon, considering historical, demographic,

anthropometrical and seasonal characteristics for the 100 yearly best performers from 1990 to 2011. This could allow the identification of the most appropriate profiles as well as the most favourable conditions.

## Method

### Data collection

We collected the results of the top 100 world best performers each year from January 1990 to December 2011 for men and from January 1996 to December 2011 for women. This produced a total of 3800 results (2200 for men and 1600 for women) collected from the open-access website <http://www.iaaf.org/>. For inclusion, men had to have completed races in less than 2 h 18 min, while the equivalent for women was less than 2 h 34 min. For each athlete, birth date, nationality, date and place of the event, race time (converted into speed, in  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), plus stature and body mass were recorded. BMI was calculated.

### Running speed

For men and women, the groups of the 100 top performers were categorised into speed deciles. For each year and each group, the mean and confidence intervals were calculated for each decile and for both sexes as a basis for comparison (equation and coefficient of determination were calculated for men and women).

A Student test was performed to compare the speed of runners integrating the top 100 in 1990 for men and 1996 for women to the speed of those integrating the top 100 in 2011.

### Demography

Athletes' nationalities were categorised into one of the six world regions: Africa, Asia, Europe, North America, South America and Oceania. For each year and both sexes, the contribution of each continent in the top 100 was calculated. One-way between groups ANOVA compared means of the 10 best performers of each continent and identified demographic trends for both sexes. Then, the means of the 10 best performers of each continent were also compared in pairs for both the sexes using a Mann-Whitney test because the sample does not follow a normal distribution and  $n$  is less than 30 (Table I).

### Morphology

The mean and confidence intervals for the top 100 men runners by year were calculated, and a Student Test was performed to compare the stature, body mass and BMI of runners integrating the Top 100

in 1990 for men and 1996 for women to those integrating the Top 100 in 2011.

Then, we determined if there was a correlation between BMI and running speed to complete a marathon. This was done by identifying the maximal running speed for each BMI.

### Seasonal performance

For races between 1990 and 2011 for men and 1996 and 2011 for women, we analysed the number of performances for each week of the year (2200 for men and 1600 for women). The weekly percentage of performances of the total was calculated for both sexes to compare seasonal effects:

$$\frac{n(\text{number of performance by week}) * 100}{N(\text{total})}$$

Statistical analyses were performed with the R software. Statistical significance was considered at  $P < 0.05$ . Effect size for One-Way ANOVA was Cohen's  $d$  and evaluated with Cohen's conventional criteria (Field, 2009). For Mann-Whitney test, the formula for the calculation of effect size is  $r = Z/\sqrt{N}$ , with criteria evaluation:  $\text{abs}(r) = 0.1$  small size,  $\text{abs}(r) = 0.3$  medium size,  $\text{abs}(r) = 0.5$  large size.

## Results

### Running speed

The mean running speed of the top 100 performers has continually increased since 1990 for men and since 1996 for women in all deciles with at least  $P < 0.001$  for men (decile10) and  $P < 0.02$  (decile1) for women. For men, the mean speed was of  $5.30 \pm 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in 1990 and  $5.52 \pm 0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in 2011,  $P < 0.001$ . For women, this trend was similar and rose from a mean speed of  $4.68 \pm 0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in 1996 to  $4.85 \pm 0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in 2011,  $P < 0.001$ . Each year, the best performances of the Top 100 men marathoners were run in  $31 \pm 5$  races. Their mean ranking at the end of each race in which they were engaged was  $4 \pm 3$ . The best performances of the top 100 women runners occurred in  $31 \pm 3$  races. Their mean ranking was  $4 \pm 3$ . Annual modifications in running speed for both sexes were similar for all decile groups throughout the study period (Figures 1 (a) and (b)).

### Demography

*Top 100.* Since 1990, 55% of men's performances were attributable to African runners (of these, 83% were from Kenya and Ethiopia), 24% were from Europe and 15% were from Asia. Since 1996, 39%

Table I. Mean speed of top 10 athletes by continents and sexes, statistically comparing by a test of mean ranks – Mann–Whitney test for men and women.

Sex	Region	Mean ± SD	p-value Africa	Europe	Asia	South America	North America
Men	Africa	5.67 ± 0.03					
	Europe	5.53 ± 0.02	***				
	Asia	5.52 ± 0.03	***	0.153			
	South America	5.49 ± 0.05	***	*	0.057		
	North America	5.47 ± 0.08	***	*	*	*	
	Oceanic	5.39 ± 0.05	***	***	***	**	**
Women	Africa	5.00 ± 0.04					
	Europe	5.00 ± 0.08	NS				
	Asia	4.99 ± 0.05	NS	0.82			
	South America	4.75 ± 0.09	***	***	***		
	North America	4.82 ± 0.10	**	**	**	0.081	
	Oceanic	4.76 ± 0.09	***	***	***	NS	0.14

Note: \* $<0.05$ ; \*\* $<0.01$ ; and \*\*\* $<0.001$ .

For Men:

Africa VS Europe:

$U = 100, Z = 3.82, P < 0.001, r = 0.85;$

Africa VS Asia:

$U = 100, Z = 3.80, P < 0.001, r = 0.85;$

Africa VS South America:

$U = 100, Z = 3.80, P < 0.001, r = 0.85;$

Africa VS North America:

$U = 99, Z = 3.72, P < 0.001, r = 0.83;$

Africa VS Oceania:

$U = 100, Z = 3.79, P < 0.001, r = 0.85;$

Europe VS Asia:

$U = 31, Z = -1.47, P = 0.15, r = 0.33;$

Europe VS South America:

$U = 22.5, Z = -2.12, P < 0.05, r = 0.47;$

Europe VS North America:

$U = 20, Z = -2.29, P < 0.05, r = 0.51;$

Europe VS Oceania:

$U = 100, Z = 3.82, P < 0.001, r = 0.86;$

Asia VS South America:

$U = 0, Z = -1.94, P = 0.06, r = 0.43;$

Asia VS North America:

$U = 20, Z = -2.28, P < 0.05, r = 0.51;$

Asia VS Oceania:

$U = 100, Z = 3.80, P < 0.001, r = 0.85;$

South America VS North America:

$U = 24, Z = -1.98, P < 0.05, r = 0.44;$

South America VS Oceania:

$U = 93.5, Z = 3.31, P < 0.01, r = 0.74;$

North America VS Oceania:

$U = 84.5, Z = 2.63, P < 0.01, r = 0.59.$

For women:

$U = 60.5, Z = 0.81, P = 0.44, r = 0.18;$

$U = 60, Z = 0.76, P = 0.47, r = 0.17;$

$U = 100, Z = 3.80, P < 0.001, r = 0.85;$

$U = 92, Z = 3.19, P < 0.01, r = 0.71;$

$U = 100, Z = 3.80, P < 0.001, r = 0.85;$

$U = 46.5, Z = -0.27, P = 0.80, r = 0.06;$

$U = 0.5, Z = -3.75, P < 0.001, r = 0.84;$

$U = 8, Z = -3.18, P < 0.01, r = 0.71;$

$U = 99, Z = 3.71, P < 0.001, r = 0.83;$

$U = 0, Z = -3.79, P < 0.001, r = 0.85;$

$U = 9.5, Z = -3.08, P < 0.01, r = 0.69;$

$U = 99, Z = 3.72, P < 0.001, r = 0.09;$

$U = 73.5, Z = 1.78, P = 0.08, r = 0.40;$

$U = 45, Z = -0.38, P = 0.73, r = 0.09;$

$U = 70, Z = 1.52, P = 0.14, r = 0.34.$

of women's performances were by Europeans, 30% by Asians and 24% by Africans runners. These percentages have continually evolved (Figure 2 (a) and (b)). For women, the percentage of African runners increased from 6% in 1996 to 52% in 2011. Likewise, for men, the percentage of African runners increased from 16% in 1990 to 94% in 2011. As a result, the demographic contribution of other regions has progressively decreased; the percentage of European women runners was 48% in 1996 but only 24% in 2011. For men, the proportion of European runners reduced from 47% in 1990 to 0% in 2011. The crossing point showing the start of African dominance in the top 100 appeared in

1996 for men. For women, this crossing point occurred 13 years later, in 2009.

#### Top 10 men and women performers for each continent

*Men nationalities in each continental top 10.* There are two nationalities for Africa (8 Kenyan and 2 Ethiopian), six for Europe (5 French, 1 Ukrainian, 1 Italian, 1 Portuguese, 1 Belgian and 1 Swiss), two for Asia (8 Japanese and 2 South Korean), two for South America (6 Mexican and 4 Brazilian), two for Oceania (8 Australian and 2 New Zealander) and only one nationality for North America (10 USA).

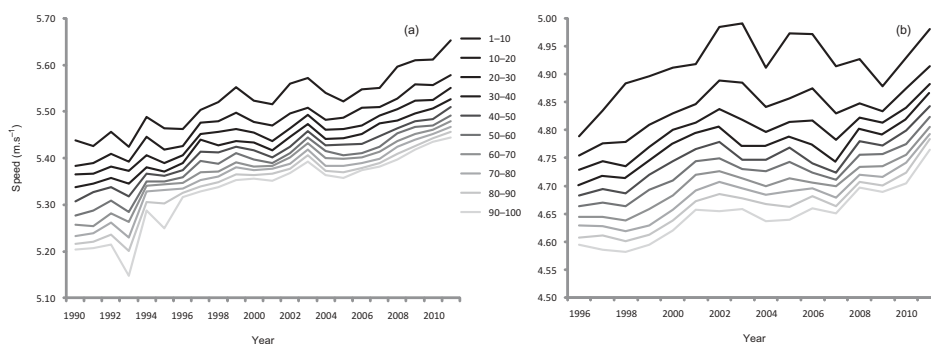


Figure 1. Mean race speeds by season for each decile from the top 100: (a) 1990 to 2011 for men; (b) 1996 to 2011 for women.

Note:

For men:

$$y_1 = -12.56 + 0.009x; R^2 = 0.87;$$

$$y_2 = -10.70 + 0.008x; R^2 = 0.90;$$

$$y_3 = -10.38 + 0.007x; R^2 = 0.91;$$

$$y_4 = -10.66 + 0.008x; R^2 = 0.91;$$

$$y_5 = -10.93 + 0.008x; R^2 = 0.91;$$

$$y_6 = -12.33 + 0.008x; R^2 = 0.89;$$

$$y_7 = -13.45 + 0.009x; R^2 = 0.89;$$

$$y_8 = -14.26 + 0.009x; R^2 = 0.87;$$

$$y_9 = -15.56 + 0.010x; R^2 = 0.87;$$

$$y_{10} = -17.40 + 0.011x; R^2 = 0.84.$$

For women:

$$y_1 = -8.43 + 0.006x; R^2 = 0.32;$$

$$y_2 = -8.82 + 0.006x; R^2 = 0.54;$$

$$y_3 = -9.0 + 0.006x; R^2 = 0.64;$$

$$y_4 = -9.30 + 0.007x; R^2 = 0.62;$$

$$y_5 = -9.80 + 0.007x; R^2 = 0.66;$$

$$y_6 = -10.72 + 0.007x; R^2 = 0.73;$$

$$y_7 = -11.76 + 0.008x; R^2 = 0.78;$$

$$y_8 = -12.70 + 0.008x; R^2 = 0.79;$$

$$y_9 = -13.62 + 0.009x; R^2 = 0.81;$$

$$y_{10} = -14.05 + 0.009x; R^2 = 0.82.$$

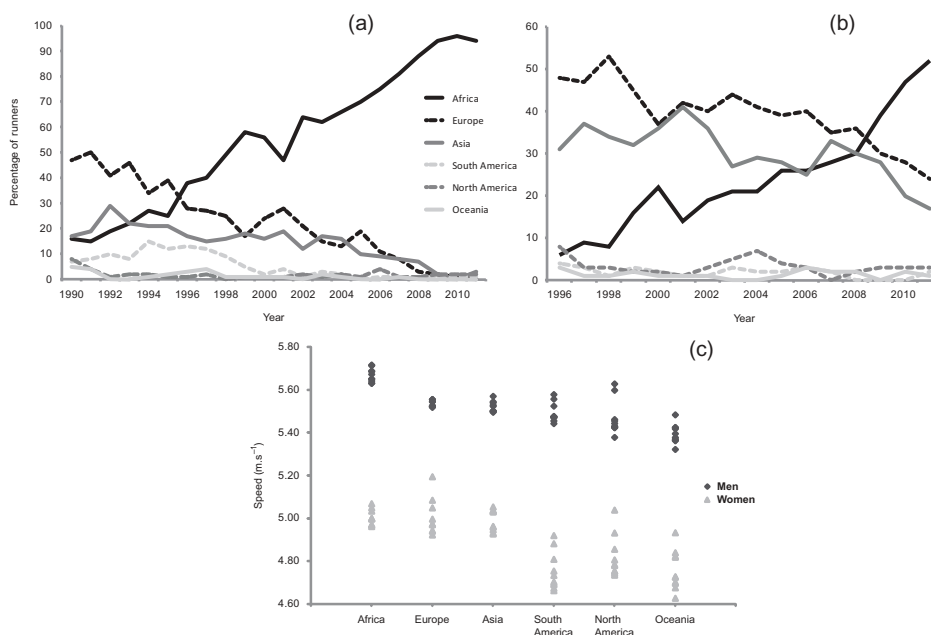


Figure 2. Continental distributions of runners among the top 100 by season (a) from 1990 to 2011 among men and (b) from 1996 to 2011 among women. (c) Race speeds of 10 best performers for the studied season for men and women by continent. Demographic trends are calculated by a one-way ANOVA test for men ( $P < 0.001$ ) and women ( $P < 0.001$ ).

**Women nationalities in each continental top 10.** There are two nationalities for Africa (7 Kenyan and 3 Ethiopian), five for Europe (5 Russian, 2 Romanian, 1 English, 1 German and 1 Belgian), two for Asia (7 Japanese and 3 Chinese), five for South America (5 Mexican, 2 Brazilian, 1 Argentinean, 1 Colombian and 1 Ecuadorian), two for Oceania (6 Australian and 4 New Zealander) and only one nationality for North America (10 USA).

Mean speeds differed by nationality for men (ANOVA men  $P < 0.001$ ) with a large effect ( $d = 0.88$  for men). The fastest were the 10 best African men runners (22 years) whose speeds ranged from  $5.63$  to  $5.72$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , with an overall mean of  $5.67 \pm 0.03$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Running speeds for men also differed according to origin (ANOVA men  $P < 0.001$ ; effect size 0.83) with African men the fastest at least  $5.63$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



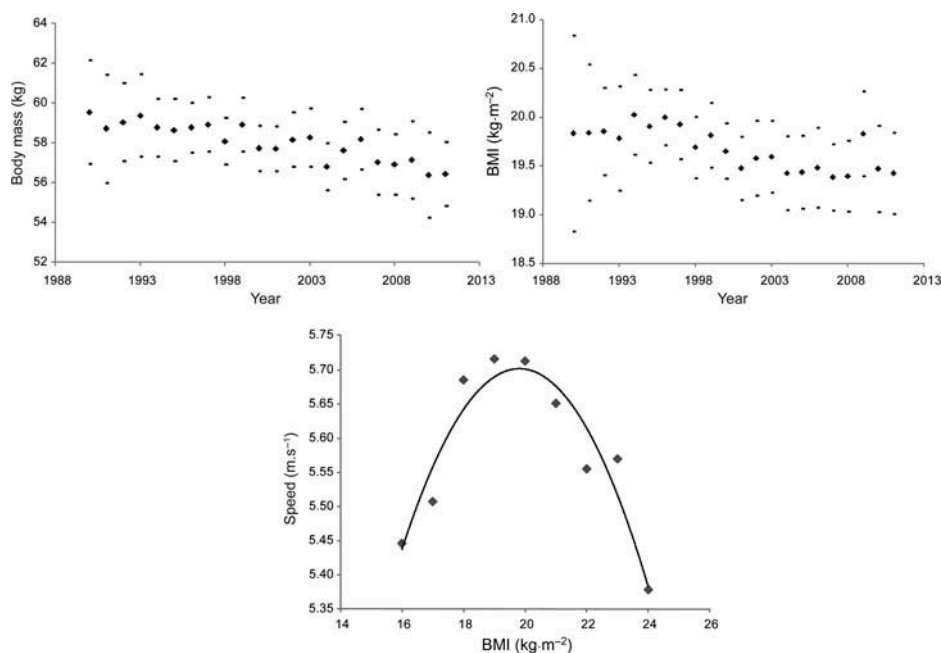


Figure 3. Mean body mass (a) and BMI (b) of the Top 100 men runners and its standard deviation by season (1990 to 2011) (c) Race speed record of the Top 100 men runners by BMI. Modelling function:  $y = -1.4387 + 0.7208x - 0.0182x^2$  and  $R^2 = 0.89$ .

Mean speed of the African 10 best is  $5.67 \pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . These runners are faster than all others competitors (Figure 2 (c) and Table I). The 10 best European and Asian men runners have similar performances with a mean race speed of  $5.53 \pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $5.52 \pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively. In contrast, for women runners, this distribution was less variable across regions (ANOVA women  $P < 0.001$ ; effect size 0.50). The mean performance for the 10 best African runners was  $5.00 \pm 0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , it is  $5.00 \pm 0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  for Europeans and  $4.99 \pm 0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  for Asian runners. However, the athletes from other continents, such as South America, North America and Oceania, have mean speeds of  $4.75 \pm 0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $4.82 \pm 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $4.76 \pm 0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively. They are slower than athletes from Africa, Europe and Asia  $P < 0.01$ .

#### Morphology and running speed of the Top 100 performers

For men, stature, body mass and BMI decreased from 1990 to 2011 (Figure 3 (a) and (b)). Over the entire study period, the stature of the runners ranged from 156 to 190 cm, the body mass from 45 to 78 kg and BMI ranged from 15.78 to 23.05 kg/m<sup>2</sup>. The mean body mass for men decreased significantly from  $59.6 \pm 2.30 \text{ kg}$  in 1990 to  $56.2 \pm 1.10 \text{ kg}$  in 2011 ( $P < 0.01$ ). The mean BMI also decreased significantly from  $19.83 \pm 1.70 \text{ kg}/\text{m}^2$  in 1990 to  $19.42 \pm 1.30 \text{ kg}/\text{m}^2$  in 2011.

In addition, BMI and maximal race speeds were correlated. When modelled with a second-order polynomial function ( $y = -1.4387 + 0.7208x -$

$0.0182x^2$ ,  $R^2 = 0.89$ ), the optimal BMI for men was  $19.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  for a maximal speed of  $5.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Equivalents for women were  $18.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  and  $5.19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figure 3 (c)).

#### Seasonality

Annual performances spread over 50 weeks for men and 47 weeks for women. The distribution shows two peaks. The first peak occurs in weeks 14, 15, 16 and 17 (April) while the second occurs during weeks 41, 42, 43 and 44 (October) (Figure 4). These eight weeks contain 48.7% of women's performances (27.6% for April and 21.1% for October) and 54.4% of men's performance (29.4% for April and 25.0% for October). Performances during weeks 25 to 32 (from early June to late August) represent less than 1% of the total.

#### Discussion

Our study is the first to analyse the overall pattern of elite-standard men and women marathoners over the last 25 years to identify factors that influence performance.

#### Race speeds

This study shows that marathon performances improved for each decile and for both sexes among the annual 100 best runners. This contrasts with sports performances in general that have tended to

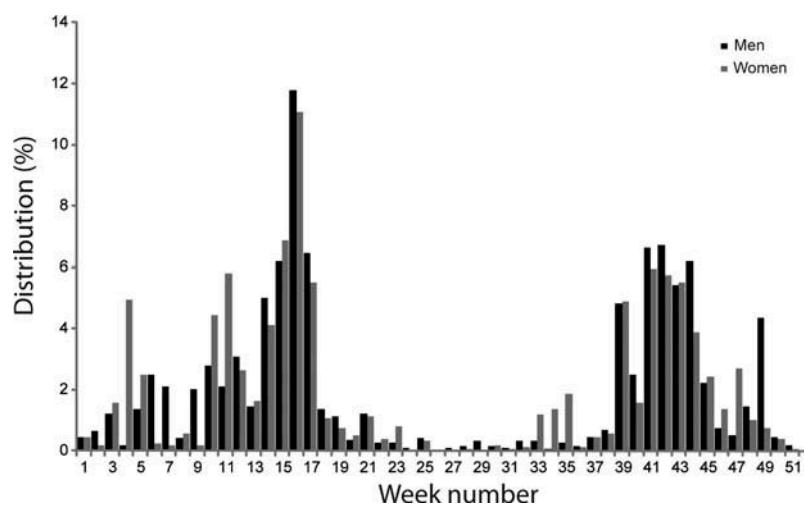


Figure 4. Percentage distributions of the 2200 performances collected from the top 100 of each year of the season (1990 to 2011) for men represented by black columns. Percentage distributions of the 1600 performances collected from the top 100 of each year of the season (1996 to 2011) for women represented by grey columns.

reach a limit; 64% of track-and-field events have not improved since 1993 (Berthelot et al., 2010; Nevill & Whyte, 2005). Moreover, this trend is apparent in many other sports where best performances have stagnated (Berthelot et al., 2008; Desgorces et al., 2008). This might be because of saturation effects, i.e. interactions between genomics (Macarthur & North, 2005; Williams & Folland, 2008), physiology, demography and environmental factors (Desgorces et al., 2008; El Helou et al., 2012). Notably, annual variations in race speeds were similar for each decile. When the first decile (Top 10 speed races) increased or decreased, the last decile (Top 90–100 speed races) varied in the same way. These variations could be associated with mean seasonal climatic conditions recorded in the host cities. This probably explains why the best performances of the top 100 men and women marathoners are accomplished each year in a mean of  $31 \pm 5$  races (in different cities) for men and  $31 \pm 3$  for women (Association of Road Racing Statisticians ARRS, s. d.).

### Demography

The best performances by men in marathons were by athletes from East Africa (mainly Kenya and Ethiopia) and this trend has been progressive from 1990 to 2011 (16% to 94%). Conversely, other nationalities, initially dominant in the list of top 100 performers (from Europe, Asia, South America, North America and Oceania), are increasingly less prominent over the same period, 84% in 1990 to 6% in 2011. This change in domination also occurred in the speed of the 10 best performers from each continent since 1990. While the top 10 African runners ran at a mean speed of  $5.68 \pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

other top 10 runners from other continents were slower ( $5.48 \pm 0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) during the same period. Several studies have attempted to explain the success of Africans. One of the reasons for the dominance could be their physiological characteristics. Despite comparable maximum oxygen uptake, Africans tend to run at a higher percentage of their maxima during competition than Europeans. This results in improved economy (Bosch, Goslin, Noakes, & Dennis, 1990; Larsen, 2003). Kenyan runners also have greater activity of the  $\beta$ -oxidative enzyme HAD (3-hydroxyacyl-CoA-dehydrogenase activity) in their muscles (Saltin, Kim, et al., 1995; Weston, Karamizrak, Smith, Noakes, & Myburgh, 1999). Other authors have shown that sporting ability is characterised by specific genotypes that still need to be identified. Macarthur and North (2005) showed that variation in human performance and athletic ability has long been recognised as having a strong heritable component. Indeed, Rivera et al. (1997) demonstrated strong associations between a restriction fragment length polymorphism in muscle-specific creatine kinase and the response of maximal oxygen uptake ( $\text{VO}_2\text{max}$ ) after 20 weeks of endurance training in 240 unrelated members of the heritage family cohort. East African runners also exhibited greater fatigue resistance (Coetzer et al., 1993). Furthermore, (Onywera, Scott, Boit, & Pitsiladis, 2006), reported that Kenyan runners differed from the general population because of greater physical activity during childhood and adolescence during their travels to school. A higher proportion of athletes had run to school each day (controls 22%, national athletes 73% and international athletes 81%) and covered greater distances than other groups. It has been shown that Kenyan boys who

travelled to school by walking and running had 30% greater  $\text{VO}_{2\text{max}}$  than those who did not (Saltin, Larsen, et al., 1995) and those results were confirmed for Ethiopian runners (Scott et al., 2003). Also, chronic altitude exposure, as experienced by many young East African runners, combined synergistically with endurance training to induce haematological adaptations, which partially accounted for their greater physiological capabilities (Schmidt et al., 2002). However, despite a marked increase in number of African athletes in the world-best performances in recent years, African women runners' superiority is not as strongly established as for men (in 2011, 94% in men as opposed to 52% in women). For performance during the study period, the 10 best race speeds of African women were not greater than those in runners from Europe and Asia.

This difference could be explained by their later and gradual arrival in this activity. Indeed, the increase of women's participation in the Olympic Games has grown from only 1.9% in 1900 to 42.3% in 2008 in Beijing (Olympics at Sports Reference, s. d.). In particular for the marathon, the first appearance of women occurred less than 30 years ago in the Los Angeles Olympic Games of 1984 (O'Brien, 1985). Today, women's mean participation in international marathons is 33% (Association of Road Racing Statisticians ARRS, s. d.). This percentage varies depending on the competition's location (Boston 42%, New York 35%, Berlin 20%). The proportion of African women marathoners will probably increase and reinforce their dominance over other international athletes.

#### *Morphology and running speed*

The morphology of athletes has changed in recent years. Decreases in stature, body mass and BMI have occurred both in men and women runners (Norton & Olds, 2001). Athletic performances require mix attributes, but a key factor might be biometric optimisation. This study shows an optimum BMI of  $19.8 \text{ kg/m}^2$ , even if the 10 best performers of all time have a BMI between 17.5 and  $20.7 \text{ kg/m}^2$ . Morphology and success in various disciplines is linked (O'Connor, Olds, & Maughan, 2007; Sedeaud et al., 2012). Indeed, the BMI of marathoners is one of the lowest of all disciplines. Several studies have investigated biometrical characteristics of runners, especially those from Africa (Dennis & Noakes, 1999; Kong & de Heer, 2008; Larsen, 2003; Marino et al., 2000).

As regards thermoregulation, the superior running performance of African runners can be partly attributed to their lower BMI. Their ability to run faster is particularly notable in warm conditions where differences in performance are even greater between

Africans and non-Africans. This could be attributable to improved ability to release heat than heavier Caucasian runners (Marino et al., 2000). It has also been shown that small body size could be an advantage in distance running, particularly in the heat (Dennis & Noakes, 1999; Marino et al., 2000). A greater proportion of lean body mass could account for differences in running performance in the heat between individuals of different sizes. It has been hypothesised that a rise of ambient temperature from 25 to  $35^\circ\text{C}$  causes larger and heavier runners to run slower because of greater accumulation of body heat that increases body temperature and so accelerates the onset of fatigue (Dennis & Noakes, 1999; Marino et al., 2000).

Kong and de Heer (2008) claimed that the gracile limbs of Kenyan endurance runners contribute to improved performances because of their lower moments of inertia, and hence, required less internal mechanical work to be done during each running stride. In addition, the reduced ground contact time in these runners could improve running economy. Such a reduction in turn reduces braking forces to decelerate forward motion. The morphology of these athletes could be advantageous in terms of thermodynamics (Larsen, 2003). Indeed, their lighter legs compared with those of Nordic athletes' produced less heat and allowed an easier and faster stride.

#### *Seasonality*

The best performances occurred in late April (weeks 14 to 17) and late October (weeks 41 to 44). The major races occurred in London, Boston, Rotterdam and Paris for the first peak, and New York, Berlin, Chicago and Amsterdam for the second one. Best performances by men during these two periods are greater than those by women, 54.4% against 48.6%, respectively. This can be explained by the dissociation of races between sexes. For women, peaks at weeks 4, 10 and 11 corresponded to marathons exclusively for women, respectively, in Osaka, Nagoya and Seoul (Osaka: start time 12:00 with mean temperature since 2001 of  $7.3^\circ\text{C} \pm 1.8^\circ\text{C}$ ; Nagoya: start 09:00 with a mean temperature since 2005 of  $8.8^\circ\text{C} \pm 3.4^\circ\text{C}$ ). However, the two peaks of the year match the optimal mean temperature condition for a marathon ( $10^\circ\text{C}$ ) recorded during these periods in the northern hemisphere during races (El Helou et al., 2012). Furthermore, no world records and few good annual performances are established in the summer during the Olympic Games, Continental or International Championships. Despite the high standard of competition in these events, the lack of great performances can be explained by the temperatures during this period of year: they are too far from the optimum value during

a marathon (Athens Olympic 2004: 25.6°C, Beijing 2008: 25.0°C and world Championship Berlin 2009: 20.7°C). Temperature has adverse effects on marathon runners. Heat causes a major alteration of cardiovascular, metabolic, neuromuscular and thermoregulatory function, and consequently, hyperthermia appears to be the key limiter of exercise performance in the heat (Galloway & Maughan, 1997; Hargreaves, 2008). A study of the Stockholm Marathon (Vihma, 2010) and a large epidemiological study on all participants in the Boston, Chicago, New York, Paris, London and Berlin marathons from 2001 to 2010 confirmed this trend and showed that ambient temperature is influential (El Helou et al., 2012).

## Conclusion

In this study, we have identified the main factors that will allow marathoner runners to improve. Each decade of the Top 100 has continued to progress over the last 20 years with similar annual variation. We have demonstrated that demography plays an important role in the improvement of top performances, with a progression of domination of African runners' performances. Furthermore, the best performances were made during periods characterised by lower temperatures (April and October) in response to optimal temperatures for endurance running (approximately 10°C). Thus, when all these conditions are assembled, performance will probably continue to improve.

## Acknowledgements

The authors thank INSEP teams for their full support.

## References

- Association of Road Racing Statisticians (ARRS). (s. d.). Association of Road Racing Statisticians ARRS. Consulté de. Retrieved from <http://www.arrs.net/>
- Berthelot, G., Tafflet, M., El Helou, N., Len, S., Escolano, S., Guillaume, M., ... Toussaint, J. F. (2010). Athlete atypicity on the edge of human achievement: Performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS One*, 5(1), e8800.
- Berthelot, G., Thibault, V., Tafflet, M., Escolano, S., El Helou, N., Joven, X., ... Toussaint, J. F. (2008). The citius end: World records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS One*, 3(2), e1552.
- Bosch, A. N., Goslin, B. R., Noakes, T. D., & Dennis, S. C. (1990). Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(1-2), 68-72.
- Coetzer, P., Noakes, T. D., Sanders, B., Lambert, M. I., Bosch, A. N., Wiggins, T., & Dennis, S. C. (1993). Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 75(4), 1822-1827.
- Dennis, S. C., & Noakes, T. D. (1999). Advantages of a smaller bodymass in humans when distance-running in warm, humid conditions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 79(3), 280-284.
- Desgorges, F.-D., Berthelot, G., El Helou, N., Thibault, V., Guillaume, M., Tafflet, M., ... Toussaint, J. F. (2008). From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS One*, 3(11), e3653.
- El Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., ... Toussaint, J. F. (2012). Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS ONE*, 7(5), e37407.
- Ely, M. R., Cheuvront, S. N., Roberts, W. O., & Montain, S. J. (2007). Impact of weather on marathon-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 487-493.
- Field, A. (2009). *Discovering statistics using SPSS* (3rd ed.). London: Sage Publications Ltd.
- Galloway, S. D., & Maughan, R. J. (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(9), 1240-1249.
- Hargreaves, M. (2008). Physiological limits to exercise performance in the heat. *Journal of Science and Medicine in Sport/Sports Medicine Australia*, 11(1), 66-71.
- Joyner, M. J., Ruiz, J. R., & Lucia, A. (2011). The two-hour marathon: Who and when? *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 110(1), 275-277.
- Kong, P. W., & de Heer, H. (2008). Anthropometric, gait and strength characteristics of Kenyan distance runners. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7, 499-504.
- Larsen, H. B. (2003). Kenyan dominance in distance running. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology*, 136(1), 161-170.
- Lippi, G., Favaloro, E. J., & Guidi, G. C. (2008). The genetic basis of human athletic performance. Why are psychological components so often overlooked? *The Journal of Physiology*, 586(Pt 12), 3017; author reply 3019-3020.
- Macarthur, D. G., & North, K. N. (2005). Genes and human elite athletic performance. *Human Genetics*, 116(5), 331-339.
- Marino, F. E., Mbambo, Z., Kortekaas, E., Wilson, G., Lambert, M. I., Noakes, T. D., & Dennis, S. C. (2000). Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, 441(2-3), 359-367.
- Nevill, A. M., & Whyte, G. (2005). Are there limits to running world records? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(10), 1785-1788.
- Norton, K., & Olds, T. (2001). Morphological evolution of athletes over the 20th century: Causes and consequences. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(11), 763-783.
- O'Brien, M. (1985). Women and sport. *Applied Ergonomics*, 16(1), 25-39.
- O'Connor, H., Olds, T., & Maughan, R. J. (2007). Physique and performance for track and field events. *Journal of Sports Sciences*, 25(suppl. 1), S49-60.
- Olympics at Sports Reference. (s. d.). *Olympics at Sports-Football-Reference.com*. Consulté avril 18, 2012, de. Retrieved from <http://www.sports-reference.com/olympics/>
- Onywera, V. O., Scott, R. A., Boit, M. K., & Pitsiladis, Y. P. (2006). Demographic characteristics of elite Kenyan endurance runners. *Journal of Sports Sciences*, 24(4), 415-422.
- Rivera, M. A., Dionne, F. T., Simoneau, J. A., Pérusse, L., Chagnon, M., Chagnon, Y., ... Bouchard, C. (1997). Muscle-specific creatine kinase gene polymorphism and VO<sub>2</sub>max in the HERITAGE Family Study. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(10), 1311-1317.
- Saltin, B., Kim, C. K., Terrados, N., Larsen, H., Svedenhag, J., & Rolf, C. J. (1995). Morphology, enzyme activities and buffer

- capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 5(4), 222–230.
- Saltin, B., Larsen, H., Terrados, N., Bangsbo, J., Bak, T., Kim, C. K., ... Rolf, C. J. (1995). Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 5(4), 209–221.
- Schmidt, W., Heinicke, K., Rojas, J., Manuel Gomez, J., Serrato, M., Mora, M., ... Keul, J. (2002). Blood volume and hemoglobin mass in endurance athletes from moderate altitude. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34(12), 1934–1940.
- Scott, R. A., Georgiades, E., Wilson, R. H., Goodwin, W. H., Wolde, B., & Pitsiladis, Y. P. (2003). Demographic characteristics of elite Ethiopian endurance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(10), 1727–1732.
- Sedeaud, A., Marc, A., Schipman, J., Tafflet, M., Hager, J.-P., & Toussaint, J.-F. (2012). How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *British Journal of Sports Medicine*, 46(8), 580–584.
- Vihma, T. (2010). Effects of weather on the performance of marathon runners. *International Journal of Biometeorology*, 54(3), 297–306.
- Weston, A. R., Karamizrak, O., Smith, A., Noakes, T. D., & Myburgh, K. H. (1999). African runners exhibit greater fatigue resistance, lower lactate accumulation, and higher oxidative enzyme activity. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 86(3), 915–923.
- Williams, A. G., & Folland, J. P. (2008). Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. *The Journal of Physiology*, 586(1), 113–121.

1 **Medical reasons behind leaves from male and female professional tennis competitions**

2

3 **Running title:** Medical reasons and leaves in elite tennis

4

5

6 **ABSTRACT**

7 **Background:** The number of leaves from professional tournaments has increased but the  
8 reasons behind this have not yet been analysed. An official consensus statement has been  
9 conducted to allow a general categorisation of injuries in tennis.

10 **Hypothesis/Purpose:** The aim was to determine the reasons for leaves and injury rates in  
11 professional tennis.

12 **Study Design:** Descriptive epidemiology study.

13 **Methods:** All reasons for leaves were collected from official ATP and WTA web pages. All  
14 tournaments apart from Grand Slams were included for the period 2001-2013 for men and  
15 women. Personal data, tournament information, surface, matches setting, date and reason  
16 were obtained for each leave scenario.

17 **Results:** Variations in leave and injury rates were seen throughout the season. Women left  
18 and were injured significantly more than men; they mainly left due to thigh injuries, whereas  
19 men left mainly due to back injuries. Surface only had an influence on the risk of lower back  
20 injuries. Only women are affected by the stage number.

21 **Conclusion:** A high level of retirements, withdrawals and lucky losers (replacement of a  
22 player withdrawing before the start of the tournament by a lucky loser from the qualifiers) is  
23 reached during the past ten years on the ATP and WTA circuits. Injuries are the main reasons  
24 of these leaves regardless of type of leave and gender. Back and thigh are the main locations  
25 for men and women respectively. Strategy seems different between men and women.

26 **Key Terms:** Tennis, Epidemiology, Injury, Professional players

27 **What is known about the subject:** An increased occurrence of leaves has been seen in  
28 professional tennis over the past decades.

29 **What this study adds to existing knowledge:** A detailed insight in the reasons for leaves in  
30 professional tennis and an indication of which injuries that cause players to retire or withdraw  
31 from ATP and WTA tournaments.

## 32 INTRODUCTION

33 Since the mid-1980s a threefold increase in player leaves (retirements, withdrawals and lucky  
34 losers) from Association of Tennis Professionals (ATP) tours has been noticed with an  
35 acceleration during the past ten year<sup>3</sup>.

36 Previous studies<sup>1,30</sup> have attempted to complete a literature review of injury epidemiology in  
37 tennis. Both concluded that it was difficult to draw a good comparison between past studies  
38 due to different injury definitions and inclusion criteria. Pluim et al.<sup>29</sup> therefore established an  
39 official consensus for the International Tennis Federation including definitions, methods and  
40 reporting standards applicable to the specific requirements of tennis.

41 Only one study<sup>33</sup> has up till now analysed medical assessment of professional players using  
42 the consensus statement<sup>29</sup>. This study included both on and off court needs of medical  
43 assessment over 16 years (1994-2009) at the US Open and showed that the majority of  
44 treatments occurred during matches. However, these results contained both medical  
45 conditions forcing a tournament leave and minor concerns that did not affect the ability to  
46 play.

47 It is fundamental to understand how and when these injuries occur in order to generate better  
48 prevention strategies. An external risk factor, which has previously been discussed in the  
49 literature, is the surface type. Since tennis at professional level is played on four different  
50 surfaces (hard, clay, grass and carpet), it is plausible that each could provoke specific injuries  
51 due to the biomechanical differences at ball and foot contact<sup>24,26</sup>. Yet friction properties of  
52 surfaces and injury risk were previously studied but no relationship was found<sup>24</sup>.



53

54 The aim of the study was to assess the reasons that forced players to retire or withdraw from  
55 the ATP and WTA tournaments and study them as a function of gender, surface type, month  
56 of the year and tournament round.

## 57 **METHODS**

### 58 **Data collection**

59 Data from single matches were collected from the period 2001 to 2012 for men and 2003 to  
60 2012 for women (earlier tournaments did not include full data). This study therefore used a  
61 research protocol qualified as non-interventional, in which “... all acts are performed in a  
62 normal manner, without any supplemental or unusual procedure of diagnosis or monitoring.”  
63 (Article L1121-1 of the French Public Health Code). According to the law, its approval  
64 therefore did not fall under the responsibility of a committee for the protection of persons. For  
65 these reasons, it is not necessary to obtain informed consent from the athletes evaluated. This  
66 study is designed and monitored by the Institute for Research in Medicine and Epidemiology  
67 of Sports scientific committee.

68 The three tournament series for men included in this study were ATP Master 1000 (formerly  
69 called Tennis Masters Series (2001-2003) and ATP Masters Series (2004-2008)), ATP  
70 Masters 500, (formerly called ATP International Series Gold (2001-2008)), and ATP World  
71 Tours 250 (formerly called ATP International Series 2001-2008). For women the tournament  
72 series included were Premier, International and non-titled. No data was included on Grand  
73 Slam tournaments since reasons for leaves were not described. All tournament information  
74 was collected from archives on the official ATP and WTA webpage<sup>2,39</sup> resulting in a sum of  
75 734 tournaments for men and 534 tournaments for women, with a total number of 27,658 and  
76 19,285 matches respectively.

77 Information on retirements, withdrawals and entries of lucky losers in all tournaments was

78 obtained. Retirement was defined as a player who retires because of illness or injury after the  
79 match has started and withdrawal as a leave prior to the start of the match by a player who is  
80 unable to compete because of illness, injury or any other reason<sup>38</sup>. A lucky loser scenario is a  
81 replacement of a player withdrawing before the start of the tournament by a lucky loser from  
82 the qualifiers. The total number of leaves obtained was 1448 for men and 1478 for women.  
83 Each case scenario included details on the player (name and gender), tournament (type,  
84 number of matches, month of competition, surface and stage at which the player stopped), and  
85 leave reasons (medical or non-medical). Data from carpet surface matches were not included  
86 when comparing surface types due to the low amount of tournaments played on carpet and  
87 since it is no longer used for ATP and WTA tours (ended 2009).  
88 Medical classifications followed the consensus statement by Pluim et al.<sup>29</sup>. It was necessary to  
89 adapt the sub-location classification by creating larger categories for “arm+”, “leg+” and  
90 “back+” since some injury descriptions in the tournament reports were insufficient to sub-  
91 categorise with regards to the medical consensus; illness classifications were not included as it  
92 was not possible to classify these due to lack of clear descriptions on the data sheets.

### 93 **Data analysis**

94 Data was calculated as incidence rates per 1000 match exposures (IR) with confidence  
95 intervals (CI) and incidence rate ratio (IRR) as described by Knowles et al.<sup>21</sup>, which has  
96 previously been used in tennis epidemiology studies<sup>17,33,37</sup>. Chi-square tests were performed to  
97 compare injury and mean reasons for leaves between genders, surfaces and type of leave.  
98 Pearson’s correlation was used to calculate the correlation between injuries and leave  
99 incidence rates, yearly and monthly. All statistics were treated with R software (Version 3.0.0,  
100 R Development Core Team, Vienna, Austria). Statistical significance was accepted at  $p < 0.05$ .

101 **RESULTS**

102 **Reasons behind leaves**

103 Women leave tournaments significantly more frequently (IR 65.65±3.62) than men (IR  
104 52.68±2.71). This mostly relates to a large difference in lucky loser rates and to the difference  
105 in withdrawal rates (Table 1). No significant gender difference was seen between retirement  
106 rates. More than 50% of leaves were caused by injuries for both genders with a significantly  
107 higher IR for women (IR 40.03±2.82) in comparison to men (IR 28.74±2.00). Illness was the  
108 second largest cause of leaves resulting in ~15 % of all leaves followed by approximately 2 %  
109 due to non-medical conditions such as denied visa, plane problems or personal reasons (Table  
110 1). Also 20.4 % of women's leaves and 27.7 % for men did not include any information on  
111 the reasons behind the leave (Table 1).

112 \*\*\* Insert Table 1\*\*\*

113 **Injury frequencies**

114 The most injured main body part was the lower limb for both genders. There was a  
115 significantly higher rate for women (IR 21.16±2.05) than men (IR 13.52±1.37). For women it  
116 was followed by upper limb (IR 10.16±1.42) and trunk (IR 7.10±1.19) whereas the trunk (IR  
117 6.98±0.98) and upper limb (IR 6.91±0.98) were equally injured for men (Table 2).

118 For men the most frequently reported region was the back, which together with the lower  
119 back/sacrum/pelvis section, which only contained lower back injuries, account for 18.6 % of  
120 all injury cases in men. For women this accounted for 11 % (p<0.01 for the gender  
121 difference). For women the most frequently reported injury region was the thigh (IR  
122 4.44±0.82) which involved both quadriceps and hamstring injuries (vs IR 2.39±0.58 for men).  
123 These injury rates were followed by shoulder/clavicle, ankle, knee, and wrist. Each of these  
124 body parts together with the hip caused a significantly higher IR for women as compared to  
125 men.

126

127 **External factors**

128 No significant difference in leave rate was reported between surfaces for men whereas women  
129 were significantly more injured on hard court than clay (Figure 1). A larger CI was observed  
130 for matches on grass as less tournament games are performed on this surface. Trunk injuries  
131 were significantly more frequent on grass than on hard courts for women and on clay for men.  
132 There are no statistical differences for the other body locations.

133 \*\*\* Insert Figure 1\*\*\*

134 Correlations for women and men were observed between injuries and general leaves on a  
135 monthly basis (Figure 2). The pattern of the year shows that women have leave rate peaks in  
136 January, May, June and August. There is no relationship between injury rates and the mean  
137 number of monthly matches (Figure 3).

138 \*\*\* Insert Figure 2 \*\*\*

139 \*\*\* Insert Figure 3 \*\*\*

140 Figure 4 shows different tendencies of general and injury related retirements at each round of  
141 the tournaments. Men's retirements have a stable tendency throughout the tournament round  
142 apart from the finals, whereas women increase their retirement risk until they reach the semi-  
143 finals.

144 \*\*\* Insert Figure 4 \*\*\*

145 **DISCUSSION**

146 This study examined the reasons behind leaves in professional tennis competitions focusing  
147 primarily on the medical reasons. It was demonstrated that injuries are the main cause of leave  
148 for both genders. Injuries constantly accounted for over 50 % of all known reasons for leaves.  
149 These injuries mainly caused retirements (>50 %). The studied period varied for men and  
150 women since no data was accessible prior to 2003 for women. But no changes in leave

151 tendencies were seen in the additional years included for men and it was preferred to include  
152 all data available to have a more complete analysis.

153 The significant increase in leaves during the studied period may be explained by the evolution  
154 of the game: players now play tennis at increased pace and strength, the faster ball speed at  
155 service and the ball strike earlier in the exchange being the most obvious indicators<sup>6</sup>. The  
156 length of games is also an important indicator with 23 of the 29 longest matches in men's  
157 tennis history occurring in the last 10 years. This development may also be related to financial  
158 issues<sup>40</sup>. During the studied period the proportion of injuries increased from 50 to 65 % for the  
159 men and stayed in the range between 60 and 70 % for the women. It was not possible to  
160 determine the injury severity because diagnosis and break after the leaves were not available  
161 in the tournament reports. One can also wonder if players did not sometimes prefer to  
162 withdraw in order to preserve some of their season results.

163 According to the consensus statement of medical conditions, the most injured location was the  
164 lower limb, followed by upper limb and trunk, with significant gender differences when  
165 looking at the subcategories. Our results are consistent with literature reviews on the main and  
166 subcategory locations<sup>27,28,30</sup> although 60 % of studies on tennis (year 1989-2005) focused on  
167 upper extremity (only 7 of the 119 identified articles focused on trunk injuries and 16 on the  
168 lower limb)<sup>30</sup>. A study of all medical activity during the U.S. Open between 1991-2009 leads  
169 to similar tendencies<sup>33</sup> and the result also seems recurrent in many other sports<sup>32</sup>.

170 The most commonly injured sub-location for men was the additionally included section  
171 "back+" which provokes 18.1 % of all injury. It is therefore the largest area of concern for  
172 male players. A recent study concluded that this location is also an important one for female  
173 tennis players with a high intensity of pain<sup>15</sup>. Lower back injury risk has been associated with  
174 the prone motions of rotational and hyperextension shearing effects and with high lower back  
175 muscle activation which is especially common in tennis serves<sup>4,13</sup>. Trunk injuries occur more

176 frequently on grass in comparison to clay and hard courts. The grass period covers a small and  
177 intense period with little time for adaptation. In addition, the number of aces is the highest on  
178 grass court (Wimbledon) than any other Grand Slam for men<sup>6</sup>. Therefore if the playing trends  
179 have not altered since the study by O'Donoghue and Ingram in 2001<sup>26</sup> then the shorter rallies  
180 played on this surface and higher frequency of serves could explain the increased back  
181 injuries observed on grass.

182 Shoulder injuries accounted for the second most injury leaves for both genders. Shoulder  
183 injuries account for a large proportion in tennis<sup>7,8,31</sup> as well as other racket sports<sup>10,23</sup>. The  
184 shoulder joint overload occurring in tennis was not different depending on surface type, which  
185 indicates a general problem. It is believed that the imbalance in eccentric-concentric ratio of  
186 the rotator cuff causes more shoulder injuries in high level tennis<sup>8,14,25</sup>, and tennis specific  
187 rehabilitation programs are already published<sup>5,14,31</sup>.

188 Women mostly left with injuries in the thigh region. Muscle strains of the thigh are among the  
189 most common injuries for top athletes<sup>9,16,19</sup> and normally related to eccentric muscle  
190 efficiency<sup>11,22,35</sup>. It is therefore no surprise that this region is commonly affected in tennis. Yet  
191 Sell et al.<sup>33</sup> did not indicate a large rate of thigh treatments during the US Open. It was only  
192 the 9<sup>th</sup> most frequently treated region for women; men were almost twice as often treated  
193 during these tournaments. This inconsistency with Sell et al.<sup>33</sup> could be related to competition  
194 level or variation in the inclusion criteria.

195 This study is the first wide study to look at epidemiology for top level (ATP and WTA  
196 players). It is therefore not surprising to observe differences between our results and those  
197 reported in the literature. Globally, the ratios of focus between body parts show a mismatch  
198 with what has been shown to be the critical injury locations causing leaves from professional  
199 tournaments. For example, a well-known injury of tennis, lateral epicondylitis is commonly  
200 expected to be a high risk factor for tennis players but elbow injuries were rare for

201 professionals, which may be nowadays due to a well-developed backhand stroke<sup>20,30,34</sup>. The  
202 conditions under which professional tennis players practice are, naturally, not the same as  
203 lower level players, particularly their equipment, physical training and medical care. It is thus  
204 inappropriate to extrapolate the results obtained into different populations of players.

205 Our analysis shows that women have a higher risk ( $p < 0.001$ ) of leaving a tournament and  
206 being injured. The gender impact is clearly significant on the injury location, yet this  
207 difference is less clear for sports in general<sup>11,13,32,36,40</sup>. This gender difference may result from  
208 variables associated with personality traits (self-esteem, perfectionism, mood states) or the  
209 history of life stressors, coping resources capacity and social support<sup>18</sup>.

210 It may also result from differences in the strategy developed by women and men. Throughout  
211 the season the monthly number of matches varied from less than 2000 up to more than 4000  
212 for the ATP and WTA; it was expected that the calendar could affect the number of leaves.  
213 Analysis of the monthly distribution of injuries based on the number of matches does not  
214 indicate a trend among men but women fluctuated throughout the season peaking in IR in  
215 January, May, June and August, which all include the preparatory phases for Grand Slams.  
216 Women may undergo higher loads at these periods but they may also choose to leave  
217 tournaments prior to Grand Slams in order to fully recover for these important events. In  
218 addition, the leave and injury incidence rates increased up until the semi-final for women  
219 whereas men were not affected by the stage.

220 The career model for women is similar in length but occurring two years earlier than men<sup>12</sup>.  
221 This discrepancy can be explained by differences in anatomical development, hormonal and  
222 physiological gender. The average age to reach the top positions in the world ranking is 15.9  
223 years for women<sup>12</sup>. This requires physical demands of players during adolescence, which may  
224 contribute to an increased injury rate for WTA players.

225 Several difficulties in following the structure of the official consensus statement were  
226 experienced. Firstly, leave reasoning given at the tournaments was difficult to categorise as  
227 according to Pluim et al.<sup>29</sup> due to different terminologies. It was only possible to follow the  
228 main grouping of medical locations but with an adaptation by creating additional  
229 subcategories: “back+, leg+ and arm+” for injuries which did not fit into the official  
230 subcategories. Moreover, it was not possible to classify the types of injuries due to the  
231 imprecise diagnostic reporting. It is therefore difficult to assess more precisely the type of  
232 injuries, the evolution along the years, the differences between men and women and  
233 consequently to be able to offer preventive advice. It was also not possible to subdivide the  
234 illnesses into the consensus statement categories. The consensus statement is a recent work  
235 but reasoning of leaves should also be standardised in the future.

236 Tournament reports from the past ten years include the reasons for leaves. Approximately  
237 80% of them were completed and demonstrated that more than 50 % are due to injuries.  
238 However, it is impossible to extrapolate the missing reasons for the remaining 20 %. For the  
239 men the percentage of missing data is relatively stable over the period, whereas for the  
240 women, the first two years were poorly filled (more than 30 % of missing data), but the  
241 following years have an even lower percentage of missing data of 10 to 15 %. Ultimately, the  
242 missing data prevent a deeper analysis of the evolution of the reasons for leaves, and hinder in  
243 linking these with explanatory factors.

244

245

## 246 **CONCLUSION**

247 Leaves reached a high level during the past ten years in ATP and WTA tournaments,  
248 regardless of type of leave and gender, injuries were the main causes for these. Women are  
249 significantly more injured than men and leave tournaments significantly more. Concerning the



250 injuries the most affected body part was the lower limb for both genders. Back injuries are the  
251 most problematic for men. Women increase their rate of leave throughout tournaments. In  
252 addition, they had four months throughout the year where the IR peaked, which all included  
253 pre-Grand Slam periods. Men did not show such tendencies. Consequently the strategy for  
254 women and men seems different.

255 This study highlights the difference between women and men for several parameters but it  
256 was not designed to understand the reasons for these differences. Future studies should try to  
257 explain the different gender risk factors. This study also highlights the specificity of the  
258 professional players who are not included frequently in studies and as such the results from  
259 other populations could not be extrapolated.

260

261 **References**

262

- 263 1. Abrams GD, Renstrom PA, Safran MR. Epidemiology of musculoskeletal injury in the  
264 tennis player. *Br J Sports Med.* 2012;46(7):492-498. doi:10.1136/bjsports-2012-091164.
- 265 2. Association of Tennis Professionals. ATP World Tour - Results Archive. *ATP World Tour -*  
266 *Results Arch.* Available at: [http://www.atpworldtour.com/Scores/Archive-Event-](http://www.atpworldtour.com/Scores/Archive-Event-Calendar.aspx)  
267 [Calendar.aspx](http://www.atpworldtour.com/Scores/Archive-Event-Calendar.aspx). Accessed July 9, 2013.
- 268 3. Breznik K, Batagelj V. Retired matches among male professional tennis players. *J Sports*  
269 *Sci Med.* 2012;11:270–278.
- 270 4. Chow JW, Park S-A, Tillman MD. Lower trunk kinematics and muscle activity during  
271 different types of tennis serves. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol.*  
272 2009;1(1):24. doi:10.1186/1758-2555-1-24.
- 273 5. Cools AM, Declercq G, Cagnie B, Cambier D, Witvrouw E. Internal impingement in the  
274 tennis player: rehabilitation guidelines. *Br J Sports Med.* 2008;42(3):165-171.  
275 doi:10.1136/bjism.2007.036830.
- 276 6. Cross R, Pollard G. Grand Slam men’s tennis 1991-2009. Serve speed and other related  
277 data. *ITF Coach Sport Sci Rev.* 2009;16(49):8-10.
- 278 7. Elliott B, Fleisig G, Nicholls R, Escamilia R. Technique effects on upper limb loading in  
279 the tennis serve. *J Sci Med Sport Sports Med Aust.* 2003;6(1):76-87.
- 280 8. Elliott B. Biomechanics and tennis. *Br J Sports Med.* 2006;40(5):392-396.  
281 doi:10.1136/bjism.2005.023150.

- 282 9. Engebretsen L, Soligard T, Steffen K, et al. Sports injuries and illnesses during the  
283 London Summer Olympic Games 2012. *Br J Sports Med*. 2013;47(7):407-414.  
284 doi:10.1136/bjsports-2013-092380.
- 285 10. Fahlström M, Yeap JS, Alfredson H, Söderman K. Shoulder pain – a common problem in  
286 world-class badminton players. *Scand J Med Sci Sports*. 2006;16(3):168–173.  
287 doi:10.1111/j.1600-0838.2004.00427.x.
- 288 11. Garrett WE Jr. Muscle strain injuries: clinical and basic aspects. *Med Sci Sports Exerc*.  
289 1990;22(4):436-443.
- 290 12. Guillaume M, Len S, Tafflet M, et al. Success and decline: top 10 tennis players follow a  
291 biphasic course. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(11):2148-2154.  
292 doi:10.1249/MSS.0b013e31821eb533.
- 293 13. Hainline B. Low back injury. *Clin Sports Med*. 1995;14(1):241-265.
- 294 14. Hoeven H van der, Kibler WB. Shoulder injuries in tennis players. *Br J Sports Med*.  
295 2006;40(5):435-440. doi:10.1136/bjism.2005.023218.
- 296 15. Igor J, Zoran G, Tajna L. Prevalence and Topology of Pain in Professional Male and  
297 Female Tennis Players. *Homo Sport*. 2013;15(1):42-46.
- 298 16. Jacobsson J, Timpka T, Kowalski J, et al. Injury patterns in Swedish elite athletics: annual  
299 incidence, injury types and risk factors. *Br J Sports Med*. 2013;47(15):935-936.  
300 doi:10.1136/bjsports-2012-091651.

- 301 17. Jayanthi NA, O'Boyle J, Durazo-Arvizu RA. Risk Factors for Medical Withdrawals in  
302 United States Tennis Association Junior National Tennis Tournaments: A Descriptive  
303 Epidemiologic Study. *Sports Health Multidiscip Approach*. 2009;1(3):231-235.  
304 doi:10.1177/1941738109334274.
- 305 18. Johnson U. Psychosocial antecedents of sport injury, prevention, and intervention: An  
306 overview of theoretical approaches and empirical findings. *Int J Sport Exerc Psychol*.  
307 2007;5(4):352–369.
- 308 19. Junge A, Engebretsen L, Mountjoy ML, et al. Sports Injuries During the Summer Olympic  
309 Games 2008. *Am J Sports Med*. 2009;37(11):2165-2172.  
310 doi:10.1177/0363546509339357.
- 311 20. King MA, Kentel BB, Mitchell SR. The effects of ball impact location and grip tightness  
312 on the arm, racquet and ball for one-handed tennis backhand groundstrokes. *J*  
313 *Biomech*. 2012;45(6):1048-1052. doi:10.1016/j.jbiomech.2011.12.028.
- 314 21. Knowles SB, Marshall SW, Guskiewicz KM. Issues in estimating risks and rates in sports  
315 injury research. *J Athl Train*. 2006;41(2):207-215.
- 316 22. Kujala UM, Orava S, Järvinen M. Hamstring injuries. Current trends in treatment and  
317 prevention. *Sports Med Auckl NZ*. 1997;23(6):397-404.
- 318 23. Meyer L, Niekerk L van, Prinsloo E, Steenkamp M, Louw Q. Prevalence of  
319 musculoskeletal injuries among adolescent squash players in the Western Cape. *South*  
320 *Afr J Sports Med*. 2009;19(1):3-8.

- 321 24. Nigg BM, Segesser B. The influence of playing surfaces on the load on the locomotor  
322 system and on football and tennis injuries. *Sports Med Auckl NZ*. 1988;5(6):375-385.
- 323 25. Noffal GJ. Isokinetic Eccentric-to-Concentric Strength Ratios of the Shoulder Rotator  
324 Muscles in Throwers and Nonthrowers. *Am J Sports Med*. 2003;31(4):537-541.
- 325 26. O' Donoghue P, Ingram B. A notational analysis of elite tennis strategy. *J Sports Sci*.  
326 2001;19(2):107-115. doi:10.1080/026404101300036299.
- 327 27. Perkins RH, Davis D. Musculoskeletal injuries in tennis. *Phys Med Rehabil Clin N Am*.  
328 2006;17(3):609-631.
- 329 28. Pluim BM, Bart Staal J. Tennis. In: *Epidemiology of injury in olympic sports*. Wiley-  
330 Blackwell. Caine, Harmer and Schiff; 2010:277-293.
- 331 29. Pluim BM, Fuller CW, Batt ME, et al. Consensus statement on epidemiological studies of  
332 medical conditions in tennis, April 2009. *Br J Sports Med*. 2009;43(12):893-897.  
333 doi:10.1136/bjism.2009.064915.
- 334 30. Pluim BM, Staal JB, Windler GE, Jayanthi N. Tennis injuries: occurrence, aetiology, and  
335 prevention. *Br J Sports Med*. 2006;40(5):415-423. doi:10.1136/bjism.2005.023184.
- 336 31. Reid M, Schneiker K. Strength and conditioning in tennis: Current research and practice.  
337 *J Sci Med Sport*. 2008;11(3):248-256. doi:10.1016/j.jsams.2007.05.002.
- 338 32. Sallis RE, Jones K, Sunshine S, Smith G, Simon L. Comparing sports injuries in men and  
339 women. *Int J Sports Med*. 2001;22(6):420-423. doi:10.1055/s-2001-16246.

- 340 33. Sell K, Hainline B, Yorio M, Kovacs M. Injury trend analysis from the US Open Tennis  
341 Championships between 1994 and 2009. *Br J Sports Med.* 2012;48(7):546-551.  
342 doi:10.1136/bjsports-2012-091175.
- 343 34. De Smedt T, de Jong A, Van Leemput W, Lieven D, Van Glabbeek F. Lateral epicondylitis  
344 in tennis: update on aetiology, biomechanics and treatment. *Br J Sports Med.*  
345 2007;41(11):816-819. doi:10.1136/bjism.2007.036723.
- 346 35. Stanton P, Purdham C. Hamstring injuries in sprinting - the role of eccentric exercise. *J*  
347 *Orthop Sports Phys Ther.* 1989;10(9):343-349.
- 348 36. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, et al. Women and men in sport performance: the  
349 gender gap has not evolved since 1983. *J Sports Sci Med.* 2010;9(2):214–223.
- 350 37. Winge S, Jørgensen U, Lassen Nielsen A. Epidemiology of injuries in Danish  
351 championship tennis. *Int J Sports Med.* 1989;10(5):368-371. doi:10.1055/s-2007-  
352 1024930.
- 353 38. Women's Tennis Association. Official Rule Book. 2013. Available at:  
354 <http://www.wtatennis.com/SEWTATour-Archive/Archive/AboutTheTour/rules2013.pdf>  
355 (accessed 9 Jul2013). Accessed June 24, 2013.
- 356 39. Women's Tennis Association. WTA - Tournament Archive. Available at:  
357 <http://www.wtatennis.com/tournament-archive>. Accessed July 9, 2013.
- 358 40. Wozniak D. Gender differences in a market with relative performance feedback:  
359 Professional tennis players. *J Econ Behav Organ.* 2012;83(1):158–171.

361 **Figure 1** - Incidence rate per 1000 match exposures and confidence interval of general  
362 reasons and main injury locations depending on surface

363

364

365 **Figure 2** - Correlation of the incidence rates per 1000 match exposures between leaves and  
366 injuries

367

368

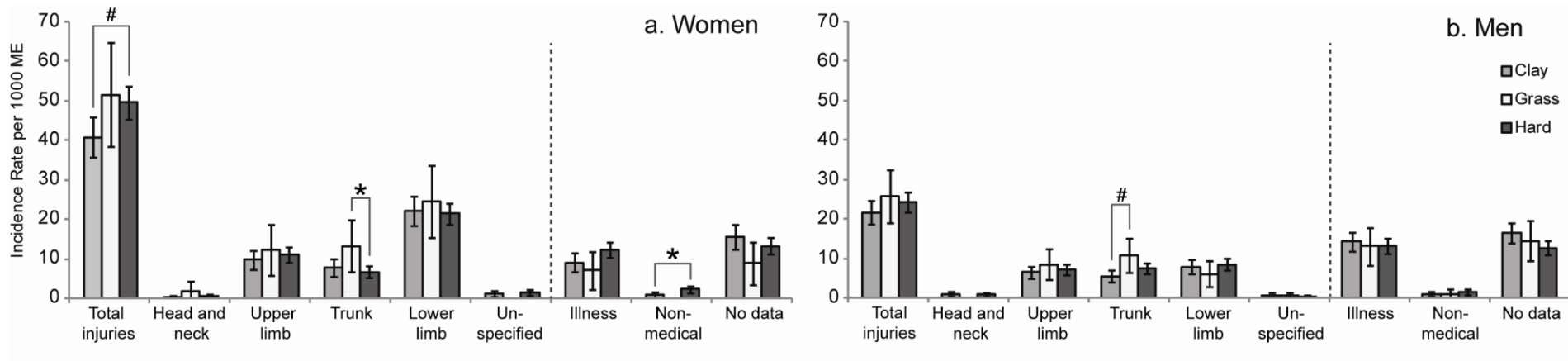
369 **Figure 3** – Incidence rate per 1000 match exposures of leaves and injury depending and mean  
370 number of matches for each month

371

372

373 **Figure 4** – Incidence rate per 1000 match exposures of leaves depending on round of the  
374 tournament.

375 1<sup>st</sup> = 1<sup>st</sup> tournament round, 1/4F = quarterfinal, 1/2F = semifinal, F = Final

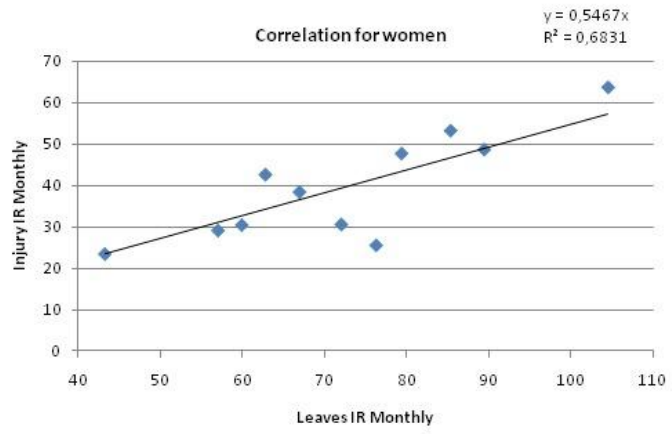
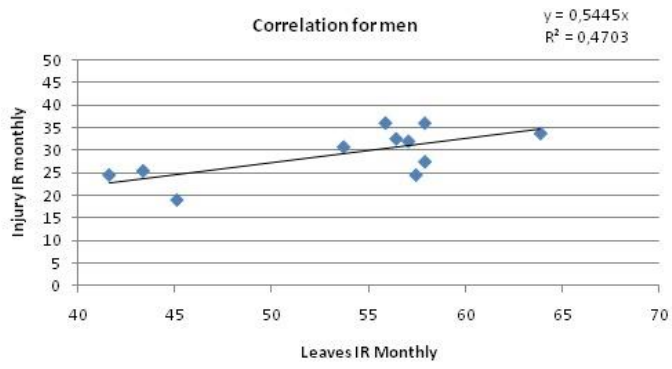


376

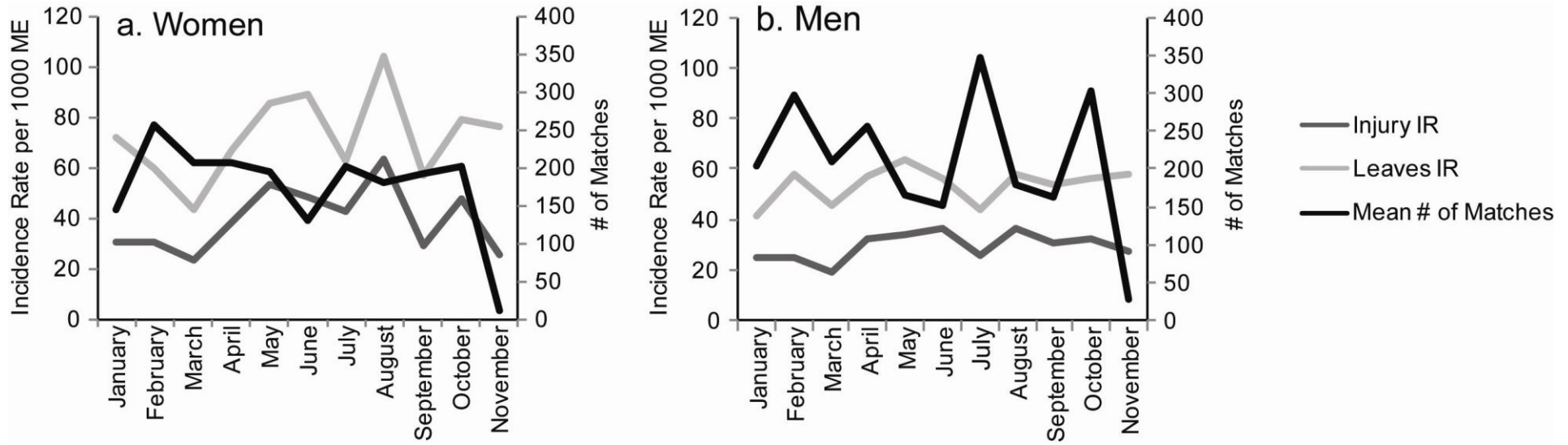
377

378

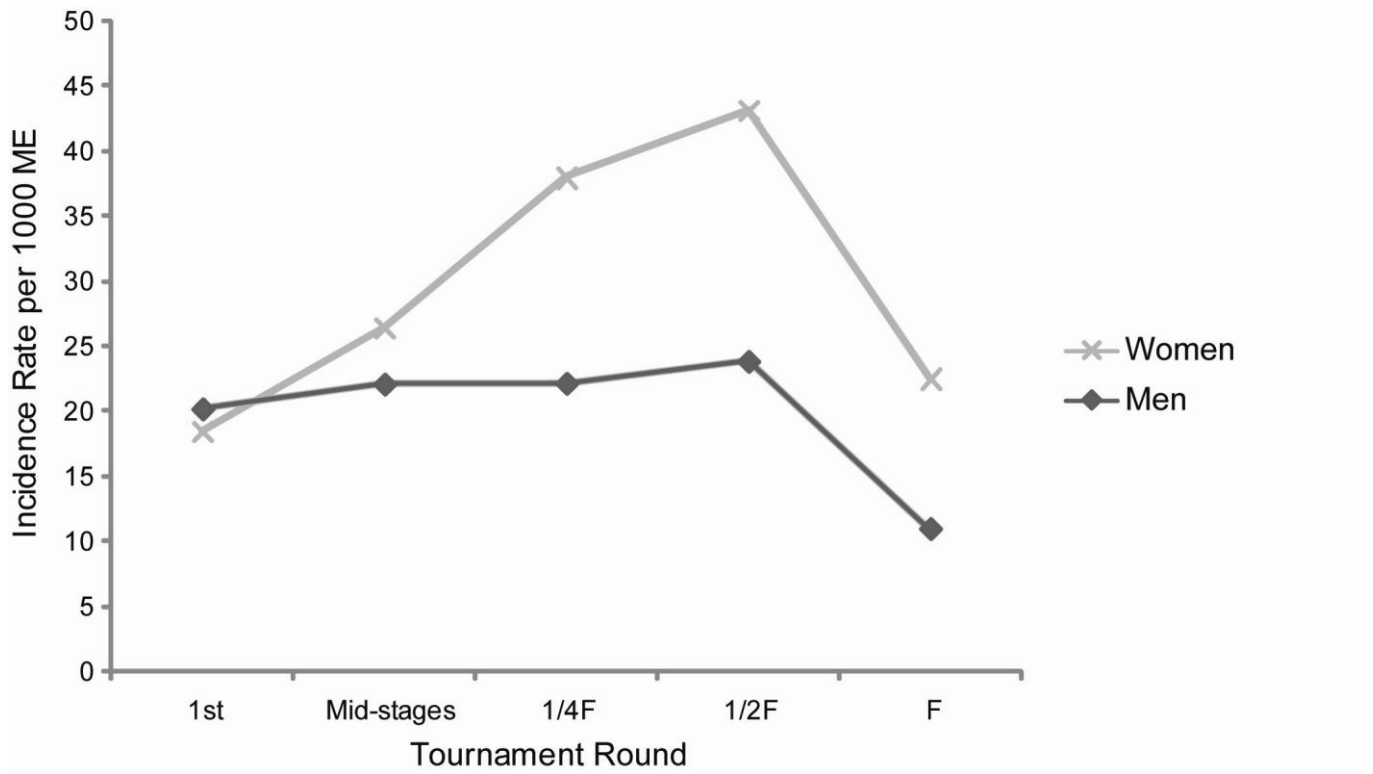




380



381



382  
383

**Table 1 – Leave types and reasons behind leaves for men and women**

	Women (2003-2012)				Men (2001-2012)					
	Medical cases (# = 1283)				Medical cases (# = 1459)					
	#matches = 19285				#matches = 27658					
	<b>Mean</b>				<b>Mean</b>					
	<b>cases</b>				<b>cases</b>					
	<b>per</b>				<b>per</b>				<b>IRR</b>	<b>95%</b>
	<b>year</b>				<b>year</b>					
	<b>%</b>	<b>IR</b>	<b>95%</b>	<b>CI</b>	<b>%</b>	<b>IR</b>	<b>95%</b>	<b>CI</b>	<b>IRR</b>	<b>95%</b>
<b>Type of leave</b>										
Withdrawals	12.4	9.8	6.51*	±1.13	11.4	9.4	4.95	±0.83	1.13	±0.30
Retirements	65.0	52.0	33.70	±2.59	71.1	58.5	30.84	±2.07	0.96	±0.10
Lucky Losers	49.2	38.1	25.51***	±2.25	38.9	32.1	16.88	±1.53	1.28	±0.18
Total	126.6		65.65***	±3.62	121.4		52.68	±2.71	1.07	±0.08
<b>Reason behind</b>										
Injury	77.2	61.0	40.03***	±2.82	66.3	54.6	28.74	±2.00	1.11	±0.12
Illness	20.3	16.1	10.53**	±1.45	18.7	15.4	8.10	±1.06	1.04	±0.22
Non-medical	3.1	2.5	1.61	±0.57	2.8	2.3	1.23	±0.41	0.88	±0.59
No data	25.8	20.4	13.38	±1.63	33.7	27.7	14.61	±1.43	0.81	±0.13

# = number, IR = match exposure, CI = Confidence interval, IRR = incidence rate ratio.

\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

384

385

**Table 2 - Injury locations for men and women**  
 Women (2003-2012)

Men (2001-2012)

	Medical cases (n = 1283)				Medical cases (n = 1459)					
	# matches = 19285				# matches = 27658					
	<b>Mean</b>				<b>Mean</b>					
	<b>cases</b>				<b>cases</b>					
	<b>per</b>				<b>per</b>				<b>IRR</b>	<b>95%</b>
	<b>year</b>	<b>%</b>	<b>IR</b>	<b>95% CI</b>	<b>year</b>	<b>%</b>	<b>IR</b>	<b>95% CI</b>		<b>CI</b>
<b>Main grouping of</b>										
<b>location of injury</b>										
Head/neck	0.9	1.2	0.47	±0.31	1.9	2.89	0.83	±0.34	0.41	±0.48
Upper limbs	19.6	25.4	10.16***	±1.42	15.9	24.0	6.91	±0.98	1.18	±0.26
Trunk	13.7	17.7	7.10	±1.19	16.1	24.3	6.98	±0.98	0.82	±0.20
Lower limbs	40.8	52.8	21.16***	±2.05	31.2	47.0	13.52	±1.37	1.25	±0.19
Unspecified	2.2	2.8	1.14	±0.48	1.2	1.8	0.51	±0.27	1.63	±1.58
<b>Subcategory of</b>										
<b>location of injury</b>										
Head/face	0	0.0	0.00		0.1	0.1	0.04	±0.07	0.00	
Neck/C spine	0.9	1.2	0.37	±0.24	1.8	2.8	0.80	±0.33	0.46	±0.54
Shoulder/clavicle	8.9	11.7	3.70**	±0.77	6.4	9.8	2.78	±0.62	1.33	±0.48
Upper arm	0.2	0.3	0.08	±0.12	0.2	0.3	0.07	±0.10	1.14	±6.32
Elbow	1.3	1.7	0.54	±0.29	1.8	2.7	0.76	±0.33	0.71	±0.70
Forearm	0.4	0.5	0.17	±0.16	0.2	0.3	0.07	±0.10	2.43	±9.60
Wrist	7.1	9.3	2.95**	±0.69	4.8	7.3	2.06	±0.54	1.43	±0.60

386

387

Hand/finger/thumb	1.3	1.7	0.54	±0.29	0.9	1.4	0.40	±0.24	1.35	±1.68
Sternum/ribs/U back	1.6	2.1	0.66	±0.33	1.3	2.0	0.58	±0.28	1.14	±1.15
Abdomen	2.3	4.8	1.54	±0.46	2.8	4.3	1.23	±0.41	1.25	±0.88
L/P/S	6.7	8.8	2.78***	±0.67	3.6	5.5	1.55	±0.47	1.79	±0.84
Hip/groin	5.9	7.7	2.45*	±0.63	4.5	6.9	1.95	±0.52	1.26	±0.56
Thigh	10.7	14.0	4.44***	±0.84	5.5	8.4	2.39	±0.58	1.86	±0.67
Knee	8.0	10.5	3.32***	±0.73	5.5	8.4	2.39	±0.58	1.39	±0.54
Lower leg/AchillesT	2.4	3.1	1.00	±0.40	1.3	2.0	0.58	±0.28	1.72	±1.54
Ankle	7.6	10.0	3.16**	±0.71	5.9	9.0	2.57	±0.60	1.23	±0.47
Foot/toe	4.3	5.6	1.79	±0.53	3.4	5.2	1.49	±0.45	1.20	±0.64
Location unspecified	2.0	2.6	0.83	±0.36	0.3	0.5	0.14	±0.14	5.93	±12.28
Arm+	0.2	0.3	0.08	±0.12	1.5	2.3	0.65**	±0.30	0.12	±0.41
Leg+	1.4	1.8	0.58	±0.30	5.0	7.6	2.17***	±0.55	0.27	±0.21
Back+	1.7	2.2	0.71	±0.34	8.6	13.1	3.72***	±0.72	0.19	±0.13

# = number, IR = match exposure, CI = Confidence interval, IRR = incidence rate ratio, U

back = thoracic back section, AchillesT = Achilles tendon, + = additional category added to the original table.

\*p<0.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001

388

389

# BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement

Adrien Sedeaud<sup>1,2\*</sup>, Andy Marc<sup>1</sup>, Adrien Marck<sup>1</sup>, Frédéric Dor<sup>1</sup>, Julien Schipman<sup>1</sup>, Maya Dorsey<sup>1</sup>, Amal Haida<sup>1,3</sup>, Geoffroy Berthelot<sup>1,2</sup>, Jean-François Toussaint<sup>1,2,4</sup>

**1** IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), INSEP, Paris, France, **2** Université Paris-Descartes, Sorbonne Paris Cité, Paris, France, **3** Université de Rouen, CETAPS EA 3832, Mont Saint Aignan, France, **4** CIMS, Hôtel-Dieu, Assistance Publique des Hôpitaux de Paris, Paris, France

## Abstract

The purpose of this study is to investigate the association between anthropometric characteristics and performance in all track and field running events and assess Body Mass Index (BMI) as a relevant performance indicator. Data of mass, height, BMI and speed were collected for the top 100 international men athletes in track events from 100 m to marathon for the 1996–2011 seasons, and analyzed by decile of performance. Speed is significantly associated with mass ( $r=0.71$ ) and BMI ( $r=0.71$ ) in world-class runners and moderately with height ( $r=0.39$ ). Athletes, on average were continuously lighter and smaller with distance increments. In track and field, speed continuously increases with BMI. In each event, performances are organized through physique gradients. «Lighter and smaller is better» in endurance events but «heavier and taller is better» for sprints. When performance increases, BMI variability progressively tightens, but it is always centered around a distance-specific optimum. Running speed is organized through biometric gradients, which both drives and are driven by performance optimization. The highest performance level is associated with narrower biometric intervals. Through BMI indicators, diversity is possible for sprints whereas for long distance events, there is a more restrictive aspect in terms of physique. BMI is a relevant indicator, which allows for a clear differentiation of athletes' capacities between each discipline and level of performance in the fields of human possibilities.

**Citation:** Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, Schipman J, et al. (2014) BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. PLoS ONE 9(2): e90183. doi:10.1371/journal.pone.0090183

**Editor:** Reury F. P. Bacurau, University of Sao Paulo, Brazil

**Received:** October 30, 2013; **Accepted:** January 20, 2014; **Published:** February 25, 2014

**Copyright:** © 2014 Sedeaud et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Funding:** The authors have no support or funding to report.

**Competing Interests:** None.

\* E-mail: adrien.sedeaud@insep.fr

## Introduction

In general, nature tends to increase diversity and complexity [1]. In favorable circumstances this can be expressed by the expansion of phenotypic variability. Simple morphological traits, like mass and height of a species may follow this law. During the past century, populations of developed countries increased its stature, body mass, BMI and life expectancy [2]. Consequently, morphological diversity has increased in these populations. Diversity and complexity in sport encompass genetic, physiological capacities and psychological skills, in which morphological aptitudes equally play a role. Sport is considered as a selective system by virtue of its competitive nature [3]. One of the first selected characteristics is the physique. Consequently, recruiting morphological suitable athletes is common in most sports [4,5]. Some studies demonstrated a link between morphology and success in track and field [6,7]. BMI is an energy indicator relating total mass and height, which allows the comparison of athletes on various distances. In marathon runners, Marc et al [8] identified the most appropriate profiles and conditions to realize optimal performance. They found, at this time, that optimal BMI for men was  $19.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , and for the 10 best performers of all time a BMI range between  $17.5$  and  $20.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Following the example of energy contribution from the aerobic to anaerobic mechanisms in different running distance [9], we hypothesized that phenotypic gradients exist among running events and levels of performance. The completeness of running events could reveal self-organization through biometric parameters, with coherence from sprints to long

distance. The importance of physical traits in performance has not been thoroughly studied [10], as a result further studies are needed to enhance knowledge of running performance, including body mass, height and BMI as a performance determinant. Our purpose, is to study performance and anthropometric traits in order to reveal the strength of their association.

## Methods

### Data collection

Data of mass, height, BMI, and speed were collected for each international male athlete among the top 100 rankings of eight running events: 100 m, 200 m, 400 m, 800 m, 1500 m, 3000 m, 10.000 m and marathon during the 1996–2011 seasons. This represents 12,800 annual-performers and 3,852 different athletes. Height and mass values were coincided with each individual's best performance by year. All of the data was collected from the website <http://www.tilastopaja.org> and cross-classified by the International Association of Athletics Federations' site: <http://www.iaaf.org>.

### Data organization

Data was organized according to four types of distributions.

First, the distribution of all athletes by distance was organized according to their BMI to identify potential morphological gradients.

Secondly, by deciles of speed: the first decile represents the 160 best performers of the discipline and the last decile represents the

160 slowest performers for a total of 1,600 annual-performers by distance (Top 100 in 16 years). We compared data of mass, height and BMI according to race distances and performance deciles.

The third organization of data was by percentage of performance: we stratified athletes BMI, by distance treated by the percentage of the best performances during the study period (1996–2011).

Lastly, the fourth by density: distributions of all BMI points by running events were presented according to speed. In order to investigate these distributions, we partitioned the BMI points of all athletes according to running events depending on performance percentage over a mesh  $M$ . Let  $X$ ,  $Y$  be the BMI of athletes and percentage of performance respectively, such that the data of an individual was expressed as  $X_i$ ,  $Y_j$ , with  $X_i \in [15, 32]$  ( $N_X = 1600$ ) and  $Y_j \in [92, 100]$  ( $N_Y = 1600$ ). The density of athletes' BMI was estimated over the nodes of  $M$ . The boundaries of  $M$  were chosen in order to encapsulate all  $X_i$  and  $Y_j$ . Lower boundaries  $[L_x; L_y]$  were defined as the largest integer that does not exceed  $\min(X_i)$ ,  $\min(Y_j)$ . Upper boundaries  $[U_x; U_y]$  were defined as the smallest integer that is not less than  $\max(X_i)$ ,  $\max(Y_j)$ . Note that in our case, the difference of the boundaries of the athletes BMI dimension  $X$  was always greater than the one of percentage of performance  $Y$ :

$$A_x > A_y \quad (1)$$

The numbers of nodes in the  $X$   $Y$  dimensions were denoted  $n_x$  and  $n_y$ , respectively, with respect to:

$$n_x, n_y \in \mathbb{N}^* \text{ and } n_x \geq 15, n_y \geq 92 \quad (2)$$

$M$  was set as a homogeneous mesh, such that each node was separated by the value  $a$  in both dimensions, with:

$$a \in ]0; A_x] \quad (3)$$

Such that the maximum possible distance between two nodes did not exceed  $U_Y(1)$ . The resolution  $r$  of  $M$  was given by:

$$r = n_X \times n_Y = \left[ \frac{U_X - L_X}{a} + 1 \right] \times \left[ \frac{U_Y - L_Y}{a} + 1 \right] \quad (4)$$

For the estimation of the density, the number of athletes' BMI performance  $d_j$  falling into the area of a  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) node was summed, such that:

$$d_j = \text{Card} \left( X_i \in \left[ X_j - \frac{a}{2}; X_j + \frac{a}{2} \right], Y_i \in \left[ Y_j - \frac{a}{2}; Y_j + \frac{a}{2} \right] \right) \quad (5)$$

is an estimate of the local density.

For choosing the best representation of the density and in order to avoid information loss due to an inadequate resolution of the mesh, we set the value of  $a = 0.8$  as it was the most represented resolution among all distances. Additionally, we chose this specific representation because this mesh was the best for all track and field events.

### Statistical analysis

All of the data was reported as means  $\pm$  standard deviation. Associations between the subjects' physique (height, mass and

BMI), and speed were examined using the Pearson product-moment correlation coefficient. Differences in anthropometrics and speed of the different track and field running events were compared using one-way analysis of variance test (ANOVA). Comparisons of the different track and field groups were performed using Bonferroni's Multiple Comparison Test. The level of significance was set at  $p = 0.05$ . Statistical analyzes were realized with the software Statistica 7.1 and Matlab 7.13.

### Ethics

This study is designed and monitored by the IRMES (Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport) scientific committee. It uses a research protocol qualified as non-interventional, in which '...all acts are performed in a normal manner, without any supplemental or unusual procedure of diagnosis or monitoring.' (Article L1121-1 of the French Public Health Code). According to the law, its approval therefore did not fall under the responsibility of a committee for the protection of persons (CPP), it does not require informed consent from individual athletes.

### Results

Speed is significantly associated with mass ( $r = 0.71$ ) and BMI ( $r = 0.71$ ) but moderately with height ( $r = 0.39$ ). The ANOVA test shows significant differences among events for height (excluding 10,000 m *vs* marathon, 200 m *vs* 800 m), mass (excluding 10,000 m *vs* marathon and 100 m *vs* 200 m and 400 m, and 200 m *vs* 400 m) and BMI (excluding 3,000 m *vs* marathon).

### Mass, height and performance

The mean mass of athletes by decile and discipline continuously increases with speed (Figure 1A). For short distances (100 m, 200 m and 400 m) athletes are heavier ( $74.82 \pm 6.39$  kg  $75.10 \pm 6.61$  and  $74.38 \pm 6.38$  kg respectively) than others runners. When distance increases, mean mass of the runners decrease (800 m:  $67.78 \pm 6.5$  kg, 1500 m:  $64.19 \pm 6.58$  kg, 3000 m:  $60.45 \pm 5.79$  kg, 10,000 m:  $57.49 \pm 5.46$  kg; marathon:  $57.85 \pm 5.11$  kg).

The mean height of athletes by decile and discipline also depends on speed (Figure 1B). Smaller athletes run long and middle distances, with a progressive increase in mean height from marathon to sprint events (marathon:  $171.9 \pm 6.28$  cm, 10,000 m:  $172.37 \pm 6.44$  cm, 3000 m:  $175.02 \pm 6.55$  cm, 400 m:  $182.75 \pm 6.24$  cm, 200 m:  $180.99 \pm 6.17$  cm and 100 m:  $179.20 \pm 5.94$  cm).

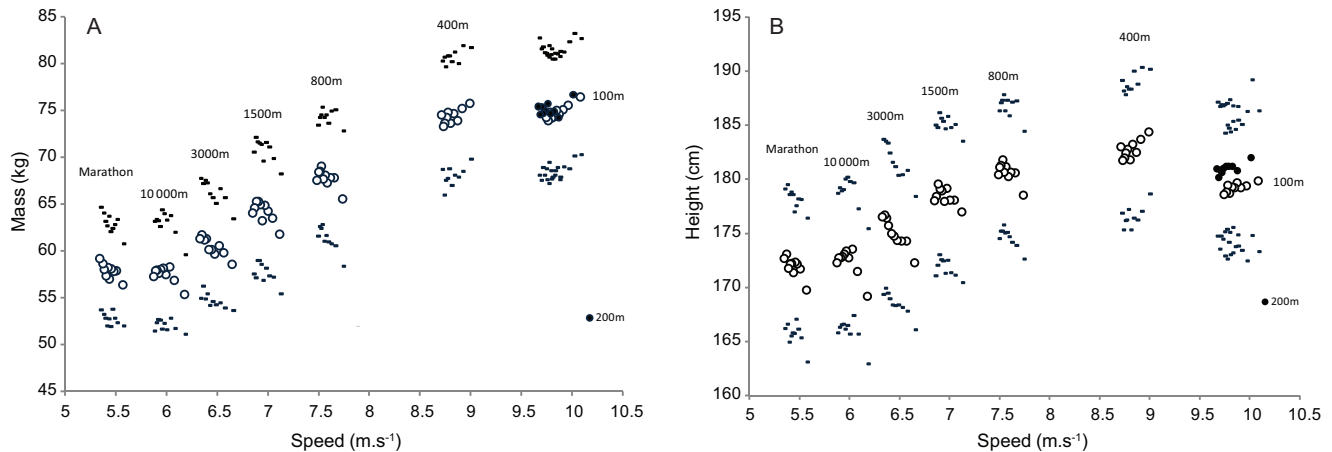
### Gradients with level of performance

First decile athletes from marathon to 800 m are lighter than their counterparts in lower deciles. Conversely, a break occurs in sprints (400 m, 200 m and 100 m), where the most successful athletes (from the first decile) have a gradient tending towards a higher mass. Thus, the fastest athletes in sprints are heavier while the lighter athletes are the most effective in long distances. Like mass, athletes of the first deciles from marathon to 800 m are shorter than their counterparts in the lowest deciles. In contrast for sprints, a break occurs as well for the most successful athletes who they display a progressively taller height.

### BMI: gradients of physiques

Figure 2 shows the BMI distribution of all athletes by running events. The highest percentage of athletes is seen at  $24 \text{ kg.m}^{-2}$  for the 100 m,  $23 \text{ kg.m}^{-2}$  for the 200 m,  $23\text{--}22 \text{ kg.m}^{-2}$  for the 400 m,  $21 \text{ kg.m}^{-2}$  for 800 m and 1500 m and  $20 \text{ kg.m}^{-2}$  for the 3000 m, 10 000 m and marathon. Long distances are distributed according to a peak while, 100 m 400 m have a plateau with range of BMI.





**Figure 1. Mean mass (A) and height (B)  $\pm$  SD of athletes in each decile of speed for the eight events (100m, 200m, 400m, 800m, 1500m, 3000m 10 000m and marathon).** Black circles show the 200 m athletes ordered by decile.  
doi:10.1371/journal.pone.0090183.g001

### BMI and performance

Figure 3 shows the mean BMI of athletes by decile and by discipline, according to speed. There is a continual increase in BMI with speed improvement from marathon:  $19.57 \pm 1.29 \text{ kg.m}^{-2}$  to 100 m:  $23.3 \pm 1.67 \text{ kg.m}^{-2}$ .

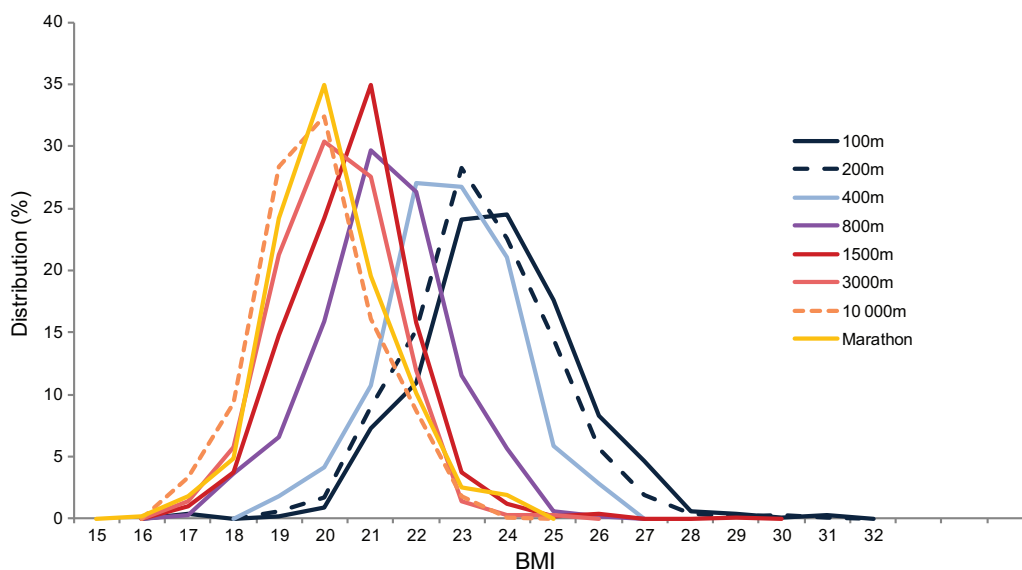
Exact data and density function are shown in Figures 4 ordered by distance and classified by percentage of performance (100% = best performance during the period studied) and function of BMI. For the four distances, the greater the level the more tightened the BMI spectrum. For example in the 800 m, when performance level reaches 93–94% of the best one, BMI ranges from 16.7 to  $25.7 \text{ kg.m}^{-2}$ ; when performance level reaches 98–99%, BMI ranges from 20.1 to  $20.9 \text{ kg.m}^{-2}$ . And we observed the same differences across all of the events. We also observed an offset of the majority of the points (red density) towards lower BMI from sprint events to long and middle distance. For the 10,000 m and marathon, like the best performers, the greatest numbers of points

(red density) are centered on an optimum interval between 19–20  $\text{kg.m}^{-2}$ .

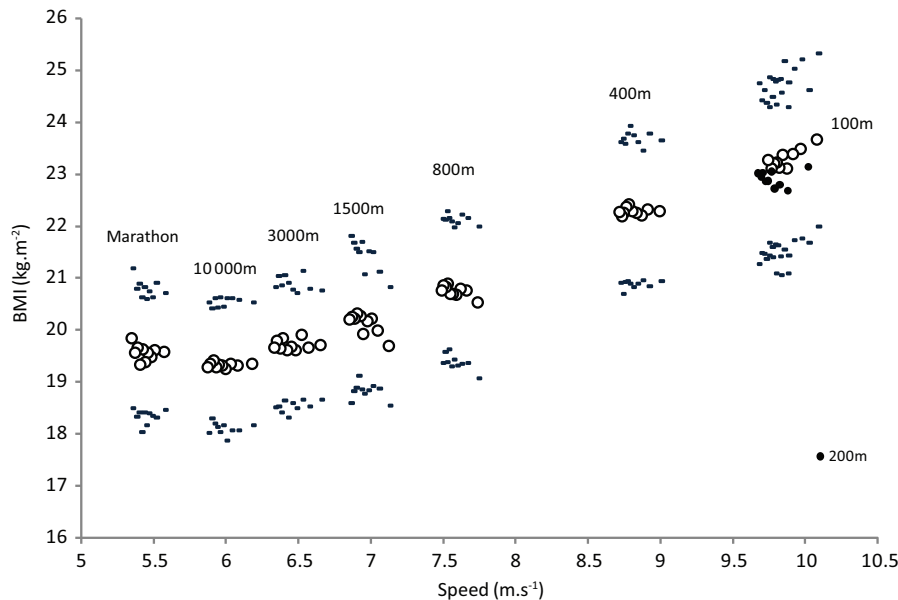
### Discussion

The present study shows that biometric parameters are ordered in a consistent self-organization between sprint and long distance. Physique optimal range for performance across the full continuum of event specializations events emerge in an organized structural basis. Consequently, this study is the first to reveal morphological optimization on the entire spectrum of track events and the relevance of BMI as performance indicator.

We also find that between 1996 to 2011 seasons, mean mass and height of the best athletes of sprint events (100 m to 400 m) are bigger (BMI and mass) than those of middle and long distance (800 m to marathon). This confirms the trends observed in track and field history [11–13] and are consistent with more recent studies [6,10,14].



**Figure 2. BMI distribution of all athletes by running events.** Each curve links points representing the percentage of athletes per 1 BMI unit for each event.  
doi:10.1371/journal.pone.0090183.g002



**Figure 3. Mean speeds and SD according to BMI for each speed decile and each events.** Black circles show the 200 m athletes ordered by decile.

doi:10.1371/journal.pone.0090183.g003

### Different height for different events

As distance progressively decreases from marathon to 400 m, the runners gradually become taller, in accordance with the literature [15,16]. This trend is not continuous, 100 m and 200 m athletes are on average shorter than those of the 400 m. The fact that 400 m athletes are the tallest, is in accordance with other studies [6,14,17,18]. Being taller in this distance may confer benefits like improvements in stride length [19]. Locomotion is a dual time organization: vertical loss of useful energy (lifting the body mass, which later drops), and the horizontal loss caused by friction against the surrounding medium [20]. For taller athletes, mass that falls from a higher altitude falls faster, down and forward [21]. Bejan and Marden [20] also show that the speed-height relation is predictable from the power law applied to animal locomotion. Speed increases with larger physiques in different species including mammals and human. For example, 3 percent increase in the height of the center of mass means a 1.5 percent increase in runners speed [21]. The fact that 100 m runners are shorter than their 400 m counterparts highlights another hypothesis. First, like O'Connor et al [6] suggest, longer legs reduce stride rate. Moreover relatively shorter thighs diminish the resistance leverage on the upper leg and the cost of locomotion. Second, in short sprint events, start, reaction time and the acceleration phase are crucial. Smaller runners own better reaction time [22]. For the movement, the response time depends on the length of the body especially the lower limbs and muscle fascicles lengths [23] consequently shorter athletes draw benefits in starting blocks. Furthermore, shorter legs will generally have a lower moment of inertia, and hence require less energy to accelerate [6]. A range of these characteristics could explain why 100 m sprinters are smaller than the 400 m ones.

### Mass requirements and performance

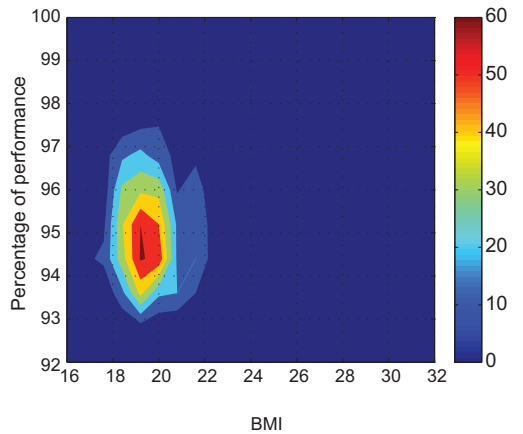
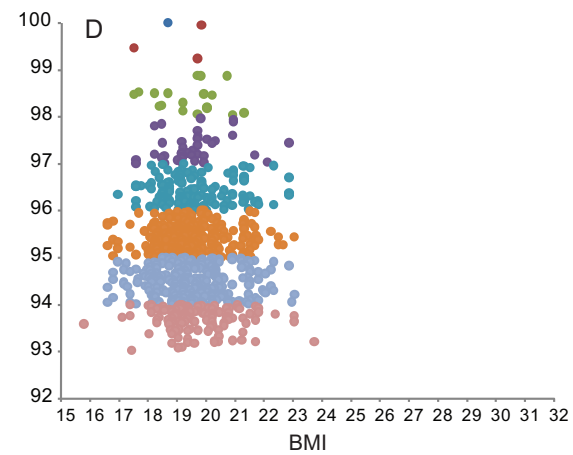
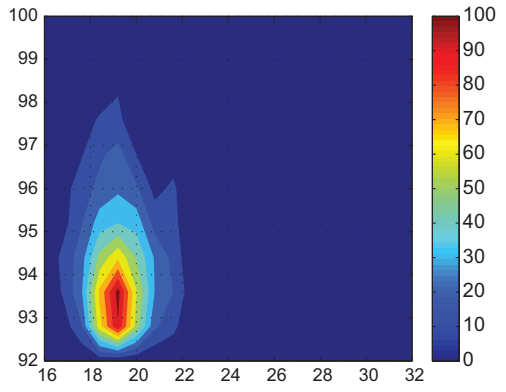
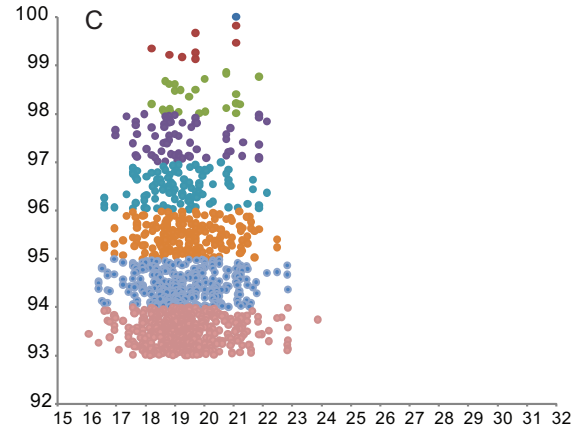
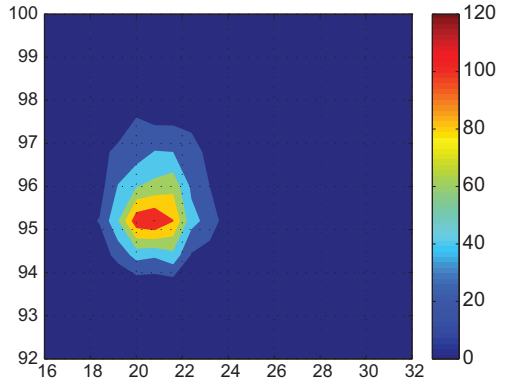
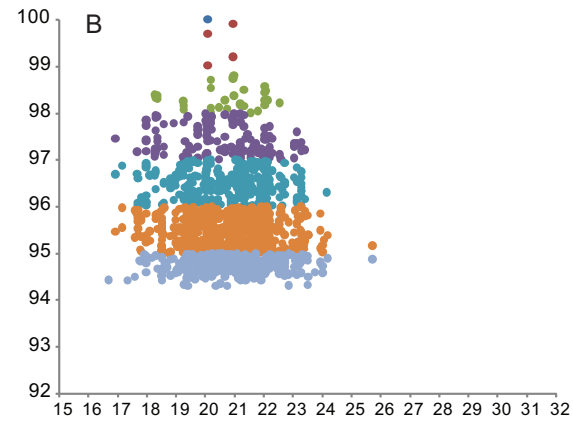
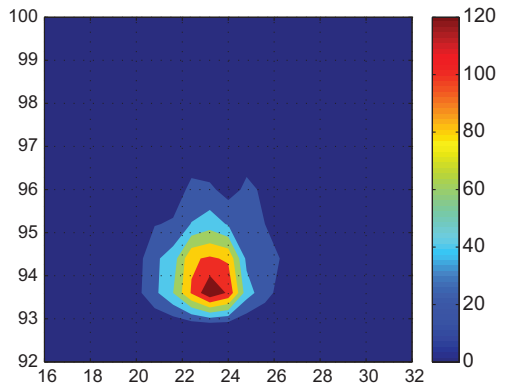
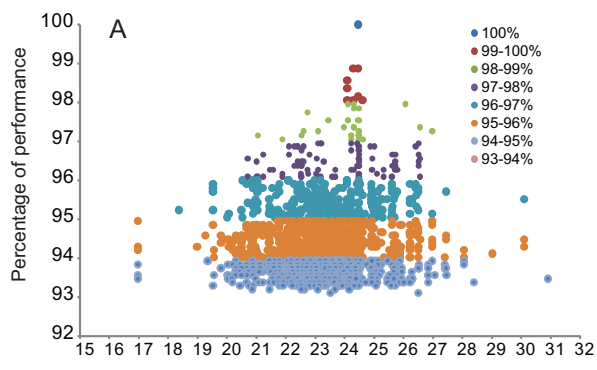
Similarly to height, as the distance progressively decreases from marathon to 100 m, runners gradually become heavier. This redefines mass as a key requirement for speed [24]. These results are consistent with the constructal theory of Bejan and Marden [20], which states that speed increases with mass. Moreover,

heavier body mass is associated with improved efficiency in sprint events, due to the necessity of muscle strength, ground force and power [14] and to improved return of elastic energy via the stretch shortening cycle [25]. On the other side of the distance spectrum, smaller stature and mass could provide an advantage for marathon runners. The metabolic cost of horizontal forward motion will in principle increase with mass [6], the heavier the athletes, the lower his energy cost [26,27]. Indeed, body mass is a significant determinant of running economy [28] and could generate poor mechanical efficiency [29]. Some authors [30,31] hypothesized that the superior running economy of the Kenyan runners is primarily due to their slender limbs with lower masses requiring less muscular effort in leg swing. Another factor is that ground reaction forces are reduced in lighter runners than heavier ones [10]. In order to maintain the high mileage and high intensity load sustained during training, athletes of limited mass have an advantage by an attenuating shock effect [10]. Pugh [32] supports that a larger body size increases the air resistance to running, and consequently smaller and leaner runners will also a lower air drag during running. Gravity is the major force to overcome during running: in this case, excess mass is detrimental to running performance [33]. An excess of body mass, means that greater muscular effort and higher energy expenditure is required [34].

Smaller sized runners also draw another benefit of their morphologies for long distances. There is a strong relationship between distance and heat-exchange characteristics. Heat production/dissipation ratio becomes increasingly important as running distance increase [6]. Body mass increases thermal strain, heavier runners reach a heat storage limit sooner than lighters ones [35]. The apparent thermodynamic advantage of lighter runners may allow them to run more intensely or longer before reaching a limiting core temperature [10,35,36]. This could be advantageous not only in competition but also in training, especially at high intensity [10].

### Reinforced link with performance increases

Links between performance and morphology are strengthened by gradient of size within each discipline. Not only sprinters are



**Figure 4. BMI of all athletes according to their performance.** To the left: Exact data of athletes' BMI distribution. To the right, athletes' BMI are represented by a density function. At the left end points are more visible to the right central density of greater number of athletes appears more clearly. (Fig. 4A 100 m, Fig. 4B 800 m, Fig. 4C 10 000 m and Fig. 4D marathon). doi:10.1371/journal.pone.0090183.g004

heavier than their long and middle distances counterparts but within their distance, the fastest athletes are also heavier. This confirms the trend observed by Khosla [11,12]: olympic champions in sprinting events are heavier than the finalists and the other participants. In contrast, the best long distance runners have a lower mass compared to less rapid athletes, like gold medalists versus finalists and other participants during Munich and Montreal Olympics games [12]. We find similar trends regarding height; the most successful sprint runners have a greater average height, whereas the best performing endurance runners have a smaller height than their slower opponents. Our study shows, through physique gradients, the importance of mass and height in all track and field events.

### BMI, performance and optimal range

Like energetic progressive contribution from the aerobic to anaerobic mechanisms [9], BMI gradients exist with distance increments. Indeed, biometric parameters are ordered and show a consistent self-organization between long distance and sprints. While BMI is a useful indicator in the general population as a public health indicator, it appears that it is also a relevant indicator in order to differentiate athletes between each discipline.

A consistent trend of increasing BMI with speed was observed with distance running performance, in accordance with previous studies showing positive effect between BMI and performance [29,37]. Elite sprinters are heavier due to their need of higher energy outputs in a short amount of time. This corresponds to a maximization of anaerobic metabolism, mainly involved in the total energy requirements in 100 m [9]. Indeed, ATP concentration is dependent on muscle mass, and BMI among athletes represents an indication of the power reserve related to lean mass [38,39]. Possible progression in speed resides in mass increments [14].

Event differences, from the marathon to 100 m, create patterns of divergent BMI and optimal body type. As performance increases it can be observed that the spectrum of BMI narrows into a more optimal area. Our study shows a reduction in variability of BMI with performance increments, where the best athletes are attracted to optimum interval. For an athlete, being away from optimum probably negatively affects his performance. Moreover, a major part of the 10,000 m and marathon athletes are also centered around an optimum interval (19–20 kg.m<sup>-2</sup>) respectively, as shown by Marc et al [40]. This evidence could indicate that there may be an optimal structure of body suited to marathon and other long distance races [35]. Despite centering on an optimum attractor for all distances, certain diversity is possible for sprints up to 800 m while, density functions show a much smaller range of possibilities for 10,000 m and marathon races. This could be explained by the more restrictive aspect in terms of physique on athletes during long distances, a phenomenon enhanced by selection. The narrowing range with performance could relate the best biomechanical (e.g.torque-angle and force-velocity relationships), bio-physical (surface area-to-mass ratios) and physiological (energy release) adaptive components on each

distance [4], and express the combination of ideal attributes [41]. It may illustrate the best trade-off by distance between different requirements in multi-objective optimization problems [42]. This could explain the decreases of BMI when race distance increases. This could also represent a functional trade-off between mass-specific aerobic power and endurance *vs* additional musculoskeletal structure required to run faster [14]. Additionally; this illustrates the energy needs during different races, assessing by an indicator of the embedded energy: BMI.

### The base of a pattern between and within different species

Locomotion is one of the major functions in life. Previous studies have suggested that the relationship between maximum relative running speed and body mass follow a curvilinear function [43] and indicated that a similar pattern may be found between mammal species. For example, species used in racing competition (*Canis Lupus*, *Equus Caballus*) co-evolved with humans and share a common training pressure [44]. In fact there is a common pattern apply for racing greyhound, including mass optimal area for best performance and centration around a mass optimum interval (personal data). Moreover, it will be very interesting to investigate BMI as indicator of embedded energy and BMI/exercise phenotype pattern in different mammals included quadrupeds.

### Conclusion

This study emphasizes mass, height and BMI as key requirements for speed. It allows for the identification of optimal physiques according to track and field events. BMI and mass are better indicators than height. However, BMI is preferred because it allows for the combination of both contributions. It appears to be a useful indicator in the categorization of elite athletes. Over time, physiological, physical and biomechanical constraints generated morphologies adapted to each race, a trend reinforced by performance gradients within each discipline. As a result there is a narrowing range around an optimal BMI for each event, where best athletes are “attracted”. Our study also reveals a possibility of larger organization induced by BMI range in diversity and complexity increase system.

### Acknowledgments

The authors thank Guy Ontanon sprint coach at the French Federation of track and fields for proofreading the manuscript and providing valuable critique and advice. The authors thank INSEP teams for their full support.

### Author Contributions

Conceived and designed the experiments: AS A. Marc FD JFT. Performed the experiments: AS A. Marc JS. Analyzed the data: AS A. Marc A. Marck JS GB. Contributed reagents/materials/analysis tools: AH MD GB. Wrote the paper: AS A. Marc A. Marck FD JS MD JFT. This manuscript was critically revised for intellectual content by all co-authors.

### References

1. McShea DW, Brandon RN (2010) *Biology's First Law: The Tendency for Diversity and Complexity to Increase in Evolutionary Systems*. University of Chicago Press. 186 p.
2. Floud R, Fogel RW, Harris B, Hong SC (2011) *The Changing Body: Health, Nutrition, and Human Development in the Western World since 1700*. Cambridge University Press. 456 p.

3. Dawkins R (1990) *The Selfish Gene*. 2nd ed. Oxford University Press, USA. 368 p.
4. Norton K, Olds T (2001) Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med* 31: 763–783.
5. Sedeaud A, Marc A, Schipman J, Tafflet M, Hager J-P, et al. (2012) How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *British Journal of Sports Medicine* 46: 580–584. doi:10.1136/bjsports-2011-090506.
6. O'Connor H, Olds T, Maughan RJ (2007) Physique and performance for track and field events. *J Sports Sci* 25 Suppl 1: S49–60. doi:10.1080/02640410701607296.
7. Pere S, Kunas M, Telkkä A (1954) Correlation between performance and physique in Finnish athletes. *American Journal of Physical Anthropology* 12: 201–208. doi:10.1002/ajpa.1330120217.
8. Marc A, Sedeaud A, Guillaume M, Rizk M, Schipman J, et al. (2013) Marathon progress: demography, morphology and environment. *J Sports Sci*. doi:10.1080/02640414.2013.835436.
9. Ward-Smith AJ (1985) A mathematical theory of running, based on the first law of thermodynamics, and its application to the performance of world-class athletes. *J Biomech* 18: 337–349.
10. Berg K (2003) Endurance training and performance in runners: research limitations and unanswered questions. *Sports Med* 33: 59–73.
11. Khosla T (1974) Relationship between speed of running and distance run. *Lancet* 1: 30.
12. Khosla T (1978) Standards on age, height and weight in Olympic running events for men. *Br J Sports Med* 12: 97–101.
13. De Garay AL (1974) Genetic and anthropological studies of Olympic athletes. *American Journal of Physical Anthropology* 45: 125–126. doi:10.1002/ajpa.1330450117.
14. Weyand PG, Davis JA (2005) Running performance has a structural basis. *J Exp Biol* 208: 2625–2631. doi:10.1242/jeb.01609.
15. Peters RH (1986) *The Ecological Implications of Body Size*. Cambridge University Press. 348 p.
16. Schmidt-Nielsen K (1984) *Scaling: Why is Animal Size so Important?* Cambridge University Press. 260 p.
17. Hirata K, Horvath SM (1979) Selection of Olympic Champions. Institute of Environmental Stress, University of California; Toyota, Department of Physical Education, Chukyo University. Dimensions 26.0x19.0 cm, book p.
18. Hirata KI (1966) Physique and age of Tokyo Olympic champions. *J Sports Med Phys Fitness* 6: 207–222.
19. Sleivert GG, Rowlands DS (1996) Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Med* 22: 8–18.
20. Bejan A, Marden JH (2006) Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying. *Journal of Experimental Biology* 209: 238–248. doi:10.1242/jeb.01974.
21. Bejan A, Jones EC, Charles JD (2010) The evolution of speed in athletics: why the fastest runners are black and swimmers white. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics* 5: 199–211.
22. Samaras TT, Bartke A, Rollo CD (2007) *Human Body Size and the Laws of Scaling: Physiological, Performance, Growth, Longevity and Ecological Ramifications*. Nova Publishers. 396 p.
23. Chu NS (1989) Motor evoked potentials with magnetic stimulation: correlations with height. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 74: 481–485.
24. Charles JD, Bejan A (2009) The evolution of speed, size and shape in modern athletics. *J Exp Biol* 212: 2419–2425. doi:10.1242/jeb.031161.
25. Bergh U, Sjödin B, Forsberg A, Svedenhag J (1991) The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc* 23: 205–211.
26. Bourdin M, Pastene J, Germain M, Lacour JR (1993) Influence of training, sex, age and body mass on the energy cost of running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 66: 439–444.
27. Maldonado S, Mujika I, Padilla S (2002) Influence of body mass and height on the energy cost of running in highly trained middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med* 23: 268–272. doi:10.1055/s-2002-29083.
28. Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS (1989) Factors affecting running economy. *Sports Med* 7: 310–330.
29. Bosch AN, Goslin BR, Noakes TD, Dennis SC (1990) Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 61: 68–72.
30. Larsen HB (2003) Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol, Part A Mol Integr Physiol* 136: 161–170.
31. Kong PW, de Heer H (2008) Anthropometric, gait and strength characteristics of Kenyan distance runners. *Journal of Sports Science and Medicine* 7: 499–504.
32. Pugh LG (1971) The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J Physiol (Lond)* 213: 255–276.
33. Deitrick RW (1991) Physiological responses of typical versus heavy weight triathletes to treadmill and bicycle exercise. *J Sports Med Phys Fitness* 31: 367–375.
34. Knechtle B, Knechtle P, Andonic JL, Kohler G (2007) Influence of anthropometry on race performance in extreme endurance triathletes: World Challenge Deca Iron Triathlon 2006. *Br J Sports Med* 41: 644–648; discussion 648. doi:10.1136/bjism.2006.035014.
35. Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert MI, et al. (2000) Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflügers Arch* 441: 359–367.
36. Dennis SC, Noakes TD (1999) Advantages of a smaller body mass in humans when distance-running in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 79: 280–284.
37. Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH (2000) Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1130–1134.
38. Nevill AM, Winter EM, Ingham S, Watts A, Metsios GS, et al. (2010) Adjusting athletes' body mass index to better reflect adiposity in epidemiological research. *J Sports Sci* 28: 1009–1016. doi:10.1080/02640414.2010.487071.
39. Watts AS, Coleman I, Nevill A (2011) The changing shape characteristics associated with success in world-class sprinters. *Journal of Sports Sciences*. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21916672>. Accessed 13 December 2011.
40. Marc A, Sedeaud A, Guillaume M, Rizk M, Schipman J, et al. (2013) Marathon progress: demography, morphology and environment. *J Sports Sci* In Press.
41. Norton K, Olds T (1996) *Anthropometrica: A Textbook of Body Measurement for Sports and Health Courses*. UNSW Press. 438 p.
42. Shoval O, Shefel H, Shinar G, Hart Y, Ramote O, et al. (2012) Evolutionary trade-offs, Pareto optimality, and the geometry of phenotype space. *Science* 336: 1157–1160. doi:10.1126/science.1217405.
43. Iriarte-Díaz J (2002) Differential scaling of locomotor performance in small and large terrestrial mammals. *J Exp Biol* 205: 2897–2908.
44. Desgorces F-D, Berthelot G, Charmantier A, Tafflet M, Schaal K, et al. (2012) Similar slow down in running speed progression in species under human pressure. *J Evol Biol* 25: 1792–1799. doi:10.1111/j.1420-9101.2012.02563.x.

1 **TITLE PAGE**

2 **TITLE: Row For Your Life: A century of mortality follow-up of French Olympic**

3 **Rowers**

4

5 **Authors:** Juliana Antero-Jacquemin<sup>1,2</sup>, François Desgorces<sup>1,2</sup>, Frédéric Dor<sup>1</sup>, Adrien

6 Sedeaud<sup>1</sup>, Amal Haïda<sup>1</sup>, Philippe LeVan<sup>3,4</sup>, Jean-François Toussaint<sup>1,2,5</sup>

7

8 **Affiliations :**

9 <sup>1</sup> Institut de Recherche bioMédicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES), Institut National  
10 du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP), Paris, France.

11 <sup>2</sup> Université Paris Descartes, EA 7329, Sorbonne Paris Cité, Paris, France.

12 <sup>3</sup> Comité National Olympique et Sportif Français (CNOSF), Medical Department, Paris,  
13 France.

14 <sup>4</sup> Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP), Paris, France.

15 <sup>5</sup> CIMS, Hôtel-Dieu, AP-HP, 1 Parvis Notre Dame, 75184 Paris Cedex 04, France.

16

1 **ABSTRACT**

2 **Background/Aim:** Strenuous endurance training required to participate in the highest sports  
3 level has been associated with deleterious effects on elite athletes' health and cardiac  
4 abnormalities. We aimed to describe overall mortality and main causes of deaths of male  
5 French rowers participating in at least one Olympic Game (OG) from 1912 to 2012 in  
6 comparison with the French general population.

7 **Methods:** Identity information and vital status of French Olympic rowers were validated by  
8 National sources from 1912 to 2013 (study's endpoint) among 203 rowers; 52 out of 255  
9 (20.3%) were excluded because their vital statuses could not be confirmed. Main causes of  
10 deaths were obtained from the National registry from 1968 up to 2012. Overall and disease-  
11 specific mortalities were calculated through standardised mortality ratios (SMRs) with its  
12 95% confidence intervals (CIs). The overall mortality was calculated for the whole rowers'  
13 cohort (PT) and for two periods apart: (P1) including rowers from 1912 to 1936 OG, a cohort  
14 in which all rowers have deceased and (P2) considering rowers from 1948 to 2012 OG.

15 **Results:** Among the 203 rowers analysed, 46 died before the study's endpoint, mainly from  
16 neoplasms (33%), cardiovascular diseases (21%) and external causes (18%). PT demonstrates  
17 a significant 42% lower overall mortality (SMR: 0.58, 95% CI: 0.43–0.78,  $p < 0.001$ ), P1 a  
18 37% reduction (SMR: 0.63, 95% CI: 0.43–0.89,  $p = 0.009$ ) and P2 a 60% reduction (SMR:  
19 0.40, 95% CI: 0.23 - 0.65,  $p < 0.001$ ) compared with their compatriots. Mortality due to  
20 cardiovascular diseases is significantly reduced (SMR: 0.41, 95% CI: 0.16–0.84,  $p = 0.01$ )  
21 among rowers.

22 **Conclusions:** French Olympic rowers benefit of lower overall mortality compared with the  
23 French general population. Among rowers' main causes of death, cardiovascular diseases are  
24 reduced in relation to their compatriots. Analytical studies with larger samples are needed to  
25 understand the reasons for such reductions.

1 **Keywords: Rowers, Mortality, Athletes, Endurance**



1 **INTRODUCTION**

2 Rowing has been reported as a safe contactless sport with low injury rate, providing  
3 health benefits to its practitioners [1,2]. Although high occurrence of cardiac diseases, and  
4 alterations on cardiovascular morphology has been previously reported in university rowers  
5 [3,4], epidemiological studies have described higher life expectancy in Harvard and Yale  
6 university rowers as in Oxford-Cambridge boat racers compared with their non-athletic  
7 referents [5,6].

8 If regular physical activity has been demonstrated to provide large health benefits [7–  
9 9] studies have reported that strenuous exercises and training of elite athletes could be  
10 associated with deleterious effects [10] such as cardiac abnormalities [11,12] more likely  
11 triggering a sudden death during high demanding effort [13,14], deregulated inflammatory  
12 responses [15] and neurodegenerative diseases [16]. In addition, training cessation after  
13 international career has showed to be deleterious in retired athletes [17–20]. Conversely, a  
14 recent meta-analysis of epidemiological studies has concluded that top-level athletes live  
15 longer than the general population [21].

16 Olympic Games (OG) are the highest competition level for rowing athletes; thus  
17 Olympians are exposed to the most extraneous training program and performance exigencies.  
18 This study aims to assess the overall mortality and main causes of deaths of male French  
19 Olympic rowers competing from 1912 up to 2012 compared with their referents in the French  
20 population.

21

## 1 **METHODS**

### 2 **Design and participants**

3 Retrospective cohort study of French Olympic rowers. The cohort was composed of  
4 all male rowers who represented France in at least one OG, from 1912 up to 2012, and had  
5 their vital status validated by the National registry of Identification of Physical Persons  
6 (RNIPP). Coxswains were not accounted as rowers.

7 Three periods were taken into account to analyse rowers' overall mortality. The first  
8 (P1) included only rowers that participated in the OG from 1912 up to 1936. This period was  
9 chosen for a separated analysis because all rowers, who participated in those games, had  
10 already deceased, allowing for a complete follow-up until the entire cohort's extinction. The  
11 second period (P2) is an uninterrupted period of OG after World War II, from 1948 to 2012.  
12 Finally, we considered the total period (PT), analysing the totality of rowers participating in  
13 the OG from 1912 up to 2012 (Figure 1). The discontinuity at the rowers' entry in the cohort  
14 between 1912-1920 and 1936-1948 is related to the Games interruption due both World Wars.

15

### 16 **Data collection**

17 Data concerning rowers' biography came from historians' sources as previously  
18 reported [22]. These records were confirmed by data of the International Olympic Committee  
19 (olympic.org) and the French Federation of Rowing (<http://www.avironfrance.asso.fr/>).  
20 Rowers' identity information and vital statuses were collected since their first Olympic  
21 participation up to January 1st 2013 (study's endpoint) from the RNIPP via INSEE (National  
22 Institute of Statistics and Economical Studies), which registers vital status of all French  
23 people since 1891. Hence, rowers born before 1891 were not included in the study.

24 The causes of death of each deceased subject were obtained from the CepiDc  
25 (Epidemiologic Centre on Medical Causes of Death). Currently, causes of deaths occurring on

1 French territory are available via National registry from 1968 up to January 1<sup>st</sup>, 2012. Thus,  
2 only deaths occurring during this period were submitted to investigation of its causes.

3 This study was approved by the Advisory Committee on Information Processing in  
4 Research in the Field of Health (CCTIRS) and the French National Commission for Data  
5 Protection and Liberties (CNIL).

6

## 7 **Statistical Analysis**

8 We compared the mortality of French rowers with the French general population by  
9 calculating overall and disease-specific Standard Mortality Ratio (SMR) and its 95%  
10 confidence intervals (CI). SMR is the ratio between the number of deaths observed in the  
11 rowers' cohort and the number of expected deaths if the athletes had the same death rates of  
12 the French population with age and period adjustment [23]. The source for general population  
13 death rates was the French life tables available at the Human Mortality Database  
14 (<http://www.mortality.org/>) via CepiDc.

15 The SMR denominator was therefore calculated by multiplying male French death  
16 rates by the rowers' person-years at the corresponding age and period. Person-years were  
17 computed so that each rower contributes for one record of each year during his follow-up.

18 The rowers' follow-up starts with their date of first OG participation and finishes with  
19 their date of death (if concerned) or with the study's endpoint. The rowers' entries in the  
20 cohort are represented in Figure 1.

21 The observed and expected survival estimations were illustrated by Kaplan-Meier  
22 curves [24] and were compared with use of the log-rank test.

23 For the disease-specific mortality we compared each cause of death found among  
24 rowers with the specific rate in the general population by calculating SMR's for the available  
25 identification period, 1968 to 2012. Causes of death were classified according to the

1 International Classification of Diseases - ICD (8th revision before 1978, 9th revision between  
2 1979 and 1999, 10th Revision after 2000).

3 The 95% confidence intervals were calculated using the exact method [25]. R software  
4 v2.14.0 was used for the analysis.

5

## 1 **RESULTS**

### 2 **Overall mortality**

3 A total of 255 male rowers represented France in the Olympics from 1912 up to 2012.  
4 All rowers verified by the RNIPP had their vital status validated, except for fifty-two (20.3%)  
5 who were not included in the study since they were born prior to 1891 (n= 10) or their date or  
6 place of birth were not properly validated (n=42). Therefore, the analyses were performed on  
7 203 French rowers.

8 Among rowers' cohort, 46 deaths occurred before the study's endpoint; 30 within P1  
9 (Table 1). The age of death ranged from 35 to 100 years old. The mean age of death was 72.5  
10 ( $\pm 15.6$ ) in P1 and 74.0 ( $\pm 9.1$ ) in P2. The PT overall mortality is significantly reduced by  
11 42% compared with the French general population. Significant overall mortality reduction is  
12 also observed among rowers for both cohort periods considered apart (Table 1).

13 The rowers observed and expected survival curves are illustrated in Figure 2. The  
14 rowers observed curve is significantly different from the expected curve derived from the  
15 matched general French population ( $p=0.008$ ). The observed rowers' curve diverges and  
16 shifts to the right early in the follow-up period. The gap widens until 45 years of follow-up,  
17 and narrows afterwards until the end of follow-up. With increasing time, progressively fewer  
18 rowers contribute to the survival estimate.

19

### 20 **Main causes of death**

21 Among the 46 deaths observed, 36 occurred during the available period of death's  
22 cause identification (1968-2012). From those, 3 died abroad and their cause of death were not  
23 available. Therefore, 33 rowers had their underlying cause of death identified. The main  
24 causes of death (Table 2) observed were neoplasms,  $n=11(33\%)$ , followed by cardiovascular  
25 diseases  $n=7 (21\%)$  and external causes  $n=6 (18\%)$ . The ICD chapter of external cause

1 comprises deaths related to accidents, homicides, suicides and falls. The remaining causes  
2 observed (nervous system diseases, genitourinary diseases, respiratory diseases, skin diseases  
3 and ill-defined conditions) together account for 27% of all causes of death identified.  
4 Concerning the three main causes observed among French Olympic rowers, cardiovascular  
5 diseases are 59% significantly lower than found in the general population. Neoplasms and  
6 external causes are not significantly different from the general population (Table 2).

## 1 **DISCUSSION**

2           To our knowledge the present study is the first to describe a survival advantage of elite  
3 rowers compared with their referents in the general population. The follow-up over the last  
4 century shows a 42 % reduction of the overall mortality of French Olympic rowers. The early  
5 cohort of rowers (P1) followed until its complete extinction as well rowers competing post  
6 Wars up to 2012 (P2) showed a consistent mortality reduction.

7           The difference between observed and expected survival curves since the beginning of  
8 the follow-up illustrates the rowers' survival advantage over the general population. This  
9 advantage increases with time, and rowers benefit the most of their status, when they are 50 to  
10 65 years old.

11           The increased selectivity of the Olympics in the modern era may require increased  
12 training intensity and may further develop the use of enhancing performance techniques, with  
13 potential adverse effects on athletes' health [26]. The consequence of such period changes on  
14 elite rowers' mortality will only be fully acknowledged after the entire extinction of the  
15 current young rowers, as it will allow a complete retrospective analysis. Up to now, our  
16 results suggest that recent rowers' longevity (P2) follows the survival advantage trend  
17 observed among P1 rowers; the mortality difference with the general population even seems  
18 to widen. However our results should be cautiously interpreted as we compare healthy  
19 individuals at cohort's entry with the general population, including ill and handicapped  
20 individuals. This "healthy worker effect" [27] probably overestimates the mortality reduction  
21 found among rowers.

22           French rowers' survival advantage appears associated with a reduced mortality from  
23 cardiovascular diseases. The benefits of leisure endurance sports on the cardiovascular health  
24 are well known in the general population [28,29] but some studies have underlined possible  
25 risks to the cardiovascular system due to excess training [13,30,31]. The preparation to OG

1 includes important training volumes with rowers reaching more than 1000h of training per  
2 year [32]. Such training loads undertaken during years of practicing produces major  
3 adaptations of the athletes' cardiovascular system [4,33] a phenomenon probably enhanced by  
4 a previously selection process [34,35]. Among French Olympic rowers, rather than a risk, the  
5 cardiovascular adaptation to training requirements to access the OG seems to be protective in  
6 light of the 59% mortality reduction found among them. Previous studies assessing  
7 cardiovascular diseases of endurance elite athletes as defined by the ICD show: a 51%  
8 reduction among Finish long distance running and cross country skiing [36] and a 37%  
9 reduction among French cyclists [37]. Finally, our findings among Olympic rowers are also in  
10 line with longevity studies assessing rowers from lower competitive level [5,6].

11         Similar reduced overall mortality have been reported among other elite athletes  
12 cohorts from different countries [21,36,38,39], including recent findings considering  
13 endurance athletes [40]. A study of French cyclists in the *Tour de France* with comparable  
14 methods - although the number of subjects and follow-up period are different - has shown a  
15 41% reduction of cyclists overall mortality [37]. Although road cycling risks are greater than  
16 rowing [2], French rowers and cyclists presents similar mortality advantage over their  
17 compatriots. Yet, the lower injury incidence among rowers might be behind the contrast with  
18 American football players' mortality [16]. Despite an overall mortality reduction of 47% the  
19 players presented an increased mortality due to neurodegenerative diseases claimed to be  
20 related with concussive blows to the head.

21         We limited our cohort to Olympic athletes in order to focus on the highest sports level  
22 for which health consequences of intense training remains debatable [10]. Nevertheless, our  
23 results are based on a small absolute number of subjects, especially those concerning causes  
24 of death; hence they should be interpreted with caution. In addition, we are not able to  
25 determine how the excluded athletes might alter the magnitude of our findings. Finally,



1 except for age and period, we could not adjust for potential confounding factors. Our methods  
2 advantage, however, relies on an extensive follow-up of French Olympic rowers followed  
3 during a century of OG, allowing for a complete follow-up of the rowers competing in the  
4 first Games. In addition, the vital status and causes of deaths assessed and validated by  
5 National sources reduces uncertainty.

6 Further investigations based on larger cohorts and in a large variety of countries are  
7 now needed to better apprehend elite athletes' reduced mortality. As it is out of an  
8 observational study's scope to determine causality, analytical studies are necessary to explain  
9 elite athletes' survival advantage. The assessment of lifestyle or physical activity post-career  
10 of elite athletes may provide better understanding of their mortality determinants.

11

## 12 **CONCLUSION**

13 French elite rowers followed-up during a century of Olympic Games benefit of lower  
14 overall mortality compared with the French general population. Among elite rowers' main  
15 causes of death, cardiovascular diseases are reduced in relation to their compatriots. A cohort  
16 composed of deceased rowers from the early Olympic Games analyzed apart and followed  
17 until its complete extinction shows also an important mortality reduction. Analytical studies  
18 with larger samples controlling for confounders such as elite athletes' training-load and  
19 lifestyle after career are needed to understand the reasons behind elite athletes' survival  
20 advantage.

1 **ACKNOWLEDGMENTS SECTION**

2 The authors thank the Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance (INSEP)  
3 for their full support.

4

5 **All authors had full access to the data and were fully involved in the data analysis.**

6

## 1 REFERENCES

- 2 1. Brosh S, Jenner JR (1988) Injuries to rowers. *Br J Sports Med* 22: 169–169.  
3 doi:10.1136/bjism.22.4.169.
- 4 2. Shephard RJ (1998) Science and medicine of rowing: A review. *J Sports Sci* 16: 603–  
5 620. doi:10.1080/026404198366416.
- 6 3. Moorstein B (1968) Life expectancy of Ivy League rowing crews. *JAMA* 205: 106.
- 7 4. duManoir GR, Haykowsky MJ, Syrotuik DG, Taylor DA, Bell GJ (2007) The effect of  
8 high-intensity rowing and combined strength and endurance training on left ventricular  
9 systolic function and morphology. *Int J Sports Med* 28: 488–494. doi:10.1055/s-2006-  
10 955897.
- 11 5. Hartley PHS, Llewellyn GF (1939) The longevity of oarsmen: A study of those who  
12 rowed in the Oxford and Cambridge boat race from 1829–1928. *Br J Sports Med* 1: 657–  
13 662.
- 14 6. Prout C (1972) Life expectancy of college oarsmen. *JAMA* 220: 1709–1711.  
15 doi:10.1001/jama.1972.03200130039008.
- 16 7. Warburton DER, Nicol CW, Bredin SSD (2006) Health benefits of physical activity: the  
17 evidence. *CMAJ Can Med Assoc J J Assoc Medicale Can* 174: 801–809.  
18 doi:10.1503/cmaj.051351.
- 19 8. Bize R, Johnson JA, Plotnikoff RC (2007) Physical activity level and health-related  
20 quality of life in the general adult population: a systematic review. *Prev Med* 45: 401–  
21 415. doi:10.1016/j.ypmed.2007.07.017.
- 22 9. Sallis RE (2009) Exercise is medicine and physicians need to prescribe it! *Br J Sports*  
23 *Med* 43: 3–4. doi:10.1136/bjism.2008.054825.
- 24 10. Predel H-G (2014) Marathon run: cardiovascular adaptation and cardiovascular risk. *Eur*  
25 *Heart J*: eht502. doi:10.1093/eurheartj/eht502.

- 1 11. Gerche AL, Burns AT, Mooney DJ, Inder WJ, Taylor AJ, et al. (2011) Exercise-induced  
2 right ventricular dysfunction and structural remodelling in endurance athletes. *Eur Heart*  
3 *J*: ehr397. doi:10.1093/eurheartj/ehr397.
- 4 12. Ector J, Ganame J, Merwe N van der, Adriaenssens B, Pison L, et al. (2007) Reduced  
5 right ventricular ejection fraction in endurance athletes presenting with ventricular  
6 arrhythmias: a quantitative angiographic assessment. *Eur Heart J* 28: 345–353.  
7 doi:10.1093/eurheartj/ehl468.
- 8 13. Drezner JA (2008) Contemporary approaches to the identification of athletes at risk for  
9 sudden cardiac death. *Curr Opin Cardiol* 23: 494–501.  
10 doi:10.1097/HCO.0b013e32830b3624.
- 11 14. Marijon E, Tafflet M, Celermajer DS, Dumas F, Perier M-C, et al. (2011) Sports-related  
12 sudden death in the general population. *Circulation* 124: 672–681.  
13 doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.110.008979.
- 14 15. Cooper DM, Radom-Aizik S, Schwindt C, Zaldivar F Jr (2007) Dangerous exercise:  
15 lessons learned from dysregulated inflammatory responses to physical activity. *J Appl*  
16 *Physiol Bethesda Md* 1985 103: 700–709. doi:10.1152/jappphysiol.00225.2007.
- 17 16. Lehman EJ, Hein MJ, Baron SL, Gersic CM (2012) Neurodegenerative causes of death  
18 among retired National Football League players. *Neurology*. Available:  
19 <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22955124>. Accessed 9 September 2014.
- 20 17. Yoshiga CC, Higuchi M, Oka J (2002) Serum lipoprotein cholesterols in older oarsmen.  
21 *Eur J Appl Physiol* 87: 228–232. doi:10.1007/s00421-002-0627-z.
- 22 18. Petibois C, Cassaigne A, Gin H, Déléris G (2004) Lipid profile disorders induced by  
23 long-term cessation of physical activity in previously highly endurance-trained subjects.  
24 *J Clin Endocrinol Metab* 89: 3377–3384. doi:10.1210/jc.2003-031311.

- 1 19. Witkowski S, Spangenburg EE (2008) Reduced physical activity and the retired athlete:  
2 a dangerous combination? *Br J Sports Med* 42: 952–953.  
3 doi:10.1136/bjism.2008.054353.
- 4 20. Marquet L, Brown M, Tafflet M, Nassif H, Mouraby R, et al. (2013) No effect of weight  
5 cycling on the post-career BMI of weight class elite athletes. *BMC Public Health* 13:  
6 510. doi:10.1186/1471-2458-13-510.
- 7 21. Garatachea N, Santos-Lozano A, Sanchis-Gomar F, Fiuza-Luces C, Pareja-Galeano H, et  
8 al. (2014) Elite Athletes Live Longer Than the General Population: A Meta-Analysis.  
9 *Mayo Clin Proc* 89: 1195–1200. doi:10.1016/j.mayocp.2014.06.004.
- 10 22. Clarke PM, Walter SJ, Hayen A, Mallon WJ, Heijmans J, et al. (2012) Survival of the  
11 fittest: retrospective cohort study of the longevity of Olympic medallists in the modern  
12 era. *BMJ* 345: e8308.
- 13 23. Bernard P-M, Lapointe C (1987) *Mesures Statistiques en Épidémiologie*. PUQ. 329 p.
- 14 24. Pohar M, Stare J (2006) Relative survival analysis in R. *Comput Methods Programs*  
15 *Biomed* 81: 272–278. doi:10.1016/j.cmpb.2006.01.004.
- 16 25. Liddell FD (1984) Simple exact analysis of the standardised mortality ratio. *J Epidemiol*  
17 *Community Health* 38: 85–88.
- 18 26. Deligiannis A, Björnstad H, Carre F, Heidbüchel H, Kouidi E, et al. (2006) ESC study  
19 group of sports cardiology position paper on adverse cardiovascular effects of doping in  
20 athletes. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil Off J Eur Soc Cardiol Work Groups Epidemiol*  
21 *Prev Card Rehabil Exerc Physiol* 13: 687–694.  
22 doi:10.1097/01.hjr.0000224482.95597.7a.
- 23 27. John M. Last (1995) *A Dictionary of Epidemiology*. 3rd ed. Oxford, UK: Oxford  
24 University Press.

- 1 28. Schnohr P, Marott JL, Lange P, Jensen GB (2013) Longevity in male and female  
2 joggers: the Copenhagen City Heart Study. *Am J Epidemiol* 177: 683–689.  
3 doi:10.1093/aje/kws301.
- 4 29. Wang H, Dwyer-Lindgren L, Lofgren KT, Rajaratnam JK, Marcus JR, et al. (2012) Age-  
5 specific and sex-specific mortality in 187 countries, 1970-2010: a systematic analysis for  
6 the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet* 380: 2071–2094. doi:10.1016/S0140-  
7 6736(12)61719-X.
- 8 30. Möhlenkamp S, Lehmann N, Breuckmann F, Bröcker-Preuss M, Nassenstein K, et al.  
9 (2008) Running: the risk of coronary events † Prevalence and prognostic relevance of  
10 coronary atherosclerosis in marathon runners. *Eur Heart J* 29: 1903–1910.  
11 doi:10.1093/eurheartj/ehn163.
- 12 31. Mont L, Elosua R, Brugada J (2009) Endurance sport practice as a risk factor for atrial  
13 fibrillation and atrial flutter. *Europace* 11: 11–17. doi:10.1093/europace/eun289.
- 14 32. Fiskerstrand A, Seiler KS (2004) Training and performance characteristics among  
15 Norwegian international rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports* 14: 303–310.  
16 doi:10.1046/j.1600-0838.2003.370.x.
- 17 33. Pelliccia A, Kinoshita N, Pisicchio C, Quattrini F, Dipaolo FM, et al. (2010) Long-term  
18 clinical consequences of intense, uninterrupted endurance training in olympic athletes. *J*  
19 *Am Coll Cardiol* 55: 1619–1625. doi:10.1016/j.jacc.2009.10.068.
- 20 34. Kujala UM, Sarna S, Kaprio J, Tikkanen HO, Koskenvuo M (2000) Natural selection to  
21 sports, later physical activity habits, and coronary heart disease. *Br J Sports Med* 34:  
22 445–449. doi:10.1136/bjism.34.6.445.
- 23 35. Ruiz JR, Gómez-Gallego F, Santiago C, González-Freire M, Verde Z, et al. (2009) Is  
24 there an optimum endurance polygenic profile? *J Physiol* 587: 1527–1534.  
25 doi:10.1113/jphysiol.2008.166645.

- 1 36. Sarna S, Sahi T, Koskenvuo M, Kaprio J (1993) Increased life expectancy of world class  
2 male athletes. *Med Sci Sports Exerc* 25: 237–244.
- 3 37. Marijon E, Tafflet M, Antero-Jacquemin J, Helou NE, Berthelot G, et al. (2013)  
4 Mortality of French participants in the Tour de France (1947–2012). *Eur Heart J*: eht347.  
5 doi:10.1093/eurheartj/eh347.
- 6 38. Gajewski AK, Poznańska A (2008) Mortality of top athletes, actors and clergy in  
7 Poland: 1924-2000 follow-up study of the long term effect of physical activity. *Eur J*  
8 *Epidemiol* 23: 335–340. doi:10.1007/s10654-008-9237-3.
- 9 39. Juliana Antero-Jacquemin, Aurélien Latouche, Jean-François Toussaint (2014) French  
10 Olympic Athletes Show a 50% Reduced Mortality Rate. *Abstract: Volume 46:5*.
- 11 40. Ruiz JR, Fiuza-Luces C, Garatachea N, Lucia A (2014) Reduced Mortality in Former  
12 Elite Endurance Athletes. *Int J Sports Physiol Perform*. doi:10.1123/ijsp.2013-0492.
- 13

1 **FIGURE LEGENDS**

2 **Figure 1: French Olympic rowers by Olympic Games and birth year.** Black diamond  
3 represents deceased subjects and blue diamond represents the subjects alive at the study's  
4 endpoint. The two periods studied apart are schematically indicated.

5

6 **Figure 2: French Olympic rowers' observed and expected survival curves.**

7 Rowers' observed survival is represented by the solid black curve and its dashed confidence  
8 interval. The blue curve refers to the expected survival derived from the matched general  
9 French population.

10



1 **TABLES**

2 **Table 1:** French Olympic rowers' cohort description and their overall mortality compared  
 3 with the French general population.

Cohort	PT (n=203)	P1 (n=30)	P2 (n=173)
Cohort's entry period	1912-2012	1912-1936	1948-2012
Nb. of person-years	6724.2	1528.4	5195.8
Mean age at cohort's entry in years (SD)	24.1 (± 3.6)	24.1 (± 3.7)	24.1 (± 3.6)
Mean follow-up time in years (SD)	33.8 (± 18.5)	48.4 (± 15.7)	31.0 (± 17.7)
SMR (95% CI)*	0.58 (0.43 - 0.78)	0.63 (0.43 - 0.89)	0.40 (0.23 - 0.65)
p-value	<0.001	0.009	<0.001

4 \*SMR lower than 1.0, indicates a reduced mortality of rowers compared with the reference  
 5 population.

- 1 **Table 2:** French Olympic rowers' main disease-specific mortality compared with the French
- 2 general population.

<b>Main causes of death (n)</b>	<b>Observed/ Expected deaths</b>	<b>SMR (95% CI)</b>	<b>p-value</b>
Neoplasms (11)	11/18.4	0.59 (0.29 – 1.07)	0.09
Cardiovascular diseases (7)	7/17.0	0.41 (0.16 - 0.84)	0.01
External causes (6)	6/5.7	1.0 (0.38 - 2.29)	0.99

3

# Build Mass Optimization: a key for new records in women athletes?

Adrien Sedeaud<sup>1,2</sup>, Andy Marc<sup>1</sup>, Adrien Marck<sup>1,2</sup>, Amal Haida<sup>1,3</sup>, Juliana Antero-Jacquemin<sup>1</sup>, Julien Schipman<sup>1</sup>, Jean-François Toussaint<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup> IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), INSEP, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France, [irmes@insep.fr](mailto:irmes@insep.fr)

<sup>2</sup> EA7329, Université Paris-Descartes, Sorbonne Paris Cité, 12 rue de l'école de médecine, 75006 Paris, France

<sup>3</sup> Rouen University, CETAPS EA 3832, 76821 Mont Saint Aignan Cedex, France

<sup>4</sup> CIMS, Hôtel-Dieu, Assistance Publique des Hôpitaux de Paris, Parvis Notre Dame, 75004 Paris, France

## **Corresponding author:**

SEDEAUD Adrien

[adrien.sedeaud@insep.fr](mailto:adrien.sedeaud@insep.fr) (AS)

Tel: 01.41.71.25.01 Fax: 01.41.74.41.75

## **Abstract**

The purpose of this study is to investigate the relationship of anthropometric characteristics and performance in all track and field running events in women athletes. Data of mass, height, Body mass Index (BMI), age and speed were collected for the top 100 international women athletes in track events from 100 m to marathon for the 1996–2012 seasons. Speed is significantly associated with mass ( $r = 0.65$ ) and BMI ( $r = 0.60$ ) in world-class runners and moderately with height ( $r = 0.38$ ). These associations were weaker in women when compared to their men counterparts published data. Women athletes are lighter and smaller with distance increments. Speed continuously increases with BMI, in accordance with the design observed in men. BMI allows for stratifying sub-populations, depending on the event requirements and the performance levels. This index suggests a new direction for morphological optimizations in female athletes. In top runners, BMI reveals efficient body structure in order to perform. Different organizations between men and women highlight possible opportunities for further morphological optimization in women athletes.

**Keywords:** BMI, female athletes, Track and Field, performance, anthropometry, morphological optimization

## **Introduction**

In a morphological expansion context, athletes also follow evolutionary trends, but often at an accelerated pace [1–3]. This pace depends on the direct and indirect benefits that the anthropometric characteristics provide [4]. Athletes' physiques are the expression of selected morphological traits subjected to high training loads. They are associated with the performance optima of an era. The 100 fastest women in the world therefore reflect an optimal phenotype for running [5]. Morphological traits, which allow for achieving the best performance in the world, can be analysed through anthropometric characteristics such as mass, height and body mass index (BMI). Norton et Olds [1] demonstrate that century BMI changes for sprint and long distances follow opposites patterns: sprint athletes improve BMI while marathon runners tend to reduce their own. Lean mass can be accurately measured by sophisticated and rare tissue imaging instruments, and may first seem more relevant than BMI. Initially conceived to assess the risk associated with overweight, the Quetelet index now provides a whole new look on top athlete populations [6] as a simplified value of the relative amount of muscle. Total mass, height and BMI provide a useful global perspective in order to study performance. In male runners, BMI is relevant to characterize and stratify sub-populations, depending on event requirements and performance levels. In addition, it allows for identifying probability spaces or performance intervals and reveals morphological optimizations [6]. Previous studies demonstrated a link between women morphology and success in track and field [5,7]. In marathon runners, Marc et al [8] identified appropriate profiles, and found that optimal BMI for women ranged between 17.6 and 19.6 kg.m<sup>2</sup> for the 10 best performers of all time. Following the energy contribution from aerobic to anaerobic metabolisms [9], we hypothesized that self-organized phenotypic gradients do exist among female runners as well, depending on event types and performance levels. The purpose of this

study is to investigate the relationship of anthropometric characteristics and performance in all track and field running events in women athletes.

## **Methods**

### **Data collection**

Data of mass, height, BMI, and speed were collected for each international women athlete among the top 100 rankings of eight running events: 100m, 200m, 400m, 800m, 1500m, 3000m, 10,000m and marathon during the 1996-2012 seasons. This represents 13,600 annual-performers and 3,324 different athletes. Height and mass values were confronted to annual best performances. All data was collected from the website <http://www.tilastopaja.org> and cross-classified by the International Association of Athletics Federations' site: <http://www.iaaf.org>.

Data was organized according to four types of distributions.

First, the distribution of all athletes was organized by distance according to BMI in order to identify potential morphological gradients.

Second, data was analyzed by deciles of speed: the first decile represents the 170 best performers of the discipline. The last decile represents the 170 slowest performers for a total of 1,700 annual-performers for each event (Top 100 over 17 years). We compared data of mass, height and BMI according to race distances and performance deciles.

The third analysis was performed by percentage of performance: athletes BMI were stratified according to the best performances (set at 100%) of the study period (1996-2012).

Fourth, data were analysed by density function: in order to investigate these distributions, we partitioned the BMI points of all athletes according to running events depending on the performance percentage over a mesh  $M$ . In order to choose the best representation of the density and avoid information loss due to inadequate mesh resolution, a value of  $a = 1$  (most represented resolution among all distances) was used [6].

### **Statistical analysis**

All data was reported as mean  $\pm$  standard deviation. Associations between the subjects' physique (height, mass and BMI), and speed were examined using the Pearson product-moment correlation coefficient. Differences in anthropometrics and speed of the different track and field running events were compared using one-way analysis of variance test (ANOVA). Comparisons of the different track and field groups were performed using Bonferroni's Multiple Comparison Test. The level of significance was set at  $p=0.05$ . Statistical analyzes were realized with the software Statistica 7.1 and Matlab 7.13.

### **Ethics**

This study is designed and monitored by the IRMES (Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport) scientific committee. It uses a research protocol qualified as non-interventional, in which '...all acts are performed in a normal manner, without any supplemental or unusual procedure of diagnosis or monitoring.' (Article L1121-1 of the French Public Health Code). According to the law, its approval therefore did not fall under the responsibility of a committee for the protection of persons (CPP), it does not require informed consent from individual athletes.

## **Results**

Speed is significantly associated with mass ( $r=0.65$ ,  $p=0.05$ ) and BMI ( $r=0.60$ ,  $p=0.05$ ) but moderately with height ( $r=0.38$ ,  $p=0.05$ ). The ANOVA test shows significant differences in mass, height and BMI (Figure 1) among sprint, middle and long distance events.

### **Height, mass, age and performance**

The mean mass of athletes increases with speed (Figure 1). For short distances (100m, 200m and 400m) athletes are heavier ( $58.5 \pm 5.1$  kg,  $59.1 \pm 5.1$  kg and  $59.4 \pm 5.6$  kg respectively) than their middle and long distance counterparts (800m:  $54.9 \pm 5.1$  kg, 1500m:  $52.3 \pm 5.3$  kg, 3000m:  $49.4 \pm 5.1$  kg, 10,000m:  $47.3 \pm 4.9$  kg ; marathon:  $47.6 \pm 4.6$  kg) (Figure 1). The mean height of athletes by decile and discipline also depends on speed (Figure 1B). On short distances (100m, 200m and 400m) athletes are taller ( $167.6 \pm 6.3$  cm,  $169.2 \pm 6.1$  cm and  $170.8 \pm 6.1$  respectively) than their long and middle distance counterparts (800m:  $168.2 \pm 5.4$  cm, 1500m:  $166.7 \pm 5.6$  cm, 3000m:  $164.3 \pm 6.0$  cm, 10,000m:  $161.6 \pm 6.0$  cm ; marathon:  $161.9 \pm 5.7$  cm) (Figure 1). The tallest athletes run the 400m.

### **Decile analysis**

The athletes of the first decile on 1500m and 3000m are lighter and shorter than their counterparts in lower deciles. On the 800m and 400m, the most successful athletes (in the first deciles) have a higher mass than the least ones. Faster women athletes in 100m and 200m, in the first three deciles, are primarily lighter than their counterparts in the lowest deciles. Morphological organizations by decile over long distances seem more random and less clearly structured.



## **BMI gradients**

Athlete BMI distributions are shown in Figure 2 for all events. The highest percentage of athletes is seen at  $21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  for the 100m and 200m,  $20\text{-}21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  for the 400m,  $20 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  for 800m,  $19 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  for 1500m and  $18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  for the 3000m, 10 000m and marathon.

## **BMI and performance**

Figure 3 shows the mean BMI of athletes by decile and by discipline, according to speed. There is a continual increase in mean BMI with speed improvement from marathon ( $18.1 \pm 1.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) to 100m ( $20.9 \pm 1.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Exact data and density function are ordered by distance and classified by percentage of performance (100% being the best performance during the studied period) and function of BMI (Figure 4). For all distances, the greater the level, the more tightened the BMI spectrum: for the 100m, when performance level reaches 93-94% of the best one, BMIs range from 16.7 to  $28.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ; when performance level reaches 98-99%, BMIs range from 19.1 to  $22.9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  only. A similar narrowing is present across all events. On the 800m, the BMI range covers a  $14.5 - 23.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  interval at 93-94% of the best performance, and narrows to a  $17.9 - 22.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$  interval at 99% of the record.

For long distance, the greatest numbers of points (red density) are centered on an optimum interval at  $18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . The greater the distance, the larger the extension of performance level: the 100m distribution extends from 100 to 93% of best performance while on marathon it spreads from 100 to 88%.

## **Discussion**

On the entire spectrum of women track events, we demonstrate that female biometric parameters are ordered in a consistent self-organization from sprint to long distance, as previously shown in men [6]. Over the period, mean BMI of sprint athletes (100m to 400m) is larger than in middle and long distance events. This confirms the trends observed in women track and field [7], and are consistent with recent male studies [5,6,10,11].

### **Morphological requirements for different events**

From marathon to 400m, women athletes gradually become taller. This growing trend stop: 100m and 200m athletes are on average shorter than those of the 400m, in accordance with previous results [5,6]. Observed height differences between events are in accordance with specific event morphological optimization. Indeed, relationship between sprint performance and height could be expressed by an optimum [12], like in basketball [2] and probably a different one according events. The fact that 100m and 200m sprinters are smaller than their 400m counterparts probably underline greater stride frequency, better reaction time, decrease cost of locomotion (shorter thighs diminish the resistance leverage on the upper leg) and lower moment of inertia of shorter legs [6]. In other hands, being taller on the 400m confers benefits like improvements in stride length [13].

Morphology generates major impact on running efficiency [14,15], particularly height and mass that could also influence biomechanical effectiveness [14,16].

For short middle distance (800-1500m) highly trained runners, the heavier and higher the athletes, the lower energy cost [17]. Bourdin et al [18] examine mass and energy cost relationship among women and men athletes: running energy cost is negatively related with mass.

The general energetic rule is cost running increase with mass improvements [14]. These parameters contribute to the differences on morphological requirements and optimisation according to events and distance. Indeed Lucia et al [19] suggest that the superior Eritreans running economy is in part associated with anthropometric variables (lower BMI and calf circumference).

As the distance progressively decreases from marathon to 100m, runners gradually become heavier. These results are consistent with male runners organisation [6] and the constructal theory of Bejan and Marden [20], an expression of allometric laws, which states that speed increases with mass. This reinforces mass as a key requirement for speed [21]. Moreover, heavier body mass correlates with improved efficiency in sprint events, due to the requirements for muscle strength, ground force and power, and improved return of elastic energy via the stretch shortening cycle [6]. Female sprinters showed less body mass variability than normal female population [12].

On the other side of distance, smaller stature and mass may provide an advantage for marathon runners through lower metabolic cost, ground reaction force, air resistance and better energy cost, biomechanical efficiency and thermodynamic advantage [6].

## **A new BMI utility confirmed**

A consistent trend of increasing BMI is observed in mirror of speed improvements, in accordance with previous studies that associated BMI and performance [6,22–24]. Elite sprinters are heavier, in agreement with their need for higher energy outputs in a short amount of time. This may be related to the maximization of anaerobic metabolism, predominantly involved in the total energy requirements in 100m [9]. In such a top athletes population, BMI

points toward the power reserve related to lean mass [6], and reflecting greater muscle mass rather than greater adiposity [24].

Second, a BMI gradient, as observed in men athletes [6], follows the distance increment along the progressive contribution from anaerobic to aerobic mechanism [9]: hence, biometric parameters show a consistent self-organization along the distance spectrum. Showing that BMI is also an important indicator to characterize morphological gradients of women athletes capabilities. Indeed, a decrease of athletes BMI is observed when distance increases, accompanied by a shift of morphological optima. Progressive differences from 100m to the marathon create BMI gradients. This shift illustrates the energy needs during races of different duration. In this case BMI takes on the role of an embedded energy indicator.

Third, whatever the distance, the spectrum of BMI narrows into a more optimal area as performance increases, translated through a reduction in BMI variability: the best athletes are attracted to the optimum value. Like men, women morphological intervals emerge around a performance optimum, following a regular and organized structural basis for the continuum of distances.

Fourth, compared to sprint, marathon and 10,000m constraints generate a more restrictive physique: a major part of athletes are centered on a small optimum BMI interval. Indeed, density functions show a more restricted range of possibilities for long distance races. This phenomenon is probably maximized by training load, enhanced by selection, and at the margin of the smallest BMI-performance relation.

## **Toward optimizations**

Among women athletes, BMI reveals new options. There does not exist an optimum inter-gender height, BM or BMI for sprinters [12].

Significant differences between male and female athletes may be highlighted. These could reveal possible optimizations in women athletes. Associations between speed, mass, height and BMI are lower in women athletes than men [6] and reveal margins for improvements probably by strength and conditioning possibilities.

In men athletes links between performance and morphology are strengthened by gradient of size within each discipline [6]. The fastest sprinters are also the heaviest and the highest one. The best long distance runners have a lower mass and height compared to less rapid athletes on these distances [6]. In contrast, the morphological organization within deciles among women does not follow the same trend, except for 400m, 1500m and 3000m. Paradoxically, trends seem even reversed for the best women sprinters (fastest were smaller and consequently slightly lighter on the 100m and 200m). This difference couldn't be explained only by technical training, training load or pattern of run but probably by morphological traits and strength and conditioning approach in some women athletes. In this case, women athletes are lighter primarily because they are smaller. Possible progression in speed resides in the selection of taller athletes but with greater mass, in order to respect BMI-speed ratio.

Despite that best female sprinter are smaller and quite lighter, their BMI-speed relationships by decile are consistent with that observed in men and coherent with allometric law. In this case, BMI expresses height-mass equilibrium and efficient body structure. Indeed, for the 45 best male and female athletes of 100m to 10,000m, Weyand and Davis assure the key

determinant is the ground support forces that runners are able to apply; and confirm that the product of ground support force and height-squared in relation to body mass are part of the same and unique law (same tendency for the ratio of BMI to mass-specific ground support force) [5]. These findings underline the importance of the BMI as an indicator for the achievement of the maximal human speed. One hypothesis would be that such an optimized mass is only observed in small athletes because the highest ones have been recruited for other sports (such as basketball, volleyball, swimming...). Another scope for improvement could lie in mass increments [5], especially in women sprint specialists, seeing as they seem to have recently evolved below the trends highlighted in men.

On the other hand, the greater the distance, the more the variability of performance : the top 100 is enclosed in the 93-100% of performance in the 100m race, while it goes down to 88% in the marathon. For men athletes, whatever the distance the top 100 is always enclosed at minimum 93% of the best performance [6]. This underscores a greater disparity in female athletes and a more restricted pool of athletes able to improve the best performance. One explanation is the lower participation of women than men in elite sport and their latter entrance [25].

## **Conclusions**

This study shows the relevance of biometrical parameters as performance indicators in female athletes. A coherent self-organization among disciplines is found, with morphological gradients and restricted performance intervals. BMI, height and mass identify performance self-organizations within levels and genders. Slightly different organizations between men and women highlight opportunities for further morphological optimization in women athletes.

## **Acknowledgments**

The authors thank Guy Ontanon sprint coach at the French Federation of track and fields for proofreading the manuscript and providing valuable critique and advice. The authors thank INSEP teams for their full support.

## References

1. Norton K, Olds T (2001) Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med Auckl NZ* 31: 763–783.
2. Sedeaud A, Marc A, Schipman J, Schaal K, Danial M, et al. (2014) Secular trend: morphology and performance. *J Sports Sci*. doi:10.1080/02640414.2014.889841.
3. Sedeaud A, Vidalin H, Tafflet M, Marc A, Toussaint JF (2013) Rugby morphologies: “bigger and taller”, reflects an early directional selection. *J Sports Med Phys Fitness* 53: 185–191.
4. Sedeaud A, Marc A, Schipman J, Tafflet M, Hager J-P, et al. (2012) How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *Br J Sports Med* 46: 580–584. doi:10.1136/bjsports-2011-090506.
5. Weyand PG, Davis JA (2005) Running performance has a structural basis. *J Exp Biol* 208: 2625–2631. doi:10.1242/jeb.01609.
6. Sedeaud A, Marc A, Marck A, Dor F, Schipman J, et al. (2014) BMI, a Performance Parameter for Speed Improvement. *PLoS ONE* 9: e90183. doi:10.1371/journal.pone.0090183.
7. Khosla T (1985) Age, height and weight of female Olympic finalists in running events. *Br J Sports Med* 19: 214–216.
8. Marc A, Sedeaud A, Guillaume M, Rizk M, Schipman J, et al. (2013) Marathon progress: demography, morphology and environment. *J Sports Sci In Press*.
9. Ward-Smith AJ (1985) A mathematical theory of running, based on the first law of thermodynamics, and its application to the performance of world-class athletes. *J Biomech* 18: 337–349.
10. Berg K (2003) Endurance training and performance in runners: research limitations and unanswered questions. *Sports Med Auckl NZ* 33: 59–73.
11. O’Connor H, Olds T, Maughan RJ (2007) Physique and performance for track and field events. *J Sports Sci* 25 Suppl 1: S49–S60. doi:10.1080/02640410701607296.
12. Uth N (2005) Anthropometric comparison of world-class sprinters and normal populations. *J Sports Sci Med* 4: 608–616.
13. Sleivert GG, Rowlands DS (1996) Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Med Auckl NZ* 22: 8–18.
14. Anderson T (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med Auckl NZ* 22: 76–89.
15. Padilla S, Bourdin M, Barthélémy JC, Lacour JR (1992) Physiological correlates of middle-distance running performance. A comparative study between men and women. *Eur J Appl Physiol* 65: 561–566.
16. Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS (1989) Factors affecting running economy. *Sports Med Auckl NZ* 7: 310–330.



17. Maldonado S, Mujika I, Padilla S (2002) Influence of body mass and height on the energy cost of running in highly trained middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med* 23: 268–272. doi:10.1055/s-2002-29083.
18. Bourdin M, Pastene J, Germain M, Lacour JR (1993) Influence of training, sex, age and body mass on the energy cost of running. *Eur J Appl Physiol* 66: 439–444.
19. Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gómez-Gallego F, San Juan AF, et al. (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners—exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 31: 530–540. doi:10.1139/h06-029.
20. Bejan A, Marden JH (2006) Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying. *J Exp Biol* 209: 238–248. doi:10.1242/jeb.01974.
21. Charles JD, Bejan A (2009) The evolution of speed, size and shape in modern athletics. *J Exp Biol* 212: 2419–2425. doi:10.1242/jeb.031161.
22. Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH (2000) Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1130–1134.
23. Bosch AN, Goslin BR, Noakes TD, Dennis SC (1990) Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *Eur J Appl Physiol* 61: 68–72.
24. Watts AS, Coleman I, Nevill A (2012) The changing shape characteristics associated with success in world-class sprinters. *J Sports Sci* 30: 1085–1095. doi:10.1080/02640414.2011.588957.
25. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, El Helou N, Schaal K, et al. (2010) Women and men in sport performance: the gender gap has not evolved since 1983. *J Sports Sci Med* 9: 214–223.

## Figure legends

**Figure 1.** Mean mass (A) and height (B)  $\pm$  SD of athletes in each decile of speed for the eight events (100m, 200m, 400m, 800m, 1500m, 3000m, 10 000m and marathon). Black circles show the 100m athletes ordered by decile. Significant differences among all events for height (excluding 10,000m vs marathon, 100m vs 800m), mass (excluding 10,000m vs marathon, 100m vs 200m and 200m vs 400m).

**Figure 2.** BMI distribution of all athletes by running event. Each curve relates percentages of athletes per 1 BMI unit for each event.

**Figure 3.** Mean speeds and SD according to BMI for each speed decile and each event. Black circles show the 100m athletes ordered by decile. Significant differences among events for BMI (excluding marathon vs 3000m and 10,000m).

**Figure 4.** BMI of all athletes according to their performance level (percentage of the best one). Left: individual BMI distributions: best end points (=100%) are identified with a blue point. Right: athletes' BMI are described through a density function: central densities (ie. the greatest number of athletes, from blue to red) appear more clearly on the 100m (A), 800m (B), 10,000m (C) and marathon (D).

Figure 1

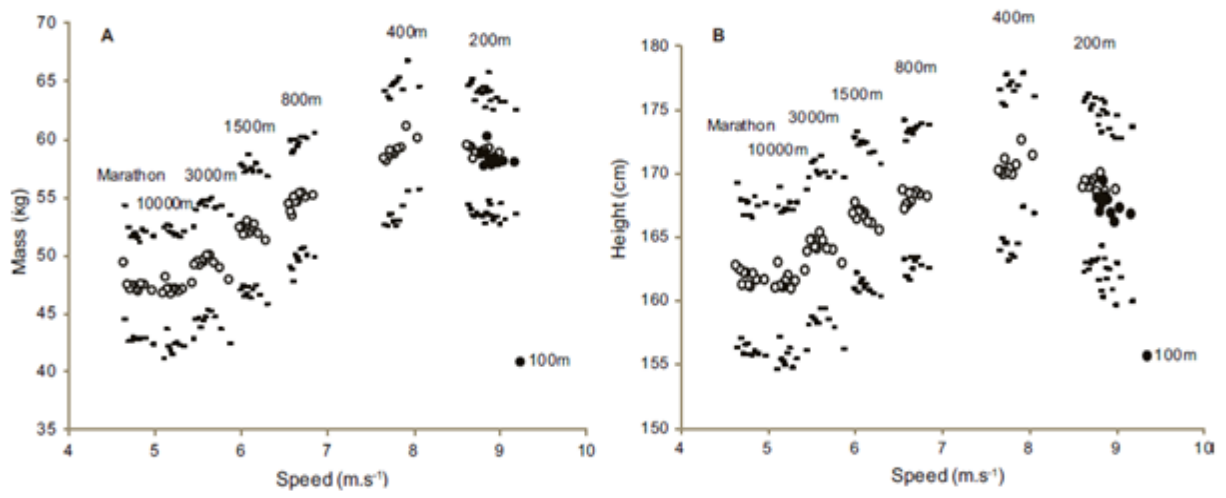


Figure 2

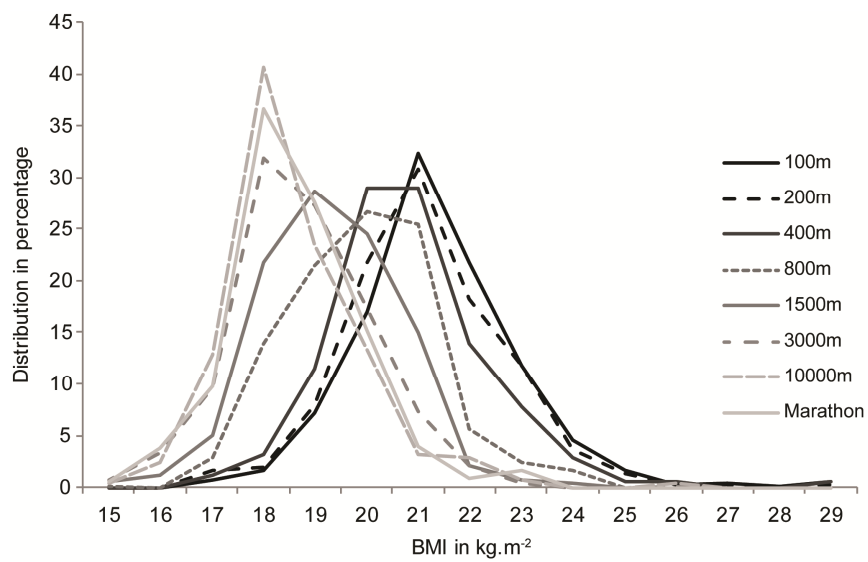


Figure 3

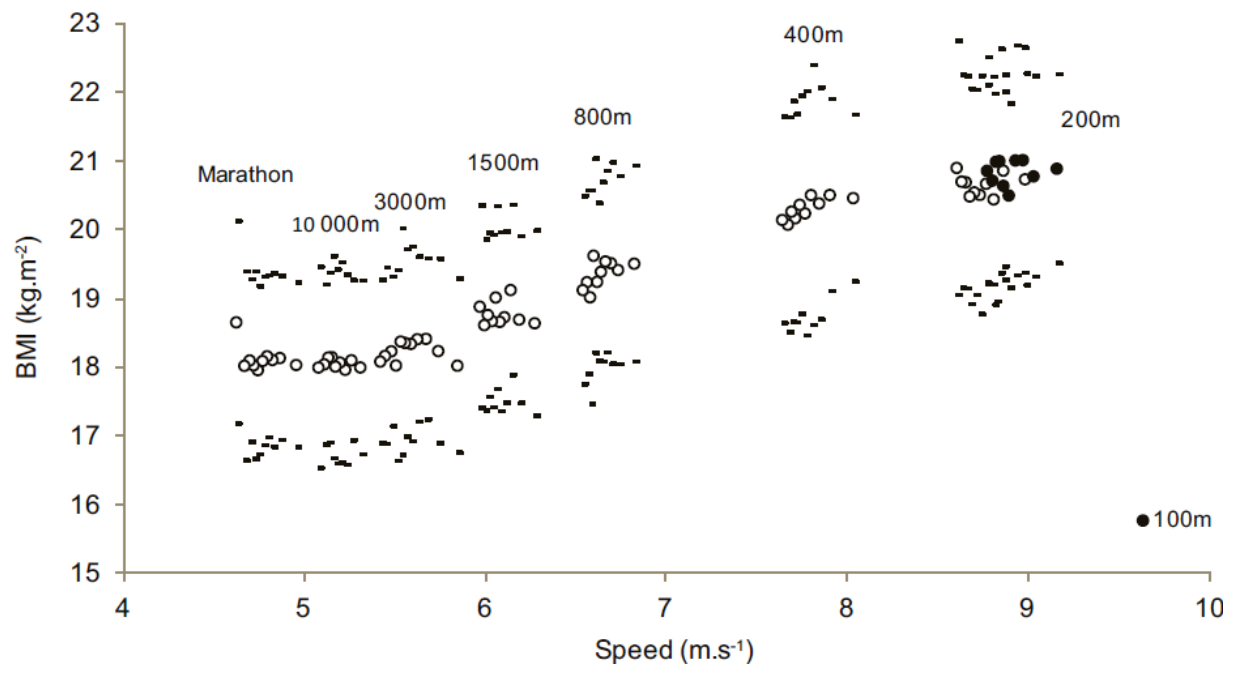


Figure 4

