



**HAL**  
open science

# Caractéristiques anthropométriques et performances de haut niveau : évolutions, indicateurs et optimisations

Adrien Sedeaud

► **To cite this version:**

Adrien Sedeaud. Caractéristiques anthropométriques et performances de haut niveau : évolutions, indicateurs et optimisations. Sport. Université Paris V- René Descartes, 2013. Français. NNT : . tel-01788589

**HAL Id: tel-01788589**

**<https://insep.hal.science//tel-01788589>**

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.

UNIVERSITE PARIS V - RENE DESCARTES

ECOLE DOCTORALE SCIENCES DU SPORT, DE LA MOTRICITE ET DU MOUVEMENT HUMAIN

# THÈSE

En vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université Paris Descartes

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Spécialité : Sciences du sport

---

## Caractéristiques anthropométriques et performances de haut niveau : évolutions, indicateurs et optimisations

---

Présentée et soutenue publiquement par

**Adrien Sedeaud**

le 18 novembre 2013

Devant le jury composé de

<b>Mr Jean-Claude Pineau</b>	(Rapporteur)	Directeur de recherche, HDR	<i>CNRS, UPR 2147</i>
<b>Mr Gérard Dine</b>	(Rapporteur)	Professeur	<i>Ecole Centrale de Paris</i>
<b>Mr Daniel Rivière</b>	(Examineur)	PU-PH	<i>CHU de Toulouse</i>
<b>Mr Bertrand During</b>	(Examineur)	Professeur	<i>Staps, Paris Descartes</i>
<b>Mme Hélène Joncheray</b>	(Examinatrice)	MCU	<i>Staps, Paris Descartes</i>
<b>Mr Hubert Vidalin</b>	(Examineur)	Docteur	<i>Clermont-Ferrand</i>
<b>Mr Jean-François Toussaint</b>	(Directeur)	PU-PH	<i>IRMES, AP-HP, Université Paris Descartes</i>



# Résumé

L'objectif de cette thèse est d'étudier les évolutions morphologiques des sportifs de haut niveau (SHN) et d'identifier les liens structurant performance et caractéristiques anthropométriques.

Les différentes études constituant cette thèse analysent la performance de haut niveau par son versant morphologique et selon différents niveaux de démonstration.

Dans un premier temps, nous montrons des évolutions différenciées entre SHN et individus de la population générale (études 1 et 2), présupposant que les SHN tirent des avantages de leurs caractéristiques anthropométriques.

Puis, nous mettons en évidence les liens directs entre les caractéristiques anthropométriques et la performance en athlétisme et dans le rugby (études 2 et 5) : les équipes de rugby disposant d'avants plus lourds et d'arrières plus grands sont plus performantes que les autres. En athlétisme, les coefficients allométriques calculés montrent l'impact du poids selon la distance de course et le sexe suggérant une possible marge de progression des caractéristiques anthropométriques pour les athlètes féminines.

Le 3<sup>ème</sup> niveau de démonstration met en exergue l'existence de couples [morphologies optimales - performances optimales], d'attracteurs biométriques bénéfiques au scoring en basketball (étude 3), et d'optima d'IMC avec leurs intervalles de performance selon la distance de course (études 4, 5 et 6).

Poids, taille et IMC sont des indicateurs pertinents puisqu'ils permettent de spécifier les paramètres des athlètes entre les différentes épreuves (gradients morphologiques en athlétisme suivant le spectre des distances, à l'instar des gradients énergétiques) mais également selon leur niveau (gradient de poids et taille inverses entre courses de fond et sprints). Ces trois indicateurs morphologiques dévoilent également des différenciations selon les spécificités de poste. Mises en comparaison, les évolutions de poids et de taille montrent des croissances asynchrones révélatrices d'atypicité.

L'IMC, très loin de sa fonction première de mesure de la corpulence et de l'obésité, doit être redéfini comme un indicateur utile de la performance de haut niveau. En effet, il révèle le compromis entre puissance, capacité énergétique et organisation de la structure corporelle efficiente chez les SHN. Dans

l'exécution sportive, l'ensemble du corps est en action, et poids, taille et IMC prennent en compte la globalité de l'athlète qui se meut.

Certains constats émanant des conclusions de cette thèse font surgir de nouvelles réflexions dans la compréhension de la performance et vont générer la mise en place de protocoles expérimentaux.

Les gabarits sont l'expression de la performance autant que l'organisation à partir de laquelle se réalise cette dernière. Les résultats de cette thèse, fondés sur l'analyse de bases de données conséquentes, apportent une nouvelle vision sur les optimisations morphologiques. Dans le dessein de performance, il est nécessaire de connaître les optimisations établies chez les meilleurs mondiaux afin de situer les athlètes dans leurs champs morphologiques mais aussi de leur permettre d'évoluer vers la meilleure adaptation anthropométrique, spécifique de leur activité.

**Mots Clés** : Morphologie, anthropométrie, performance, indicateurs et optimisation

# Abstract

The purpose of this thesis is to study the morphological changes of top athletes and identify structural links between performance and anthropometric characteristics.

This thesis is comprised of various studies that analyze the highest level of performance by morphological aspect and different levels of proof. At first, we show differentiated changes between high level athletes and individuals in the general population (Studies 1 and 2), presupposing that athletes draw benefits from their anthropometric characteristics. Then we highlight the direct links between anthropometric characteristics and performance in track and field athletes and rugby players (studies 2 and 5): rugby teams with heavier forwards and taller backs are more successful than others. In track and field, calculated allometric coefficients show the impact of mass depending on the distance of the race and sex, suggesting a possible anthropometric progression margin for female athletes. The third level of supporting evidence, highlights the existence of couples [optimal morphologies - optimal performance], biometric attractors beneficial in scoring in basketball (Study 3), and BMI optimum with performance intervals in race distance (studies 4, 5 and 6). Mass, height and BMI are relevant indicators used to specify athletes between different events (morphological gradients in track and field following the spectrum of distances, like energy gradients) but also according to their level (inverse gradient between mass and height according to middle and long distances and sprints). These three indicators also reveal morphological differentiation depending on the specific position. Being compared, changes in mass and height show asynchronous growth indicative of atypicality. Independent from BMI's primary function of measuring the body size and obesity, it should be refined as a useful indicator of high level performance. Indeed, it reveals trade-off between power, energy capacity and organization of efficient body structure for high level athletes. In athletic performance, the whole body is in action, and mass, height and BMI take into account the entire athlete who moves. Some conclusions from the findings of this thesis arise new thoughts in the performance understanding and will generate the development of experimental protocols. Physiologies are the expression of the performance as well as the organization from which it is realized. The results of this thesis, based on the analysis of consistent databases, provide a new vision on morphological optimizations. For the purpose of performance, it is necessary to know the optimizations established in order to situate athletes in their morphological fields, but also enable them to move towards better anthropometric adaptation specific of their activities.

**Keywords** : Morphology, anthropometry, performance, indicators and optimisation



# REMERCIEMENTS

---

Les travaux de recherche qui constituent cette thèse ont été réalisés à l'Institut de Recherche bio-Médicale et d'Epidémiologie du Sport (**IRMES**), unité accueillie à l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP).

Mes remerciements s'adressent en particulier :

Au **Professeur Toussaint** pour votre encadrement et la confiance témoignée durant ces trois années, qui sont, d'un point de vue professionnel, les trois plus intéressantes, enrichissantes et durant lesquelles j'ai le plus appris. Merci pour les longues relectures et discussions qui ont rendu ces travaux acceptables.

Aux Professeurs **Jean-Claude PINEAU** et **Gérard DINE** d'avoir accepté de donner de votre temps afin d'expertiser ce travail. Vos remarques, conseils et expériences dans la recherche sur la performance de haut niveau me seront précieux. Recevez ici ma sincère gratitude et mes remerciements.

Aux Professeurs **Daniel RIVIERE** et **Bertrand DURING**, ainsi qu'aux Docteurs **Hubert VIDALIN** et **Hélène JONCHERAY** de me faire l'honneur de participer à ce jury de thèse en qualité d'examineurs.

A **Guy ONTANON**, pour ses relectures et les discussions qui ont suivi autour de la compréhension du sport et bien sûr de l'athlétisme.

A **Andy**, le Veauliporc qui a été partie prenante de toutes les études de cette thèse et qui a apporté une certaine épaisseur à cette dernière.

A **Juju** Jacquard, le coq et son nez légendaire dans l'orientation des études sport-santé.

Après ces trois années communes, vous êtes plus que des collègues : des amis avec qui le chemin professionnel, je l'espère, sera long...

En me permettant d'intégrer l'IRMES, et ses « séminaires hebdomadaires », j'ai eu la chance de rencontrer une équipe de recherche complémentaire mais aussi des personnes d'exception.

Je retiendrai une rencontre humaine riche en couleur avec qui, dès les premiers moments, les mots ne sont déjà plus nécessaires, la compréhension est là : **Hélène**. La maman écureuil, qui, de son œil bienveillant, encadre, conseille et apporte de la vie à l'IRMES.

Merci à **Marion** de m'avoir sauvé des mercredis de l'ennui et pour ces mémorables moments du Président.

Merci à **Hala** et **Nour**, les précurseurs, pour leurs conseils. **Zazou**, à travers le sport santé, tu m'as appris la planification et l'intérêt de se fixer des deadlines dans sa rédaction : je t'en remercie.

Aux pintades, pour leur bonne humeur. **Laurie-Anne**, **Amal**, la team Irmes Bad. **Juliana** : la petite maladie, merci pour les ananas et quatre-heures en tout genre que tu m'as « offerts ».

A **Fred-Fred** qui, avec sa grande rigueur scientifique dans la relecture des documents, a fait évoluer les articles que naïvement je pensais prêts pour la soumission.

A **Adrien** le poète... si si « Le bonheur de l'hibiscus fourré au foie gras ».

A **Geoff**, « Hey Mike thanx for your help », notamment sur le formatage des figures avant soumission.

-----

A **Marie**, sans t'avoir rejoint à Paris, ces trois belles années n'auraient pu débiter. Une nouvelle fois tu es centrale à ce que je deviens. Merci pour tout et dans ces travaux pour ton soutien inconditionnel, tes relectures et toujours dans la gentillesse et la tendresse qui te caractérisent.

Mes derniers mots pour **mes parents** sans qui je ne serais rien. Merci de m'avoir offert la possibilité de faire ce que je souhaitais, je vous en serai à jamais reconnaissant. Votre soutien, votre support de toujours et par dessus tout votre amour sont le socle de ce que je suis et deviendrai...

## Ce travail de thèse a fait l'objet des publications suivantes

---

### Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

**Sedeaud A**, Marc A, Schipman J, Tafflet M, Hager J-P, Toussaint J-F. How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *British Journal of Sports Medicine*. 2012;46(8):580-584.

**Sedeaud A**, Vidalin H, Tafflet M, Marc A, Toussaint JF. Rugby morphologies: « bigger and taller », reflects an early directional selection. *The Journal of sports medicine and physical fitness*. 2013;53(2):185-191.

Marc A, **Sedeaud A**, Guillaume M, Rizk, M, Schipman J, Antero-Jacquemin J, Haida A, Berthelot G, Toussaint J-F. Marathon progress: demography, morphology and environment. *Journal of Sports Sciences*. 2013;In Press.

**Sedeaud A**, Marc A, Schipman J, Schaal K, Danial M, Guillaume M, Berthelot G, Toussaint JF. Secular trend : morphology and performance. *Journal of Sports Sciences*. Under review.

**Sedeaud A**, Marc A, Dor F, Marck A, Schipman J, Dorsey M, Haida A, Berthelot G, Toussaint JF. BMI, a performance parameter for speed improvement. . *British Journal of Sports Medicine*. Under review.

### Présentations dans des congrès

**VI<sup>ème</sup> Symposium de l'IRMES** (Caen 2011) : Comment ont-ils gagné une coupe du monde de rugby : le poids, la taille et le vécu collectif ?

**4<sup>ème</sup> Congrès Commun SFMS & SFTS** 2011 : Comment ont-ils gagné une coupe du monde de rugby : le poids, la taille et le vécu collectif ?

**VII<sup>ème</sup> Symposium de l'IRMES** (Grenoble 2012) : Spécialisation et expansion morphologiques.

**5<sup>ème</sup> Congrès Commun SFMES & SFTS** 2012 : Spécialisation et expansion morphologiques.

### Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Gutierrez D, Roque P, Bagate C, Barizien N, El Helou N, **Sedeaud A**, Thoreux P, Toussaint J-F. Étude épidémiologique prospective des pathologies dans le XV de France féminin de rugby de juillet 2006 à septembre 2010. *Journal de Traumatologie du Sport*. 2011;28(4):208-214.

Bihan H, Méjean C, Castetbon K, Faure H, Ducros V, **Sedeaud A**, Galan P, Le Clésiau H, Péneau S, Hercberg S. Impact of fruit and vegetable vouchers and dietary advice on fruit and vegetable intake in a low-income population. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2011.

Nassif H, **Sedeaud A**, Abidh E, Schipman J, Tafflet M, Deschamps T, Maillet H, Ovigneur H, Desgorces F-D, Toussaint J-F. Monitoring fitness levels and detecting implications for health in a French population: an observational study. *BMJ Open*. 2012;2(5).

Berthelot G, **Sedeaud A**, Guillaume M, Toussaint J-F. Les records sportifs auront-ils une fin? *Pour la Science*. 2012;(422).

Nassif H, **Sedeaud A**, Schipman J, Toussaint J-F. Équilibres: Réflexions, actions et opportunités pour la promotion de l'activité physique ou sportive. *Cahier de Nutrition et Diététique*. 2011;46(Supplément 1):S36-S38.

**Sedeaud A**, Guillaume M, Berthelot G, Toussaint J-F. Aux limites de la performance. *Biofutur*. 2012;(334):57-58.

Schaal K, Nassif H, Maître C, Antero-Jacquemin J, Haida A, **Sedeaud A**, Berthelot G, Guillaume M, Toussaint J-F. Maternity during sports careers do not jeopardize future athletic success in elite marathon runners. *PloS One*. Under review.

## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>17</b>
<b>2. CONTEXTE GENERAL .....</b>	<b>21</b>
2.1. <i>Introduction.....</i>	21
2.2. <i>Caractéristiques morphologiques.....</i>	22
2.2.1 Cadrage sémantique.....	22
2.2.1.1. Morphologie .....	22
2.2.1.2. Caractéristiques biométriques.....	22
2.2.1.3. Caractéristiques anthropométriques.....	23
2.2.1.4. Caractéristiques kinanthropométriques .....	23
2.2.1.5. Nomenclatures et conclusion .....	23
2.2.2. Evolutions.....	24
2.2.2.1. Tendance séculaire .....	24
2.2.2.2. Les évolutions vers de plus imposants gabarits : la loi de Cope .....	24
2.2.2.3. Population générale.....	26
2.2.2.3.1. Taille .....	26
2.2.2.3.2. Poids.....	27
2.2.2.3.3. IMC.....	28
2.2.2.4. Conclusion .....	29
2.2.3. Caractéristiques morphologiques et conséquences.....	30
2.2.3.1. Caractéristiques morphologiques et caractéristiques physiologiques.....	30
2.2.4. Taille .....	31
2.2.4.1. Taille et performance .....	31
2.2.4.2. Taille et santé.....	33
2.2.4.3. Taille et mortalité toutes causes.....	33
2.2.4.3.1. Etudes favorables aux plus grands .....	33
2.2.4.3.2. Etudes favorables aux plus petits.....	34
2.2.4.3.3. Conclusion .....	34
2.2.4.4. Taille et cancer.....	35
2.2.4.5. Taille et maladies cardio-vasculaires .....	35
2.2.4.5.1. Etudes favorables aux plus grands .....	35
2.2.4.5.2. Etudes favorables aux plus petits.....	36
2.2.4.5.2.1. Similarité féminine .....	36
2.2.4.5.3. Conclusion .....	36
2.2.4.6. Conclusions.....	37
2.2.5. Poids.....	37
2.2.5.1. Poids et mortalité .....	37
2.2.5.2. Facteurs physiologiques et prise de poids .....	38
2.2.6. IMC.....	39
2.2.6.1. Augmentation de l'IMC et diabète .....	39
2.2.6.2. Augmentation de l'IMC et MCV .....	39
2.2.6.3. Augmentation de l'IMC et cancer .....	40
2.2.6.3.1. IMC et cancer du sein .....	40
2.2.6.3.2. IMC et cancer du colon.....	40
2.2.6.3.3. IMC et cancer du rein .....	41
2.2.6.3.4. Conclusion : IMC et cancer .....	41
2.2.6.4. Augmentation de l'IMC et mortalité toute cause .....	41
2.2.6.5. Conclusion IMC.....	44

2.2.7.	Conclusion Caractéristiques morphologiques et santé .....	44
2.2.8.	Optima.....	45
2.3.	<i>Caractéristiques biométriques et sport</i> .....	48
2.3.1.	Indicateur anthropométrique : les somatotypes.....	48
2.3.2.	Taille, poids et IMC.....	50
2.3.3.	Description morphologique.....	52
2.3.3.1.	Rugby.....	52
2.3.3.2.	Football américain .....	52
2.3.3.3.	Basket-ball .....	53
2.3.3.4.	Hockey sur glace .....	53
2.3.3.5.	Baseball.....	53
2.3.3.6.	Athlétisme .....	53
2.3.3.6.1.	Courses.....	54
2.3.3.6.2.	Comparaisons.....	54
2.3.3.7.	Comparaisons et population générale.....	56
2.3.4.	Conclusion .....	56
2.4.	<i>Evolution des caractéristiques anthropométriques des sportifs</i> .....	57
2.4.1.	Rugby.....	58
2.4.1.1.	Tendances internationales.....	59
2.4.1.2.	Tendances françaises.....	59
2.4.1.3.	Tendances anglaises .....	60
2.4.1.4.	Rugby à VII .....	60
2.4.2.	Foot US .....	60
2.4.3.	Basket.....	63
2.4.4.	Athlétisme .....	64
2.4.5.	Comparaison avec la population générale .....	66
2.4.5.1.	Rugby et population générale.....	66
2.4.5.2.	Football américain et population générale.....	66
2.4.5.3.	Basketball et population générale .....	68
2.4.5.4.	Athlétisme et population générale .....	68
2.4.6.	Vers une évolution Darwinienne? .....	70
2.4.7.	Conclusion .....	70
2.5.	<i>Morphologie et performance</i> .....	71
2.5.1.	Place des gabarits dans la performance .....	71
2.5.2.	« Optimisation morphologique » .....	73
2.5.2.1.	Compromis phénotypique : vers des optima morphologiques ?.....	73
2.5.3.	Caractéristiques biométriques et performances physiques .....	74
2.5.3.1.	Force, poids, taille et IMC.....	74
2.5.3.2.	VO <sub>2</sub> max, poids et IMC.....	76
2.5.4.	Activités sportives .....	76
2.5.4.1.	Rugby.....	77
2.5.4.1.1.	Tendances Internationales .....	78
2.5.4.1.1.1.	Comparaisons selon les niveaux.....	78
2.5.4.1.1.2.	Comparaisons selon la performance .....	78
2.5.4.1.2.	Tendances françaises .....	79
2.5.4.1.2.1.	Comparaisons selon les niveaux .....	79
2.5.4.1.3.	Tendances chez les jeunes joueurs .....	79
2.5.4.1.4.	Conclusion .....	80
2.5.4.2.	Foot US .....	80
2.5.4.3.	Basketball .....	81
2.5.4.3.1.	Comparaisons selon les niveaux.....	81

2.5.4.3.2.	Comparaisons selon la performance .....	81
2.5.4.4.	Hockey sur glace .....	82
2.5.4.4.1.	Comparaisons selon les niveaux.....	82
2.5.4.4.2.	Liens direct avec la performance.....	83
2.5.4.5.	Baseball.....	83
2.5.4.5.1.	Comparaison selon les niveaux .....	83
2.5.4.5.2.	Comparaison selon la performance .....	84
2.5.4.6.	Athlétisme .....	85
2.5.4.6.1.	Les courses .....	85
2.5.4.6.1.1.	Comparaison à la population générale .....	85
2.5.4.6.1.2.	Comparaison selon la performance.....	85
2.5.4.6.1.3.	Sprint .....	86
2.5.4.6.1.4.	Fond et demi-fond .....	86
2.5.4.6.2.	Marathon .....	89
2.5.4.6.2.1.	Comparaison à la population générale.....	89
2.5.4.6.2.2.	Comparaison selon la performance.....	89
2.5.4.6.2.3.	Liens directs avec la performance .....	89
2.5.4.6.3.	Conclusion Courses .....	90
2.5.4.7.	Synthèses des études reliant morphologie et performance (autres sports).....	90
2.5.5.	Conclusion des études reliant morphologie et performance .....	92
<b>3.</b>	<b>OBJECTIFS DE LA RECHERCHE .....</b>	<b>93</b>
<b>4.</b>	<b>METHODES TRANSVERSALES .....</b>	<b>95</b>
4.1.	<i>Méthodes connues .....</i>	<i>95</i>
4.2.	<i>Méthodes envisagées .....</i>	<i>96</i>
4.3.	<i>Ethique .....</i>	<i>96</i>
<b>5.</b>	<b>ÉTUDE 1 .....</b>	<b>97</b>
5.1.	<i>Résumé.....</i>	<i>97</i>
5.2.	<i>Introduction.....</i>	<i>98</i>
5.3.	<i>Méthodes .....</i>	<i>99</i>
5.3.1.	Collecte des données .....	99
5.3.2.	Analyses statistiques .....	99
5.4.	<i>Résultats.....</i>	<i>101</i>
5.5.	<i>Discussion .....</i>	<i>104</i>
5.6.	<i>Conclusion .....</i>	<i>108</i>
5.7.	<i>Perspectives : liens Etude 1-Etude 2 .....</i>	<i>108</i>
<b>6.</b>	<b>ÉTUDE 2 .....</b>	<b>109</b>
6.1.	<i>Résumé.....</i>	<i>109</i>
6.2.	<i>Introduction.....</i>	<i>110</i>
6.3.	<i>Méthodes .....</i>	<i>111</i>
6.3.1.	Collecte de données .....	111
6.3.2.	Conception de l'étude .....	111
6.3.3.	Analyses statistiques .....	112
6.4.	<i>Résultats.....</i>	<i>113</i>
6.4.1.	Evolution des néo-internationaux .....	113
6.4.2.	Le poids comme déterminant de la performance .....	114
6.4.3.	La taille comme déterminant de la performance .....	115

6.4.4.	L'expérience collective comme déterminant de la performance .....	116
6.5.	<i>Discussion</i> .....	116
6.6.	<i>Conclusion</i> .....	119
6.7.	<i>Perspectives</i> .....	119
6.7.1.	Apport de la coupe du monde 2011 : tendances vérifiées ? .....	119
6.8.	<i>Liens étude 2- étude 3</i> .....	122
<b>7.</b>	<b>ÉTUDE 3</b> .....	<b>125</b>
7.1.	<i>Résumé</i> .....	125
7.2.	<i>Introduction</i> .....	126
7.3.	<i>Méthodes</i> .....	127
7.3.1.	Collecte des données.....	127
7.3.1.1.	Athlètes.....	127
7.3.1.2.	Population générale américaine .....	127
7.3.2.	Conception de l'étude .....	128
7.3.2.1.	Evolution biométrique des athlètes dans les sports américains.....	128
7.3.2.2.	Football américain .....	128
7.3.2.3.	NBA .....	128
7.3.3.	Analyses statistiques .....	129
7.4.	<i>Résultats</i> .....	130
7.4.1.	Tendance séculaire.....	130
7.4.2.	Football américain .....	132
7.4.3.	NBA.....	133
7.5.	<i>Discussion</i> .....	135
7.5.1.	Tendances séculaires.....	135
7.5.2.	Creusement des écarts.....	136
7.5.3.	Effet de plateau observé chez les athlètes sélectionnés spécifiquement sur leur taille .....	136
7.5.4.	Asynchronisme entre les augmentations .....	137
7.5.5.	Football américain .....	138
7.5.6.	Basketball .....	139
7.6.	<i>Conclusion</i> .....	141
7.7.	<i>Perspectives</i> .....	141
7.8.	<i>Lien étude 3- étude 4</i> .....	142
<b>8.</b>	<b>ÉTUDE 4</b> .....	<b>143</b>
8.1.	<i>Résumé</i> .....	143
8.2.	<i>Introduction</i> .....	144
8.3.	<i>Méthodes</i> .....	145
8.3.1.	Collecte des données .....	145
8.3.2.	Organisation des données.....	145
8.3.3.	Analyses statistiques .....	147
8.4.	<i>Résultats</i> .....	148
8.4.1.	Poids, taille et performance .....	148
8.4.2.	Gradients de performance .....	149
8.4.3.	IMC et performance .....	150
8.5.	<i>Discussion</i> .....	153
8.5.1.	Des tailles différentes pour des distances différentes .....	153
8.5.2.	Poids et performance .....	154
8.5.3.	Liens renforcés avec l'augmentation de la performance .....	156
8.5.4.	IMC, performance et intervalle optimal .....	156

8.6.	<i>Conclusions</i> .....	158
8.7.	<i>Perspectives</i> .....	159
8.8.	<i>Lien étude 4- étude 5</i> .....	162
<b>9.</b>	<b>ÉTUDE 5</b> .....	<b>163</b>
9.1.	<i>Résumé</i> .....	163
9.2.	<i>Introduction</i> .....	164
9.3.	<i>Méthodes</i> .....	167
9.3.1.	Collecte des données .....	167
9.3.2.	Organisation des données.....	167
9.3.3.	Relation allométrique : poids-vitesse selon les distances .....	168
9.3.4.	Analyses statistiques .....	169
9.4.	<i>Résultats</i> .....	170
9.4.1.	Poids et performance .....	170
9.4.2.	Taille et performance .....	171
9.4.3.	Gradients de performance .....	172
9.4.4.	IMC et performance .....	173
9.4.5.	Ecart hommes-femmes.....	176
9.4.6.	Vitesse, Poids, IMC et taille en fonction de la distance de course .....	176
9.4.7.	Relation allométrique : poids-vitesse selon les distances .....	177
9.5.	<i>Discussion</i> .....	178
9.5.1.	Des similitudes hommes/femmes .....	178
9.5.1.1.	Des tailles différentes pour des distances différentes.....	178
9.5.1.2.	Poids et performance .....	179
9.5.1.3.	IMC, performance et intervalle optimal .....	180
9.5.2.	Des différences hommes/femmes .....	181
9.5.2.1.	Fond et demi fond .....	181
9.5.2.2.	Sprints.....	181
9.5.2.3.	Des différences d'organisation .....	182
9.5.3.	Apport des différences morphologiques dans la compréhension des écarts.....	183
9.6.	<i>Conclusions</i> .....	184
9.7.	<i>Perspectives</i> .....	184
9.8.	<i>Liens étude 5- étude 6</i> .....	184
<b>10.</b>	<b>ÉTUDE 6</b> .....	<b>185</b>
10.1.	<i>Résumé</i> .....	185
10.2.	<i>Introduction</i> .....	186
10.3.	<i>Méthodes</i> .....	187
10.3.1.	Collecte des données.....	187
10.3.2.	Vitesse de course.....	187
10.3.3.	Démographie .....	187
10.3.4.	Morphologie .....	188
10.3.5.	Performance saisonnière.....	188
10.3.6.	Analyses statistiques .....	188
10.4.	<i>Résultats</i> .....	189
10.4.1.	Vitesses de course .....	189
10.4.2.	Démographie .....	190
10.4.2.1.	Top 100.....	190
10.4.3.	Morphologie et vitesse de course chez le Top 100 .....	192
10.4.4.	Saisonnalité .....	193

10.5.	<i>Discussion</i> .....	194
10.5.1.	Vitesses de courses.....	194
10.5.2.	Démographie .....	194
10.5.3.	Morphologie et vitesse de course .....	196
10.5.4.	Saisonnalité .....	197
10.6.	<i>Conclusion</i> .....	198
<b>11.</b>	<b>DISCUSSION GENERALE</b> .....	<b>199</b>
11.1.	<i>1<sup>er</sup> niveau de démonstration : évolution et sélection</i> .....	200
11.2.	<i>2<sup>ème</sup> niveau de démonstration : liens directs avec la performance</i> .....	202
11.3.	<i>3<sup>ème</sup> niveau de démonstration : intervalle de performance et optimisation</i> .....	203
11.3.1.	Taille et optimisation .....	203
11.3.2.	Poids et optimisation.....	205
11.3.3.	IMC et optimisation .....	207
11.4.	<i>4<sup>ème</sup> niveau de démonstration : pertinence des indicateurs</i> .....	209
11.5.	<i>Intérêts et apports de la thèse</i> .....	211
<b>12.</b>	<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>213</b>
<b>13.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>215</b>
<b>14.</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>247</b>
14.1.	<i>Annexe 1</i> .....	247
14.2.	<i>Annexe 2</i> .....	255
14.3.	<i>Annexe 3</i> .....	261

## 1. Introduction Générale

« Le corps est le premier véhicule de l'être au monde » (1). Dans sa *Phénoménologie de la perception*, Merleau-Ponty resitue le corps à sa place première : il est celui avec lequel tout être doit s'organiser pour sa réalisation, son expression et sa performance. Il est non seulement le premier véhicule de l'être au monde mais aussi celui de tous les âges et donc le dernier. En découle la notion de corps « capital-santé » à entretenir et faire fructifier dans une optique de longévité (2,3). Comme « le corps est le premier et le plus naturel instrument de l'homme » (4), le sport incarne un lieu privilégié où s'exposent les corps en mouvement. Le sport de haut niveau devient le laboratoire du corps éprouvé, optimisé et étudié aux confins de ses ressources.

Les sportifs de haut niveau (SHN) présentent des caractéristiques sélectionnées, entraînées et optimisées loin des normes (5–7). A l'instar des records du monde, qui reflètent les limites et les maxima d'une époque, les gabarits des meilleurs sportifs mondiaux sont l'image des physiques les plus adaptés du moment. La réflexion autour de ce thème devrait révéler les soubassements structurels nécessaires à la performance de haut niveau. Cette dernière est en effet le fruit d'interactions complexes et les apports de l'épidémiologie dans la compréhension de ces phénomènes sont un outil nouveau extrêmement utile (5).

La morphologie n'est qu'un élément de la matrice de performance ; l'impact relatif des caractéristiques anthropométriques reste difficile à quantifier parmi l'ensemble des paramètres physiologiques, biomécaniques ou sociologiques. Afin d'améliorer et d'optimiser la performance de haut niveau, il est essentiel de connaître la place de ces caractéristiques. Révéler des optimisations biométriques grâce aux études épidémiologiques pourrait fournir des standards à partir desquels les athlètes seraient en mesure de se situer, de placer leurs progressions, les entraîneurs d'adapter les paramètres de leurs séances.

Historiquement les caractéristiques anthropométriques des SHN ont été mesurées dans de nombreuses études (8–11) mais avec l'essor des explorations physiologiques, biologiques et biomécaniques, la biométrie a vite été reléguée dans un sous-chapitre anonymement descriptif des batteries de test. Dans la littérature, elles font l'objet de comparaisons avec la population générale ou entre sportifs de différents niveaux. Si des différences anthropométriques sont constatées, les auteurs affirment que ces dernières confèrent des bénéfices à la performance, sans pour autant en

apporter la démonstration patente. Il en est de même lorsque l'on compare l'évolution biométrique des SHN à celle de la population générale (12), dans son contexte d'expansion (13,14). Les études tentant de comprendre l'importance ou de quantifier la prégnance des caractéristiques anthropométriques sont très peu nombreuses. Pourtant, certains auteurs (15,16) ont pu montrer des capacités prédictives similaires entre caractéristiques anthropométriques et physiologiques de la performance athlétique. L'importance du physique est empiriquement reconnue par les spécialistes, entraîneurs et athlètes en dépit du peu d'études reliant directement morphologie et performance de haut niveau. Fournir de réelles preuves scientifiques de ces liens s'avère nécessaire afin de situer les athlètes dans leur « contexte morphologique » et d'octroyer aux entraîneurs et sportifs des éléments pour enrichir sélection et entraînements. D'autant que l'expansion des performances sportives s'appuie sur une expansion des phénotypes à même de les réaliser.

Aucune étude n'a mis en évidence d'optima ou d'intervalles morphométriques de performance. Pour mieux comprendre et optimiser la performance de haut niveau, il convient de resituer ces caractéristiques anthropométriques au premier plan.

Le poids, la taille et l'IMC sont des indicateurs intéressants pour comprendre la performance car ils reflètent l'organisation corporelle des athlètes. L'étude de ces traits anthropométriques chez les meilleurs mondiaux livre les structurations les plus adaptées d'une époque. De plus, les analyses exhaustives permettent de dévoiler des auto-organisations pour chaque sport, chaque épreuve, et potentiellement pour chaque niveau de performance. Le poids total, la taille et l'IMC participent à la performance, expression de la totalité du corps en action, qui inclue masse maigre, masse osseuse, masses grasse et viscérale.

Si le poids et la taille jouent un rôle reconnu dans le processus de sélection du sport professionnel (12), l'IMC peut apporter un élément pertinent nouveau. Cet indice doit cependant être utilisé en ayant conscience de ses limites mais aussi de ses intérêts (17). Initialement inspiré des tables d'Adolphe Quételet, publiées pour la première fois en 1833 dans ses recherches sur le poids de l'homme aux différents âges, le rapport du poids sur la taille au carré n'est sémantiquement apparu IMC que dans les années 1970 (18). Les premières recommandations de son utilisation n'arrivent qu'une dizaine d'années plus tard (19,20) puis l'OMS l'affirme comme outil de diagnostic et de prévention dans la lutte contre l'obésité (21). En France, comme dans le reste du monde, il est l'outil

de l'étude de la corpulence, utilisé dans les études sur l'obésité même s'il ne mesure pas l'excès de masse grasse ni sa distribution. Son caractère pratique, reposant sur des données faciles à recueillir, et sa forte corrélation à la masse grasse en population générale, a fait de l'IMC le plus utilisé des indicateurs (formule de Broca, Lorentz, Devine, Perrault ou Monnerot-Dumaine). Ses raffinements offrent des interprétations plus précises selon la taille (22).

Chez les SHN, l'IMC fournit des renseignements différents mais tout aussi utiles. Il octroie une représentation de la structure corporelle efficiente et une appréciation indirecte des puissances et des capacités énergétiques nécessaires à la performance. Dans cette population très particulière, l'IMC ne peut être lu selon les classes connues en population générale. Nous définirons à travers ces travaux de thèse, certaines des possibilités d'interprétation sur la population des SHN.

Nous émettrons l'hypothèse qu'à l'instar des études sanitaires fournissant des optima d'IMC, et des intervalles de protection, il existe également des optima et des intervalles morphométriques favorables à la performance.



## 2. Contexte Général

### 2.1. Introduction

Ce cadrage contextuel fournit une vision globale des caractéristiques morphologiques et de leurs impacts sur la performance de haut niveau. Pour cerner ces liens, les notions de poids, taille, IMC ainsi que leurs évolutions séculaires en population générale doivent préfigurer tout travail. La morphologie affecte en effet la performance mais aussi la santé, la longévité. Les sportifs de haut niveau sont un groupe particulier de la population générale, en distribution symétrique par rapport aux sous-groupes de patients (23), qui sont plus souvent l'objet des études épidémiologiques. Cette symétrie autorise de fait les mêmes raisonnements analytiques et l'emploi d'outils statistiques très comparables. Malgré leurs particularités et leur rareté (génétique, physiologiques ou statistique) les SHN subissent aussi certaines des influences et des contraintes environnementales générales. Il s'agira ici de comprendre quels bénéfices ces derniers tirent de leurs particularités. Les études reliant morphologies et performances sportives feront l'objet du dernier chapitre.

## 2.2. Caractéristiques morphologiques

Dans ce chapitre, il s'agira de définir les termes de morphologie, biométrie et anthropométrie et d'en montrer les évolutions connues en population générale. Une fois les trajectoires évolutives définies, nous recenserons synthétiquement les relations démontrées entre taille, poids, IMC d'une part et santé, morbidité et mortalité d'autre part.

### 2.2.1 Cadrage sémantique

#### 2.2.1.1. Morphologie

La morphologie (du grec μορφή morphé, « forme » et -logie, « discours ») est la science de la structure ou science descriptive de la forme externe d'un être indépendamment de sa fonction (24). En dépit de la grande diversité entre structure et fonction dans la phylogénie des mammifères, la morphologie apparaît comme un des prédicateurs les plus fiables reliant, selon des lois d'échelle, ces éléments clés les uns aux autres. La morphologie n'est pas seulement l'étude des structures matérielles, elle s'intéresse aussi à son aspect dynamique, en termes de force et d'échanges énergétiques (24). La morphologie est donc liée à la fois à la physiologie et à la biomécanique de l'humain en mouvement. Ainsi les masses, les leviers et les forces sont « la pierre angulaire du mouvement humain » (25,26). Leur quantification est aussi le « fondement de la construction d'une connaissance plus complète de la performance humaine » (25,26).

#### 2.2.1.2. Caractéristiques biométriques

La biométrie ou « mesure du vivant », désigne l'étude quantitative des êtres vivants. Traditionnellement, elle repose sur le principe de la reconnaissance de caractéristiques physiques, avec l'utilisation des empreintes digitales, de l'iris, la rétine, la main ou des empreintes vocales afin d'offrir une preuve irréfutable de l'identité d'une personne. Parmi ces nombreux domaines d'application, on retrouve l'analyse morphologique, celle sur laquelle nous nous focaliserons lorsque nous parlerons de biométrie.

#### 2.2.1.3. Caractéristiques anthropométriques

L'anthropométrie, du grec «anthrôpos», l'homme, et «metron», est l'étude des proportions du corps humain ou des particularités dimensionnelles de l'homme.

La quantification des gabarits, l'un des indicateurs de l'anthropométrie, permet en recensant la structure des corps des athlètes de haut niveau de révéler des profils spécifiques adaptés à certains sports ou disciplines.

#### 2.2.1.4. Caractéristiques kinanthropométriques

La kinanthropométrie est l'étude de la dimension humaine, la forme, la proportion, la composition et la fonction motrice brute, afin de comprendre la croissance, la performance physique et la maturation (27,28). Elle est l'interface entre l'anatomie humaine et le mouvement.

#### 2.2.1.5. Nomenclatures et conclusion

Nous retiendrons le terme morphologie dans son acception science de descriptive de la structure. Lorsque nous parlerons de biométrie, seront pris en compte les aspects non pas de mesure d'empreintes digitales ou de l'iris, mais les aspects essentiellement morphologiques. Nous parlerons principalement de caractéristiques anthropométriques dans le sens de la mesure de la structure des corps. Le terme anthropométrie, à l'instar des anglo-saxons, est approprié à nos travaux. Pour ces derniers, « *morphology* », en termes de recherche dans le sport, est très souvent relié aux études sur les blessures. Ce terme revêt l'aspect dynamique, d'échanges énergétiques. Il se trouve dans leur interprétation, bien plus que dans la nôtre, lié à la fois à la physiologie et la biomécanique de l'humain. Pour eux « *morphology* » n'est pas un synonyme d'« *anthropometry* », c'est pourquoi nous parlerons ici de morphologie dans son aspect descriptif de la structure.

## 2.2.2. Evolutions

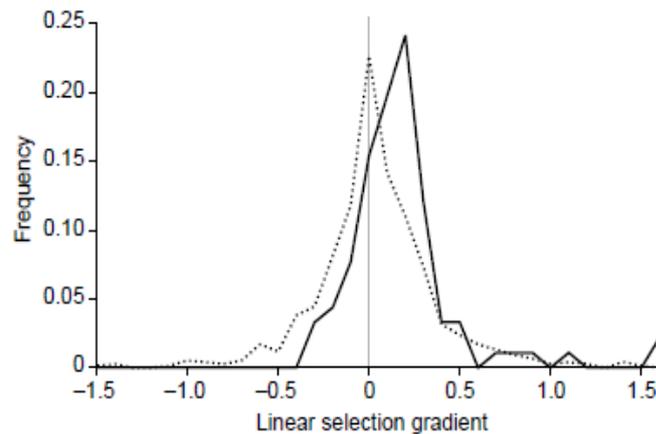
### 2.2.2.1. Tendance séculaire

Le terme tendance séculaire désigne les changements anthropométriques de générations successives de populations humaines vivant dans les mêmes territoires (29). Le phénotype d'un individu par sa forme, sa masse et sa composition corporelle est le fruit d'interactions entre facteurs génétiques et environnementaux. Ces évolutions sont principalement de l'ordre allométrique, c'est-à-dire que les traits phénotypiques évoluent en relation les uns par rapport aux autres. L'apport des études épidémiologiques sur la croissance morphologique des populations est éclairant non seulement pour comprendre ce à quoi nous sommes confrontés mais aussi afin de situer les SHN dans leur contexte évolutif.

### 2.2.2.2. Les évolutions vers de plus imposants gabarits : la loi de Cope

La loi de Cope est la tendance des lignées évolutives à augmenter leur corpulence au fil du temps en situation peu contrainte (30). Un plus grand gabarit devrait fournir de meilleures aptitudes. Une augmentation de taille corporelle est censée véhiculer de nombreux avantages sélectifs sur un organisme, mais elle présente aussi de nouveaux problèmes (31). L'application de la loi de Cope sous-entend que les bénéfices doivent surpasser les problèmes. Il a été montré que cette loi régit l'évolution de divers groupes de mammifères (32,33).

Kingsolver et al (34) ont utilisé une base de données compilées des études de sélection phénotypique (854 traits dont 91 morphologiques, de 39 espèces différentes issues de 42 études, portant sur des vertébrés, invertébrés et des plantes) afin de comparer la force de la sélection de la taille corporelle et d'autres traits morphologiques au sein de populations naturelles. Les gradients de sélection ont été tracés selon les corpulences et leurs effets sur «les aptitudes générales» de survie (fécondité et reproduction) couvrant ainsi les effets de taille et d'autres caractéristiques sur la sélection naturelle et la sélection sexuelle. Les résultats sont intéressants puisque l'augmentation de la taille produit une nette augmentation de survie, de fécondité et reproduction, alors que d'autres traits s'avèrent neutres (*Figure 1 et 2*).

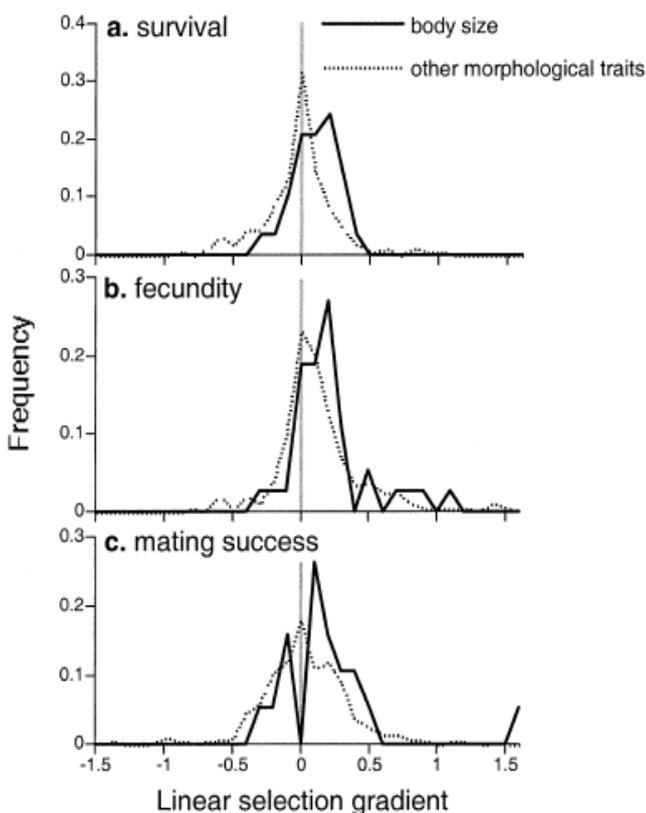


**Figure 1.** La distribution des gradients de sélection pour les gabarits (trait plein) et d'autres traits morphologiques (ligne en pointillés). La taille corporelle est un résultat positif, alors que les autres traits fournissent des effets de sélection neutres. Reproduit à partir de l'étude Kingsolver et al (34).

Pour la taille, plus de 79% des estimations de sélection dépassent zéro, alors que pour d'autres traits morphologiques, les valeurs sont similaires en fréquence. L'avantage sélectif de l'augmentation de

taille se produit pour les traits impliqués à la fois dans la sélection naturelle (survie) et la sélection sexuelle (reproduction et fécondité). Ce modèle qualitatif de sélection selon la corpulence vaut aussi pour les différents groupes taxonomiques (invertébrés, plantes et vertébrés).

Cependant, des contraintes au niveau des espèces ou des générations peuvent empêcher les fortes augmentations de taille à court terme prévues par ces résultats. D'autres contraintes morphologiques peuvent être limitantes par rapport à la taille actuelle: une girafe pourrait ne pas être en mesure de croître plus, en raison des limites de pression artérielle nécessaire à la vascularisation cérébrale au travers d'un cou plus long.



**Figure 2 :** Fréquence de distribution des gradients de sélection selon les corpulences et leurs effets sur «les aptitudes générales» de survie, fécondité et reproduction. Reproduit à partir de l'étude Kingsolver et al (34).

Un oiseau ne peut dépasser une certaine masse, au-delà de laquelle il ne peut plus voler. Nous sommes ici dans un problème d'optimisation. Par ailleurs la question de recouvrement des niches, stipule que la plupart des organismes sont limités écologiquement à un morphospace de dimension  $n$ , entouré de tous côtés par les morphospaces d'autres espèces. Si un organisme devient trop grand, il empiète sur les morphospaces d'autres espèces, ce qui conduit à une concurrence accrue (35).

Nos travaux tenteront d'observer les évolutions anthropométriques des SHN et d'observer si ces tendances morphologiques sont bénéfiques à la performance.

### 2.2.2.3. Population générale

Les augmentations de taille et de poids de la population générale de ces 150 à 200 dernières années sont bien documentées (13,36–41). La population des pays occidentaux et européens a vu sa taille et son poids augmenter au cours du dernier siècle (14).

#### 2.2.2.3.1. *Taille*

Traditionnellement, la taille moyenne des populations était utilisée comme un guide du statut nutritionnel et de la santé des populations. Les économistes et les autorités de santé publique ont vu qu'une plus grande taille était le reflet d'une meilleure nutrition et de conditions de santé publique plus favorables (37,42). Durant le siècle dernier, le taux de croissance a avoisiné les 2,54 cm (1 pouce) par génération (43), une tendance à l'augmentation également observée chez les entrants en collège et à l'université (44).

Palmer (45), dans une déclaration générale couvrant à la fois la taille et le poids, montre que « *dans la plupart des pays civilisés, aujourd'hui les jeunes adultes sont, en moyenne, près d'un pouce plus grand que leurs homologues des trente à cinquante dernières années* ». Boas (46), synthétisant la recherche européenne sur la stature, déclare que dans presque tous les pays d'Europe, les tailles moyennes ont augmenté de plus d'un pouce. Entre 1871 et 1980 l'augmentation de taille moyenne des européens fut de 1,08 cm par décennie (14). Données en parfait accord avec d'autres études (47–49) qui soulignent que durant les 100 dernières années, une tendance mondiale vers une augmentation de la taille et une maturation plus précoce est observée. Par exemple, au cours du

dernier siècle en Australie, Norvège, au Canada, Japon, et aux États-Unis fut observée une augmentation séculaire de la taille moyenne, avec, pour une période de 90 ans, des augmentations des enfants blancs de 14 ans, 17 ans et jeunes adultes de 14,8 cm, 8,8 cm, et 5,3 cm respectivement (50). Les Japonais ont également majoré leur taille depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale d'environ 12,7 cm (51).

Ces augmentations peuvent trouver une réponse à partir du concept de statut nutritionnel (13). Celui de la mère détermine celui de l'enfant à la naissance ; si l'enfant est confronté à un environnement favorable fournissant les apports nécessaires, il atteindra sa taille optimale (maximale). Si l'on s'inscrit dans l'hypothèse du statut nutritionnel, la transmission de conditions nutritionnelles optimales de génération en génération pourrait avoir permis l'expression de la taille optimale de chacun et par conséquent celles des athlètes de haut niveau puisqu'ils sont issus de et sélectionnés parmi la population générale.

#### 2.2.2.3.2. Poids

Aux États-Unis, depuis 1900 chaque nouvelle génération présente un poids moyen supérieur de 4,5 kg à la précédente. Kuczmariski et al (52) constatent entre 1976-80 et 1988-91 des augmentations de poids moyen pour les hommes et les femmes de 3,6 kg.

La croissance séculaire concernant le poids a également été observée en Europe depuis environ 150 ans (53). Constat étayé vis à vis du poids à la naissance qui a augmenté lors des 100 dernières années ainsi que le pourcentage d'enfants macrosomiques (poids à la naissance > 4000 grammes) (54). Dans ce cas, il convient de considérer que le poids à la naissance est fortement corrélé au poids à l'âge adulte (55,56). De plus, puisque poids et taille sont régis par des croissances allométriques, de petites augmentations de taille peuvent produire de plus grandes prises de poids. Une augmentation de 10% de la taille engendre une prise de l'ordre de 33% de poids pour des organismes géométriquement similaires (51).

Même s'il s'avère difficile de généraliser à travers différentes données démographiques, les augmentations séculaires d'environ 1 kg par décennie sont assez représentatives des tendances des pays développés au cours du XXe siècle (50,57). Un des révélateurs de ces prises conséquentes de poids est généralement exprimé à travers les mesures de prévalence du surpoids ou de l'obésité au sein des nations.

### 2.2.2.3.3. IMC

Dans une étude du *Lancet* analysant 960 années-pays et 9,1 millions de participants, Finucane et al (58) ont estimé les tendances mondiales concernant l'IMC des populations. Ils en concluent que l'IMC moyen a augmenté depuis 1980 et que l'excès de poids est un problème majeur de santé publique. Entre 1980 et 2008, l'IMC moyen dans le monde a augmenté de 0,4 kg.m<sup>-2</sup> par décennie pour les hommes et 0,5 kg.m<sup>-2</sup> par décennie pour les femmes. En 2008, ces auteurs estiment à 1,46 milliard le nombre d'adultes (1,41-1,51 milliards) à travers le monde ayant un IMC de 25 kg.m<sup>-2</sup> ou plus. Parmi eux, 205 millions d'hommes (193 à 217 millions) et 297 millions de femmes (280-315 millions d'euros) sont obèses. Dans les pays à revenus élevés, les américains sont ceux qui ont connu la plus grande augmentation d'IMC avec 1,1 kg.m<sup>-2</sup> par décennie, suivis par le Royaume-Uni (1,0 kg.m<sup>-2</sup> par décennie), et l'Australie (0,9 kg.m<sup>-2</sup> par décennie), puis viennent les suisses, italiens et français, avec des hausses allant de 0,3 à 0,4 kg.m<sup>-2</sup> par décennie. Dans le monde, en 2008, la prévalence standardisée selon l'âge de l'obésité est de 9,8% chez les hommes et de 13,8% chez les femmes, alors qu'elle n'était en 1980 que de 4,8% pour les hommes et 7.9 % pour les femmes.

Ces données d'augmentation d'IMC sont amplement étayées notamment dans la population américaine (52,59). En 2009-2010, 37,5% de cette dernière était obèse (60), alors qu'ils n'étaient que 30,5% en 1999-2000 et 22,9% dans *The National Health and Nutrition Examination Surveys* (NHANES) III de 1988-1994 (61). La prévalence du surpoids a également augmenté durant cette dernière période de 55,9% à 64,5%. Ces augmentations majeures d'IMC sont constatées dans tous les groupes d'âge masculins et féminins (62). Cependant ces augmentations de prévalence de l'obésité observée précédemment ne se poursuivent pas au même rythme au cours des 10 dernières années, en particulier pour les femmes.

Dans la plupart des cas, la prévalence de l'obésité est apparue plus faible dans les pays européens qu'aux États-Unis. Toutefois, les estimations provenant d'autres pays ne sont pas exactement comparables à celles des États-Unis en raison de différences dans les méthodes utilisées, les années de mesure ou les tranches d'âge, ainsi que les méthodes d'ajustement sur l'âge ou les catégorisations. En Europe, dans le milieu des années 1980, 17% des femmes et 15% des hommes présentaient un IMC supérieur à 30 kg.m<sup>-2</sup> (63). Le taux d'obésité a augmenté d'approximativement

30% lors des 10-15 dernières années (64), avec parfois des augmentations notables dès les années 50 (15% d'augmentation du taux d'obésité au Royaume-Uni entre 1943 et 1965)(65).

Dans « *The weight of nations : an estimation of adult human biomass* », Wapole et al (66) développent une approche originale quant à ces majorations. En effet, les populations humaines sont souvent appréhendées par l'estimation de leur nombre, mais peu d'études ajoutent à l'équation la masse des individus. Ces auteurs (66) estiment la biomasse humaine mondiale, sa répartition par région et sa proportion engendrée par la surcharge pondérale et l'obésité (en considérant la biomasse totale comme le produit du nombre d'individus adultes par leur poids moyen). En 2005, la biomasse humaine était d'environ 287 millions de tonnes, dont 15 millions de tonnes dues au surpoids (IMC > 25 kg.m<sup>-2</sup>) et 3,5 millions de tonnes à l'obésité. L'Amérique du Nord représentant 6% de la population mondiale, constitue 34% de la biomasse due à l'obésité, alors que l'Asie et ses 61% de la population mondiale, ne représente que 13% de la biomasse due à l'obésité. Ces données sont éclairantes dans le sens où l'augmentation de la masse de la population n'est pas sans conséquence, qu'elle soit individuelle ou populationnelle. Car non seulement la planète accueille de plus en plus d'individus mais ces derniers s'inscrivent aussi dans une majoration morphologique (58). Dans leur article, Walpole et al (66) estiment que l'énergie nécessaire pour maintenir la biomasse des personnes obèses correspond aux besoins énergétiques de 24 millions d'adultes de masse corporelle moyenne et celle nécessaire à maintenir la biomasse des individus en surpoids correspond aux besoins énergétiques de 111 millions d'adultes d'IMC normal. Ces résultats soulignent la nécessité de prendre en compte « *l'expansion morphologique* » lorsque l'on considère les conséquences écologiques de la croissance démographique.

#### 2.2.2.4. Conclusion

Les tendances séculaires démontrent des augmentations de taille, de poids et d'IMC au cours du siècle dernier (67–69). Ces tendances se sont accélérées lors des 40 dernières années mais leur taux de croissance a ralenti depuis 10 ans.

### 2.2.3. Caractéristiques morphologiques et conséquences

La taille d'un organisme influe sur un grand nombre d'aspects, de sa biologie à sa physiologie en passant par son évolution (13,70).

#### 2.2.3.1. Caractéristiques morphologiques et caractéristiques physiologiques

Il y a déjà longtemps Archimède avait observé des augmentations de taille en rapport au poids différentes chez les animaux. Depuis, l'augmentation cubique du poids au regard de la taille apparaît dans de nombreux articles (71,72). Lorsque l'on mesure les évolutions d'échelle, deux termes sont impliqués, les changements allométriques et isométriques. Les caractéristiques corporelles, comme la taille, le poids, la surface corporelle augmentent avec des pourcentages différents les uns par rapport aux autres. Ainsi 20% d'augmentation de la taille résulte en environ 70 % d'augmentation de poids (51). Par contre des changements isométriques impliquent des augmentations égales et proportionnelles des différentes parties du corps ou organes.

De plus, la diversité biologique est aussi une question d'anthropométrie (71). La morphologie d'un individu affecte de nombreuses structures et processus biologiques du métabolisme cellulaire à la dynamique des populations (31,70). En effet, la dépendance d'une variable biologique Y à la masse M du corps est généralement caractérisée par une loi d'échelle allométrique de la forme:

$$Y = Y_0 M^b \quad [1]$$

où b est l'exposant de la mise à l'échelle et  $Y_0$  une constante, caractéristique du type d'organisme. Si ces relations reflètent des contraintes géométriques, alors b doit être un multiple simple d'un tiers ou d'un quart. Par exemple, les besoins métaboliques d'un animal ne sont pas proportionnels à sa masse mais à sa masse à la puissance  $\frac{3}{4}$  (71,72). Un éléphant de 10 tonnes est  $10^4$  (10 000) fois plus lourd qu'un lapin d'un kilo mais ses besoins énergétiques ne sont que  $10^3$  (1000) fois plus élevés (71). La plupart des échelles entre phénomènes biologiques et masse corporelle se relie à la puissance selon l'expression d'un quart (puissance  $\frac{1}{4}$  à  $\frac{3}{4}$ ) (31,70). Par exemple, les taux métaboliques B de l'ensemble des organismes sont liés par une loi d'échelle  $M^{3/4}$ ; le métabolisme cellulaire, les battements cardiaques, et la croissance maximale de la population de l'ordre  $M^{1/4}$ , tout comme la croissance et le développement embryonnaire. Il en est de même pour les tailles biologiques des

structures : les sections transversales (cross-sectional area) de l'aorte des mammifères ainsi que l'arborescence des troncs s'expriment selon l'échelle  $M^{3/4}$ . Parce que les organismes de différentes tailles corporelles ont des exigences différentes en matière de ressources et opèrent à différentes échelles spatiales et temporelles, l'échelle allométrique  $1/4$  est sans doute l'organisation la plus répandue de la diversité biologique (71).

Prenons l'exemple de deux adultes géométriquement similaires, l'un pesant 70 et l'autre 105 kg. Ce dernier est 50% plus lourd mais il présente une surface corporelle supérieure de 31% (1,72 vs 2,25 m<sup>2</sup>). Cette plus petite différence de surface corporelle s'explique par la relation masse exposant pour la surface corporelle qui est de 2/3. Maintenant, si la surface corporelle est exprimée de manière relative (1.72 m<sup>2</sup> /70 kg et 2.25 m<sup>2</sup> /105 kg), le plus petit individu présente une plus grande surface corporelle relative (0.025 vs 0.021) (73). Une plus grande surface corporelle relative engendre des conséquences physiologiques importantes comme une perte de chaleur plus rapide.

#### **2.2.4. Taille**

##### **2.2.4.1. Taille et performance**

Avant d'étudier les relations entre taille et performances sportives, il semble cohérent de s'intéresser aux liens entre cette dernière et la performance dans son acception générale.

Selon Samaras et al (51), la taille à l'âge adulte expliquerait plus de 60% des traits liés au métabolisme. Au regard des relations allométriques, le fait d'être plus grand confère des bénéfices, notamment vis-à-vis de la force et de la capacité de travail physique.

En effet, les cohortes de personnes de grande taille présentent en moyenne une force maximale plus grande. Une personne 20% plus grande qu'une autre mais avec les mêmes proportions corporelles sera plus forte d'environ 40% (51). Cependant de nombreux facteurs peuvent altérer cette idée, puisque la force est affectée par l'entraînement, la génétique, la nutrition ou encore l'âge.

D'un autre côté, les hommes plus petits bénéficient d'un meilleur temps de réaction et d'une meilleure accélération et d'une plus grande consommation maximale d'oxygène par unité de poids pouvant permettre une meilleure endurance (51). En effet le délai de réponse dépend de la longueur

du corps et plus particulièrement des membres inférieurs (74). Ainsi les individus plus petits ont la capacité de réagir plus vite. Ce phénomène lié à la distance axonale à parcourir facilite l'accélération des individus les plus petits.

L'endurance entendue comme aptitude à maintenir un effort pendant une durée prolongée, dépend des capacités pulmonaires, cardiaques et vasculaires à maintenir un flux adapté d'oxygène vers les muscles pendant un temps prolongé. Diverses tentatives ont été faites pour déterminer la relation entre les dimensions du corps, la force musculaire et la puissance aérobie. Les analyses théoriques en général ont suggéré une relation à la Taille<sup>2</sup> ou Masse<sup>2/3</sup>, mais les observations empiriques sur la période de croissance ont laissé entendre que la puissance aérobie augmente approximativement comme une fonction cubique de la stature (27) (relation aux capacités pulmonaires).

Par contre, la relation avec la **consommation maximale d'oxygène** (VO<sub>2</sub>max), ou VO<sub>2</sub>max relative est différente. La VO<sub>2</sub>max représente le débit maximal d'oxygène que les muscles peuvent utiliser par unité de temps. Pour un individu dont la VO<sub>2</sub>max absolue est stable, lorsque son poids diminue, sa VO<sub>2</sub>max relative augmente.

Elle est régie par l'équation de Fick :

$$VO_2\max = (FC\max \times VES\max) \times (CaO_2 - CvO_2) \quad [2]$$

*FCmax= fréquence cardiaque maximale ; VESmax= volume d'éjection systolique maximal (VES=volume sanguin éjecté à chaque battement cardiaque) ; CaO<sub>2</sub>-CvO<sub>2</sub>=différence de concentration en oxygène entre le sang artériel et le sang veineux ou différence artéri- veineuse.*

et donc dépendante de l'éjection du sang par le cœur à chaque battement et du système de diffusion au sein de l'organisme. Le rapport est maintenu entre le volume du réseau vasculaire (proportionnelle à la masse), le nombre de capillaires (proportionnel à la vitesse du métabolisme) (71) et la capacité maximale d'éjection du cœur. Par conséquent, le maximum d'oxygène fourni aux tissus par unité de masse et par unité de temps est plus faible pour une personne plus grande. Chaque contraction du ventricule gauche éjecte un volume de sang proportionnel à la masse corporelle. Ce plus faible taux de pompage chez les grands signifie que lors des activités d'endurance, comme le marathon, moins d'oxygène est disponible par unité de temps et de masse (51). Les

personnes plus petites peuvent courir de grandes distances plus rapidement car elles peuvent fournir plus d'énergie par minute à leurs muscles et maintenir un rythme de course plus élevé.

Une analyse sur des jeunes footballeurs confirme de plus basses consommations maximales d'oxygène chez les athlètes les plus grands comparés aux plus petits (75).

#### 2.2.4.2. Taille et santé

Au-delà des liens entre taille et performance, nous devons connaître les relations entre taille et indicateurs de santé. Ces relations peuvent éclairer notre compréhension du phénotype, son optimisation et ses adaptations aux contraintes environnementales.

La partie suivante présente les relations entre taille et maladies chroniques, cardiovasculaires, cancers, la mortalité et la longévité. Des milliers d'études ont été publiées sur les relations anthropométrie-santé. La plupart d'entre elles se sont focalisées sur l'incidence et la mortalité des maladies chroniques en relation avec le poids, la taille et l'IMC.

L'activité physique, le statut socio-économique, l'IMC, la nutrition, le tabac, le stress émotionnel et social, la qualité des soins médicaux, l'éducation, sont autant de variables qui doivent être ajustées afin de fournir des conclusions non biaisées.

#### 2.2.4.3. Taille et mortalité toutes causes

##### 2.2.4.3.1. *Etudes favorables aux plus grands*

En général, ces études montrent des réductions faibles à modérées des risques de mortalité toutes causes avec l'augmentation de la taille.

Des études de suivi regroupant des millions de participants trouvent des corrélations inverses entre mortalité toutes causes et taille à la fois chez les hommes et les femmes (76–78). Dans les réserves connexes à ces études, un potentiel problème est l'ajustement par rapport aux facteurs de risques. Les hommes de petite taille sont par exemple plus souvent représentés dans les travaux manuels, avec un plus haut risque de maladie cardiaque, de tabagisme, d'obésité ou d'alcoolisme (79). Un autre problème est celui de la tendance séculaire à l'augmentation de la taille et de l'espérance de

vie (à peu près 2,5 ans par décennie) : si une cohorte de taille plus grande naît 10 ans après une cohorte plus petite, elle tire bénéfice de cette tendance. De plus, les ajustements par rapport aux nombreux facteurs de risques sont des procédures imprécises (80) : tous les facteurs confondant ne peuvent être identifiés, ce qui oblige à relativiser les conclusions de ces études.

#### *2.2.4.3.2. Etudes favorables aux plus petits*

Une trentaine d'études trouvent une corrélation négative entre taille et mortalité toutes causes, Wild et al (81) ont étudié la mortalité d'1 million de californiens d'origines ethniques différentes, de 25 à 84 ans. Samaras et al (51) ont recueilli les tailles correspondantes et montré l'augmentation de la mortalité toutes causes avec la taille. Données corroborées par Van Heemst et al (82) et Rebecca Sear, dans sa communication : « *A life history perspective on size, health and adult mortality in the Gambia* » (83). Cette communication, ainsi que l'étude de Hosegood et Campbell (84) mettent en exergue un intervalle dans lequel la mortalité est la plus faible ; au-delà de cet intervalle (taille plus grande ou plus petite), la mortalité augmente

#### *2.2.4.3.3. Conclusion*

Les individus les plus petits auraient ainsi une mortalité toute cause plus faible. Or différents problèmes émergent. Des études représentatives de la population, englobant selon une distribution normale tous les individus n'existent pas. Dans chaque cas, la vision est parcelaire et non globale. Les outliers (les individus de taille extrême) ne sont pas ou trop peu représentés. C'est pourquoi les relations linéaires simples ne sont pas en mesure de décrire précisément les relations taille-mortalité. Il semblerait plus logique d'évaluer ces relations selon des fonctions permettant de révéler des intervalles optimaux.

#### 2.2.4.4. Taille et cancer

Une revue de Gunnell et al (85), sur plus de 300 études, relate que les gens les plus grands ont une augmentation de la mortalité par cancer de 20 à 60%. Ces auteurs concluent que la taille n'est pas une cause de cancer mais un biomarqueur d'une exposition non identifiée.

En effet, sur plus de 700 000 femmes, celles de plus d'1m60, 1m67 et 1m70 comparées à celles de moins d'1m56 et 1m60 augmentent leurs risque de cancer du sein de près de 30% (86–88). Les études démontrant des risques accrus avec l'augmentation de taille existent pour le cancer du pancréas (89), du colon (90), du rein (augmentation du risque relatif de 19% pour une taille supérieure de 10 cm) (91), de la prostate (92), des ovaires (93). Les études dans ce dernier exemple, réalisées sur 1,1 million de norvégiennes suivies pendant 25 ans, montrent que le risque augmente de 98% pour les femmes de taille inférieure à 150 cm et de 129% pour une taille supérieure à 175 cm comparée aux femmes de taille comprise entre 150cm et 175cm(94). Nous retrouvons ici la notion « d'intervalle de protection » où le risque est minimal au centre de l'intervalle et augmente avec les tailles extrêmes, grandes ou petites.

Mais dans ce type d'étude des ajustements doivent être réalisés par rapport à l'IMC. Giovannucci et al (95) ont évalué le risque global de cancer chez 47 690 hommes sur 12 ans. Les résultats indiquent que les hommes de plus d'1m83 ont une augmentation significative du risque de 82% par rapport aux hommes de moins d'1m68. Ce risque diminue à 74% quand il est ajusté au tabac, à l'alcool et à l'IMC.

#### 2.2.4.5. Taille et maladies cardio-vasculaires

Les maladies cardio-vasculaires (MCV) peuvent être causées par de nombreux facteurs, dont les principaux sont le tabagisme, l'hypertension artérielle, l'hypercholestérolémie ou la sédentarité.

##### 2.2.4.5.1. *Etudes favorables aux plus grands*

Près de 40 articles ont montré une relation négative entre taille et morbidité-mortalité cardio-vasculaire : les plus grands sujets présentent moins de MCV. Les plages de risque de maladie

cardiaque, de coronaropathie, d'ischémie et d'AVC vont de 1 à 32% en plus pour les personnes de petite taille (19% en moyenne) selon les écarts de centimètres entre les groupes comparés (78,79,96–100).

#### *2.2.4.5.2. Etudes favorables aux plus petits*

A l'opposé, près de 90 études ont trouvé des évidences entre plus petite taille et plus faible taux de MCV (101–108).

Ces données comme les précédentes sont à interpréter avec précautions compte tenu des nombreux facteurs confondants et du manque d'études dont la population est représentative de toutes les tailles.

##### *2.2.4.5.2.1. Similarité féminine*

De même, deux études ont montré que les femmes plus petites présentaient moins de MCV et d'ischémies que leurs homologues de plus grande taille (109,110). L'étude de Parker et al, impliquant 3741 femmes de plus de 35 ans, suivies pendant 11 ans, a montré un risque plus faible pour celles se situant entre 152,6 et 159,4 cm. Elles présentaient un risque ajusté de mortalité de 0,59 alors que les femmes de plus de 163,8 cm présentaient un risque relatif de 1,18 et celles de moins de 152,4 cm un risque de 1, suggérant un intervalle de protection.

#### *2.2.4.5.3. Conclusion*

Certaines études n'ajustent pas leurs résultats en fonction des facteurs de risques tels que l'IMC, l'activité physique, la nutrition ou le statut socio-économique. En prenant en compte ces ajustements, les individus plus petits présenteraient moins de risques de MCV (études et participants plus nombreux). Ces études doivent être interprétées avec prudence compte tenu du contexte évolutif dans lequel elles sont réalisées.

#### 2.2.4.6. Conclusions

Si une synthèse devait être faite des liens démontrés entre taille et santé, à la première lecture, la balance pourrait pencher en faveur des individus de plus petite taille. Or le problème majeur de ces études tient au fait que les individus de tailles extrêmes ne sont pas, ou trop peu, représentés.

Cependant, des études contradictoires existent et il semble très compliqué de prendre en compte les nombreux facteurs de risques impactant ces relations (IMC, AP, Nutrition, statut socio-économique...). Une fois ce premier frein levé, les études existantes se doivent d'être interprétées avec prudence compte tenu du contexte évolutif dans lequel elles ont réalisées et des relations allométriques qui unissent taille et masse. Dans cette situation s'affranchir des autres facteurs impactant ces relations afin d'observer l'impact de la taille seule semble un but difficilement accessible. De plus, établir des comparaisons entre morbidité, mortalité et taille aussi simples que « les plus petits » vs « les plus grands » ne peut révéler les liens complexes qui unissent taille et santé dans son acception générale. Cependant, certaines études font émerger la notion d'intervalle optimal, où les risques augmentent avec les valeurs s'écartant de cet intervalle rappelant les relations en U. Il semblerait plus cohérent de retenir ce type de relation en U afin de décrire les liens précédents.

#### 2.2.5. Poids

##### 2.2.5.1. Poids et mortalité

La plupart des études concernant la mortalité tente de la relier avec la taille ou l'IMC. Seul un petit nombre d'études s'intéresse au poids uniquement. Une revue de Samaras et al (111) sur les liens entre poids et mortalité montre une corrélation positive. D'un autre côté, les études de suivi de cohortes comme la Framingham Heart Study, l'American Cancer Society Study ou celles basées sur les données d'assurance vie, indiquent qu'en dessous d'un certain poids la longévité augmente, si toutefois ce poids n'est pas associé à une maladie ou à des antécédents historiques préjudiciables en terme de santé. Cependant, les personnes en surpoids ont tendance à mourir plus tôt surtout dans les cas de surcharge pondérale dès le plus jeune âge. C'est pourquoi le terme de « poids idéal » a été

utilisé puis remplacé par « poids désirable » en conséquence de relations en U observées entre poids et mortalité (112).

#### 2.2.5.2. Facteurs physiologiques et prise de poids

Alors qu'une majorité des études montre une relation en U entre IMC et mortalité, il est important de noter que de nombreuses études évaluent les paramètres spécifiques en relation avec la prise de poids. Par exemple, certains auteurs (113,114) relatent que l'augmentation du poids corporel notamment de la graisse abdominale promeut des changements physiologiques indésirables tels que l'augmentation :

- de l'hypertension artérielle
- des ischémies coronaires
- de maladies cardiaques
- du risque de certains cancers
- du diabète de type 2
- des calculs biliaires, d'insuffisance rénale, d'apnée du sommeil...

Une étude du *Lancet* (115) a également montré que l'obésité accélérerait le vieillissement par un raccourcissement plus rapide des télomères.

Dans les études se focalisant sur le poids, Anderson et al (116) rapportent qu'une augmentation de 5kg chez les hommes est associée à une augmentation de près de 30% du risque de maladie cardiaque. Ils trouvent que 60 à 90% des cas de diabètes de type 2 pourraient être liés à de fortes prises de poids. En effet, le surpoids et l'obésité sont étroitement associés à une variété de maladies chroniques, causant près de 300 000 décès chaque année, et 117 milliards de dollars en coûts annuels directs et indirects aux États-Unis (114).

### 2.2.6. IMC

Ce chapitre fournit une synthèse d'un grand nombre de résultats sur l'impact de l'IMC sur les maladies chroniques, la mortalité et la longévité. Depuis quelques décennies, une augmentation dramatique de la prévalence de l'obésité s'observe dans de nombreux pays (117), notamment en Europe (64) ou encore en Chine où la prévalence de l'obésité a doublé en 10 ans (118). Ce constat épidémiologique n'est pas sans conséquence. Des preuves substantielles soutiennent une association positive entre excès d'adiposité et risque de décès. L'obésité est un facteur de risque bien établi pour de nombreuses maladies chroniques (119,120). En effet, le tissu adipeux est de plus en plus reconnu comme un organe endocrinien actif, capable de libérer un grand nombre de cytokines et de médiateurs qui jouent un rôle important dans la pathogenèse de nombreuses maladies liées à l'obésité (121).

#### 2.2.6.1. Augmentation de l'IMC et diabète

Anderson et al (116) rapportent qu'un IMC trop élevé est associé à des augmentations indésirables de certains paramètres physiologiques pouvant favoriser le diabète de type 2 qui prend des allures épidémiques chez les américains. Nagaya et al (122) ont évalué le risque de diabète sur 25 000 hommes et femmes japonais(e)s sains entre 30 et 59 ans lors d'un suivi de plus de 7 ans. Ils montrent que le risque de diabète de type 2, dans une population non obèse, augmente de 25% pour chaque augmentation d'un point d'IMC, au dessus de  $23 \text{ kg.m}^{-2}$ .

#### 2.2.6.2. Augmentation de l'IMC et MCV

Les maladies cardiovasculaires sont reliées à de nombreux facteurs tels qu'une haute pression artérielle, une hyper-cholestérolémie, un faible taux de HDL, un taux élevé de protéine réactive C, d'insuline, de créatine, de fibrinogène ou de diabète (123,124). Tous ces facteurs sont reliés à l'IMC, et nombre de ces derniers augmentent linéairement avec cet indicateur (125). Une étude (126) portant sur 6452 hommes sains de 40 à 59 ans sur 20 ans s'est intéressée à trois facteurs de risque : le tabagisme, l'inactivité physique et l'IMC. Durant la période d'étude, les auteurs concluent que la plus faible occurrence de MCV se trouve vers un optimum de  $21 \text{ kg.m}^{-2}$ . De même Shaper et al (127)

ont pu montrer pour les 7735 hommes de 40 à 59 ans suivis durant 15 ans, une relation significative entre l'IMC et la mortalité CV, avec le plus faible risque se présentant pour un optimum de 22 kg.m<sup>-2</sup>.

Une focale sur les sportifs a été réalisée par l'Institut National de la Sécurité et de la Santé au Travail NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) qui a conduit une étude (128), sur 6848 joueurs de football retraités. Cette dernière a montré que les joueurs les plus imposants, c'est-à-dire les joueurs de ligne, avaient 270% de risques de mortalité CV en plus.

### 2.2.6.3. Augmentation de l'IMC et cancer

#### 2.2.6.3.1. *IMC et cancer du sein*

Dumitrescu et Cotarla (129) ont réalisé une revue de littérature analysant 107 articles consacrés au cancer du sein. Ils ont conclu qu'une augmentation d'IMC post ménopause augmentait le risque de cancer de manière faible à modérée. Une autre étude de 2005 (86), lors d'un suivi de 20 ans sur plus de 430 000 femmes, montre que celles avec les IMC les plus élevés (> 35 kg.m<sup>-2</sup>) ont 74% de risques en plus de développer un cancer du sein par rapport à celles présentant un IMC inférieur à 25 kg.m<sup>-2</sup>. Une autre étude sur 99 717 norvégiennes non ménopausées suivies pendant 7 ans a montré que le risque de cancer est minimal lorsque ces dernières ont un IMC entre 20 et 25 kg.m<sup>-2</sup> (88) ; évoquant à nouveau la notion d' « **intervalle de protection** ».

#### 2.2.6.3.2. *IMC et cancer du colon*

Une étude prospective sur 100 000 japonais(es) âgés de 40 à 79 ans a été conduite sur une période de 10 ans, afin d'évaluer l'impact de l'IMC sur le cancer du colon (90). Les femmes présentant un IMC supérieur à 28 kg.m<sup>-2</sup> (état basal) avaient 3,42 fois plus de risques de développer un cancer du colon que celles dont l'IMC se trouvait dans l'intervalle 20-22 kg.m<sup>-2</sup>.

#### 2.2.6.3.3. *IMC et cancer du rein*

Une étude longitudinale a été réalisée sur 2 millions de norvégien(ne)s examinant l'incidence des carcinomes rénaux sur des individus âgés de 20 à 74 ans suivis pendant 23 ans (91). Des augmentations substantielles du risque ont été observées avec l'augmentation de l'IMC (risque relatif de 1,05 pour chaque incrémentation d'un point d'IMC au-delà de la borne supérieure de l'intervalle de protection).

#### 2.2.6.3.4. *Conclusion : IMC et cancer*

En conclusion, une étude aux Etats-Unis a été réalisée sur la mortalité par tout type de cancer (œsophage, estomac, colorectal, foie, vésicule biliaire, pancréas, prostate, rein, leucémie...) sur 900 000 adultes (130). Elle a montré que les individus les plus lourds de la cohorte (IMC>40) augmentaient leurs risques de mortalité par cancer de 52% pour les hommes et de 62% pour les femmes, comparés à leurs homologues se situant dans l'intervalle considéré comme normal d'IMC.

#### 2.2.6.4. Augmentation de l'IMC et mortalité toute cause

Basé sur les études NHANES (National Health and Nutrition Examination Surveys) I, II et III, Flegal et al (131) ont conduit une large synthèse sur les liens entre mortalité et classes d'IMC. Les résultats indiquent une plus grande mortalité pour les classes les plus basses et obèses.

Tableau 1 : Classes d'IMC et risque de mortalité (issu de Samaras et a (51)).

<b>BMI range (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Mortality Risk</b>
<18.5	1.50
18.5 to < 25	1.00
25 to < 30	0.90
30 to < 35	1.13
≥ 35	1.12

Un suivi de 22 ans sur 2 millions de personnes en Norvège (76) a trouvé une relation en U entre IMC et mortalité toutes causes. Les plus faibles risques encourus se situent entre 21,5 et 22,5 pour les hommes et 23,5 et 25 kg.m<sup>-2</sup> pour les femmes. Les hommes avec un IMC inférieur à 17,5 kg.m<sup>-2</sup> présentaient 2,06 fois plus de risques de mortalité que ceux dans l'intervalle optimal. De l'autre côté

du spectre, les individus avec un IMC supérieur à  $40 \text{ kg.m}^{-2}$  ont 3,3 fois plus de risques de mourir que ceux se situant dans l'intervalle optimal.

Une étude américaine portant sur 467 785 hommes et 588 369 femmes s'est intéressée à la mortalité lors d'un suivi de 14 ans (132). L'IMC avec le plus faible risque de mortalité était entre 23,5 et 24,9 pour les Euro-américains et 22 à 23,4  $\text{kg.m}^{-2}$  pour les Euro-Américaines. Le risque de mortalité pour les hommes était majoré de 26% pour ceux dont l'IMC était inférieur 18,5  $\text{kg.m}^{-2}$  par rapport à ceux se situant dans l'optimum, et de 32% pour ceux de 30 à 32  $\text{kg.m}^{-2}$ . Pour les femmes, le risque augmentait de 36% pour celles dont l'IMC était inférieur à 18,5  $\text{kg.m}^{-2}$  et celles entre 30 et 32  $\text{kg.m}^{-2}$ . Ces résultats confirment des relations en U entre IMC et mortalité sur de larges populations (133).

Une étude symptomatique de ces relations est parue dans le *New England Journal of Medicine* (117). Elle évaluait les associations entre l'IMC et le risque de décès chez 1,1 million de personnes recrutées au sein de 19 cohortes asiatiques. L'analyse a porté sur 120 700 décès intervenus durant le suivi de près de 10 ans. Dans les cohortes d'Asie de l'est, incluant Chine, Japon, Corée, le plus faible risque de mortalité fut observé parmi les personnes dont l'IMC se situait dans l'intervalle 22,6-27,5  $\text{kg.m}^{-2}$ . Une relation en U similaire fut également constatée entre IMC et mortalité par cancer, maladie cardiovasculaire et autres causes (Figure 3).

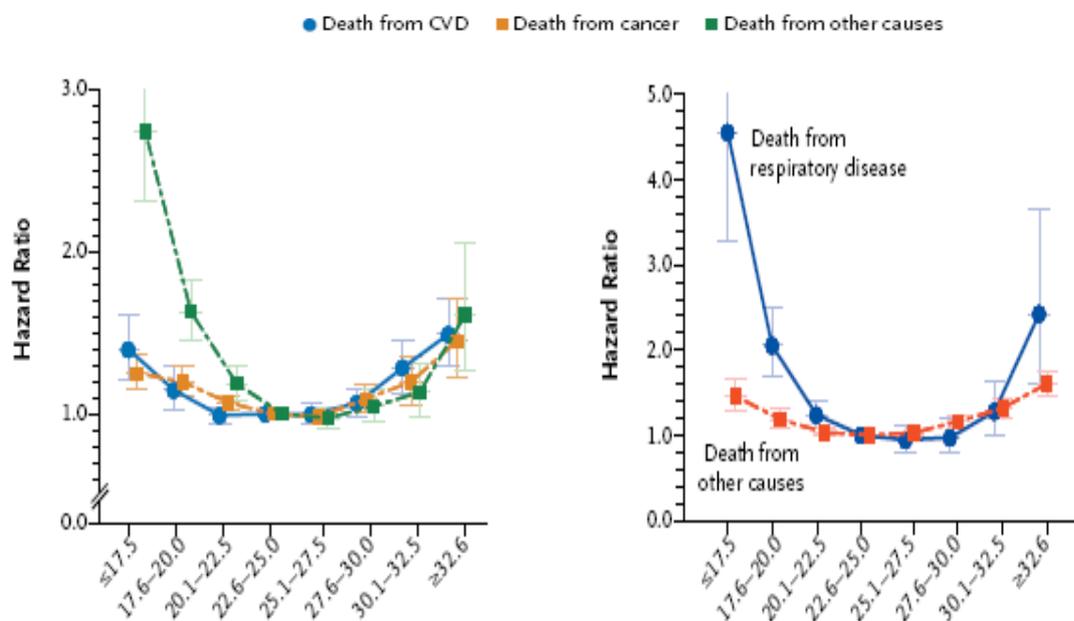


Figure 3: IMC et mortalité (issue de Zhengh et al (117)).

Sur les sportifs, une étude (134), basée sur 3200 décès de joueurs de baseball a montré que la durée de vie diminuait d'un an par unité supplémentaire d'IMC.

D'un point de vue historique, dans le contexte d'expansion morphologique, Fogel (135) a constaté un déplacement récent de l'IMC de la population générale vers une sortie de la zone optimale des courbes d'iso-IMC (figure 4).

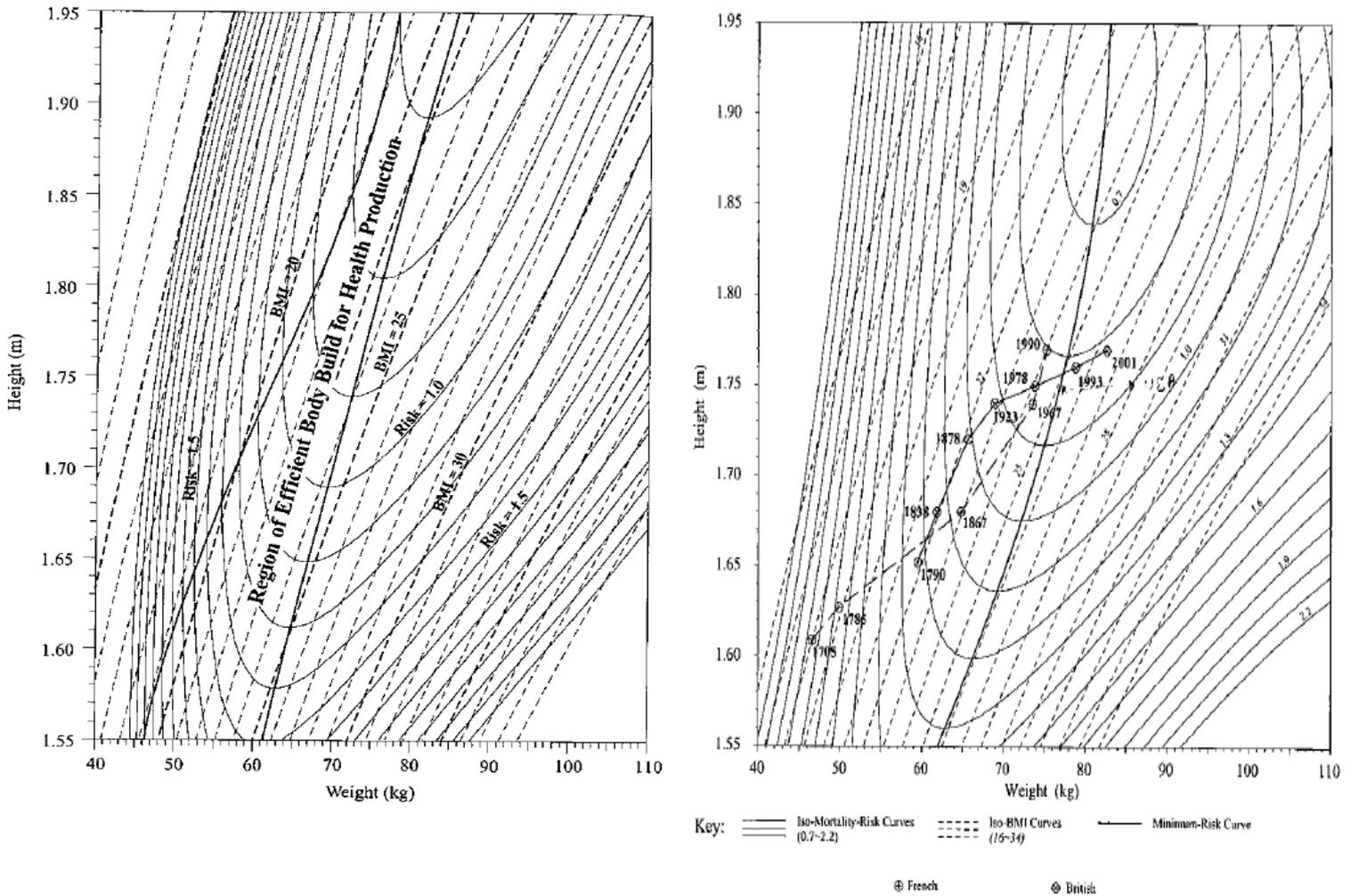


Figure 4: A gauche : Courbes d'Iso-IMC. A droite : Evolution des courbes d'Iso-IMC de la population française et anglaise depuis 1705 à 2001. Figure tirée de Fogel (135).

Les SHN participent à ce climat d'expansion morphologique et comme pour les optima de santé, des optima morphologiques pour la performance de haut niveau doivent pouvoir être révélés.

#### 2.2.6.5. Conclusion IMC

Un IMC élevé entraîne des conséquences néfastes sur la santé. Mais la relation sous-jacente est plus complexe et souvent exprimée sous la forme d'une relation en U. Il en découle un intervalle dit de protection où les risques sont minorés. L'intervalle 20-22 d'IMC semble être celui où le risque serait le plus faible pour la population des 20-25 ans (43). Puisque l'IMC augmente en moyenne d'1 kg.m<sup>-2</sup> par décennie, l'intervalle optimal fait de même (133,136,137).

#### 2.2.7. Conclusion Caractéristiques morphologiques et santé

Dans les comparaisons établies, il semblait que les plus petits et les plus légers vivaient plus longtemps. Ceci pouvait sembler en désaccord avec la pensée commune et en opposition au contexte d'expansion morphologique des populations.

Ces conclusions sont donc à pondérer grandement.

En effet, les études concernant la taille ne considèrent quasiment jamais les outliers. Les individus de taille extrême ne sont pas, ou trop peu, étudiés.

C'est pourquoi l'interprétation « plus petit » et « plus léger » ne peut être laissée en l'état.

En effet, ces relations, à l'instar de l'IMC, sont plutôt régies par des courbes faisant apparaître un **intervalle de protection** où les extrêmes « trop petits » et « trop légers », tout comme « trop grands » ou « trop lourds », voient leur risque augmenter.

### 2.2.8. Optima

Les études de santé publique 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. En s'intéressant à la performance de haut niveau, une relation exponentielle croissante puis décroissante est observée dans de nombreux sports (138,139) 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 ou natation, figure de gauche (138)), mais elles permettent aussi une réelle appréciation dans des sports d'opposition individuels comme le tennis, figure de droite (figure 5).

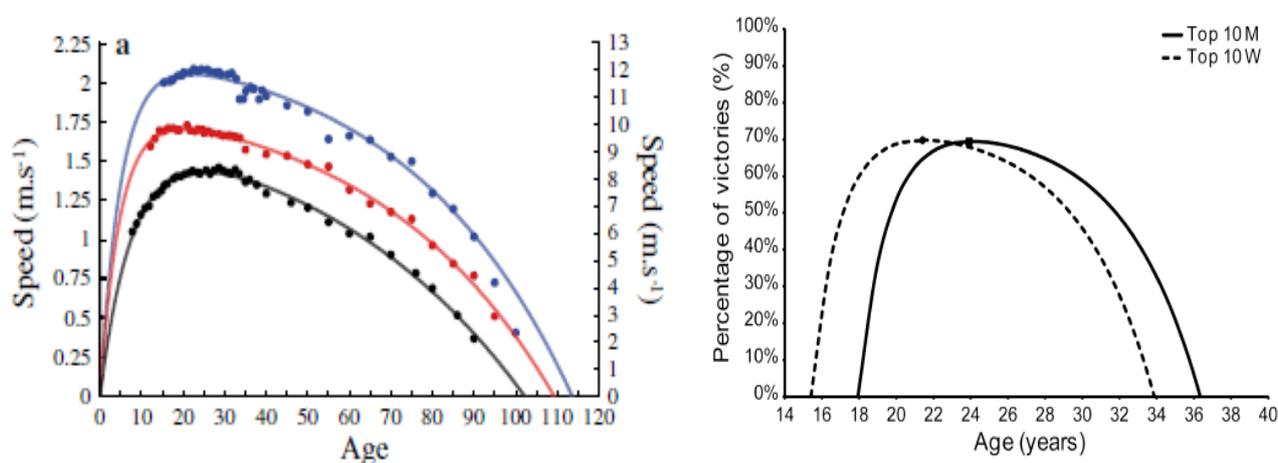


Figure 5: Age et performance en athlétisme (figure de gauche : 400m féminin courbe noire), natation (figure de gauche : 200m nage libre féminin courbe rouge et 100m nage libre masculin courbe bleu) et tennis pour le top 10 masculin et féminin (figure de droite). Figures tirées des articles de Berthelot et al(138) et Guillaume et al (139).

A ce jour, l'IRMES (Institut de Recherche bio-Médicale 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 (140) caractérise de nombreux autres paramètres tels que la force (figure 6 gauche) (141), le volume respiratoire (142), le volume des capillaires pulmonaires (143), les performances cognitives (144), ou encore les naissances (figure 6 droite) (145).

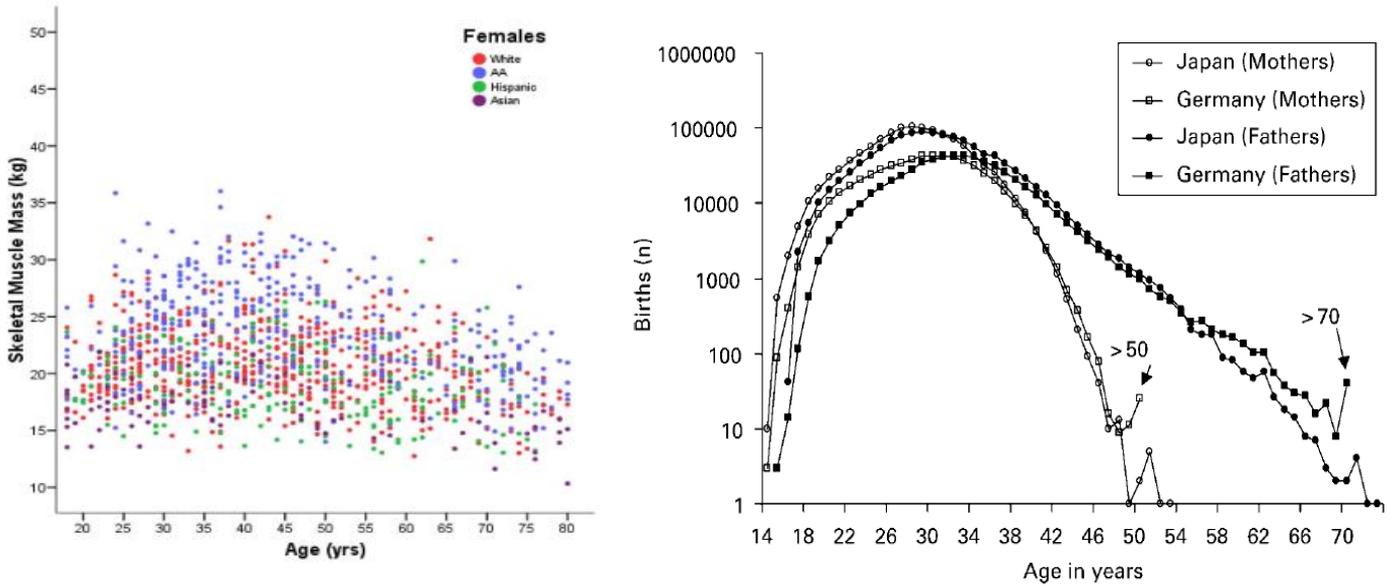


Figure 6: A droite : Masse musculaire de 1280 femmes mesurée par DXA ; A gauche : naissance en fonction de l'âge.

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>) (146). Les auteurs ont non seulement montré une corrélation significative entre performance et température selon une fonction polynomiale du 2<sup>nd</sup> degré (courbe en U), mais aussi une température optimale indépendante du niveau de performance (figure 7).

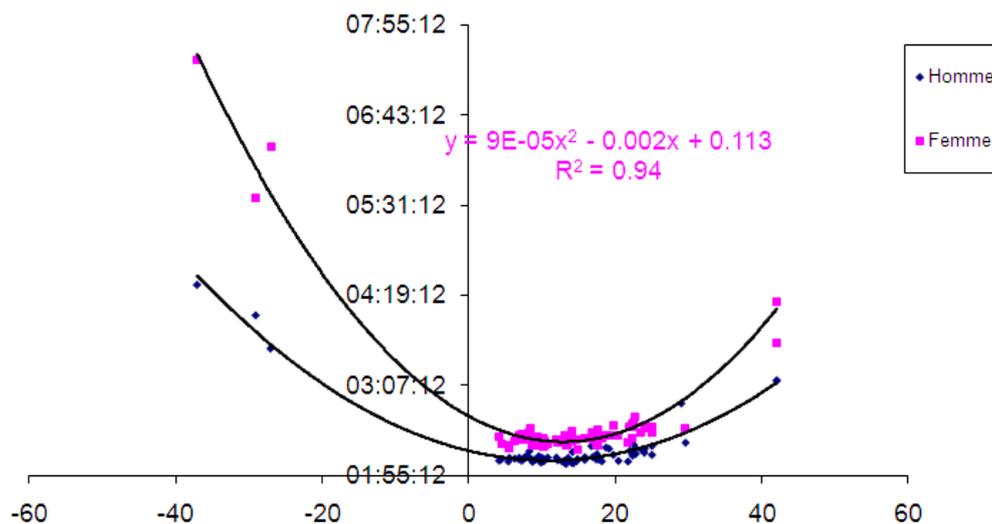


Figure 7: Relation entre la température de l'air et le temps de course en marathon chez les femmes et les hommes. Figure tirée de El Helou et al (146).

Les auteurs déterminent un pic de température optimale de 9,9°C. De part et d'autre de ces températures, les performances diminuent. Cet optimum thermique favorable à la performance ne peut que nous rappeler les relations entre température et mortalité (figure 8) détaillées par Besancenot (147).

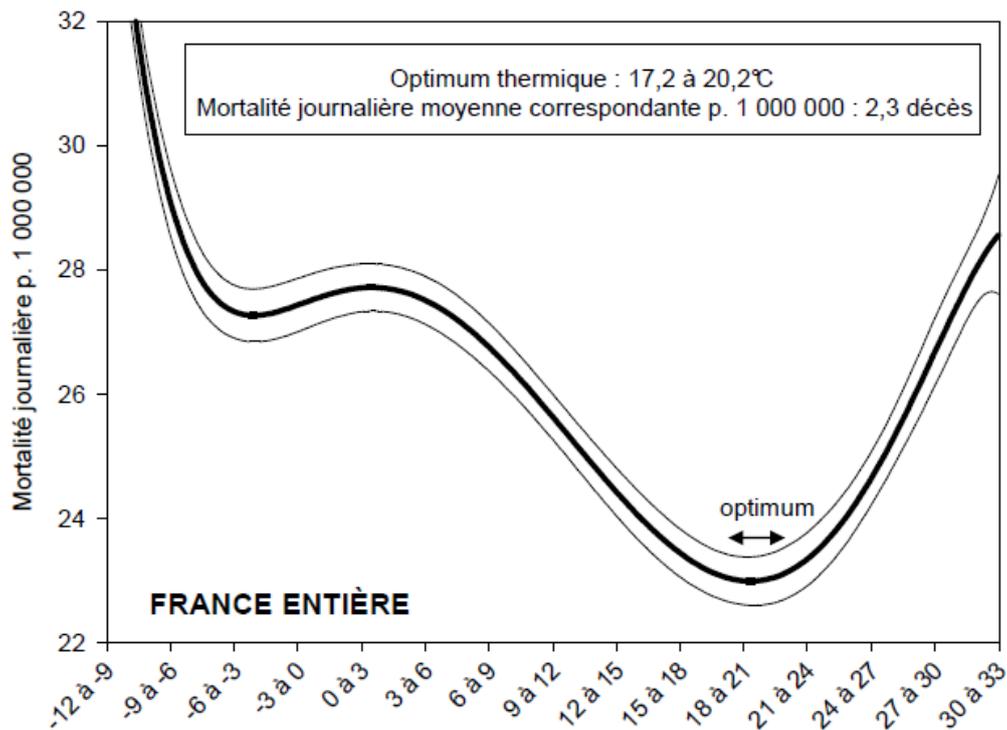


Figure 8 : Relation température-mortalité en France au pas de temps journalier (courbe en trait gras et intervalle de confiance à 95%. Figure tirée de Besancenot (147).

A l'instar des études montrant des optima d'IMC et des intervalles de protection ou celles déterminant des pics de performance selon l'âge ou la température, nous pensons qu'il existe également des optima morphologiques et des intervalles anthropométriques favorables à la performance.

### **2.3. Caractéristiques biométriques et sport**

Les athlètes de haut niveau représentent une partie unique de notre population (148). L'utilité d'une description morphologique peut contribuer à faciliter la compréhension de la plasticité de leurs caractéristiques morphologiques (24). Ces variations anthropométriques ont intéressé les scientifiques dans un but de description et de classification (149).

Les recherches anthropométriques appliquées aux sports sont relativement nombreuses. De nature descriptive, elles cherchent le plus souvent à établir des profils morphologiques par spécialité sportive dans une perspective d'évaluation des athlètes. Or, la relation entre la morphologie et les tâches spécifiques liées à chaque pratique sportive est rarement analysée. En effet, pléthore d'études présentent une partie descriptive des athlètes, selon des batteries de tests qui incluent régulièrement des mesures morphologiques (25,75,150–179). L'objectif est souvent de fournir une classification des formes corporelles par une expression chiffrée et de discriminer les athlètes par sport (180,181), par poste ou par position de jeu à partir de leurs morphologies (75,168,171,172,175,182–185).

A partir de ces profils anthropométriques furent souvent réalisées des comparaisons afin de situer un sportif et d'observer si, d'un point de vue morphologique, il correspondait aux « normes » ainsi réalisées. La dérive la plus classique consiste à considérer la détection sur ces simples critères malgré la complexité de la performance sportive.

#### **2.3.1. Indicateur anthropométrique : les somatotypes**

D'un point de vue historique, divers indicateurs anthropométriques ont été mis en place dans la littérature scientifique. Une méthode largement développée dans les années 1970 est celle des somatotypes (169,186–202) mais les études récentes employant réellement les classifications issues de ces méthodes sont peu nombreuses (203–207).

Le terme somatotype a été introduit par le psychologue américain WH. Sheldon dans son système de classification des types morphologiques humains. Sheldon a élaboré une méthode de classification du gabarit humain selon un système d'échelle à trois composantes s'inspirant des trois couches

embryonnaires endoderme, ectoderme et mésoderme. Dans son système, les êtres humains peuvent être classés selon la corpulence en fonction de trois morphotypes extrêmes et ce indépendamment de leur sexe:

- **endomorphe**
- **mésomorphe**
- **ectomorphe**

Afin de déterminer l'appartenance d'un individu à un type de morphotype, il existe trois méthodes (208,209):

1. La méthode avec des mesures anthropométriques
2. La méthode à partir de photographies
3. La méthode combinant les deux précédentes

La méthode anthropométrique est réalisée à partir de 10 mesures anthropométriques : taille, poids, plis cutanés du triceps, subscapulaire, supraspinal, cutanés du mollet, ainsi que deux largeurs d'os : humérus et fémur et deux circonférences : bras fléchi/tendu et mollet. A partir de ces mesures diverses déterminent une valeur pour chaque composante morphotypique (208,209).

Ainsi, tous les individus, hommes et femmes, peuvent entrer dans cette classification selon ces trois somatotypes. La plupart des individus proposeront un somatotype mixte exprimé sur un graphique somatomorphe (somatochart).

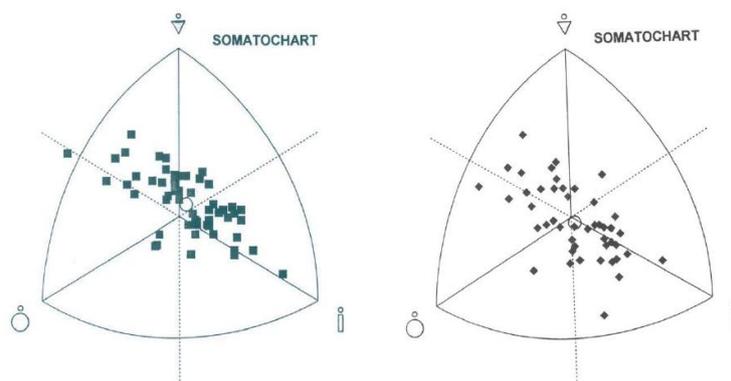


Figure 1 : Distribution des somatotypes des arrières (figures de gauche) et des centres (figure de droite) des basketteuses des championnats du monde de 1994, figure tirée de (205).

Initialement, l'inventeur de cette classification a relié ces somatotypes à des traits de personnalité, et a même tenter de corréler statistiquement les composantes endomorphe, mésomorphe et ectomorphe à des caractéristiques psychologiques. La méthode photographique ainsi que les corrélations d'ordre psychologique et culturel ont engendré de vives critiques quand à l'utilisation de cette méthode.

D'un point de vue uniquement morphologique, Tanner (210) a pu montrer que les coureurs de 110m haies avaient le même somatotype que les sprinters et les coureurs de 400m et 400m haies. De même, les coureurs de marathon, de moyennes distances et les marcheurs présentaient les mêmes somatotypes.

Cette méthode a été utilisée afin d'identifier des somatotypes par sports (186–198), ou à des fins de comparaison entre sports (169,200–202) ou encore dans un dessein de sélection ou d'entraînement (204). Mais cette méthode ne permet pas de différencier les athlètes selon le niveau de compétition (163,200,211–213) ni les athlètes de disciplines différentes (210,214–216).

Cependant, quelques analyses récentes ont proposé des distinctions selon les postes et le niveau de jeu (203,205–207).

Néanmoins au regard du caractère de mesure très indirecte et des divergences de résultats dans la littérature, nous avons axés notre démarche à partir des critères premiers de poids, taille et IMC.

### **2.3.2. Taille, poids et IMC**

Les travaux de cette thèse se focalisent sur la taille, le poids et l'IMC.

Mais quelles peuvent être l'utilité et la pertinence de ces simples critères ?

Dans le rugby, Doutreloux (217) nous enseigne que le poids total est peu utile mais que la masse maigre est essentielle. Cependant, lors des impacts, le poids global est à considérer, apprécié par un indice d'inertie, le *sprint momentum*, produit de la vitesse par le poids total. Le poids global, notamment dans les sports de contact peut ainsi fournir des renseignements intéressants.

Peu d'études s'intéressent uniquement à la taille des SHN et son lien avec la performance. Elle est généralement peu reliée à la spécialisation sportive, en partie du au fait que l'entraînement, la préparation physique ou la nutrition une fois adulte n'impactent plus sur cette dernière. Elle est un caractère hautement héritable (218). En effet l'étude de Lango Allen et al, portant sur 187 827 sujets a identifié 180 loci qui influencent la taille adulte mais n'expliquent que 10% de la variation du phénotype (218). Cette étude montre la complexité des facteurs transmissibles de la taille et de leurs interactions.

En 1997, l'Organisation mondiale de la santé a défini l'IMC comme le principal indicateur pour évaluer les risques liés au surpoids chez l'adulte. Cet indice est surtout utile pour mettre en évidence l'augmentation des facteurs de risques et n'a pas été conçu pour mesurer précisément de la masse grasse ni la masse musculaire ou osseuse. La catégorisation par tranche d'IMC place même certains sportifs comme les rugbymen ou les joueurs de NFL (National Football League) en surpoids ou en obésité pour la majorité de ces derniers, alors que ces athlètes présentent de fortes masses musculaires (51). En effet, l'IMC des athlètes qui possèdent une masse musculaire élevée et peu de graisse corporelle, tels que les *widereceivers*, *running backs* ou *tigh end* du football américain (219) peut générer des interprétations incorrectes (220). Par contre, si l'on appréhende l'IMC hors des classes prédéfinies pour la population générale, cet indicateur peut exprimer un autre équilibre entre taille et masse. Au delà de ces limites, l'IMC est un indicateur de l'énergie disponible et peut être interprété de deux manières. Selon l'équipe du Pr Nevill (221,222) dans la population générale, l'IMC serait symptomatique de la réserve énergétique accumulée sous forme d'acide gras et une estimation de l'adiposité, alors qu'il représente une indication de la réserve de puissance liée à la masse maigre chez les athlètes.

Le gabarit, par son expression simple de taille, poids et IMC, n'est qu'une pièce de la matrice totale de la performance. Mais avec l'amélioration des performances au plus haut niveau et sa stagnation actuelle dans de nombreux sports (223–227), les incréments à venir seront infimes. Ainsi, la modulation de chacun des déterminants de la performance devient de plus en plus importante. En ce sens, l'attention portée aux caractéristiques morphologiques pourrait faire la différence entre perdant et gagnant (24).

### **2.3.3. Description morphologique**

Les mesures anthropométriques sont réalisées depuis longtemps et sur un grand nombre d'athlètes (228), notamment les participants aux jeux olympiques (229). Une présentation axée sur les principaux sports (étudiés dans cette thèse) est développée ci-dessous.

#### **2.3.3.1. Rugby**

Dans le rugby, Doutreloux et al (217) nous informent que la morphologie et sa place dans la performance ont rarement fait l'objet de publications, alors que l'importance de gabarits spécifiques, en accord avec les exigences de chaque poste, est largement acceptée par les entraîneurs et les sélectionneurs. Des distinctions anthropométriques entre avants et arrières ont été publiées (230,231). En général, les avants sont plus grands et lourds que leurs homologues des lignes arrières (169,232) et le gabarit des joueurs de divisions supérieures surclassent celui de leurs homologues de championnats inférieurs (233–235). Des descriptions et comparaisons morphologiques sont également réalisées entre les différentes disciplines de rugby. Les joueurs de rugby à VII présentent des caractéristiques anthropométriques similaires à celles des arrières du rugby à XV (159).

#### **2.3.3.2. Football américain**

D'un point de vue descriptif, Kraemer et al (236) ont souligné des différences anthropométriques (taille, poids, IMC et pourcentage de masse grasse (%MG)) en fonction du poste des joueurs et ce sur différentes périodes. Les joueurs de lignes sont les plus grands et les plus lourds (237). Ces auteurs soulèvent un aspect intéressant puisque tous ces athlètes sont considérés en « surpoids », dans la classe d'IMC « obèse » voire « obésité sévère » mais par rapport à leur %MG, ils se situent tous dans un rapport dit de « bonne santé » ou avec un faible pourcentage. Par ailleurs des données descriptives de différentes équipes ont confirmé la discrimination par poste selon les caractéristiques anthropométriques des joueurs (238–240).

#### 2.3.3.3. Basket-ball

Dans leur étude ayant pour but de décrire la taille et les caractéristiques de la proportionnalité des joueurs du Championnat du monde de basket-ball féminin, Ackland et al (241) ont pu montrer des différences significatives de poids et de taille selon les postes. Ces différences, en fonction des postes de jeu et des demandes inhérentes aux rôles spécifiques attribués aux joueurs ont été retrouvées par d'autres chercheurs (242–245).

#### 2.3.3.4. Hockey sur glace

En hockey sur glace, les défenseurs sont plus grands et plus lourds que les attaquants, des caractéristiques également imputables aux exigences de poste (246–250). L'étude comportant le plus de joueurs (n=703) retrouve des différenciations identiques par postes (défenseurs plus grands et plus lourds) (251).

#### 2.3.3.5. Baseball

Des descriptions morphologiques de joueurs de baseball existent dans la littérature (252–254). Quelques études ont mis en évidence des discriminations anthropométriques selon les postes (255,256) et le niveau de jeu (257). Ces derniers auteurs ont montré que les rookies et les joueurs de ligues mineures étaient moins lourds et surtout présentaient une masse maigre inférieure à celles des joueurs de Major League Baseball (MLB).

#### 2.3.3.6. Athlétisme

Dans une étude sur les olympiens, Tanner (210) a mesuré 14 variables anthropométriques de 125 athlètes sélectionnés à partir de 18 épreuves d'athlétisme. Il a observé des distinctions entre les épreuves et les différentes courses.

### 2.3.3.6.1. Courses

La composition corporelle des coureurs a été largement décrite (258–263). Dans leur étude, Arrese et Ostáriz (264) révèlent une description selon la distance de course (tableau 2):

Tableau 2 : Caractéristiques physiques en athlétisme (Tableau tiré de Arrese et Ostáriz (264)).

Table I. Physical characteristics and performance of the male runners.

Event	Performance (race time)	Age (years)	Weight (kg)	Height (m)	Sum of six skinfolds (mm)	n
100 m	10.68 CV=2.13%	21.72 ± 2.34	70.82 ± 6.72	1.77 ± 0.05	37.64 ± 6.25	19
400 m	47.73 CV=2.14%	23.72 ± 4.12	74.17 ± 6.99	1.82 ± 0.07	38.29 ± 6.53	24
800 m	1:49.68 CV=2.91%	21.83 ± 3.34	69.33 ± 4.90	1.81 ± 0.05	37.75 ± 4.88	23
1500 m	3:43.35 CV=2.74%	22.94 ± 3.16	65.69 ± 3.94	1.78 ± 0.05	36.92 ± 5.06	16
3000 m steep.	8:38.76 CV= 2.3%	22.01 ± 3.20	66.10 ± 3.72	1.77 ± 0.05	35.88 ± 4.19	8
5000 m	13:30.73 CV=2.18%	27.45 ± 4.06	60.68 ± 4.11	1.71 ± 0.07	37.08 ± 8.98	6
10000 m	28:57.14 CV=3.36%	25.99 ± 4.15	57.98 ± 5.24	1.70 ± 0.05	38.39 ± 6.05	17
Marathon	2:13.34 CV=2.19%	30.51 ± 3.94	59.85 ± 3.34	1.72 ± 0.04	33.19 ± 5.54	17

CV = coefficient of variation of performance.

### 2.3.3.6.2. Comparaisons

De nombreuses études comparent les caractéristiques anthropométriques des athlètes. Dès 1954, Pere et al (265) ont pu montrer que les lanceurs étaient en moyenne les plus grands, suivis de près par les sauteurs puis les sprinteurs. Par la suite, d'autres chercheurs (266) ont confirmé que les lanceurs étaient les plus grands et les plus lourds alors que les coureurs de longue distance étaient les plus petits et les plus maigres. Il fut constaté qu'avec l'augmentation progressive de la distance 100m, 200m, 400m et 800m, les coureurs deviennent de plus en plus grands et minces (267,268), ces constats ont même été observés chez les femmes (264). Cette relation fut constatée par O'Connor et al (263) qui se sont intéressés aux morphologies des athlètes, ils proposent la description ci-dessous (Figure 9).

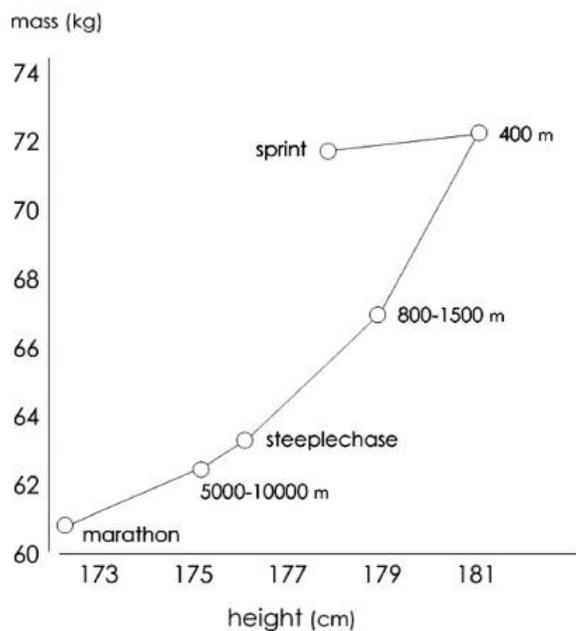


Figure 9: Relation entre la taille et le poids moyens des athlètes internationaux de 1960 à 2005. Figure tirée de O'Connor et al (263).

Une très bonne synthèse des particularismes anthropométriques selon les distances de course et le sexe fût réalisée par Weyand et Davis (269). Ces auteurs ont recueilli le poids et la taille du top 45 hommes et femmes, du 100m au 10 000m entre 1990 et 2003 (N=275 hommes et N=261 femmes).

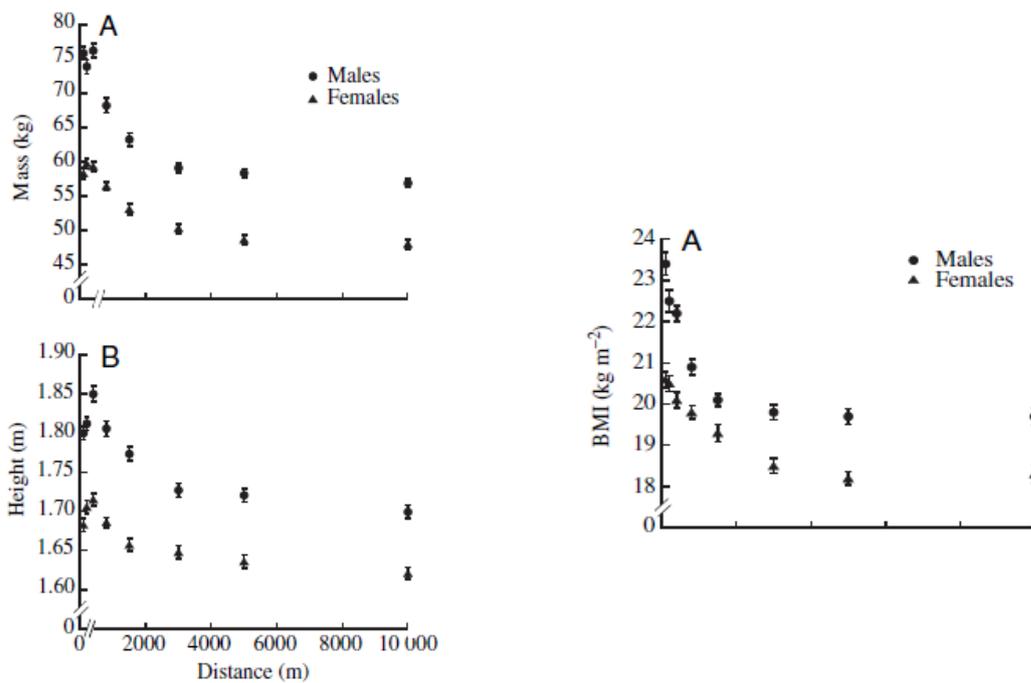


Figure 10 : Poids, taille et IMC moyen du Top 45 hommes et femmes selon la distance de course. Figure tirée de Weyand et Davis (269).

Les spécialistes des courtes distances sont plus massifs que ceux des courses de fond et de demi-fond, que ce soit chez les hommes ou chez les femmes (*figure 10*).

#### 2.3.3.7. Comparaisons et population générale

De nombreux profils anthropométriques d'athlètes engagés dans des sports spécifiques ont été identifiés, avec des différences inter et intra-sport. Souvent, les auteurs partent du constat qu'une différence est synonyme d'avantage (157). Parfois les caractéristiques anthropométriques des SHN sont comparées à celles de la population générale. Concernant les différences intra-sports, ces dernières sont généralement associées aux postes comme détaillé précédemment en rugby, football américain, basketball, hockey sur glace ou en athlétisme selon les distances de course. Régulièrement, ces études descriptives comparent les caractéristiques anthropométriques des SHN à celles de leurs homologues sédentaires ou non sportifs de haut niveau. De nombreuses études ont conclu que les athlètes (270), joueurs de baseball (271,272), de basketball (165,270), de football (270), d'aviron (152,153,273) ou de natation (274,275) ont tendance à être plus lourds, et souvent plus grands avec une proportion moindre de masse grasse, que les non-participants du même âge.

#### 2.3.4. Conclusion

Les caractéristiques anthropométriques sont omniprésentes dans les protocoles de recherche sur le sport, mais elles sont majoritairement relayées à la partie anodine de description de la population. Elles ne font que très rarement l'objet d'analyses détaillées en lien direct avec la performance.

## 2.4. Evolution des caractéristiques anthropométriques des sportifs

Yamamoto et al (276) affirment que les profils anthropométriques de pratiquement tous les athlètes contemporains diffèrent de ceux des athlètes du passé. Pour autant, les études qui se sont focalisées sur l'évolution détaillée de ces caractéristiques ne sont pas nombreuses. La meilleure synthèse à ce jour est celle de Norton et Olds (12) qui porte sur 22 sports issus de 100 publications. Sur l'ensemble du siècle, les données colligées concernent : Australian Football League 674 athlètes; boxe 83; cyclisme sur Route 706; cyclisme sur piste 388; plongée 180, gymnastique 366; saut en hauteur 162; des jockeys 1169; saut en longueur 259; NBA 3370; NFL 18 517; aviron (poids lourd) 1167; rugby à XV 1372; athlétisme : sprint 968; 400m 465; 800-1500m 590; 3000-10 000 654; marathon 668; lancer de poids 133; lancers (autres) 336; volley-ball 398; natation 1397 et waterpolo 532. Les auteurs expriment les évolutions estimées de poids (*Figure 11*) et de taille (*Figure 12*) par décennie et par sport.

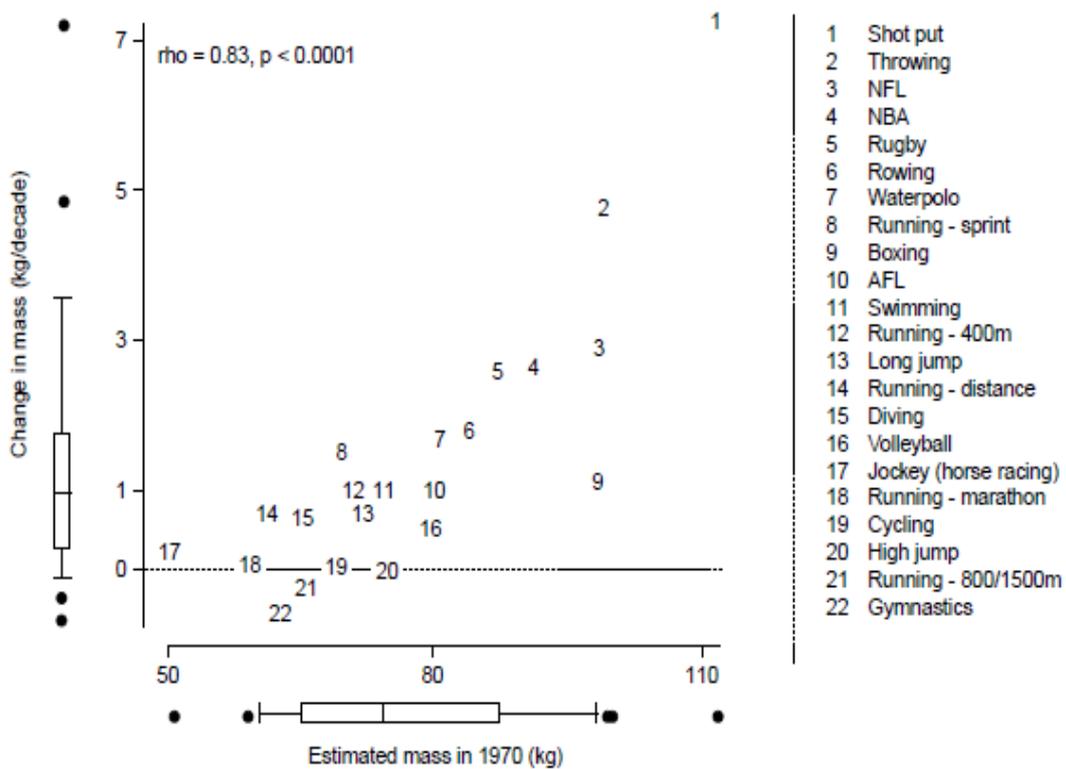


Figure 11 : Relation entre les évolutions de poids estimées dans 22 sports (kg/décennie) en fonction du poids moyen en 1970.

Figure tirée de Norton et Olds (12).

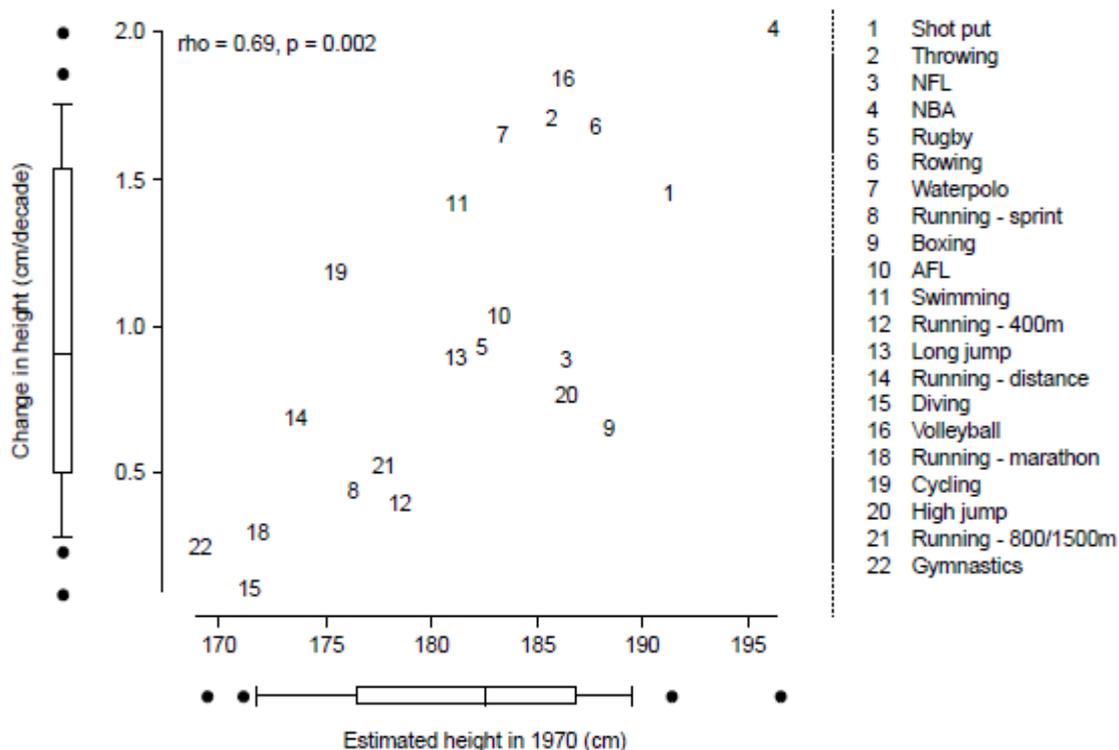


Figure 12 : Relation entre les évolutions de tailles estimées dans 22 sports (cm/décennie) en fonction de la taille moyenne en 1970. Figure tirée de Norton et Olds (12).

Les athlètes qui ont pris le plus de poids sont les lanceurs, les joueurs de NFL et les rugbymen. Alors que ceux qui ont vu leur taille le plus augmenter sont les joueurs de NBA et de volleyball. D'un autre côté, on constate que les gymnastes et les plongeurs sont ceux qui augmentent le moins en termes de taille et de poids ; ils présentent des évolutions en deçà des tendances de la population.

### 2.4.1. Rugby

De nombreuses études (191,196,277–283) dans les années 80 et début 90 ont analysé les morphologies mais peu en terme d'évolution comparative.

#### 2.4.1.1. Tendances internationales

Dans son étude sur *"l'évolution des gabarits des rugbymen durant le XXème siècle"*, Olds (284) a repris les données de 843 joueurs, issues de 21 articles et communications. A partir de ces 843 joueurs, et grâce à une simulation de type Monte Carlo, il montre une augmentation de 2,6 kg par décennie (et 0,4 kg.m<sup>-2</sup> par décennie) entre 1905 et 200. Ces augmentations dépassent celles des hommes jeunes de la population générale. Une accélération sur la période la plus récente a également été décelée avec une augmentation de l'IMC depuis 1975 trois à quatre fois supérieure à l'augmentation entre 1905 et 1975. Par contre, l'augmentation de taille de 1 cm par décennie est comparable à l'augmentation séculaire de la population. Ces augmentations sont en accord avec celles proposées par Norton et Olds (12) (*figure 11-12*).

Pour illustrer l'évolution du rugby moderne, Quarrie et Hopkins (285) ont analysé les enregistrements vidéo de chaque match de la Bledisloe Cup, joués entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande de 1972 à 2004. Dans cette analyse, une focale porte sur la taille et la masse corporelle des joueurs. Avec l'avènement du professionnalisme les joueurs sont devenus plus lourds et les arrières plus grands.

#### 2.4.1.2. Tendances françaises

En France, Bergougnou et Cayon (286) ont comparé les caractéristiques morphologiques des joueurs qui ont participé aux championnats de France de l'élite entre 1989, 1995 et 1999. Les auteurs ont montré que si la taille moyenne des joueurs a légèrement augmenté, notamment chez les trois-quarts depuis 1989, les gains de poids ont été très importants, quel que soit le poste occupé. D'autres études confirment ces tendances conséquentes de prise de masse (217,287,288).

Dans sa thèse *« Le complexe de « Rambo » : les conséquences d'une professionnalisation annoncée dans la population des rugbymen français de haut niveau (1960-2003) »*, Allain (289) réalise une étude longitudinale sur 44 ans, impliquant 25 777 rugbymen. Le poids moyen des joueurs aux différents postes ne cesse de croître depuis 1960 et c'est chez les rugbymen du Top 14 que les augmentations de poids sont les plus importantes (vis-à-vis des joueurs de division inférieure).

#### 2.4.1.3. Tendances anglaises

Une récente étude a évalué les changements de taille, poids et âge des joueurs de première league anglaise entre 2002 et 2011 (290). Sur la période, le gabarit de l'ensemble des joueurs a augmenté, mais seuls les talonneurs et les demis d'ouverture se renforcent significativement. Alors que la masse corporelle moyenne des joueurs a augmenté pour la plupart des postes, seul les demis d'ouverture et les deuxièmes lignes la majorent significativement. Dans la *Premiership* anglaise, les joueurs professionnels de rugby sont devenus plus grands, plus lourds et plus jeunes, mais les changements statistiquement significatifs ont été limités aux demis d'ouverture (plus grands et plus lourds), aux talonneurs (plus grands et plus jeunes) et aux deuxièmes lignes (plus lourds).

#### 2.4.1.4. Rugby à VII

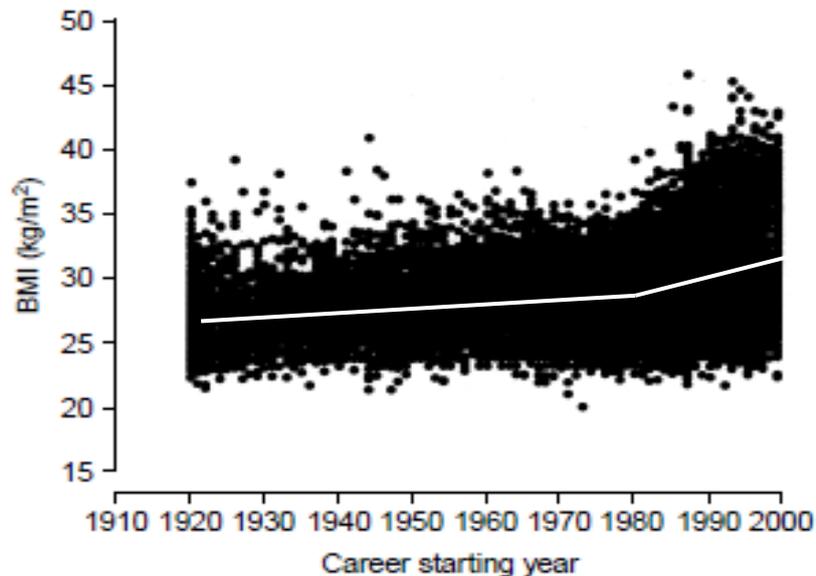
Dans le rugby à VII, Higham (159) ont montré que les joueurs actuels étaient 5 kg plus lourds et 3,7 cm plus grands que ceux du tournoi international de 1996 (291). Ces auteurs parlent d'homogénéisation des gabarits par rapport à leurs homologues quinzistes due à la faible variabilité intra-athlète des caractéristiques des joueurs de rugby à VII.

### **2.4.2. Foot US**

Les études de la composition corporelle des joueurs de NFL ont débuté il y a plus de 50 ans (148,292,293). Pour les premiers joueurs de football américains intégrant une étude évolutive, Malina (49) avait analysé les données de taille et de poids des joueurs universitaires de 1899 à 1970. Les équipes de 1970 présentaient des joueurs en moyenne plus lourds de 16,05 kg et plus grands de 6,6 cm par rapport à ceux du siècle précédent. La tendance estimée sur 70 ans était de 0,94 cm par décennie et 2,29 kg par décennie. Selon Kraemer et al (236) avec les améliorations concernant l'entraînement et la préparation physique, la perception des néophytes est que les joueurs sont devenus plus imposants d'année en année. A travers leur étude, ces auteurs comparent les joueurs

de 2003 à ceux de 1998 (239), 1976 (294) et 1972 (148). Ils ne constatent pas de grands changements de taille et de masse grasse mais des prises de masse significatives chez les joueurs de lignes.

Dans la revue de Norton et Olds (12), figurent les évolutions des joueurs de NFL, ils mesurent une évolution de 3 kg par décennie et un peu moins de 1 cm tous les dix ans. Ils mettent en évidence les changements d'IMC en identifiant deux périodes (*figure 13*).



*Figure 13 : Evolution de l'IMC de 18 517 joueurs de NFL. Deux régressions linéaires ont été apposées afin de constater les changements d'IMC de 1920 à 1979 (n=10 602) et de 1980 à 1999 (n=7915). Les pentes de régressions sont significativement différentes soulignant une prise plus importante à partir de 1980. Figure tirée de Norton et Olds (12).*

Une prise de masse plus conséquente apparaît à partir des années 1980, augmentations constatées par d'autres auteurs (219,237,238). Norton et Olds, constatent également que les augmentations de masse des joueurs de NFL sont synchrones avec celles des joueurs de rugby. Ils expliquent cette accélération par l'avènement du professionnalisme, la généralisation de la préparation physique et de la musculation mais aussi par l'utilisation de stéroïdes anabolisants.

Dans son étude, Jacobson (219) montre entre 1950 et 2010 des évolutions flagrantes de poids et de taille des joueurs de ligne de la ligue « *National Collegiate Athletic Association Division I universities* » (figure 14).

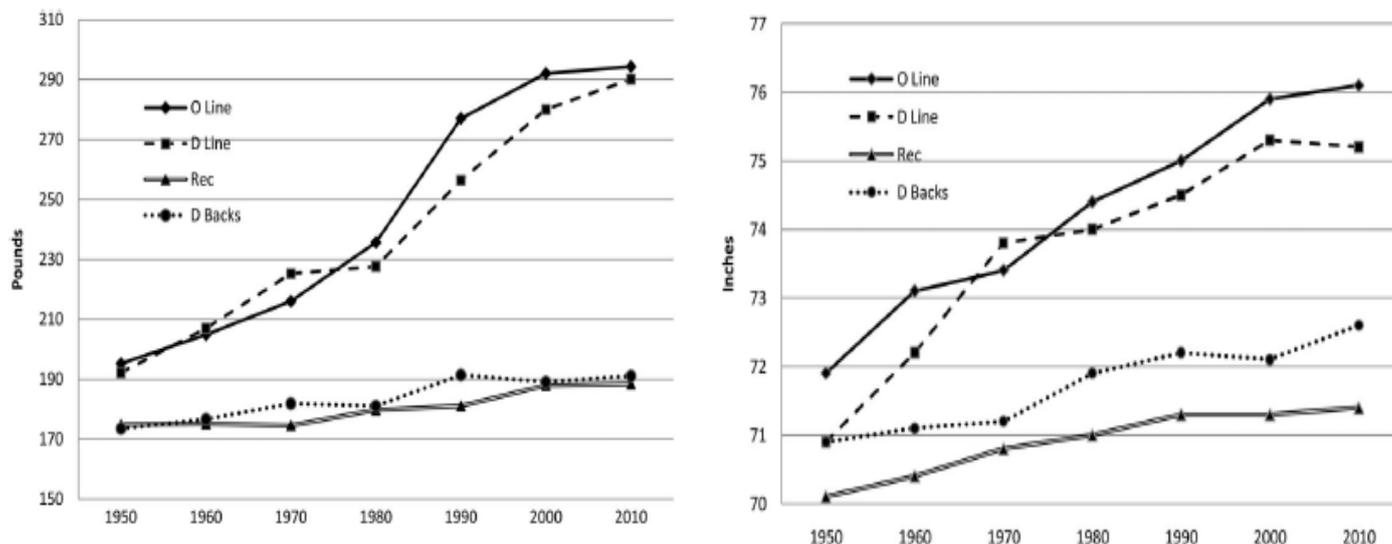


Figure 14 : Evolutions par décennie du poids (figure de droite) et de la taille (figure de gauche) selon les postes. Figure tirée de Jacobson (219).

Les auteurs nous informent que les joueurs des lignes offensives ont majoré leur poids de 50,8% (88,5 vs 133,5 kg) et leur taille de 5,4% alors que ceux des lignes défensives ont augmenté leur masse de 50,9% (87,2 vs 131,6 kg) et leur taille de 6,7%. Pour les autres postes, les accroissements sont plus modestes : 7,7% pour le poids des receveurs et 1,9% pour leur taille. Une tendance importante est également soulignée par ces auteurs, puisque les rookies (nouveaux entrants) sont 2% plus lourds que les sophomores (ceux qui réalisent leur deuxième saison professionnelle), ce qui laisse présager que les augmentations pourraient perdurer.

Anzell et al (237) montrent que les joueurs de collège, et pour toutes les positions, ont eux aussi augmenté leur poids et taille entre 1942 et 2011. Ces données démontrent que les poids de tous les joueurs universitaires et les joueurs de lignes professionnels ont considérablement augmenté de 1942 à 2011. L'augmentation des gabarits des joueurs en université et collège a été constatée dans plusieurs études (295,296).

### 2.4.3. Basket

Dans leur revue, Norton et Olds (12) tablent sur une augmentation d'un peu moins de 3 kg par décennie, mais surtout sur une majoration de 2 cm par décennie pour la taille. La *figure 15* montre ces évolution:

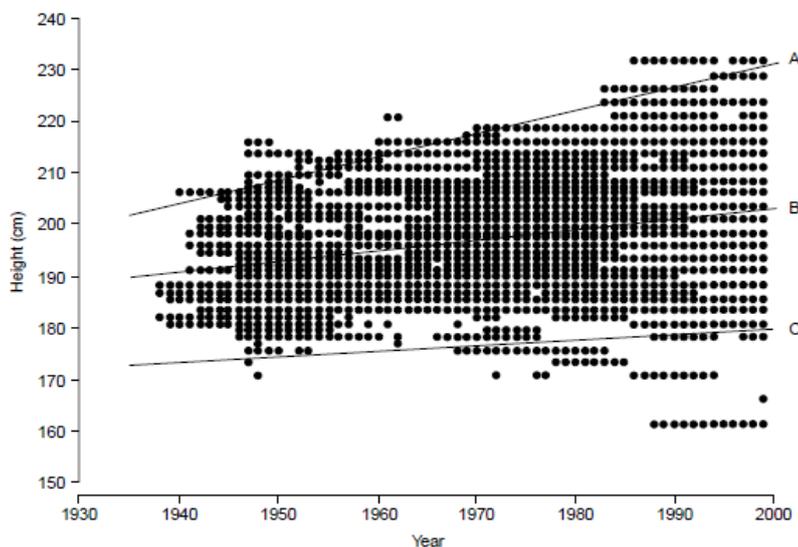
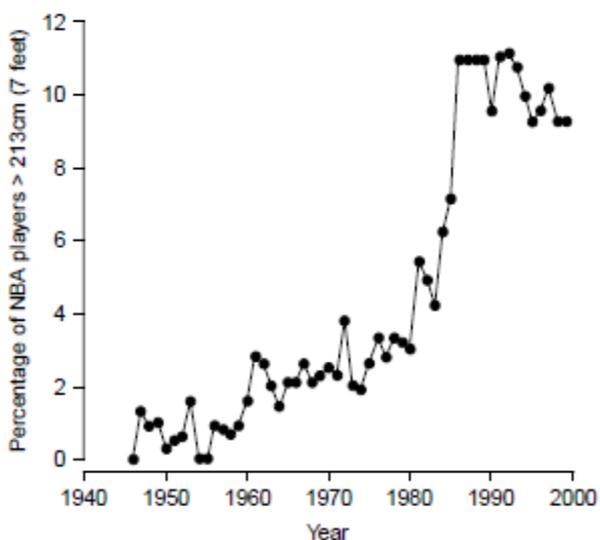


Figure 15 : Evolution de la taille de l'ensemble des joueurs de NBA. La régression linéaire A repose sur les 3 plus grands joueurs de chaque année, ( $y = 0.483x + 182.6$  avec  $y$  pour la taille  $x$  pour l'année), la B est constituée à partir de tous les joueurs ( $y = 0.193x + 183.1$ ) et la C représente la population générale américaine ( $y = 0.042x + 93.0$ ). Figure tirée de Norton et Olds (12).



La *figure 16* illustre l'ouverture au recrutement international de la NBA qui recherche les joueurs les plus grands. Le pourcentage semble se stabiliser au cours de la dernière décennie, potentiellement en raison de l'épuisement du vivier mondial des plus grands (12).

Figure 16 : Evolution du pourcentage de joueurs NBA plus grands que 213cm (7 feet) chaque année entre 1946 et 1998. Figure tirée de Norton et Olds (12).

### 2.4.4. Athlétisme

Dans “*Morphological Evolution of Athletes Over the 20th Century*”, Norton et Olds (12) estiment les augmentations par décennie de 1,5 et 1 kg en sprint 100m, 400m, et de 0,9 kg sur 3000-10000m. Ils ne constatent pas d’augmentation en marathon, voire de légères pertes de poids par décennie sur 800-1500m (Figure 11).

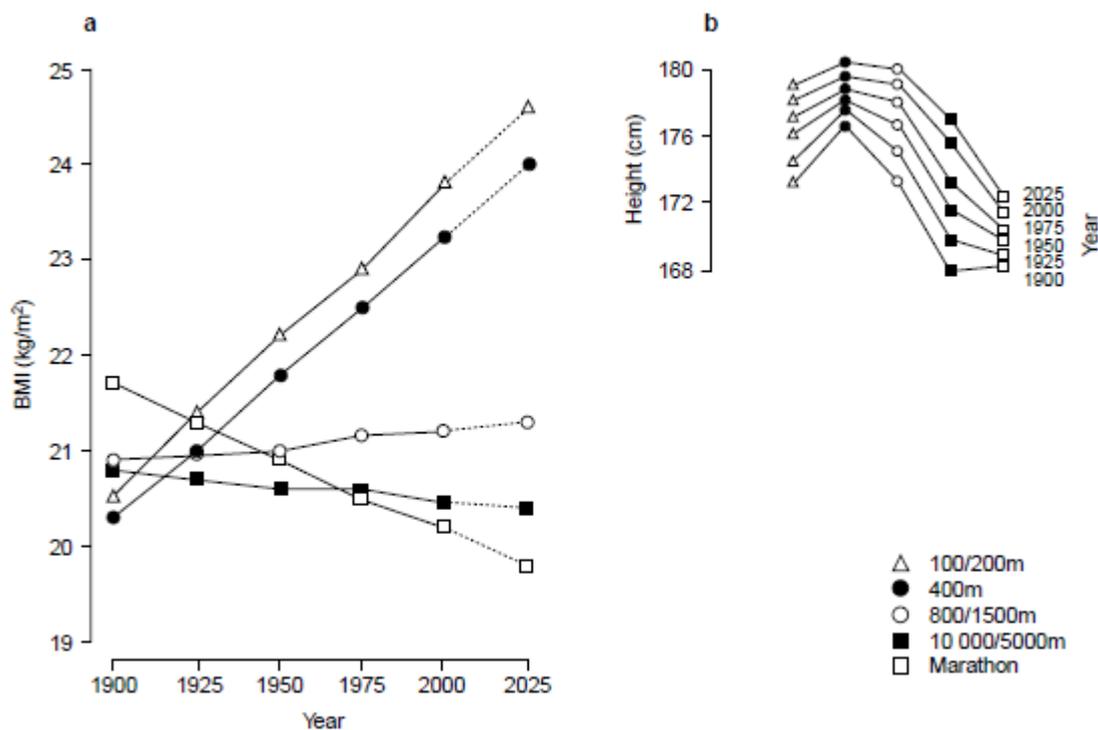


Figure 17 : (a) Tendances évolutives de l’IMC des coureurs du sprint au marathon entre 1900, extrapolées jusqu’en 2025. (b) Tendances évolutives de la taille des coureurs du sprint au marathon entre 1900 et extrapolées jusqu’en 2025. Figure tirée de Norton et Olds (12).

A partir de la figure 17, nous pouvons observer, selon les données reconstituées de Norton et Olds, que les sprinteurs sont passés d’un IMC de 20,5 kg.m<sup>-2</sup> à 23-24 kg.m<sup>-2</sup>, entre 1900 et 2000. A l’opposé, les marathoniens sont passés d’un IMC de 21,8 à 20,2 kg.m<sup>-2</sup> (figure 16), signalant une évolution différentielle très marquée sur ces différentes épreuves.

Sur une comparaison plus restreinte, De Garay (297) avait comparé les tailles d’athlètes entre les Jeux Olympiques (JO) de Rome 1960 et ceux de Mexico (1968). Il avait constaté une augmentation de

la taille des sprinteurs (400m) de 5 cm et des stagnations pour les coureurs de longue distance. Taner (210) a reporté que les Olympiens de Rome en 1960 étaient plus grands que ceux des Jeux d'Amsterdam de 1928: en moyenne les coureurs de demi-fond étaient plus grands de 7,6 cm.

Dans "The changing shape characteristics associated with success in world-class sprinters", Watts et al (222) décrivent les évolutions de poids, taille, IMC et âge des sprinteuses du top 100 (tableau 3) et sprinteurs du top 100 (tableau 4). Cependant, ces données doivent être interprétées en considérant que, pour les hommes, moins de 35% des données jusqu'en 1990 sont disponibles et que ce n'est qu'à partir des années 80 que plus de 70% des données ont pu être recueillies chez les femmes.

Tableau 3 : Caractéristiques anthropométriques des meilleures sprinteuses mondiales par décennie. (Tableau tiré de Watts et al (222), comparaisons possibles selon le nombre d'athlètes dans l'analyse qu'à partir de 1980).

Years of measurement	n	Height (m)		Body mass (kg)		Age (years)		RPI (cm · kg <sup>-0.333</sup> )		BMI (kg · m <sup>-2</sup> )	
		s	s	s	s	s	s	s	s		
1940-1949	3	1.73	0.10	65.33	9.87	28.75	4.99	43.17	0.95	21.65	1.41
1950-1959	2	1.74	0.02	64.50	2.12	28.50	6.35	43.33	1.00	21.44	1.23
1960-1969	2	1.75	0.08	58.50	2.12	25.80	4.61	45.13	1.64	19.14	1.16
1970-1979	2	1.73	0.04	62.00	1.41	23.38	4.10	43.77	0.74	20.72	0.54
1980-1989	71	1.68	0.05	57.68	3.88	25.03	3.09	43.62	1.05	20.39	1.13
1990-1999	74	1.69	0.07	59.09	5.20	26.41	3.96	43.40	1.26	20.78	1.51
2000-2009	74	1.66	0.07	58.72	6.65	26.18	3.91	42.94	1.02	21.14	1.43
2010	1	1.70	-	56.00	-	22.40	2.01	44.49	-	19.38	-

Note: s = standard deviation.

Chez les hommes et les femmes, on observe une augmentation progressive de la taille, du poids et de l'IMC des athlètes (tableau 3-4).

Tableau 4 : Caractéristiques anthropométriques des meilleurs sprinteurs mondiaux par décennie. (Tableau tiré de Watts et al (222))

Years of measurement	n	Height (m)		Body mass (kg)		Age (years)		RPI (cm · kg <sup>-0.333</sup> )		BMI (kg · m <sup>-2</sup> )	
		s	s	s	s	s	s	s	s		
1910-1919	9	1.77	0.04	69.22	3.63	23.26	3.02	43.25	1.08	22.06	1.43
1920-1929	23	1.73	0.04	69.48	4.65	23.61	2.88	42.07	0.88	23.33	1.29
1930-1939	25	1.78	0.03	74.64	6.93	23.66	2.76	42.35	1.10	23.40	1.80
1940-1949	22	1.80	0.03	72.36	4.59	23.24	3.28	43.19	1.28	22.48	1.81
1950-1959	30	1.76	0.09	71.90	6.26	24.07	3.20	42.46	1.99	23.27	2.31
1960-1969	23	1.79	0.07	75.91	7.25	23.62	2.95	42.38	1.06	23.67	1.34
1970-1979	21	1.84	0.07	76.90	5.42	23.18	2.90	43.30	1.53	22.82	1.88
1980-1989	34	1.83	0.05	73.68	6.04	23.79	2.67	43.86	0.76	21.87	1.21
1990-1999	54	1.80	0.05	75.17	5.33	26.09	3.51	42.84	1.15	23.12	1.56
2000-2009	99	1.81	0.06	77.98	5.63	25.63	3.46	42.51	1.41	23.79	1.75

Note: s = standard deviation.

### 2.4.5. Comparaison avec la population générale

Il semble logique que les caractéristiques anthropométriques des athlètes et des sédentaires diffèrent, tout comme celles des athlètes de différents sports (24). Dans *“Physical Structure of Olympic Athletes”*, Carter (258) synthétise les mesures anthropométriques des Olympiens de 1928 à 1976. Il constate que les femmes et les hommes participant aux Jeux olympiques sont plus grands que les individus de la population générale.

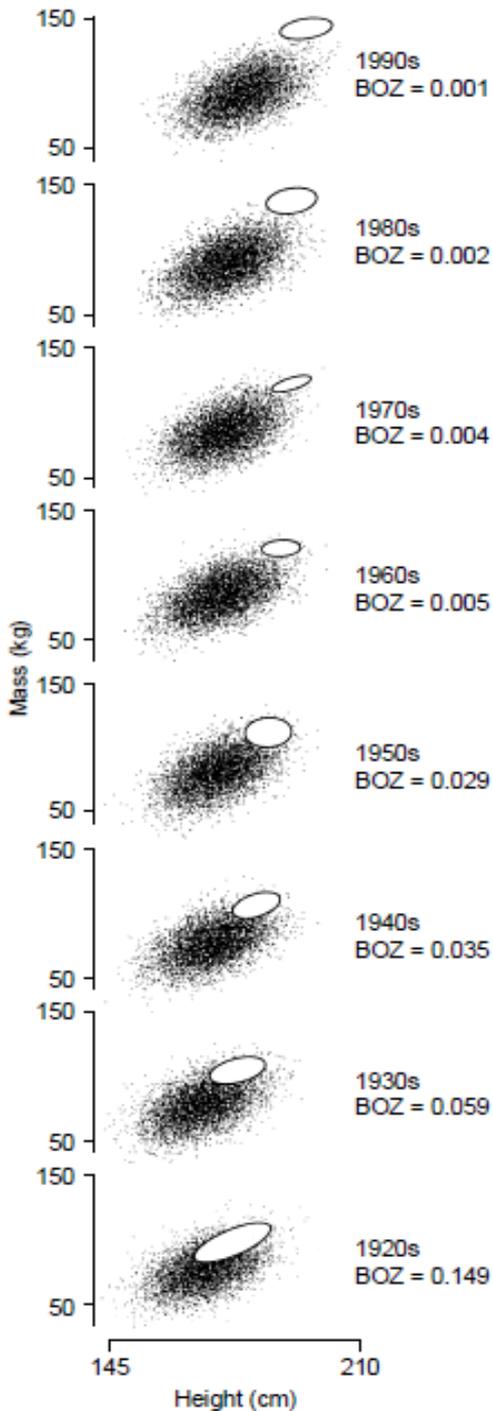
#### 2.4.5.1. Rugby et population générale

Le travail de Bauduer et al (288) sur les rugbymen français de haut niveau, nous montre que, depuis 20 ans, l'augmentation des gabarits des joueurs est supérieure aux tendances observées en population générale masculine française.

#### 2.4.5.2. Football américain et population générale

De 1899 à 1970, durant chaque période étudiée, les joueurs de football américains sont en moyenne toujours plus grands et plus lourds que leurs pairs sédentaires (49). Sur la période 1960-1971, les joueurs sont plus grands de 6,6 cm et plus lourds de 16,05 kg. La majoration du poids des athlètes est plus marquée que le gain de taille, alors qu'une partie de ce gain de poids peut être attribué au gain de taille.

Dans *“Morphological Evolution of Athletes Over the 20th Century”*, Norton et Olds (12) développent le concept de BOZ pour Bivariate Overlap Zone. Ce principe de zone de recouvrement bidimensionnelle repose sur le calcul du chevauchement entre deux distributions bidimensionnelles (par exemple, la probabilité d'un jeune adulte de posséder la taille et le poids requis afin de jouer en NFL). Les auteurs retracent la probabilité pour qu'un individu d'une population donnée puisse correspondre aux critères d'une population spécifique, exprimée par un «chevauchement» entre les deux populations. Ils pensent que les chevauchements peuvent être mieux visualisés que le degré de superposition de deux distributions de populations.

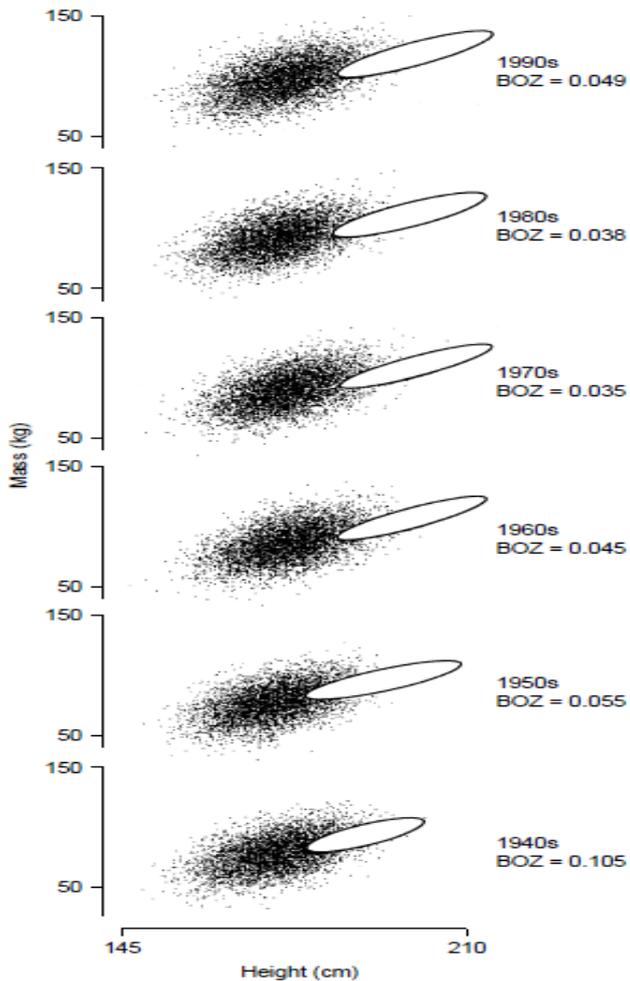


Ces chevauchements peuvent être quantifiés en une statistique qu'ils nomment la zone de chevauchement (OZ : Overlap Zone). Lorsque deux caractéristiques sont mises en regard (par exemple poids et taille), l'OZ est représentée graphiquement comme le chevauchement de deux « ellipses de densité » et les auteurs parlent de BOZ. Soit X la variable taille et Y la variable poids de deux populations. Si une population est composée de jeunes adultes de sexe masculin appelés population de référence, et l'autre population se compose d'un échantillon de SHN, alors les auteurs cherchent à déterminer la probabilité qu'une personne choisie au hasard dans la population de référence corresponde en termes de taille et poids à la population sportive. La *figure 18* illustre le creusement de la probabilité qu'un individu de la population générale bénéficie des caractéristiques de taille et de poids correspondant aux athlètes de NFL. Au cours du siècle dernier, les joueurs de lignes de NFL s'éloignent morphologiquement de plus en plus des sédentaires. Les athlètes de 1920 avaient des profils chevauchant en grande partie les poids et taille des individus de la population générale, alors qu'en 1990, ils sont très éloignés de cette dernière. Le score BOZ dans les années 20 est de 0,149, ce qui signifie que 14,9 % de la population de jeunes américains possèdent les traits anthropométriques appropriés pour être sélectionnés en NFL. Dans les années 1990, ce score est passé à 0,001 signifiant que seul un jeune américain sur mille peut aspirer (du point de vue de son gabarit) à une sélection en NFL.

Figure 18 : Evolution de la zone de recouvrement bidimensionnelle (BOZ) des joueurs de ligne de NFL entre 1920 et 1999.

Figure tirée de Norton et Olds (12).

### 2.4.5.3. Basketball et population générale



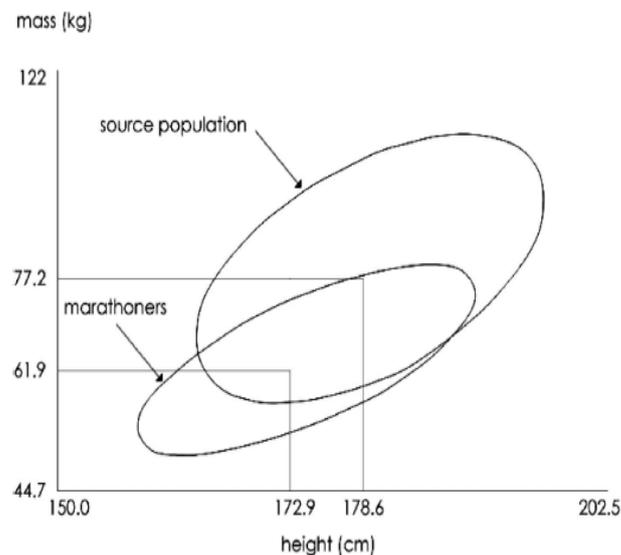
De même, grâce au concept de BOZ, la *figure 19* nous montre la faible probabilité qu'un individu de la population générale américaine possède un poids mais surtout une taille concordante avec les traits anthropométriques retrouvés chez les joueurs de NBA. La probabilité de correspondance morphologique dans les années 1940 était de 10,5% alors que seuls 4,9 % des jeunes américains possèdent un poids et une taille désormais en accord avec ceux et celles des joueurs de NBA.

*Figure 19 : Evolution de la zone de recouvrement bidimensionnelle (BOZ) des joueurs de NBA de 1940 à 1990. Figure tirée de Norton et Olds (12).*

### 2.4.5.4. Athlétisme et population générale

Dans leur article "*Physique and performance for track and field events*" O'Connor et al (263), observent que, sur presque 100 ans d'analyse des vainqueurs du marathon de Boston, la taille et le poids de ces derniers ont peu évolué en dépit des augmentations dans la population générale (298).

La *figure 20* exprime une sorte de BOZ des marathoniens, qui contrairement aux populations de SHN vues précédemment, s'écartent de la population générale dans l'autre sens et tendent vers des valeurs de poids et taille plus basses.



*Figure 20 : Distribution bidimensionnelle de la taille et du poids des marathoniens élités et de la population source. Figure tirée de O'Connor (263).*

Ces observations sont en accord avec le fait que les coureurs de longue distance pèsent généralement moins lourd que la population de référence du même âge et de même sexe (299).

Dès 1951, Parnell (11) avait observé que, par rapport à un groupe contrôle, les athlètes étaient plus grands, avec une plus grande longueur de jambes, et plus lourds (même pour les coureurs de fond et demi fond).

Selon Olds (284), dans de nombreux sports, l'évolution de la taille et du poids des athlètes a dépassé les tendances séculaires de la population générale, dont les athlètes sont issus et sélectionnés. Dans certains sports, les athlètes présentent des morphologies qui se trouvent très en marge de la répartition de leur population d'origine. Dès lors, de légères évolutions de celles-ci peuvent réduire considérablement le pool disposant de caractéristiques physiques appropriées pour la réussite sportive. Ces circonstances peuvent se rencontrer lors de crises graves (guerres civiles, épidémie, récession économique, sécheresse) avec leur cortège de malnutrition, de maladies infectieuses, de souffrances et de repli.

#### **2.4.6. Vers une évolution Darwinienne?**

Ces vitesses d'évolutions différentes entre SHN et population générale peuvent être interprétées selon une approche Darwinienne, en vertu de la structure compétitive et sélective du sport (300). Dans les sports où le physique est un élément important de la réussite, va s'opérer une sélection des organismes qui tend vers les morphologies les plus adaptées. La concurrence engendre une « course à l'armement » des gabarits au sein et entre les sports où les organismes adaptés deviennent de plus en plus extrêmes et de plus en plus rares. Selon O'Connor et al (263) le sport est donc Darwinien par nature car, au fil du temps, les plus adaptés morphologiquement restent sélectionnés par ce mécanisme.

#### **2.4.7. Conclusion**

Les analyses des variables anthropométriques et leurs évolutions ou différenciées entre SHN et individus en population générale soulignent le rôle important de ces caractères sur la performance. Elles le soulignent et l'affirment mais ne démontrent pas pour autant les liens qui unissent performance et poids ou taille.

## 2.5. Morphologie et performance

Comment les morphologies impactent-elles la performance ? L'analyse du gabarit des meilleurs athlètes octroie une bonne photographie de la direction de ces effets (299).

Certains auteurs (10,210,297,301,302) constatent que les athlètes les plus performants possèdent un physique différent de leurs concurrents. Il s'agira ici de référencer les articles qui relient la performance aux caractéristiques anthropométriques. En effet, des relations entre le succès en compétition et les traits physiques ont été identifiées dans une large gamme de sports (12), comme le rugby (284), les sports esthétiques (303), la natation (304), l'athlétisme (305), le ski (306) l'aviron (154) ou le handball (307–310).

### 2.5.1. Place des gabarits dans la performance

L'importance des caractéristiques anthropométriques s'exprime notamment à travers la persistance de certains de ces traits en dépit ou au delà des changements observés en population générale (263) (*i.e* stabilisation de l'IMC des marathoniens à l'encontre des incrémentations séculaires ou réduction de la probabilité qu'un individu de la population générale bénéficie des caractéristiques de taille et poids correspondant aux athlètes de NFL ; *chapitre précédent*). Le gabarit d'un athlète est un des déterminants de sa réussite ; il apparait une tendance chez les meilleurs athlètes qui gravitent autour de caractéristiques anthropométriques spécifiques leur permettant de performer dans leur sport (311). Cependant dans de nombreux cas, les relations entre morphologie et performances sont complexes et affectent, entre autres, demandes et réserves énergétiques.

Le gabarit peut être vu comme l'un des maillons de la chaîne qui conduit à la performance. Une combinaison idéale de taille et de poids en fonction d'un sport n'est pas suffisante en elle-même, mais son absence peut être un sérieux handicap (312–314).

Les études tentant de comprendre l'importance ou de quantifier la prégnance des caractéristiques anthropométriques sont très peu nombreuses. Certes les attributs physiques sont généralement des avantages sélectifs spécifiques au sport ; mais la majorité des études de terrain qui cherchent à

comprendre la performance tentent de l'expliquer par les facteurs physiologiques, biomécaniques ou psychologiques. Dans ce constat, les caractéristiques anthropométriques sont relayées à la rubrique descriptive de la population étudiée et sont rarement impliquées dans les analyses de prédiction de la performance ou intégrées dans les paramètres essayant d'expliquer la variance de cette dernière.

Pour autant, deux études ont démontré que de simples caractéristiques anthropométriques pouvaient fournir des prédictions de la performance athlétique du même ordre que celles obtenues à partir des variables physiologiques (15,16).

Par exemple, Tanaka et Matsuura (16) ont pu montrer que 20 à 40% de la variance de la performance en course pouvait s'expliquer par trois variables anthropométriques. Ils ajoutent que VO<sub>2</sub>max et Qmax combinés comptent, eux aussi pour 20 à 40% de la variance des performances. Ce qui a pu conduire Berg (315) à conclure que les gabarits devraient être incorporés aux équations prédictives de la performance, d'autant que les athlètes s'organisent à partir de ces caractéristiques morphologiques. Dans de nombreux sports, ces caractéristiques anthropométriques peuvent devenir des facteurs limitant la performance. Il est rare d'être confronté à des individus qui sont en mesure de compenser un profil morphologique totalement défavorable.

En dépit de l'absence de preuves empiriques de l'influence du physique sur les performances dans certaines disciplines, les entraîneurs comme les athlètes en sont souvent convaincus, à partir de l'expérience personnelle, fondée sur l'observation des sportifs les plus compétents (263). Il semble important de fournir de réelles preuves scientifiques de ces liens afin d'octroyer aux entraîneurs et sportifs des éléments pour enrichir la sélection, mais aussi dans le but de situer les athlètes dans leur « contexte morphologique ».

## 2.5.2. « Optimisation morphologique »

L'importance des facteurs anthropométriques est souvent évidente. Même des néophytes ou observateurs occasionnels s'aperçoivent que les sprinteurs sont plus musculeux, les marathoniens plus minces ou que les lanceurs présentent des gabarits nettement plus imposants.

Un concept phare abordé dans cette thèse sera celui de « **l'optimisation morphologique** », notion selon laquelle un spectre étroit de morphologies est associé à la réussite sportive (298). Cette optimisation morphologique opérerait selon deux mécanismes : la sélection et l'adaptation.

### 2.5.2.1. Compromis phénotypique : vers des optima morphologiques ?

Un phénotype ne peut être l'expression optimale de toutes les tâches, il résulte d'un compromis (316). Shoval et al expliquent que l'espace occupé par un phénotype est un « *morpho-space* ». Pour eux, les théories de sélection naturelle maximisent une fonction spécifique résultant en un phénotype optimal. Chaque être est confronté à un problème d'optimisation multi-objectif, dans le but d'obtenir le meilleur compromis entre ces différentes exigences. La performance décroîtrait à mesure qu'elle s'éloigne de l'archétype ou du morpho-espace optimal. Les auteurs comparent le meilleur compromis au « front de Pareto ». Dans cette ligne d'idée, nous testerons la présence de « **fronts de performance** » pour la taille, le poids ou l'IMC dans le « morpho-space » du haut niveau.

Il est probable que les SHN soient les meilleurs révélateurs de ces compromis phénotypiques dans le domaine de la haute performance.
--

### **2.5.3. Caractéristiques biométriques et performances physiques**

Des relations entre les mesures anthropométriques et des variables telles que force (317), capacités aérobiques et anaérobiques (318,319), détente horizontale, détente verticale, temps sur 50 yard (45,7 m), 600 yard (548,6 m) et 1 mile (1,61 km) ont été rapportées (320).

#### **2.5.3.1. Force, poids, taille et IMC**

En 1983, Wilmore (321) indiquait que la composition corporelle affecte grandement la force physique, la demande énergétique ainsi que de nombreuses capacités dans une variété de sports. Plus récemment Crewther et al (322) ont trouvé des relations significatives entre le poids de corps et les valeurs absolues du pic de force et de puissance chez des joueurs de rugby. De nombreuses études sur différents sports, relient les performances en sauts, squat, demi-squat, pompes et autres mesures similaires avec les caractéristiques anthropométriques telles que poids ou taille. Un exemple de Marques et al (171), concernant des volleyeurs professionnels, montre des relations significatives entre développé-couché, poids et taille. Une autre chez les judokas observe des relations linéaires entre poids et performance de force: les plus lourds performant mieux en développé-couché et squat (323). Les auteurs expliquent les différences entre les groupes de poids et de tailles par le paradigme d'échelle géométrique de Schmidt et Nielsen(31). Selon ce paradigme, la force est directement reliée à la CSA (Cross-Sectional Area ou section transversale), qui augmente avec l'incrémentation de la taille du corps, soulignant qu'une personne plus grande devrait mieux performer dans les activités où la force est un composant principal.

Pour l'IMC, bien que l'objectif de l'étude fut de comparer l'utilisation de modèle linéaire et non-linéaire, Sekulić et al (324) ont analysé poids, taille, IMC et les performances en pompes, abdominaux, détente verticale.

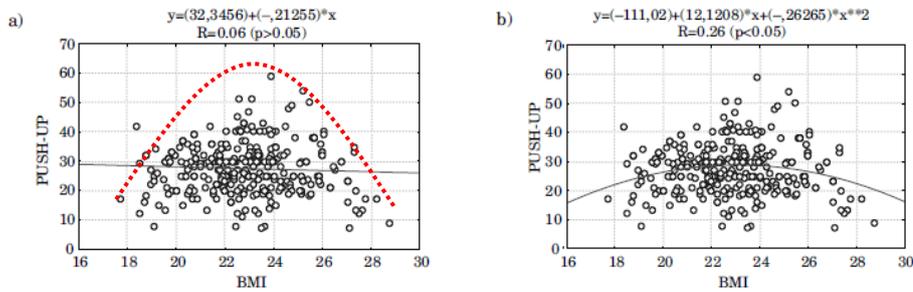


Fig. 1. Linear and non linear correlation model for the variables: BMI – body mass index and PUSH-UP, (a) Linear relation BMI, PUSH-UP, (b) Non linear relation BMI, PUSH-UP.

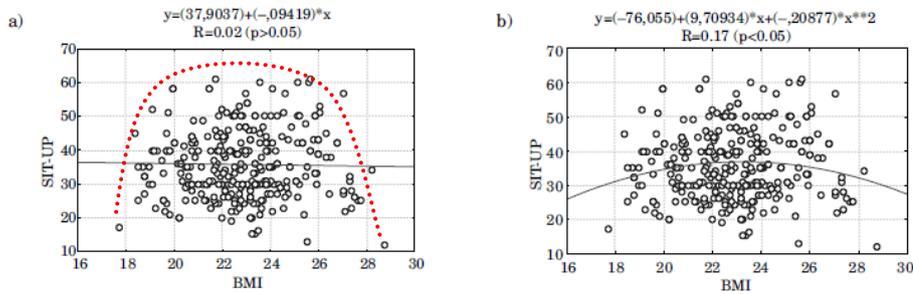


Fig. 2. Linear and non linear correlation model for the variables: BMI – body mass index and SIT-UP, (a) Linear relation BMI, SIT-UP, (b) Non linear relation BMI, SIT-UP.

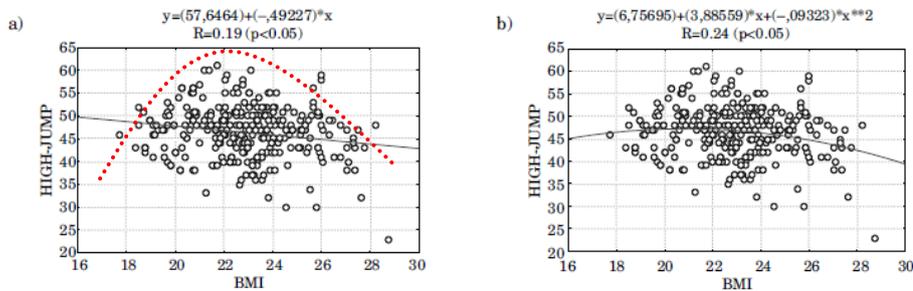


Fig. 3. Linear and non linear correlation model for the variables: BMI – body mass index and HIGH-JUMP, (a) Linear relation BMI, HIGH-JUMP, (b) Non linear relation BMI, HIGH-JUMP.

Figure 21 : Synthèse des relations linéaires et non linéaire entre push-up, sit-up, détente et IMC. Figure tirée de Sekulić et al (324).

L'idée non soulevée par les auteurs, est qu'en observant l'enveloppe de l'ensemble des points (figure 21 : traits pointillés rouges), nous pourrions voir émerger des intervalles favorables concernant l'IMC et la performance en pompes, abdominaux et détente. Sans le dire et sur de petits échantillons, les auteurs révèlent le dessin de relations entre IMC et performance en soulignant un intervalle propice aux meilleurs résultats.

#### 2.5.3.2. VO<sub>2</sub>max, poids et IMC

Quand la masse augmente, la consommation d'oxygène par kg de masse transportée diminue chez l'enfant (325) et l'adulte (326). En effet, la consommation d'oxygène par kilogramme de poids de corps est inversement proportionnelle à la masse corporelle (299). Chez l'animal, la consommation d'oxygène par kilogramme de masse corporelle décroît aussi avec l'augmentation de la masse du corps (327).

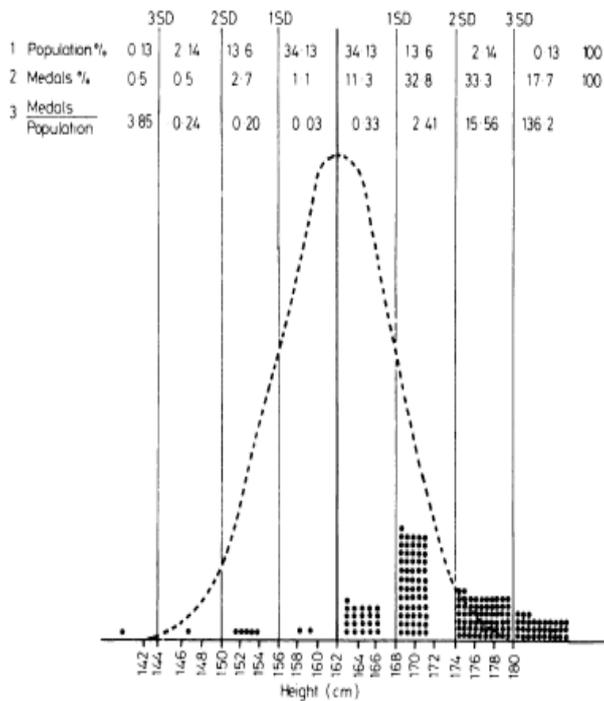
Pour certains auteurs (328), la différence de VO<sub>2</sub>max entre hommes et femmes réside principalement dans des différences de taille et de masse.

Concernant l'IMC, son augmentation (couplée à celle du tour de taille) chez les sédentaires, entraîne une diminution de la VO<sub>2</sub>max (329), tout comme l'augmentation de la masse grasse chez les SHN (323).

#### **2.5.4. Activités sportives**

Des études sur les athlètes internationaux, femmes et hommes, ont incontestablement montré des différences morphologiques entre les athlètes de différents sports ou de différentes épreuves (10,209,258,297,312,330–332). Cependant, les liens directs établis avec les caractéristiques anthropométriques sont plus rares.

Vers le début des années 70, le Dr Khosla (333,334), montre l'existence d'un biais énorme en faveur des athlètes les plus grands, avantagés dans leur pratique. En 1983, cet auteur réalise une étude se focalisant sur les huit disciplines féminines introduites aux JO de Montréal (handball, basketball, et six catégories d'aviron) (314). Il observe que ce sont les plus grandes et lourdes qui remportent les médailles. Le poids moyen des championnes olympiques est supérieur de 13,6 kg par rapport aux non médaillées.



La figure 22 montre les écarts de taille entre la population générale et les athlètes médaillées (les athlètes sont représentées par les points noirs). Dans le même registre, Khosla et McBroom (312) ont comparé les distributions de taille de 824 finalistes olympiques femmes par rapport à celles de la population générale. Ils montrent l'avantage conféré par une grande taille à l'aide d'un ratio (nombre de finalistes/nombre de femmes présentant la même taille dans la population référence). Le ratio augmente avec les grandes tailles, montrant que la possibilité de devenir une finaliste est 191 fois plus grande dans le groupe des plus grandes.

Figure 22: Distribution de la taille des femmes américaines de 18 à 24 ans et de la taille des 186 médaillées des huit nouvelles disciplines. Figure tirée de Khosla et McBroom (312).

Ce constat est à interpréter et modérer selon les contraintes des activités car il est probable que sur les disciplines prises en compte ici, une plus grande taille soit favorable. Pour autant, la notion de « biais en faveur des plus grands » dans le papier « *Sport for tall* » (314) est à relativiser en fonction des sports.

Le paragraphe à venir détaillera les études qui ont pu établir des relations entre le poids, la taille, l'IMC et les performances des sports étudiés dans ces travaux de thèse.

#### 2.5.4.1. Rugby

Les caractéristiques anthropométriques des joueurs semblent refléter les exigences imposées par le sport (231). C'est pourquoi certaines études comparent les traits anthropométriques de joueurs de divisions différentes. Une étude compare, lors d'une coupe du monde, le rang final et les gabarits.

### 2.5.4.1.1. *Tendances Internationales*

#### 2.5.4.1.1.1. Comparaisons selon les niveaux

Dès 1973, Bell (233) montre des différences anthropométriques significatives entre les joueurs de première et deuxième catégories, tendance confirmée par Riggan et Reilly dans l'ouvrage de Lees et Davids (283). En 1995, Quarrie et al (231) réalisent une étude qui a pour objectif de quantifier les caractéristiques anthropométriques d'une cohorte de joueurs néo-zélandais de différents niveaux. Ils concluent que les joueurs de niveaux supérieurs présentent des gabarits plus imposants. Des observations similaires ont également été réalisées par Olds (284) qui a montré que le poids moyen des joueurs d'élite depuis 1975 est de 98,6 kg, tandis que celui des joueurs de niveau national est de 96,3 kg et de 87,1 kg pour leurs homologues de niveau régional. Il observe les mêmes tendances sur la taille (185 vs 184 vs 181 cm).

Dans les études utilisant ce type de comparaison, les auteurs sous-entendent que les différents attributs reflètent les exigences sous-jacentes de la performance. Ce constat est largement accepté par les sélectionneurs, les entraîneurs et les joueurs (235). Ceci a pu amener Bell (335) à affirmer que la performance est déterminée par le gabarit, et qu'il existerait un « poids optimal » favorisant cette dernière. Pour autant, quelles sont ces caractéristiques, ce poids optimal, cette taille favorable ? La description par niveau est une première réponse mais elle ne démontre pas les liens entre performance et caractéristiques anthropométriques, elle révèle et expose des écarts.

#### 2.5.4.1.1.2. Comparaisons selon la performance

Seul Olds (284) a pu montrer qu'il existait une association entre gabarit et succès lors de la coupe du monde 1999. Le gabarit se présente comme un indicateur d'efficacité : les équipes dont les joueurs sont les plus grands et les plus lourds surpassent les autres. L'auteur conclut que le poids des joueurs est un avantage dans les sports de contact comme le rugby.

#### 2.5.4.1.2. *Tendances françaises*

##### 2.5.4.1.2.1. Comparaisons selon les niveaux

Dans sa thèse, intitulée « Le complexe de Rambo : les conséquences d'une professionnalisation annoncée dans la population des rugbymen français de haut niveau (1960-2003) », Allain (289) explique qu' « en ce qui concerne le niveau de jeu, à de rares exceptions, l'écart de taille est toujours en faveur des joueurs du Top 16 » (par rapport aux championnats de niveau inférieur). Indépendamment du poste, les majorations sont toujours plus conséquentes pour les joueurs des championnats supérieurs.

Dans le même ordre d'étude, Doutreloux et al (217) ont comparé les joueurs de rugby français à ceux de l'hémisphère sud. Les rugbymen français sont en moyenne significativement moins grands et moins lourds que ceux qui évoluent dans l'hémisphère sud. Les écarts moyens sont de 1,9 cm et 6,23 kg.

Le même type de réserves s'exerce ici, puisque la comparaison des caractéristiques anthropométriques, révélatrice d'une tendance, doit être ensuite démontrée comme corrélée à la performance.

#### 2.5.4.1.3. *Tendances chez les jeunes joueurs*

Le profil anthropométrique de joueurs adolescents irlandais en stage de préparation a été mesuré (161). L'analyse des auteurs révèle que le poids des joueurs est prédictif du poste de ces derniers et que, parmi les variables prises en compte (taille, poids, pourcentage de masse grasse, de masse maigre), seul le poids contribue significativement à leur modèle.

2.5.4.1.4. Conclusion

La majorité des études sur morphologie et performance en rugby repose sur des comparaisons entre divers championnats ou niveau. Régulièrement, les auteurs déclarent que le gabarit des joueurs est un élément important à prendre en compte dans les facteurs de performance. Cependant peu d'études relient ou corrélient une performance sur le terrain et les caractéristiques anthropométriques. Seul Olds (284), sur les 20 équipes de coupe du monde 1999, a relié poids, taille et rang final. Une étude sur un plus grand nombre de compétitions et de joueurs permettrait sans doute une compréhension plus détaillée et plus robuste de ces liens.

2.5.4.2. Foot US

Dans leur étude, Harp et Hecht (336) ne trouvent pas de relation entre l'IMC moyen des équipes et leur classement dans leur conférence (*figure 23*). Le problème est que l'écart entre les moyennes est

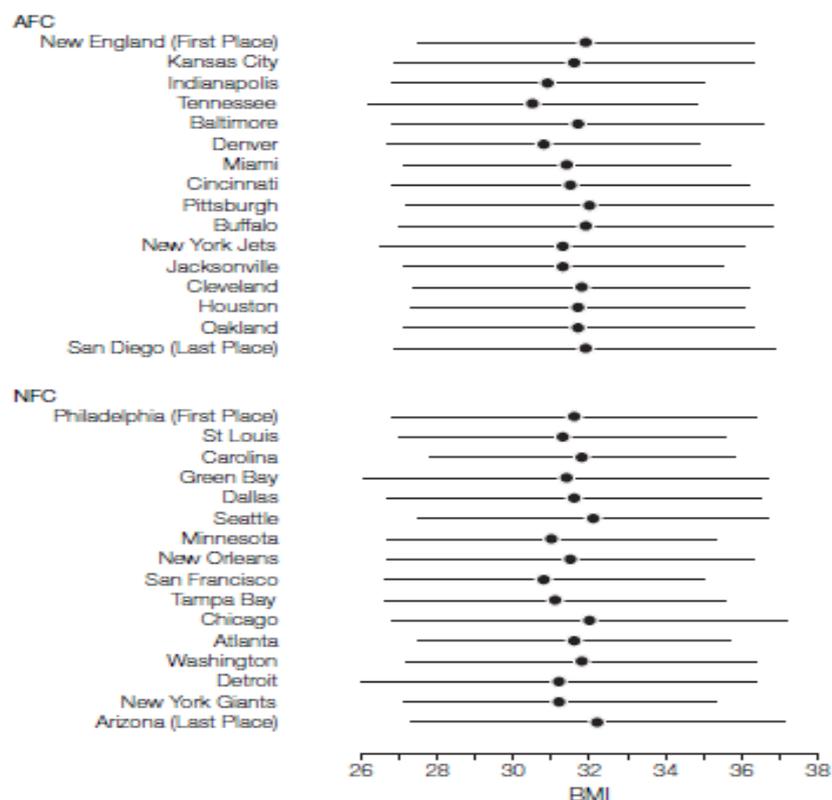


Figure 23: Classement et IMC des équipes de NFL lors de la saison 2003-2004. Figure tirée de Harp et Hecht (336).

trop faible et la variabilité intra-équipes est, elle, trop grande. De ce point toutes les équipes sont similaires, la différence ne peut se faire que sur des descriptions plus fines avec par exemple des gradients de performance.

C'est pourquoi, Jacobson (219) affirme que le gabarit est un paramètre incontestable dans l'ascension au niveau supérieur. L'exemple pris est celui des « *offensive linemen (OL)* » et « *defensive linemen (DL)* » les mieux notés pour la *draft* 2011 de NFL. Ils pèsent respectivement 141,6 kg et 138,2 kg et mesurent 196,9 cm et 191,5 cm, valeurs proches des OL et DL de 10 équipes NFL choisies aléatoirement.

En football américain, les gabarits les plus imposants ont plus de probabilités de réussir (12,284,292). Il reste à démontrer la nature et l'évolution de ces liens.

#### 2.5.4.3. Basketball

Quelques études sur le basketball affirment que la taille est le facteur anthropométrique le plus discriminant par rapport à la performance (333) et qu'une grande taille confère des avantages (165,284).

##### 2.5.4.3.1. *Comparaisons selon les niveaux*

A partir de ces publications, Erčulj et Bračić (242) ont réalisé une comparaison de joueurs de trois divisions différentes. Les joueurs de première division sont les plus grands et les plus lourds, suivis par ceux de division 2, alors que les joueurs évoluant en 3<sup>ème</sup> division sont les plus minces et petits.

##### 2.5.4.3.2. *Comparaisons selon la performance*

Sur l'ensemble de joueurs et joueuses d'un championnat, Hoare (337) a réalisé une étude sur les profils de performance à la lecture des variables anthropométriques et physiologiques. Il constate que les meilleurs joueurs et joueuses (Top 8 par postes des championnats australiens moins de 16 ans) diffèrent sur un nombre de paramètres physiologiques mais aussi anthropométriques. Il a

montré que les meilleurs meneurs et ailiers sont significativement plus grands que leurs homologues moins performants, cette tendance se retrouve pour tous les postes et pour les joueuses (où au-delà de la tendance la significativité s'applique pour les ailières fortes).

Une étude portant sur le championnat du Monde féminin de 1994 avait comme objectif d'établir un profil anthropométrique des joueuses et d'identifier les facteurs discriminants de la réussite en basketball (241). Les joueuses des équipes du Top 5 sont significativement plus grandes que leurs homologues des 5 moins bonnes équipes. Sur l'ensemble des matchs du championnat du monde, les auteurs ont montré que les arrières des 5 meilleures équipes ont une part plus importante dans le scoring (46% du total des points) que celles des 5 moins bonnes équipes (32% du total).

Sodhi (165) réalisa une étude sur l'équipe nationale de basket d'Inde de 1978 (29 mesures anthropométriques sur les 12 joueurs). Il conclut que les joueurs les plus grands sont avantagés. Par exemple, le plus grand pivot joue plus et score plus que les autres pivots. Sur l'ensemble des joueurs, l'auteur montre une relation significative entre taille et scoring, rebonds et performance globale et conclut que la taille joue un rôle essentiel en basketball.

En conclusion, l'importance d'une grande taille en basket est démontrée par la description entre différents niveaux et relié à la performance en comparant les meilleurs performeurs aux moins bons. Cependant, à ce jour, l'existence d'un optimum de performance ou d'une taille optimale n'ont pas été établie.

#### 2.5.4.4. Hockey sur glace

Des études sur l'analyse de la performance en hockey qui détaillent ou décrivent simplement les caractéristiques anthropométriques existent (247,248,338), mais seulement deux interpellent les caractéristiques anthropométriques comme élément de la performance.

##### 2.5.4.4.1. *Comparaisons selon les niveaux*

Une récente étude (339) a examiné le profil de 204 joueuses professionnelles de hockey sur glace de 13 pays différents, qui ont été sélectionnées par la Fédération Internationale de Hockey sur Glace

pour participer à un camp d'entraînement. Dans la batterie de tests réalisés, les caractéristiques anthropométriques furent mesurées. L'ensemble des variables ont été analysées en fonction du succès des équipes auxquelles les joueuses appartenaient (groupe 1: Canada, Etats-Unis, groupe 2: Suède et Finlande, groupe 3: les autres pays). Les athlètes des pays ayant les meilleurs bilans internationaux sont plus lourdes et présentent moins de graisse corporelle que leurs homologues des équipes moins bien classées.

#### 2.5.4.4.2. *Liens direct avec la performance*

L'étude de Burr et al (340) avait comme objectif de déterminer parmi des variables physiques, lesquelles permettaient au mieux de prédire le potentiel de joueurs de hockey sur glace professionnels lors de leur draft. Les auteurs ont créé un index corporel basé sur la taille, la masse maigre et le développement musculaire. Cet index s'avère aussi important afin de différencier les joueurs que le pic de puissance anaérobie (autre facteur discriminant). Selon les postes, la variable anthropométrique semble plus efficace pour catégoriser les avants, tandis que le pic de puissance anaérobie et le taux de fatigue sont plus utiles pour différencier les défenseurs. Les auteurs concluent que les mesures de condition physique et les données anthropométriques sont précieuses pour aider à prédire le potentiel des futurs joueurs de hockey.

#### 2.5.4.5. Baseball

Carvajal et al (255) nous apprennent que peu de littérature existe sur l'association des profils anthropométriques des joueurs de baseball et la performance.

##### 2.5.4.5.1. *Comparaison selon les niveaux*

Une étude sur 2 ans, incluant 343 joueurs professionnels, a comparé les variables anthropométriques avec de nombreux indicateurs de performance (home run, bases totales, bases volées, et également SLG (*slugging percentage* qui détermine la puissance au bâton d'un frappeur)) (257). Une comparaison entre les niveaux a mis en exergue que les *rookies* (c'est-à dire les nouveaux entrant dans la *league*) et les joueurs de ligues mineures étaient moins lourds et surtout présentaient

une masse maigre inférieure que les joueurs de MLB. Cependant, les variables anthropométriques ici mesurées (taille, poids, composition corporelle) n'ont pas réussi à ajouter une explication supplémentaire à la variance des performances spécifiques de baseball.

#### 2.5.4.5.2. Comparaison selon la performance

Forts de cette lacune dans la littérature, Carvajal et al (255) ont établi des relations entre les morphologies et les performances des joueurs. Les « *First basemen* » et « *outfielders* », considérés comme les meilleurs joueurs offensifs avec le plus haut SLG (*slugging percentage*), formule mathématique pour calculer la moyenne de puissance d'un frappeur, présentent des masses musculaires supérieures. De plus, des différences morphologiques en fonction de la performance ont aussi été constatées chez les lanceurs. En effet les lanceurs les plus performants ( $\geq 600$  pourcentage de victoire (Wpct)) sont significativement plus lourds.

Une récente étude de Nakata et al (341) avait pour objectif de relier différentes variables de la performance dont les mesures anthropométriques de 164 jeunes joueurs de baseball. Leur analyse révèle notamment comme éléments prédictifs de la performance de frappe, l'âge et l'IMC. Selon les auteurs, cette étude fournit des preuves scientifiques de l'impact de certains tests de performance spécifiques et des caractéristiques physiques du corps avec la performance de frappe au bâton. La vitesse de frappe a aussi été étudiée par Szymanski et al (254) qui ont réalisé un article portant sur les relations entre les caractéristiques anthropométriques, physiologiques et la vitesse de frappe à la batte (avant et après programme d'entraînement). Ils trouvent des relations significatives entre taille, poids, masse maigre et vitesse de frappe.

Mangine et al (342) ont examiné les relations entre les mesures anthropométriques, de tests physiques et de performance chez les joueurs de baseball professionnels. Ils utilisent « *l'ultimate zone rating extrapolation (UZR/150)* » qui est le taux de performance de *run* sauvés ou ratés au sein d'une zone de responsabilité par rapport à la moyenne de la ligue. Ces auteurs montrent que le meilleur élément prédictif de l'UZR/150 est la masse corporelle.

#### 2.5.4.6. Athlétisme

Un physique adapté est considéré comme l'un des préalables à une bonne performance en athlétisme. On pourrait donc supposer que, selon les distances ou les événements athlétiques, des contraintes anthropométriques s'exercent et des profils particuliers s'expriment. D'autant plus que chez les coureurs, une gamme de variables anthropométriques comme le poids, la taille, l'IMC, la masse grasse, les plis cutanés ou la longueur des membres inférieurs affectent la performance (343).

##### 2.5.4.6.1. *Les courses*

Par le passé, les variables comme la  $VO_2$ max ou la puissance maximale aérobie ont clairement été investies afin de comprendre leurs impacts sur la performance de course (344–347). Cependant, la composition corporelle a également fait l'objet d'études (348–350), il s'agira d'en définir les liens déjà établis.

###### 2.5.4.6.1.1. Comparaison à la population générale

Les coureurs de longue distance (10 000m et marathon) ne présentent pas de plus grande taille que les individus de même âge de la population générale (333). Par contre, les sprinteurs sont toujours en moyenne plus grands que leurs contemporains sédentaires.

###### 2.5.4.6.1.2. Comparaison selon la performance

Sur des comparaisons prenant en compte les participants aux JO de Munich et Montréal, Khosla (313) montre que, sur le sprint (100m, 200m et 400m), les champions olympiques sont plus lourds que les finalistes, eux-mêmes plus lourds que les autres participants. Cependant sur les longues distances (5000m, 10 000m et marathon), les champions olympiques sont plus maigres que les finalistes, eux-mêmes moins lourds que leurs opposants n'atteignant pas la finale.

#### 2.5.4.6.1.3. Sprint

En 1954, dans le but de vérifier si de bonnes performances présupposent un type de physique, Per et al (265) examinent les corrélations entre performance et certaines mesures morphologiques. Ils révèlent que la taille moyenne des sprinters est significativement corrélée à la performance ( $r= 0,31$ ).

En sprint, la vitesse tend à augmenter avec la taille (31,70). De plus, les analyses de Bejan et Marden (351) sur de nombreuses espèces incluant les humains, dévoilent que la force, la vitesse et la puissance augmentent avec le poids : les plus rapides sont les plus grands et les plus lourds (352). Ces auteurs (353) ont mis en évidence que les records du monde en sprint et natation étaient réalisés par des athlètes avec des centres de masse différents. Par exemple, une augmentation de 3% de la hauteur du centre de masse engendre une augmentation de 1,5% de la vitesse de course (353), phénomène imputable aux différences morphologiques.

#### 2.5.4.6.1.4. Fond et demi-fond

Les coureurs de longues et moyennes distances arborent des petites tailles et une faible masse corporelle (11,301,354). Mais quels sont les liens déjà formulés entre endurance et anthropométrie ? Quels avantages peuvent-ils tirer de ces caractéristiques ?

##### 2.5.4.6.1.4.1. Comparaison à la population générale

Selon Bergh et al (299), les coureurs de longues distances pèsent habituellement moins que la moyenne des personnes comparables de même âge et sexe soulignant l'avantage à être léger dans ce type d'épreuve. Concernant la taille, Khosla (355) a pu montrer que toutes les médaillées olympiques étaient plus grandes que la moyenne de taille des femmes de la population générale, sauf les marathoniennes.

#### 2.5.4.6.1.4.2. Comparaison selon les niveaux

Dans leur étude, O'Connor et al (263) affirment que le poids des coureurs de 5000m et 10 000m varie selon le niveau. Le poids moyen des coureurs internationaux est de 61,7 kg, celui des athlètes de niveau national de 65,2 kg et celui des coureurs en club de 67,1 kg. Ils montrent un gradient de poids selon le niveau et concluent qu'un faible poids de corps est un élément important de la réussite en course (sur 5000m et 10 000m).

Un autre étude s'est intéressée aux caractéristiques anthropométriques des coureurs de 10 000m selon leurs niveaux (356). Trois groupes furent constitués:

- Groupe 1 : temps en dessous 29 minutes et 30 secondes (Groupe élite)
- Groupe 2 : temps entre 30 et 35 minutes (Groupe bons coureurs)
- Groupe 3 : record entre 35 et 45 minutes

Les meilleurs coureurs étaient plus petits, plus maigres et avec une somme des plis cutanés inférieure à ceux des deux autres groupes. Un gradient de poids fut, là aussi, observé : 64,4 kg pour le groupe 1, 66,3 pour le 2 et 69,2 pour le 3. De plus, une régression multiple prédictive du temps sur 10 km indique qu'avec le volume d'entraînement, la distance parcourue par semaine, le nombre d'années de course et les caractéristiques anthropométriques, le pourcentage de la variance totale était de 85,6%.

#### 2.5.4.6.1.4.3. Liens directs avec la performance

De nombreux paramètres anthropométriques sont négativement reliés à la performance en fond et demi-fond, comme le poids (157,304,356,357), l'IMC (358), la masse grasse (358–361), la somme des plis cutanés (356), l'épaisseur du pli cutané des membres inférieurs (264,356,362,363) ou encore la taille (356,364–366).

Par exemple, le poids expliquerait à lui seul 28% de la variabilité de la performance sur 10km chez les femmes (367), soit une portion certes modérée mais non négligeable de la performance. Dans la même lignée d'étude, Tanaka et Matsuura (16) ont pu montrer que 20 à 40% de la variance de la

performance en course pouvait s'expliquer par trois variables anthropométriques (la linéarité du gabarit, la circonférence du gabarit et la graisse sous-cutanée). Par la suite Tanaka et al (167) ont cherché à stratifier l'importance des éléments connus de la performance sur 3000m, 5000m et 10 000m. Ces auteurs trouvent des corrélations entre le 3000m, le poids et la taille, le 5000m et le poids et le 10 000m avec le pourcentage de masse grasse. Ils suggèrent que la VO<sub>2</sub>max ne peut être le seul facteur décisif du succès en course mais que l'explication se situerait plutôt dans la combinaison de plusieurs attributs tels que le seuil de lactate, la composition corporelle et le statut hématologique.

#### 2.5.4.6.1.4.4. Economie de course

La mesure de l'économie de course est un critère connu affectant la performance et l'efficacité d'un coureur de longue distance (368). La capacité d'un coureur à minimiser la dépense énergétique à une vitesse donnée est un déterminant de la performance (369). Dans leur revue sur les facteurs affectant l'économie de course, Morgan et al (370) déclarent que la masse corporelle est un des déterminants importants. Le coût énergétique est corrélé à la taille et au poids : plus les athlètes sont grands et lourds et plus leur économie de course est faible.

#### 2.5.4.6.1.4.5. Epaisseur des plis cutanés

Chez les coureurs, un excès de tissu adipeux requiert généralement un effort musculaire supérieur et par conséquent un coût énergétique supérieur pour une vitesse donnée.

Certaines études (264,363) ont identifié des associations entre l'épaisseur des plis cutanés chez les 50 meilleurs athlètes espagnols (hommes et femmes) selon la distance. Ces études montrent qu'un léger excès de graisse confère des désavantages dans la performance de haut niveau quelle que soit la distance. En effet, de nombreuses études (371,372) rapportent que les sujets présentant des masses grasses importantes ont des plus faibles efficacités mécaniques. Et, qu'à l'inverse, de faibles masses grasses, sont positivement associées à l'amélioration du temps de course sur 10 000 m (264,356,362,363), 1500m (356) ou le marathon (373). Deason et al (374) ont observé des relations similaires chez les coureurs de 800m. Brandon et Boileau (375) reportent des corrélations de  $r=0,67$ ,  $0,64$  et  $0,69$  entre la masse grasse et les temps sur 800m, 1500m et 3000m, respectivement.

A la lecture de ces études, il semble en effet logique que la performance en athlétisme (sprint, demi-fond et fond) repose sur de nombreux critères, mais il apparaît indéniable que les caractéristiques anthropométriques jouent un rôle prégnant, même si leur quantification est parfois difficile.

#### 2.5.4.6.2. *Marathon*

Dès 1931, Bramwell et Ellis (376) avaient reporté sur 28 marathoniens, qu'en comparaison aux autres athlètes olympiques, ces derniers détenaient de plus fins bustes, troncs et gabarits.

##### 2.5.4.6.2.1. Comparaison à la population générale

Le poids des vainqueurs du marathon de Boston n'a quasiment pas varié (263), en dépit des évolutions séculaires de taille et de poids de la population générale suggérant l'importance de ce facteur. Ceci est une indication considérable dans l'évolution séculaire et souligne l'intérêt que l'on doit porter à cet indicateur.

##### 2.5.4.6.2.2. Comparaison selon la performance

Dans leur étude sur les marathoniens, Pollock et al (377) signalent que les meilleurs sont moins lourds, données corroborées par Hagan et al (378) qui ajoutent qu'ils sont aussi moins grands et présentent donc un IMC inférieur. En effet, les faibles IMC des coureurs africains et leur petits gabarits semblent être des éléments importants de leur réussite (379,380).

##### 2.5.4.6.2.3. Liens directs avec la performance

Hagan et al (378) rapportent des coefficients de corrélation entre temps de course et poids de  $r=0,41$ . De plus pour les meilleurs marathoniens, 76% de la variation de la performance peut s'expliquer par l'IMC et l'historique de l'entraînement. Chez les marathoniennes, l'IMC et le poids

sont aussi positivement reliés à la performance (358). Par contre, l'IMC est un meilleur élément prédictif de la performance chez les femmes avec une corrélation de  $r=0,70$ .

#### 2.5.4.6.3. Conclusion Courses

La lecture des articles sur le sujet recentre dans le débat la dualité des exigences en matière de morphologie ; à savoir un profil léger et fin pour les longues distances, et un profil musculeux pour les sprinteurs. Certains vont plus loin, pensant que le sprint ne peut être dominé que par des athlètes de plus en plus grands et lourds alors que le constat pour le marathon semble inverse. L'explication de cette dichotomie pourrait résider dans une étude cherchant à comprendre l'organisation structurelle des athlètes sur tout le spectre de l'athlétisme, afin d'identifier les liens entre caractéristiques anthropométriques optimales et performance. En accord avec les préconisations de Berg (315) qui, dans sa revue de littérature sur l'athlétisme, souligne le manque d'études impliquant les caractéristiques anthropométriques dans les facteurs de performance.

#### 2.5.4.7. Synthèses des études reliant morphologie et performance (autres sports)

L'analyse des autres sports fait majoritairement ressortir des démonstrations selon 3 méthodes.

1. Comparaison des SHN à la population générale comme par exemple en Gymnastique (155,381).
2. Comparaison selon différents niveaux ou championnats, comme en triathlon (382,383), handball (307,308), cyclisme (311), aviron (154), gymnastique (384), judo (323), volley-ball (168,385), football (75) (184) ou même escalade (386).
3. Comparaison selon la performance (par exemple au sein d'une compétition) comme en triathlon (357,360,383,387,388), natation (389), handball (309), aviron (152,153,268), gymnastique (390–392), tennis (163), volley-ball (207), football (183), ou escalade (162)

Très peu de liens directs entre morphologie et performance sont établis (360,393).

En natation, une étude de Dufour et al (310) a permis d'établir un lien entre la taille de 50 nageurs (30 garçons et 20 filles) et leur vitesse de nage (crawl sur 25 mètres), montrant ainsi que la différence de temps de parcours entre les filles et les garçons serait plus liée au dimorphisme sexuel qu'à une qualité de nage. Le poids et la taille sont significativement corrélés à la vitesse record ( $r=0,87$  et  $r=0,84$ ). Parmi les nageurs, ce sont essentiellement les plus grands qui se maintiennent le plus longtemps à un haut niveau de performance. Selon les auteurs, la différence de performance n'est qu'une conséquence du dimorphisme lié à la taille et non d'une différence de qualité sportive des nageurs.

Dans une étude de 2007, Sekulić et al (394) avaient comme objectif de définir l'influence de la taille, du poids et de l'IMC sur le temps de course en 50m (FS50) et 400m (FS400) nage libre. La taille ressort comme la caractéristique anthropométrique prédisant le mieux la performance. Dans leur étude, Sekulić et al (394) comparent un modèle linéaire et non linéaire. Ainsi, pour les hommes sur 400m, le modèle non linéaire explique 13% de plus de la variance de la performance, phénomène encore plus observable chez les femmes avec une variance prise en compte pour 20% de plus.

Ces auteurs, avec ces prédictions améliorées par les modèles non linéaires, se rapprochent, mais sans le décrire ou l'énoncer, de la notion de poids optimal (figure 24).

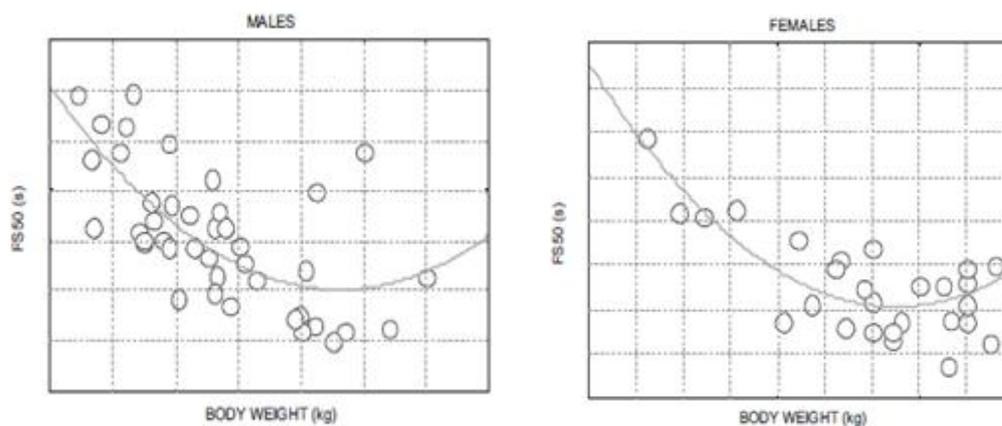


Figure 24 : Modèle non linéaire modélisant le poids des nageurs et nageuses de 50m nage libre. Figure tirée de Sekulić et al (394)

Une autre approche intéressante est celle des championnats du monde de handball qui se sont déroulés en Egypte en 1999, de Mahour Bacha et al (309). Ils ont montré des corrélations significatives entre le classement et la taille ( $r=-0,79$ ), mais aussi le poids et la performance ( $r=-0,58$ ).

Selon les auteurs, la stature se présente comme un facteur important et prédominant de la haute performance en handball. Les onze premières équipes du tournoi enregistrent une stature supérieure à la moyenne générale des autres équipes.

Cette étude montre qu'il est possible de percevoir des différences anthropométriques des sélectionnés nationaux au sein de la compétition.

### 2.5.5. Conclusion des études reliant morphologie et performance

L'ensemble des études reliant morphologie et performance repose sur la comparaison des athlètes à la population générale, la comparaison d'athlètes de différents niveaux ou de différents classements au sein d'une compétition. Ces discriminations selon le niveau ou la performance comparent et révèlent des différences jugées favorables aux SHN. Cependant, certaines études corrélient directement les facteurs anthropométriques avec des indicateurs de performance, mais elles les relient *juste* sans rechercher de valeurs propices à la performance.

Les notions d'intervalles favorables à la performance ou d'optima morphologiques ne sont jamais évoquées.

En rugby, seul Olds (284), et sur une seule coupe du Monde, a relié poids, taille et rang final. Une étude sur un plus grand nombre identifiera de manière plus précise et plus robuste ces liens.

En basketball, les comparaisons par niveaux et des meilleurs joueurs vis-à-vis des moins performants ont mis en évidence l'importance de la taille. Cependant, à ce jour, l'existence d'un optimum de performance ou d'une taille favorable n'a pas été établie.

En athlétisme, la distinction morphologique entre sprinteurs et coureurs de plus longues distances est établie. Toutefois, une étude ordonnant l'organisation structurelle des athlètes (hommes et femmes) sur tout le spectre de l'athlétisme permettra d'identifier les liens entre caractéristiques anthropométriques optimales et performance.

### 3. Objectifs de la recherche

L'ensemble des travaux évoqués dans la précédente revue de littérature identifie quatre axes pour démontrer les liens entre performance et caractéristiques anthropométriques. Ces liens sont principalement actés par des études comparatives entre traits anthropométriques des SHN et ceux des individus de la population générale, ou de sportifs de différents niveaux, divisions ou compétitions. De façon très marginale, des liens directs ont été recherchés, mais ces études trop peu nombreuses doivent être renforcées.

Or les notions d'intervalles favorables à la performance ou d'optima morphologiques n'ont pas été démontrées.

Notre travail de recherche étaye ces quatre axes en prenant comme objectif principal d'étudier les évolutions morphologiques des sportifs de haut niveau et d'identifier les liens structurant performance et caractéristiques anthropométriques.

Dans un premier temps, nous mesurerons l'évolution des paramètres biométriques des joueurs seniors, juniors et minimes de rugby à XV de 1<sup>ère</sup> division française. La deuxième étude s'attachera à étudier l'évolution des caractéristiques anthropométriques chez les joueurs internationaux de rugby participant aux Coupes du Monde et identifier les éléments associés à la performance.

Nous montrerons des évolutions vis-à-vis de la population générale. Nous définirons ensuite ces relations pour d'autres sportifs sélectionnés selon des gabarits extrêmes, tels que les joueurs de football américain ou de basketball. Les objectifs de la troisième étude seront de comparer les évolutions séculaires de poids, taille et IMC des athlètes des quatre grandes ligues professionnelles américaines et la population générale, d'observer l'émergence d'une différenciation selon la spécificité de postes, et d'étudier la relation entre taille et performance.

Les optima et intervalles de performance étudiés précédemment amènent une réflexion similaire autour de la composante primaire du mouvement : la course. Quels liens structurent poids, taille, IMC et vitesse ? L'objectif de la quatrième étude sera d'étudier ces relations selon le spectre des

distances en athlétisme et d'évaluer l'IMC en tant qu'indicateur de performance. Par la suite, l'étude cinq vérifiera si les athlètes féminines présentent des organisations morphologiques similaires aux hommes et mesurera l'impact des écarts morphologiques sur les écarts de vitesse.

La dernière étude concernera la performance au marathon tant sur le plan historique, qu'anthropométrique ou saisonnier et replacera les gabarits dans la globalité de la performance.

De tels travaux permettront de statuer plus précisément sur la pertinence des caractéristiques anthropométriques et leur utilisation dans le cadre de l'entraînement, la sélection et l'optimisation de la performance de haut niveau.

## 4. Méthodes transversales

### 4.1. Méthodes connues

L'importance relative des caractéristiques anthropométriques et de l'optimisation morphologique peut être quantifiée, selon la littérature sur le sujet, à partir de 4 méthodes :

1. La comparaison des caractéristiques anthropométriques des SHN à celles de leurs homologues en population générale.
2. La comparaison évolutive des caractéristiques anthropométriques. L'évolution des qualités anthropométriques des SHN est comparée aux tendances séculaires observées en population générale.

Dans le cas de comparaison à la population générale, la population dite référence ou source doit présenter le même âge que la population des athlètes et être représentative.

L'équipe d'Olds (12,263,284) s'est interrogée sur la façon d'identifier l'importance du gabarit dans la réussite en sport. Selon eux, une voie réside dans la différence entre les propriétés physiques (taille, poids, IMC) de l'échantillon sportif et de la population source. Si l'échantillon sportif représente un sous-groupe inhabituel de la population d'origine (moyennes très différentes, écarts-types resserrés, ou les deux), alors il est probable que le physique soit un prédicateur de la réussite.

Un autre axe de démonstration se situe dans les gradients morphologiques :

3. La comparaison entre les qualités anthropométriques d'athlètes de niveaux différents ou évoluant dans des divisions différentes
4. La comparaison entre les qualités anthropométriques d'athlètes stratifiés par performance lors d'une compétition ou évènements sportifs (Best vs Rest).

Selon l'équipe du professeur Olds, si les caractéristiques physiques montrent des tendances nettes et distinctes entre athlètes de niveaux régionaux, nationaux, internationaux, ou au sein d'une compétition entre meilleurs et moins bons, ces tendances sont probablement indicatives de

sélections basées sur le physique. Cependant, les auteurs ajoutent que les tendances évolutives seules ne révèlent pas toujours les optimisations morphologiques existantes.

## **4.2. Méthodes envisagées**

Les comparaisons précédentes révèlent des différences probablement favorables à la performance mais ne décrivent pas les liens directs avec cette dernière. C'est pourquoi nous développerons comme méthodes, afin d'identifier les qualités morphologiques les plus adaptées, des analyses directes avec certains indicateurs de performance. Nous détaillerons l'organisation de paramètres anthropométriques selon ces indicateurs en fonction du niveau de performance dans le but d'identifier des profils morphologiques favorables ou optimaux.

## **4.3. Ethique**

Les études proposées 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.

## 5. Étude 1

### Morphologies et rugby: « plus grand et plus lourd », le reflet d'une sélection dirigée

#### 5.1. Résumé

**Objectif :** Mesurer l'évolution des paramètres biométriques des joueurs seniors, juniors et minimes de rugby à XV de 1<sup>ère</sup> division française.

**Méthodes :** Nous avons recueilli l'âge, le poids et la taille de 2051 rugbymen seniors de première division française entre les saisons 1988-1989 et 2008-2009. L'âge, le poids et la taille de 145 juniors (- de 21 ans) et 448 minimes (- de 15 ans) des meilleurs français ont également été recueillis pour les saisons 1988-1989 et 2008-2009.

**Résultats :** Nous montrons qu'en 20 ans les rugbymen français sont devenus plus lourds de 12 kg et 12,3 kg et plus grands de 5,4 cm et 2,9 cm pour, respectivement, les arrières et les avants. Les moins de 21 ans sont également devenus plus grands et plus lourds de 6 cm et 9,9 kg pour les arrières et de 4,4 cm et 11,1 kg pour les avants. Les minimes ont gagné 5,1 cm et 6,5 kg pour les arrières et 4,7 cm et 4,7 kg pour les avants.

**Conclusion :** Outre le fait que les joueurs deviennent plus grands et lourds, la morphologie actuelle des rugbymen est le produit d'un processus long de compétition et de sélection. Nous montrons en effet que cette sélection des « super gabarits » est déjà présente chez les jeunes que ce soit pour les juniors ou les minimes.

Publication de cette étude en Annexe 1

## 5.2. Introduction

Le rugby est perçu comme un sport international de collision (395). Ce sport de combat collectif engendre de nombreuses phases de contact, de plaquage, de ruck, de maul et mêlée nécessitant diverses exigences physiques (396–398); et requérant des joueurs des efforts de différentes intensités (399,400). Au regard des contraintes et des sollicitations spécifiques, les joueurs sont amenés à développer une large gamme d'habiletés techniques et tactiques, mais ils tirent également partie de leurs qualités anthropométriques (400,401). Force, puissance, vitesse, puissance aérobie sont des aspects physiques centraux et extrêmement développés, eu égard aux demandes physiologiques de l'activité, que ce soit pendant les matchs ou aux entraînements (397,402,403). Ces contraintes, semblent se répercuter sur le recrutement des gabarits appropriés. Le rugby traditionnel singularisait l'engagement physique des avants et la capacité d'évitement des arrières ; cependant cette distinction s'amenuise dans le système de jeu actuel dans lequel le combat physique prend une part prépondérante à tous les postes (404). Par conséquent, l'empreinte initiale du rugby reflétant la distribution des morphologies de la population générale s'oriente vers un stéréotype de joueurs (288,404). La quête du recrutement de gabarits appropriés, peut potentiellement conduire à une augmentation de joueurs allochtones, qui eux possèdent les caractéristiques morphologiques congruentes (288,404). Depuis l'avènement du professionnalisme en 1995, les joueurs sont soumis à une charge supplémentaire de contraintes physiques et morales, qui s'accompagne d'un accroissement de l'incidence des blessures, du nombre de plaquages ou de rucks par match qui ont presque quadruplé en trente ans (285). En effet Austin et al (405) suggèrent que le rugby moderne a entraîné une augmentation des activités à haute intensité. Par exemple, Eaves et Hugues (406) ont montré, lors des tournois des V puis VI nations, que l'incidence de rucks avait augmenté de 62,4 à 134,4 événements/matches entre 1988 et 2002.

Le gabarit se présente comme un indicateur d'efficacité (284): une forte association existe entre la masse, la taille et les performances individuelles et collectives, les équipes dont les joueurs sont les plus grands et les plus lourds surpassent les autres (284). Certains auteurs ont ainsi estimé que la masse corporelle est la principale caractéristique physique qui prédit avec succès la sélection d'un joueur, indépendamment de son poste (407). Il a été suggéré que la forte pression de sélection se produisant dans le sport de haut niveau peut accélérer les processus morphologiques évolutifs observés dans la population générale (12). A ce jour aucune étude n'a analysé les évolutions des caractéristiques biométriques des rugbymen français seniors, juniors et minimes de première division. Cette étude visait à étudier les changements de taille, masse et de l'Indice de Masse

Corporelle (IMC) de joueurs de moins de 15 ans, 21 ans et seniors de rugby de l'élite française entre 1988 et 2008.

## **5.3. Méthodes**

### **5.3.1. Collecte des données**

Nous avons recueilli les données d'âge, de poids et de taille des rugbymen seniors de l'élite française de la saison 1988-1989, puis des saisons 1998-1999 et 2008-2009 selon les données biométriques de la revue annuelle Rugbyrama. Le site Rugbyrama recueille les données officielles fournies par les clubs chaque année. Ces données sont obtenues à partir du suivi longitudinal des athlètes, avec les mesures effectuées par le ou les médecins de l'équipe.

Les données de poids et de taille des juniors (moins de 21 ans), sont issues du suivi de ces derniers, réalisé par le Centre médical de l'AS Montferrandaise pour les années 1988-1989 et 2008-2009. La taille et le poids des minimes (moins de 15 ans), ont été collectés lors du Challenge Marcel Michelin regroupant 16 équipes des meilleurs clubs nationaux. Ces mesures biométriques ont été prises par le même examinateur pour tous les joueurs et envoyées à l'IRMES. Les joueurs ont été séparés en deux populations: les arrières (joueurs numéro 9 à 15), et les avants (numéro 1 à 8).

### **5.3.2. Analyses statistiques**

Le centre d'intérêt de cette étude était l'évolution des paramètres biométriques des joueurs de ces 20 dernières années. Chaque population (arrière et en avant) a été analysée séparément selon l'âge (en années), la taille (en centimètres), la masse (en kilogrammes) et l'IMC défini comme la masse divisée par la taille au carré ( $\text{kg.m}^{-2}$ ) (18).

Nous avons également mesuré le pourcentage de rugbymen autochtones qui jouent dans le championnat français afin d'analyser les changements dans le recrutement.

Le pourcentage d'allochtones a été obtenu comme suit:

$$\% \text{ allochtones} = \frac{N \text{ de joueurs allochtones}}{N \text{ totale de joueurs}} \times 100$$

Les modifications des paramètres anthropométriques pour les 3 saisons ont été comparées selon l'âge, la position (arrière ou avant) et les saisons. Les différences entre ces paramètres ont été comparées par des tests t de student. Les différences morphologiques ont été testées entre décennies à l'aide d'ANOVA. L'analyse de la variance a été ajustée sur l'âge, car les joueurs de rugby adultes sont devenus également plus vieux entre 1988 et 2008, cela pouvant affecter leurs changements de masse et d'IMC.

Nous avons également effectué une régression linéaire multiple ajustée sur l'âge pour chaque paramètre afin de tester la tendance évolutive. Les valeurs sont présentées en moyenne et écart type. Le seuil de significativité a été fixé à  $p=0,05$ .

## 5.4. Résultats

La population étudiée est composée de 2644 joueurs, dont 2051 seniors : 1141 avants et 910 arrières, 145 juniors : 82 avants et 63 arrières et 448 minimes : 267 avants et 181 arrières.

Durant la saison 1988-1989, les avants étaient significativement plus âgés (0,9 ans), plus grands (9,1 cm) et plus lourds (19,7 kg) que les arrières et avaient un indice de masse corporelle plus important (3,4 kg.m<sup>-2</sup>). De même, les avants de la saison 1998-1999 étaient significativement plus âgés (1,3 ans), plus grands (8 cm) et plus lourds (21,3 kg) que les arrières et présentaient également un indice de masse corporelle plus important (4,0 kg.m<sup>-2</sup>). Contrairement aux saisons précédentes, les avants et les arrières participant au Top 14 2008-2009 n'ont montré aucune différence significative d'âge, mais les différences de taille, masse et IMC persistent : respectivement 6,6 cm, 20 kg et 3,9 kg.m<sup>-2</sup> (figure 25).

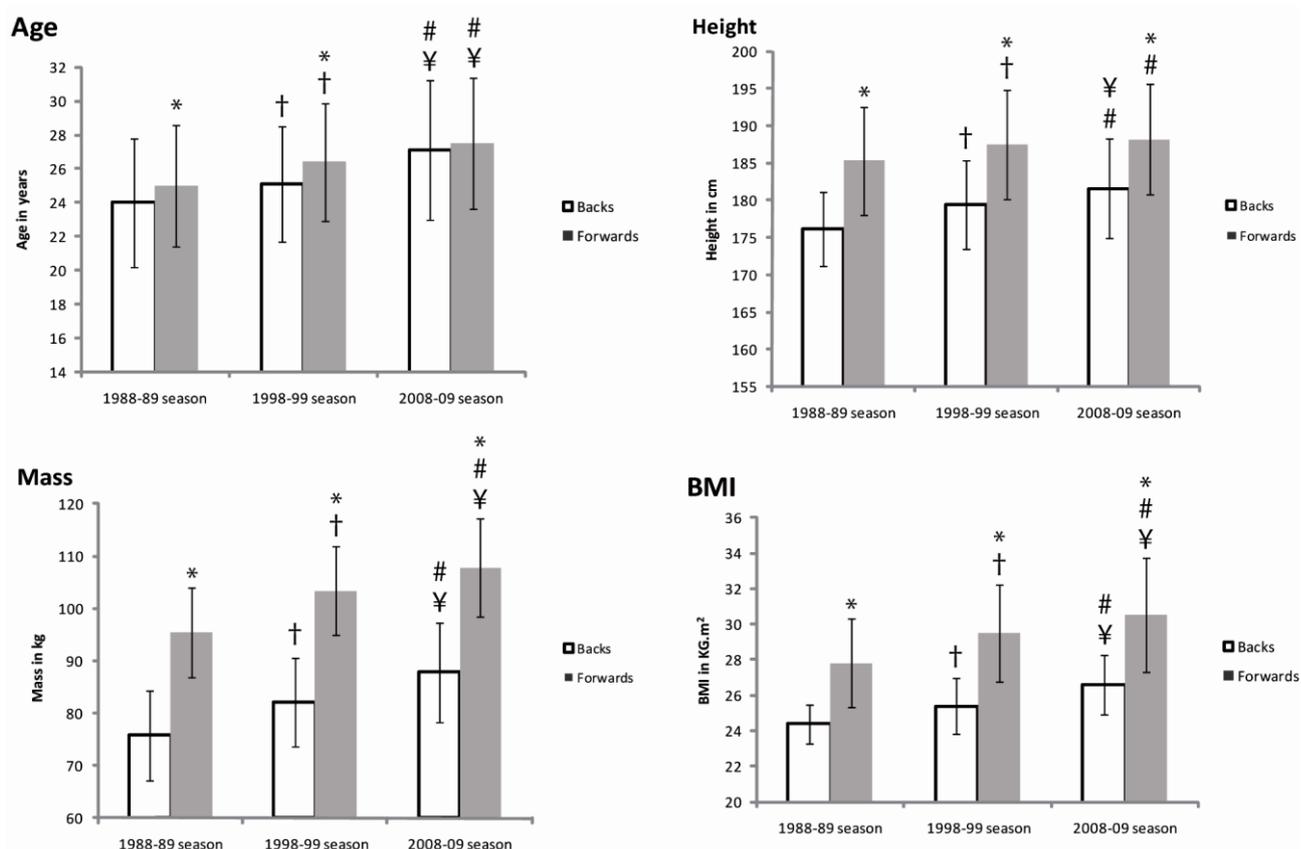


Figure 25: Evolution de l'âge, la taille, le poids et l'IMC (moyenne et écart-type) des joueurs de rugby seniors entre les saisons 1988 et 2008. \* =  $p < 0,001$  pour les avants vs les arrières, † =  $p < 0,001$  pour les saisons 1988 vs 1998, # =  $p < 0,001$  pour les saisons 1988 vs 2008, ¥ =  $p < 0,001$  pour les saisons 1998 vs 2008.

L'âge moyen des arrières et des avants jouant dans l'élite a augmenté au cours des 20 dernières années:  $24 \pm 3,8$  et  $25 \pm 3,6$  ans en 1988 contre  $27,1 \pm 3,9$  et  $27,5 \pm 4,1$  ans au cours de la saison 2008-2009. Au cours de ces 20 ans, les joueurs sont également devenus plus grands, plus lourds et ont majoré leurs IMC (*figure 25*). Les arrières et les avants ont augmenté respectivement de 5,4 et 2,9 cm, 12 et 12,3 kg et  $2,2 \text{ kg m}^{-2}$  et  $2,7 \text{ kg m}^{-2}$  d'IMC, entre 1988 et 2008.

Les résultats de différents modèles statistiques sont représentés dans le *tableau 5* pour les arrières et les avants. Tous les paramètres diffèrent significativement entre décennies, même une fois les analyses ajustées en fonction de l'âge. La régression linéaire indique que les arrières ont augmenté de 5,7 kg, 2,7 cm et  $1 \text{ kg m}^{-2}$  par décennie et les avants ont gagné 5,9 kg, 1,51 cm et  $1,25 \text{ kg m}^{-2}$  par décennie.

Tableau 5 : ANOVA et ANOVA ajustée sur l'âge et régression linéaire pour les avants et les arrières

	means			ANOVA		ANOVA (Adjusted for age)		trend (adjusted for age)			
	1988	1998	2008	F-value	p	F-value	p	t-value	p	linear coefficient*	std(coeff)
<b>Backs</b>											
<b>Mass</b>	75.8	82.1	87.8	177.4	<0.0001	145.36	<0.0001	17.03	<0.0001	5.70	0.33
<b>Height</b>	176.2	179.5	181.6	61.55	<0.0001	53.71	<0.0001	10.23	<0.0001	2.73	0.27
<b>BMI</b>	24.4	25.4	26.6	140.48	<0.0001	109.75	<0.0001	14.82	<0.0001	0.99	0.07
<b>Age</b>	24	25.1	27.1	43.98	<0.0001						
<b>Forwards</b>											
<b>Mass</b>	95.5	103.4	107.8	179.16	<0.0001	147.85	<0.0001	16.81	<0.0001	5.87	0.35
<b>Height</b>	185.3	187.4	188.2	15.64	<0.0001	14.4	<0.0001	5.13	<0.0001	1.51	0.29
<b>BMI</b>	27.8	29.5	30.5	83.96	<0.0001	65.99	<0.0001	11.34	<0.0001	1.24	0.11
<b>Age</b>	25	26.4	27.5	40	<0.0001						

\*Gains exprimés par décennie

Actuellement, en moyenne 36% des effectifs du Top 14 sont composés de joueurs étrangers, alors qu'ils ne représentaient que 1,8% des effectifs en 1988: ces équipes avaient une moyenne de 0,6 joueurs étrangers par club, puis 1 par club au cours de la saison 1994-1995 (288), et cette moyenne est passée à 14,6, par club dans le championnat d'aujourd'hui (i.e Top 14 2010-2011) (204 étrangers sur un total de 566 joueurs de rugby).

A l'instar de leurs homologues seniors, les arrières et les avants juniors sont respectivement devenus plus grands de 6 et 4,4 cm, plus lourds de 9,9 et 11,1 kg et présentent un IMC majoré de + 3,8 et +2,2 kg.m<sup>-2</sup> (figure 26).

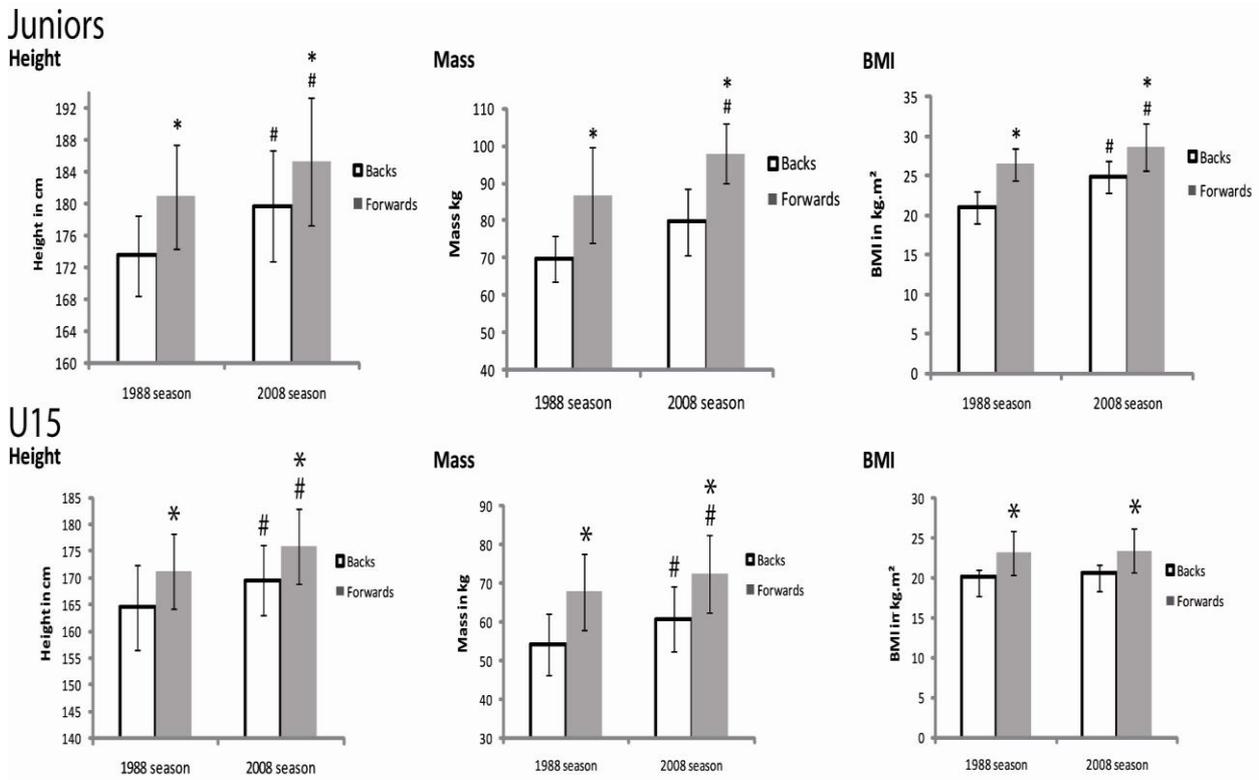


Figure 26: Evolution de la taille, du poids et de l'IMC (moyenne et écart-type) des joueurs de rugby juniors et minimes. \* = p<0,001 pour les avants vs les arrières, # = p<0,001 pour les saisons 1988 vs 2008.

Comme leurs pairs, les minimes sont devenus respectivement pour les arrières et les avants plus grands de 5,1 et 4,7 cm, plus lourds de 6,5 et 4,7 kg et présentent un IMC majoré de 0,6 et 0,2 kg.m<sup>-2</sup> (figure 26).

## 5.5. Discussion

Pour toutes les saisons et les groupes d'âge étudiés, les avants sont significativement plus lourds, plus grands et par conséquent présentent un plus grand IMC que les arrières, données en accord avec de précédentes études (400,408). Une des explications tient au profil de poste, car les avants passent significativement plus de temps à plaquer (403,409,410), en phase de contact (400,410) et sont plus souvent impliqués dans des activités à haute intensité que les arrières (409). Il est donc probable que de plus grandes masses et tailles corporelles leurs confèrent un impact majoré durant ces temps de jeu. Une grande masse corporelle est considérée comme nécessaire afin de générer et de tolérer de grands impacts durant les plaquages (401) et pour fournir force et puissance durant les phases de mêlées, mauls et rucks. En outre, dans le rugby, la force générée en mêlée est significativement corrélée à un gabarit imposant (411). De plus, les avants endurent en moyenne 21 mêlées, 35 rucks, 25 mauls et 14 plaquages alors que les arrières ne participent qu'à 11 rucks, 4 mauls et 10 plaquages (410). A ceci s'ajoute que durant un match, il a été mesuré que les avants étaient plus largement impliqués dans les collisions et qui plus est à des intensités de l'ordre de 60 % plus importantes que les arrières (399). En dépit de cette différence, les arrières présentent un risque plus élevé de blessures (395,403), lors des chocs physiques, les différences morphologiques sont souvent en défaveur des arrières.

D'autre part, la taille des avants leur confère un avantage pour attraper la balle lors de lancement de jeu tel que la touche (400). Leur plus grande masse corporelle leur permet aussi de générer de plus grands « sprint momentum » (231), caractéristique à leur avantage lors des phases de contact. De plus, les différences de taille entre avants et arrières tendent à s'amoinrir ce qui pourrait suggérer que le rugby demande des joueurs physiquement plus polyvalents (408). La réduction de ces différences peut s'expliquer par l'engagement des arrières qui sont de plus en plus amenés à participer durant le match aux rucks et mauls qui étaient traditionnellement des phases de jeu dédiées aux avants (285). D'un autre côté, que les arrières soient également plus grands leur confère des avantages durant les temps forts du match (c'est-à-dire sous les réceptions des coups de pied et chandelles ou encore lors de rucks isolés afin de protéger la balle dans l'attente de soutiens).

Dans cette étude, nous constatons qu'entre les saisons 1988-1989 et 2008-2009, les arrières et les avants augmentent significativement en âge, taille poids et IMC, ce qui confirme les tendances des années 90 et l'importance des qualités morphologiques dans ce sport, notamment du poids et de la

taille (412). Ces données soulignent une rapide augmentation de la masse des joueurs subséquente à l'introduction du professionnalisme, que ce soit pour les joueurs de la Bledisloe Cup (285), ou ceux de deux équipes basques (288). Cette évolution traduit la modernisation du rugby, qui devient de plus en plus un rugby de confrontation physique et d'affrontement où les joueurs les plus puissants sont retenus, comme dans le football américain (12). Ces évolutions s'orientent vers la recherche de joueurs physiquement surdimensionnés (288), et une optimisation des gabarits.

Olds et al (12,284) se sont intéressés aux changements de gabarit des athlètes au 20<sup>ème</sup> siècle. Ils rapportent une augmentation de la masse des joueurs de rugby plus rapide que celle de la population générale dans les pays développés.

Au cours des vingt dernières années, la population française a, par décennie, pris 3 kg et grandi de 2 cm (413). Les joueurs de rugby étudiés ici dépassent les tendances observées dans la population générale en termes de poids (et de taille en ce qui concerne les arrières), avec des augmentations de 5,7 kg et 2,7 cm par décennie pour les arrières, et de 5,9 kg et 1,5 cm pour les avants. Cette évolution vers une expansion morphologique s'observe également dans les nations émergentes du rugby mondial (232). Le développement des physiques semble logique étant donné le fort lien individuel et collectif entre morphologie et performance (284,414), et son impact sur la sélection des joueurs (414). En effet, pendant la Coupe du Monde de Rugby de 1999, les équipes les plus performantes alignaient les joueurs les plus grands et lourds (284). Concernant le recrutement, il est dirigé d'abord vers le vivier de joueurs français, mais dans la mesure où le stéréotype physique recherché s'éloigne de plus en plus de celui de la population moyenne, le vivier de joueurs natifs susceptibles de convenir se trouve de facto réduit. Ce phénomène de recrutement de joueurs surdimensionnés se retrouve dans d'autres sports : la taille pour le basketball, le handball ou le volleyball, le poids pour les sports de contact comme le football américain, l'haltérophilie ou les lancers (12). Cette quête de grands gabarits épuise rapidement le groupe de natifs, déplaçant également le pool pour d'autres sports et s'inscrivant dans une course à l'armement envers les athlètes les plus imposants physiquement.

Ce développement des physiques des joueurs de rugby peut trouver des explications. Les joueurs de rugby professionnels d'aujourd'hui s'entraînent cinq à six jours par semaine en plus des matchs, et parfois lors de sessions bi ou tri-quotidienne (414). Les habiletés techniques et caractéristiques physiologiques des joueurs s'en trouvent en conséquence accentuées. Par exemple, le nombre d'impacts par session d'entraînement est en moyenne de 23 pour les avants et de 16 pour les arrières, jusqu'à un maximum de 82 et 75 respectivement (403). L'intensité de ces impacts a

augmenté, ce dont témoignent des analyses biomécaniques (404) et la mesure de la vitesse d'impact sur des sacs d'entraînement. Les augmentations de poids et d'IMC peuvent être expliquées par des augmentations de la charge d'entraînement et de la préparation physique, associées à un suivi nutritionnel, et pour certaines, de manière sporadique, par l'utilisation de stéroïdes anabolisants (415). L'Agence mondiale anti-dopage souligne en effet dans son rapport annuel que 39 des 5725 joueurs de rugby ont été testés positifs. Ce faible pourcentage suggère toutefois que ce phénomène n'est pas plus proéminent dans le rugby que dans d'autres sports. D'autres aspects, comme l'évolution des règles du jeu, ont accompagné cette croissance du physique des joueurs de rugby. En 1997, l'autorisation des remplacements en-dehors des blessures a permis aux entraîneurs de faire tourner leur effectif, diminuant le temps passé sur le terrain et permettant ainsi des engagements sur de plus courtes durées et modulant les possibilités d'intensité. Selon Quarrie et Hopkins (285), le fait que les joueurs passent moins de temps sur le terrain réduit la charge aérobie tout en augmentant la charge anaérobie. Les morphologies sont adaptées aux contraintes de l'activité, et un changement de règles peut modifier le caractère plus ou moins adapté d'un joueur au jeu (12). L'évolution des règles peut changer la nature du jeu : l'augmentation du nombre de rucks et de plaquages amplifie la fréquence d'utilisation de phases de puissance (285). Finalement, un poids plus important confère indéniablement de réels bénéfices pendant ces phases. Ainsi, les règles génèrent le jeu, qui lui-mêmes génère les corps.

Le sport suit une évolution rapide, ce qui conduit à de fortes pressions sélectives orientées vers des critères adaptés (12). En effet, les athlètes de nombreux sports (mais pas tous, en dépit de la tendance séculaire de la population générale) sont devenus plus grands et plus massifs avec le temps. La « course à l'armement », étudiée par Norton et Olds pour le basketball, qui épuise rapidement le vivier de joueurs grands et lourds, gagne le rugby. C'est une tendance visible en France : nous montrons que le recrutement de joueurs étrangers a progressé de 1,8% par club en 1998 à 36,2% des joueurs de rugby dans le Top 14 d'aujourd'hui. Ces joueurs étrangers sont significativement plus lourds, plus grands et présentent un IMC plus élevé que les joueurs français (104,6 kg vs 96,9 kg et 187,6 cm vs 184,9 cm ainsi que 29,7 vs 28,3 kg.m<sup>-2</sup> respectivement).

La morphologie actuelle des joueurs de rugby est le produit d'un long processus de compétition et de sélection, et cette étude montre en fait qu'une sélection privilégiée des «super-gabarits» (c'est-à-dire des physiques exceptionnels) est déjà présente chez les juniors et les minimes. Notre étude met en lumière une sélection dès le plus jeune âge. Nous notons aussi que les jeunes arrières, comme

leurs homologues seniors, sont significativement plus petits et plus légers que les jeunes avants. Nous montrons une augmentation de la taille, du poids et de l'IMC des jeunes joueurs de rugby au cours des vingt dernières années. Il est possible que les gains de poids soient dus à l'augmentation de la charge d'entraînement et l'intensification du jeu. En effet, les exigences d'entraînement et de jeu sont de plus en plus similaires à celles des adultes (416).

Hartwig et al ont signalé une moyenne de 7 heures par semaine chez les minimes (rugby talent squad) et un maximum de 13,5 heures. Dans cette étude, 91% de l'activité hebdomadaire rapportée étaient reliés au rugby (416). Les données indiquent que la sélection des physiques imposants se produit déjà chez les juniors et les minimes. A l'âge de la sélection, les garçons qui sont déjà entrés dans la phase pubertaire (et donc ont déjà commencé leur poussée de croissance) détiennent un avantage significatif sur les autres. Une étude (417) a pu montrer que le degré de maturité expliquait une portion significative de la variance de la morphologie, et que le statut pubertaire avait des effets significatifs sur les sauts et la force des membres supérieurs, qui sont autant de qualités nécessaires et importantes au rugby. Qualités tout aussi nécessaires que la vitesse de course, qui est aussi affectée par l'âge chronologique (418). Toutes ces qualités peuvent conférer un bénéfice aux joueurs qui ont commencé ou terminé tôt leur puberté. De plus, même chez les jeunes joueurs, les titulaires sont plus grands et plus lourds que les remplaçants, suggérant que les caractéristiques biométriques jouent un rôle dans le choix des titulaires de la première division et des divisions inférieures chez les juniors (419). Enfin, une étude a montré que les adolescents en première division espoir sont plus lourds que les joueurs de niveaux inférieurs (420). Toutefois, il pourrait être désavantageux d'intégrer trop rapidement de jeunes joueurs. Ils ont peut-être les caractéristiques physiques, mais ils n'ont pas forcément l'expérience pour franchir le cap de la première division chez les seniors. Qui plus est, ceux qui se développent plus tard pourraient les dépasser après maturation.

Concernant les causes sous-jacentes, l'augmentation du poids peut résulter de l'augmentation de la préparation physique associée à un suivi nutritionnel, de l'augmentation de l'intensité du jeu, par contre l'augmentation de la taille est le résultat d'une sélection dirigée.

## **5.6. Conclusion**

En conclusion, en vingt ans, les joueurs de rugby français sont devenus plus lourds et plus grands. Cette augmentation de poids peut être expliquée par l'augmentation de taille mais aussi par l'augmentation du volume d'entraînement, de la musculation, accompagnée d'un suivi nutritionnel, ou de changements de règles et d'optique de recrutement. La quête des « super-gabaris » est confirmée par le fait que cette tendance n'est pas seulement apparente dans la division des séniors, mais aussi chez les juniors et les minimes. Leurs augmentations de poids peuvent résulter d'une amélioration de l'entraînement, mais leurs tailles supérieures sont le résultat d'une sélection dirigée ; à compétences égales, les entraîneurs ont tendance à sélectionner les joueurs les plus grands. Ainsi, la morphologie actuelle des joueurs de rugby est le résultat d'un long processus de compétition et de sélection ; les données indiquent une sélection des « super gabarits » déjà présente chez les jeunes joueurs.

## **5.7. Perspectives : liens Etude 1-Etude 2**

Sur le championnat français, les résultats précédents révèlent une tendance à la majoration des gabarits qui est déjà présente dans les catégories de jeunes. Mais qu'en est-il au niveau international ? Les meilleurs joueurs du monde, c'est-à-dire ceux sélectionnés par leurs équipes nationales respectives suivent-ils cette tendance ? Outre ces tendances de majoration qu'en est-il des liens entre traits anthropométriques et performance en rugby ? L'impact de simples caractéristiques telles que le poids, la taille et l'IMC est-il mesurable ? Ces indicateurs morphologiques sont-ils pertinents afin de différencier les équipes victorieuses ?

## 6. Étude 2

### Comment ont-ils gagné une Coupe du Monde de rugby : le poids, la taille et le vécu collectif

#### 6.1. Résumé

**Objectifs :** Etudier l'évolution des caractéristiques anthropométriques chez les joueurs internationaux de rugby participant aux Coupes du Monde et identifier les éléments associés à la performance.

**Méthodes :** L'âge, le poids, la taille, de 2692 internationaux participants aux coupes de monde (CM) de rugby de 1987 à 2007 ont été collectés. Le classement dans chaque Coupe du Monde et l'expérience collective des vainqueurs, finalistes, demi-finalistes et quart-de-finalistes, ont été comparés au reste des équipes en compétition. Les paramètres anthropométriques ont été comparés en fonction des âges et postes (avants et arrières).

**Résultats :** Entre 1987 et 2007, les avants et arrières sont devenus plus lourds de 6,63 et 6,68 kg respectivement, et plus grands de 0,61 et 1,09 cm. L'expérience collective du pack des avants, ainsi que le poids des avants et la taille des arrières, augmentent avec le classement final.

**Conclusions :** Pour toutes les Coupes du Monde de Rugby, les équipes les plus performantes s'appuient à la fois sur de plus grands arrières et de plus lourds avants ayant emmagasiné une expérience collective supérieure.

Publication de cette étude en Annexe 2

## 6.2. Introduction

L'avènement du professionnalisme dans le rugby s'est accompagné d'une augmentation de la morphologie des joueurs (400) observée tant dans le championnat français que dans des matches internationaux pendant la Bledisloe Cup (285). Cette tendance suit l'évolution des contraintes de l'activité dans laquelle le nombre de plaquages et de rucks par match a été multiplié par un facteur quatre en trente ans (285). Eaves et Hughes (406) ont également montré que l'incidence de rucks dans le Tournoi des Cinq puis Six Nations est passée de 62,4 par match en 1988 à 134,4 par match en 2002. Austin et al (405) suggèrent que le développement du rugby moderne a conduit à une augmentation de l'activité à haute intensité et est devenu plus exigeant physiquement, et ce en raison d'augmentations du temps de jeu effectif et de la vitesse de jeu. Ainsi des tailles et poids accrus sont autant de caractéristiques souhaitables, que dans le football américain où les joueurs sélectionnés sont les plus grands, lourds et puissants (12). La morphologie en rugby semble en effet prédictive de l'efficacité: une association forte existe entre le poids, la taille et les performances individuelles et collectives (284). Les équipes avec les joueurs les plus grands et lourds ont été plus performantes que les autres lors de la Coupe du Monde de Rugby de 1999 (284). Toutefois le rugby engendre de nombreuses phases de contacts, plaquages, rucks, mauls et mêlées, sollicitant des exigences physiques variées (396–398), nécessitant de la part des joueurs de participer à des phases d'efforts intenses entrecoupées de périodes de plus faible intensité (399,400). La performance au rugby implique un grand nombre de paramètres dépendant des contraintes spécifiques de l'activité. Parmi elles la force, la vitesse, la puissance aérobie et anaérobie, l'aptitude à changer de direction et les caractéristiques spécifiques du sport sont décisives (402). La performance est aussi liée à l'efficacité collective. En effet, les groupes qui présentent une forte efficacité collective sont plus enclins à réussir que ceux qui ne partagent pas cet attribut (421), et maintiennent leur performance de groupe plus longtemps (422). Dans le football, un plus grand pourcentage de nouvelles recrues est associé à un nombre de buts marqués par match inférieur (423). Au rugby, Greenlees et al (424) ont estimé que le score d'efficacité collective représentait 22% de la variance de l'affect positif de pré-match. Le rugby devenant toujours plus exigeant physiquement (396), nous émettons l'hypothèse que le poids, la taille et l'expérience collective des joueurs sont autant de paramètres cruciaux dans la progression des performances lors des Coupes du Monde.

### **6.3. Méthodes**

L'objectif de cette étude est d'analyser les évolutions de poids et de taille des joueurs de rugby qui ont participé aux Coupes du Monde et d'identifier les éléments associés à de meilleures performances.

#### **6.3.1. Collecte de données**

Les données d'âge, de poids et de taille ont été collectées pour tous les joueurs qui ont participé à des Coupes du Monde de rugby entre 1987 et 2007. Les données ont été colligées à partir des sites officiels des équipes nationales tels que [www.ffr.fr](http://www.ffr.fr), [www.allblacks.com](http://www.allblacks.com) et [www.fiji rugby.com](http://www.fiji rugby.com) et vérifiées à l'aide de diverses sources telles [www.itsrugby.fr](http://www.itsrugby.fr), [www.lionsrugby.com](http://www.lionsrugby.com) ou [www.rugbyrama.fr](http://www.rugbyrama.fr). La version annuelle du site internet de Rugbyrama collecte des données officielles (âge, poids et taille) fournies par les clubs. Ces données ont été établies à partir d'études longitudinales de suivi de joueurs, avec des mesures prises par les médecins de chaque équipe.

#### **6.3.2. Conception de l'étude**

Les joueurs ont été séparés en deux populations : arrières (numéros 9 à 15) et avants (numéros 1 à 8). Chaque performance d'équipe a été analysée en fonction de l'âge (en années) et des paramètres biométriques (taille en centimètres, poids en kilogrammes et IMC en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) des deux catégories.

Nous avons réalisé une analyse de l'équipe entière regroupant tous les joueurs d'une équipe, titulaires et remplaçants, puisqu'une Coupe du Monde est gagnée par une équipe entière, les joueurs étant amenés à être remplacés pendant les matchs et d'un match à l'autre.

Les analyses ont aussi porté sur les néo-internationaux (joueurs participant à une Coupe du Monde pour la première fois).

L'expérience collective a été définie comme le pourcentage de joueurs dans une équipe qui ont participé à une précédente Coupe du Monde :

$$\%d'expérience\ collective\ pour\ les\ avants = \frac{N_{avants\ qui\ ont\ participé\ à\ une\ précédente\ Coupe\ du\ Monde}}{N_{avants}} \times 100$$

Nous avons analysé l'expérience collective, tout comme le poids et la taille, en fonction de la position des joueurs (avants et arrières), et en fonction du niveau atteint par chaque équipe : vainqueurs, finalistes, demi-finalistes et quart-de-finalistes des Coupes du Monde comparés aux autres équipes en compétition.

### 6.3.3. Analyses statistiques

Les pourcentages d'expérience collective ont été comparés par des tests du  $\chi^2$ . Les évolutions des paramètres biométriques ont été comparées sur les six Coupes du Monde entre les avants et les arrières et en fonction du classement final. Les paramètres biométriques entre catégories ont été comparés par des tests de Student. Les évolutions de paramètres entre les Coupes du Monde ont été testées en utilisant une analyse de variance et une régression linéaire multiple pour évaluer l'effet du temps. Le seuil de significativité a été fixé à  $p=0.05$ .

## 6.4. Résultats

L'échantillon est composé de 2692 joueurs, incluant 1457 avants et 1235 arrières. Les néo-internationaux représentent 1044 avants and 866 arrières.

### 6.4.1. Evolution des néo-internationaux

Pour toutes les Coupes du Monde, les avants présentent un âge, une taille, un poids et un IMC moyens significativement supérieurs à ceux des arrières (figure 27).

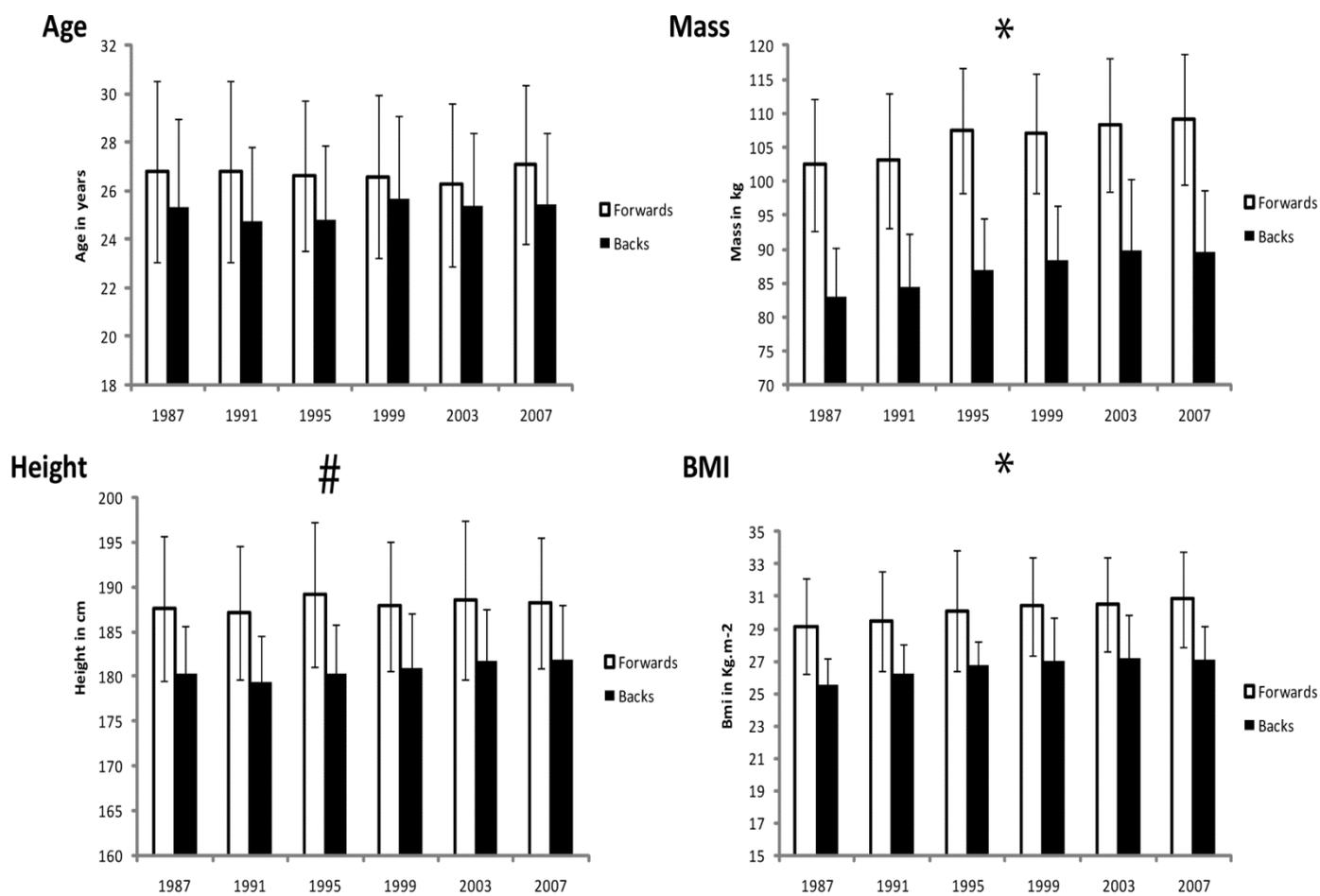


Figure 27 : Evolution de l'âge, du poids, de la taille et de l'IMC (moyenne  $\pm$  ET) des néo-internationaux. ANOVA\*= $p < 0,05$  pour les avants et les arrières, ANOVA# = $p < 0,05$  pour les arrières seulement. Pour l'ensemble des Coupes du Monde, les avants et les arrières sont significativement différents en âge, poids, taille et IMC.

Nous observons une tendance significative d'augmentation du poids et de l'IMC pour les arrières et les avants ainsi qu'une augmentation de la taille pour les arrières. Les caractéristiques biométriques des joueurs augmentent entre chaque Coupe du Monde, de 1,34 kg et 0,33 kg.m<sup>-2</sup> en moyenne pour les avants, et de 1,46 kg et 0,30 kg.m<sup>-2</sup> pour les arrières (tableau 6).

Tableau 6: ANOVA et régressions linéaires pour les avants et les arrières

	Moyennes						ANOVA		ANOVA Ajustée sur âge		Tendances ajustée sur l'âge par CM			
	1987	1991	1995	1999	2003	2007	F-value	p	F-value	p	t-value	p	linear coefficient*	std(coeff)
<b>Avants</b>														
<b>n</b>	111	136	137	241	216	203								
<b>Poids</b>	102,42	103,1	107,45	107,03	108,30	109,05	13,17	<0,0001	13,16	<0,0001	57,11	<0,0001	+ 1,34	0,18
<b>Taille</b>	187,6	187,15	189,17	187,89	188,52	188,21	1,29	0,26	1,22	0,3	1,09	0,2746	0,16	0,14
<b>IMC</b>	29,17	29,50	30,10	30,41	30,56	30,85	7,1	<0,0001	7,11 *	<0,0001	34,12	<0,0001	+ 0,33	0,06
<b>Age</b>	26,79	26,80	26,62	26,59	26,25	27,08	1,38	0,23						
<b>Arrières</b>														
<b>n</b>	95	114	104	196	186	171								
<b>Poids</b>	82,96	84,46	86,88	88,44	89,88	89,64	14,9	<0,0001	15,92	<0,0001	72,5	<0,0001	+ 1,46	0,17
<b>Taille</b>	180,31	179,32	180,27	180,93	181,66	181,84	3,75	0,0023	4,21	0,0009	16,33	<0,0001	+ 0,48	0,12
<b>IMC</b>	25,50	26,25	26,70	27,01	27,21	27,09	13,9	<0,0001	14,24	<0,0001	57,4	<0,0001	+ 0,30	0,04
<b>Age</b>	25,33	24,75	24,83	25,67	25,37	25,41	1,75	0,1203						

#### 6.4.2. Le poids comme déterminant de la performance

Pour toutes les Coupes du Monde, les avants des équipes championnes du monde, finalistes, demi-finalistes et quart-de-finalistes sont significativement plus lourds que les avants des autres équipes (figure 28). Le poids moyen ( $\pm$ ET) des avants des équipes qui ont remporté les Coupes du Monde est en effet de 108,5 ( $\pm$ 7,9) kg alors que le reste des concurrents pèse seulement 106,1 ( $\pm$ 9,3) kg en moyenne. Pour les arrières, on observe aussi cette tendance significative chez les demi-finalistes et les quart-de-finalistes, mais la tendance n'atteint pas le seuil de significativité pour les vainqueurs et les finalistes ( $p=0,055$  et  $0,072$ , respectivement). Les arrières dont les équipes atteignent les quart-de-finales pèsent 88,3 ( $\pm$ 7,7) kg alors que les arrières des équipes qui ne les ont pas atteintes pèsent 85,6 ( $\pm$ 8,1) kg.

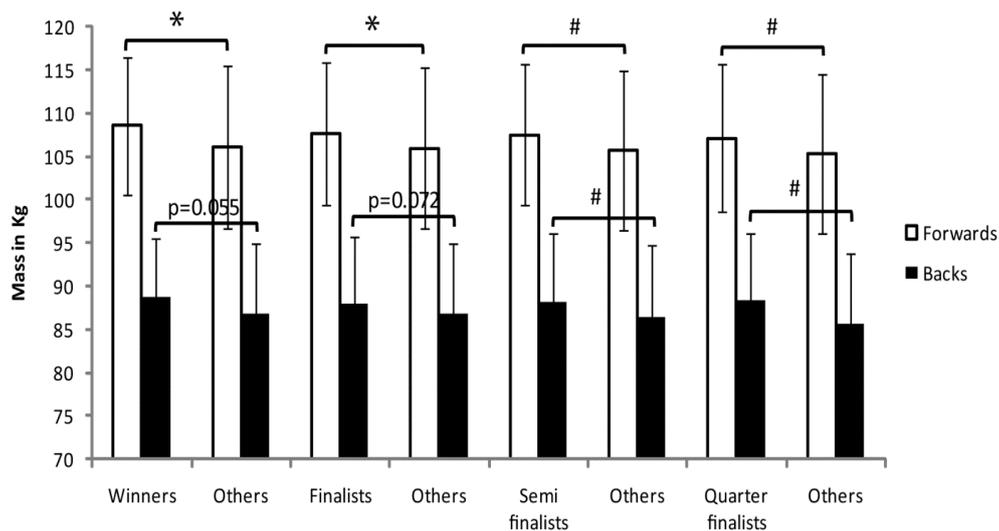


Figure 28 : Poids (moyen et ET) des vainqueurs, finalistes, demi-finalistes, quart-de-finalistes versus le reste des compétiteurs. \*= $p < 0,05$  et #= $p < 0,01$ .

### 6.4.3. La taille comme déterminant de la performance

Pour toutes les Coupes du Monde, les arrières des équipes championnes du monde, finalistes, demi-finalistes et quart-de-finalistes sont significativement plus grands que les arrières des autres équipes (figure 29). La taille moyenne des arrières dont les équipes gagnent la Coupe du Monde est ainsi de 182,4 ( $\pm 5,4$ ) cm, alors qu'elle est seulement de 180,9 ( $\pm 5,8$ ) cm pour le reste des joueurs en compétition. Chez les avants on observe une tendance similaire, mais qui n'atteint pas le seuil de significativité (vainqueurs vs autres  $p=0,072$ , finalistes vs autres  $p=0,051$ , demi-finalistes vs autres  $p=0,12$ , quart-de-finalistes vs autres  $p=0,089$ ).

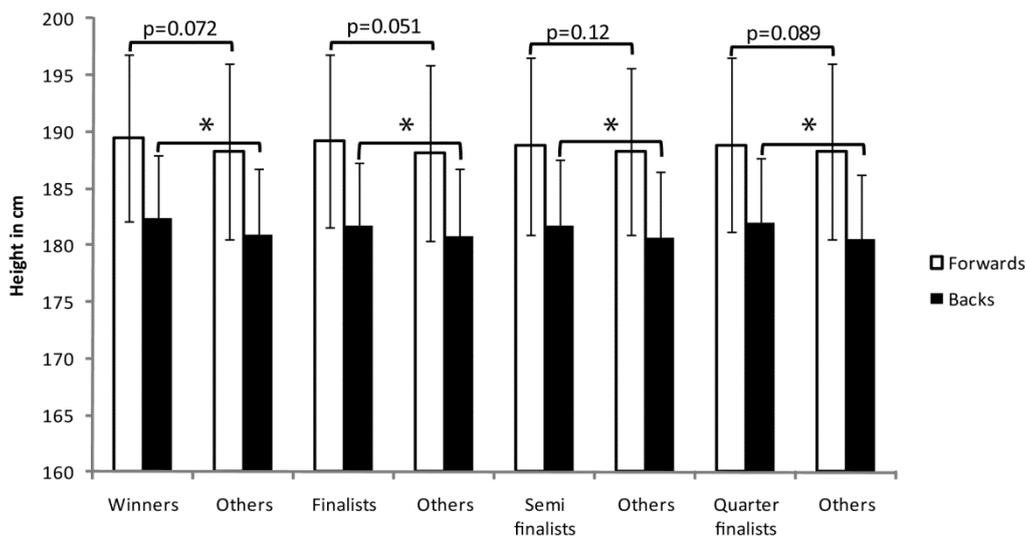


Figure 29 : Taille (moyenne et ET) des vainqueurs, finalistes, demi-finalistes, quart-de-finalistes versus le reste des compétiteurs. \*= $p < 0,05$ .

#### 6.4.4. L'expérience collective comme déterminant de la performance

Pour toutes les Coupes du Monde, les avants des équipes victorieuses s'appuient sur une expérience collective significativement plus grande que les avants des autres équipes : 39,6% pour les avants des équipes victorieuses et 31,7% pour les avants des autres équipes (*figure 30*). De plus, l'expérience collective des avants des équipes qui ont participé à une finale, une demi-finale ou un quart de finale est également significativement plus grande que ceux des équipes qui n'ont pas réussi à se qualifier pour ces phases. Par exemple, 38,1% des avants finalistes ont déjà joué une Coupe du Monde contre 31,1% des avants des autres équipes.

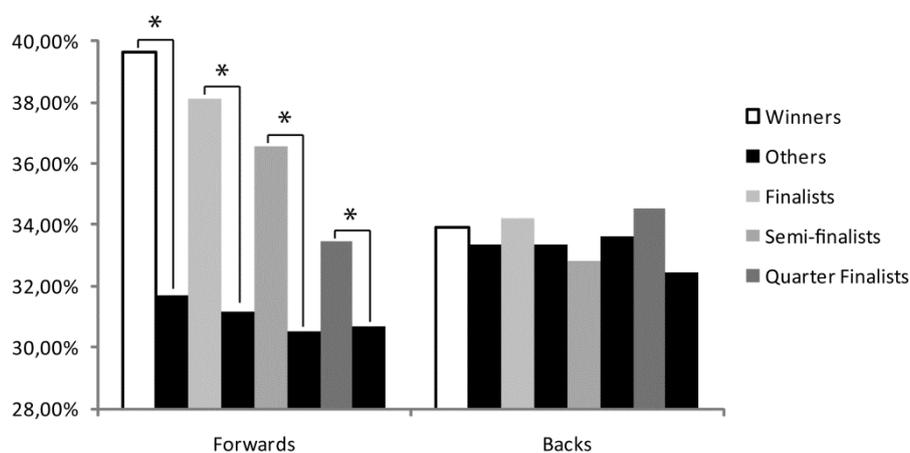


Figure 30 : Pourcentage d'expérience collective selon le poste en fonction du stade de compétition atteint. \*= $p < 0,05$ .

## 6.5. Discussion

Cette étude met en avant qu'entre 1987 et 2007 le poids moyen et IMC de tous les avants et arrières se sont accrus de manière significative au fur et à mesure des Coupes du Monde de rugby. Ceci confirme les tendances observées depuis l'introduction du professionnalisme, chez les joueurs de rugby français, ceux ayant pris part à la Bledisloe Cup (285), ou encore parmi nations émergentes du rugby mondial (232). Avec les contraintes du jeu orientant vers toujours plus de confrontations physiques, le rugby devient un sport dans lequel les joueurs lourds sont de plus en plus importants : la maximisation des morphologies et la quête des « super-gabarits » sont inhérents au rugby de niveau international, tout comme dans d'autres sports (12). Le développement de la masse maigre est en effet souhaitable au rugby pour augmenter la vitesse, la force, et ainsi la puissance (335,425).

Les augmentations de poids et d'IMC peuvent être expliquées par des augmentations de la charge d'entraînement associées à un suivi nutritionnel, et pour certaines, même de manière sporadique, par l'utilisation de stéroïdes anabolisants (415). L'Agence mondiale antidopage souligne en effet dans son rapport annuel que parmi 5725 joueurs de rugby, 39 ont été testés positifs (415). Ce faible pourcentage suggère que le dopage n'est pas un phénomène plus présent dans le rugby que dans d'autres sports, comme nous l'avons précédemment noté.

Les changements de règles amènent aussi des changements dans la morphologie des joueurs. En effet, les règles génèrent le jeu, qui génère à son tour des exigences en termes de morphologie. Ainsi l'augmentation du nombre de confrontations physiques conduit à une recherche de joueurs adaptés et avec une capacité à supporter contacts, charges, soutiens, poussées et plaquages de plus en plus nombreux.

Pour tous les joueurs des Coupes du Monde étudiés ici, les avants étaient significativement plus âgés, plus grands, plus lourds et avaient un IMC plus grand que les arrières, un résultat cohérent avec les études antérieures (231,400,426). Ceci s'explique principalement par le profil de poste : les avants passent un temps significativement plus important que les arrières à plaquer (409,410), en phase de contact (400,410) ou encore impliqués dans des activités de haute intensité (409). Par ailleurs, être plus lourds et grands leur permet de générer et de tolérer des impacts plus grands et de fournir force et puissance pendant les phases de mêlées, rucks et mauls.

Nous montrons, dans toutes les Coupes du Monde, que le poids des avants est un des déterminants de la performance d'équipe au rugby. En effet, les équipes qui gagnent une Coupe du Monde, ou atteignent les finales, demi-finales et quarts de finale, ont des avants plus lourds que les autres équipes, comme observé lors de la Coupe du Monde de rugby de 1999 (284). On note de plus la même tendance chez les arrières. La performance au rugby est bien sûr plus complexe, et multifactorielle. En plus des ressources énergétiques et des capacités physiques, (force, taux de montée de force, accélération, puissance, endurance) considérées comme déterminantes de la performance au rugby, certaines de ces qualités sont inhérentes aux joueurs plus grands et plus forts (335,425). En effet, comme le montre Bejan et Marden (351), dans de nombreuses espèces dont l'humain, la force, la vitesse et la puissance augmentent avec le poids. Même si d'autres compétences, telles la dextérité, l'adresse technique, les qualités tactiques et psychologiques,

peuvent être d'égale importance, un critère aussi simple que le poids reste un paramètre associé au succès dans une phase finale de Coupe du Monde.

Les équipes qui gagnent une Coupe du Monde ou atteignent la finale, les demi-finales ou les quart-de-finales sont aussi caractérisées par des arrières plus grands que les autres équipes. Ces données sont cohérentes avec une précédente étude (284) rapportant que les groupes finalistes de la Coupe du Monde de rugby de 1999 étaient plus grands que les autres concurrents. Le fait que les arrières participant aux derniers matchs du tournoi soient plus grands que leurs homologues peut être expliqué par les spécificités de leurs postes. En effet, être plus grand confère des avantages pendant les temps forts du jeu (c'est-à-dire les réceptions sous les coups de pieds et chandelles et la protection dans des rucks isolés en attendant le soutien des avants).

Un autre résultat clé de cette étude consiste en la démonstration que les vainqueurs, finalistes, demi-finalistes et quart-de-finalistes peuvent compter sur des avants s'appuyant sur une expérience collective supérieure à celle des autres équipes. L'expérience collective glanée lors d'une Coupe du Monde précédente et pendant les quatre saisons de compétitions entre deux Coupes du Monde est un facteur de performance pour les avants. Par ailleurs, ce pourcentage croît des équipes quart-de-finalistes (33,4%) jusqu'aux équipes victorieuses (39,6%). Le vécu collectif des avants confère un avantage certain dans les phases de combat collectif que sont les mauls, les rucks et les mêlées. L'art de l'agir ensemble, du partage dans l'action que ce soit en attaque ou en défense est l'essence même du rugby. Le placement collectif, l'effort partagé dans l'ensemble des actions des avants est essentiel, que ce soit dans les zones de rucks pour le déblayage, les touches pour la synchronisation, les mauls pour le placement, la poussée collective, l'orientation et bien entendu lors des mêlées. Contenir, orienter les poussées des coéquipiers commence par un travail collectif relatif aux placements et aux liaisons. Ce fait de jeu associe le physique mais repose aussi sur des complicités fortes, acquises au fil des ans. S'adapter collectivement aux mêlées adverses, fournir un effort commun, orienter les poussées, répondre ensemble à une situation difficile nécessite un savoir partagé et conjugué en action. Cette connaissance en action est centrale dans le jeu des avants et s'acquiert semble-t-il plus lentement. C'est pourquoi les équipes qui gagnent en coupe du monde présentent des avants avec un vécu collectif significativement supérieur à celles qui ne gagnent pas.

Nous montrons ainsi que certains facteurs comme la morphologie et l'expérience collective peuvent être prédictifs de succès. Toutefois, il est probable que bien d'autres facteurs contribuent à expliquer pourquoi seulement quatre pays ont remporté la Coupe du Monde de rugby. Une part attribuable de

la réussite de ces équipes victorieuses réside probablement dans l'investissement économique, historique, politique ou encore technologique de leur pays dans ce sport (427).

## 6.6. Conclusion

Nous montrons que les avants et les arrières deviennent plus lourds au fur et à mesure des Coupes du Monde. Même si la performance au rugby demeure complexe et multifactorielle, des facteurs aussi simples que le poids et la taille semblent discriminants dans la course à l'armement. Les équipes disposant d'avants plus lourds et d'arrières plus grands sont, de fait, plus performantes que les autres. De plus, les équipes qui gagnent une Coupe du Monde ou atteignent la finale, les demi-finales ou les quarts de finale peuvent s'appuyer sur des avants partageant une expérience collective plus conséquente que celles qui ne se sont pas qualifiées pour ces matchs.

## 6.7. Perspectives

### 6.7.1. Apport de la coupe du monde 2011 : tendances vérifiées ?

Après la Coupe du monde 2011, nous sommes en mesure de compléter cette étude en y ajoutant les 600 joueurs de cette dernière Coupe du Monde.

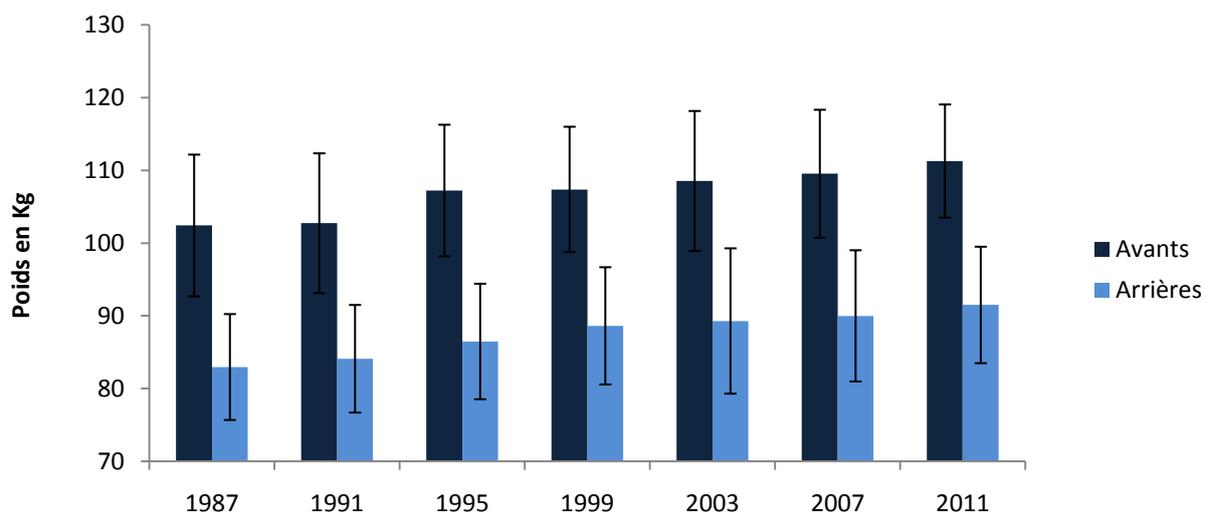


Figure 31: Evolution du poids (moyenne  $\pm$  ET) des joueurs de toutes les Coupes du Monde. ANOVA  $*=p<0,05$  pour les avants et les arrières

Lors de la CM 2007 les avants et les arrières pesaient  $109,5 \pm 8,8$  kg et  $89,9 \pm 9$  kg respectivement, alors que pour la CM 2011, le poids moyen était de  $111,3 \pm 7,7$  kg pour les avants et  $91,5 \pm 8$  kg pour les arrières (figure 31). La régression linéaire ajustée sur l'âge réalisée dans l'article indiquait une prise de masse entre chaque CM de 1,34 kg pour les avants et 1,46 kg pour les arrières, ici les avants ont pris 1,74 kg et les arrières 1,5 kg. Ce résultat montre que la tendance se confirme chez les arrières mais que pour cette CM 2011, les avants sélectionnés le sont encore plus sur leur poids renforçant les liens montrés dans l'article.

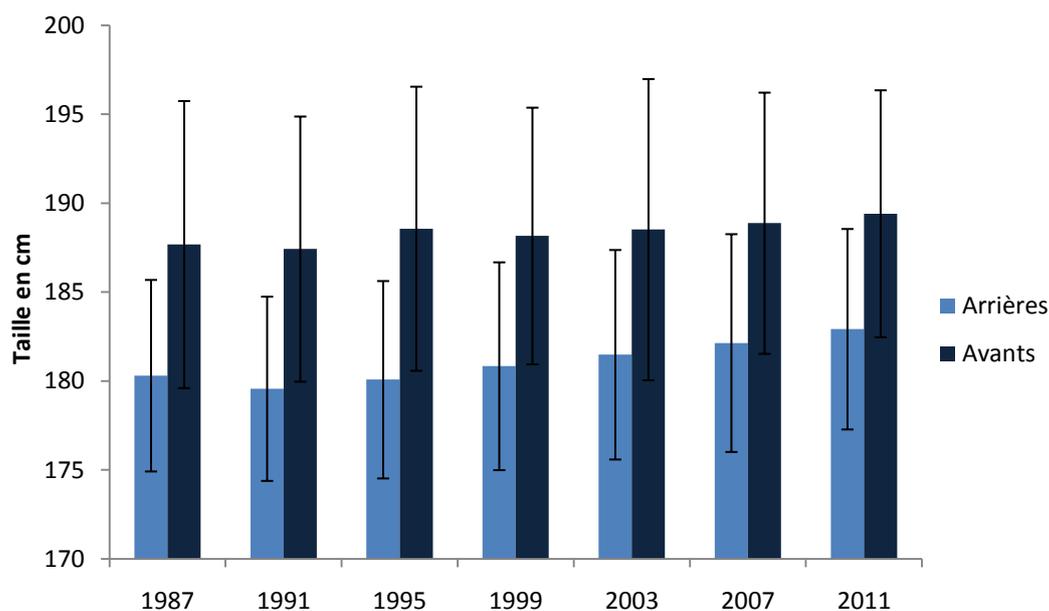


Figure 32 : Evolution de la taille (moyenne  $\pm$  ET) des joueurs de toutes les Coupes du Monde.

Concernant la taille, entre 2007 et 2011 elle est passée de  $188,9 \pm 7,5$  à  $189,4 \pm 6,9$  cm chez les avants et  $182,1 \pm 6,1$  à  $182,9 \pm 5,6$  chez les arrières (figure 32). Par rapport aux tendances détectées par la régression linéaire ajustée sur l'âge (soit + 0,16 cm pour les avants entre chaque CM et + 0,48 cm pour les arrières), les données 2011 dépassent à nouveau les augmentations précédentes.

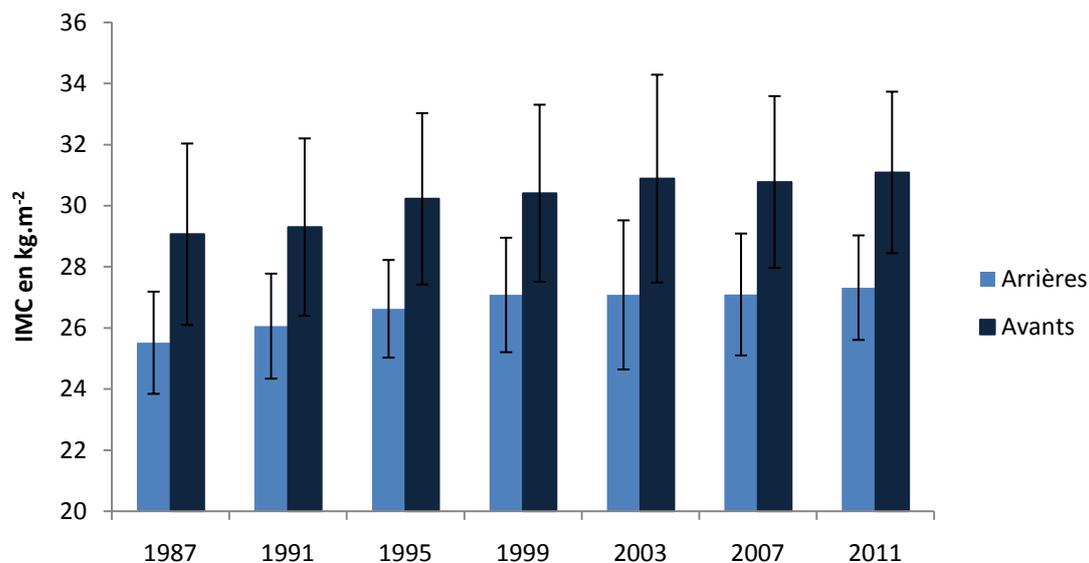


Figure 33: Evolution de l'IMC (moyen ± ET) des joueurs de toutes les Coupes du Monde.

Entre les CM 2007 et 2011, les IMC des avants sont passés de  $30,8 \pm 2,8$  à  $31,1 \pm 2,6$  kg.m<sup>-2</sup>, et ceux des arrières de  $27,1 \pm 1,9$  à  $27,3 \pm 1,7$  kg.m<sup>-2</sup> (Figure 33); confirmant là encore les tendances à l'augmentation observée dans l'article (tableau 6).

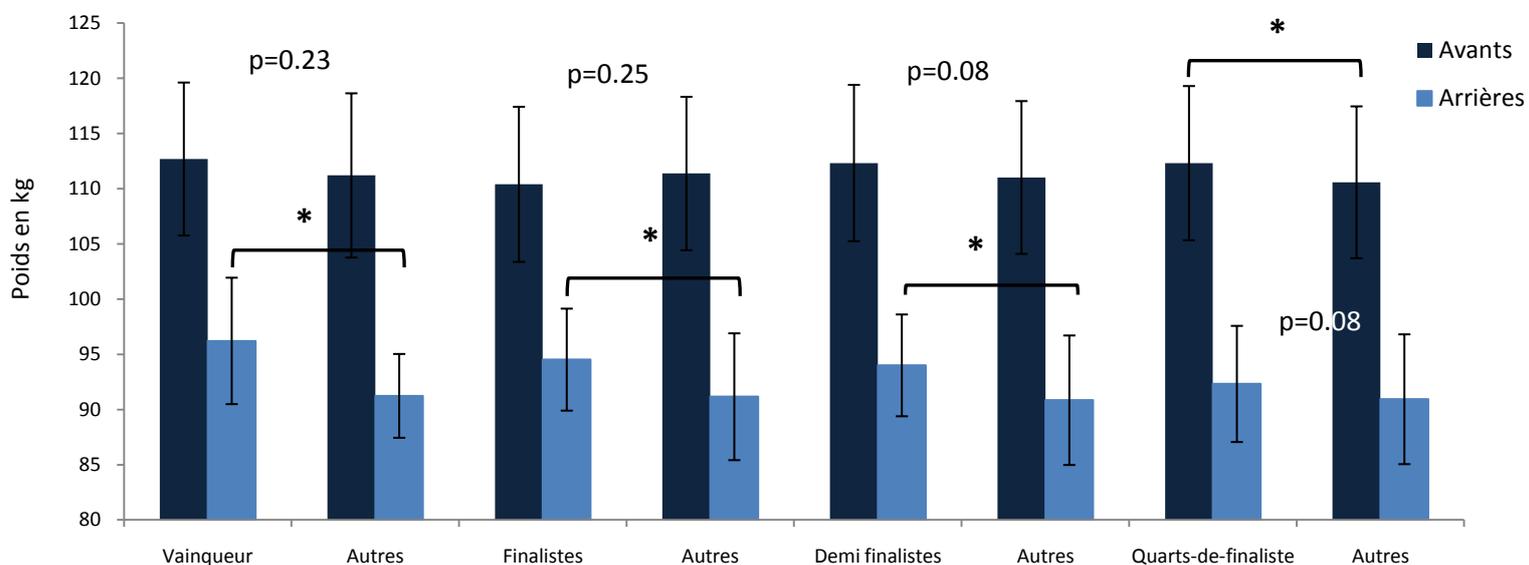


Figure 34: Poids (moyen et ET) des vainqueurs, finalistes, demi-finalistes, quart-de-finalistes versus le reste des compétiteurs.

En effectuant une analyse uniquement sur les comparaisons de poids lors de la CM 2011, nous observons des tendances proches de ce que nous avons constaté pour les CM 1997-2007 (Figure 34).

Une fois incorporés à ces analyses, les résultats 1987-2011 ne changent pas la direction des conclusions précédentes. Il en est de même pour la taille.

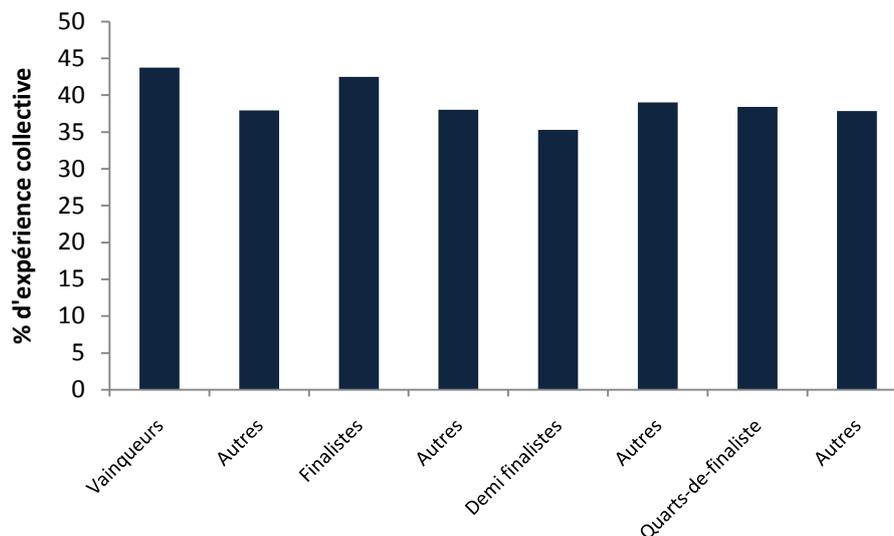


Figure 35: Pourcentage d'expérience collective des avants en fonction du stade de compétition atteint lors de la CM 2011

Enfin, sur la CM 2011, les All Blacks présentaient une expérience collective de 43,7% pour 37,9% chez les autres participants (Figure 35). Pour les finalistes, le pourcentage était de 42,5% contre 38% pour le reste des adversaires. Ces écarts confirment et renforcent encore une fois les résultats observés sur les CM précédentes.

Nous observons également un renforcement des liens entre poids, taille, expérience collective et performance en se focalisant sur la comparaison finalistes vs vainqueurs.

## 6.8. Liens étude 2- étude 3

Les majorations de poids, taille et IMC des rugbymen de haut niveau dépassent celles de la population générale (Etude 1). Or dans le contexte d'expansion morphologique de la population générale, quel modèle de croissance les athlètes suivent-ils dans d'autres disciplines ?

Le constat sur des équipes de rugbymen, très dépendants de leurs caractéristiques anthropométriques, montre que les majorations morphologiques confèrent de réels bénéfices vis-à-

vis de la performance (Etude 2). Cependant qu'en est-il sur d'autres populations sélectionnées selon des gabarits extrêmes, tels que les joueurs de football américain ou de basketball ? Quel est le rôle du poids dans l'émergence de postes en football américain ? La taille est-elle pertinente dans la startification de la performance des joueurs de NBA ? A partir de ces indicateurs morphologiques, est-il possible de quantifier des liens plus fins avec la performance ? En NBA existe-t-il une taille favorable ou un intervalle de taille propice à la performance ?



## 7. Étude 3

### Tendances séculaires dans quatre grands sports américains : poids et émergence de postes, la taille comme indicateur de performance

#### 7.1. Résumé

**Objectifs** : Comparer les évolutions séculaires en matière de poids, taille et IMC entre les athlètes et la population générale américaine, observer l'émergence d'une variabilité au sein de ces morphologies qui pourrait expliquer une différenciation selon la spécificité des postes, et étudier la relation entre la taille et la performance au tir en basket.

**Méthodes** : Les données biométriques incluant poids et taille, ainsi que l'âge ont été colligées pour 50 376 athlètes américains représentant 249 336 performeurs annuels en baseball, football américain, hockey sur glace et basketball, depuis leur première saison respective et jusqu'à la saison 2011. Les distributions par poids des joueurs de NFL sont décrites par périodes. Le total de paniers marqués a été étudié en fonction de la taille des joueurs de NBA.

**Résultats** : Entre 1871 et 2011, les athlètes de ces quatre sports ont vu leur poids, taille et IMC augmenter, suivant une fonction multi-exponentielle par séries. Les différences biométriques entre athlètes et population générale s'accroissent progressivement. L'évolution dans la distribution des poids parmi les joueurs de NFL témoigne de l'émergence d'une spécificité biométrique en fonction du poste. A ces niveaux, la performance demeure structurée autour de valeurs biométriques précises. En NBA, un attracteur-taille de  $201,3 \pm 6,3$  cm pour les meilleurs marqueurs est invariant, quelque soit le niveau de jeu.

**Conclusions** : Ces résultats suggèrent que les lois de croissance et de biométrie guident le sport de haut niveau et organisent la performance autour de contraintes spécifiques liées au poste de jeu. Des asynchronismes entre prise de poids et gain de taille conduisent à s'interroger sur l'augmentation conséquente du poids au cours des décennies 1980 et 1990.

## 7.2. Introduction

Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, la population générale, tant aux Etats-Unis qu'en Europe et dans la plus grande partie du monde, a vu son poids, sa taille, son IMC et son espérance de vie augmenter (13). Au fur et à mesure de cette expansion morphologique, la population américaine a connu un changement considérable, passant du statut de plus grande population dans le monde, à celui de population la plus en surpoids et la plus obèse (40). L'IMC est un indicateur d'énergie qui doit être interprété de deux façons : dans la population générale, c'est une mesure des réserves énergétiques et une estimation de la masse grasse, alors que pour les athlètes, il peut être appréhendé comme une indication de la réserve de puissance liée à la masse maigre (221,222). Alors que toutes les caractéristiques physiques ne jouent pas nécessairement un rôle dans les processus de sélection mis en jeu dans le sport professionnel, la taille et le poids semblent particulièrement importants (12). Les évolutions annuelles de taille, de poids, et d'IMC peuvent être analysées sur plus d'un siècle dans les quatre sports américains principaux et comparées à la population générale des Etats-Unis. Les augmentations de taille et de poids de la population générale ont un impact direct sur l'évolution de la morphologie des athlètes (12). En effet, les athlètes connaissent le même phénomène d'expansion morphologique que la population générale (13). Par ailleurs, sur un plan historique, on observe que l'expansion des performances sportives s'appuie sur une expansion des phénotypes à même de les réaliser (138). Comme l'ont montré Bejan et Marden (351), dans beaucoup d'espèces dont l'espèce humaine, la force, la vitesse et la puissance augmentent avec le poids : les nageurs les plus rapides sont aussi les plus grands et lourds (352). Ces auteurs (353) ont montré que les records du monde en course et en natation ont été établis par des athlètes avec des centres de masse différents ; un phénomène imputable aux physiques. Les morphologies des athlètes au cours du vingtième siècle suivent un processus de sélection en lien avec les contraintes de leurs sports (12). Le recrutement de morphologies de plus en plus rares se retrouve à l'échelle planétaire dans différents sports (12,412). Les caractéristiques morphologiques des athlètes devraient dès lors continuer à augmenter et s'éloigner de celles de la population générale, et devenir plus spécifiques de leurs activités au cours du siècle à venir. En effet, la morphologie procure un avantage compétitif significatif (412), dans de nombreux sports et selon les postes de jeu. Cependant les preuves empiriques à même de montrer l'influence de la biométrie sur la performance dans les disciplines où l'on trouve des gabarits plus extrêmes (263), comme en NFL ou en NBA, font défaut. Les morphologies affectent la performance et sont à l'origine de standards et de seuils de sélection. En effet, les athlètes qui prennent part à des compétitions internationales affichent en général des morphologies différentes de la population

générale. Le but de cette étude est (i) de comparer les évolutions séculaires de poids, taille et IMC entre les athlètes et la population générale américaine, (ii) d'observer l'émergence d'une variabilité au sein de ces morphologies qui pourrait expliquer une différenciation selon la spécificité des postes et en fonction de ces caractéristiques, (iii) enfin d'étudier la relation entre la taille et la performance au tir en basket.

## **7.3. Méthodes**

### **7.3.1. Collecte des données**

#### **7.3.1.1. Athlètes**

Les données correspondant aux caractéristiques biométriques et à l'âge de 50 376 athlètes représentant 249 336 performeurs annuels de quatre sports différents ont été obtenues à partir du site [www.sport-reference.com](http://www.sport-reference.com). Le poids, la taille, l'IMC et l'âge de tous les joueurs qui ont participé à au moins une saison de NBA, NFL, NHL (National Hockey League) et MLB (Major League Baseball) depuis leur année de création respective jusqu'à 2011 ont été colligés. Les 50 376 athlètes sont répartis comme suit : 3 453 joueurs de basketball de 1950 à 2011, 22 889 joueurs de football américain de 1921 à 2011, 7 213 joueurs de hockey sur glace de 1918 à 2011 et 16 821 joueurs de baseball de 1871 à 2011.

Toutes ces données ont été rassemblées à partir du site [www.sport-reference.com](http://www.sport-reference.com) et vérifiées à l'aide de différentes sources telles <http://espn.go.com/nhl/>, <http://espn.go.com/nba/>, <http://espn.go.com/nfl/>, <http://espn.go.com/mlb/>.

#### **7.3.1.2. Population générale américaine**

Les données de poids, taille et IMC de la population américaine entre 20 et 30 ans ont été colligées à partir du *National Health Examination Surveys* (NHES), des successifs *Health and Nutrition Examination Surveys* (NHANES) entre 1960 et 2002 (52,59) et entre 1999 et 2010 (60) et à partir du

livre *The changing Body* pour les statistiques les plus anciennes (13). Ces données ont été vérifiées à partir de différentes sources (40,52,58,62,428), de sites officiels comme <http://www.cdc.gov/nchs/>, et de rapports de l'OMS comme *The SuRF report 2*.

### **7.3.2. Conception de l'étude**

#### **7.3.2.1. Evolution biométrique des athlètes dans les sports américains**

Pour chaque saison, le poids, la taille et l'IMC moyens de tous les joueurs de chaque discipline ont été calculés et comparés à la population américaine. L'IMC est calculé en divisant la masse par la taille au carré.

#### **7.3.2.2. Football américain**

Les évolutions de distribution du poids de tous les joueurs de la NFL ont été observées sur trois périodes de 30 ans : saisons 1920-21 à 1949-50 ; 1950-51 à 1979-80 ; 1980-81 à 2011.

#### **7.3.2.3. NBA**

Afin de relier la performance sportive aux caractéristiques biométriques en NBA, nous avons analysé précisément la dernière période : en raison d'un plateau de taille observé depuis, nous nous sommes ainsi concentrés sur les saisons de 1987 à 2011 (incluant 10 580 performeurs annuels). Nous avons étudié le total de paniers marqués en fonction de la taille des joueurs par décile de temps passé sur le terrain. Le premier décile regroupe les 1 058 joueurs qui ont passé le plus de temps sur le terrain par saison, le dernier décile représente les 1 058 joueurs de NBA avec les temps de jeu les plus courts. Nous avons développé un traitement par décile en fonction du temps de jeu pour nous assurer que les différents postes étaient représentés de manière homogène : meneurs, arrières, ailiers, ailiers forts, pivots. Nous avons établi un seuil statistique afin de vérifier que chaque point correspondant au nombre maximum de paniers marqués par taille représentait au moins 10 joueurs différents. Nous avons séparé des classes par inch (2,54 cm) entre 160,0 et 231,1 cm. Ce seuil a été choisi pour obtenir des données représentatives et écarter les valeurs atteintes par des joueurs

uniques dans des groupes isolés de taille extrême. Une équation polynomiale du second degré a été utilisée afin de déterminer la taille optimale à laquelle les joueurs marquent un maximum de paniers pour chaque niveau de performance.

### 7.3.3. Analyses statistiques

Chaque série annuelle de paramètres anthropométriques a été fittée pour chaque sport par un modèle exponentiel en série ultérieurement développé (223) et appliqué à l'analyse de différents sports (224,429). Afin de modéliser le développement de deux paramètres morphologiques (poids et taille), nous avons utilisé la fonction suivante :

$$y = a \cdot \exp^{b \cdot t} + c \quad [4]$$

Où « y » est le paramètre morphologique estimé à l'année « t » et « a », « b » et « c » les coefficients estimés par la méthode des moindres carrés non linéaires. Cette fonction a été ajustée à différentes périodes de temps pour chaque discipline et chaque paramètre (*tableau 7*). Le R<sup>2</sup> et les erreurs quadratiques moyennes (RMSE : Root mean square error) sont donnés pour chaque période fittée (*tableau 8*). Les événements historiques (224,427,429) ont permis de distinguer différentes périodes pour chaque sport depuis son commencement jusqu'à la fin de la saison 2011. Le modèle (eq. [4]) a été ajusté à chaque période de temps.

Concernant les données de NBA, nous avons réalisé une modélisation de la performance sous forme de paniers marqués en fonction de la taille. La meilleure performance par taille est fittée par une fonction polynomiale du 2<sup>nd</sup> degré. Le seuil de significativité a été établi à  $p=0,05$ . Les analyses statistiques ont été réalisées à partir du logiciel Statistica 7.1 et R 2.13.0.

## 7.4. Résultats

### 7.4.1. Tendances séculaires

L'augmentation du poids moyen s'élève à 14 kg pour les joueurs de NHL entre les saisons 1918 et 2011 (1,5 kg/décennie), 22,9 kg pour les joueurs de MLB depuis 1871 (1,6 kg/décennie), 14,2 kg pour les joueurs de NBA entre 1950 et 2011 (2,3 kg/par décennie), et 24,8 kg pour les joueurs de NFL depuis 1920 (2,7 kg/décennie). Sur ces mêmes saisons respectivement, on a observé une augmentation de la taille moyenne de 8,2 cm pour les joueurs de NHL (0,9 cm/décennie), 8,2 cm pour la NFL (0,9 cm/décennie), 13,4 cm pour la MLB (0,9 cm/décennie), et 9,7 cm pour les joueurs de NBA (1,6 cm/décennie). Les augmentations d'IMC moyen furent ainsi de 1,4 kg.m<sup>-2</sup> pour les joueurs de NHL, 1,3 kg.m<sup>-2</sup> pour les joueurs de NBA, 3,3 kg.m<sup>-2</sup> pour la MLB et 4,5 kg.m<sup>-2</sup> pour les joueurs de NFL sur la même période. L'âge moyen était quant à lui de 26,3 ± 0,5 ans en NFL, 26,4 ± 0,5 ans en NBA, 27,1 ± 0,9 ans en NHL et 28,2 ± 0,6 ans en MLB.

Tableau 7 : Nombre de périodes par discipline et par paramètres anthropométriques.

Disciplines	Nb de périodes	Périodes
<b>Taille</b>		
NBA	1	[1950-2011]
NFL	2	[1920-1945] [1946-2011]
NHL	3	[1918-1945][1946-1984][1984-2011]
BASEBALL	2	[1871-1926][1926-2011]
<b>Poids</b>		
NBA	2	[1950-1979][1979-2011]
NFL	3	[1920-1945][1945-1979][1979-2011]
NHL	3	[1925-1955][1955-1984][1984-2011]
BASEBALL	3	[1871-1920][1920-1987][1987-2011]

La figure 36a montre l'évolution de la taille moyenne de tous les athlètes en fonction des saisons, en comparaison avec celle de la population générale. Pour tous les athlètes comme pour la population générale, on observe une stagnation de la taille moyenne depuis les années 1990. Un creusement de l'écart entre athlètes et population générale est observé : en 1870, les joueurs de baseball mesuraient 2,8 cm de plus que la population générale, en 2011, ils mesuraient 11,9 cm de plus. Le creusement de cet écart s'observe dans tous les sports. Les joueurs de NHL, NFL et NBA mesuraient 2,7 cm, 6,7 cm et 20,2 cm de plus que la population générale au moment de la première saison de leur sport, pendant la saison 2011 ils mesurent respectivement 10,1 cm, 11,9 cm et 24,9 cm de plus.

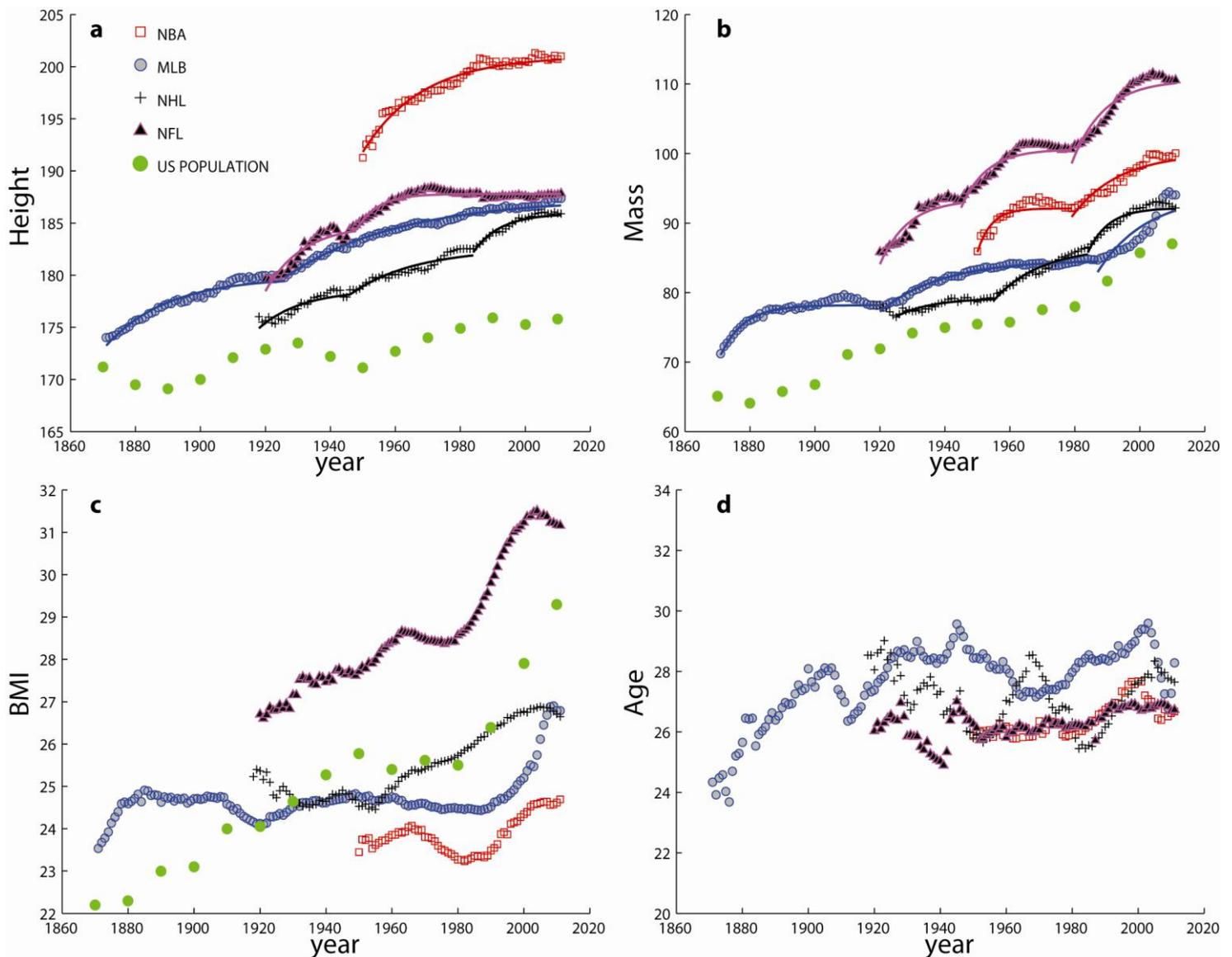


Figure 36: Evolution de la taille, du poids, de l'IMC et de l'âge (moyenne  $\pm$  ET) pour tous les joueurs de NBA, NHL, NFL et MLB

La figure 36b fait apparaître l'évolution du poids moyen de tous les athlètes en fonction des saisons comparée à celle de la population générale. Une période de croissance synchronisée a débuté dans les années 1980 : entre 1980 et 2011 le poids moyen a augmenté de 6,4 kg pour les joueurs de NHL (2,1 kg/décennie), de 9,4 kg pour la NFL (3,1 kg par décennie), de 7,9 kg pour la NBA (2,6 kg/décennie) et de 9,7 kg pour les joueurs de MLB (3,2 kg/décennie). Sur la même période, alors que les joueurs de NFL ont pris 9,4 kg sans grandir, les joueurs de MLB ont vu leur poids augmenter de 9,7 kg et leur taille de seulement 1,7 cm. L'écart entre le poids moyen des athlètes et le poids de la population s'est également creusé. En 1920, les joueurs de NFL pesaient 13,9 kg de plus que la

population générale, alors que la différence s'élevait à 23,6 kg en 2011. De même, les joueurs de MLB et de NBA pesaient 6,1 et 10,5 kg de plus pendant leur première saison, mais 7,1 et 13,1 kg de plus pendant la dernière.

Tableau 8:  $R^2$  and Root mean square error (RMSE) pour chaque période fittée des graphiques 1a et 1b.

Taille	Courbe1		Courbe2		Courbe2	
	$R^2$	rmse	$R^2$	rmse	$R^2$	rmse
NBA	0,9628	0,4964				
BASEBALL	0,9499	0,4241	0,9849	0,2468		
NHL	0,9015	1,0223				
NHL2	0,8078	0,506	0,8644	0,4676	0,9477	0,257
NFL	0,888	0,6333	0,8466	0,3194		
Poids	Courbe1		Courbe2		Courbe3	
	$R^2$	rmse	$R^2$	rmse	$R^2$	rmse
<b>NBA</b>	0,8148	0,8811	0,8987	0,8666		
<b>BASEBALL</b>	0,9227	0,5439	0,9828	0,2645	0,7447	1,7082
<b>NHL</b>	0,8871	1,4836				
<b>NHL2</b>	0,8372	0,3422	0,936	0,5433	0,8994	0,6556
<b>NFL</b>	0,8562	1,1566	0,8823	0,9128	0,8894	1,2734

La figure 36c montre l'évolution de l'IMC moyen de tous les athlètes en fonction des saisons comparée à celle de la population générale. Depuis 1980, on observe une augmentation considérable pour tous les athlètes. Entre 1980 et 2011 les joueurs de NFL ont vu leur IMC augmenter de  $2,6 \text{ kg.m}^{-2}$ . De même, les joueurs de basketball, de baseball et de hockey avaient un IMC de  $23,3 \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $24,5 \text{ kg.m}^{-2}$  et  $25,7 \text{ kg.m}^{-2}$  pendant la saison 1980, IMC qui avait atteint, respectivement,  $24,7$ ,  $26,8$  et  $26,6 \text{ kg.m}^{-2}$  pendant la saison 2011.

#### 7.4.2. Football américain

La figure 37a illustre l'évolution de la distribution du poids des joueurs de NFL sur trois périodes d'approximativement 30 ans. Sur la période 1920-1949 (P1), le poids des joueurs de football suit une distribution normale. Pendant la période 1950-1979 (P2), trois pics émergent : à 90 kg, 105 kg et 115

kg. Sur la période la plus récente 1980-2011 (P3), le premier pic s'établit à 95 kg, le second à 110 kg, le troisième à 120 kg et le dernier à 140 kg. Sur la période entière, on observe un élargissement important de la distribution des poids. La *figure 37b* illustre la distribution du poids des joueurs de NFL (surface grise) comparée à la population générale : la distribution du poids des individus se déplace vers la droite (les individus sont de plus en plus lourds) mais les athlètes pèsent également plus lourd et s'éloignent de plus en plus des normes standard.

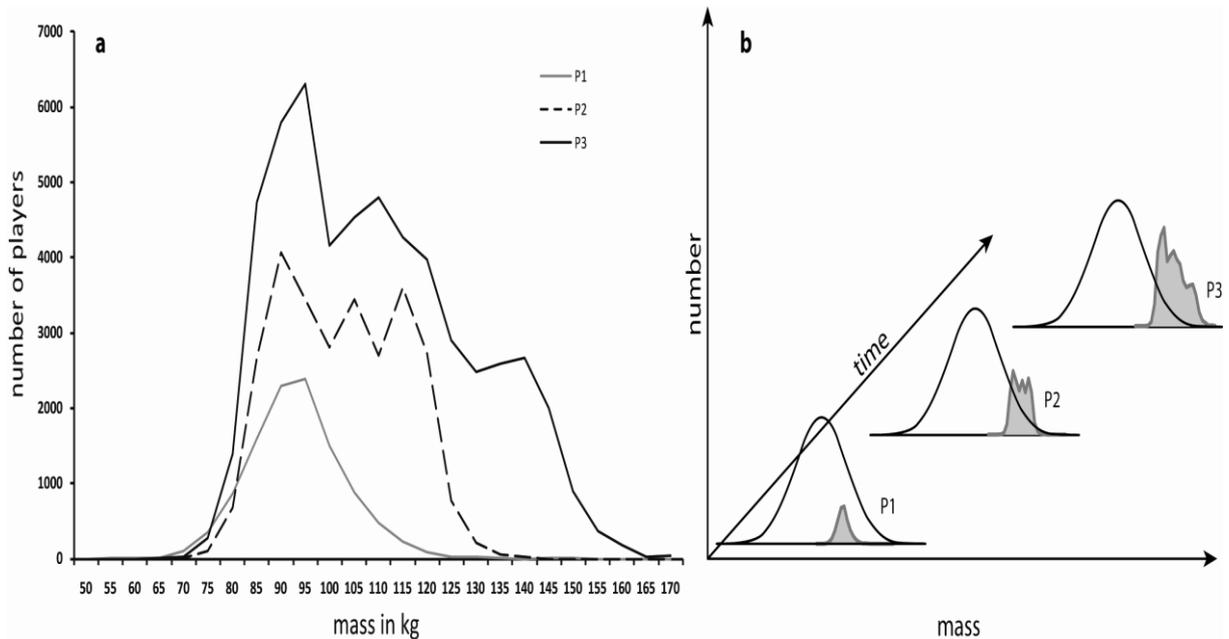


Figure 37: 37a Evolution de la distribution du poids des joueurs de NFL selon 3 périodes. 37b Changements conceptuels de la distribution du poids des joueurs de NFL comparés à la population générale.

### 7.4.3. NBA

La *figure 38* montre le nombre maximum de paniers marqués par saison de NBA en fonction de la taille. La taille moyenne des meilleurs marqueurs ou « *attracteur-taille* » atteint  $201,3 \pm 6,3$  cm (pic moyen pour chaque fonction polynomiale modélisée pour tous les déciles). En effet, cette relation est pour le premier décile ( $y = -0,5298x^2 + 206,73x - 19326$ ,  $R^2 = 0.65$ ), avec un maximum de 1098 paniers marqués pendant la saison 1987 par M. Jordan (qui mesure 198 cm).

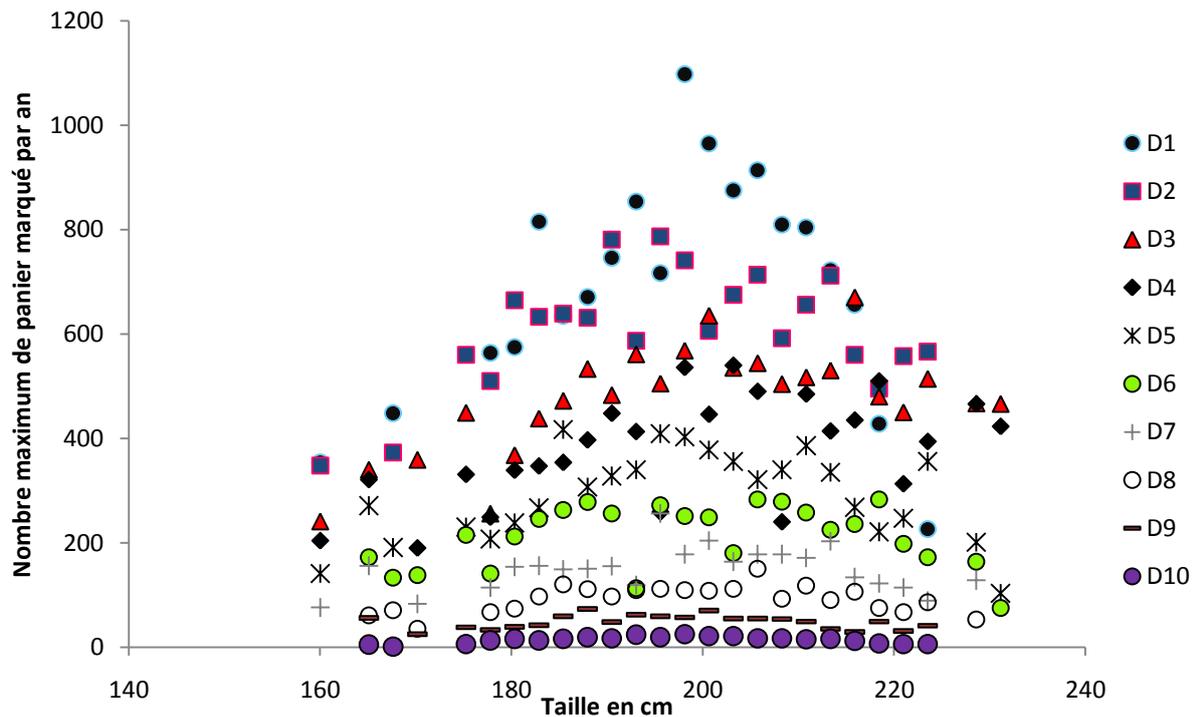


Figure 38: Nombre maximum de paniers marqués par saison en fonction de la taille entre les années 1987-2011.

Cet attracteur-taille est constant quel que soit le niveau : il est similaire pour tous les déciles (figure 39). Même pour les joueurs de NBA qui passent le moins de temps par saison sur le parquet, les meilleurs marqueurs ont un optimum de taille similaire. Du premier au dernier décile, les joueurs mesurant entre 190 et 208 cm ont marqué le même pourcentage de points dans leur catégorie (50.3% des points marqués dans le premier décile et 51.6 % dans le dernier).

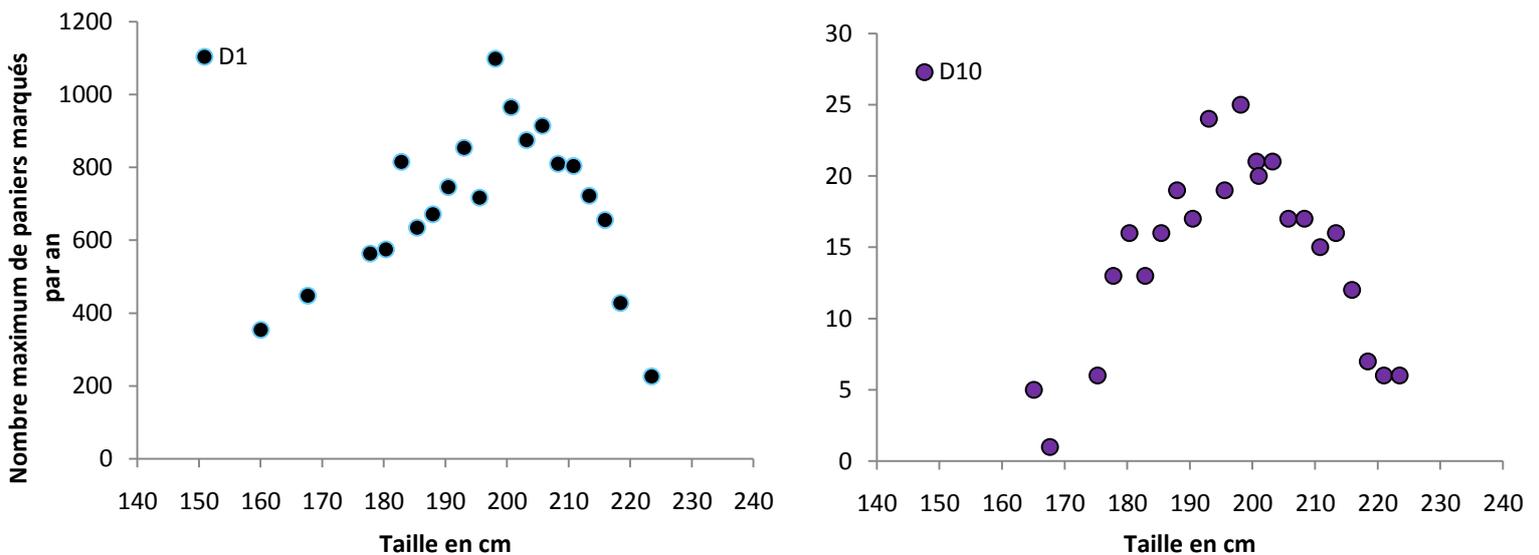


Figure 39: Nombre maximum de paniers marqués par saison en fonction de la taille entre les années 1987-2011, pour le premier et le dernier décile.

## 7.5. Discussion

### 7.5.1. Tendances séculaires

Nous montrons qu'entre 1871 et 2011, les athlètes professionnels des quatre grandes ligues de sports américains affichent de considérables augmentations de poids, taille et IMC évaluées par des séries multi-exponentielles. Cette tendance s'observe dans différents sports à différentes périodes (12,49,236,412,430). Ces augmentations sont, dans une certaine mesure, impulsées par les taux de croissances observés dans la population générale (52,59,60,62), un fort processus de sélection se charge ensuite de maximiser ces caractéristiques dans les sports professionnels. L'étude montre une expansion considérable du poids pour tous les athlètes avec une synchronisation des pentes, révélant une augmentation considérable qui débute dans les années 1980. Ceci confirme les tendances de gains substantiels de poids observés chez les sportifs (12), surtout en NFL (49,236,237). Etant données les contraintes de jeu qui le dirige vers un accent plus grand mis sur la vitesse multidirectionnelle et l'agilité, l'augmentation de la masse maigre est cruciale (236). La maximisation de la morphologie et la quête de « super-gabarits » sont inhérents à la sélection en NFL, qui s'exprime par une demande plus importante tournée vers les athlètes plus grands (237). Les augmentations de poids dans les quatre sports peuvent aussi être expliquées par les augmentations et la diversification de la charge d'entraînement (237) et les programmes de musculation (431–434), associés à un suivi nutritionnel (49,237). Une autre explication possible implique des changements de règles (237) comme l'interdiction de *cutter* (plonger en direction des jambes) pendant un *drive blocking* en NFL. Ceci exige des joueurs qu'ils viennent supporter leur coéquipier dans leur *pushing blocks* et requiert plus de puissance. Le fait que les joueurs en défense puissent lever leurs bras pour bloquer le ballon, qu'un plus grand nombre de joueurs soient autorisés par équipe et que les périodes de repos pendant le jeu soient plus nombreuses a peut-être contribué au recrutement de joueurs plus massifs (12). Le parallélisme de ces croissances dans des sports aussi différents que le baseball, le basketball et le hockey cache probablement des tendances communes plus profondes.

L'étude montre des augmentations de l'IMC des athlètes américains. Nous observons également une synchronisation des pentes avec une stagnation entre 1960 et 1980, de manière similaire à ce qui fut observé dans la population générale (52). Cependant, ces gains majeurs d'IMC observés en population générale et chez les athlètes, même s'ils font apparaître des augmentations synchrones,

ne reflètent pas des types de croissance similaires : dans la population générale, une telle augmentation reflète principalement l'augmentation de la masse grasse, tandis que chez les athlètes cette augmentation de l'IMC reflète une masse musculaire plus importante (221,222). Néanmoins un déplacement récent de l'IMC de la population générale est illustré par une sortie de la zone optimale des courbes d'iso-IMC (135). Alors que le gain de masse grasse au sein de la population générale est connu pour ses nombreuses conséquences néfastes pour la santé, un gain substantiel de poids chez les athlètes pourrait quant à lui être nuisible en termes de blessures (435) ou de risque pour la santé (336,436).

### **7.5.2. Creusement des écarts**

Cependant, les caractéristiques physiques des athlètes s'éloignent de plus en plus de celles de la population générale. Ce creusement d'écart souligne la composante sélective du sport professionnel (430), orienté vers des caractéristiques morphologiques spécifiques comme cela a été montré dans le rugby (412,430) et dans d'autres sports (12,49). De plus, quelle que soit la période, tous les athlètes sont en moyenne plus grands et plus lourds que leurs homologues non-athlètes du même âge dans la population générale, des tendances cohérentes avec les résultats d'études antérieures (12,430). Le creusement d'écart s'observe dans tous les sports (taille et poids), malgré l'expansion observée dans la population générale.

### **7.5.3. Effet de plateau observé chez les athlètes sélectionnés spécifiquement sur leur taille**

Après les gains significatifs du début jusqu'au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle, les augmentations de la taille moyenne furent beaucoup plus faibles, et stagnent depuis 1990 (12,236). Ceci pourrait partiellement s'expliquer par le statut nutritionnel (13). La transmission de conditions nutritionnelles optimales pendant des générations a peut-être permis l'expression d'une taille maximale de chaque individu et, de ce fait, des athlètes choisis au sein de la population générale. La stagnation pendant 30 ans de ces populations particulièrement grandes présente des similarités avec la stagnation observée pour les records du monde (223) et les meilleures performances mondiales (224). A travers les augmentations de taille et de poids, une fonction homothétique entre le record du monde et la biométrie pourrait modéliser la performance sportive de haut niveau. En effet, les évolutions de taille et de poids à

travers le siècle suivent le même modèle exponentiel en série observé dans la performance en cyclisme sur route (429), dans les records du monde en natation, haltérophilie ou 50 km marche (223) ou chez les meilleurs performeurs en athlétisme et natation (224). De plus il existe une pression sélective sur les plus grands athlètes dans les différents sports (12). Les tendances à la stagnation de la taille d'abord observées chez les joueurs de NFL et de NBA pendant les décennies 1970 et 1980 apparaissent également en MLB et NHL dans les années 2000. Contrairement aux évolutions morphologiques observées dans de nombreux sports (12,412,430), celles qui sont étudiées ici cessent. Ceci peut être dû à un épuisement des processus de sélection dans un pool d'athlètes grands et lourds déplété, ou à une optimisation morphologique.

#### **7.5.4. Asynchronisme entre les augmentations**

Des asynchronismes récurrents entre les augmentations de taille et de poids posent la question de l'utilisation de produits dopants. Une telle discordance entre les évolutions attendues des indicateurs de performance a déjà été évoquée dans le cyclisme sur route (429). A la préparation physique et au suivi nutritionnel sont associés des stéroïdes anabolisants chez de nombreux joueurs afin d'augmenter la masse musculaire et la force (237). Dans le rapport Mitchell (437), plusieurs joueurs de baseball ont suggéré que la moitié de ces derniers utilisaient des stéroïdes anabolisants. A certains postes de jeu en NFL, le ratio a été décrit comme atteignant près de 90% (438), particulièrement parmi les joueurs de ligne (237). Dans le même temps, le rapport annuel de l'Agence mondiale antidopage faisait état d'un chiffre beaucoup plus bas, proche de 1% (128 positifs sur 18 402 joueurs de baseball testés, 68 des 5 370 joueurs de hockey sur glace, 160 des 21 225 joueurs de football, et 139 des 9 575 joueurs de basketball ont été testés positifs pour des drogues améliorant la performance) (415). En dépit de ce bas pourcentage, il est presque universellement accepté que l'utilisation des drogues améliorant la performance soit le plus grand problème rencontré dans le sport aujourd'hui (12). Au sein de cette large estimation (1-90%), la vérité avoisine probablement un pourcentage assez élevé, parce que les gains de poids assez incompatibles avec de petites augmentations de taille mettent en lumière des discordances difficiles à expliquer. Le sommet officiel de l'iceberg (données de l'AMA), pourrait en fait reposer sur une base sous-jacente de comportements déviants. Supportée par des preuves et des témoignages quant à un recours répandu aux stéroïdes, l'asynchronisme entre les augmentations de poids et de taille suggère, comme le soulignent Norton et OLds (12), que des aides ergogéniques ont été largement impliquées.

Des recherches plus approfondies seront nécessaires pour valider les causes et conséquences directes de ces résultats et de l'utilisation potentielle de drogues. Malgré tout, l'asynchronisme entre les augmentations de taille et de poids peut être utilisé pour souligner l'atypicité (224).

#### 7.5.5. Football américain

Pendant la première période, la distribution normale des poids montre une variabilité plus faible entre les joueurs évoluant aux différents postes. Pendant la deuxième période, trois pics émergent, reflétant la spécificité de chaque poste de jeu. C'est à partir de cette période que la NFL assoie son statut (premier Super Bowl en 1967), conduisant les équipes à accorder davantage d'attention au choix des joueurs recrutés en fonction de leurs besoins stratégiques ou tactiques. Dans cette deuxième période, le premier pic à 90 kg correspond au poids moyen des *wide receivers* (WR), *corner backs* (CB) et *tell backs* (TB), l'évolution du poids moyen étant cohérente avec les résultats d'études antérieures obtenus sur la même période (Kraemer et al., 2005). Les joueurs à ces postes de jeu sont les plus rapides, athlétiques et très explosifs. WR et TB portent le ballon en attaque, ils sont capables de changer de direction en un minimum de temps et d'espace. Les CB sont leurs homologues défensifs et de ce fait doivent assurer leur couverture et les suivre sur le terrain, expliquant leurs caractéristiques morphologiques similaires. Ensuite, les *Full backs* (FB), *linebackers* (LB) *tight ends* (TE) et *defensive ends* (DE) pèsent entre 105 et 110 kg. Poids moyen en accord avec de précédentes études de la même période (148,294). Ces joueurs sont un peu moins rapides mais très puissants. Par exemple l'objectif principal du FB est de réaliser un lead block pour le TB. Il doit dégager le LB qui est son homologue défensif et ouvrir un chemin pour le TB qui le suit. Il peut également prendre le ballon afin de franchir plein centre dans les cas où il manquerait quelques yards à parcourir. Ce qui nécessite une grande force et puissance chez ces joueurs. Le TE est souvent un peu plus grand en taille (295), il est nécessairement puissant car il doit pouvoir bloquer un defensive line (DL). Le TE est un joueur complet, également rapide car il peut aussi sortir en tracé pour attraper un ballon, c'est pourquoi son gabarit est souvent un mixte entre le WR et l'offensive line (OL) (295). Le DE a pour objectif principal d'assurer un countain, il doit aussi pouvoir amener le jeu au sol à l'intérieur de la défense c'est pour cela qu'il doit également présenter de grandes qualités de puissance si un OL vient le bloquer. Enfin vers 115-120 kg les joueurs de ligne : OL et DL composé de nose (N) en défense et centre (C) et guards (G) en attaque. Ce sont les joueurs les plus lourds du foot US (295,439), ils se déplacent sur de courtes distances 5-10 yards. Les N ont pour objectifs soit d'arrêter

le jeu au sol en bouchant les trous que pourrait emprunter le TB soit d'aller « sacker » le quarterback lors des jeux de passe. Les G et C ont pour objectifs d'ouvrir des portes aux coureurs (RB) en dégagant les N ou de bien protéger le quarterback lors des jeux de passe : dans ces deux cas une grande force est nécessaire. Sur la dernière période (1980-2011), le premier pic autour de 95 kg rassemble WR, CB et TB (au cours de la saison 2012 de NFL, le poids moyen était de 92,6 kg, données personnelles), le pic de 110 kg représente les DE, FB, TE et une athlétisation des joueurs de ligne (confirmé par la saison 2012 de NFL, analyse personnelle : la moyenne pour ces trois postes était de 108,6 kg). Dans la période contemporaine, les données font apparaître un autre pic autour de 120 kg qui inclurait les DL et OL (confirmé par les données de la saison 2012) ; ces joueurs sont devenus plus imposants parce que de plus larges OL offrent une meilleure protection des passes pour les *quarterback* dans une équipe susceptible de s'appuyer sur un jeu de passes. Le pic le plus extrême de distribution se situe à 140 kg et inclut des DL et OL (T, OG, G, C et NT) (saison 2012 : poids moyen de 142,1 kg, données personnelles). Ces joueurs, aux caractéristiques morphologiques extrêmes seraient utilisés lors de formation spéciale : en attaque « BIG » lorsqu'il ne reste qu'1 ou 2 yards à parcourir près de la end zone. Pour les DL, ces joueurs plus lourds seront utilisés pour boucher les trous et éviter d'être déplacés par les OL. Ces catégorisations en fonction du poids sont en accord avec celles montrées par Kraemer et al (236) comparant ses données de la saison 2003 avec celles plus anciennes d'autres auteurs de 1998 (239), 1976 (294) et 1972 (148). Des exigences morphologiques en football américain semblent jouer un rôle de facteur de sélection tout au long de la deuxième période débutant en 1950 avec un degré de spécialisation toujours plus grand (236,239).

#### **7.5.6. Basketball**

Un autre résultat clé de cette étude consiste à montrer l'existence d'une taille moyenne (attracteur-taille) des meilleurs marqueurs se situant autour de 201 cm, un chiffre qui ne varie pas en fonction du niveau de jeu. Les individus plus grands jouissent d'un avantage évident pour jouer au basketball. La taille améliore l'exécution de certains mouvements spécifiques : les tirs des plus grands joueurs ont une distance plus faible à parcourir jusqu'au panier ; ces joueurs débutent leur action plus près du rebond ; et leur capacité à sauter plus haut offre une meilleure chance de bloquer les tirs des joueurs plus petits ou de réussir un lay-up ou un dunk. Une caractéristique physique comme une grande taille peut ainsi constituer un prérequis important au basketball (243) : les meilleurs meneurs et ailiers sont plus grands que les moins bons marqueurs (241,337). En revanche, l'observation de la combinaison de toutes les qualités qui font la performance au basketball révèle que la relation entre

taille et paniers marqués ne suit pas une tendance linéaire. Nous montrons ici que cette relation passe par un optimum. C'est probablement cette morphologie qui réunit au mieux certaines qualités requises telles que la vitesse, le saut, l'agilité, la dextérité ou les qualités de tirs, tout en retirant les bénéfices d'une morphologie imposante. Cette taille peut aussi représenter le meilleur compromis pour marquer non seulement derrière la ligne des trois points, mais aussi à mi-distance, ou encore finir par un *lay-up* ou un *dunk*, permettant ainsi d'optimiser les opportunités de marquer par une triple menace. Il s'agit peut-être du meilleur compromis entre différentes exigences à même de résoudre un problème d'optimisation multi-objectifs (316). Quel que soit le niveau de jeu (temps de jeu les plus courts ou les plus longs), il semble que 201 cm définissent l'attracteur-taille. Les arrières et les ailiers mesurent en moyenne 201,9 cm (au cours de la période étudiée). Ces joueurs ont un rôle majeur dans le scoring de leur équipe et créent plus d'incertitude parmi les adversaires grâce à leur capacité à tirer depuis des longues, moyennes et courtes distances. De chaque côté de cet optimum de taille nous trouvons que les plus proches de l'attracteur-taille (c'est-à-dire les plus grands parmi les petits et les plus petits parmi les grands) marquent davantage de paniers. Non seulement un optimum existe, mais nous suggérons de plus l'existence d'un **intervalle de performance** dans lequel les joueurs dont la taille se situe dans un petit éventail (entre 190-208 cm) marquent plus de 50 % de tous les paniers tandis que le spectre des tailles est, lui, beaucoup plus étalé (160-231 cm). Ceci n'implique pas que les joueurs plus grands ou plus petits ne marquent pas, mais simplement qu'ils marquent moins. En effet, la performance diminue au fur et à mesure que la taille s'éloigne de l'optimum et est maximisée dans une gamme de tailles plutôt que pour un chiffre précis (316). Un éventail de tailles entre 190 et 208 cm pourrait être un meilleur compromis pour toutes les tâches impliquées au basketball et un intervalle à même de potentialiser la performance selon ces ressources énergétiques, de compétences physiques ou d'expérience collective, autant d'éléments qui la génèrent au basketball (241,243,440). Un physique idéal n'est certes pas synonyme d'excellence, mais il y contribue largement, la clé étant de trouver sa propre combinaison parmi toutes les qualités qui font la performance au basketball.

## 7.6. Conclusion

En conclusion, cette étude fait apparaître des augmentations séculaires de poids, de taille et d'IMC des joueurs des quatre sports américains majeurs. Cette tendance semble toutefois se stabiliser pour la taille tant parmi les joueurs professionnels qu'au sein de la population générale. En comparant les progressions des lois de croissance, les différences entre certaines évolutions biométriques (taille vs. poids) engendrent des questions quant aux comportements qui ont permis ces augmentations de poids entre 1980 et 1990. Sur la période considérée dans son ensemble, des spécificités morphologiques de postes émergent, confortées par l'expansion morphologique et une sélection renforcée. En NBA, est mis en évidence un intervalle de performance ainsi qu'un attracteur-taille invariant d'échelle bénéfique au scoring.

## 7.7. Perspectives

Dans la même logique de traitement par décile nous obtenons pour les rebonds :

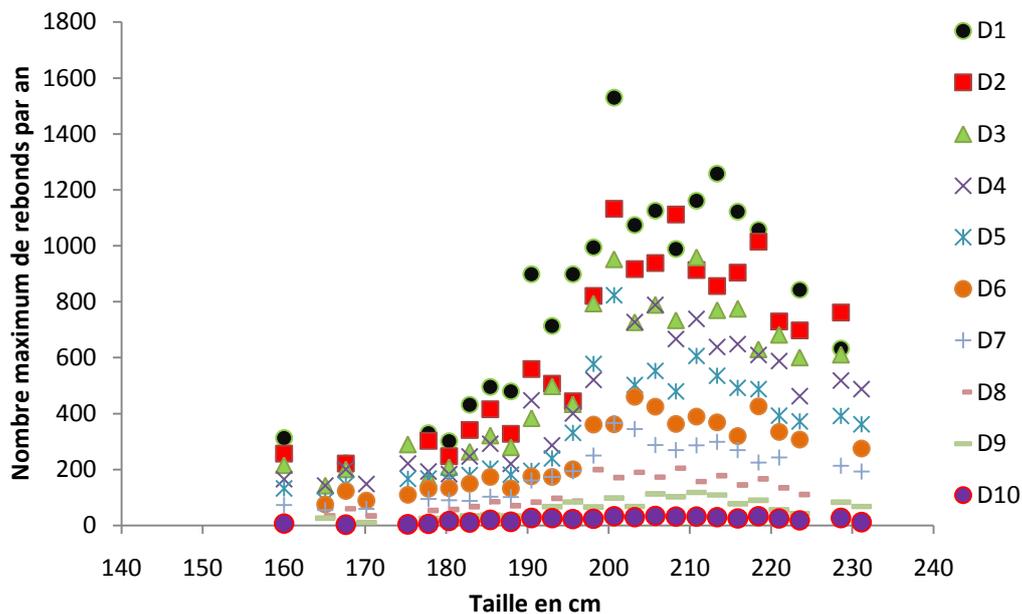


Figure 40: Nombre maximum de rebonds par saison en fonction de la taille entre les années 1987-2011.

Et selon le premier et le dernier décile :

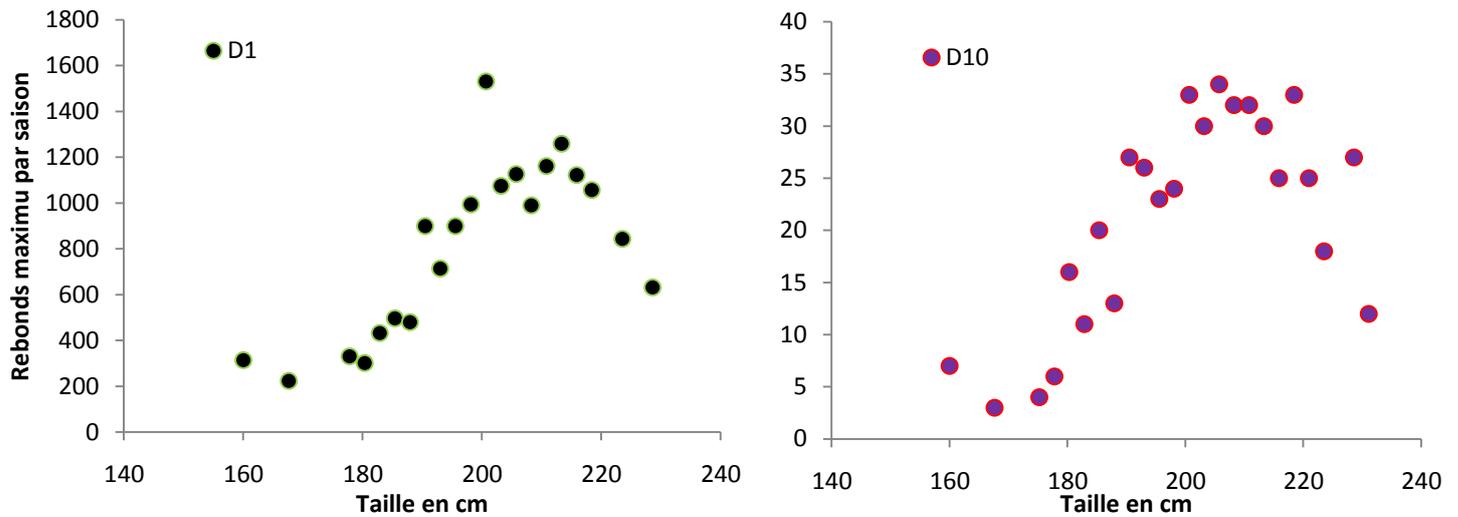


Figure 41: Nombre maximum de rebonds par saison en fonction de la taille entre les années 1987-2011, pour le premier et le dernier décile.

Ce type de relation peut donc s'appliquer à d'autres indicateurs de la performance.

### 7.8. Lien étude 3- étude 4

L'optimum de taille, entouré de son intervalle favorable à la performance, révèle des optimisations morphologiques.

Ces questions d'optima et d'intervalles de performance se posent aussi autour de la composante primaire du mouvement : la course. Quels liens structurent poids, taille, IMC et vitesse ? Existe-t-il des gradients morphologiques dans l'expression de la performance, selon les spécificités de course ?

## 8. Étude 4

# L'IMC, un indicateur de performance dans l'augmentation de la vitesse

### 8.1. Résumé

**Objectifs :** Etudier la relation entre les caractéristiques anthropométriques et la performance selon le spectre des distances en athlétisme et évaluer l'IMC en tant qu'indicateur de performance.

**Méthodes :** Poids, taille, IMC et vitesse ont été collectés pour les athlètes masculins internationaux du Top 100 sur 100, 200, 400, 800, 1 500, 3 000, 10 000 mètres et marathon, pour les saisons 1996 à 2011, et analysés par décile de performance.

**Résultats :** La vitesse est positivement corrélée au poids ( $r=0,71$ ) et à l'IMC ( $r=0,71$ ) chez les coureurs internationaux, et plus modérément à la taille ( $r=0,39$ ). Les athlètes sont en moyenne de plus en plus légers et de plus en plus petits au fur et à mesure que la distance augmente. Pour chaque distance, la performance est organisée autour de gradients morphologiques. Comme s'il fallait être « aussi petit et léger que possible » en endurance et « aussi lourd et grand que possible » en sprint. La comparaison de l'ensemble des athlètes révèle que la vitesse augmente progressivement avec l'IMC. Avec l'augmentation de la performance, la variabilité de l'IMC se resserre progressivement, et reste centrée autour d'un optimum spécifique de la distance.

**Conclusions :** Parmi les athlètes masculins, la vitesse de course est organisée autour de gradients biométriques, qui induisent, et sont induits par l'optimisation de la performance. Des optima morphologiques et une variabilité des gradients de performance émergent au sein du continuum des courses athlétiques. La performance de très haut niveau est associée à des intervalles biométriques plus étroits ou « **intervalles de performance** ». En termes d'IMC, les possibilités d'organisation sont plus grandes en sprint alors qu'un aspect plus restrictif s'exerce sur le physique des coureurs de longue distance. L'IMC est un indicateur pertinent pour distinguer les performances des athlètes par discipline et par niveau.

## 8.2. Introduction

En règle générale, dans la nature s'exprime une tendance vers plus de diversité et de complexité (441). Dans des circonstances favorables cela peut s'exprimer par l'expansion de la variabilité phénotypique. De simples caractéristiques morphologiques comme le poids et la taille d'une espèce peuvent suivre cette loi. Au cours du siècle dernier, la population des pays développés a vu augmenter sa taille, son poids, son IMC et son espérance de vie (13). Par conséquent, la diversité morphologique s'est accrue dans ces populations. Diversité et complexité dans le sport incluent des capacités génétiques, physiologiques, psychologiques, parmi lesquelles les aptitudes morphologiques jouent aussi un rôle. Le sport est considéré comme un système sélectif en raison de sa nature compétitive (300), fondé sur la conservation des caractéristiques qui conduisent à la réussite. Une des premières caractéristiques sélectionnées est le gabarit, ainsi le recrutement d'athlètes surdimensionnés est commun à la plupart des sports (12,412). Des études ont démontré un lien entre morphologie et succès en athlétisme (263,265). L'IMC est un indicateur englobant poids et taille, permettant la comparaison d'athlètes sur différentes distances. Chez les marathoniens, Marc et al (442) ont identifié les profils les plus appropriés et les conditions permettant de réaliser les meilleures performances. Ils ont trouvé que l'IMC optimal pour les hommes était de  $19,8 \text{ kg.m}^{-2}$ , et pour les dix meilleurs performeurs de tous les temps un éventail d'IMC allant de  $17,5$  à  $20,7 \text{ kg.m}^{-2}$ . L'accession au très haut niveau passe par l'optimisation des compétences des athlètes, incluant l'entraînement et les capacités innées, reflétant ainsi les synergies entre inné et acquis. A l'instar de la contribution énergétique des mécanismes aérobie vers anaérobie avec l'augmentation des distances (443), nous émettons l'hypothèse que des gradients phénotypiques existent parmi les distances et les niveaux. L'exhaustivité des épreuves courses pourrait révéler une auto-organisation autour de paramètres biométriques, avec une cohérence entre le sprint et les longues distances.

Pour autant, l'importance des caractéristiques morphologiques dans la performance n'a pas encore été étudiée en détail (315), aussi des études plus approfondies sont-elles nécessaires pour améliorer la connaissance des performances de course selon le poids, la taille et l'IMC. Le but ici est d'étudier la performance et les caractéristiques anthropométriques dans le but de révéler la force de leurs associations.

## 8.3. Méthodes

### 8.3.1. Collecte des données

Les données de poids, taille, IMC, âge et vitesse ont été collectées pour les athlètes masculins internationaux du Top 100 sur huit distances : 100m, 200m, 400m, 800m, 1500m, 3000m, 10000m et marathon, pendant les saisons 1996 à 2011. Ceci représente 12 800 performances-année et 3852 athlètes différents. Les données de taille et poids correspondent à la meilleure performance de chaque individu par année. Toutes les données ont été collectées à partir du site internet <http://www.tilastopaja.org> et vérifiées à l'aide du site internet de l'Association Internationale des Fédérations d'Athlétisme <http://www.iaaf.org>.

### 8.3.2. Organisation des données

Les données ont été organisées selon quatre types de distributions.

Premièrement, une distribution de l'ensemble des athlètes par distance a été réalisée en fonction de leurs IMC afin de déceler de potentiels gradients morphologiques.

Deuxièmement, par décile de vitesse : le premier décile représente les 160 meilleurs performeurs de la discipline et le dernier décile représente les 160 performeurs les plus lents, pour un total de 1600 performances-année par distance (Top 100 sur 16 ans). Nous avons comparé les données de poids, taille et IMC en fonction des distances de course et des déciles de performance.

Troisièmement, par pourcentage de performance : nous avons stratifié les athlètes par leur IMC selon les distances au regard de la meilleure performance réalisée lors de la période étudiée (1996-2011).

Quatrièmement par fonction de densité : les distributions de tous les points d'IMC par distance ont été représentées en fonction de la vitesse. Afin d'étudier la distribution des IMC, nous avons réparti les points d'IMC de tous les athlètes en fonction de la distance et toujours par rapport à la meilleure performance sur un maillage M. Soit  $X$ ,  $Y$  respectivement les IMC des athlètes et le pourcentage de performance, de telle sorte que les données d'un individu sont exprimées par  $X_i, Y_j$ , avec  $X_i \in [15,32]$

( $N_x=1600$ ) et  $Y_j \in [92,100]$  ( $N_y=1600$ ). La densité des IMC des athlètes a été estimée par les nœuds de M. Les limites de M ont été choisies afin de contenir tous les  $X_i$  et  $Y_j$ . Les limites inférieures [ $L_x$ ;  $L_y$ ] ont été définies comme le plus grand nombre entier qui ne dépasse pas  $\min(X_i)$ ,  $\min(Y_i)$ . Les limites supérieures [ $U_x$ ;  $U_y$ ] ont été définies comme le plus petit nombre entier qui n'est pas inférieur à  $\max(X_i)$ ,  $\max(Y_i)$ . Notons que dans notre cas, la différence entre les limites des IMC des athlètes X était toujours supérieure à celle du pourcentage de performance Y :

$$\Delta_x > \Delta_y \quad [5]$$

Le nombre de nœuds dans la dimension X Y était noté  $n_x$  et  $n_y$  respectivement, selon:

$$n_x, n_y \in \mathbb{N}^* \quad \text{et} \quad n_x \geq 15, n_y \geq 92 \quad [6]$$

M a été défini comme un maillage homogène, de telle sorte que chaque nœud fut séparé par la valeur  $a$  dans les deux dimensions, avec :

$$a \in ]0; \Delta_x] \quad [7]$$

De telle sorte que la distance maximale possible entre deux nœuds ne dépasse  $U_y$  [5]. La résolution r de M a été donnée par:

$$r = n_x \times n_y = \left[ \frac{U_x - L_x}{a} + 1 \right] \times \left[ \frac{U_y - L_y}{a} + 1 \right] \quad [8]$$

Pour l'estimation de la densité, le nombre de performance selon l'IMC des athlètes  $d_j$  tombe dans la zone  $j$  ( $j=1, \dots, n$ ) avec les nœuds résumés, de telle sorte que:

$$d_j = \text{Card} \left( X_i \subseteq \left[ X_j - \frac{a}{2}; X_j + \frac{a}{2} \right], Y_i \subseteq \left[ Y_j - \frac{a}{2}; Y_j + \frac{a}{2} \right] \right) \quad [9]$$

soit une estimation de la densité locale.

Afin de choisir une meilleure représentation de la densité et d'éviter la perte d'information due à une résolution inadéquate du maillage, nous avons établi la valeur  $\alpha = 0,8$  qui est la résolution qui conserve le maximum d'information pour l'ensemble des distances représentées. Nous avons ainsi fourni le meilleur compromis entre sensibilité et entropie maximisée.

### **8.3.3. Analyses statistiques**

Toutes les données ont été présentées sous forme de moyennes  $\pm$  écart-type. Les relations entre le gabarit des athlètes (taille, poids et IMC) et la vitesse ont été examinées à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson.

Les différences anthropométriques et de vitesse selon les distances ont été comparées à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA). Les différents groupes ont été comparés en utilisant un post hoc de Bonferroni. Le niveau de significativité a été fixé à  $p=0,05$ . Les analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels Statistica 7.1 et Matlab 7.13.

## 8.4. Résultats

La vitesse est significativement corrélée au poids ( $r=0,71$ ) et à l'IMC ( $r=0,71$ ) mais modérément à la taille ( $r=0,39$ ). Le test ANOVA montre des différences significatives de taille entre les différentes distances (sauf 10 000 mètres vs marathon et 200m vs 800m), de poids (sauf 10 000 mètres vs marathon et 100 mètres vs 200m et 400m ainsi que 200m et 400m) et d'IMC (sauf 3000 mètres vs marathon). Pendant la période étudiée, la taille, le poids et l'IMC de tous les athlètes n'ont pas évolué significativement.

### 8.4.1. Poids, taille et performance

Le poids moyen (+/- ET) des athlètes par décile et par discipline augmente de manière continue avec la vitesse (Figure 42). Pour tous les coureurs, le poids varie de 42 à 98 kg et la vitesse de 5,31 à 10,44 m. s<sup>-1</sup>. Sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres) les athlètes sont plus lourds ( $74,82 \pm 6,39$  kg,  $75,10 \pm 6,61$  and  $74,38 \pm 6,38$  kg respectivement) que les autres coureurs. Quand la distance augmente, la vitesse et le poids moyen diminuent (800m:  $67,78 \pm 6,5$  kg, 1500m:  $64,19 \pm 6,58$  kg, 3000m:  $60,45 \pm 5,79$  kg, 10,000m:  $57,49 \pm 5,46$  kg ; marathon:  $57,85 \pm 5,11$  kg).

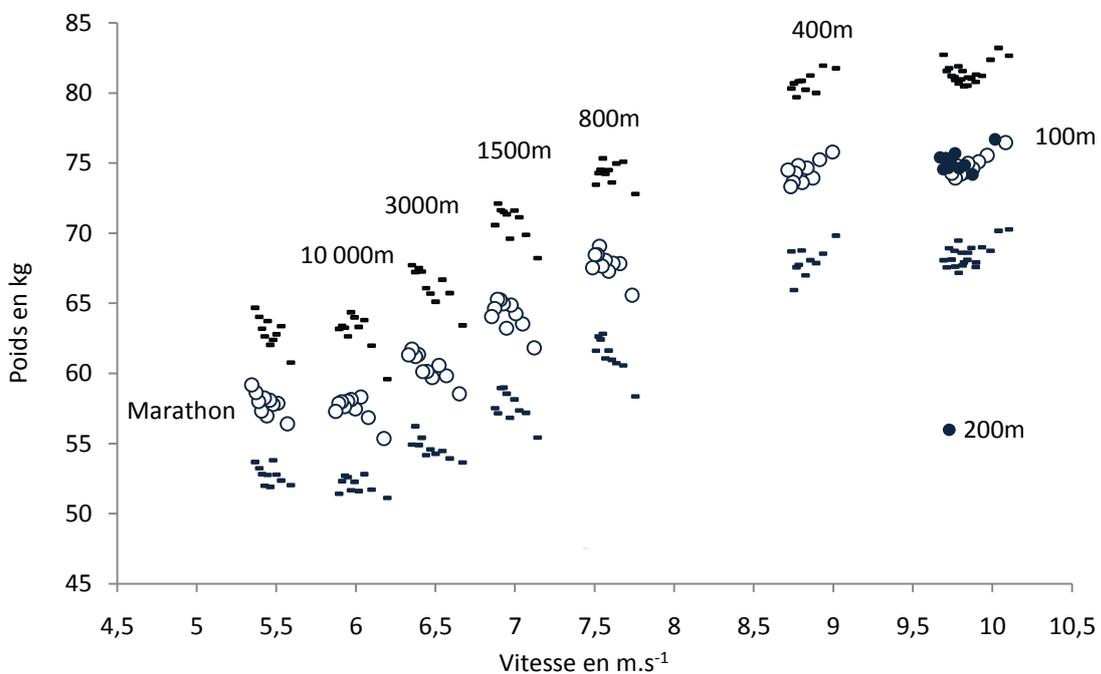


Figure 42: Poids moyen et écart type de l'ensemble des athlètes par décile de vitesse sur huit distances.

La taille moyenne (+/- ET) des athlètes par décile et par discipline dépend également de la vitesse (Figure 43). La taille varie de 152 à 202 cm. Les plus petits athlètes courent les longues et moyennes distances, avec une augmentation progressive de la taille moyenne depuis le marathon jusqu'aux sprints (marathon :  $171,9 \pm 6,28$  cm, 10 000m :  $172,37 \pm 6,44$  cm, 3000m :  $175,02 \pm 6,55$  cm, 400m :  $182,75 \pm 6,24$  cm, 200m :  $180,99 \pm 6,17$  cm and 100m :  $179,20 \pm 5,94$  cm).

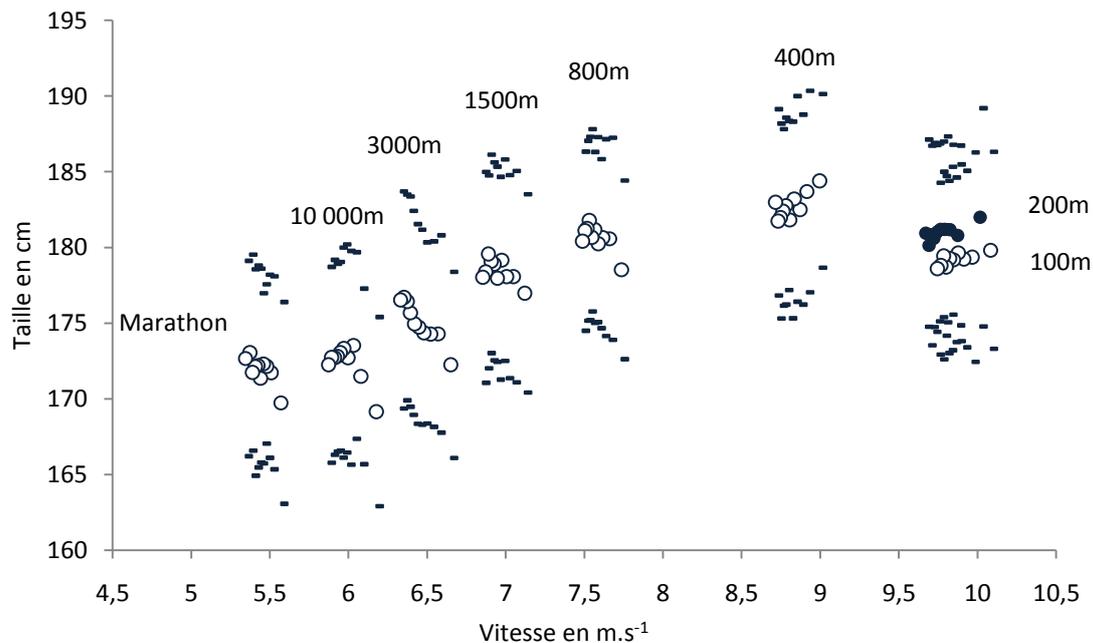


Figure 43: Taille moyenne et écart type de l'ensemble des athlètes par décile de vitesse sur huit distances.

#### 8.4.2. Gradients de performance

Les athlètes du premier décile du marathon au 800 mètres sont plus légers que leurs homologues des déciles plus faibles. Inversement, on observe une rupture dans les sprints (400m, 200m et 100m), où les meilleurs athlètes (du premier décile) ont un gradient qui tend vers un poids plus élevé. Ainsi, les athlètes les plus rapides au sprint sont les plus lourds tandis que les athlètes les plus légers sont les plus efficaces sur de longues distances.

Comme pour le poids, les athlètes des premiers déciles du marathon au 800 mètres sont plus petits que leurs homologues des déciles inférieurs. Nous retrouvons la même organisation pour les sprints où les meilleurs athlètes sur 400 mètres, 200 mètres et 100 mètres ont une taille supérieure à celle de leurs homologues moins rapides.

La *figure 44* montre la distribution de l'IMC de tous les athlètes par distance. Nous retrouvons le plus grand pourcentage d'athlètes à  $24 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 100 mètres,  $23 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 200 mètres,  $23\text{-}22 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 400 mètres,  $21 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 800 mètres et 1500 mètres et  $20 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 3000 mètres, 10 000 mètres et le marathon. Les longues distances sont distribuées autour d'un pic tandis que le 100 mètres et le 400 mètres présentent un plateau regroupant une gamme d'IMC.

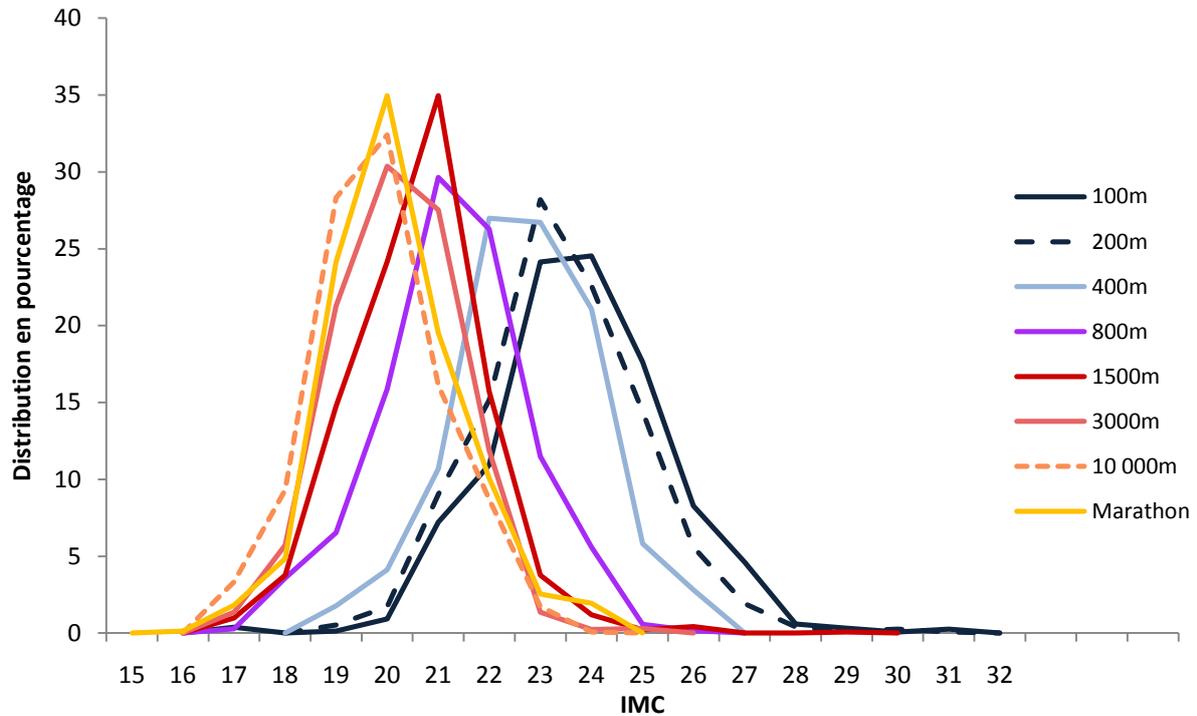


Figure 44. Distribution de l'IMC des athlètes par distance.

### 8.4.3. IMC et performance

La *figure 45* montre l'IMC moyen des athlètes par décile et par discipline en fonction de la vitesse. Pour toutes les distances, les IMC des coureurs varient de  $15,78$  à  $30,93 \text{ kg.m}^{-2}$ . Nous observons une augmentation continue des IMC avec l'amélioration de la vitesse (marathon :  $19,57 \pm 1,29 \text{ kg.m}^{-2}$ , 10 000 mètres :  $19,32 \pm 1,22 \text{ kg.m}^{-2}$  vs 400 mètres :  $22,29 \pm 1,4 \text{ kg.m}^{-2}$ , 200 mètres :  $22,92 \pm 1,57 \text{ kg.m}^{-2}$  et 100 mètres :  $23,3 \pm 1,67 \text{ kg.m}^{-2}$ ).

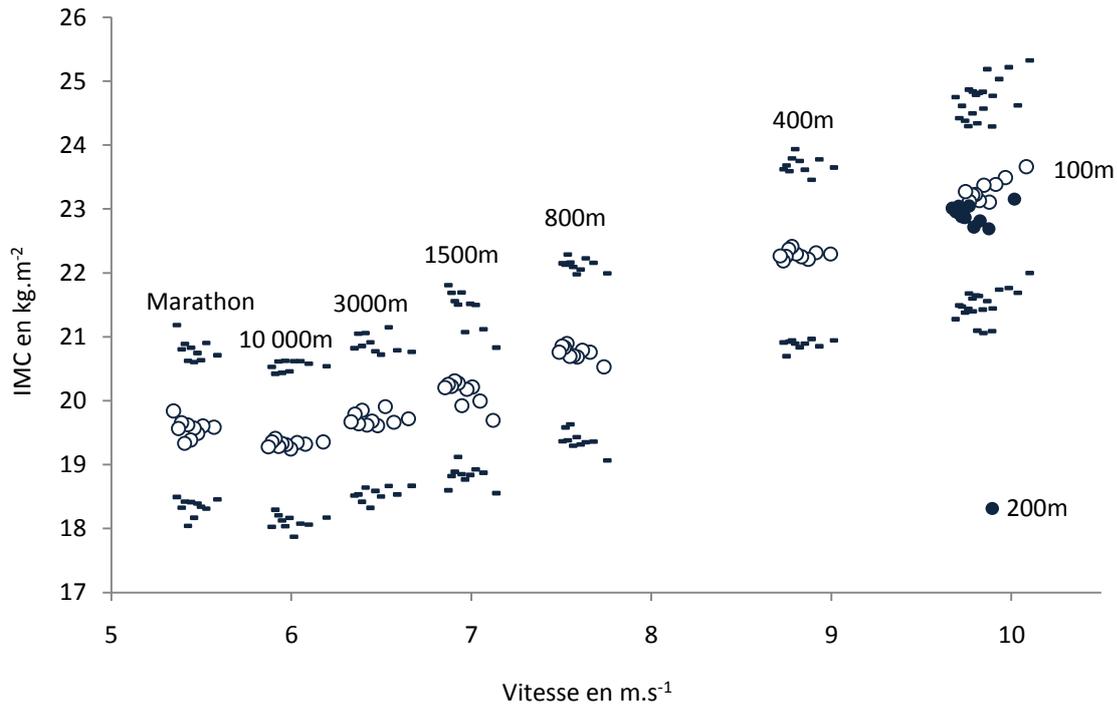


Figure 45: IMC moyen et écart type de l'ensemble des athlètes par décile de vitesse.

Les données exactes et la fonction de densité apparaissent sur les figures 46 ordonnées par distance et classées par pourcentage de performance (100% = meilleure performance durant la période étudiée) et en fonction de l'IMC. Pour les quatre distances, meilleur est le niveau et plus étroit est le spectre des IMC. Par exemple sur le 800 mètres, quand le niveau de performance atteint 93-94% des meilleurs athlètes, l'IMC varie de 16,7 à 25,7  $\text{kg.m}^{-2}$ ; quand le niveau de performance atteint 98-99%, l'IMC varie de 20,1 à 20,9  $\text{kg.m}^{-2}$ . Nous observons les mêmes différences sur toutes les distances. Nous notons également un décalage de la majorité des points (densité rouge) vers un IMC plus bas depuis les courses de sprint vers les moyennes et longues distances. Sur le 10 000 mètres et le marathon, comme pour les meilleurs performeurs, la majorité des points (densité rouge) est centrée sur un intervalle optimal autour de 19-20  $\text{kg.m}^{-2}$ .

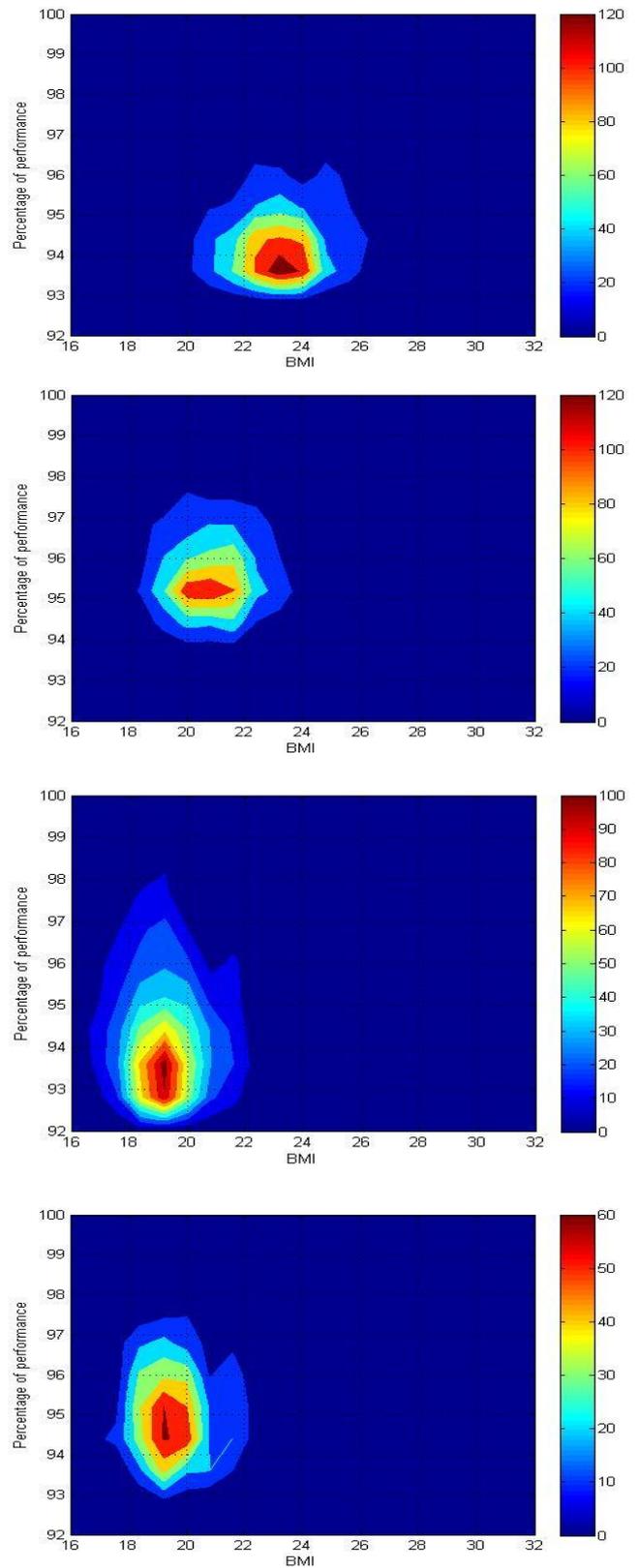
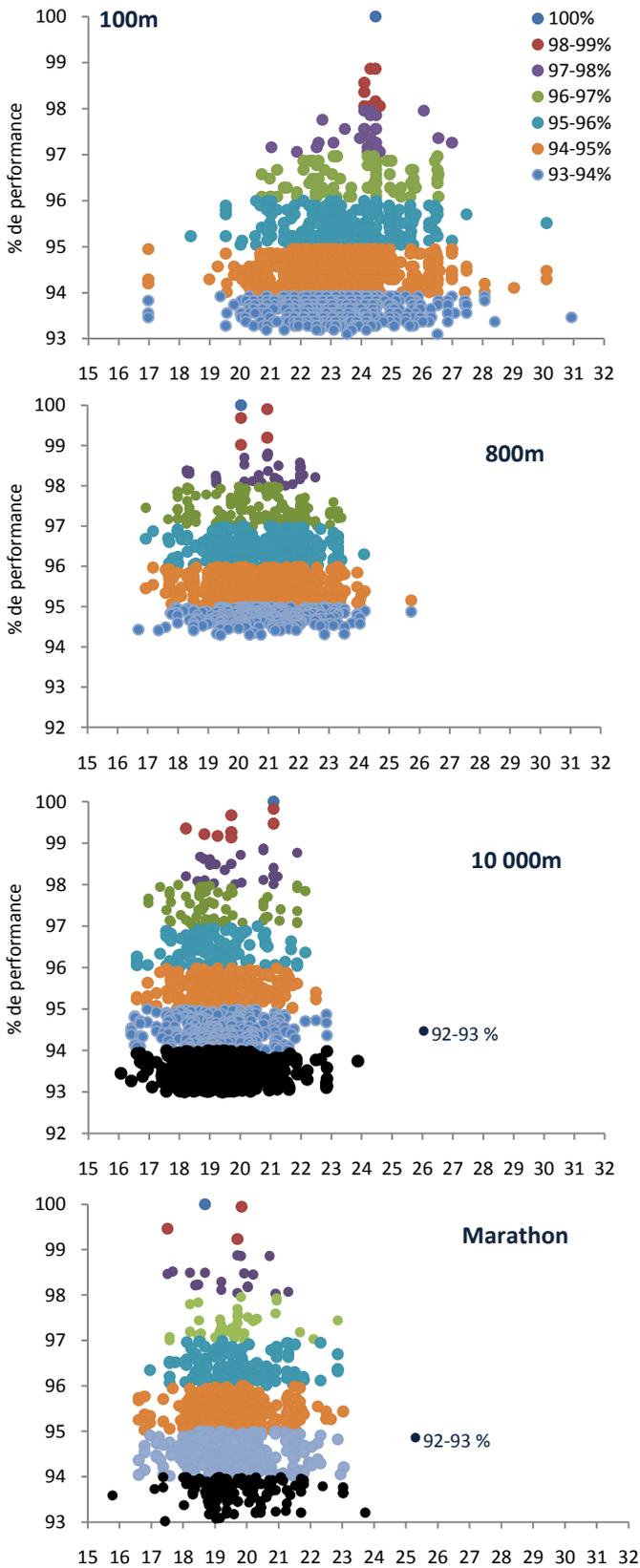


Figure 46: IMC de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance.

La *figure 46* présente pour quatre distances la distribution de chaque IMC des performeurs (figures de gauche) et la distribution sous forme de densité (figure de droite). La lecture doit être complémentaire, les figures de gauche apportent le détail sur les meilleures performances alors que celles de droites détaillent comment la majorité des points est organisée.

## 8.5. Discussion

La présente étude montre que les paramètres biométriques sont ordonnancés dans une auto-organisation cohérente allant du sprint aux courses de fond. Des **intervalles morphologiques optimaux** de performance émergent selon une base structurelle organisée et spécialisée selon le continuum des distances en athlétisme.

Nous constatons également qu'entre 1996 et 2011, les poids et tailles moyens des meilleurs sprinteurs (100m à 400m) sont supérieurs à ceux des athlètes des moyennes et longues distances (800m à marathon). Ce qui confirme les tendances observées dans l'histoire de l'athlétisme (297,313,444) ou dans des études plus récentes (263,269,315).

### 8.5.1. Des tailles différentes pour des distances différentes

Avec la diminution progressive de la distance du marathon au 400m, les coureurs deviennent graduellement de plus en plus grands. En accord avec le concept de certains auteurs (31,70) qui stipulent que la vitesse a tendance à augmenter avec la taille. Cette tendance (athlètes plus grands avec la diminution de la distance) n'est pas continue : les sprinteurs du 200 et 100m sont en moyenne plus petits que ceux du 400m. Le fait que les coureurs du 400 soient les plus grands trouve des échos dans d'autres études (263,267–269). Être plus grand sur cette distance peut conférer des avantages comme une plus grande longueur de foulée (383). Historiquement, la vitesse lors des records du monde a augmenté en miroir des tailles des sprinteurs (352). D'un autre côté, la locomotion est une organisation en deux temps : la perte d'énergie utile verticale (soulever le poids du corps, qui descend plus loin), et la perte horizontale provoquée par le frottement contre le milieu environnant (351). Pour les athlètes de grande taille, la masse qui tombe d'une altitude plus élevée tombe plus vite, à la fois vers le bas et vers l'avant (353). Bejan et Marden (351) ont montré que la relation vitesse-hauteur est prévisible à partir de la loi de puissance appliquée à la locomotion

animale, la vitesse augmente avec des gabarits plus imposants et ce dans différentes espèces, dont les mammifères et les humains. Par exemple, une augmentation de 3% de la hauteur du centre de masse signifie un gain de 1,5% de vitesse (353). Le fait que les sprinteurs (100 et 200m) soient plus petits que leurs homologues du 400 souligne d'autres hypothèses. Premièrement comme O'Connor et al (263) le suggèrent, des jambes plus longues réduisent la fréquence de foulée, par contre des cuisses relativement plus courtes diminuent la résistance de l'effet de levier sur le haut de la jambe et le coût de la locomotion. Dans un second temps, sur les sprints courts, le départ, le temps de réaction et la phase d'accélération sont cruciaux. Les coureurs plus petits possèdent un meilleur temps de réaction (51). A l'initiation du mouvement, un signal se déplace à partir du cerveau vers les extrémités inférieures et le temps de réaction dépend de la longueur du corps en particulier des membres inférieurs (74). Si la longueur des faisceaux musculaires à parcourir est plus courte alors le temps de réaction sera meilleur, par conséquent les plus petits sprinteurs tirent des bénéfices dans les starting blocks. En outre, des jambes plus courtes auront généralement un plus faible moment d'inertie, et donc nécessiteront moins d'énergie pour accélérer (263). Ces caractéristiques jumelées pourraient, en partie, expliquer pourquoi les sprinters du 100m sont plus petits que ceux du 200 et 400m.

### **8.5.2. Poids et performance**

De manière identique à la taille, alors que la distance décroît progressivement du marathon au 100m, les coureurs deviennent de plus en plus lourds. Redéfinissant le poids comme exigence clé de la vitesse (352) et recentrant la fameuse dualité maigre pour les longues distances et musculature proéminente pour le sprint dans le débat des exigences morphologiques selon la distance. Ces résultats sont cohérents avec la théorie structurale de Bejan et Marden (351), qui précise que la vitesse augmente avec la masse et que la force produite par la jambe est dépendante de la masse corporelle. Par ailleurs, une masse corporelle supérieure est associée à une meilleure efficacité en sprint, en raison de l'amélioration du retour de l'énergie élastique durant le cycle étirement-détente (299), d'une force musculaire, d'une puissance et d'une force de réaction au sol supérieures (269).

De l'autre côté du spectre des distances, de plus petits poids et taille peuvent procurer des avantages, notamment en marathon. En effet, le coût métabolique du mouvement en principe augmente avec la masse (263). Ce coût énergétique de la course est négativement corrélé à la taille et au poids sur les distances de demi-fond : les plus grands et lourds engendrent un coût énergétique

majoré (366,445). D'autant plus que le poids est un déterminant de l'économie de course (370) et peut induire une faible efficacité biomécanique (371). Certains auteurs (380,446) vont même à penser que l'économie de course supérieure des coureurs Kenyans serait d'abord due au fait qu'ils présentent des mollets et membres fins avec des masses inférieures nécessitant moins d'effort musculaire dans l'oscillation de la jambe.

Un autre facteur pouvant expliquer l'avantage d'un faible poids de corps sur les longues distances est la force de réaction du sol qui est réduite pour les coureurs les plus maigres par rapport aux plus lourds (315). Dans la droite ligne de ces idées, afin de maintenir un kilométrage et une intensité élevés durant l'entraînement, les athlètes de masse moindre ont un avantage par une diminution de la somme des forces résultantes de la réaction du sol (315). Pugh (447) supporte l'idée selon laquelle les plus gros gabarits sont plus exposés à la résistance de l'air durant la course et par conséquent les coureurs petit et maigres seraient bénéficiaires. Comme la gravité est la force majeure à surmonter lors de la course, l'excès de poids est préjudiciable à l'exécution de la performance (388). En effet, la petite taille corporelle réduit la puissance énergétique et cinétique nécessaire afin de vaincre la résistance de l'air (263). Par ailleurs, un excès de masse corporelle, est synonyme d'effort musculaire supérieur et donc d'une augmentation des dépenses énergétiques (343).

Les petits gabarits tirent un autre bénéfice de leur morphologie lors des courses de longues distances. Une forte relation existe entre la thermorégulation et les courses longues, le taux de production/dissipation thermique augmente avec le temps de course (263). A ceci s'ajoute que la masse corporelle augmente les contraintes thermiques, les coureurs plus lourds atteignent une limite de stockage de chaleur plus rapidement que les plus maigres (448). L'avantage apparent de la thermodynamique des coureurs légers leur permet de courir plus intensément ou plus longtemps avant d'atteindre une température centrale limite (315,448,449). De plus, cet avantage s'exprime non seulement en compétition mais aussi lors des entraînements afin de supporter des charges, intensités supérieures (315).

### **8.5.3. Liens renforcés avec l'augmentation de la performance**

Les liens entre la performance et la morphologie sont renforcés par les gradients anthropométriques présents au sein de chaque distance. Non seulement les sprinteurs sont plus lourds que leurs homologues de fond et demi-fond mais, au sein de leur distance, les plus rapides sont aussi les plus lourds. Ce qui confirme des tendances initialement observées par Khosla (313,444), à savoir que les champions olympiques en sprint sont plus lourds non seulement que les autres participants mais aussi que les finalistes. A l'opposé, les meilleurs coureurs de fond et demi-fond présentent un poids inférieur que leurs opposants moins rapides, comme les médaillés d'or par rapport aux finalistes et autres participants durant les Jeux Olympiques de Munich et Montréal (313). Nous avons trouvé des tendances similaires concernant la taille ; les sprinteurs les plus performants ont une taille moyenne supérieure alors que les meilleurs coureurs de fond et demi-fond présentent en moyenne une taille inférieure vis-à-vis de leurs concourants moins rapides.

Notre étude montre, à travers des gradients biométriques, le rôle central du poids et de la taille dans l'ensemble des courses en athlétisme. La possession du physique "optimal" n'est pas suffisante en elle-même mais les athlètes tirent des avantages de leurs caractéristiques anthropométriques inhérentes qui impactent le coût énergétique, l'économie de course, la thermorégulation, et donc la performance. Khosla (313) suggère que l'écart de l'optimum anthropométrique peut devenir un handicap afin d'atteindre l'excellence.

### **8.5.4. IMC, performance et intervalle optimal**

A l'instar de l'apport énergétique progressif entre les mécanismes aérobie et anaérobie (443), des gradients d'IMC existent avec l'augmentation de la distance. En effet, les paramètres biométriques sont ordonnancés et montrent une auto-organisation cohérente entre les longues distances et les sprints. Bien que l'IMC soit un indicateur initialement conçu et utile à destination de la population générale pour des mesures de santé publique, il semble que ce soit également un indicateur pertinent afin de différencier les athlètes entre disciplines.

Une tendance constante de l'augmentation de l'IMC en regard de celle de la vitesse a été observée, soulignant une cohérence avec les études antérieures montrant un effet positif entre IMC et performance (371,450). Les spécialistes du sprint sont plus lourds parce qu'ils ont besoin de

beaucoup d'énergies sur un laps de temps court. Ce qui correspond à la maximisation du métabolisme anaérobie, mécanisme principalement impliqué lors du 100m (443). En effet, la concentration en ATP est dépendante de la masse musculaire, et l'IMC des athlètes représente une indication de la masse embarquée et potentiellement de la réserve de puissance en rapport avec la masse maigre (221,222). Une possibilité de progression peut résider dans l'augmentation de la masse (269).

Selon les courses, du marathon au 100m, se créent, autour de différents IMC constitutif des distances, des morphologies adaptées et optimales. En effet, plus le niveau de performance augmente et plus le spectre des IMC se rétrécit vers un **intervalle optimal**. Notre étude montre la réduction de la variabilité des IMC avec l'augmentation des performances, où les meilleurs athlètes sont situés dans un intervalle optimal. Pour un athlète, s'écarter de l'optimum ou un changement d'IMC le décalant de cet intervalle affectera probablement négativement sa performance. De plus la majorité des coureurs de 10 000m et marathon sont également centrés autour de cet intervalle optimal (19 et 19-20 kg.m<sup>-2</sup> respectivement), optimum identique à celui trouvé par Marc et al (442) pour le marathon. Cette preuve indique qu'il pourrait y avoir un gabarit optimal adapté au marathon ainsi qu'aux autres distances (448).

Nous soulignons qu'au delà le resserrement de la gamme d'IMC vers un intervalle optimal pour toutes les distances, une certaine marge dans l'organisation par rapport à sa structure corporelle est possible en sprint et 800m mais pour le 10 000m et le marathon, les fonctions de densité nous montrent que, même pour les athlètes les plus faibles, une « centration » autour du même attracteur est présente. Cet aspect plus restrictif en termes de physique sur les courses de fond pourrait s'expliquer par l'aspect plus contraignant de ces courses longues, phénomène accentué par les entraînements et la sélection. Ce resserrement de l'intervalle autour des meilleurs performeurs pourrait recouvrir les meilleurs paramètres biomécanique (par exemple, les relations de couple-angle et la force-vitesse) biophysique (surface corporelle) et physiologique (énergie fournie) pour chaque distance (12), et exprimer la combinaison optimale de ces attributs (298). C'est peut-être le meilleur compromis par distance entre des exigences différentes dans un problème d'optimisation multi-objectif (316). Cela pourrait expliquer la diminution de l'IMC quand la distance de course augmente. Cela pourrait également représenter un compromis fonctionnel entre la puissance aérobie et la masse spécifique en l'endurance *versus* la prise musculaire nécessaire pour courir plus vite (269). De

plus, ces optima et intervalles de performance illustrent les besoins en énergie pendant les différentes courses, évaluées ici par l'énergie embarquée: l'IMC. Ainsi l'IMC est perçu comme un pré requis à travers lequel l'optimum énergétique selon les distances de course s'exprime sous les contraintes physiologiques.

Il est clair que cette étude met en évidence les notions d'optima et d'**intervalles de performance** selon l'IMC. Des tendances similaires ont été observées avec le poids. Nous avons choisi de présenter l'IMC en tant qu'indicateur car il fournit une compréhension de l'équilibre entre poids et taille et par conséquent de la structure du corps. De plus, l'IMC permet de différencier les athlètes selon leur discipline mais aussi selon leur performance.

## 8.6. Conclusions

Cette étude replace le poids, la taille et l'IMC comme éléments central de la vitesse permettant l'identification de gabarits selon les distances de course. L'IMC et le poids sont de meilleurs indicateurs que la taille. Cependant l'IMC a été préféré car il est l'expression du poids et de la taille. Avec le temps, les contraintes physiologiques, physiques et biomécaniques ont généré des morphologies adaptées aux distances : tendances renforcées par les gradients de performance au sein de chaque type de course. Il est observé un rétrécissement autour d'un intervalle d'IMC optimal pour chaque événement, où les meilleurs athlètes sont «attirés». L'IMC semble être un indicateur utile dans la catégorisation des athlètes élite: dans notre étude, il révèle une possibilité de plus grande organisation en sprint qu'en longue distance.

## 8.7. Perspectives

Sur l'ensemble des huit distances, les performances des athlètes en fonction de l'IMC ont été présentées pour le 100m, 800m, 10 000m et marathon. La même méthode est maintenant appliquée aux autres distances.

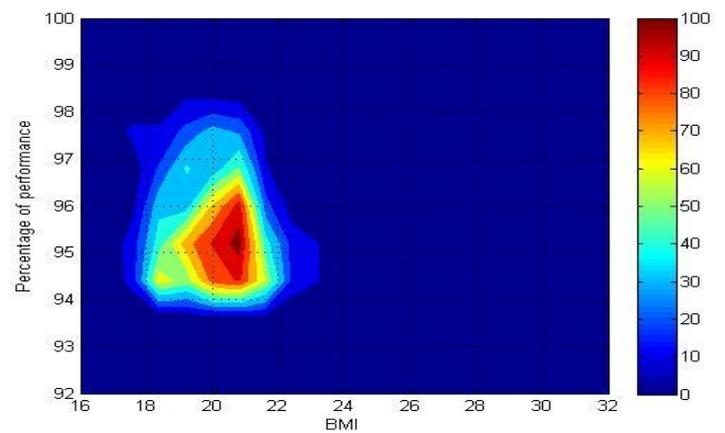
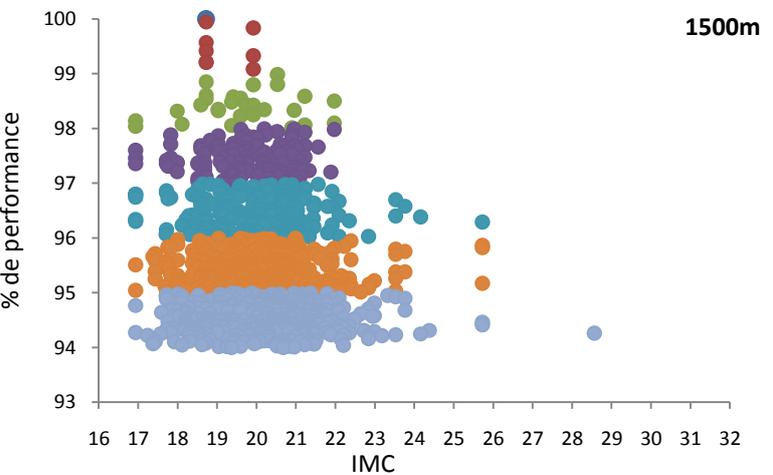
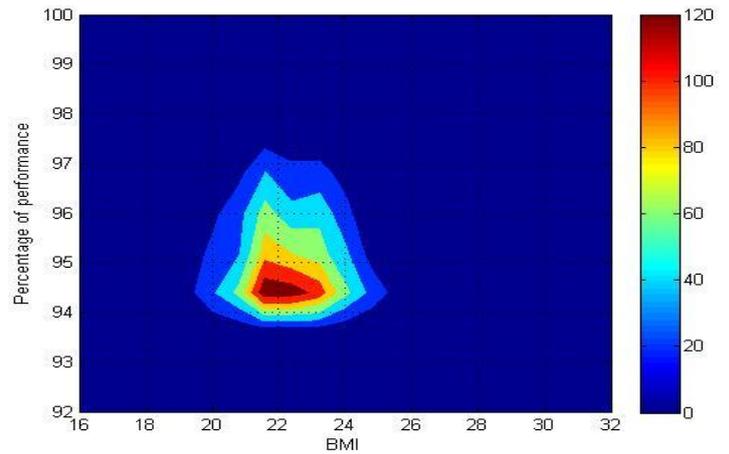
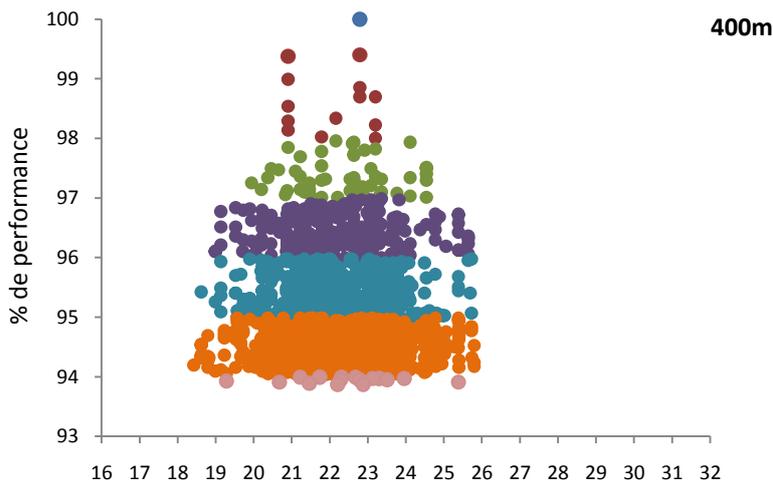
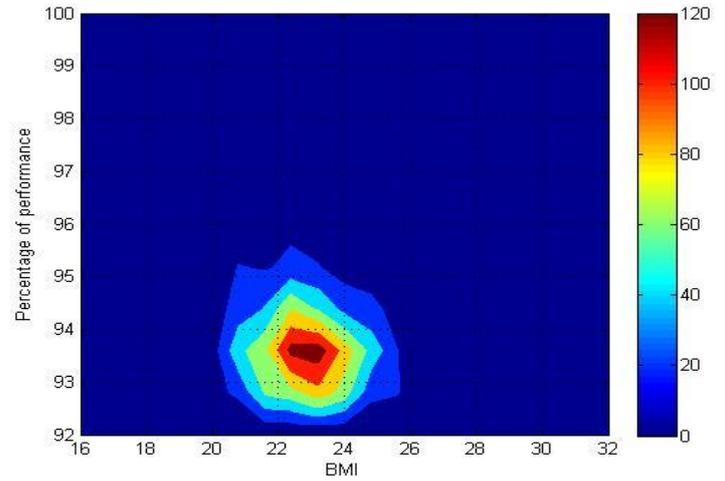
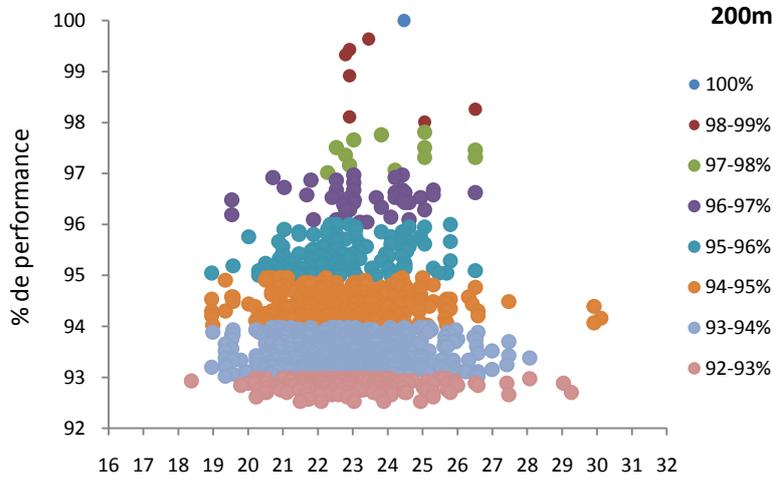


Figure 47: IMC de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance sur 200m, 400m et 1500m.

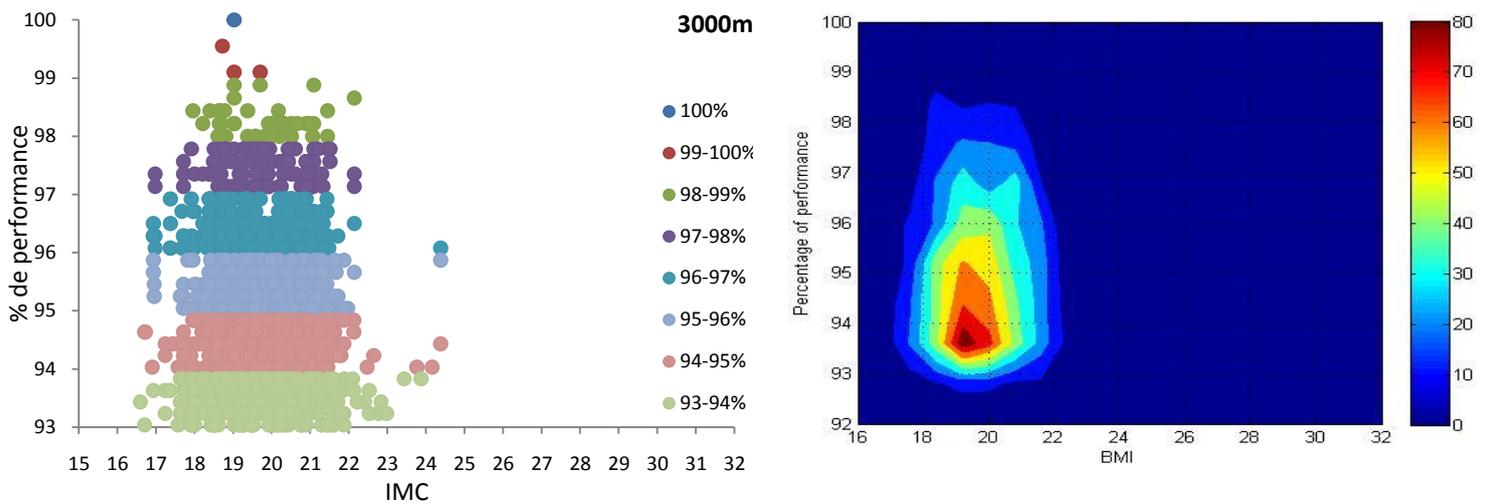


Figure 48: IMC de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance sur 3000m

Les phénomènes soulignés dans l'étude 4, d'organisation et de réduction de la variabilité des IMC s'observent avec l'augmentation des performances (figure 47 et 48).

Comme pour le 100m, la fonction de densité du 200m et 400m, fluctue autour de 22-24 kg.m<sup>-2</sup>, autorisant une marge dans l'organisation par rapport à sa structure corporelle.

Alors que sur 1500m et 3000m s'amorce déjà une centration des moins bons autour de valeurs plus resserrées comme celles largement constatées pour le 10 000m et le marathon. Sur ces distances, les fonctions de densité nous montrent que même pour les athlètes les plus faibles une « centration » autour du même attracteur est présente.

Vous trouverez ci-dessous l'expression des performances selon le poids (figure 48).

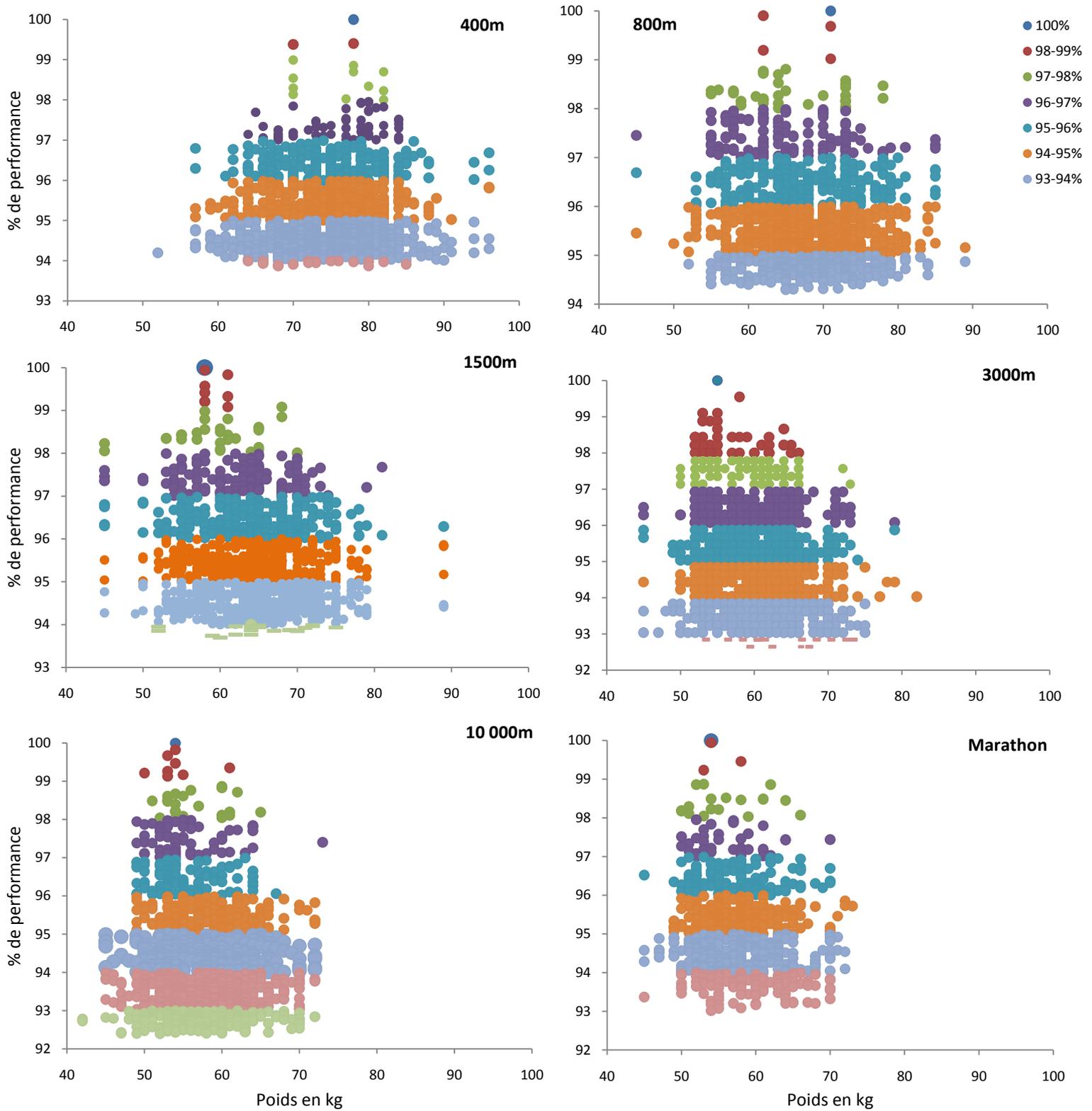


Figure 49: Poids de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance sur 400m, 800m et 1500m, 3000m ; 10 000m et marathon.

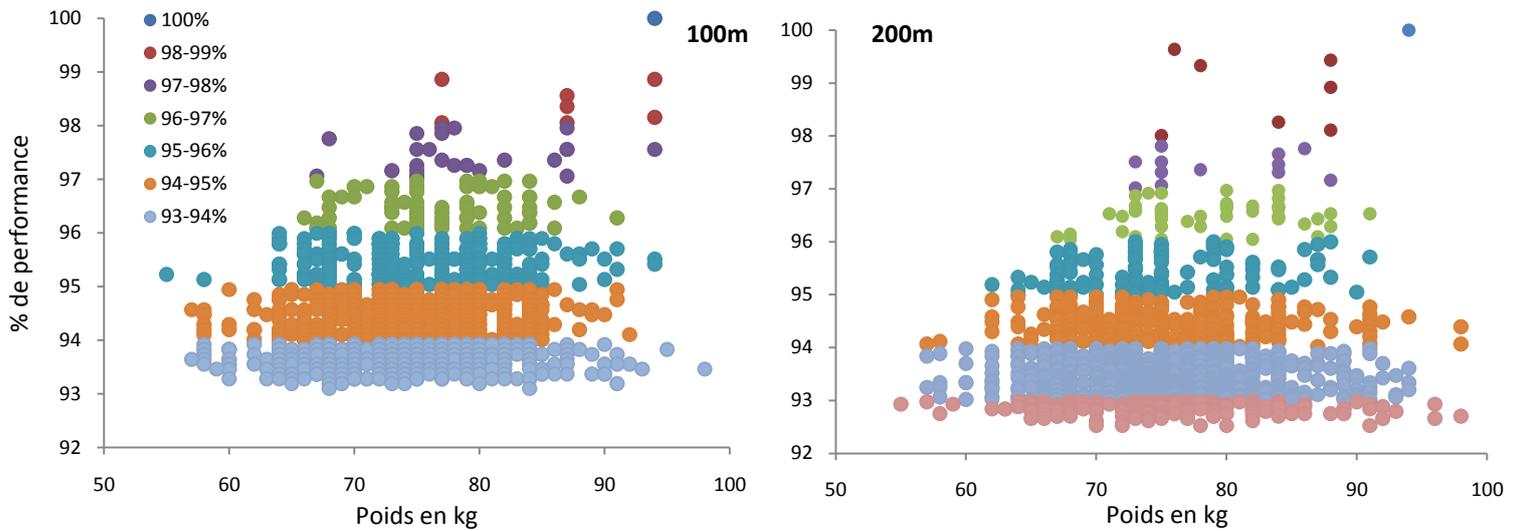


Figure 50: Poids de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance sur 100m et 200m.

Sur le 100m et le 200m, Usain Bolt et ses 94 kg désaxe quelque peu le resserrement autour d'un intervalle de poids et révèle d'autant plus la pertinence de l'IMC et de l'expression associée du poids et de la taille.

### 8.8. Lien étude 4- étude 5

A partir des conclusions de l'étude 4, il s'agit de savoir si les organisations et structures révélées se retrouvent chez les athlètes féminines. Dans la mesure où seront comparées les données entre hommes et femmes, les notions d'écart de performance et de «gender gap» seront interprétées non seulement selon les distances de courses mais aussi à la lecture des différences morphologiques.

## 9. Étude 5

### Exigences morphologiques et athlétisme : Comparaison entre hommes et femmes

#### 9.1. Résumé

**Objectifs** : vérifier si les athlètes féminines présentent des organisations morphologiques similaires aux hommes selon les distances ou le niveau de performance et mesurer l'impact de ces écarts morphologiques sur les écarts de vitesse.

**Méthodes** : Poids, taille, IMC et vitesse ont été collectés pour les athlètes masculins et féminines internationaux du Top 100 sur 100, 200, 400, 800, 1 500, 3 000, 10 000 mètres et marathon, pour les saisons 1996 à 2012, et analysés par décile de performance.

**Résultats** : Les poids et tailles moyens des meilleures sprinteuses (100m à 400m) sont supérieurs à ceux des athlètes des moyennes et longues distances (800m à marathon) révélant une auto organisation similaire entre hommes et femmes. Les différences de vitesse entre hommes et femmes (« gender gap » : sprints 10,78%, demi-fond 12,79% et 12,89% pour le fond) sont abordées par le prisme morphologique. Dans la recherche d'une relation allométrique entre vitesse et poids, les coefficients allométriques sont significativement différents entre hommes et femmes ( $\alpha_{Sprints\ Hommes}=0,532$ ,  $\alpha_{Sprints\ Femmes}=0,525$ ,  $\alpha_{Demi-fond\ Hommes}=0,468$ ,  $\alpha_{Demi-fond\ Femmes}=0,458$ ,  $\alpha_{Fond\ Hommes}=0,432$  et  $\alpha_{Fond\ Femmes}=0,417$ ).

**Conclusions** : Cette étude, renforce la pertinence de l'IMC du poids et de la taille comme indicateurs de performance chez les SHN. En effet, la même auto organisation cohérente entre les disciplines se retrouve chez les femmes, tout comme les gradients morphologiques et les resserrements autour d'intervalles favorables à la performance. Un autre degré dans la pertinence de ces indicateurs est révélé puisqu'ils permettent la mise en évidence d'organisations par niveaux différentes entre hommes et femmes. Les lois de puissance similaires organisant poids, taille, IMC et vitesse révèlent des liens forts. En effet, les coefficients allométriques apportent une autre lecture aux différences hommes/femmes et mettent en exergue de potentielles optimisations féminines.

## 9.2. Introduction

Dans un contexte d'expansion morphologique global, les athlètes suivent aussi des dynamiques évolutives (Etudes 1, 2 et 3 de cette thèse), mais souvent à des rythmes accélérés, très dépendants de leurs caractéristiques anthropométriques (412,430). Ce physique des athlètes est l'expression de traits morphologiques sélectionnés puis soumis à de fortes charges d'entraînement. Ils représentent les optima de performance de l'époque. Le top 100 des hommes et des femmes les plus rapides au monde reflète un phénotype optimal pour la course (269). Le gabarit, grâce auquel sont réalisées les meilleures performances mondiales, peut être appréhendé à partir de caractéristiques anthropométriques simples comme le poids, la taille et l'IMC. Le poids et l'IMC sont importants pour la performance. En effet, si la masse maigre mesurée précisément par des instruments perfectionnés et rares d'imagerie tissulaire peut de premier abord sembler plus pertinente, l'IMC mesuré aisément à partir de deux critères primaires (taille et poids) représente une valeur simplifiée de l'énergie embarquée, en l'occurrence des quantités musculaires relatives. De fait, le poids global chez l'athlète représente aussi l'indice d'une masse musculaire utile. De plus, les masses osseuse, viscérale et grasse participent à la performance, certes pour certaines comme facteurs limitants mais lors de cette dernière la totalité du corps est en action. Appréhender le poids total évite d'être trop réductionniste afin de comprendre la totalité du corps en mouvement.

La performance étant globale, les notions de poids total, de taille et d'IMC apportent une vision globale qui ne doit pas être négligée. Même si initialement l'indice de Quetelet a été conçu pour évaluer les risques liés au surpoids chez l'adulte, ce dernier peut apporter un tout autre regard quant à son utilisation sur des populations de SHN. L'IMC est un indicateur pertinent dans le but de distinguer les athlètes selon les distances mais aussi selon la performance (Etude 4) ou selon les postes (Etude 1 et 2). De plus, il permet de mettre en évidence des intervalles favorables à la performance et par conséquent de révéler des optimisations morphologiques (Etude 4).

Les gradients morphologiques constatés chez les athlètes masculins sont-ils aussi pertinents chez les féminines ? Les resserrements autour d'intervalles propices à la performance le sont-ils aussi ? Peut-on révéler une organisation anthropométrique et des facteurs de performance similaires chez elles, dont l'entrée en compétition fut plus tardive ?

Une étude a regroupé et comparé les 45 meilleurs athlètes hommes et femmes entre 1990 et 2003 du 100m au 10 000m afin de déceler une loi structurelle commune (269). Selon eux, le déterminant

fondamental est la force d'appui que les coureurs appliquent au sol. Ils établissent sur 18 athlètes une relation entre poids/taille et force appliquée au sol selon le continuum des distances. Toutefois IMC et force sont liés, par conséquent les limites sont inscrites dans d'autres gradients certainement à comprendre avec l'évolution selon les distances. Cependant, il n'existe pas d'étude du 100m au marathon qui, au-delà de comparer les différences hommes/femmes, inclut des indicateurs morphologiques afin de déceler des organisations communes ou des intervalles de performances.

Les différences de performance entre hommes et femmes suscitent de nombreuses attentions. Historiquement, avec la participation des féminines aux sports athlétiques plus tardive, leurs courbes de progression ont laissé penser qu'elles dépasseraient les performances masculines rapidement (451) ou dans un futur plus ou moins proche (452). Pour autant, elles atteignent également des plateaux (223,453,454). L'atteinte de limites constatées dans de nombreux sports (IRMES exemple *figure 51*) pourrait également révéler des optimisations communes.

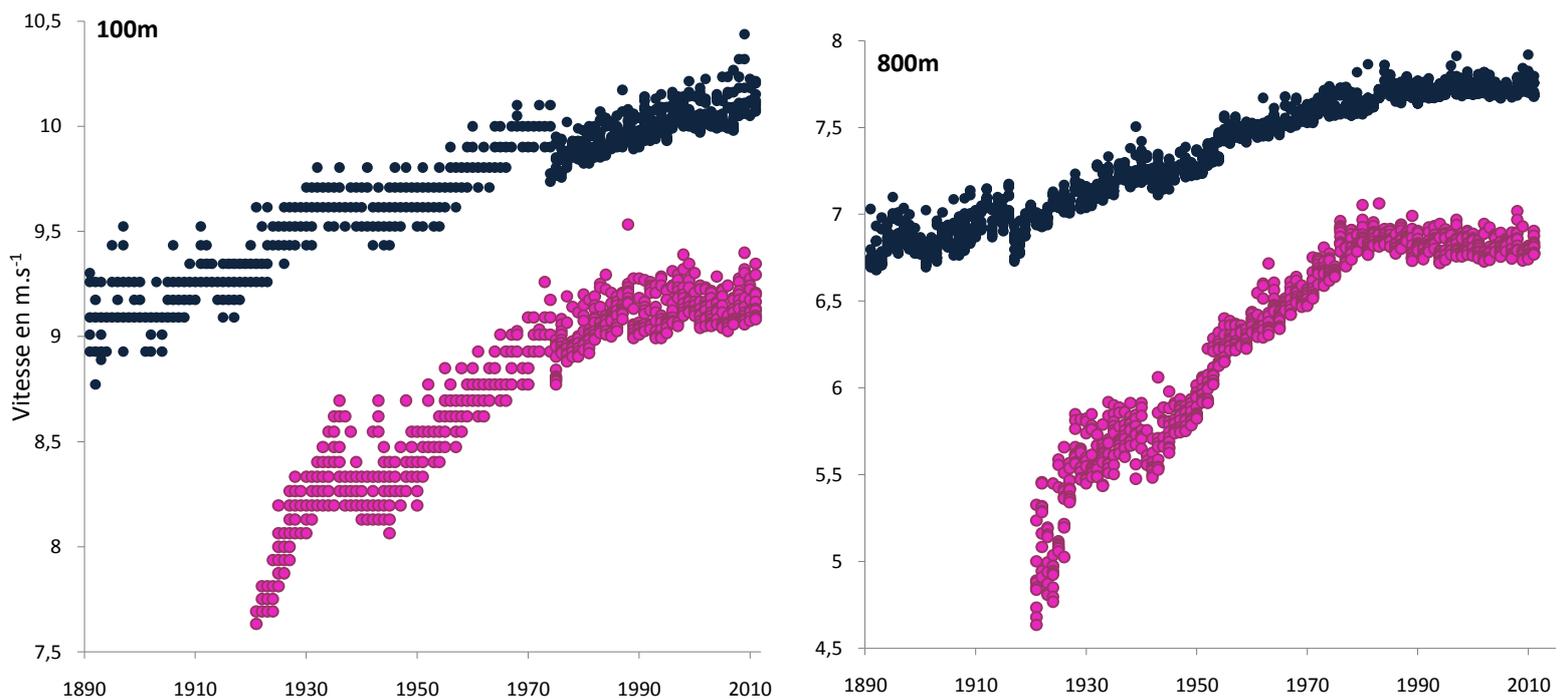


Figure 51: Evolutions annuelles des 10 meilleurs performeurs mondiaux sur 100m (figure de gauche) et 800m (figure de droite). Ronds bleus pour les hommes et ronds roses pour les femmes.

Néanmoins, l'écart entre les sexes est stable depuis 1983 (455), suggérant qu'au niveau le plus élevé, les performances des femmes ne pourront égaler celles des hommes. En athlétisme, les écarts sont

stabilisés à 10,7 % (455). L'analyse des performances en course, natation et patinage depuis les années 50 révèle que la différence entre les hommes et les femmes a cessé de rétrécir et pourrait à nouveau augmenter depuis les années 1990 (456). Avec des taux de participation accrus, des séances d'entraînement similaires, un accès identique aux évolutions technologiques mais aussi aux produits dopants, les différences de performance actuelles reflètent les différences physiologiques entre hommes et femmes (456). Dans leur revue de littérature, Cheuvront et al (457) estiment que les différences actuelles en athlétisme sont dues à des origines biologiques : les hommes possèdent de plus grandes forces musculaires et une plus grande capacité aérobie. Par conséquent, les écarts de performances hommes-femmes ne vont pas se réduire si l'évolution des gabarits et de ces capacités physiologiques reste commune (453). De plus, des différences de visibilité médiatique, les diversités économique ou culturelle (458) dont les problématiques de genres dans certains sports (459,460), peuvent limiter la participation des meilleurs potentiels féminins et donc de leurs gabarits les plus adaptés.

Afin de comprendre les mécanismes sous-jacents aux différences de vitesse entre hommes et femmes, les caractéristiques de force (pour les courtes distances) et de  $VO_2\text{max}$  (pour les distances longues) sont étudiées, mais les différences métaboliques, thermorégulatrices ou anthropométriques ne sont généralement pas approfondies.

Notre objectif est donc de vérifier si les athlètes féminines présentent des organisations morphologiques similaires aux hommes selon les distances ou le niveau de performance et de mesurer l'impact de ces écarts morphologiques sur les écarts de vitesse.

## **9.3. Méthodes**

### **9.3.1. Collecte des données**

Les données de poids, taille, IMC et vitesse ont été collectées pour les athlètes masculins et féminines internationaux du Top 100 sur huit distances : 100m, 200m, 400m, 800m, 1500m, 3000m, 10 000m et marathon, pendant les saisons 1996 à 2012. Ceci représente 27 200 performances-année et 7307 athlètes différents (3324 femmes et 3983 hommes). Les données de taille et poids correspondent à la meilleure performance de chaque individu par année. Toutes les données ont été collectées à partir du site internet <http://www.tilastopaja.org> et vérifiées à l'aide du site internet de l'Association Internationale des Fédérations d'Athlétisme <http://www.iaaf.org>.

### **9.3.2. Organisation des données**

Les données ont été organisées selon trois types de distributions.

Premièrement, une distribution de l'ensemble des athlètes par distance a été réalisée en fonction de leurs IMC afin de déceler de potentiels gradients morphologiques.

Deuxièmement, par décile de vitesse : le premier décile représente les 170 meilleurs performeurs et performeuses de la discipline et le dernier décile représente les 170 athlètes les plus lents, pour un total de 1700 performances-année par distance (Top 100 sur 17 ans). Nous avons comparé les données de poids, taille et IMC en fonction des distances de course et des déciles de performance.

Troisièmement, par pourcentage de performance : nous avons stratifié les athlètes par leur IMC selon les distances au regard de la meilleure performance réalisée lors de la période étudiée (1996-2012).

Par la suite, nous avons quantifié les différences de vitesse, de poids, de taille et d'IMC selon les distances.

### 9.3.3. Relation allométrique : poids-vitesse selon les distances

Une relation de puissance entre vitesse et masse est recherchée pour les hommes et les femmes sur le sprint (100m, 200m, 400m), les épreuves de demi-fond (800m, 1500m et 3000m) et celles d'endurance (10 000m et Marathon).

La dépendance d'une variable biologique ou physiologique  $Y$  à la masse  $M$  de l'organisme est généralement caractérisée par une loi allométrique de la forme :

$$Y = Y_0 M^b \quad [1]$$

où  $b$  est l'exposant de la mise à l'échelle et  $Y_0$  une constante qui est caractéristique du type d'organisme (71,72).

Nous testons ici la relation entre vitesse et masse selon une loi générale :

$$v = v_0 M^\alpha \quad [10]$$

Soit,

$$\log(v) = \alpha \log(M) + \log(v_0)$$

D'où

$$\alpha = \frac{\log(v)}{\log(M)} - C \quad \text{Où } C \text{ est une constante}$$

Les coefficients  $\alpha$  seront calculés et comparés pour les hommes et les femmes selon les distances courtes et longues, soit par exemple pour les hommes en distances courtes :

$$\bar{\alpha}_{Sprints Hommes} = \frac{1}{1700 + 1700 + 1700} \sum_{i=1}^{5100} \alpha_i$$

Où  $\bar{\alpha}_{Sprints Hommes}$  représente la moyenne des  $\alpha_i$  des 1700 athlètes du 100m, 1700 du 200m et 1700 du 300m.

Pour les femmes sur les distances courtes, le coefficient  $\alpha_{Sprints Femmes}$  sera calculé de la même manière.

Les coefficients  $\alpha$  seront également calculés et comparés pour les hommes et les femmes pour les distances de demi-fond, soit par exemple pour les femmes:

$$\bar{\alpha}_{Demi-Fond Femmes} = \frac{1}{1700 + 1700 + 1700} \sum_{i=1}^{5100} \alpha_i$$

Où  $\bar{\alpha}_{Demi-Fond Femmes}$  représente la moyenne des  $\alpha_i$  des 1700 athlètes du 800m, 1700 du 1500m et 1700 du 3000m.

Pour les hommes sur les distances de demi-fond, le coefficient  $\alpha_{Demi-Fond Hommes}$  sera calculé de la même manière.

Les coefficients  $\alpha$  seront également calculés et comparés pour les hommes et les femmes pour les distances de fond, soit par exemple pour les femmes:

$$\bar{\alpha}_{Fond Femmes} = \frac{1}{1700 + 1700} \sum_{i=1}^{3400} \alpha_i$$

Où  $\bar{\alpha}_{Fond Femmes}$  représente la moyenne des  $\alpha_i$  des 1700 athlètes du 10 000m et les 1700 du marathon.

Pour les hommes sur les distances de fond, le coefficient  $\alpha_{Fond Hommes}$  sera calculé de la même manière.

#### 9.3.4. Analyses statistiques

Toutes les données ont été présentées sous forme de moyennes. Les relations entre le gabarit des athlètes (taille, poids et IMC) et la vitesse ont été examinées à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson.

Les différences anthropométriques et de vitesse selon les distances ont été comparées à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA). Les différents groupes ont été comparés en utilisant un post hoc de Bonferroni. Le niveau de significativité a été fixé à  $p=0,05$ . Les comparaisons entre hommes et femmes des coefficients  $\alpha$  sur courtes et longues distances ont été mesurées par des tests de Student. Les analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels Statistica 7.1.

## 9.4. Résultats

Pour l'ensemble des athlètes (hommes et femmes), la vitesse est significativement corrélée au poids ( $r=0,71$ ) et à l'IMC ( $r=0,70$ ) mais modérément à la taille ( $r=0,49$ ). Pour les femmes, la vitesse est significativement corrélée au poids ( $r=0,65$ ) à l'IMC ( $r=0,60$ ) et plus modérément à la taille ( $r=0,38$ ). Alors que pour les hommes, les corrélations sont plus fortes pour le poids ( $r=0,73$ ) et l'IMC ( $r=0,72$ ) et similaires pour la taille ( $r=0,40$ ).

Chez les hommes et les femmes, les tests ANOVA montrent des différences significatives de poids de taille, et d'IMC entre les différentes distances (*Figures 52, 53 et 55*).

### 9.4.1. Poids et performance

Le poids moyen (+/- ET) des athlètes par décile et par discipline augmente de manière continue avec la vitesse (*Figure 52*). Pour l'ensemble des coureurs hommes, le poids varie de 42 à 99 kg et la vitesse de 5,31 à 10,44 m. s<sup>-1</sup>, alors que chez les femmes, le poids fluctue de 36 à 79 kg et la vitesse de 4,57 à 9,40 m. s<sup>-1</sup>. Sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres) les athlètes sont plus lourds ( $74,82 \pm 6,51$  kg,  $75,13 \pm 6,68$  kg et  $74,37 \pm 6,39$  kg respectivement) que les autres coureurs. Quand la distance augmente, la vitesse et le poids moyen diminuent (800m:  $67,70 \pm 6,57$  kg, 1500m:  $64,2 \pm 6,62$  kg, 3000m:  $60,36 \pm 5,83$  kg, 10,000m:  $57,53 \pm 5,52$  kg ; marathon:  $57,98 \pm 5,27$  kg).

Chez les femmes, cette même tendance est observée avec des athlètes plus lourdes sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres), respectivement  $58,53 \pm 5,1$  kg,  $59,14 \pm 5,15$  kg et  $59,37 \pm 5,56$  kg) que sur les épreuves plus longues (800m:  $54,90 \pm 5,09$  kg, 1500m:  $52,28 \pm 5,35$  kg, 3000m:  $49,39 \pm 5,06$  kg, 10 000m:  $47,31 \pm 4,93$  kg ; marathon:  $47,59 \pm 4,59$  kg) (*Figure 52*).

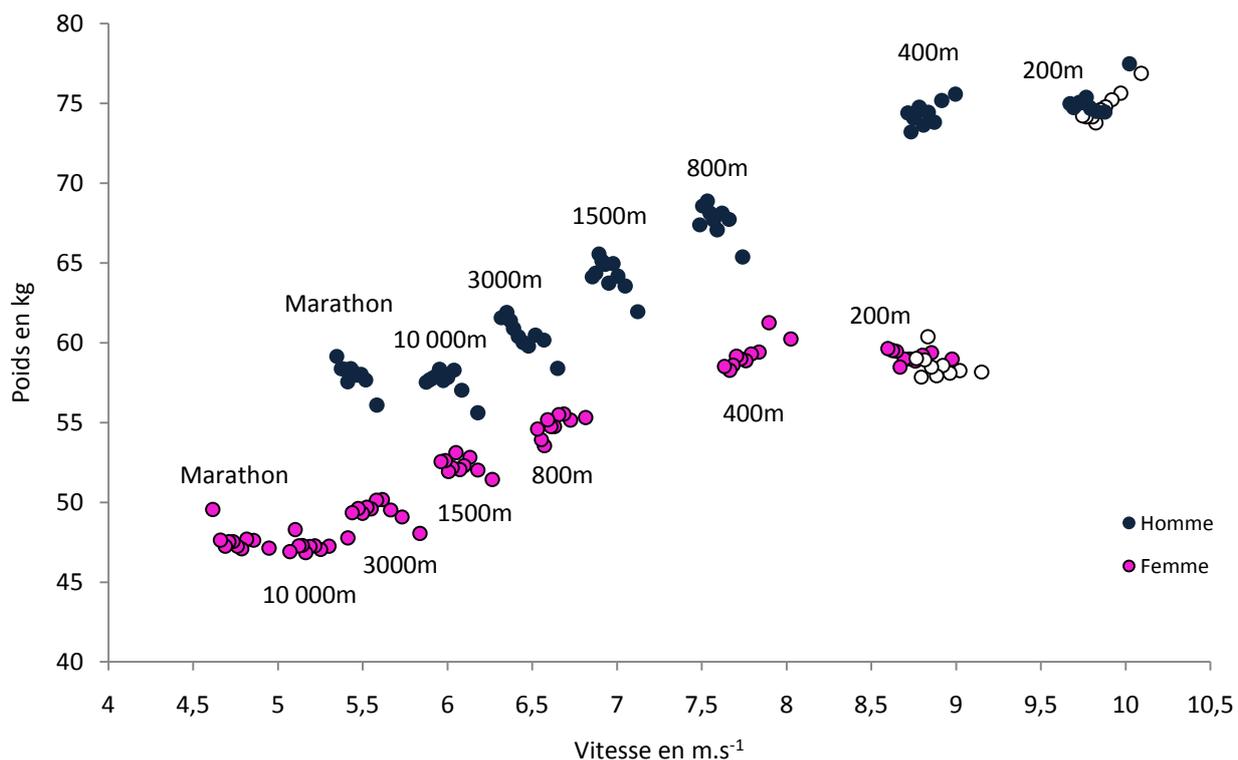


Figure 52: Poids moyen de l'ensemble des athlètes hommes et femmes par décile de vitesse sur huit distances. Les ronds blancs représentent les athlètes du 100m. Pour les hommes, différences significatives de poids entre les athlètes des différentes distances sauf 100m vs 200m et 400m ainsi que 200m et 400m et 10 000m vs marathon. Chez les femmes, différences significatives de poids entre les athlètes des différentes distances sauf 100m vs 200m, 200m vs 400m et 10 000m vs marathon.

#### 9.4.2. Taille et performance

La taille moyenne des athlètes par décile et par discipline augmente de manière continue avec la vitesse (Figure 53). Pour l'ensemble des coureurs hommes, la taille varie de 152 à 202 cm, alors que chez les femmes, la taille fluctue de 144 à 190 cm. Sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres), les athlètes sont plus grands ( $179,19 \pm 5,98$  cm,  $181,01 \pm 6,13$  cm et  $182,76 \pm 6,26$  cm respectivement) que les autres coureurs. Quand la distance augmente, la vitesse et la taille moyenne diminuent (800m:  $180,61 \pm 6,10$  cm, 1500m:  $178,42 \pm 6,66$  cm, 3000m:  $174,85 \pm 6,64$  cm, 10 000m:  $172,42 \pm 6,49$  cm ; marathon:  $171,96 \pm 6,30$  cm).

Chez les femmes, la même tendance est observée avec des athlètes plus grandes sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres), respectivement  $167,57 \pm 6,35$  cm,  $169,20 \pm 6,12$  cm et  $170,80 \pm 6,05$  cm) que sur les épreuves plus longues (800m:  $168,17 \pm 5,43$  kg, 1500m:  $166,66 \pm$

5,56 cm, 3000m: 164,30 ± 6,01 cm, 10 000m: 161,65 ± 6,02 cm ; marathon: 161,92 ± 5,74 cm) (Figure 53).

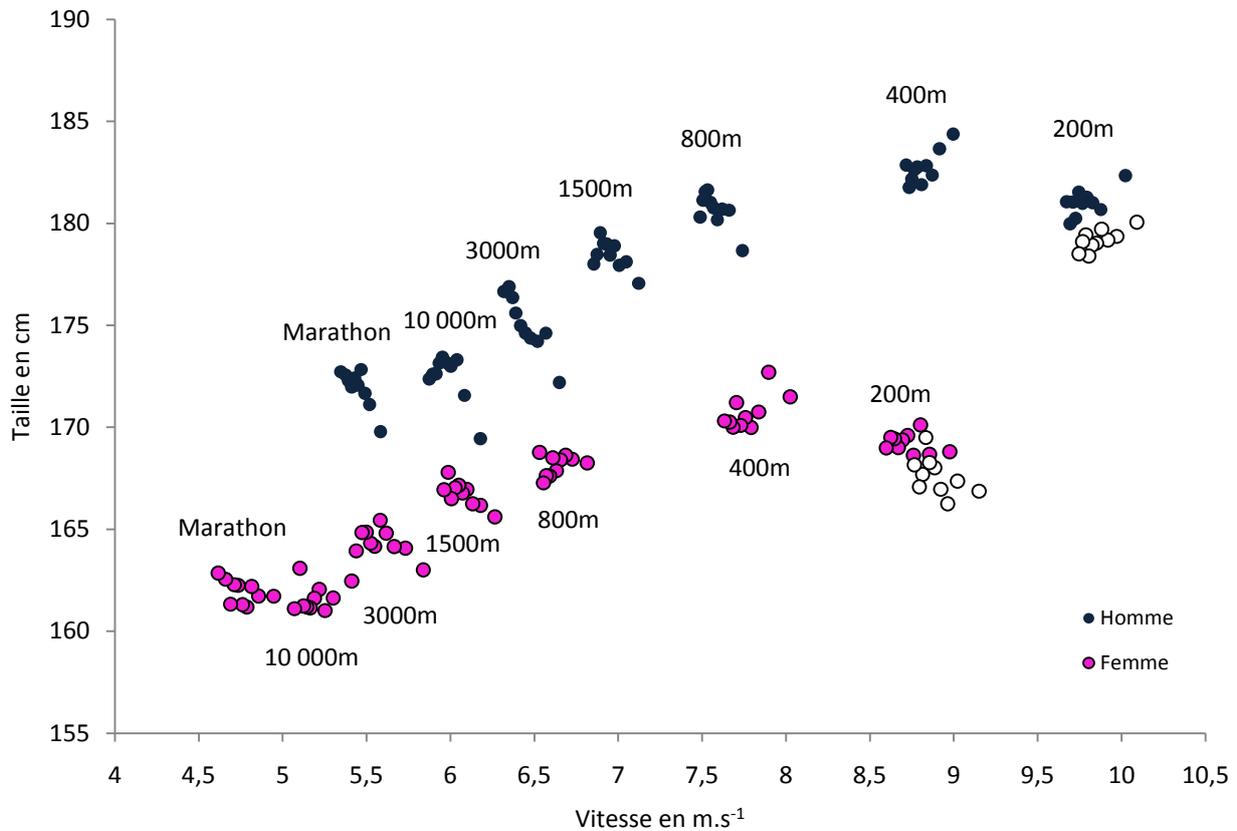


Figure 53: Taille moyenne de l'ensemble des athlètes hommes et femmes par décile de vitesse sur huit distances. Les ronds blancs représentent les athlètes du 100m. Pour les hommes, différences significatives de taille entre les athlètes des différentes distances sauf 200m vs 800m et 10 000m vs marathon. Chez les femmes, différences significatives de taille entre les athlètes des différentes distances sauf 100m vs 800m, marathon vs 10 000m.

### 9.4.3. Gradients de performance

Les athlètes hommes des premiers déciles depuis le marathon jusqu'au 800 mètres sont plus légers et plus petits que leurs homologues des déciles plus faibles. Inversement, on observe une rupture dans les sprints (400m, 200m et 100m), où les meilleurs athlètes (du premier décile) ont un gradient qui tend vers un poids et une taille plus élevés (Figure 52 et 53).

En revanche, chez les femmes, l'organisation morphologique au sein des déciles ne suit pas les mêmes tendances, sauf pour le 400m (athlètes plus grandes et plus lourdes pour les déciles les plus rapides), et le 1500 et 3000m (athlètes plus petites et plus légères pour les déciles les plus rapides).

Concernant le 100 et 200m, les tendances semblent même être inverses avec les meilleures sprinteuses plus petites et plus légères que celles issues des déciles inférieurs (Figure 52 et 53).

La figure 54 montre la distribution de l'IMC de toutes les athlètes par distance. Nous retrouvons le plus grand pourcentage d'athlètes à  $21 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 100 et 200 mètres,  $20\text{-}21 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 400 mètres,  $20 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 800 mètres,  $19 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 1500 mètres et  $18 \text{ kg.m}^{-2}$  pour le 3000, 10 000 mètres et marathon.

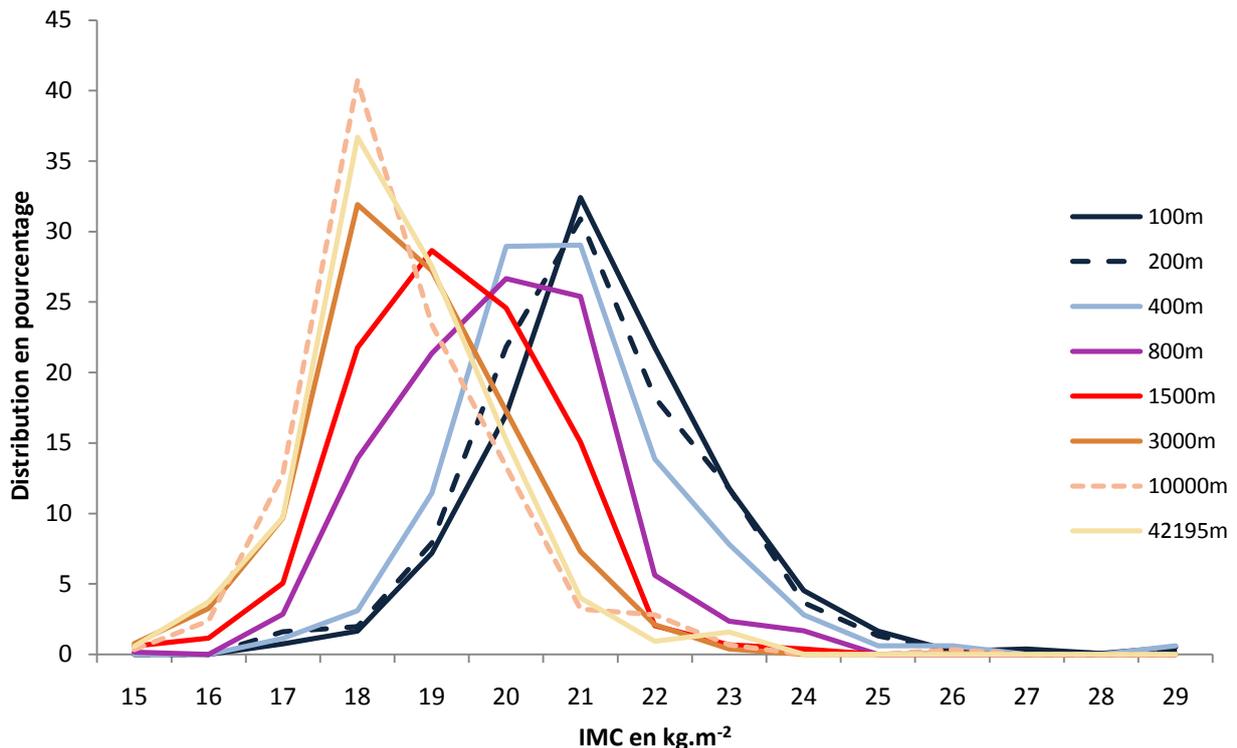


Figure 54. Distribution de l'IMC des athlètes féminines par distance.

#### 9.4.4. IMC et performance

L'IMC moyen des athlètes par décile et par discipline augmente de manière continue avec la vitesse (Figure 55). Pour l'ensemble des coureurs hommes, l'IMC varie de  $15,78$  à  $30,93 \text{ kg.m}^{-2}$ , alors que chez les femmes, l'IMC fluctue de  $14,47$  à  $28,89 \text{ kg.m}^{-2}$ . Sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres) les athlètes ont des IMC supérieurs ( $23,31 \pm 1,69 \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $22,92 \pm 1,55 \text{ kg.m}^{-2}$  et  $22,26 \pm 1,35 \text{ kg.m}^{-2}$  respectivement) que les autres coureurs. Quand la distance augmente, la vitesse et l'IMC

moyen diminuent (800m:  $20,73 \pm 1,37 \text{ kg.m}^{-2}$ , 1500m:  $20,13 \pm 1,31 \text{ kg.m}^{-2}$ , 3000m:  $19,71 \pm 1,17 \text{ kg.m}^{-2}$ , 10 000m:  $19,33 \pm 1,23 \text{ kg.m}^{-2}$ ; marathon:  $19,60 \pm 1,25 \text{ kg.m}^{-2}$ ).

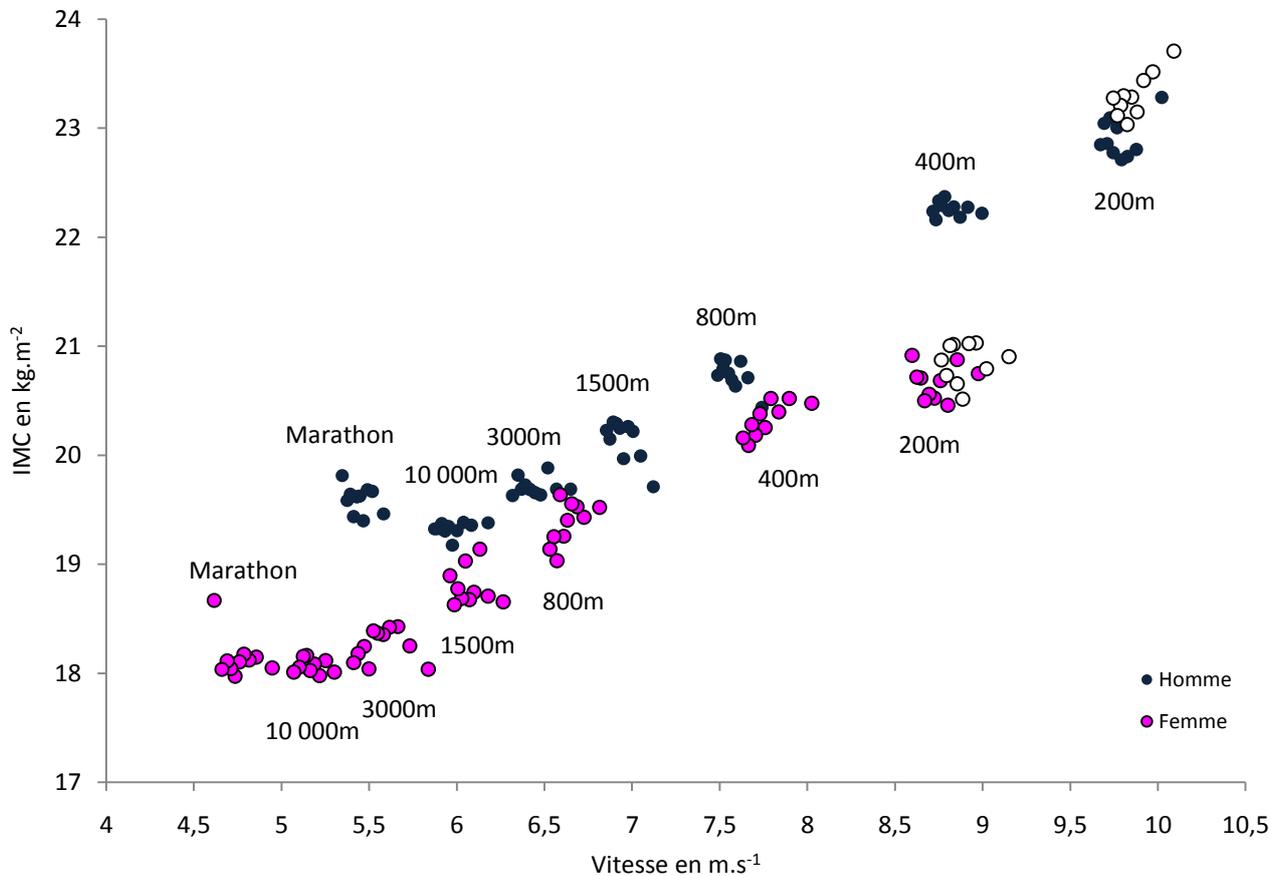


Figure 55: IMC moyen de l'ensemble des athlètes hommes et femmes par décile de vitesse sur huit distances. Les ronds blancs représentent les athlètes du 100m. Pour les hommes, différences significatives d'IMC entre les athlètes des différentes distances sauf 3000 mètres vs marathon. Chez les femmes, différences significatives d'IMC entre les athlètes des différentes distances sauf 100m vs 200m ( $p > 0,01$ ), 3000m vs marathon et 10 000m vs marathon.

Chez les femmes, la même tendance est observée avec des athlètes plus imposantes sur les courtes distances (100 mètres, 200 mètres et 400 mètres), respectivement ( $20,86 \pm 1,57 \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $20,67 \pm 1,57 \text{ kg.m}^{-2}$  et  $20,34 \pm 1,58 \text{ kg.m}^{-2}$ ) que sur les épreuves plus longues (800m:  $19,40 \pm 1,38 \text{ kg.m}^{-2}$ , 1500m:  $18,79 \pm 1,29 \text{ kg.m}^{-2}$ , 3000m:  $18,26 \pm 1,33 \text{ kg.m}^{-2}$ , 10 000m:  $18,07 \pm 1,32 \text{ kg.m}^{-2}$ ; marathon:  $18,13 \pm 1,27 \text{ kg.m}^{-2}$ ) (Figure 55).

A l'encontre des hommes, sur 100m et 800m, avec les meilleures performances féminines, nous observons plus difficilement un resserrement distinct autour d'un intervalle (figure 56). Pour autant, sur le 100 mètres, quand le niveau de performance atteint 93-94% des meilleurs athlètes, l'IMC varie

de 16,7 à 28,9 kg.m<sup>-2</sup> ; quand le niveau de performance atteint 98-99%, l'IMC varie de 19,1 à 22,9 kg.m<sup>-2</sup> (figure 56).

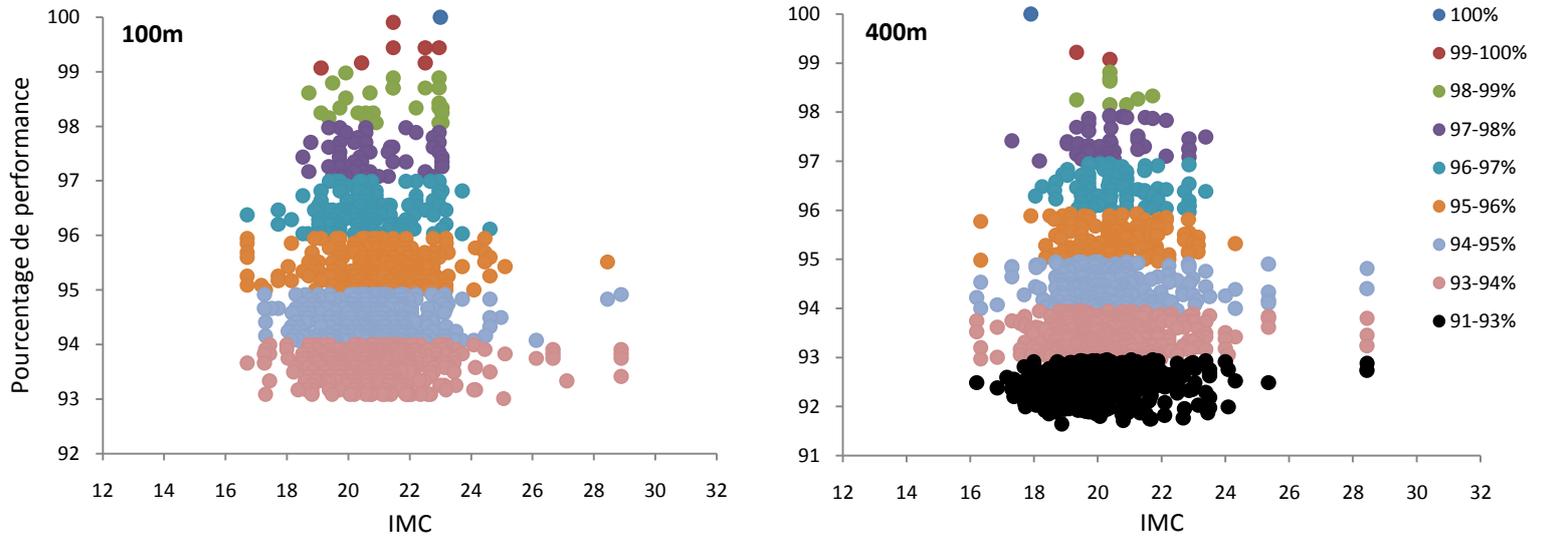


Figure 56: IMC de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance.

Sur 1500m et marathon, cette notion de resserrement autour d'intervalles avec les meilleures performances s'observe plus facilement sur le fond. Pour le 1500m mètres, quand le niveau de performance atteint 90-93% des meilleurs athlètes, l'IMC varie de 14,5 à 23,4 kg.m<sup>-2</sup> ; quand le niveau de performance atteint 98-99%, l'IMC varie de 17,7 à 20,7 kg.m<sup>-2</sup> (figure 57).

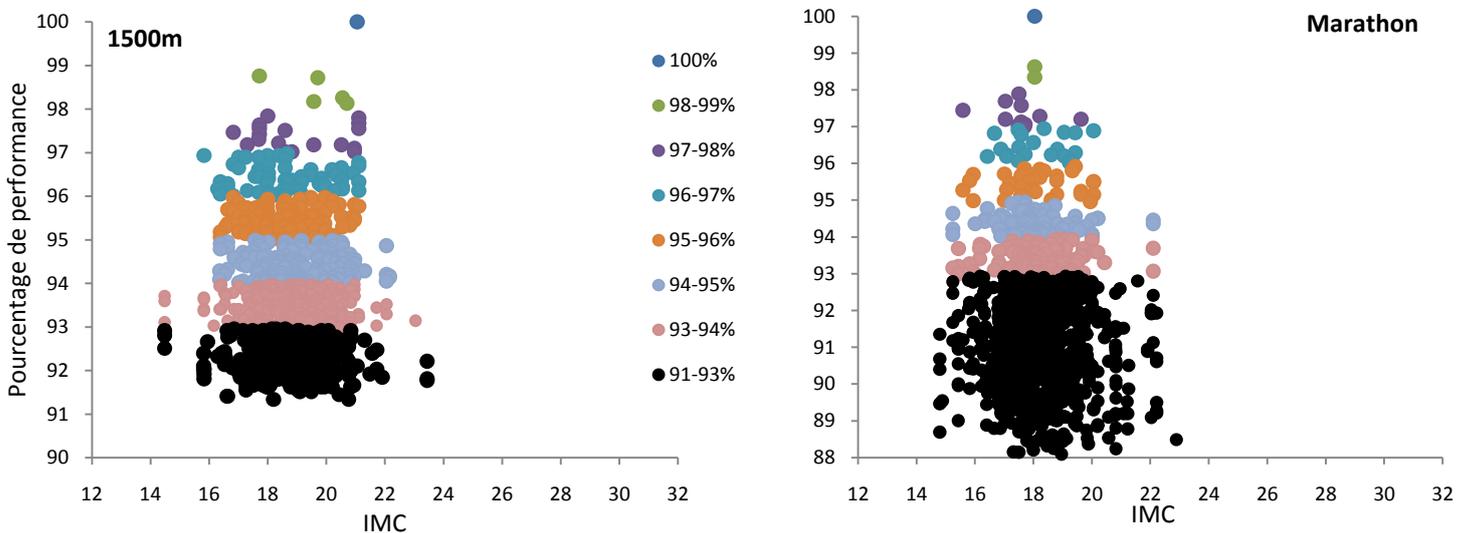


Figure 57: IMC de l'ensemble des athlètes selon le niveau de performance.

### 9.4.5. Ecart hommes-femmes

Les écarts de vitesse en pourcentage selon les distances de courses s'étalent de 9,77% à 13,32% (tableau 9). L'écart moyen sur l'ensemble des distances du Top 100 est de 12,06%.

Tableau 9 : Ecart moyen entre les 1700 hommes et femmes par distance de 1996 à 2012

Ecart en pourcentage	
Distances	Vitesse
100m	9,77
200m	10,71
400m	11,85
800m	12,41
1500m	12,63
3000m	13,32
10 000m	13,15
Marathon	12,64

Selon les catégories de course, l'écart de vitesse moyen entre homme et femme diffère : sprints 10,78%, demi-fond 12,79% et 12,89% pour le fond.

### 9.4.6. Vitesse, Poids, IMC et taille en fonction de la distance de course

Tout comme la variation de la vitesse de course en fonction de la distance ( $R^2=0,95$  chez les hommes et  $0,94$  chez les femmes), les moyennes de poids, de taille et d'IMC évoluent selon une loi de puissance pour les deux sexes (figures 58 et 59).

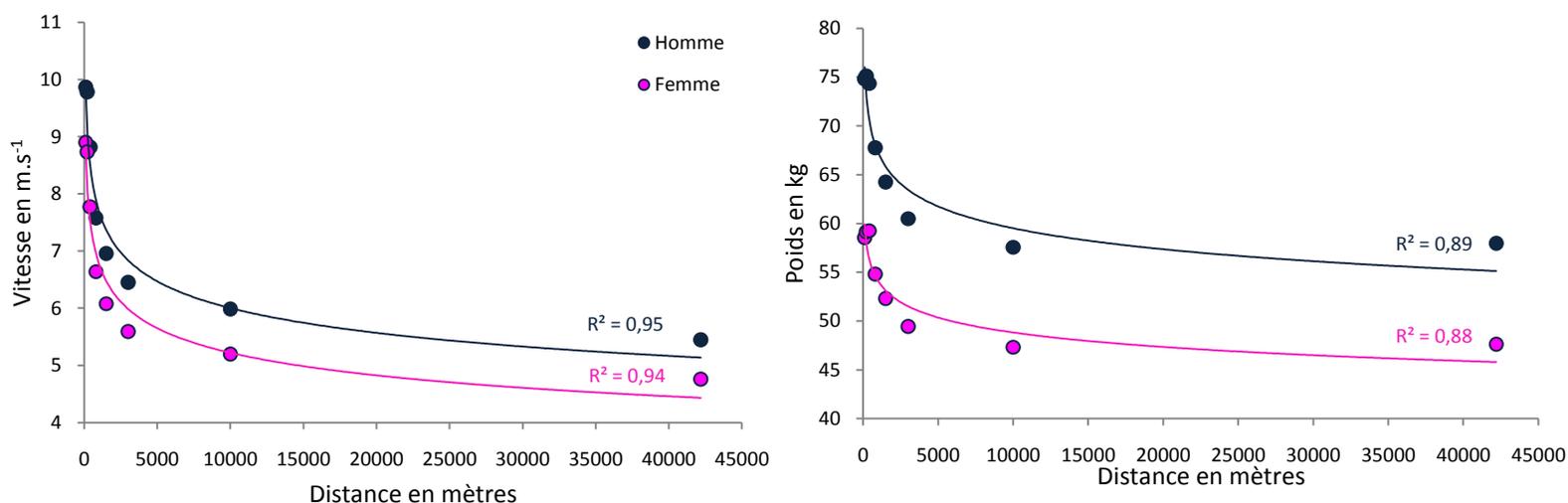


Figure 58: Vitesses et poids moyens des athlètes par distance et par sexe.

Avec un coefficient de détermination de 0,89 pour les hommes et 0,88 pour les femmes, le poids est l'indicateur morphologique le plus corrélé, suivi de l'IMC ( $R^2=0,82$  chez les hommes et 0,86 chez les femmes) puis de la taille ( $R^2=0,76$  chez les hommes comme pour les femmes) (figures 58- 59).

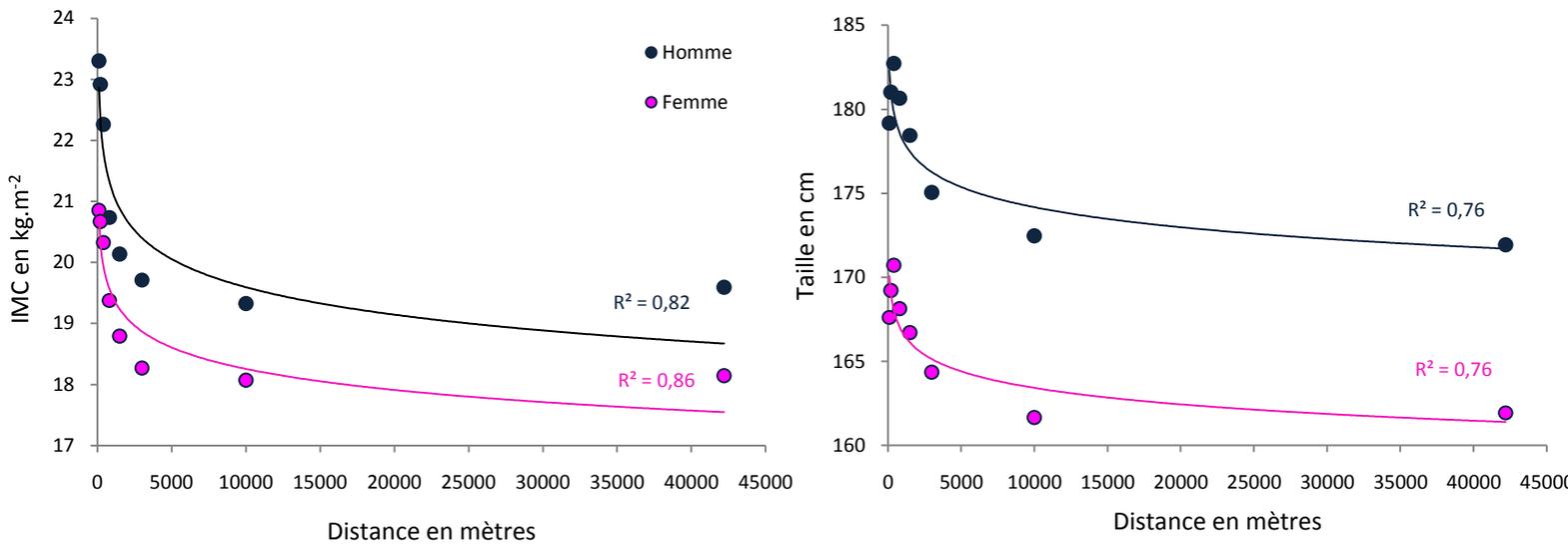


Figure 59: IMC et Taille moyens des athlètes par distance et par sexe.

#### 9.4.7. Relation allométrique : poids-vitesse selon les distances

Les relations entre vitesse et masse selon les distances sont:

$$v_{Sprints\ hommes} = M^{0.532}$$

$$v_{Sprints\ Femmes} = M^{0.525}$$

Et

$$v_{Demi-Fond\ Hommes} = M^{0.468}$$

$$v_{Demi-Fond\ Femmes} = M^{0.458}$$

$$v_{Fond\ Hommes} = M^{0.432}$$

$$v_{Fond\ Femmes} = M^{0.417}$$

Lorsque est comparé l'ensemble des exposants entre hommes et femmes, ces exposants concernant les sprints, demi-fond et demi-fond sont significativement différents. Entre les catégories établies

(Sprints, Demi-fond et Fond) les exposants sont significativement différents (chez les hommes et chez les femmes).

## 9.5. Discussion

La présente étude montre que les paramètres biométriques sont ordonnancés dans une auto-organisation cohérente avec celle des hommes selon les distances. En effet entre 1996 et 2012, les poids et taille moyens des meilleures sprinteuses (100m à 400m) sont supérieurs à ceux des athlètes des longues distances (800m à marathon). Ce qui confirme les tendances observées dans l'histoire de l'athlétisme féminin (355), dans les études plus récentes ou chez les athlètes hommes (263,269,315). Comme chez les hommes, des intervalles morphologiques optimaux de performance émergent suivant une base structurelle organisée selon le continuum des distances en athlétisme.

Par contre des différences fortes sont mises en évidence quant à l'organisation par niveau de performance et ces dernières pourraient révéler des optimisations possibles.

Cependant cette étude apporte une compréhension des différences de vitesse entre hommes et femmes par la morphologie. En effet les lois de puissance similaires selon les distances entre vitesse, IMC, taille et poids reflètent les liens forts sous-jacents. De plus les coefficients d'allométrie  $\alpha$  (reliant poids et vitesse) différents entre hommes et femmes et entre distances caractérisent plus finement ces liens et le degré d'importance du poids dans la vitesse.

### 9.5.1. Des similitudes hommes/femmes

#### 9.5.1.1. Des tailles différentes pour des distances différentes

Comme chez les hommes, la diminution progressive de la distance du marathon au 400m, est associée à une taille des coureuses graduellement plus grande, en accord avec le concept de certains auteurs (31,70) qui stipulent que la vitesse a tendance à augmenter avec la taille. A l'instar des hommes cette tendance n'est pas continue : les sprinteuses du 200 et 100m sont en moyenne plus

petites que celles du 400m, en accord avec les résultats de (269). Etre plus grande sur cette distance peut conférer des avantages comme une plus grande longueur de foulée (383). Comme évoqué chez les hommes dans l'étude 4, le fait que les sprinteuses (100 et 200m) soient plus petites que leurs homologues du 400 souligne d'autres hypothèses :

- fréquence de foulée supérieure
- meilleur temps de réaction
- diminution du coût de locomotion (des cuisses relativement plus courtes diminuent la résistance de l'effet de levier sur le haut de la jambe)
- plus faible moment d'inertie de jambes plus courtes

#### 9.5.1.2. Poids et performance

A l'instar de leurs homologues masculins, alors que la distance décroît progressivement du marathon au 100m, les athlètes deviennent de plus en plus lourdes. Redéfinissant le poids comme exigence clé de la vitesse (352) et recentrant la fameuse dualité maigre pour les longues distances et musculature développée pour le sprint dans le débat des exigences morphologiques selon la distance. Ces résultats sont cohérents avec la théorie structurelle de Bejan et Marden (351), qui précise que la vitesse augmente avec la masse et que la force produite par la jambe est dépendante de la masse corporelle.

Par ailleurs, une masse corporelle supérieure est associée à une meilleure efficacité en sprint (cf étude 4) :

- force musculaire, puissance et force de réaction au sol supérieures
- amélioration du retour de l'énergie emmagasinée par la composante élastique de la fibre musculaire durant le cycle étirement-détente

De l'autre côté, de plus petits poids et taille peuvent procurer des avantages, notamment en marathon (cf étude 4):

- coût énergétique moindre
- économie de course supérieure
- efficacité biomécanique
- force de réaction au sol inférieure

- résistance de l'air inférieure
- thermorégulation facilitée

#### 9.5.1.3. IMC, performance et intervalle optimal

Comme pour l'apport énergétique progressif entre les mécanismes aérobie et anaérobie (443), des gradients d'IMC existent avec l'augmentation de la distance. En effet, les paramètres biométriques montrent une auto-organisation cohérente entre les longues distances et les sprints. Bien que l'IMC soit un indicateur initialement conçu et utile à destination de la population générale pour des mesures de santé publique, il semble que ce soit également un indicateur pertinent afin de différencier les athlètes entre disciplines chez les femmes.

Une tendance constante de l'augmentation de l'IMC en regard du gain de vitesse a été observée, soulignant une cohérence avec l'étude 4 (chez les hommes) et montrant un effet positif entre IMC et performance (371,450). Les spécialistes du sprint sont plus lourdes reflétant le besoin énergétique fort sur un laps de temps court. Ce qui correspond à la maximisation du métabolisme anaérobie, mécanisme principalement impliqué lors du 100m (443). Comme vu précédemment (étude 4), la concentration en ATP est dépendante de la masse musculaire et l'IMC des athlètes représente une indication de la masse embarquée et potentiellement de la réserve de puissance en rapport avec la masse maigre (221,222). Une possibilité de progression pourrait ainsi résider dans l'augmentation de la masse (269), d'autant plus que les spécialistes féminines du sprint semblent en deçà des tendances mises en évidence chez les hommes.

Plus le niveau de performance augmente et plus le spectre des IMC se rétrécit vers un intervalle optimal chez les hommes comme chez les femmes. Par contre chez ces dernières, le resserrement autour d'un IMC favorable à la performance est plus subtil et moins flagrant. Pour un athlète, s'écarter de l'optimum affectera probablement sa performance.

Ces optima et intervalles de performance, se décalant d'IMC plus élevés sur les sprints vers des IMC plus bas pour les longues distances, illustrent, comme chez les hommes, les besoins en énergie pendant les différentes courses, évalués ici par un marqueur de l'énergie embarquée: l'IMC. Ainsi

l'IMC est perçu comme un pré-requis à travers lequel l'optimum énergétique selon les distances de course s'exprime sous les contraintes physiologiques.

### **9.5.2. Des différences hommes/femmes**

L'écart moyen entre hommes et femmes sur l'ensemble des huit distances du Top 100 est de 12,06%, en accord avec les constats de la littérature (454,455,457). Les écarts de poids, taille et IMC sont les plus importants sur les distances courtes. Ces écarts diminuent graduellement jusqu'au marathon ou des compromis différents en terme de déplacement sur de longues distances induisent des gabarits plus élancés et finalement moins divers.

#### **9.5.2.1. Fond et demi fond**

L'écart moyen de vitesse entre hommes et femmes sur le fond et demi-fond se situe à 12,8%, il est stable depuis plusieurs années (455,457). Dans la compréhension des écarts hommes/femmes, Sparling et al (454) ont montré l'importance de la consommation d'oxygène notamment relative au poids du corps. Cependant, même rapporté à la masse maigre utile, les hommes maintiennent toujours un considérable avantage en performance aérobie (454,461–464).

#### **9.5.2.2. Sprints**

L'écart moyen de vitesse entre hommes et femmes sur les sprints est de 10,78% et semble également stabilisé (455,457).

D'un point de vue explicatif, de nombreuses différences des caractéristiques structurelles des fibres musculaires contribuent à la production de force : la longueur, le type de fibre, l'angle de pennation, la longueur du fascicule mais seulement la section transversale (CSA) des fibres diffèrent entre hommes et femmes (465–469). La force étant positivement corrélée à la fois à la CSA du muscle (470) et à la vitesse en sprint (471), cette différence est la principale évoquée lors de recherche d'explication des écarts. Sous un angle biologique, de plus grandes concentrations de testostérone

circulante chez les hommes affectant la synthèse protéique du muscle squelettique (472–474) expliquerait aussi les différences physiologiques de la CSA.

La vitesse en sprint peut aussi être perçue comme la résultante de la longueur et de la fréquence de la foulée (475). Les hommes les plus rapides présentent une plus grande foulée et une plus grande fréquence que les femmes. Weyand et al (475) ont montré que les hommes développent de plus grandes forces d'appui au sol.

En conclusion, dans la compréhension des écarts de vitesse entre hommes et femmes, Cheuvronte et al (457) estiment que les différences actuelles en athlétisme sont dues à des causes biologiques : les hommes présentent de plus grandes forces musculaires et une plus grande capacité aérobie.

#### 9.5.2.3. Des différences d'organisation

Chez les hommes, les liens entre la performance et la morphologie sont renforcés par les gradients anthropométriques spécifiques de chaque distance. Non seulement les sprinteurs sont plus lourds et grands que leurs homologues de fond et demi-fond mais au sein de leurs distances les plus rapides sont aussi les plus lourds et les plus grands. A l'opposé, les meilleurs coureurs de fond et demi-fond présentent un poids et une taille inférieurs à leurs opposants directs moins rapides. En revanche, chez les femmes, l'organisation morphologique au sein des déciles ne suit pas les mêmes tendances, sauf pour le 400m (athlètes plus grandes et plus lourdes pour les déciles les plus rapides), le 1500 et 3000m (athlètes plus petites et plus légères pour les déciles les plus rapides). Les tendances semblent même inversées sur 100m et 200m pour les meilleures sprinteuses (plus petites et plus légères que celles issues des déciles inférieurs).

L'organisation différente entre hommes et femmes révèle chez les hommes une cohérence pour toutes les épreuves. Même si la possession d'un physique "optimal" n'est pas la condition *sine qua non* de la performance, les athlètes tirent des avantages de leurs caractéristiques anthropométriques. Le fait que sur le 100m et 200m les plus rapides présentent des poids et tailles inférieurs à leurs concurrentes plus lentes pourrait paraître contradictoire avec la théorie structurelle de Bejan et Marden (351), qui précise que la vitesse augmente avec la masse. Cette organisation qui

semble plus aléatoire chez les féminines pourrait mettre en exergue de potentielles marges de progression ou d'optimisation anthropométriques.

### 9.5.3. Apport des différences morphologiques dans la compréhension des écarts

Cette étude apporte également une lecture et une compréhension des différences par les morphologies. Les lois de puissance similaires entre les écarts de poids, taille, IMC et vitesse selon la distance chez les hommes et femmes révèlent des liens sous-jacents forts. La similitude répétée de ces écarts suggère que ces relations ne sont pas fortuites.

Les coefficients allométriques exposent plus finement ces liens. Ils expriment une base commune structurelle mais pondérée selon la catégorie (sprints, demi-fond et fond).

Ces coefficients allométriques sont à interpréter uniquement dans notre cas chez les athlètes de haut niveau car ils sont l'expression des liens entre masse globale et vitesse. Les différences de coefficients selon les distances ( $\alpha_{Sprints} > \alpha_{Demi-Fond} > \alpha_{Fond}$ ) chez les hommes comme chez les femmes soulignent l'importance accrue de la masse sur les distances courtes. La différence des coefficients allométriques entre hommes et femmes ( $\alpha_{Sprints Hommes} > \alpha_{Sprints Femmes}$ ) souligne que le degré d'importance du poids sur la performance chez les hommes est supérieur et pourrait mettre en exergue une marge de progression chez les femmes. En effet, elles ont pu bénéficier des connaissances et techniques élaborées et améliorées pendant plusieurs années chez les hommes mais elles atteignent aussi un plafonnement dans leur performance. Cette étude comparative suggère pourtant une marge de progression sur leurs caractéristiques anthropométriques.

## **9.6. Conclusions**

Cette étude renforce la pertinence de l'IMC, du poids et de la taille comme indicateurs de performance chez les SHN, à travers un couple [similarité-différence].

En effet, la même auto-organisation cohérente entre les disciplines se retrouve, avec des gradients morphologiques et resserrements autour d'intervalles favorables à la performance.

Par contre, la pertinence de ces indicateurs est renforcée, puisqu'ils permettent la mise en évidence d'organisations par niveaux différentes entre hommes et femmes.

La compréhension de ces différences est abordée par le prisme morphologique. Les lois de puissance similaires organisant poids, taille, IMC et vitesse révèlent des liens forts. En effet, les coefficients allométriques apportent une autre lecture aux différences hommes/femmes et mettent en exergue de potentielles optimisations féminines.

## **9.7. Perspectives**

Ces études (4 et 5) soulèvent des interrogations quant aux optimisations possibles entre vitesse et indicateurs morphologiques (cf discussion générale) concernant les impacts d'une prise ou d'une perte de poids sur la performance en vitesse?

## **9.8. Liens étude 5- étude 6**

Les études précédentes caractérisent et définissent des liens forts entre caractéristiques anthropométrique et performance. Pour autant, la performance et la complexité qui en permet son expression sont le fruit d'un panel de qualités. C'est pourquoi il convient, de faire figurer les caractéristiques anthropométriques et de mieux les situer parmi les autres déterminants.

## 10. Étude 6

### Progression des performances au marathon : démographie, morphologie et environnement

#### 10.1. Résumé

**Objectifs** : Identifier les différents facteurs qui mènent à la performance de haut niveau au marathon tant sur le plan historique, qu'anthropométrique et saisonnier pour les 100 meilleurs marathoniens hommes et femmes de 1990 à 2011.

**Méthodes** : Les performances des 100 meilleurs marathoniens de Janvier 1990 à Décembre 2011 pour les hommes et les femmes ont été analysées. L'impact historique, démographique, physiologique, saisonnier et environnemental a été mesuré.

**Résultats et conclusions** : Les performances au marathon se sont améliorées et ceci à chaque niveau de performance (déciles de vitesses). En 2011, 94% des 100 meilleurs athlètes hommes sont d'origine Africaine (Kenyan et Ethiopienne) et 52% pour les femmes. Les caractéristiques anthropométriques de taille, poids et IMC ont diminué pour les deux sexes. Une fonction parabolique reliant IMC et vitesses maximales de course est visible soulignant un optimal pour la performance ainsi qu'un intervalle propice à cette dernière. La distribution saisonnière des performances montre 2 pics, l'un au printemps (semaines 14 à 17) et l'autre en automne (semaines 41 à 44). Durant ces deux périodes, les températures moyennes des villes organisatrices atteignent les valeurs optimales pour les longues distances ( $\approx 10^{\circ}\text{C}$ ). Les coureurs d'origines Africaines continuent à largement dominer le marathon et repousser les records dans des conditions éco-physiologiques optimales.

## 10.2. Introduction

L'achèvement d'un marathon en moins de deux heures ne s'est pas encore produit. Joyner et al (476) ont estimé que cette barrière devrait être dépassée vers 2021, grâce à un gain moyen de 10 secondes par an. En 40 ans, cette quête de records s'est universalisée sur les 5 continents. Cette période a également été marquée par l'augmentation du nombre de courses organisées chaque année (644 en 1990 et 2 820 en 2011) ainsi que le nombre de participants (234 000 en 1990 contre 1,48 million en 2011) (Association of Road Racing Statisticians ARRS). En athlétisme, 64% des épreuves n'ont pas vu leurs records du monde s'améliorer depuis 1993 (223,224), alors qu'au marathon, un nouveau record a été établi en Septembre 2013 à Berlin par le Kenyan Wilson Kipsang en 2 heures 3 minutes et 23 secondes. La performance individuelle dépend de facteurs endogènes tels que les caractéristiques anthropométriques, génétiques et physiologiques (477,478) et des facteurs environnementaux auxquels les athlètes sont exposés (146,479–481). Grâce à la mondialisation de l'épreuve, le nombre de participants a augmenté et ainsi ouvert la participation à une large diversité phénotypique au sein du marathon. Cependant, les meilleures performances restent principalement réalisées par les coureurs originaires d'Afrique de l'Est qui possèdent des caractéristiques physiologiques propices aux performances. De plus, le marathon est une épreuve athlétique qui est affectée par les conditions environnementales telles que la température, l'humidité, les polluants, la pression atmosphérique ou encore le vent. Parmi ces facteurs, la température apparaît comme celle ayant le plus d'impact sur la performance (146). Pour des raisons culturelles, médiatiques et commerciales, les grandes compétitions internationales telles que les Jeux Olympiques ou les championnats du monde sont organisées pendant l'été (Juillet et Août), généralement sous de mauvaises conditions climatiques.

L'objectif de l'étude est d'identifier les différents facteurs qui mènent à la performance de haut niveau au marathon tant sur le plan historique, qu'anthropométrique et saisonnier pour les 100 meilleurs marathoniens hommes et femmes de 1990 à 2011. Ceci pourrait permettre l'identification de profils les plus appropriés ainsi que des conditions les plus favorables.

## **10.3. Méthodes**

### **10.3.1. Collecte des données**

Nous avons collecté les performances des 100 meilleurs marathoniens chaque année de Janvier 1990 à Décembre 2011 et des 100 meilleures marathoniennes de Janvier 1996 à Décembre 2011. Un total de 3800 performances annuelles soit 2200 pour les hommes et 1600 pour les femmes, ont été collectées sur le site internet <http://www.iaaf.org/>. Pour être inclus dans l'étude, les hommes devaient terminer un marathon en moins de 2 heures 18 minutes et les femmes, moins de 2 heures et 34 minutes. Pour chaque athlète, la nationalité, la date et le lieu de compétition, le temps de course (converti en vitesse en  $m.s^{-1}$ ), ainsi que la taille et la masse corporelle ont été récoltés. L'IMC a été calculé.

### **10.3.2. Vitesse de course**

Pour les hommes comme pour les femmes, les 100 meilleurs athlètes ont été regroupés par décile de vitesse. La moyenne et l'intervalle de confiance ont été calculés pour chaque décile et pour les deux sexes. Un test de Student a été réalisé afin de comparer les vitesses de courses des athlètes ayant intégré le Top 100 en 1990 pour les hommes et 1996 pour les femmes aux vitesses de ceux et celles intégrant le Top 100 en 2011.

### **10.3.3. Démographie**

Les nationalités des athlètes ont été catégorisées en 6 régions du monde : Afrique, Asie, Europe, Amérique du Nord ; Amérique du Sud et Océanie. Pour chacune des années et pour les deux sexes, la contribution de chaque continent dans le Top 100 a été calculée. Une comparaison ANOVA par groupe a été réalisée afin de comparer les moyennes des 10 meilleurs athlètes de chaque continent entre eux et afin d'identifier une éventuelle tendance démographique pour les deux sexes. Puis, les moyennes des 10 meilleur(e)s athlète(s) issu(e)s de chaque continent ont également été comparées par pair en utilisant le Test de Mann-Whitney car l'échantillon ne suit pas une distribution normale et le n est inférieur à 30.

#### **10.3.4. Morphologie**

La moyenne ainsi que l'intervalle de confiance ont été calculés pour les Top 100 homme et femme chaque année et un test de Student a été réalisé afin de comparer la taille, le poids et l'IMC des athlètes ayant intégré le Top 100 en 1990 chez les hommes et en 1996 chez les femmes à celles et ceux intégrant le Top 100 en 2011. Puis, nous avons déterminé s'il existait une corrélation entre l'IMC et la vitesse de course. Ceci a été réalisé en identifiant la vitesse maximale de course pour chaque IMC.

#### **10.3.5. Performance saisonnière**

Pour les courses réalisées entre 1990 et 2011 pour les hommes et de 1996 à 2011 pour les femmes, nous avons analysé le nombre de performances en fonction de la semaine de l'année (2200 pour les hommes et 1600 pour les femmes). Le pourcentage de performances par semaine de l'année a été calculé pour les deux sexes afin de comparer l'impact de la saisonnalité sur les performances.

#### **10.3.6. Analyses statistiques**

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le programme R. Le seuil de significativité était considéré à  $p=0,05$ . La taille de l'effet pour l'ANOVA par pair était celui de Cohen et évalué avec les critères conventionnels de Cohen (482). Pour le test de Mann-Whitney, la formule pour calculer la taille de l'effet est la suivante;  $r = Z/\sqrt{N}$ , avec comme critère d'évaluation:  $abs(r)=0,1$  petit effet,  $abs(r)=0,3$  effet moyen et  $abs(r)=0,5$  grand effet.

## 10.4. Résultats

### 10.4.1. Vitesses de course

Les moyennes des vitesses de courses du Top 100 ont continuellement augmenté depuis 1990 pour les hommes et 1996 pour les femmes et ceci pour chaque décile de vitesse. Chez les hommes, la vitesse moyenne est passée de  $5,30 \pm 0,08 \text{ m.s}^{-1}$  en 1990 à  $5,52 \pm 0,06 \text{ m.s}^{-1}$  en 2011 ( $p < 0,001$ ). Chez les femmes, cette tendance est similaire puisque ces dernières sont passées d'une vitesse moyenne de  $4,68 \pm 0,06 \text{ m.s}^{-1}$  en 1996 à  $4,85 \pm 0,07 \text{ m.s}^{-1}$  en 2011, ( $p < 0,001$ ). Chaque année, les meilleures performances du Top 100 hommes ont été réalisées en moyenne dans  $31 \pm 5$  courses et leur ranking moyen à l'issue de ces compétitions était de  $4 \pm 3$ . En moyenne les 100 meilleures marathoniennes ont réalisé leurs performances dans  $31 \pm 3$  courses également et leur ranking moyen était de  $4 \pm 3$ . De plus, les variations annuelles des vitesses de courses étaient similaires à tous les niveaux de performances (déciles) et ceci pour les hommes comme pour les femmes (Figures 60).

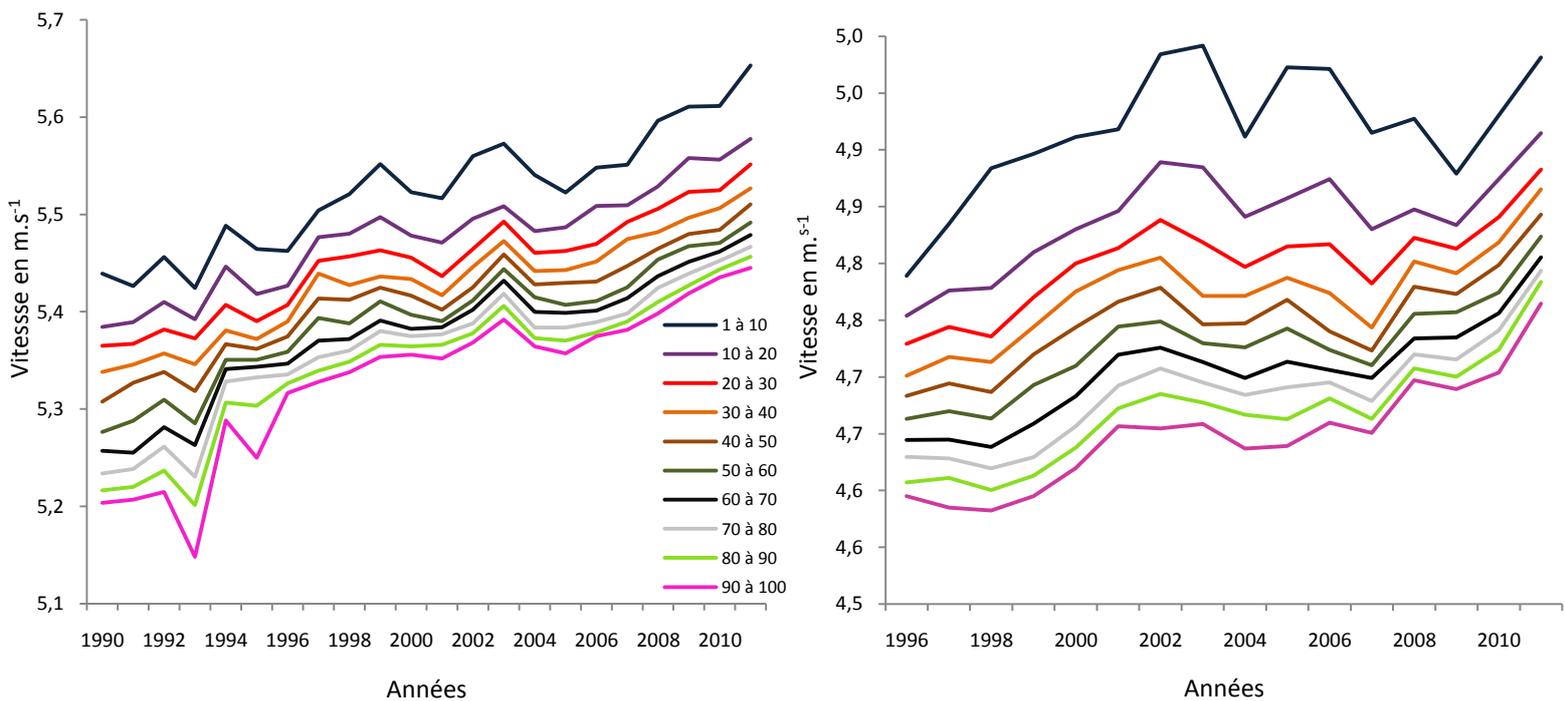


Figure 60: Moyennes des vitesses de courses du Top 10 pour chaque saison par déciles de 1990 à 2011 pour les hommes (figure de gauche) et de 1996 à 2011 pour les femmes (figure de droite).

### 10.4.2. Démographie

#### 10.4.2.1. Top 100

Depuis 1990, 55% des performances masculines ont été réalisées par des coureurs d'origine africaine (parmi celles-ci, 83% sont d'origine Kenyane ou Ethiopienne), 24% étaient européens et 15% asiatiques. Concernant les femmes, l'impact démographique est un peu différent puisque depuis 1996, 39% des performances sont réalisées par des européennes, 30% par des asiatiques, et 24% par des coureuses d'origine africaine. Cependant, ces pourcentages ont continuellement évolué (Figure 61). Chez les femmes, le pourcentage de marathoniennes africaines est passé de 6% en 1996 à 52% en 2011. Chez les hommes, les coureurs d'origine africaine étaient représentés à 16% en 1990 pour atteindre 94% en 2011. Par conséquent, la contribution démographique des autres régions du monde a progressivement diminué, le pourcentage de marathoniennes européennes est passée de 48% en 1996 à seulement 24% en 2011. Chez les hommes, la proportion d'athlètes européens est passée de 47% en 1990 à 0% en 2011. Le point de croisement montrant le début de la domination africaine au sein du Top 100 apparaît en 1996 chez les hommes alors qu'il apparaît seulement treize ans plus tard, en 2009 chez les femmes.

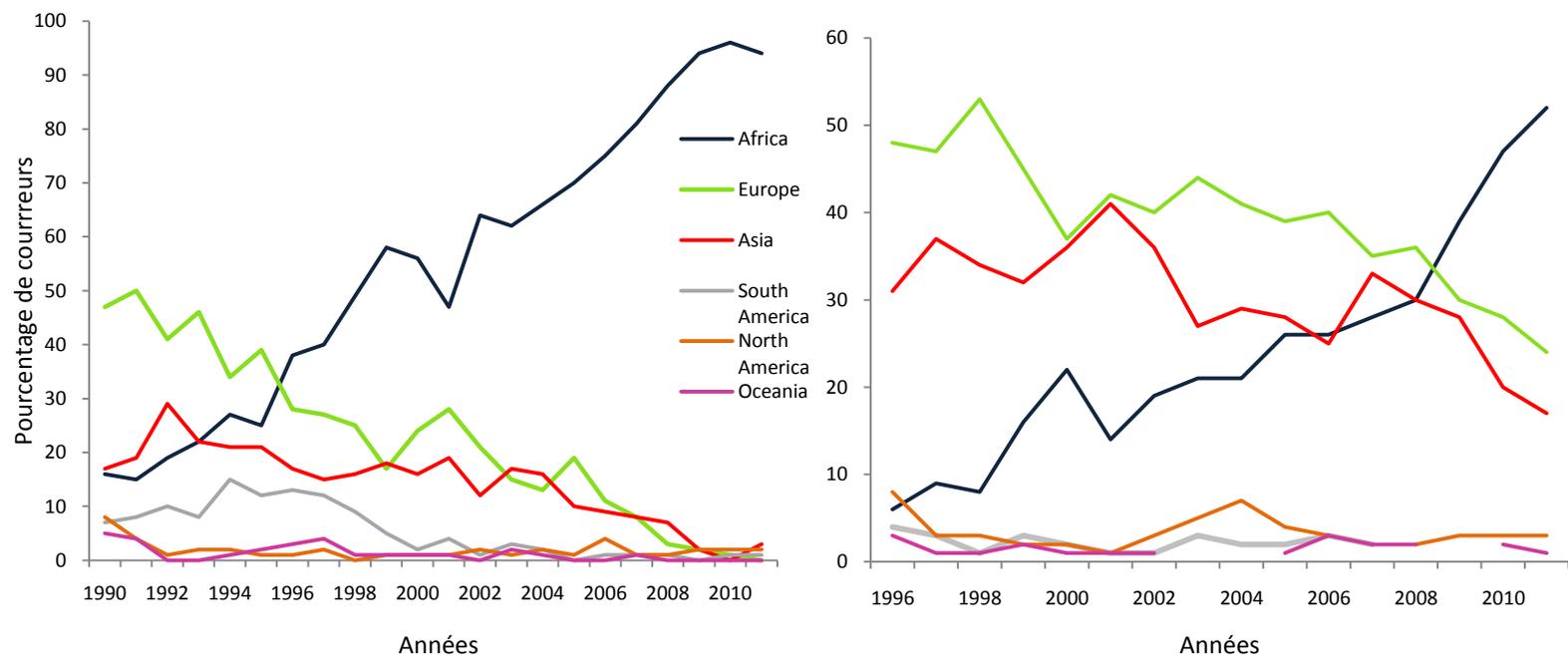


Figure 61: Distribution par continents des coureurs du top 100 par saison de 1990 à 2011 pour les hommes (figure de gauche) et de 1996 à 2011 pour les femmes (figure de droite).

Les moyennes de vitesses de courses diffèrent par nationalité pour les hommes (ANOVA  $p < 0,001$ ) avec un large effet de taille ( $d = 0,88$ ). Les plus rapides sont le groupe de 10 africains (sur les 22 ans d'étude) avec des vitesses qui s'étalent de  $5,63$  à  $5,72 \text{ m.s}^{-1}$ , avec une moyenne de  $5,67 \pm 0,03 \text{ m.s}^{-1}$ . Ce groupe est plus rapide que tous les autres compétiteurs (Figure 62). Les 10 meilleurs coureurs d'origines européenne et asiatique ont des performances similaires avec des moyennes de courses de  $5,53 \pm 0,02 \text{ m.s}^{-1}$  et  $5,52 \pm 0,03 \text{ m.s}^{-1}$ , respectivement. A l'inverse, chez les femmes, les performances sont plus variées au sein des régions (ANOVA  $p < 0,001$ , taille de l'effet  $0,50$ ). La moyenne des performances des 10 meilleures africaines est de  $5,00 \pm 0,04 \text{ m.s}^{-1}$ , de  $5,00 \pm 0,08 \text{ m.s}^{-1}$  pour les européennes et de  $4,99 \pm 0,05 \text{ m.s}^{-1}$  pour les asiatiques. Cependant, les athlètes issues des autres continents, tels que l'Amérique du Sud, du Nord et l'Océanie, ont des moyennes respectivement de  $4,75 \pm 0,009 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $4,82 \pm 0,1 \text{ m.s}^{-1}$  et  $4,76 \pm 0,09 \text{ m.s}^{-1}$  et par conséquent beaucoup moins rapides que les coureuses originaire d'Afrique, d'Europe et d'Asie ( $p < 0,01$ ).

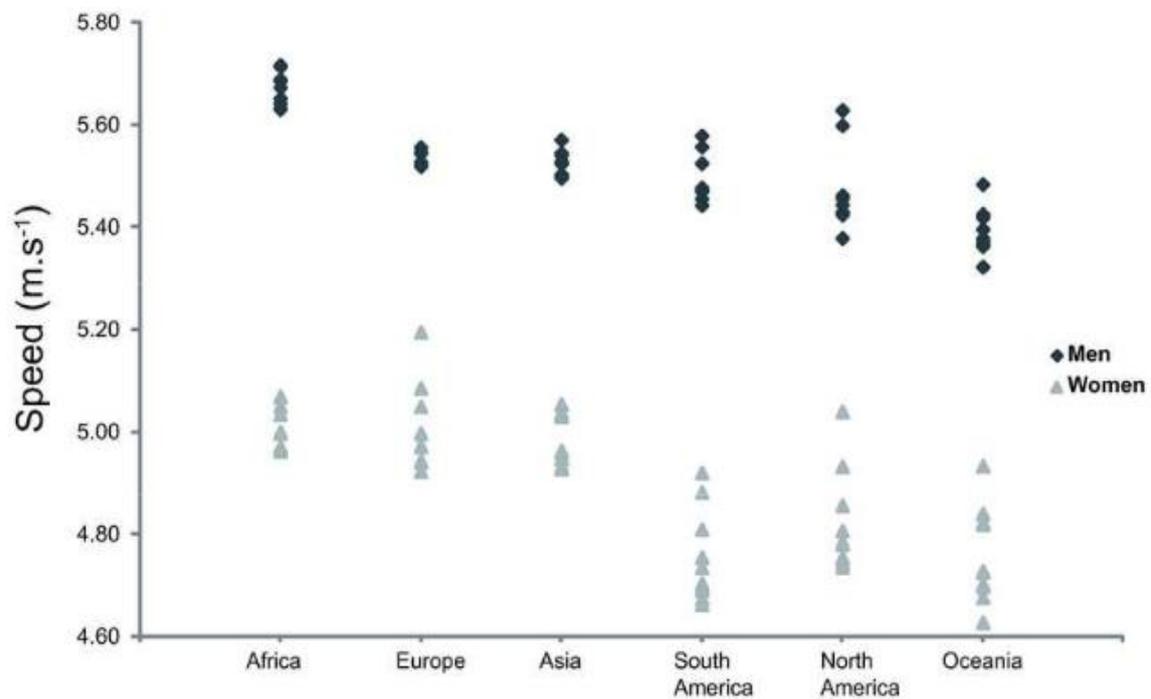


Figure 62: Moyenne des vitesses des 10 meilleurs athlètes par saisons et par continents.

### 10.4.3. Morphologie et vitesse de course chez le Top 100

Chez les hommes, la taille, le poids et l'IMC diminuent de 1990 à 2011 (Figure 63). Sur la totalité de la période étudiée, la taille des coureurs s'étale de 156 à 190 cm, le poids de 45 à 78 kg et l'IMC de 15,78 à 23,05 kg.m<sup>-2</sup>. La moyenne de poids des hommes a diminué significativement pour passer de 59,6 ± 2,30 kg en 1990 à 56,2 ± 1,10 kg en 2011 (p < 0,01). La moyenne d'IMC a également diminué significativement pour passer de 19,83 ± 1,70 kg.m<sup>-2</sup> en 1990 à 19,42 ± 1,30 kg.m<sup>-2</sup> en 2011.

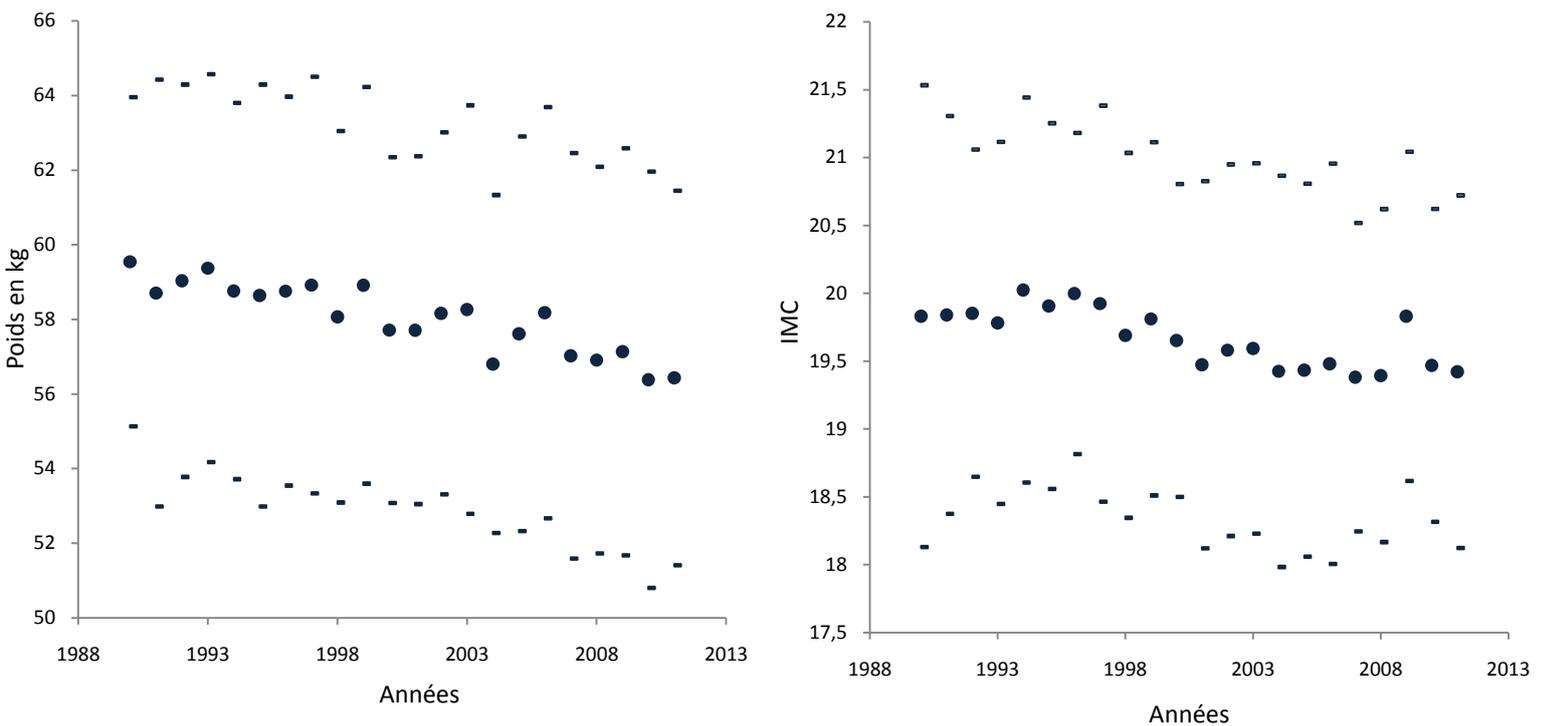


Figure 63: Evolutions moyennes (et écarts types) du poids (figure de gauche) et de l'IMC (figure de droite) des marathoniens du Top 100 lors des saisons 1990-2011.

De plus, l'IMC semble être très corrélé à la vitesse maximale de course. Après modélisation avec une fonction polynomiale du second degré ( $y = -1.4387 + 0.7208x - 0.0182x^2$ ,  $R^2 = 0,89$ ), l'IMC optimal chez les hommes est de 19,80 kg.m<sup>-2</sup> pour une vitesse maximale de 5,70 m.s<sup>-1</sup>. L'équivalent chez les femmes est 18.2 kg.m<sup>-2</sup> pour une vitesse maximale de 5,19 m.s<sup>-1</sup> (Figure 64).

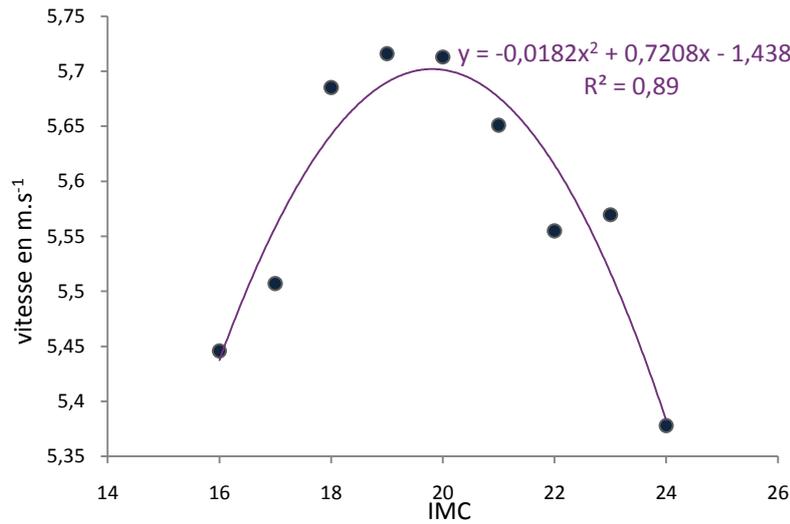


Figure 64: Vitesse maximale de course du top 100 en fonction de l'IMC.

#### 10.4.4. Saisonnalité

L'ensemble des performances annuelles du Top 100 s'étalent sur 50 semaines pour les hommes et 47 pour les femmes. La distribution montre deux pics, le premier durant les semaines 14, 15, 16 et 17 (en Avril) alors que le second apparaît durant les semaines 41, 42, 43 et 44 (en Octobre). Ces huit semaines représentent 48,7% des performances féminines (27,6% pour Avril et 21,1% pour Octobre) et 54,4% chez les hommes (29,4% en Avril et 25% en Octobre). A l'inverse, les performances réalisées durant les semaines 25 à 32 (début Juin à Aout) représentent seulement moins de 1% du total (Figure 65).

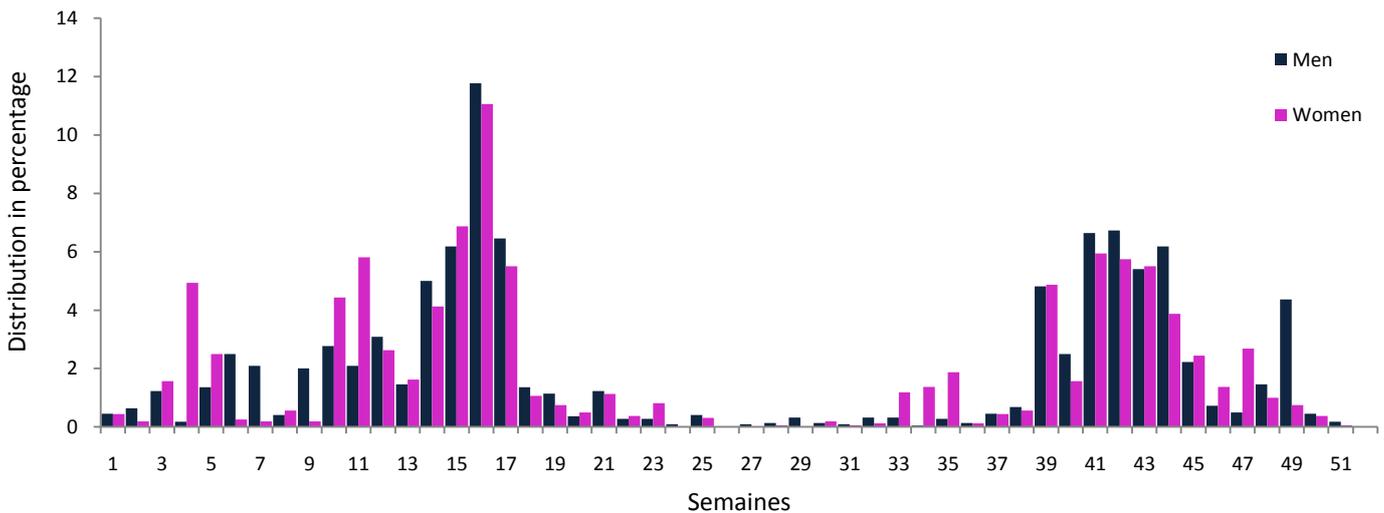


Figure 65: Distribution des 3800 performances des top 100 masculin et féminin

## 10.5. Discussion

Notre étude est la première à analyser l'ensemble du paysage des marathoniens hommes et femmes sur les derniers 25 ans et à identifier les différents facteurs qui mènent à la performance de haut niveau.

### 10.5.1. Vitesses de courses

Cette étude montre que les performances du Top 100 masculin et féminin au marathon se sont améliorées et ce pour chaque niveau de performance. Ceci diffère de nombreux autres sports qui se sont rapprochés de limites ; 64% des épreuves en Athlétisme n'ont pas progressé depuis 1993 (224,226). Ceci pourrait être dû à des effets de saturations entre interactions de la génomique (478,483), la physiologie, la démographie et les facteurs environnementaux (146,484).

Un point important dans cette étude est que les variations annuelles de vitesses de courses sont similaires pour chaque décile. Quand le premier décile (Top10) améliore ces performances, les autres déciles varient également. Ces variations pourraient être associées avec les conditions climatiques moyennes enregistrées lors des compétitions dans les villes organisatrices. Ceci expliquerait probablement pourquoi les meilleures performances du Top 100 hommes et femmes n'ont été accomplies que dans  $31 \pm 5$  courses pour les hommes et  $31 \pm 3$  pour les femmes.

### 10.5.2. Démographie

Les meilleures performances chez les hommes au marathon sont réalisées par des athlètes originaires d'Afrique de l'Est (principalement Kenya et Ethiopie) et cette tendance n'a fait que progresser de 1990 à 2011 (16% à 94%). A l'inverse, les autres nationalités initialement dominantes dans le Top 100 en 1990 (Europe, Asie, Amérique du Nord et du Sud et Océanie) sont de moins en moins présentes sur la scène internationale, 84% en 1990 et 6% en 2011. Ce changement de domination a également eu un impact sur l'évolution des performances globales mais surtout sur celles du Top 10 par régions. Alors que sur l'ensemble de la période étudiée, les dix meilleures coureurs africains ont une moyenne de course de  $5,68 \pm 0,03 \text{ m.s}^{-1}$ , les autres dix meilleurs

marathoniens des autres continents sont beaucoup plus lents ( $5,48 \pm 0,07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Plusieurs études ont tenté d'expliquer cette domination est-africaine.

L'une des raisons pourrait être liée à leurs caractéristiques physiologiques. En effet, malgré une consommation maximale d'oxygène comparable, les coureurs africains seraient capables de courir avec un pourcentage plus élevé plus longtemps que les européens (371,380). Les coureurs kenyans ont aussi une plus grande activité de l'enzyme HAD  $\beta$ -oxydative (activité 3-hydroxyacyl-CoA-déshydrogénase) dans leurs muscles (485,486). D'autres auteurs ont montré que les habiletés sportives étaient caractérisées par des génotypes spécifiques qui ont encore besoin d'être identifiés. Macarthur et North (478) ont montré que la variation des performances humaines et l'habileté athlétique ont longtemps été reconnues comme ayant de fortes composantes héréditaires. En effet, Rivera et al (487) ont démontré de grandes associations entre la restriction de la longueur d'un polymorphisme d'un muscle spécifique de la créatine kinase et la réponse à la consommation maximale en oxygène ( $\text{VO}_2\text{max}$ ) après 20 semaines d'entraînement en endurance chez une cohorte de 240 membres indépendants d'une famille.

Les coureurs d'Afrique de l'Est montrent également une plus grande résistance à la fatigue (488). De plus, Onywera et al (489), ont affirmé que les coureurs kenyans différaient de la population générale grâce à leur plus grande activité physique lors de l'enfance et l'adolescence sur le trajet à l'école. Une plus grande proportion d'athlètes courait même chaque jour pour aller à l'école (groupe contrôle 22%, athlètes nationaux 73% et internationaux 81%) et couvrait de plus grandes distances que les autres groupes. Il a été montré que les enfants kenyans qui allaient à pied et en courant à l'école, avaient une  $\text{VO}_2\text{max}$  30% supérieure aux autres enfants (490). Ceci a également été confirmé sur des coureurs éthiopiens (491). De plus, l'exposition chronique à l'altitude, telle qu'elle a été vécue par beaucoup d'enfants d'Afrique de l'Est, combinée avec l'entraînement en endurance induit des adaptations hématologiques, qui offriraient partiellement de plus grandes capacités physiologiques (492). Cependant, malgré une augmentation massive du nombre d'athlètes africains au sein des meilleures performances mondiales ces dernières années, la supériorité des marathoniennes africaines n'est pas aussi fortement visible que chez les hommes (94% chez les hommes en 2011 pour 52% chez les femmes la même année). En effet, les vitesses de courses des dix meilleures coureuses africaines ne sont pas plus rapides que celles réalisées par les coureuses européennes et asiatiques. Cette différence pourrait s'expliquer par leur arrivée plus tardive au sein de l'activité. En effet,

l'augmentation du taux de participation des femmes aux Jeux Olympiques est passée de 1,9% en 1900 à 42,3% en 2008 à Pékin. Concernant le marathon, la première apparition d'une femme remonte à près de 30 ans aux Jeux Olympiques de Los Angeles en 1984 (493). De nos jours, la participation des femmes aux marathons internationaux peut varier selon le lieu de compétition (42% pour Boston, 35% pour New York et 20% pour Berlin). Cependant la proportion des femmes africaines au marathon continue de s'améliorer et va probablement renforcer leur domination dans les années futures.

### **10.5.3. Morphologie et vitesse de course**

La morphologie des marathoniens a changé ces dernières années. La diminution de la taille, du poids et de l'IMC est visible chez les hommes comme chez les femmes (12). Les performances aux marathons requièrent une multitude de qualités, mais un des facteurs clé pourrait être celui de l'optimisation biométrique. Cette étude montre un optimum d'IMC à  $19,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . Les 10 meilleurs marathoniens de tous les temps ont un IMC compris dans un intervalle de performance réduit allant de  $17,5$  et  $20,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ . En effet, l'IMC des marathoniens est l'un des plus faibles de toutes les épreuves d'athlétisme. Plusieurs auteurs se sont intéressés aux caractéristiques biométriques des coureurs et spécialement celles des africains (380,446,448,449). D'un point de vue de la thermorégulation, la domination des coureurs africains pourrait être due à leur plus faible IMC. Leurs capacités à courir plus vite est particulièrement marquée dans des conditions climatiques chaudes, ou une grande différence existe entre les athlètes africains et les autres. Ceci pourrait s'expliquer par leurs capacités à mieux dissiper la chaleur que les coureurs caucasiens (448). Il a également été démontré qu'une plus petite taille pourrait être un avantage pour les épreuves de longues distances, particulièrement pour l'évacuation de la chaleur (448,449). Une plus grande proportion de masse maigre expliquerait les différences de performance lors de courses réalisées en ambiance chaude. Il a été suggéré que lors d'une augmentation de la température ambiante de  $25$  à  $35^\circ\text{C}$  les coureurs plus grands et plus lourds verraient leurs performances plus fortement altérées notamment dues à une accumulation de la chaleur corporelle accélérant ainsi l'apparition de la fatigue(448,449).

Kong et Heer (446) ont affirmé que les jambes élancées et fines des coureurs kenyans leurs permettaient d'améliorer leurs performances en raison de leurs faibles moments d'inertie, et par conséquent, un moindre travail mécanique interne à réaliser pour chaque foulée. Ainsi, cette réduction du temps de contact avec le sol améliorerait l'économie de course de ces coureurs. Une

telle réduction diminue à son tour les forces de freinage et permet d'accélérer le mouvement vers l'avant. La morphologie des ces athlètes serait également un avantage en terme de thermodynamique (380). En effet, leurs jambes plus légères comparativement à celles des athlètes nordiques produiraient moins de chaleur et permettraient une foulée plus facile et plus rapide.

#### **10.5.4. Saisonnalité**

Les meilleures performances apparaissent fin Avril (semaines 14 à 17) et fin Octobre (semaines 41 à 44). Les courses majeures durant ces périodes sont celles de Londres, Boston, Rotterdam et Paris pour le premier pic, et New-York, Berlin, Chicago et Amsterdam pour le second pic. Les meilleures performances masculines sont plus regroupées dans ces deux pics (54,4% pour les hommes et 48,6% pour les femmes). Ceci peut s'expliquer par la dissociation de certaines courses. Chez les femmes, les pics de performances aux semaines 4, 10 et 11 correspondent à des marathons exclusivement féminins, respectivement Osaque, Nagoya et Séoul (Osaque; départ à 12:00 avec un température moyenne de  $7,3^{\circ}\text{C} \pm 1,8^{\circ}\text{C}$  depuis 2001; Nagoya: départ à 9:00 avec un température moyenne de  $8,8^{\circ}\text{C} \pm 3,4^{\circ}\text{C}$  depuis 2005).

De plus, ces deux pics annuels correspondent aux températures optimales enregistrées dans l'hémisphère Nord lors de ces périodes ( $10^{\circ}\text{C}$ ) et sont en accord avec les valeurs obtenues dans la littérature (146). De plus, aucun record mondial et seulement quelques performances sont établis durant l'été lors de Jeux Olympiques ou des championnats Internationaux et Continentaux. Malgré le haut niveau de performance des compétiteurs engagés lors de ces épreuves, l'absence de performances peut s'expliquer par des valeurs de températures trop écartées de celles optimales (Jeux Olympiques d'Athènes de 2004 :  $25,6^{\circ}\text{C}$ , Pékin 2008 :  $25,0^{\circ}\text{C}$  et au championnat du monde de Berlin 2009 :  $20,7^{\circ}\text{C}$ ).

La température a des effets néfastes sur les performances des marathonniens. La chaleur provoque altérations majeures sur les fonctions cardiovasculaires, métaboliques, neuromusculaires et thermorégulatrices, et par conséquent, l'hyperthermie apparaît comme une limite clé lors d'un exercice dans des conditions de températures élevées (480,494). Une étude sur le marathon de Stockholm (481) ainsi qu'une large analyse sur l'ensemble des participants aux marathons de Boston, Chicago, New-York, Paris, Londres et Berlin de 2001 à 2010 ont confirmé ces tendances et montré que la température avait un impact majeur sur l'ensemble des performances.

## 10.6. Conclusion

Dans cette étude, nous avons identifié les principaux facteurs qui mènent à la performance de haut niveau au marathon. Chaque décile de performance issu du Top 100 masculin et féminin a continué de progresser durant les vingt dernières années avec des variations annuelles de performances similaires. Nous avons démontré que la démographie joue un rôle clé dans l'amélioration de ces performances, dans un contexte où la domination des coureurs d'origines africaines est primordiale. De plus, les meilleures performances sont réalisées durant des périodes fraîches (Avril et Octobre) en réponse à des températures optimales de courses avoisinant les 10°C. Concernant les gabarits, **l'intervalle de performance** resserrée et proche de l'optimum d'IMC révélé reflète des optimisations morphologiques qui se sont mises en place au cours des ans. En effet, la diminution du poids, de la taille et de l'IMC des athlètes du Top 100 est révélatrice de ces adaptations. Ainsi, quand l'ensemble de ces conditions sont réunies, la performance continuera probablement de s'améliorer tout en se rapprochant de plus en plus des limites de l'épreuve. Les gabarits avec l'optimisation révélée ne pourront fournir qu'une marge de progression faible dans le panel des éléments de la performance. Mais s'écarter de l'intervalle morphologique favorable pourrait nuire à toute progression.

## 11. Discussion générale

Différents niveaux de démonstration des liens structurels entre les caractéristiques anthropométriques et la performance de haut niveau sont révélés à travers cette thèse.

Le 1<sup>er</sup> niveau repose sur des **évolutions différentes** entre SHN et population générale (études 1 et 2). Ces évolutions différenciées présupposent que les SHN tirent des avantages supérieurs de leurs caractéristiques anthropométriques.

Le 2<sup>ème</sup> niveau de démonstration repose sur la mise en évidence de **liens directs** entre caractéristiques anthropométriques et performance (études 2 et 5).

Le 3<sup>ème</sup> met en exergue l'existence de **couples [optima physiques - optima de performances]**, à travers certains champs des possibles ce qui, de fait, définit les **marges de progressions encore envisageables** (études 3, 4, 5 et 6).

Le 4<sup>ème</sup> niveau de démonstration s'appuie sur la **pertinence et les interactions avec la performance d'indicateurs simples** tels que poids (études 2, 3, 4, 5), taille (étude 2, 3, 4, 5) et IMC (études 4, 5, 6).

Ces études et leurs constats amènent aussi de nouvelles questions sur la compréhension des liens entre morphologie et performance et proposent une conception de l'IMC différente de celle à laquelle il est assujéti dans les études de santé publique.

Cette thèse présente divers intérêts comme la compréhension de la performance par un versant morphologique grâce à l'exhaustivité de bases de données conséquentes. Elle offre également la possibilité de préciser le rôle respectif de certains éléments essentiels à la performance, pouvant servir dans la conception d'entraînements ou de sélection des SHN. L'analyse des caractéristiques anthropométriques peut s'avérer un marqueur d'atypicité ou encore d'établir des marges de progression.

### **11.1. 1<sup>er</sup> niveau de démonstration : évolution et sélection**

Dans un contexte d'expansion morphologique globale des populations, celles spécifiquement sélectionnées sur leurs gabarits telles que rugbymen, joueurs de NFL ou de NBA, nous révèlent une accélération de cette tendance (études 1 et 3). Les joueurs de rugby français, des seniors aux minimes présentent des augmentations de taille et de poids bien supérieures à celles de la population générale. Si les majorations de poids peuvent être la conséquence de la modernisation et de la professionnalisation de ce sport (entraînements, préparation physique, suivi nutritionnel, nombre de matchs...), les rehaussements de taille sont le fruit d'une sélection dirigée. Une limite est à souligner par rapport aux caractéristiques morphologiques utilisées comme seuil de sélection dans les catégories "jeunes". Cette pratique va systématiquement exclure les athlètes talentueux mais à maturation tardive et par conséquent affecter le processus de détection et d'identification. C'est pourquoi il est nécessaire de toujours considérer la composante anthropométrique au sein de la palette des déterminants de la performance. Pour cela, une connaissance du degré d'importance des traits anthropométriques par discipline est nécessaire.

Dans ce premier niveau de démonstration, le parallélisme mesuré des croissances dans des sports aussi différents que le rugby, baseball, basketball, hockey sur glace ou football américain suggère des tendances communes plus profondes. Certes impulsées par les taux de croissance observés dans la population, ces majorations sont renforcées par un processus de sélection qui se charge ensuite de maximiser les caractéristiques favorables dans les sports professionnels.

Avec le temps, le creusement des écarts anthropométriques entre SHN et individus en population générale souligne la composante sélective du sport professionnel, lui même révélateur d'optimisations construites et sélectionnées.

L'analyse des quatre grands sports américains (étude 3), met aussi en évidence des croissances biométriques asymptotiques similaires aux courbes de plafonnements des records du monde. Les plateaux et stagnations de tailles, observés dans un premier temps en NFL et NBA sont quelques années plus tard identifiables dans les deux autres sports. A l'opposé de nombreuses évolutions

morphologiques constatées dans une large gamme de sports, celles étudiées ici s'interrompent. Sont-elles pour autant annonciatrices de saturations émergentes dans d'autres sports ? Deux hypothèses peuvent alors se discuter : ces stagnations pourraient être dues 1. à l'épuisement du vivier mondial d'athlètes imposants, renforcées par une compétition entre sports recrutant ces individus hors normes, ou 2. à des optimisations morphologiques abouties. Une réponse pourrait être apportée par le basket-ball, en vérifiant sur des périodes antérieures si en NBA l'attracteur taille révélé sur la période contemporaine est présent lors des premières décennies de ce championnat. Un attracteur taille similaire à celui des saisons récentes ou un intervalle identiquement favorable à la performance mesurée confirmeraient l'hypothèse d'une optimisation anthropométrique. Le meilleur compromis entre taille et efficacité en attaque opèrerait alors depuis plusieurs années. Par contre, si l'optimum ou l'intervalle de performance sont inférieurs chez les anciens joueurs de NBA, alors les optima pourraient être régis par une stagnation du recrutement de plus grands joueurs.

Cependant, les augmentations par palier qui concernent la taille et le poids, dévoilent une fonction homothétique entre records du monde et biométrie. Ces fonctions semblent parfaitement épouser les modélisations récentes de la performance sportive de haut niveau et pourraient révéler une synchronisation de ces évolutions.

Dans les sports étudiés ici, une spécialisation accrue des postes fut également mise en évidence, tandis qu'une différenciation morphologique accompagnait progressivement ces nouvelles spécificités techniques. Les contraintes nouvelles de ces postes ont aussi permis la recherche et la sélection des gabarits les plus adaptés. Ce phénomène d'adéquation morphologique aux exigences du jeu a été renforcé par l'aspect sélectif du sport professionnel.

Les augmentations de poids, taille et IMC sont à contextualiser car l'expansion morphologique globale agit comme un terreau propice à l'apparition de gabarits extrêmes. L'étude 3 permet ainsi de mettre en exergue des gains importants et concomitants d'IMC entre SHN et population générale. Ces prises synchrones d'IMC interrogent quant à la signification et la représentation de ces majorations. Elles ne reflètent en aucun cas des croissances similaires. En population générale (ici américaine), elles sont symptomatiques de prise de masse grasse alors que chez les athlètes, ces augmentations d'IMC reflètent une masse musculaire plus importante (221,222). Il n'empêche que

les déplacements récents des IMC en population générale sont illustrés par une sortie de la zone optimale des courbes d'iso-IMC (135), impliquant de nombreuses conséquences directement néfastes pour la santé. Les SHN, avec leurs gains massifs et recherchés de poids n'échappent pas à la dialectique "maximisation et blessures". Les gains de poids peuvent en effet s'avérer nuisibles en termes de fréquence ou de récurrence de blessures (435,495–500) ou de risque pour la santé (336,436).

Ces constats de majorations doivent aussi amener à une réflexion autour de l'IMC initialement construit et utilisé pour mesurer les fluctuations corporelles dans un but sanitaire. Cet indice pourrait en effet fournir une valeur simplifiée utile à la performance de haut niveau et rendre compte d'éléments autres qu'en population générale, mais toujours reliés à la notion d'énergie "embarquée".

Nonobstant, ces différences de croissance constatées suggèrent fortement les bénéfiques que ces traits anthropométriques confèrent à la performance de haut niveau. Ces tendances différenciées de majorations révèlent des orientations certainement profitables aux SHN, sans pour autant en apporter la démonstration patente.

## **11.2. 2<sup>ème</sup> niveau de démonstration : liens directs avec la performance**

Ces évolutions dévoilées au sein de populations d'athlètes de haut niveau, notamment de rugbymen nationaux sont renforcées avec l'apport des données des meilleurs internationaux ayant participé aux Coupes du Monde. Au delà d'étayer ou de renforcer ces tendances, un degré supérieur de démonstration reliant morphologie et performance est offert à travers l'analyse de l'ensemble des joueurs et matchs des Coupes du Monde de rugby (étude 2). Des liens directs sont établis entre poids, taille et niveaux de performance. En ce sens, ces indicateurs anthropométriques permettent non seulement de différencier les joueurs selon leurs postes mais aussi selon le stade atteint lors de la compétition et par conséquent le niveau de performance.

Dans un sport de combat collectif, un indicateur morphologique permettant une distinction entre les équipes selon leur place dans la hiérarchie internationale confirme l'importance du poids pour les avants, majoritairement impliqués dans les zones de combat, ainsi que de la taille et de la spécificité de jeu des arrières.

Toutefois, prégnance du poids pour les avants et implication de la taille comme facteur opportun à la performance pour les arrières démontrent et quantifient l'importance d'éléments recherchés depuis toujours en rugby. En effet, l'être complet en mouvement dans l'exercice de sa performance l'exprime en premier chef par l'intermédiaire de son propre corps. Par des étapes successives d'entraînement, de renforcement, de sélection et d'optimisation, apparaissent les traits morphologiques les plus adaptés. Et l'analyse de ces indicateurs anthropométriques permet aussi de révéler, du poids ou de la taille, lequel de ces éléments est discriminant de la performance selon le poste.

Ce deuxième niveau de démonstration, entre caractéristiques anthropométriques et performance, dépasse le premier stade descriptif. Mais, bien qu'établies sur des liens directs, ces relations restent grossières et se doivent d'être appréhendées plus finement dans la quantification et l'objectivation de leurs rapports à la performance.

### **11.3. 3<sup>ème</sup> niveau de démonstration : intervalle de performance et optimisation**

#### **11.3.1. Taille et optimisation**

En athlétisme, une taille graduellement différente entre moins performants et meilleurs mondiaux, avec des tendances inverses entre sprints et fond/demi-fond, dévoile les organisations les plus favorables à la performance (étude 4).

La réflexion autour des gabarits extrêmes éclaire les sous-bassements structurels nécessaires à la performance de haut niveau. En effet, les joueurs spécifiquement sélectionnés par rapport à leur taille et évoluant en NBA, présentent un attracteur-taille identique pour les meilleurs comme les moins bons marqueurs. La puissance de cet attracteur invariant d'échelle est renforcée par l'existence, autour de ce dernier, d'un intervalle de taille réduit dans lequel plus de 50% des points sont marqués, une nouvelle fois pour les meilleurs comme les moins bons (étude 3). Ces résultats permettent de préciser optimum de taille et intervalles favorables à la performance. De plus, au sein de ces espaces, plus un individu s'écarte de la valeur optimale et se rapproche des bornes extérieures moins sa performance est bonne. Cette gamme étroite de taille et son optimum réunissent idéalement les qualités requises et l'efficacité nécessaire au basket-ball : agilité, dextérité, qualités de tir, mais aussi sauts et vitesse, tout en tirant les bénéfices d'une grande taille. Cette morphologie potentialise certainement les possibilités offensives en présentant un compromis d'efficacité permettant pour les joueurs de cette taille de posséder la triple menace : tir extérieur, qualités de dribles et de dépassement afin de finir en lay-up ou dunk mais également capacité de tir à mi-distance. Puisqu'un phénotype ne peut être l'expression optimale de toutes les tâches, une situation de compromis est recherchée tentant de répondre à un problème d'optimisation entre de multiples aptitudes (316). Selon Shoval et al (316), la performance décroît à mesure qu'elle s'éloigne du morpho-espace optimal, ce qui s'applique au sport de haut niveau puisque l'efficacité diminue fortement de part et d'autre de l'intervalle de performance.

Cependant, optimum et intervalles de performance pour le scoring demeurent spécifiques de chaque phase de jeu : tirs, rebonds, passes (Perspectives étude 3) et, potentiellement, pour chaque indicateur quantifiable de la performance. Pourtant, un basketteur de très haut niveau remplit sa « feuille de stats » dans tous les compartiments du jeu : un triple double étant 10 unités dans trois catégories de statistiques, par exemple au moins 10 points, 10 rebonds et 10 passes sur un match. De nouveau, la performance se trouve confrontée à un problème d'optimisation multi objectifs, où les joueurs aptes à réaliser ce type de performance doivent présenter des tailles qui chevauchent différents intervalles optimaux.

Par ailleurs, les phénomènes cumulés de sélection, entraînement et optimisation qui agissent en interaction afin de produire une performance type, ont permis de mettre en évidence les meilleurs compromis morphologiques pour un ou plusieurs indicateurs de la performance. Néanmoins, il convient de situer la morphologie dans le panel d'éléments qui permettent l'expression de la performance. Certes des optimisations morphologiques existent, mais dans la complexité qui sous-tend la performance, des optimisations plurielles sont nécessaires. En effet, les gabarits jouent un rôle essentiel dans la performance, ils en sont d'ailleurs le premier vecteur, mais ils ne sont qu'un des nombreux maillons de la chaîne. De nombreux autres éléments sont à considérer dans la pluralité de la performance, tels que les caractéristiques physiologiques, biomécaniques, psychologiques mais aussi la qualité des entraînements, de la préparation physique spécifique, des équipements ou encore les aspects sociologiques ou des investissements politiques. Si l'on poursuit la métaphore, la chaîne ne peut être robuste qu'à l'image de son maillon le plus faible. Par conséquent, taille, poids ou IMC optimaux ne sont pas suffisants dans la réalisation d'une prestation sportive de haut niveau mais il est nécessaire de s'assurer qu'ils ne sont pas un handicap. Dans ce but, révéler des optimisations et intervalles de performances existants grâce aux études épidémiologiques fournit des standards à partir desquels les athlètes peuvent se situer ou placer leurs progressions.

### **11.3.2. Poids et optimisation**

Les évolutions accélérées des caractéristiques anthropométriques des SHN observées, ainsi que les impacts directs de ces caractéristiques avec la performance amènent à une réflexion contiguë aux optimisations morphologiques.

La différenciation des meilleurs par rapport aux moins performants selon le critère de poids pour tout le spectre des distances en athlétisme, avec des tendances inversées entre sprints et fond/demi-fond révèle l'importance et l'optimisation de cette caractéristique anthropométrique (étude 4). Ces différenciations sont graduelles, elles révèlent des organisations construites qui apportent des bénéfices selon les distances : puissance, accélération ou coût énergétique, thermorégulation, économie de course, résistance au sol et de l'air.

A l'instar des relations entre taille et efficacité au tir en NBA, des optima et intervalles morphologiques spécifiques selon les distances et favorables à la performance ont été mis en évidence entre vitesse et poids. Du marathon au 100m, se centrent autour de différents gradients de poids, des morphologies adaptées et optimales. En effet, plus le niveau de performance augmente et plus la variabilité diminue, renfermant le spectre des poids des meilleurs coureurs autour d'un intervalle optimal rétréci. Ces optima de poids, se constituant progressivement avec la diminution de la variabilité conjointe à l'amélioration de la performance, sont probablement une expression indirecte des ressources énergétiques et de puissances et capacités développables. Par contre, ils sont l'expression directe de compromis favorables aux spécificités de performance selon les distances de course.

En athlétisme, les coefficients allométriques calculés fournissent un autre degré dans l'intellection des relations directes entre poids et vitesse, selon les distances et le sexe (étude 5). Un élément supplémentaire est ici livré dans la compréhension des différences hommes / femmes par le prisme morphologique. Les lois de puissance identiques entre écarts de poids et de vitesse selon les distances chez les hommes et les femmes révèlent des structurations fortes qui ne peuvent être aléatoires. Ces coefficients allométriques éclairent quant à l'impact et la prégnance du poids selon les distances de course et le sexe. Ils expriment une base commune structurelle mais pondérée selon la catégorie (sprints, demi-fond et fond). En effet, ils traduisent l'importance accrue du poids sur le sprint, tandis que cette prégnance diminue avec l'augmentation de la distance. Point majeur, ces coefficients allométriques sont toujours significativement inférieurs chez les athlètes féminines, soulignant une implication sensiblement moindre du poids dans l'atteinte de leur vitesse maximale. Ces différences suggèrent qu'il pourrait exister encore une marge de progression à partir des caractéristiques anthropométriques des athlètes féminines.

Ces coefficients allométriques sont le fruit de relations établies uniquement sur les SHN. Par conséquent, ils ne sont à interpréter que sur ces derniers groupes car ils sont l'expression des liens entre masse globale et vitesse. Ils expriment une idée de « masse efficace » pour le déplacement de l'ensemble du corps en mouvement. L'intérêt est qu'ils ne sont pas réducteurs d'une masse spécifique (grasse ou maigre) mais qu'ils appréhendent le phénomène global et renseignent ainsi

comment le poids total se meut en lien avec la vitesse. Ils offrent une relation entre la vitesse et la masse totale en action.

Ces indicateurs soulèvent des interrogations quant aux optimisations possibles entre vitesse et poids. En effet, ces constats sur de nombreux athlètes questionnent quant aux fluctuations de poids et leur impact sur la performance. Un athlète plus lourd, avec une masse maigre plus conséquente sortira-t-il plus rapidement des *starting-blocks* ? Atteindra-t-il sa vitesse maximale ( $V_{\max}$ ) plus tôt ? Quelles différences sur le maintien de la vitesse en fin de course existe-t-il entre des athlètes de différents poids ? Ces questionnements inhérents aux constats mis en avant par l'étude 5 vont générer la mise en place de protocoles visant à déchiffrer ces liens. Le but sera de comprendre l'impact de la prise de masse sur l'accélération mais aussi sur l'atteinte de la  $V_{\max}$  et son maintien.

### 11.3.3. IMC et optimisation

La course, composante primaire du mouvement et essentielle à de nombreux sports, nous informe quant à l'utilité d'indicateurs morphologiques tel que l'IMC. Les études 5 et 6 mettent en évidence des gradients morphologiques et d'IMC selon les distances, similaires aux gradients et contributions énergétiques. Ils sont marqueurs de différences par distance et précurseurs d'organisations qui tendent vers des optima.

De plus, à l'image des études sanitaires qui promeuvent intervalle de protection et optima d'IMC, nous montrons qu'il existe également des optima morphologiques d'IMC différents selon les distances et des intervalles favorables à la performance autour de ces derniers (études 4-5-6). Ces indicateurs sont essentiels et doivent être couplés avec les études d'optima temporel (pic de performance selon l'âge) (138,139) ou environnementaux (pic de température et optima) (146) afin de mieux comprendre la réalisation sportive et ses améliorations encore possibles.

Non seulement un intervalle étroit d'IMC autour de l'optimum est mis en évidence pour chaque événement, mais des différences « d'organisation corporelle » sont aussi mises à jour selon les distances. L'analyse de l'ensemble des meilleurs athlètes mondiaux apporte la démonstration d'un

large éventail de structures corporelles du 100m au 800m. Mais à partir du 1500m et surtout pour le 10 000m et le marathon, les athlètes des niveaux inférieurs restent très centrés autour du même attracteur. L'aspect plus homogène des IMC des fondeurs pourrait s'expliquer par les contraintes beaucoup plus fortes lors des courses longues, phénomène accentué par les entraînements et la sélection.

Ces optima et intervalles de performance sont à concevoir comme une expression des besoins de puissance et capacités énergétiques selon les différentes courses, évaluées ici par l'IMC, marqueur intermédiaire de l'énergie embarquée. L'IMC est alors un vecteur à travers lequel se révèle l'optimum énergétique selon la contrainte de course.

L'IMC des SHN fournit un rapport tout autre qu'en population générale. Il octroie une représentation de la **structure corporelle efficiente** en vue d'une performance, il est davantage le reflet d'une organisation morphologique optimale et ne doit aucunement être lu sous le prisme des classes connues d'IMC, mais comme une approche de l'énergie embarquée et de la puissance qui peut être développée. Loin de l'appréhension de la masse grasse en population générale, et bien que les liens soient à vérifier à l'aide d'instruments perfectionnés et rares d'imagerie tissulaire, l'IMC est probablement plus proche de la masse maigre chez les SHN. L'IMC est plus intéressant dans une approche globale du corps puisque le corps est l'expression de la performance et pas seulement de la masse maigre.

Si le déplacement pour un sprinteur ou un fondeur dépend bien entendu des possibilités que lui confère sa masse maigre, il doit déplacer son corps entier et l'IMC est un bon révélateur de ce compromis. L'IMC des SHN, mesuré aisément à partir de deux critères primaires (taille et poids) accorde une valeur simplifiée de l'énergie embarquée et des quantités musculaires relatives.

#### 11.4. 4<sup>ème</sup> niveau de démonstration : pertinence des indicateurs

Des liens forts entre caractéristiques anthropométriques et performance de haut niveau sont révélés à travers les études de cette thèse. La puissance de ces liens dans toutes les strates soulignent l'intérêt d'indicateurs biométriques simples.

En effet, poids, taille et IMC sont des marqueurs pertinents qui mettent **en évidence des évolutions différenciées** chez les SHN par rapport à la population générale, laissant présager que les SHN tirent des bénéfices de ces caractéristiques anthropométriques. Des fonctions exponentielles par série modélisent les évolutions de poids et de taille des sportifs américains (NBA, NFL, NHL et MLB), de manière identique à celles des records du monde ; leurs asymptotes soulignent d'autres similitudes et suggèrent d'autres perspectives à partir de tels marqueurs.

Des **asynchronismes de progression** sont également révélés en comparant les différences entre ces évolutions biométriques prises 2 à 2 (taille vs. poids). Ces progressions surprenantes engendrent des questions quant aux comportements qui ont permis ces augmentations de poids entre 1980 et 1990 ; dans ce cas, ces asynchronismes pourraient servir de **marqueurs d'atypicité**.

Des **différenciations et émergences de postes** dans plusieurs sports étudiés sont distinguables par le poids, apportant un autre degré de pertinence à cet indicateur.

Un autre point est dévoilé avec les **optimisations morphologiques** de taille en basket-ball. Des attracteurs taille pour l'efficacité au tir, entourés d'un intervalle réduit favorable à la performance, ainsi que la notion d'attracteur spécifique (tir, rebond, passe ...) ont été exposés et soulignent des maximisations multidimensionnelles construites.

Des **gradients morphologiques** d'IMC, comme les gradients énergétiques, respectent la continuité du spectre des distances. Parmi les athlètes masculins, la vitesse de course est organisée autour de gradients biométriques, qui induisent, et sont induits par, l'optimisation de la performance.

L'analyse du poids et de la taille des athlètes met en exergue des **gradients morphologiques de performance**. En effet, entre sprints et courses de fond, des organisations non aléatoires différentes sont démontrées. Poids et taille révèlent des organisations particulières et apportent une finesse nouvelle d'analyse.

Ainsi cette thèse montre que les paramètres biométriques sont ordonnancés selon une auto-organisation cohérente, allant du sprint aux courses de fond. Des **intervalles morphologiques optimaux** de performance émergent selon une base structurelle spécialisée couvrant le continuum des distances en athlétisme, chez les hommes comme chez les femmes.

De plus, l'IMC permet d'observer des différences d'organisation corporelle selon les distances. Sur le sprint, des marges de manœuvre semblent permises, alors que l'ensemble des athlètes des courses de fond, même ceux de moindre niveau, sont assujettis à une centration morphologique beaucoup plus étroite autour de l'optimum, reflétant les contraintes fortes exercées sur les corps des fondeurs.

Les indicateurs de poids et de taille sont utiles dans une autre mesure, puisqu'ils permettent la mise en évidence d'organisations par niveau, différentes entre hommes et femmes. Ils offrent un éclairage nouveau dans la **compréhension des différences** hommes femmes : une lecture morphologique du *gender gap* en quelque sorte.

Ces marqueurs biométriques ont permis d'observer des similitudes entre hommes et femmes mais leur utilité est entérinée par l'organisation différente observée chez les athlètes féminines. Ces différences par niveau, ne présentant pas la même structure par gradients chez les femmes et, si elles s'avèrent modifiables, pourraient exposer une direction nouvelle en vue d'optimisations morphologiques.

De plus, la compréhension des différences hommes / femmes est abordée par le prisme morphologique. Les coefficients allométriques apportent ainsi une autre lecture et **mettent en exergue de potentielles optimisations féminines**, dans le sens où vitesse et poids sont toujours reliés mais avec des coefficients plus faibles chez les femmes. Ici un degré de pertinence supérieur est abordé avec la proposition **de marges de progression**.

La force de ces indicateurs repose aussi sur le fait qu'ils offrent des relations à partir de performances individuelles chiffrées et chronométrées comme sur des interactions plus complexes

de sports collectifs induisant effort commun, travail d'équipe, techniques particulières et tactiques communes.

Les morphologies n'affectent pas seulement la performance, elles sont à l'origine de standards construits, travaillés et optimisés ainsi que des seuils de sélection. À la base de la réalisation motrice, elles sont à la fois performance et premier vecteur de performance.

### **11.5. Intérêts et apports de la thèse**

Cette thèse couvre un large champ anthropométrique du sport de haut niveau. À travers une approche épidémiologique, l'analyse d'un très grand nombre de performances et de sujets indique le sens des évolutions récentes et la puissance des liens et des impacts morphologiques. De plus, la richesse des bases de données tient aussi de leur **exhaustivité**. Lorsque nous étudions les relations entre poids, taille et performance en rugby, la base de données construite regroupe tous les rugbymen ayant participé à l'ensemble des Coupes du Monde de 1987 à 2011. De même lorsque nous comparons les évolutions des joueurs des quatre grands sports américains, nous colligeons les données de tous ces sportifs ayant réalisé au moins une saison en NFL, NHL, NBA ou MLB depuis les débuts respectifs de chaque sport et ce jusqu'en 2011. De manière identique, pour comprendre les liens entre vitesse, poids, taille et IMC, nous construisons les bases de données des 100 meilleurs athlètes, hommes et femmes, depuis seize ans.

Par contre, l'étude de ces données rétrospectives ne doit pas être tirée en l'état vers des conclusions prospectives dans un but de sélection ou de standard à atteindre ; mais elles permettent de fixer le paysage morphologique du très haut niveau.

**Des intérêts nouveaux** pourraient voir la mise en place d'outils complémentaires pour les sélections ou l'entraînement mais aussi afin de situer les athlètes et de proposer des marges de progressions adaptées à leur potentiel. En effet, la quantification des gabarits des meilleurs athlètes mondiaux est un point de référence dans la relation entre structure corporelle et performance.

L'examen des caractéristiques anthropométriques des SHN peut aider les entraîneurs, sportifs, préparateurs physiques et scientifiques dans la compréhension de la performance. L'identification d'éléments contributifs à la performance est essentielle. Cette dernière peut être utilisée dans la conception d'entraînements et d'optimisations spécifiques par poste dans le but d'améliorer des caractéristiques plastiques du phénotype tel que le poids. Cet examen fournit de réelles preuves scientifiques de l'influence du gabarit sur les performances afin d'octroyer aux entraîneurs et sportifs des éléments pour enrichir sélections et entraînements, mais aussi dans le but de situer les athlètes dans leur « contexte morphologique ».

Un intérêt autre a été mis en exergue, puisque les évolutions comparées de paramètres anthropométriques peuvent être des outils de détection d'asynchronisme et donc des **marqueurs d'atypicité**.

En révélant des organisations différentes, les indicateurs morphologiques **offrent une ouverture sur de nouvelles marges de progression potentielle**.

Ces constats sont une étape dans la compréhension de l'influence de la morphologie sur la performance. Ils suscitent des questionnements qui vont aboutir à la mise en place de protocoles de recherche dans l'optique de déchiffrer encore plus clairement des relations non connues qui sous-tendraient les observations épidémiologiques. Un premier portera sur l'impact du poids et de la prise de masse sur l'accélération en sprint, mais aussi sur l'atteinte de la  $V_{max}$  et son maintien. Quels impacts sur la sortie des *starting-blocks*, l'atteinte de la  $V_{max}$  et son maintien, ont la prise de masse dans les membres inférieurs et la prise de force qui en découle ? Quelles différences sur le départ, l'atteinte de la  $V_{max}$  et son maintien, sont conférées selon que les sprinteurs soient plus ou moins grands ?

Les optimisations révélées par l'IMC questionnent les relations entre cet indicateur et les masses maigre ou grasse chez les SHN. Un protocole de mesure, par imagerie tissulaire, d'abaques de SHN apporterait des preuves directes des relations entre IMC et rapport de ces différentes masses en fonction des sports.

## 12. Conclusion générale

Cette thèse, par l'exhaustivité de bases de données conséquentes, apporte différents niveaux de preuves structurant les liens entre caractéristiques anthropométriques et performance de haut niveau. Que les performances soient chronométriques et aisément quantifiables ou collectives et plus difficilement mesurables, l'analyse des caractéristiques morphologiques (telles que poids, taille ou IMC) permet la mise en évidence de leurs liens forts avec la performance. Les différentes études réalisées apportent une compréhension de la performance de haut niveau par son versant morphologique.

Dans la révélation de ces liens, cette thèse s'appuie sur des évolutions différenciées entre SHN et croissance en population générale, mais aussi sur des liens directs structurant performance et caractéristiques anthropométriques.

Le poids, la taille et l'IMC sont pertinents puisqu'ils permettent de différencier les athlètes entre les différentes épreuves (selon les distances et leurs contraintes) mais également selon leur niveau, tout en révélant des optimisations et intervalles favorables à la performance. De plus, ces indicateurs offrent aux entraîneurs et aux sportifs la possibilité de se situer morphologiquement vis à vis des meilleurs et d'orienter sélection, entraînement et préparation physique en conséquence.

Ces indicateurs morphologiques apportent différents niveaux de démonstration des liens structurels qui les unissent à la performance de haut niveau. Ils dévoilent non seulement des similitudes mais aussi des différences d'organisation et mettent en exergue des marges de progression.

Le gabarit et ses caractéristiques morphologiques jouent un rôle essentiel dans l'atteinte de la meilleure performance. Cette thèse met en avant un couple [morphologie optimale - performance optimale]. L'importance relative des caractéristiques anthropométriques vis à vis des autres éléments de la performance reste à définir clairement dans beaucoup de sports. Mais contrairement à la taille, le poids est une caractéristique plastique qui peut être modulable par la nutrition et les entraînements.

Les morphologies adaptées, mises en évidence à travers ces études, sont la résultante de contraintes physiologiques, physiques et biomécaniques, qui, avec le temps, ont généré des gabarits optimisés, par phénomènes cycliques et successifs de sélection, entraînement et compétition.

L'IMC apparaît comme un indicateur utile de la performance de très haut niveau. Il est révélateur de compromis entre puissance, capacité énergétique et organisation de la structure corporelle efficiente. Lors de l'exécution sportive, la totalité du corps est en action et l'IMC est un indicateur prenant en compte la globalité de l'athlète qui se meut : il permet une approche globale du corps en mouvement.

Les gabarits sont l'expression de la performance autant que l'organisation à partir de laquelle se réalise la performance. Sans eux la performance ne pourrait se réaliser. Par conséquent, la succession de sélection, construction et entraînement aboutit à des optimisations qu'il est nécessaire de connaître afin de situer les athlètes dans leurs champs morphologiques mais aussi de leur permettre d'évoluer vers la meilleure adaptation anthropométrique spécifique de leurs activités et donc de leur offrir potentiellement de nouvelles marges de progression.

## 13. Bibliographie

1. Merleau-Ponty M. *Phénoménologie de la perception*. [Paris]: Gallimard; 1976.
2. Queval I. *Le corps aujourd'hui*. Paris: Gallimard; 2008.
3. Pichery B, Serres M. *Regards sur le sport*. Paris: Ed. Le Pommier; 2010.
4. Mauss M. Les techniques du corps. *Journal de psychologie*. 1934;32(3-4):365–86.
5. El Helou N. 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 de Doctorat]. IRMES: Paris Descartes; 2011.
6. Speed CA, Ingham SA. Research in high-performance sports medicine: from the bench, to the bedside...to the podium. *Br J Sports Med*. 2011;45(8):608–610.
7. Speed C, Jaques R. High-performance sports medicine: an ancient but evolving field. *Br J Sports Med*. 2011;45(2):81–83.
8. Vandervael F. *Biométrie humaine*. Masson et Cie Paris. 1946.
9. Telkkä A, Pere S, Kunnas M. Anthropometric studies of Finnish athletes and wrestlers. *Ann. Acad. Sci. Fennic*. 1951;28:1–34.
10. Cureton TK. *Physical fitness of champion athletes*. Univ. of Illinois Press; 1951 452 p.
11. Parnell RW. Some Notes on Physique and Athletic Training. *BMJ*. 1951;1(4718):1292–1295.
12. Norton K, Olds T. Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med*. 2001;31(11):763–783.
13. Floud R, Fogel RW, Harris B, et al. *The Changing Body: Health, Nutrition, and Human Development in the Western World since 1700*. Cambridge University Press; 2011 456 p.
14. Hatton TJ. How have Europeans grown so tall? *Oxf. Econ. Pap*. 2013;:gpt030.
15. Berg K, Bell CW. Physiological and anthropometric determinants of mile run time. *J Sports Med Phys Fitness*. 1980;20(4):390–396.
16. Tanaka K, Matsuura Y. A multivariate analysis of the role of certain anthropometric and physiological attributes in distance running. *Ann. Hum. Biol*. 1982;9(5):473–482.
17. De Saint Pol T. Comment mesurer la corpulence et le poids "idéal"? Histoire, intérêts et limites de l'indice de masse corporelle. 2007;

18. Keys A, Fidanza F, Karvonen MJ, et al. Indices of relative weight and obesity. *J Chronic Dis.* 1972;25(6):329–343.
19. Royal College of Physicians. Obesity. A report of the Royal College of Physicians. *Journal of the Royal College of Physicians of London.* 1983;17:5–64.
20. National Institute of Health. Health implications of obesity. National Institutes of Health Consensus Development Conference Statement. *Ann. Intern. Med.* 1985;103(6 ( Pt 2)):1073–1077.
21. Organisation Mondiale de la Santé. The Asia-Pacific Perspective: Redefining Obesity and its Treatment. Melbourne: International Association for the Study of Obesity and International Obesity Task Force; 2000.
22. Pineau J-C. Signification et interprétation biologique de l'indice de corpulence BMI (Body Mass Index). *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie.* 1992;315(11):409–414.
23. Plomin R, Haworth CMA, Davis OSP. Common disorders are quantitative traits. *Nat. Rev. Genet.* 2009;10(12):872–878.
24. Hawes MR, Sovak D. Morphological prototypes, assessment and change in elite athletes. *J Sports Sci.* 1994;12(3):235–242.
25. Clarke DH, Eckert HM. Limits of human performance. Published by Human Kinetics Publishers, Inc. for the American Academy of Physical Education; 1985 328 p.
26. Thompson DW. On Growth and Form. Cambridge University Press; 1966 376 p.
27. Ostin M, Beunen G, Simons J. Kinanthropometry II. University Park Press; 1980 518 p.
28. Tsang B, Chan CK, Taylor G. Kinanthropometry study of the physique of disciplined personnel. *International Journal of Clothing Science and Technology.* 2000;12(2):144–160.
29. Ulijaszek SJ, Johnston FE, Preece MA. The Cambridge Encyclopedia of Human Growth and Development. Cambridge University Press; 1998 520 p.
30. Pagel MD. Encyclopedia of evolution. 1. [Overview essays, Acan - hybr]. Oxford University Press, Incorporated; 2002 1205 p.
31. Schmidt-Nielsen K. Scaling: Why is Animal Size so Important? Cambridge University Press; 1984 260 p.
32. Alroy J. Cope's rule and the dynamics of body mass evolution in North American fossil mammals. *Science.* 1998;280(5364):731–734.
33. MacFadden BJ. Fossil Horses: Systematics, Paleobiology, and Evolution of the Family Equidae. Cambridge University Press; 1994 388 p.

34. Kingsolver JG, Pfennig DW, Phillips P. Individual-level selection as a cause of Cope's Rule of phyletic size increase. *Evolution*. 2004;58(7):1608–1612.
35. Hone DWE, Benton MJ. The evolution of large size: how does Cope's Rule work? *Trends in Ecology & Evolution*. 2005;20(1):4–6.
36. Kunitz SJ. Making a long story short: a note on men's height and mortality in England from the first through the nineteenth centuries. *Med Hist*. 1987;31(3):269–280.
37. Floud R, Wachter KW, Gregory A. Height, Health and History: Nutritional Status in the United Kingdom, 1750-1980. Cambridge University Press; 1990 381 p.
38. Fogel RW. Economic Growth, Population Theory, and Physiology: The Bearing of Long-Term Processes on the Making of Economic Policy. National Bureau of Economic Research; 1994 (Accessed November 11, 2012).(http://www.nber.org/papers/w4638). (Accessed November 11, 2012)
39. Steckel RH, Floud R. Health and Welfare during Industrialization. University of Chicago Press; 1997 478 p.
40. Komlos J, Baur M. From the tallest to (one of) the fattest: the enigmatic fate of the American population in the 20th century. *Economics & Human Biology*. 2004;2(1):57–74.
41. Karpinos B. Current height and weight of youths of military age. *Hum. Biol*. 1961;33:335– 354.
42. Sunder M. The making of giants in a welfare state: the Norwegian experience in the 20th century. *Econ Hum Biol*. 2003;1(2):267–276.
43. Samaras TT, Elrick H. Height, body size and longevity. *Acta Med. Okayama*. 1999;53(4):149–169.
44. Meredith HV. Stature and weight of private school children in two successive decades. *American Journal of Physical Anthropology*. 1941;28(1):1–40.
45. Palmer CE. Temporal cycles of growth. 1933.
46. Boas F. Anthropology and Modern Life. Courier Dover Publications; 1932 276 p.
47. Tanner JM. Growth at adolescence. C. C. Thomas; 1955 258 p.
48. Tanner JM. Earlier maturation in man. *Sci. Am*. 1968;218(1):21–27.
49. Malina RM. Comparison of the increase in body size between 1899 and 1970 in a specially selected group with that in the general population. *Am. J. Phys. Anthropol*. 1972;37(1):135–141.
50. Meredith HV. Finding from Asia, Australia, Europe, and North America on secular change in mean height of children, youths, and young adults. *Am. J. Phys. Anthropol*. 1976;44(2):315–325.

51. Samaras TT, Bartke A, Rollo CD. Human Body Size and the Laws of Scaling: Physiological, Performance, Growth, Longevity and Ecological Ramifications. Nova Publishers; 2007 396 p.
52. Kuczmarski RJ, Flegal KM, Campbell SM, et al. Increasing prevalence of overweight among US adults. The National Health and Nutrition Examination Surveys, 1960 to 1991. *JAMA*. 1994;272(3):205–211.
53. Samaras TT, Storms LH. Secular growth and its harmful ramifications. *Med. Hypotheses*. 2002;58(2):93–112.
54. Bergmann RL, Richter R, Bergmann KE, et al. Secular trends in neonatal macrosomia in Berlin: influences of potential determinants. *Paediatr Perinat Epidemiol*. 2003;17(3):244–249.
55. Chike-Obi U, David RJ, Coutinho R, et al. Birth weight has increased over a generation. *Am. J. Epidemiol*. 1996;144(6):563–569.
56. Tuvemo T, Cnattingius S, Jonsson B. Prediction of male adult stature using anthropometric data at birth: a nationwide population-based study. *Pediatr. Res*. 1999;46(5):491–495.
57. Pheasant S, Haslegrave CM. Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics, And The Design Of Work. Taylor & Francis; 2006 360 p.
58. Finucane MM, Stevens GA, Cowan MJ, et al. National, regional, and global trends in body-mass index since 1980: systematic analysis of health examination surveys and epidemiological studies with 960 country-years and 9.1 million participants. *Lancet*. 2011;377(9765):557–567.
59. Ogden CL, Fryar CD, Carroll MD, et al. Mean body weight, height, and body mass index, United States 1960–2002. *Advance Data*. 2004;(347):1–17.
60. Ogden CL, Carroll MD, Kit BK, et al. Prevalence of Obesity in the United States, 2009–2010. *NCHS Data Brief*. 2012;82.
61. Flegal KM, Carroll MD, Ogden CL, et al. Prevalence and trends in obesity among US adults, 1999–2000. *JAMA*. 2002;288(14):1723–1727.
62. Flegal KM, Carroll MD, Ogden CL, et al. Prevalence and trends in obesity among US adults, 1999–2008. *JAMA*. 2010;303(3):235–241.
63. Gulliford MC, Rona RJ, Chinn S. Trends in body mass index in young adults in England and Scotland from 1973 to 1988. *J Epidemiol Community Health*. 1992;46(3):187–190.
64. Berghöfer A, Pischon T, Reinhold T, et al. Obesity prevalence from a European perspective: a systematic review. *BMC Public Health*. 2008;8:200.
65. Khosla T, Lowe CR. Height and weight of British men. *Lancet*. 1968;1(7545):742–745.
66. Walpole SC, Prieto-Merino D, Edwards P, et al. The weight of nations: an estimation of adult human biomass. *BMC Public Health*. 2012;12(1):439.

67. Elrick H, Samaras TT, Demas A. Missing links in the obesity epidemic. *Nutrition Research*. 2002;22(10):1101–1123.
68. Samaras T, Elrick H. An alternative hypothesis to the obesity epidemic: obesity is due to increased maternal body size, birth size, growth rate, and height. *Med. Hypotheses*. 2005;65(4):676–682.
69. Samaras TT, Elrick H, Storms LH. Birthweight, rapid growth, cancer, and longevity: a review. *J Natl Med Assoc*. 2003;95(12):1170–1183.
70. Peters RH. *The Ecological Implications of Body Size*. Cambridge University Press; 1986 348 p.
71. West GB, Brown JH, Enquist BJ. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*. 1997;276(5309):122–126.
72. West GB, Brown JH, Enquist BJ. The fourth dimension of life: fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science*. 1999;284(5420):1677–1679.
73. Swain DP. The influence of body mass in endurance bicycling. *Med Sci Sports Exerc*. 1994;26(1):58–63.
74. Chu NS. Motor evoked potentials with magnetic stimulation: correlations with height. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1989;74(6):481–485.
75. Reilly T, Bangsbo J, Franks A. Anthropometric and physiological predispositions for elite soccer. *Journal of Sports Sciences*. 2000;18(9):669–683.
76. Engeland A, Bjørge T, Selmer RM, et al. Height and body mass index in relation to total mortality. *Epidemiology*. 2003;14(3):293–299.
77. Waaler HT. Height, weight and mortality. The Norwegian experience. *Acta Med. Scand. Suppl*. 1984;679:1–56.
78. Davey Smith G, Hart C, Upton M, et al. Height and risk of death among men and women: aetiological implications of associations with cardiorespiratory disease and cancer mortality. *J Epidemiol Community Health*. 2000;54(2):97–103.
79. Wannamethee SG, Shaper AG, Whincup PH, et al. Adult height, stroke, and coronary heart disease. *Am. J. Epidemiol*. 1998;148(11):1069–1076.
80. Wannamethee SG, Shaper AG, Whincup PH, et al. Migration within Great Britain and cardiovascular disease: early life and adult environmental factors. *Int J Epidemiol*. 2002;31(5):1054–1060.
81. Wild SH, Laws A, Fortmann SP, et al. Mortality from coronary heart disease and stroke for six ethnic groups in California, 1985 to 1990. *Ann Epidemiol*. 1995;5(6):432–439.
82. Van Heemst D, Beekman M, Mooijaart SP, et al. Reduced insulin/IGF-1 signalling and human longevity. *Aging Cell*. 2005;4(2):79–85.

83. Shepherd A. Evolutionary demography. Annual conference: British Society for Population Studies, Department of Social Policy. 2005;(http://www2.lse.ac.uk/socialPolicy/BSPS/annualConference/2005/2005\_evolutionaryabstracts.aspx#DynamicJumpMenuManager\_1\_Anchor\_7). (Accessed December 4, 2012)
84. Hosegood V, Campbell OMR. Body mass index, height, weight, arm circumference, and mortality in rural Bangladeshi women: a 19-y longitudinal study. *Am. J. Clin. Nutr.* 2003;77(2):341–347.
85. Gunnell D, Okasha M, Smith GD, et al. Height, leg length, and cancer risk: a systematic review. *Epidemiol Rev.* 2001;23(2):313–342.
86. McCullough ML, Feigelson HS, Diver WR, et al. Risk factors for fatal breast cancer in African-American women and White women in a large US prospective cohort. *Am. J. Epidemiol.* 2005;162(8):734–742.
87. Lahmann PH, Hoffmann K, Allen N, et al. Body size and breast cancer risk: findings from the European Prospective Investigation into Cancer And Nutrition (EPIC). *Int. J. Cancer.* 2004;111(5):762–771.
88. Weiderpass E, Braaten T, Magnusson C, et al. A prospective study of body size in different periods of life and risk of premenopausal breast cancer. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev.* 2004;13(7):1121–1127.
89. Michaud DS, Giovannucci E, Willett WC, et al. Physical activity, obesity, height, and the risk of pancreatic cancer. *JAMA.* 2001;286(8):921–929.
90. Tamakoshi K, Wakai K, Kojima M, et al. A prospective study of body size and colon cancer mortality in Japan: The JACC Study. *Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord.* 2004;28(4):551–558.
91. Bjørge T, Tretli S, Engeland A. Relation of height and body mass index to renal cell carcinoma in two million Norwegian men and women. *Am. J. Epidemiol.* 2004;160(12):1168–1176.
92. Engeland A, Tretli S, Bjørge T. Height, body mass index, and prostate cancer: a follow-up of 950000 Norwegian men. *Br. J. Cancer.* 2003;89(7):1237–1242.
93. Schouten LJ, Goldbohm RA, van den Brandt PA. Height, weight, weight change, and ovarian cancer risk in the Netherlands cohort study on diet and cancer. *Am. J. Epidemiol.* 2003;157(5):424–433.
94. Engeland A, Tretli S, Bjørge T. Height, body mass index, and ovarian cancer: a follow-up of 1.1 million Norwegian women. *J. Natl. Cancer Inst.* 2003;95(16):1244–1248.
95. Giovannucci E, Rimm EB, Liu Y, et al. Height, predictors of C-peptide and cancer risk in men. *Int J Epidemiol.* 2004;33(1):217–225.
96. Song Y-M, Smith GD, Sung J. Adult height and cause-specific mortality: a large prospective study of South Korean men. *Am. J. Epidemiol.* 2003;158(5):479–485.

97. Morris RW, Whincup PH, Emberson JR, et al. North-south gradients in Britain for stroke and CHD: are they explained by the same factors? *Stroke*. 2003;34(11):2604–2609.
98. McCarron P, Okasha M, McEwen J, et al. Height in young adulthood and risk of death from cardiorespiratory disease: a prospective study of male former students of Glasgow University, Scotland. *Am. J. Epidemiol.* 2002;155(8):683–687.
99. Langenberg C, Shipley MJ, Batty GD, et al. Adult socioeconomic position and the association between height and coronary heart disease mortality: findings from 33 years of follow-up in the Whitehall Study. *Am J Public Health*. 2005;95(4):628–632.
100. Forsén T, Eriksson J, Qiao Q, et al. Short stature and coronary heart disease: a 35-year follow-up of the Finnish cohorts of The Seven Countries Study. *J. Intern. Med.* 2000;248(4):326–332.
101. Keys A, Menotti A, Aravanis C, et al. The seven countries study: 2,289 deaths in 15 years. *Prev Med*. 1984;13(2):141–154.
102. Taylor HL, Blackburn H, Keys A, et al. Coronary heart disease in seven countries. IV. Five-year follow-up of employees of selected U.S. railroad companies. *Circulation*. 1970;41(4 Suppl):120–39.
103. Aravanis C, Corcondilas A, Dontas AS, et al. Coronary heart disease in seven countries. IX. The Greek islands of Crete and Corfu. *Circulation*. 1970;41(4 Suppl):188–100.
104. Buzina R, Keys A, Mohacek I, et al. Coronary heart disease in seven countries. V. Five-year follow-up in Dalmatia and Slavonia. *Circulation*. 1970;41(4 Suppl):140–51.
105. Fidanza F, Puddu V, Imbimbo AB, et al. Coronary heart disease in seven countries. VII. Five-year experience in rural Italy. *Circulation*. 1970;41(4 Suppl):163–75.
106. Evans AE, Ruidavets JB, McCrum EE, et al. Autres pays, autres coeurs? Dietary patterns, risk factors and ischaemic heart disease in Belfast and Toulouse. *QJM*. 1995;88(7):469–477.
107. Samaras TT, Elrick H, Storms LH. Is short height really a risk factor for coronary heart disease and stroke mortality? A review. *Med. Sci. Monit*. 2004;10(4):RA63–76.
108. Samaras TT, Elrick H, Storms LH. Is height related to longevity? *Life Sci*. 2003;72(16):1781–1802.
109. Parker DR, Lapane KL, Lasater TM, et al. Short stature and cardiovascular disease among men and women from two southeastern New England communities. *Int J Epidemiol*. 1998;27(6):970–975.
110. Rosenberg CR, Shore RE, Pasternack BS. Height and mortality after myocardial infarction. *J Community Health*. 1995;20(4):335–343.
111. Samaras TT, Storms LH, Elrick H. Longevity, mortality and body weight. *Ageing Res. Rev*. 2002;1(4):673–691.

112. Simopoulos AP, Van Itallie TB. Body weight, health, and longevity. *Ann. Intern. Med.* 1984;100(2):285–295.
113. Pi-Sunyer FX. The obesity epidemic: pathophysiology and consequences of obesity. *Obes. Res.* 2002;10 Suppl 2:97S–104S.
114. Stein CJ, Colditz GA. The epidemic of obesity. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2004;89(6):2522–2525.
115. Valdes AM, Andrew T, Gardner JP, et al. Obesity, cigarette smoking, and telomere length in women. *Lancet.* 2005;366(9486):662–664.
116. Anderson JW, Kendall CWC, Jenkins DJA. Importance of weight management in type 2 diabetes: review with meta-analysis of clinical studies. *J Am Coll Nutr.* 2003;22(5):331–339.
117. Zheng W, McLerran DF, Rolland B, et al. Association between body-mass index and risk of death in more than 1 million Asians. *N. Engl. J. Med.* 2011;364(8):719–729.
118. Ding EL, Malik VS. Convergence of obesity and high glycemic diet on compounding diabetes and cardiovascular risks in modernizing China: an emerging public health dilemma. *Global Health.* 2008;4:4.
119. Abelson P, Kennedy D. The obesity epidemic. *Science.* 2004;304(5676):1413.
120. WHO Expert Consultation. Appropriate body-mass index for Asian populations and its implications for policy and intervention strategies. *Lancet.* 2004;363(9403):157–163.
121. Van Gaal LF, Mertens IL, De Block CE. Mechanisms linking obesity with cardiovascular disease. *Nature.* 2006;444(7121):875–880.
122. Nagaya T, Yoshida H, Takahashi H, et al. Increases in body mass index, even within non-obese levels, raise the risk for Type 2 diabetes mellitus: a follow-up study in a Japanese population. *Diabet. Med.* 2005;22(8):1107–1111.
123. Mendall MA, Strachan DP, Butland BK, et al. C-reactive protein: relation to total mortality, cardiovascular mortality and cardiovascular risk factors in men. *Eur. Heart J.* 2000;21(19):1584–1590.
124. Glowinska B, Urban M, Koput A, et al. New atherosclerosis risk factors in obese, hypertensive and diabetic children and adolescents. *Atherosclerosis.* 2003;167(2):275–286.
125. Jones DW, Kim JS, Andrew ME, et al. Body mass index and blood pressure in Korean men and women: the Korean National Blood Pressure Survey. *J. Hypertens.* 1994;12(12):1433–1437.
126. Emberson J, Whincup PH, Morris RW, et al. Lifestyle and cardiovascular disease in middle-aged British men: the effect of adjusting for within-person variation. *Eur. Heart J.* 2005;26(17):1774–1782.

127. Shaper AG, Wannamethee SG, Walker M. Body weight: implications for the prevention of coronary heart disease, stroke, and diabetes mellitus in a cohort study of middle aged men. *BMJ*. 1997;314(7090):1311–1317.
128. Baron S. NIOSH study refutes myth of early death. *The New Audible*. 1994;17:1–2.
129. Dumitrescu RG, Cotarla I. Understanding breast cancer risk -- where do we stand in 2005? *J. Cell. Mol. Med*. 2005;9(1):208–221.
130. Calle EE, Rodriguez C, Walker-Thurmond K, et al. Overweight, obesity, and mortality from cancer in a prospectively studied cohort of U.S. adults. *N. Engl. J. Med*. 2003;348(17):1625–1638.
131. Flegal KM, Graubard BI, Williamson DF, et al. Excess deaths associated with underweight, overweight, and obesity. *JAMA*. 2005;293(15):1861–1867.
132. Calle EE, Thun MJ, Petrelli JM, et al. Body-mass index and mortality in a prospective cohort of U.S. adults. *N. Engl. J. Med*. 1999;341(15):1097–1105.
133. Stevens J, Cai J, Pamuk ER, et al. The effect of age on the association between body-mass index and mortality. *N. Engl. J. Med*. 1998;338(1):1–7.
134. Samaras TT, Storms LH. Impact of height and weight on life span. *Bull. World Health Organ*. 1992;70(2):259–267.
135. Fogel RW. *The Escape from Hunger and Premature Death, 1700-2100: Europe, America, and the Third World*. Cambridge University Press; 2004 220 p.
136. Flegal KM, Kit BK, Orpana H, et al. Association of all-cause mortality with overweight and obesity using standard body mass index categories: a systematic review and meta-analysis. *JAMA*. 2013;309(1):71–82.
137. Hughes V. The big fat truth. *Nature*. 2013;497(7450):428–430.
138. Berthelot G, Len S, Hellard P, et al. Exponential growth combined with exponential decline explains lifetime performance evolution in individual and human species. *Age (Dordr)* [electronic article]. 2011;(http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21695422). (Accessed February 1, 2012)
139. Guillaume M, Len S, Tafflet M, et al. Success and decline: top 10 tennis players follow a biphasic course. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(11):2148–2154.
140. Moore DH 2nd. A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature*. 1975;253(5489):264–265.
141. Mitchell WK, Williams J, Atherton P, et al. Sarcopenia, dynapenia, and the impact of advancing age on human skeletal muscle size and strength; a quantitative review. *Front Physiol*. 2012;3:260.

142. Stanojevic S, Wade A, Stocks J, et al. Reference ranges for spirometry across all ages: a new approach. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2008;177(3):253–260.
143. Aguilaniu B, Maitre J, Glénet S, et al. European reference equations for CO and NO lung transfer. *Eur. Respir. J.* 2008;31(5):1091–1097.
144. Park DC, Reuter-Lorenz P. The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding. *Annu Rev Psychol.* 2009;60:173–196.
145. Kühnert B, Nieschlag E. Reproductive functions of the ageing male. *Hum. Reprod. Update.* 2004;10(4):327–339.
146. El Helou N, Tafflet M, Berthelot G, et al. Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS ONE.* 2012;7(5):e37407.
147. Besancenot J-P. La mortalité selon le contexte thermique. *Réalité présente et scénarios pour le XXIème siècle. Le cas de la France. GICC, Paris.* 2003;:1–54.
148. Wilmore JH, Haskell WL. Body composition and endurance capacity of professional football players. *J Appl Physiol.* 1972;33(5):564–567.
149. Diwakar Lal Amatya. Kinanthropometric studies of selected track and field athletes of Nepal. SPORTS AUTHORITY OF INDIA NETAJI SUBHASH NATIONAL INSTITUTE OF SPORTS PATIALA; 1994.
150. Communications to kinanthropometry IV conference. *Journal of Sports Sciences.* 1990;8(2):159–194.
151. Mikulic P. Anthropometric and Metabolic Determinants of 6,000-m Rowing Ergometer Performance in Internationally Competitive Rowers. *Journal of Strength and Conditioning Research.* 2009;23(6):1851–1857.
152. Bourgois J, Claessens AL, Vrijens J, et al. Anthropometric characteristics of elite male junior rowers. *Br J Sports Med.* 2000;34(3):213–216.
153. Bourgois J, Claessens AL, Janssens M, et al. Anthropometric characteristics of elite female junior rowers. *J Sports Sci.* 2001;19(3):195–202.
154. Shephard RJ. Science and medicine of rowing: A review. *Journal of Sports Sciences.* 1998;16(7):603–620.
155. Claessens AL, Veer FM, Stijnen V, et al. Anthropometric characteristics of outstanding male and female gymnasts. *J Sports Sci.* 1991;9(1):53–74.
156. Fry AC, Ryan AJ, Schwab RJ, et al. Anthropometric characteristics as discriminators of body-building success. *J Sports Sci.* 1991;9(1):23–32.
157. McLean BD, Parker AW. An anthropometric analysis of elite Australian track cyclists. *J Sports Sci.* 1989;7(3):247–255.

158. Marquet L-A, Brown M, Tafflet M, et al. No effect of weight cycling on the post-career BMI of weight class elite athletes. *BMC Public Health*. 2013;13(1):510.
159. Higham DG, Pyne DB, Anson JM, et al. Physiological, anthropometric, and performance characteristics of rugby sevens players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2013;8(1):19–27.
160. Kondrič M, Uljević O, Gabrilo G, et al. General anthropometric and specific physical fitness profile of high-level junior water polo players. *J Hum Kinet*. 2012;32:157–165.
161. Delahunt E, Byrne RB, Doolin RK, et al. Anthropometric profile and body composition of Irish adolescent rugby union players aged 16-18. *J Strength Cond Res*. 2013;
162. Watts PB, Martin DT, Durtschi S. Anthropometric profiles of elite male and female competitive sport rock climbers. *J Sports Sci*. 1993;11(2):113–117.
163. Sánchez-Muñoz C, Sanz D, Zabala M. Anthropometric characteristics, body composition and somatotype of elite junior tennis players. *Br J Sports Med*. 2007;41(11):793–799.
164. Leone M, Lariviere G, Comtois AS. Discriminant analysis of anthropometric and biomotor variables among elite adolescent female athletes in four sports. *J Sports Sci*. 2002;20(6):443–449.
165. Sodhi HS. Kinanthropometry and performance of top ranking Indian basketball players. *Br J Sports Med*. 1980;14(2-3):139–144.
166. Duncan MJ, Woodfield L, al-Nakeeb Y. Anthropometric and physiological characteristics of junior elite volleyball players. *Br J Sports Med*. 2006;40(7):649–651.
167. Tanaka K, Mimura K, Kim HS, et al. Prerequisites in distance running performance of female runners. *Ann Physiol Anthropol*. 1989;8(2):79–87.
168. Malousaris GG, Bergeles NK, Barzouka KG, et al. Somatotype, size and body composition of competitive female volleyball players. *J Sci Med Sport*. 2008;11(3):337–344.
169. Boennec P, Prevot M, Ginet J. Somatotype de sportif de haut niveau: Resultats dans huit disciplines differentes. *Medecine du Sport*. 1980;54:309–318.
170. Tsunawake N, Tahara Y, Moji K, et al. Body Composition and Physical Fitness of Female Volleyball and Basketball Players of the Japan Inter-high School Championship Teams. *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*. 2003;22(4):195–201.
171. Marques MC, van den Tillaar R, Gabbett TJ, et al. Physical fitness qualities of professional volleyball players: determination of positional differences. *J Strength Cond Res*. 2009;23(4):1106–1111.
172. Sheppard JM, Gabbett TJ, Stanganelli L-CR. An analysis of playing positions in elite men's volleyball: considerations for competition demands and physiologic characteristics. *J Strength Cond Res*. 2009;23(6):1858–1866.

173. Bell W, Rhodes G. The Morphological Characteristics of the Association Football Player. *Br J Sports Med.* 1975;9(4):196–200.
174. Meleski BW, Shoup RF, Malina RM. Size, physique, and body composition of competitive female swimmers 11 through 20 years of age. *Hum. Biol.* 1982;54(3):609–625.
175. Tahara Y, Moji K, Tsunawake N, et al. Physique, body composition and maximum oxygen consumption of selected soccer players of Kunimi High School, Nagasaki, Japan. *J Physiol Anthropol.* 2006;25(4):291–297.
176. Hue O, Antoine-Jonville S, Galy O, et al. Anthropometric and physiological characteristics in young afro-Caribbean swimmers. A preliminary study. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;8(3):271–278.
177. Tittel K, Wutscherk H. Sportanthropometrie. 1972.
178. Watson AW. Physical and fitness characteristics of successful Gaelic footballers. *Br J Sports Med.* 1995;29(4):229–231.
179. Dey SK, Khanna GL, Batra M. Morphological and physiological studies on Indian national kabaddi players. *Br J Sports Med.* 1993;27(4):237–242.
180. Maas GD. The physique of athletes. *American Journal of Physical Anthropology.* 1974;45(1):127–128.
181. Silva DAS, Petroski EL, Gaya ACA. Anthropometric and Physical Fitness Differences Among Brazilian Adolescents who Practise Different Team Court Sports. *J Hum Kinet.* 2013;36:77–86.
182. Zapartidis I, Kororos P, Christodoulidis T, et al. Profile of young handball players by playing position and determinants of ball throwing velocity. *Journal of Human Kinetics.* 2011;27(-1):17–30.
183. Wong P-L, Chamari K, Dellal A, et al. Relationship between anthropometric and physiological characteristics in youth soccer players. *J Strength Cond Res.* 2009;23(4):1204–1210.
184. Gravina L, Gil SM, Ruiz F, et al. Anthropometric and physiological differences between first team and reserve soccer players aged 10-14 years at the beginning and end of the season. *J Strength Cond Res.* 2008;22(4):1308–1314.
185. Pineau J-C, Horvath L, Landure P. Etude des aptitudes physiques et morphologiques des handballeurs en fonction de leur poste et de leur niveau. *Cahiers d'anthropologie et biométrie humaine.* 1989;7(1-2):129–147.
186. Barbieri D, Zaccagni L, Cogo A, et al. Body composition and somatotype of experienced mountain climbers. *High Alt. Med. Biol.* 2012;13(1):46–50.
187. Sterkowicz-Przybycień KL, Sterkowicz S, Zarów RT. Somatotype, body composition and proportionality in polish top greco-roman wrestlers. *J Hum Kinet.* 2011;28:141–154.

188. Sterkowicz-Przybycień K. Body composition and somatotype of the elite of Polish fencers. *Coll Antropol.* 2009;33(3):765–772.
189. Vucetić V, Matković BR, Sentija D. Morphological differences of elite Croatian track-and-field athletes. *Coll Antropol.* 2008;32(3):863–868.
190. Bale P, Colley E, Mayhew JL, et al. Anthropometric and somatotype variables related to strength in American football players. *J Sports Med Phys Fitness.* 1994;34(4):383–389.
191. Casagrande G, Viviani F. Somatotype of Italian rugby players. *J Sports Med Phys Fitness.* 1993;33(1):65–69.
192. Viviani F, Calderan M. The somatotype in a group of “top” free-climbers. *J Sports Med Phys Fitness.* 1991;31(4):581–586.
193. Leake CN, Carter JEL. Comparison of body composition and somatotype of trained female triathletes. *Journal of Sports Sciences.* 1991;9(2):125–135.
194. Orvanová E. Somatotypes of weight lifters. *J Sports Sci.* 1990;8(2):119–137.
195. Claessens A, Beunen G, Wellens R, et al. Somatotype and body structure of world top judoists. *J Sports Med Phys Fitness.* 1987;27(1):105–113.
196. Withers RT, Craig NP, Norton KI. Somatotypes of South Australian male athletes. *Hum. Biol.* 1986;58(3):337–356.
197. Carter JE, Sleet DA, Martin GN. Somatotypes of male gymnasts. *J Sports Med Phys Fitness.* 1971;11(3):162–171.
198. Carter JE. The somatotypes of athletes--a review. *Hum. Biol.* 1970;42(4):535–569.
199. Carter JE. Somatotypes of college football players. *Res Q.* 1968;39(3):476–481.
200. Bayios IA, Bergeles NK, Apostolidis NG, et al. Anthropometric, body composition and somatotype differences of Greek elite female basketball, volleyball and handball players. *J Sports Med Phys Fitness.* 2006;46(2):271–280.
201. Gualdi-Russo E, Graziani I. Anthropometric somatotype of Italian sport participants. *J Sports Med Phys Fitness.* 1993;33(3):282–291.
202. Thorland WG, Johnson GO, Fagot TG, et al. Body composition and somatotype characteristics of junior Olympic athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 1981;13(5):332–338.
203. Cavala M, Trninić V, Jasić D, et al. The influence of somatotype components and personality traits on the playing position and the quality of top Croatian female cadet handball players. *Coll Antropol.* 2013;37 Suppl 2:93–100.
204. Vernillo G, Schena F, Berardelli C, et al. Anthropometric characteristics of top-class Kenyan marathon runners. *J Sports Med Phys Fitness.* 2013;53(4):403–408.

205. Carter JEL, Ackland TR, Kerr DA, et al. Somatotype and size of elite female basketball players. *J Sports Sci.* 2005;23(10):1057–1063.
206. Gualdi-Russo E, Zaccagni L. Somatotype, role and performance in elite volleyball players. *J Sports Med Phys Fitness.* 2001;41(2):256–262.
207. Martín-Matillas M, Valadés D, Hernández-Hernández E, et al. Anthropometric, body composition and somatotype characteristics of elite female volleyball players from the highest Spanish league. *J Sports Sci.* 2013;
208. Carter JEL. The Heath-Carter anthropometric somatotype method. *Anthropometrica: A textbook of body measurement for sports and health courses.* 1996;:148–170.
209. Carter JEL, Heath BH. Somatotyping: Development and Applications. Cambridge University Press; 1990 524 p.
210. Tanner JM. The physique of the olympic athlete. *American Journal of Physical Anthropology.* 1964;22(4):494–495.
211. Kawashima K, Kat K, Miyazaki M. Body size and somatotype characteristics of male golfers in Japan. *J Sports Med Phys Fitness.* 2003;43(3):334–341.
212. Giampietro M, Pujia A, Bertini I. Anthropometric features and body composition of young athletes practicing karate at a high and medium competitive level. *Acta Diabetol.* 2003;40 Suppl 1:S145–148.
213. Hopper DM. Somatotype in high performance female netball players may influence player position and the incidence of lower limb and back injuries. *Br J Sports Med.* 1997;31(3):197–199.
214. Monsma DV, Malina RM. Anthropometry and somatotype of competitive female figure skaters 11-22 years. Variation by competitive level and discipline. *J Sports Med Phys Fitness.* 2005;45(4):491–500.
215. Godinho M, Fragoso I, Vieira F. Morphologic and anthropometric characteristics of high level Dutch korfbal players. *Percept Mot Skills.* 1996;82(1):35–42.
216. Toriola AL, Salokun SO, Mathur DN. Somatotype characteristics of male sprinters, basketball, soccer, and field hockey players. *Int J Sports Med.* 1985;6(6):344–346.
217. Doutreloux JP, Bergougnou E, Cayon C, et al. Comparaison de la morphologie des joueurs de rugby en France et dans l'hémisphère sud. *STAPS. Sciences et techniques des activités physiques et sportives.* 2000;(53):19–34.
218. Lango Allen H, Estrada K, Lettre G, et al. Hundreds of variants clustered in genomic loci and biological pathways affect human height. *Nature.* 2010;467(7317):832–838.
219. Jacobson BH. Anthropometric cross-sectional comparisons of college football players and potential health implications. *J Strength Cond Res.* 2012;26(12):3358–3364.

220. Jacobson BH, Cook D, Redus B. Correlation between body mass index and percent body fat of trained body builders. *Percept Mot Skills*. 2003;96(3 Pt 1):931–932.
221. Nevill AM, Winter EM, Ingham S, et al. Adjusting athletes' body mass index to better reflect adiposity in epidemiological research. *J Sports Sci*. 2010;28(9):1009–1016.
222. Watts AS, Coleman I, Nevill A. The changing shape characteristics associated with success in world-class sprinters. *Journal of Sports Sciences* [electronic article]. 2011;(http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21916672). (Accessed December 13, 2011)
223. Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, et al. The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS ONE*. 2008;3(2):e1552.
224. Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, et al. Athlete atypicality on the edge of human achievement: performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS ONE*. 2010;5(1):e8800.
225. Berthelot G, Sedeaud A, Guillaume M, et al. Les records sportifs auront-ils une fin? *Pour la science*. 2012;(422).
226. Nevill AM, Whyte G. Are there limits to running world records? *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37(10):1785–1788.
227. Nevill AM, Whyte GP, Holder RL, et al. Are there limits to swimming world records? *Int J Sports Med*. 2007;28(12):1012–1017.
228. Kohlrausch W. Zusammenhänge von Körperform und Leistung. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1929;2(2):187–204.
229. Hirata K. Age and physique of tokyo olympic champions in the world. See notes; 1966.
230. Carlson BR, Carter JE, Patterson P, et al. Physique and motor performance characteristics of US national rugby players. *J Sports Sci*. 1994;12(4):403–412.
231. Quarrie KL, Handcock P, Waller AE, et al. The New Zealand rugby injury and performance project. III. Anthropometric and physical performance characteristics of players. *Br J Sports Med*. 1995;29(4):263–270.
232. Babić Z, Misigoj-Duraković M, Matasić H, et al. Croatian rugby project-Part I. Anthropometric characteristics, body composition and constitution. *J Sports Med Phys Fitness*. 2001;41(2):250–255.
233. Bell W. Anthropometry of the Young Adult College Rugby Player in Wales. *Br J Sports Med*. 1973;7(1-2):298–299.
234. Bell W. Distribution of skinfolds and differences in body proportions in young adult rugby players. *J Sports Med Phys Fitness*. 1973;13(2):69–73.
235. Quarrie KL, Handcock P, Toomey MJ, et al. The New Zealand rugby injury and performance project. IV. Anthropometric and physical performance comparisons between positional categories of senior A rugby players. *Br J Sports Med*. 1996;30(1):53–56.

236. Kraemer WJ, Torine JC, Silvestre R, et al. Body size and composition of National Football League players. *J Strength Cond Res.* 2005;19(3):485–489.
237. Anzell AR, Potteiger JA, Kraemer WJ, et al. Changes in height, body weight, and body composition in american football players from 1942 to 2011. *J Strength Cond Res.* 2013;27(2):277–284.
238. Noel MB, VanHeest JL, Zanetas P, et al. Body composition in Division I football players. *J Strength Cond Res.* 2003;17(2):228–237.
239. Snow T., Millard-Stafford M, Rosskopf L. Body Composition Profile of NFL Players. *J Strength Cond Res.* 1998;(12):146–149.
240. Kaiser GE, Womack JW, Green JS, et al. Morphological Profiles for First-Year National Collegiate Athletic Association Division I Football Players. *Journal of Strength and Conditioning Research.* 2008;22(1):243–249.
241. Ackland TR, Schreiner AB, Kerr DA. Absolute size and proportionality characteristics of World Championship female basketball players. *J Sports Sci.* 1997;15(5):485–490.
242. Erčulj F, Bračič M. Comparison of the morphological profiles of young European female basketball players from different competitive levels. *Physical Culture.* 2010;64(2):14–21.
243. Ostojic SM, Mazic S, Dikic N. Profiling in basketball: physical and physiological characteristics of elite players. *J Strength Cond Res.* 2006;20(4):740–744.
244. Ostojic SM, Mazic S, Dikic N. Antropomorphological characteristics of elite Serbian basketball players. *Sportska Med.* 2003;3(83).
245. Spurgeon JH, Spurgeon NL, Giese W. Measures of body size and form of elite female basketball players. *Medicine Sport.* 1981;15:192–200.
246. Montgomery DL. Physiology of ice hockey. *Sports Med.* 1988;5(2):99–126.
247. Geithner CA, Lee AM, Bracko MR. Physical and performance differences among forwards, defensemen, and goalies in elite women's ice hockey. *J Strength Cond Res.* 2006;20(3):500–505.
248. Vescovi JD, Murray TM, Vanheest JL. Positional performance profiling of elite ice hockey players. *Int J Sports Physiol Perform.* 2006;1(2):84–94.
249. Agre JC, Casal DC, Leon AS, et al. Professional ice hockey players: physiologic, anthropometric, and musculoskeletal characteristics. *Arch Phys Med Rehabil.* 1988;69(3 Pt 1):188–192.
250. Houston ME, Green HJ. Physiological and anthropometric characteristics of elite Canadian ice hockey players. *J Sports Med Phys Fitness.* 1976;16(2):123–128.
251. Quinney HA, Dewart R, Game A, et al. A 26 year physiological description of a National Hockey League team. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2008;33(4):753–760.

252. Mangine GT, Hoffman JR, Fragala MS, et al. Effect of age on anthropometric and physical performance measures in professional baseball players. *J Strength Cond Res.* 2013;27(2):375–381.
253. Hurd WJ, Morrey BF, Kaufman KR. The effects of anthropometric scaling parameters on normalized muscle strength in uninjured baseball pitchers. *J Sport Rehabil.* 2011;20(3):311–320.
254. Szymanski DJ, Szymanski JM, Schade RL, et al. The relation between anthropometric and physiological variables and bat velocity of high-school baseball players before and after 12 weeks of training. *J Strength Cond Res.* 2010;24(11):2933–2943.
255. Carvajal W, Ríos A, Echevarría I, et al. Body type and performance of elite cuban baseball players. *MEDICC Rev.* 2009;11(2):15–20.
256. Carda RD, Looney MA. Differences in physical characteristics in collegiate baseball players. A descriptive position by position analysis. *J Sports Med Phys Fitness.* 1994;34(4):370–376.
257. Hoffman JR, Vazquez J, Pichardo N, et al. Anthropometric and performance comparisons in professional baseball players. *J Strength Cond Res.* 2009;23(8):2173–2178.
258. Carter JEL. Physical structure of olympic athletes. *American Journal of Physical Anthropology.* 1982;70(4):541–542.
259. Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 1980;12(5):357–360.
260. Pollock ML, Gettman LR, Jackson A, et al. Body composition of elite class distance runners. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1977;301:361–370.
261. Wilmore JH, Brown CH. Physiological profiles of women distance runners. *Med Sci Sports.* 1974;6(3):178–181.
262. Wilmore JH, Brown CH, Davis JA. Body physique and composition of the female distance runner. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1977;301:764–776.
263. O'Connor H, Olds T, Maughan RJ. Physique and performance for track and field events. *J Sports Sci.* 2007;25 Suppl 1:S49–60.
264. Arrese AL, Ostáriz ES. Skinfold thicknesses associated with distance running performance in highly trained runners. *J Sports Sci.* 2006;24(1):69–76.
265. Pere S, Kunnas M, Telkkä A. Correlation between performance and physique in Finnish athletes. *American Journal of Physical Anthropology.* 1954;12(2):201–208.
266. De AK, Roy AS, Ray A, et al. Simple anthropometry and peak expiratory flow rate in elite South Asian athletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 1991;31(4):596–598.
267. Hirata KI. Physique and age of Tokyo Olympic champions. *J Sports Med Phys Fitness.* 1966;6(4):207–222.

268. Hirata K, Horvath SM. Selection of Olympic Champions. Institute of Environmental Stress, University of California; Toyota, Department of Physical Education, Chukyo University; 1979 Dimensions 26.0x19.0 cm, book p.
269. Weyand PG, Davis JA. Running performance has a structural basis. *J Exp Biol.* 2005;208(14):2625–2631.
270. Clarke HH. Physical and Motor Tests in the Medford Boy's Growth Study. 1971 316 p.
271. Hale C. Physiologic maturity of Little League baseball players. *Research Quarterly.* 1956;(27):267–84.
272. Krogman WM. Maturation Age of 55 Boys in the Little League World Series, 1957. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation.* 1959;30(1):54–56.
273. Shephard RJ. Fitness of a Nation. S. Karger AG (Switzerland); 1986 (Accessed May 28, 2013).(<http://pubmedcentralcanada.ca/pmcc/articles/PMC1478321/pdf/brjsmed00048-0020.pdf>). (Accessed May 28, 2013)
274. Andrew GM, Becklake MR, Guleria JS, et al. Heart and lung functions in swimmers and nonathletes during growth. *J Appl Physiol.* 1972;32(2):245–251.
275. Cunningham DA, Eynon RB. The working capacity of young competitive swimmers, 10-16 years of age. *Med Sci Sports.* 1973;5(4):227–231.
276. Yamamoto JB, Yamamoto BE, Yamamoto PP, et al. Epidemiology of college athlete sizes, 1950s to current. *Res Sports Med.* 2008;16(2):111–127.
277. Watson AW. Discriminant analysis of the physiques of schoolboy rugby players, hurlers and non-team members. *J Sports Sci.* 1988;6(2):131–140.
278. Maud PJ. Physiological and anthropometric parameters that describe a rugby union team. *Br J Sports Med.* 1983;17(1):16–23.
279. Jardine MA, Wiggins TM, Myburgh KH, et al. Physiological characteristics of rugby players including muscle glycogen content and muscle fibre composition. *S. Afr. Med. J.* 1988;73(9):529–532.
280. Reilly T, Clarys J, Stibbe A. Science and Football II. Taylor & Francis; 1993.
281. Reilly T, Hardiker R. Somatotype and injuries in adult student rugby football. *J Sports Med Phys Fitness.* 1981;21(2):186–191.
282. Smit PJ. Sport and Somatology in Ischaemic Heart Disease: Selected Papers. Universiteit van Pretoria; 1979 56 p.
283. Lees A, Davids K. Science and Football. Proceedings of the First World Congress of Science and Football Liverpool, 13-17th April 1987: Taylor & Francis; 1987 674 p.

284. Olds T. The evolution of physique in male rugby union players in the twentieth century. *J Sports Sci.* 2001;19(4):253–262.
285. Quarrie KL, Hopkins WG. Changes in player characteristics and match activities in Bledisloe Cup rugby union from 1972 to 2004. *J Sports Sci.* 2007;25(8):895–903.
286. Bergougnou E, Cayon C. Evolution de la morphologie des joueurs de rugby français de 1989 à 1999. Toulouse: Université de Toulouse III; 1999.
287. Maso F, Robert A. Evolution anthropométrique des joueurs de l'élite du rugby français. *Science & Sports.* 1999;14(6):301–304.
288. Bauduer F, Monchaux C, Mathieu J-P. Professionnalisme et rugby de haut niveau: Approche anthropobiologique. Professionalism and high-level rugby: An anthropobiological approach. *Bulletins et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris.* 2006;18(1-2):103–111.
289. Allain B. Des jeux de balle traditionnels au rugby professionnel: histoire d'une domination économique et politique des corps [Thèse de Doctorat]. [S.l.]: [s.n.]; 2010 (Accessed July 6, 2012) 207 p.(<http://www.sudoc.fr/14981495X>). (Accessed July 6, 2012)
290. Fuller CW, Taylor AE, Brooks JHM, et al. Changes in the stature, body mass and age of English professional rugby players: A 10-year review. *J Sports Sci.* 2012;
291. Rienzi E, Reilly T, Malkin C. Investigation of anthropometric and work-rate profiles of Rugby Sevens players. *J Sports Med Phys Fitness.* 1999;39(2):160–164.
292. Polednak AP. Secular trend in body size among college athletes. *Am. J. Phys. Anthropol.* 1975;42(3):501–505.
293. Elbel ER. Body Measurements of Male Students Entering the University of Kansas. [University of Kansas] School of Education; 1954 24 p.
294. Wilmore J., Parr R., Haskell WL, et al. Football pros' strengths and CV weakness charted. *Phys Sportsmed.* 1976;(4):45–54.
295. Secora CA, Latin RW, Berg KE, et al. Comparison of physical and performance characteristics of NCAA Division I football players: 1987 and 2000. *J Strength Cond Res.* 2004;18(2):286–291.
296. Olson JR, Hunter GR. Football: A comparison of 1974 and 1984 player sizes and maximal strength and speed efforts for Division INCAA universities. *Strength & Conditioning Journal.* 1984;6(6):26.
297. De Garay AL. Genetic and anthropological studies of Olympic athletes. *American Journal of Physical Anthropology.* 1974;45(1):125–126.
298. Norton K, Olds T. Anthropometrica: A Textbook of Body Measurement for Sports and Health Courses. UNSW Press; 1996 438 p.
299. Bergh U, Sjödin B, Forsberg A, et al. The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Med Sci Sports Exerc.* 1991;23(2):205–211.

300. Dawkins R. *The Selfish Gene*. 2nd ed. Oxford University Press, USA; 1990 368 p.
301. Carter JE. The somatotypes of athletes-a review. *Hum. Biol.* 1970;42(4):535–569.
302. Malina RM, Harper AB, Avent HH, et al. Physique of female track and field athletes. *Med Sci Sports.* 1971;3(1):32–38.
303. Claessens AL, Lefevre J, Beunen G, et al. The contribution of anthropometric characteristics to performance scores in elite female gymnasts. *J Sports Med Phys Fitness.* 1999;39(4):355–360.
304. Siders WA, Lukaski HC, Bolonchuk WW. Relationships among swimming performance, body composition and somatotype in competitive collegiate swimmers. *J Sports Med Phys Fitness.* 1993;33(2):166–171.
305. Claessens AL, Hlatky S, Lefevre J, et al. The role of anthropometric characteristics in modern pentathlon performance in female athletes. *J Sports Sci.* 1994;12(4):391–401.
306. White AT, Johnson SC. Physiological comparison of international, national and regional alpine skiers. *Int J Sports Med.* 1991;12(4):374–378.
307. Krüger K, Pilat C, Ueckert K, et al. Physical performance profile of handball players is related to playing position and playing class. *J Strength Cond Res.* 2013;
308. Gorostiaga EM, Granados C, Ibáñez J, et al. Differences in physical fitness and throwing velocity among elite and amateur male handball players. *Int J Sports Med.* 2005;26(3):225–232.
309. Mahour Bacha S, Mimouni N, Mahour Bacha M. Etude des indices morphologiques des handballeurs de haut niveau et leur impact sur la performance sportive. 2000;
310. Dufour A-B, Pontier J, Rouard A. Morphologie et performance chez les sportifs de haut niveau: cas du hand ball et de la natation. *Cahiers d'anthropologie et biométrie humaine.* 1988;6(1-2):47–60.
311. Foley JP, Bird SR, White JA. Anthropometric comparison of cyclists from different events. *British Journal of Sports Medicine.* 1989;23(1):30–33.
312. Khosla T, McBroom VC. Age, height and weight of female Olympic finalists. *Br J Sports Med.* 1985;19(2):96–99.
313. Khosla T. Standards on age, height and weight in Olympic running events for men. *Br J Sports Med.* 1978;12(2):97–101.
314. Khosla T. Sport for tall. *Br Med J (Clin Res Ed).* 1983;287(6394):736–738.
315. Berg K. Endurance training and performance in runners: research limitations and unanswered questions. *Sports Med.* 2003;33(1):59–73.
316. Shoal O, Sheftel H, Shinar G, et al. Evolutionary trade-offs, Pareto optimality, and the geometry of phenotype space. *Science.* 2012;336(6085):1157–1160.

317. Watson AW, O'Donovan DJ. Factors relating to the strength of male adolescents. *J Appl Physiol.* 1977;43(5):834–838.
318. Davies CT, Barnes C, Godfrey S. Body composition and maximal exercise performance in children. *Hum. Biol.* 1972;44(2):195–214.
319. O'Donovan DJ, Watson AW. Relationship between physical working capacity and body size and shape of male adolescents [proceedings]. *J. Physiol. (Lond.)*. 1976;263(2):270P–271P.
320. Slaughter MH, Lohman TG, Boileau RA. Relationship of anthropometric dimensions to physical performance in children. *J Sports Med Phys Fitness.* 1982;22(3):377–385.
321. Wilmore JH. Body composition in sport and exercise: directions for future research. *Med Sci Sports Exerc.* 1983;15(1):21–31.
322. Crewther BT, Kilduff LP, Cook CJ, et al. Scaling strength and power for body mass differences in rugby union players. *J Sports Med Phys Fitness.* 2012;52(1):27–32.
323. Franchini E, Nunes AV, Moraes JM, et al. Physical fitness and anthropometrical profile of the Brazilian male judo team. *J Physiol Anthropol.* 2007;26(2):59–67.
324. Sekulić D, Zenić N, Marković G. Non linear relationships between anthropometric and motor-endurance variables. *Coll Antropol.* 2005;29(2):723–730.
325. Davies CT. Metabolic cost of exercise and physical performance in children with some observations on external loading. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1980;45(2-3):95–102.
326. Thorstensson A. Effects of moderate external loading on the aerobic demand of submaximal running in men and 10 year-old boys. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1986;55(6):569–574.
327. Taylor CR, Heglund NC. Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. *Annu. Rev. Physiol.* 1982;44:97–107.
328. Hutchinson PL, Cureton KJ, Outz H, et al. Relationship of cardiac size to maximal oxygen uptake and body size in men and women. *Int J Sports Med.* 1991;12(4):369–373.
329. Dagan SS, Segev S, Novikov I, et al. Waist circumference vs body mass index in association with cardiorespiratory fitness in healthy men and women: a cross sectional analysis of 403 subjects. *Nutr J.* 2013;12:12.
330. Tanner JM. *Foetus Into Man: Physical Growth from Conception to Maturity.* Harvard University Press; 1978 294 p.
331. Carter JEL. *Physical structure of Olympic athletes: Kinanthropometry of Olympic athletes.* Karger; 1984 266 p.
332. Reilly T, Watkins J, Borms J. Kinanthropometry III. *Br J Sports Med.* 1988;22(3):124.
333. Khosla T. Unfairness of certain events in the Olympic games. *Br Med J.* 1968;4(5623):111–113.

334. Khosla T. The community and sport participation. *Br J Prev Soc Med.* 1971;25(2):114–118.
335. Bell W. Body composition of rugby union football players. *Br J Sports Med.* 1979;13(1):19–23.
336. Harp JB, Hecht L. Obesity in the National Football League. *JAMA.* 2005;293(9):1061–1062.
337. Hoare DG. Predicting success in junior elite basketball players--the contribution of anthropometric and physiological attributes. *J Sci Med Sport.* 2000;3(4):391–405.
338. Elferink-Gemser MT, Visscher C, Lemmink KAPM, et al. Multidimensional performance characteristics and standard of performance in talented youth field hockey players: a longitudinal study. *J Sports Sci.* 2007;25(4):481–489.
339. Ransdell LB, Murray TM, Gao Y. Off-ice fitness of elite female ice hockey players by team success, age, and player position. *J Strength Cond Res.* 2013;27(4):875–884.
340. Burr JF, Jamnik RK, Baker J, et al. Relationship of physical fitness test results and hockey playing potential in elite-level ice hockey players. *J Strength Cond Res.* 2008;22(5):1535–1543.
341. Nakata H, Nagami T, Higuchi T, et al. Relationship between performance variables and baseball ability in youth baseball players. *J Strength Cond Res.* 2013;
342. Mangine GT, Hoffman JR, Vazquez J, et al. Predictors of Fielding Performance in Professional Baseball Players. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013;
343. Knechtle B, Knechtle P, Andonie JL, et al. Influence of anthropometry on race performance in extreme endurance triathletes: World Challenge Deca Iron Triathlon 2006. *Br J Sports Med.* 2007;41(10):644–648; discussion 648.
344. Costill DL. The relationship between selected physiological variables and distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness.* 1967;7(2):61–66.
345. Davies CT, Thompson MW. Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1979;41(4):233–245.
346. Wyndham CH, Strydom NB, van Rensburg AJ, et al. Physiological requirements for world-class performances in endurance running. *S. Afr. Med. J.* 1969;43(32):996–1002.
347. Saltin B, Astrand PO. Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol.* 1967;23(3):353–358.
348. Costill DL, Bowers R, Kammer WF. Skinfold estimates of body fat among marathon runners. *Med Sci Sports.* 1970;2(2):93–95.
349. Novak LP, Woodward WA, Bestit C, et al. Working capacity, body composition, and anthropometry of Olympic female athletes. *J Sports Med Phys Fitness.* 1977;17(3):275–283.
350. Sprynarová S, Parízková J. Functional capacity and body composition in top weight-lifters, swimmers, runners and skiers. *Int Z Angew Physiol.* 1971;29(2):184–194.

351. Bejan A, Marden JH. Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying. *Journal of Experimental Biology*. 2006;209(2):238–248.
352. Charles JD, Bejan A. The evolution of speed, size and shape in modern athletics. *J. Exp. Biol.* 2009;212(Pt 15):2419–2425.
353. Bejan A, Jones EC, Charles JD. The evolution of speed in athletics: why the fastest runners are black and swimmers white. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 2010;5(3):199–211.
354. Behnke AR, Royce J. Body size, shape, and composition of several types of athletes. *J Sports Med Phys Fitness*. 1966;6(2):75–88.
355. Khosla T. Age, height and weight of female Olympic finalists in running events. *Br J Sports Med*. 1985;19(4):214–216.
356. Bale P, Bradbury D, Colley E. Anthropometric and training variables related to 10km running performance. *British Journal of Sports Medicine*. 1986;20(4):170–173.
357. Sharwood K, Collins M, Goedecke J, et al. Weight changes, sodium levels, and performance in the South African Ironman Triathlon. *Clin J Sport Med*. 2002;12(6):391–399.
358. Hagan RD, Upton SJ, Duncan JJ, et al. Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices in female distance runners. *Br J Sports Med*. 1987;21(1):3–7.
359. Keatinge WR, Khartchenko M, Lando N, et al. Hypothermia during sports swimming in water below 11 degrees C. *Br J Sports Med*. 2001;35(5):352–353.
360. Landers GJ, Blanksby BA, Ackland TR, et al. Morphology and performance of world championship triathletes. *Ann. Hum. Biol.* 2000;27(4):387–400.
361. Tuuri G, Loftin M, Oescher J. Association of swim distance and age with body composition in adult female swimmers. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34(12):2110–2114.
362. Legaz A, Eston R. Changes in performance, skinfold thicknesses, and fat patterning after three years of intense athletic conditioning in high level runners. *Br J Sports Med*. 2005;39(11):851–856.
363. Legaz Arrese A, González Badillo JJ, Serrano Ostáriz E. Differences in skinfold thicknesses and fat distribution among top-class runners. *J Sports Med Phys Fitness*. 2005;45(4):512–517.
364. Geladas ND, Nassis GP, Pavlicevic S. Somatic and physical traits affecting sprint swimming performance in young swimmers. *Int J Sports Med*. 2005;26(2):139–144.
365. Jagomägi G, Jürimäe T. The influence of anthropometrical and flexibility parameters on the results of breaststroke swimming. *Anthropol Anz*. 2005;63(2):213–219.
366. Maldonado S, Mujika I, Padilla S. Influence of body mass and height on the energy cost of running in highly trained middle- and long-distance runners. *Int J Sports Med*. 2002;23(4):268–272.

367. Berg K, Latin RW, Coffey C. Relationship of somatotype and physical characteristics to distance running performance in middle age runners. *J Sports Med Phys Fitness*. 1998;38(3):253–257.
368. Cavanagh PR, Kram R. The efficiency of human movement--a statement of the problem. *Med Sci Sports Exerc*. 1985;17(3):304–308.
369. Hausswirth C, Brisswalter J. Le coût énergétique de la course à pied de durée prolongée: étude des paramètres d'influence. *Science & Sports*. 1999;14(2):59–70.
370. Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS. Factors affecting running economy. *Sports Med*. 1989;7(5):310–330.
371. Bosch AN, Goslin BR, Noakes TD, et al. Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1990;61(1-2):68–72.
372. Morgan DW, Daniels JT. Relationship between VO<sub>2</sub>max and the aerobic demand of running in elite distance runners. *Int J Sports Med*. 1994;15(7):426–429.
373. Bale P, Rowell S, Colley E. Anthropometric and training characteristics of female marathon runners as determinants of distance running performance. *J Sports Sci*. 1985;3(2):115–126.
374. Deason J, Powers SK, Lawler J, et al. Physiological correlates to 800 meter running performance. *J Sports Med Phys Fitness*. 1991;31(4):499–504.
375. Brandon LJ, Boileau RA. Influence of metabolic, mechanical and physique variables on middle distance running. *J Sports Med Phys Fitness*. 1992;32(1):1–9.
376. Bramwell JC, Ellis R. *Quart. J. Med*. 1931;(24):329.
377. Pollock ML, Gettman, LR, Jackson A. Body composition of elite class distance runners in P. Milvy (Ed.), *The Marathon*. New York Academy of Science, 361-370. 1977.
378. Hagan RD, Smith MG, Gettman LR. Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices. *Med Sci Sports Exerc*. 1981;13(3):185–189.
379. Marino FE, Lambert MI, Noakes TD. Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J. Appl. Physiol*. 2004;96(1):124–130.
380. Larsen HB. Kenyan dominance in distance running. *Comp. Biochem. Physiol., Part A Mol. Integr. Physiol*. 2003;136(1):161–170.
381. Claessens AL, Malina RM, Lefevre J, et al. Growth and menarcheal status of elite female gymnasts. *Med Sci Sports Exerc*. 1992;24(7):755–763.
382. Laurenson NM, Fulcher KY, Korkia P. Physiological characteristics of elite and club level female triathletes during running. *Int J Sports Med*. 1993;14(8):455–459.
383. Sleivert GG, Rowlands DS. Physical and physiological factors associated with success in the triathlon. *Sports Med*. 1996;22(1):8–18.

384. Faria IE, Faria EW. Relationship of the anthropometric and physical characteristics of male junior gymnasts to performance. *J Sports Med Phys Fitness*. 1989;29(4):369–378.
385. Spence DW, Disch JG, Fred HL, et al. Descriptive profiles of highly skilled women volleyball players. *Med Sci Sports Exerc*. 1980;12(4):299–302.
386. Grant S, Hynes V, Whittaker A, et al. Anthropometric, strength, endurance and flexibility characteristics of elite and recreational climbers. *J Sports Sci*. 1996;14(4):301–309.
387. Shephard RJ, Astrand P-O. Endurance in sport. 1992 (Accessed April 16, 2013).(<http://www.ebay.com/itm/ENDURANCE-IN-SPORT-THE-ENCYCLOPAEDIA-OF-SPORTS-MEDICINE-SHEPHARD-ASTRAND-/130849619257>). (Accessed April 16, 2013)
388. Deitrick RW. Physiological responses of typical versus heavy weight triathletes to treadmill and bicycle exercise. *J Sports Med Phys Fitness*. 1991;31(3):367–375.
389. Khosla T. Physique of Female Swimmers and Divers From the 1976 Montreal Olympics. *JAMA*. 1984;252(4):536–537.
390. Pool J, Binkhorst RA, Vos JA. Some anthropometric and physiological data in relation to performance of top female gymnasts. *Int Z Angew Physiol*. 1969;27(4):329–338.
391. Falls HB, Dennis HL. Body Type and Composition Differences between Placers and Nonplacers in an AIAW Gymnastics Meet. *Research quarterly*. 1978;49(1):38–43.
392. Lopez A, Rojas L, Garcia E. Somatotype te composition du corps chez les gymnastes de haut niveau. *Cinésiologie*. 1979;(72):5–18.
393. Bloomfield J, Sigerseth PO. Anatomical and physiological di fferences between sprint and middle distance swimmers at the university level. *J Sports Med Phys Fitness*. 1965;36:76–81.
394. Sekulić D, Zenić N, Zubcević NG. Non linear anthropometric predictors in swimming. *Coll Antropol*. 2007;31(3):803–809.
395. Fuller CW, Brooks JHM, Cancea RJ, et al. Contact events in rugby union and their propensity to cause injury. *Br J Sports Med*. 2007;41(12):862–867; discussion 867.
396. Brooks JHM, Kemp SPT. Recent trends in rugby union injuries. *Clin Sports Med*. 2008;27(1):51–73, vii–viii.
397. Duthie GM. A framework for the physical development of elite rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2006;1(1):2–13.
398. Mellalieu S, Trewartha G, Stokes K. Science and rugby union. *J Sports Sci*. 2008;26(8):791–794.
399. Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, et al. An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res*. 2009;23(4):1195–1203.

400. Duthie G, Pyne D, Hooper S. Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Med.* 2003;33(13):973–991.
401. Gabbett T, Kelly J, Pezet T. A comparison of fitness and skill among playing positions in sub-elite rugby league players. *J Sci Med Sport.* 2008;11(6):585–592.
402. Argus CK, Gill ND, Keogh JWL, et al. Changes in strength, power, and steroid hormones during a professional rugby union competition. *J Strength Cond Res.* 2009;23(5):1583–1592.
403. Gabbett T, Jenkins D, Abernethy B. Physical collisions and injury during professional rugby league skills training. *J Sci Med Sport.* 2010;13(6):578–583.
404. Cazorla G, Godemet M, Miller C. Comment comprendre et organiser la préparation physique du rugbyman de haut niveau? 2004;
405. Austin D, Gabbett T, Jenkins D. The physical demands of Super 14 rugby union. *J Sci Med Sport.* 2011;14(3):259–263.
406. Eaves S., Hughes M. Patterns of play of international rugby union teams before and after the introduction of professional status. *International Journal of Performance Analysis in Sport.* 2003;3:103–111.
407. Gabbett TJ. Physiological characteristics of junior and senior rugby league players. *Br J Sports Med.* 2002;36(5):334–339.
408. Maso F. Physiological features of rugby players of French team. *Science & Sports.* 2002;17(6):297–301.
409. Eaton C, George K. Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I: Empirical movement analysis data. *Physical Therapy in Sport.* 2006;7(1):22–29.
410. Roberts SP, Trewartha G, Higgitt RJ, et al. The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci.* 2008;26(8):825–833.
411. Quarrie KL, Wilson BD. Force production in the rugby union scrum. *J Sports Sci.* 2000;18(4):237–246.
412. Sedeaud A, Marc A, Schipman J, et al. How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *British Journal of Sports Medicine.* 2012;46(8):580–584.
413. De Saint Pol T. L'obésité en France: les écarts entre catégories sociales s'accroissent. Insee; 2007.
414. Gabbett TJ. Influence of physiological characteristics on selection in a semi-professional first grade rugby league team: a case study. *J Sports Sci.* 2002;20(5):399–405.
415. World Anti-Doping Agency. Adverse Analytical Findings and Atypical Findings Reported by Accredited Laboratories. 2010.

416. Hartwig TB, Naughton G, Searl J. Defining the volume and intensity of sport participation in adolescent rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform*. 2008;3(1):94–106.
417. Coelho E Silva MJ, Moreira Carvalho H, Gonçalves CE, et al. Growth, maturation, functional capacities and sport-specific skills in 12-13 year-old- basketball players. *J Sports Med Phys Fitness*. 2010;50(2):174–181.
418. Papaïakovou G, Giannakos A, Michailidis C, et al. The effect of chronological age and gender on the development of sprint performance during childhood and puberty. *J Strength Cond Res*. 2009;23(9):2568–2573.
419. Gabbett T, Kelly J, Ralph S, et al. Physiological and anthropometric characteristics of junior elite and sub-elite rugby league players, with special reference to starters and non-starters. *J Sci Med Sport*. 2009;12(1):215–222.
420. Hartwig TB, Naughton G, Searl J. Load, stress, and recovery in adolescent rugby union players during a competitive season. *J Sports Sci*. 2009;27(10):1087–1094.
421. Goncalo JA, Polman E, Maslach C. Can confidence come too soon? Collective efficacy, conflict and group performance over time. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*. 2010;113(1):13–24.
422. Greenlees IA, Graydon JK, Maynard IW. The impact of collective efficacy beliefs on effort and persistence in a group task. *J Sports Sci*. 1999;17(2):151–158.
423. Poli R, Ravanel L, Besson R. Annual review of the european football players' labour market. 2010.
424. Greenlees IA, Nunn RL, Graydon JK, et al. The relationship between collective efficacy and precompetitive affect in rugby players: testing Bandura's model of collective efficacy. *Percept Mot Skills*. 1999;89(2):431–440.
425. Duthie GM, Pyne DB, Hopkins WG, et al. Anthropometry profiles of elite rugby players: quantifying changes in lean mass. *Br J Sports Med*. 2006;40(3):202–207.
426. Maso F. Exigences physiologiques nécessaires à la pratique de rugby de haut niveau. Physiological features of rugby players of French team. *Science & Sports*. 2002;17(6):297–301.
427. Guillaume M, Helou NE, Nassif H, et al. Success in developing regions: world records evolution through a geopolitical prism. *PLoS ONE*. 2009;4(10):e7573.
428. Mokdad AH, Serdula MK, Dietz WH, et al. The Spread of the Obesity Epidemic in the United States, 1991-1998. *JAMA*. 1999;282(16):1519–1522.
429. El Helou N, Berthelot G, Thibault V, et al. Tour de France, Giro, Vuelta, and classic European races show a unique progression of road cycling speed in the last 20 years. *J Sports Sci*. 2010;28(7):789–796.

430. Sedeaud A, Vidalin H, Tafflet M, et al. Rugby morphologies: “bigger and taller”, reflects an early directional selection. *J Sports Med Phys Fitness*. 2013;53(2):185–191.
431. Ebben WP, Blackard DO. Strength and conditioning practices of National Football League strength and conditioning coaches. *J Strength Cond Res*. 2001;15(1):48–58.
432. Simenz CJ, Dugan CA, Ebben WP. Strength and conditioning practices of National Basketball Association strength and conditioning coaches. *J Strength Cond Res*. 2005;19(3):495–504.
433. Ebben WP, Carroll RM, Simenz CJ. Strength and conditioning practices of National Hockey League strength and conditioning coaches. *J Strength Cond Res*. 2004;18(4):889–897.
434. Ebben WP, Hintz MJ, Simenz CJ. Strength and conditioning practices of Major League Baseball strength and conditioning coaches. *J Strength Cond Res*. 2005;19(3):538–546.
435. Laurson KR, Eisenmann JC. Prevalence of overweight among high school football linemen. *JAMA*. 2007;297(4):363–364.
436. George CFP, Kab V, Levy AM. Increased prevalence of sleep-disordered breathing among professional football players. *N. Engl. J. Med*. 2003;348(4):367–368.
437. Mitchell GJ. Mitchell Report. Report to the Commissioner of Baseball of an Independent Investigation into the Illegal Use of Steroids and Other Performance Enhancing Substances by Players in Major League Baseball. 2007.
438. Yesalis C. Anabolic Steroids in Sport and Exercise. Human Kinetics; 2000 516 p.
439. Robbins DW. Positional physical characteristics of players drafted into the National Football League. *J Strength Cond Res*. 2011;25(10):2661–2667.
440. Delextrat A, Cohen D. Physiological testing of basketball players: toward a standard evaluation of anaerobic fitness. *J Strength Cond Res*. 2008;22(4):1066–1072.
441. McShea DW, Brandon RN. Biology’s First Law: The Tendency for Diversity and Complexity to Increase in Evolutionary Systems. University of Chicago Press; 2010 186 p.
442. Marc A, Sedeaud A, Guillaume M, et al. Marathon progress: demography, morphology and environment. *J Sports Sci*. 2013;In Press.
443. Ward-Smith AJ. A mathematical theory of running, based on the first law of thermodynamics, and its application to the performance of world-class athletes. *J Biomech*. 1985;18(5):337–349.
444. Khosla T. Relationship between speed of running and distance run. *Lancet*. 1974;1(7845):30.
445. Bourdin M, Pastene J, Germain M, et al. Influence of training, sex, age and body mass on the energy cost of running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1993;66(5):439–444.
446. Kong PW, de Heer H. Anthropometric, gait and strength characteristics of Kenyan distance runners. *Journal of sports Science and Medicine*. 2008;7:499–504.

447. Pugh LG. The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J. Physiol. (Lond.)*. 1971;213(2):255–276.
448. Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, et al. Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflugers Arch*. 2000;441(2-3):359–367.
449. Dennis SC, Noakes TD. Advantages of a smaller bodymass in humans when distance-running in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1999;79(3):280–284.
450. Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc*. 2000;32(6):1130–1134.
451. Whipp BJ, Ward SA. Will women soon outrun men? *Nature*. 1992;355(6355):25.
452. Tatem AJ, Guerra CA, Atkinson PM, et al. Athletics: momentous sprint at the 2156 Olympics? *Nature*. 2004;431(7008):525.
453. Holden C. An everlasting gender gap? *Science*. 2004;305(5684):639–640.
454. Sparling PB, O'Donnell EM, Snow TK. The gender difference in distance running performance has plateaued: an analysis of world rankings from 1980 to 1996. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30(12):1725–1729.
455. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, et al. Women and men in sport performance: the gender gap has not evolved since 1983. *J Sports Sci Med*. 2010;9(2):214–223.
456. Seiler S, De Koning JJ, Foster C. The fall and rise of the gender difference in elite anaerobic performance 1952-2006. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39(3):534–540.
457. Cheuvront SN, Carter R, Deruisseau KC, et al. Running performance differences between men and women:an update. *Sports Med*. 2005;35(12):1017–1024.
458. Capranica L, Piacentini MF, Halson S, et al. The gender gap in sport performance: equity influences equality. *Int J Sports Physiol Perform*. 2013;8(1):99–103.
459. Pfister G. Women in sport – gender relations and future perspectives1. *Sport in Society*. 2010;13(2):234–248.
460. Joncheray H, Tlili H. Are there still social barriers to women's rugby? *Sport in Society*. 2013;16(6):772–788.
461. Sparling PB, Nieman DC, O'Connor PJ. Selected scientific aspects of marathon racing. An update on fluid replacement, immune function, psychological factors and the gender difference. *Sports Med*. 1993;15(2):116–132.
462. Sparling PB. A meta-analysis of studies comparing maximal oxygen uptake in men and women. *Res Q Exerc Sport*. 1980;51(3):542–552.

463. Drinkwater BL. Women and exercise: physiological aspects. *Exerc Sport Sci Rev.* 1984;12:21–51.
464. Sparling PB, Cureton KJ. Biological determinants of the sex difference in 12-min run performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1983;15(3):218–223.
465. Alway SE, Grumbt WH, Gonyea WJ, et al. Contrasts in muscle and myofibers of elite male and female bodybuilders. *J. Appl. Physiol.* 1989;67(1):24–31.
466. Schantz P, Randall-Fox E, Hutchison W, et al. Muscle fibre type distribution, muscle cross-sectional area and maximal voluntary strength in humans. *Acta Physiol. Scand.* 1983;117(2):219–226.
467. Miller AE, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, et al. Gender differences in strength and muscle fiber characteristics. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1993;66(3):254–262.
468. Abe T, Brechue WF, Fujita S, et al. Gender differences in FFM accumulation and architectural characteristics of muscle. *Med Sci Sports Exerc.* 1998;30(7):1066–1070.
469. Abe T, Fukashiro S, Harada Y, et al. Relationship between sprint performance and muscle fascicle length in female sprinters. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci.* 2001;20(2):141–147.
470. Tesch P, Karlsson J. Isometric strength performance and muscle fibre type distribution in man. *Acta Physiol. Scand.* 1978;103(1):47–51.
471. Alexander MJ. The relationship between muscle strength and sprint kinematics in elite sprinters. *Can J Sport Sci.* 1989;14(3):148–157.
472. Herbst KL, Bhasin S. Testosterone action on skeletal muscle. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2004;7(3):271–277.
473. Willoughby DS, Taylor L. Effects of sequential bouts of resistance exercise on androgen receptor expression. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(9):1499–1506.
474. Gooren LJG, Bunck MCM. Transsexuals and competitive sports. *Eur. J. Endocrinol.* 2004;151(4):425–429.
475. Weyand PG, Sternlight DB, Bellizzi MJ, et al. Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. *J. Appl. Physiol.* 2000;89(5):1991–1999.
476. Joyner MJ, Ruiz JR, Lucia A. The two-hour marathon: who and when? *J. Appl. Physiol.* 2011;110(1):275–277.
477. Lippi G, Favaloro EJ, Guidi GC. The genetic basis of human athletic performance. Why are psychological components so often overlooked? *J. Physiol. (Lond.).* 2008;586(Pt 12):3017; author reply 3019–3020.
478. Macarthur DG, North KN. Genes and human elite athletic performance. *Hum. Genet.* 2005;116(5):331–339.

479. Ely MR, Cheuvront SN, Roberts WO, et al. Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(3):487–493.
480. Galloway SD, Maughan RJ. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29(9):1240–1249.
481. Vihma T. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol.* 2010;54(3):297–306.
482. Field AP. *Discovering statistics using IBM SPSS statistics: and sex and drugs and rock “n” roll.* London: SAGE; 2013.
483. Williams AG, Folland JP. Similarity of polygenic profiles limits the potential for elite human physical performance. *J. Physiol. (Lond.).* 2008;586(1):113–121.
484. Desgorces F-D, Berthelot G, El Helou N, et al. From Oxford to Hawaii ecophysiological barriers limit human progression in ten sport monuments. *PLoS ONE.* 2008;3(11):e3653.
485. Saltin B, Kim CK, Terrados N, et al. Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports.* 1995;5(4):222–230.
486. Weston AR, Karamizrak O, Smith A, et al. African runners exhibit greater fatigue resistance, lower lactate accumulation, and higher oxidative enzyme activity. *J. Appl. Physiol.* 1999;86(3):915–923.
487. Rivera MA, Dionne FT, Simoneau JA, et al. Muscle-specific creatine kinase gene polymorphism and VO<sub>2</sub>max in the HERITAGE Family Study. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;29(10):1311–1317.
488. Coetzer P, Noakes TD, Sanders B, et al. Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *J. Appl. Physiol.* 1993;75(4):1822–1827.
489. Onywera VO, Scott RA, Boit MK, et al. Demographic characteristics of elite Kenyan endurance runners. *J Sports Sci.* 2006;24(4):415–422.
490. Saltin B, Larsen H, Terrados N, et al. Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports.* 1995;5(4):209–221.
491. Scott RA, Georgiades E, Wilson RH, et al. Demographic characteristics of elite Ethiopian endurance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35(10):1727–1732.
492. Schmidt W, Heinicke K, Rojas J, et al. Blood volume and hemoglobin mass in endurance athletes from moderate altitude. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(12):1934–1940.
493. O’Brien M. Women and sport. *Appl Ergon.* 1985;16(1):25–39.
494. Hargreaves M. Physiological limits to exercise performance in the heat. *J Sci Med Sport.* 2008;11(1):66–71.

495. Gutierrez D, Roque P, Bagate C, et al. Étude épidémiologique prospective des pathologies dans le XV de France féminin de rugby de juillet 2006 à septembre 2010. *Journal de Traumatologie du Sport*. 2011;28(4):208–214.
496. Lee AJ, Myers JL, Garraway WM. Influence of players' physique on rugby football injuries. *Br J Sports Med*. 1997;31(2):135–138.
497. Quarrie KL, Alsop JC, Waller AE, et al. The New Zealand rugby injury and performance project. VI. A prospective cohort study of risk factors for injury in rugby union football. *Br J Sports Med*. 2001;35(3):157–166.
498. Fuller CW, Laborde F, Leather RJ, et al. International Rugby Board Rugby World Cup 2007 injury surveillance study. *Br J Sports Med*. 2008;42(6):452–459.
499. Fuller CW, Sheerin K, Targett S. Rugby World Cup 2011: International Rugby Board Injury Surveillance Study. *Br J Sports Med*. 2012;
500. Murray AD, Murray IR, Robson J. Rugby Union: faster, higher, stronger: keeping an evolving sport safe. *Br J Sports Med* [electronic article]. 2012;(http://bjsm.bmj.com.ezproxy.brighton.ac.uk/content/early/2012/12/21/bjsports-2012-091844). (Accessed January 7, 2013)

## 14. Annexes

### 14.1. Annexe 1

J SPORTS MED PHYS FITNESS 2013;53:185-91

## Rugby morphologies: “bigger and taller”, reflects an early directional selection

A. SEDEAUD<sup>1,2</sup>, H. VIDALIN<sup>3</sup>, M. TAFFLET<sup>1,4</sup>, A. MARC<sup>1</sup>, J.-F. TOUSSAINT<sup>1,2,5</sup>

**Aim.** The aim of this paper was to investigate the changes over time in anthropometric parameters of young and adult rugby players in France.

**Methods.** Age, mass and height were collected for 2051 French elite rugby players participating in the championship during the 1988-1989 and the 2008-2009 seasons. The same variables were collected for the best 145 juniors (under 21 years) and 448 U15 (under 15 years) French players for these seasons. Changes in anthropometric parameters were compared according to age, category (back vs. forwards) and season.

**Results.** Over 20 years, adult French rugby backs and forwards have become heavier by 12 kg and 12.3 kg, taller by 5.4 cm and 2.9 cm, respectively. Junior players also became taller and heavier, 6 cm and 9.9 kg for backs and 4.4 cm and 11.1 kg for forwards. U15 backs have gained 5.1 cm and 6.5 kg, and forwards earned 4.7 cm and 4.7 kg.

**Conclusion.** Rugby players have become taller and heavier. Their current morphology is the product of a long process of competition and selection. This study demonstrates that this selection of the “large sizes” is already present at a young age.

**KEY WORDS:** Body size - Anthropometry - Athletes.

Rugby union is an international contact sport.<sup>1</sup> This collective game with many phases of contact, tackling, ruck, maul and scrum, necessitates various physical demands,<sup>2,4</sup> requiring players to participate in intensive efforts interspersed with some periods of lower intensity.<sup>5,6</sup> In view of the constraints and specific demands of this sport, players are required to develop a wide range of technical and tactical skills, in addition to the benefits drawn from their anthropometric qualities.<sup>6,7</sup> Strength, explosive power, speed, and aerobic power are central

<sup>1</sup>IRMES (Institute for biomedical and epidemiological research in sport), INSEP, Paris, France

<sup>2</sup>Université Paris-Descartes Sorbonne Paris Cité, Paris, France

<sup>3</sup>Médecin du Sport-Centre médico-sportif de l'A.S. Montferrandaise Clermont Ferrand Cedex 2, France

<sup>4</sup>INSERM Unit 970, Paris, France

<sup>5</sup>CIMS, Hôtel-Dieu Assistance Publique des Hôpitaux de Paris Paris, France

physical aspects to performance and are highly developed, in regard to the physiological demands of this activity, both during games and training.<sup>3, 8, 9</sup> These qualities seem to influence recruitment of suitable morphological sizes and capacities. Traditional rugby is distinguished by the physical commitment of forwards and the game-specific agility of backs; however, this difference has become less important in the current game, in which physical contact takes a leading part in all positions.<sup>10</sup> Moreover, the initial nature of rugby players reflects the morphological distribution of the general population. Through time it has progressively evolved into a current sport associated with strong physical stereotypes<sup>10, 11</sup> for players which are not representative of the general population. The quest of recruiting suitable morphologies and profiles, (less and less frequent) may potentially lead to an increase in non-native players, who possess appropriate morphological traits, in French championship teams.<sup>10, 11</sup> Since the advent of rugby

Corresponding author: A. Sedeaud, 11 avenue du Tremblay, 75012 Paris, France. E-mail: adrien.sedeaud@insep.fr

professionalism in France in 1995 as well as in other countries, players have become subjected to an additional load of physical and moral constraints, accompanied by an increase in the incidence of injury. The number of tackles or rucks per game has increased by a factor of four in thirty years,<sup>12</sup> and Austin *et al.*<sup>13</sup> suggest that the modern game of rugby union has resulted in an increase in high-intensity activity. Furthermore, Eaves and Hughes<sup>14</sup> showed, during Five and Six Nations Championships, that the incidence of rucks in rugby union had increased since 1988 from 62.4 to 134.4 events/game in 2000/02.

Overall size has been identified as a predictor of efficiency:<sup>15</sup> a strong association exists between mass, height and the individual and collective performances. Teams with the tallest and heaviest players outperform others.<sup>15</sup> Some authors considered body mass as the main physical characteristic that successfully predicts the selection of a player, regardless of his position.<sup>16</sup> It has been suggested that the strong selection pressure occurring in (high level) sport may accelerate and overcome processes observed in the population in term of size.<sup>17</sup> To date, no study has investigated the changes of anthropometric characteristics in young and adult high level rugby players in France. This study includes athletes between 14 and 39 years of age and a large sample at the highest national level.

This study aimed to investigate changes in height and mass of U15, junior and senior rugby players of the French elite between 1988 and 2008.

## Materials and methods

### Ethics

This study used a non-interventional protocol, 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), and informed consent from the athletes evaluated was not necessary. This study was designed and monitored by the IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et Epidémiologique du Sport) scientific committee.

### Data collection

Age, mass and height of French elite rugby players during the 1988-1989, 1998-1999 and 2008-2009 seasons were collected from reports published in the Annual review of Rugbyrama. The Rugbyrama website collects official data (for age, mass and sizes) provided by the clubs each year. These data are obtained from the athletes' longitudinal follow up, with measurements done by the team physician.

Age, mass and height of juniors (less than 21 years) and U15 (under 15 years) were collected from the medical center of the AS Montferrandaise (team of elite French rugby championship), during the 1988 and 2008 Marcel Michelin Challenge, which gathers 16 of the best national clubs. These biometric measurements were taken by the same examiner for all players, during the athletes' longitudinal follow up, and sent to IRMES. Players were separated into two populations: backs (players number 9 through number 15), and forwards (number 1 through number 8).

### Statistical analysis

The focus of interest in this study was the change of biometric parameters of French elite rugby union players over twenty years. Each population (backs and forwards) was analyzed separately according to age (in years), height (in centimeters), mass (in kilograms) and BMI defined as mass divided by height-squared (kg/m<sup>2</sup>).<sup>18</sup> We also measured the percentage of non-native rugbymen playing in the French elite divisions in order to analyze changes in recruitment of non-native players. Players were considered as non-native if they are "allochthonous", the percentage of non-native was obtained as follows:

$$\% \text{ of non-native players} = \frac{N \text{ non-native players} \times 100}{N \text{ of all players}}$$

Changes in anthropometric parameters across the 3 seasons were compared according to age, category (back vs. forwards) and seasons. Differences between categories were compared by Students t-tests. Differences between decades were tested using ANOVA. The ANOVA was adjusted on age, as adult rugby players became also older between 1988-2008 seasons this could affect their changes of mass and BMI. We also performed a multiple linear regression adjusted for age on each parameter to test the time

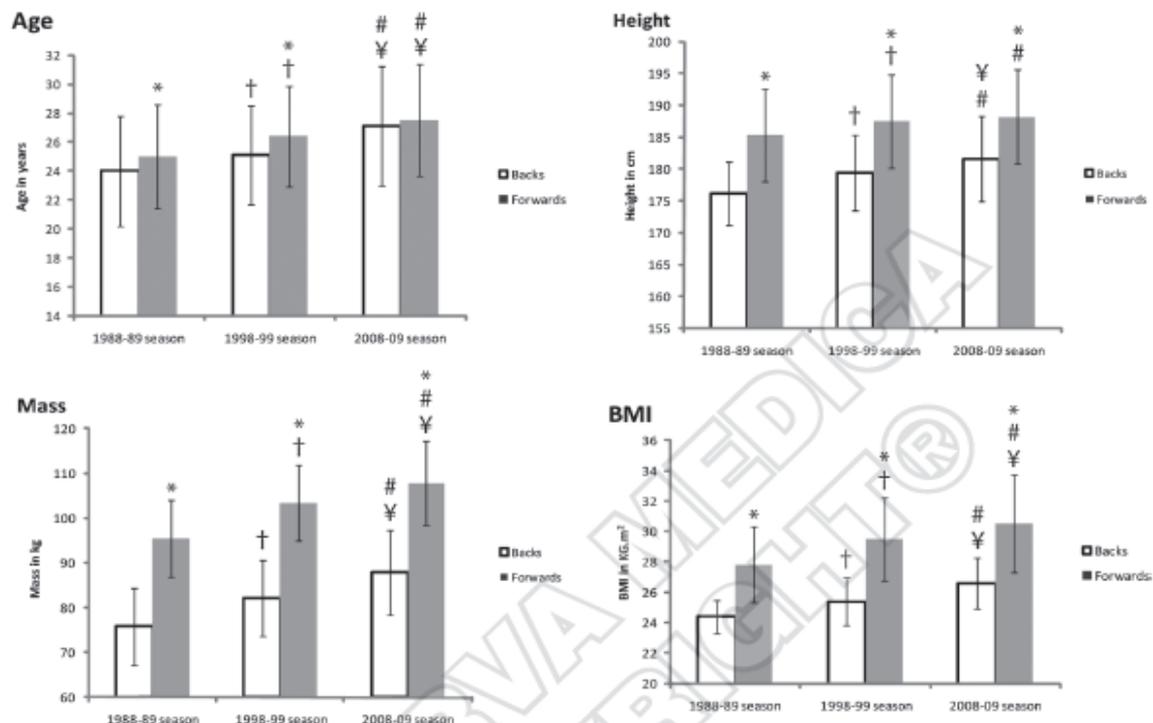


Figure 1.—Evolution of the age, height, mass and BMI represented by mean and standard deviation of senior rugby players between 1988 and 2008 seasons. \* $P < 0.001$  for Forwards vs. Backs; † $P < 0.001$  for 1988 season vs. 1998 season, # $P < 0.001$  for 1988 season vs. 2008 season, ¥ $P < 0.001$  for 1998 season vs. 2008 season.

trend. Values are presented as mean and standard deviation. Statistical significance was accepted at  $P < 0.05$ .

### Results

The sample population was composed of 2644 players, including 2051 seniors: 1141 forwards and 910 backs; 145 juniors: 82 forwards and 63 backs and 448 U15: 267 forwards and 181 backs.

During the 1988-1989 season, forwards were significantly older (+0.9 years), taller (+9.1 cm) and heavier (+19.7 kg) than backs and had a larger body mass index (+3.4 kg.m<sup>-2</sup>) (Figure 1). Similarly, forwards of the 1998-1999 season were significantly

older (+1.3 years), larger (+8 cm) and heavier (+21.3 kg) than backs and also had a larger body mass index (+4.0 kg.m<sup>-2</sup>) (Figure 1). Unlike previous seasons, backs and forwards participating in the Top 14 in 2008-2009 showed no significant difference in age, but differences in height, mass and BMI: (+6.6 cm, +20 kg, +3.9 kg.m<sup>-2</sup>, respectively) persist (Figure 1).

The mean age of backs and forwards playing in the elite has increased over the last 20 years:  $24 \pm 3.8$  and  $25 \pm 3.6$  years in 1988 against  $27.1 \pm 3.9$  and  $27.5 \pm 4.1$  years during the 2008-2009 season. Over these 20 years, players have also become taller, heavier and have a greater BMI (Figure 1). Backs and forwards have increased by respectively 5.4 and 2.9 cm, 12 and 12.3 kg, and 2.2 kg.m<sup>-2</sup> and 2.7 kg.m<sup>-2</sup> for BMI, between 1988 and 2008.

TABLE I.—ANOVA and ANOVA adjusted by age and linear regression for backs and forwards.

	Means			ANOVA		ANOVA (Adjusted for age)		Trend (adjusted for age)			
	1988	1998	2008	F-value	P	F-value	P	t-value	P	linear coefficient*	SD (coeff)
<b>Backs</b>											
Mass	75.8	82.1	87.8	177.4	<0.0001	145.36	<0.0001	17.03	<0.0001	5.70	0.33
Height	176.2	179.5	181.6	61.55	<0.0001	53.71	<0.0001	10.23	<0.0001	2.73	0.27
BMI	24.4	25.4	26.6	140.48	<0.0001	109.75	<0.0001	14.82	<0.0001	0.99	0.07
Age	24	25.1	27.1	43.98	<0.0001						
<b>Forwards</b>											
Mass	95.5	103.4	107.8	179.16	<0.0001	147.85	<0.0001	16.81	<0.0001	5.87	0.35
Height	185.3	187.4	188.2	15.64	<0.0001	14.4	<0.0001	5.13	<0.0001	1.51	0.29
BMI	27.8	29.5	30.5	83.96	<0.0001	65.99	<0.0001	11.34	<0.0001	1.24	0.11
Age	25	26.4	27.5	40	<0.0001						

\* Unit of ten years

Results of different statistical models are represented in Table I for backs and forwards. All parameters differed significantly by decades, and also with adjustment for age in both categories. Multiple linear regression indicates that backs have gained 5.7 kg, 2.7 cm and 1 kg.m<sup>-2</sup> per decade and forwards have gained 5.9 kg, 1.51 cm and 1.25 kg.m<sup>-2</sup> per decade.

Currently, 36% of the elite division workforce is made up of non-native players, while they only represented 1.8% of the division in 1988; these teams had an average of 0.6 foreign players per club, 1 per club during the 1994-1995 season<sup>11</sup> and this average increased to 14.6, per club in today's championships (*i.e.* 2010-2011 Top 14 championship) (204 foreigners out of 566 rugby players).

Like their adults' backs and forwards counterparts, juniors have also become significantly taller: +6 and +4.4 cm, heavier +9.9 and +11.1 kg, with larger BMI +3.8 and +2.2 kg.m<sup>-2</sup>, respectively (Figure 2).

Like their adults' backs and forwards peers, U15 backs and forwards became 5.1 and 4.7 cm taller, heavier by 6.5 and 4.7 kg, with a BMI increased by 0.6 and 0.2 kg.m<sup>-2</sup> (Figure 2).

### Discussion

For all seasons and age groups studied here, forwards were significantly heavier, taller and consequently with larger BMI than backs, consistently with previous studies.<sup>6, 19, 20</sup> This is principally explained by the profile of these positions: forwards

spend significantly more time tackling<sup>9, 21, 22</sup> and in contact phases<sup>6, 22</sup> and high intensity activities that backs.<sup>21</sup> It is likely that greater height and mass enable them to generate an increased impact force during these phases. A large body mass is considered necessary to generate and tolerate large impacts during tackles<sup>7</sup> and to provide strength and power during the phases of scrums, rucks and mauls. Furthermore, in rugby union, a larger body size correlates significantly with scrummaging force.<sup>23</sup> Moreover, forwards endure an average of 21 scrums, 35 rucks, 25 mauls and 14 tackles while backs only participate in 11 rucks, 4 mauls and 10 tackles.<sup>22</sup> In addition, during a game, it was measured that forwards were involved in 60% more high-level impacts than backs<sup>5</sup>; forwards perform a higher number of tasks involving collisions in game. Despite this difference, backs present a higher risk of injuries,<sup>1, 9</sup> as differences are always in favor of forwards during physical impacts.

On the other hand, the height of forwards gives them an advantage to catch the ball in line-out.<sup>6</sup> Their greater body mass allows them to generate greater sprint momentum.<sup>24</sup> The diminution of height differences between backs and forwards could suggest that rugby teams may be increasingly looking for more versatile players.<sup>20</sup> The reduction in these height differences can be explained by the engagement of backs which are increasingly called upon to participate in rucks and mauls that were traditionally dedicated to forwards,<sup>12</sup> with an increased time devoted to contact. In other hand, being taller confers advantages at the highlights of the game (*i.e.* recep-

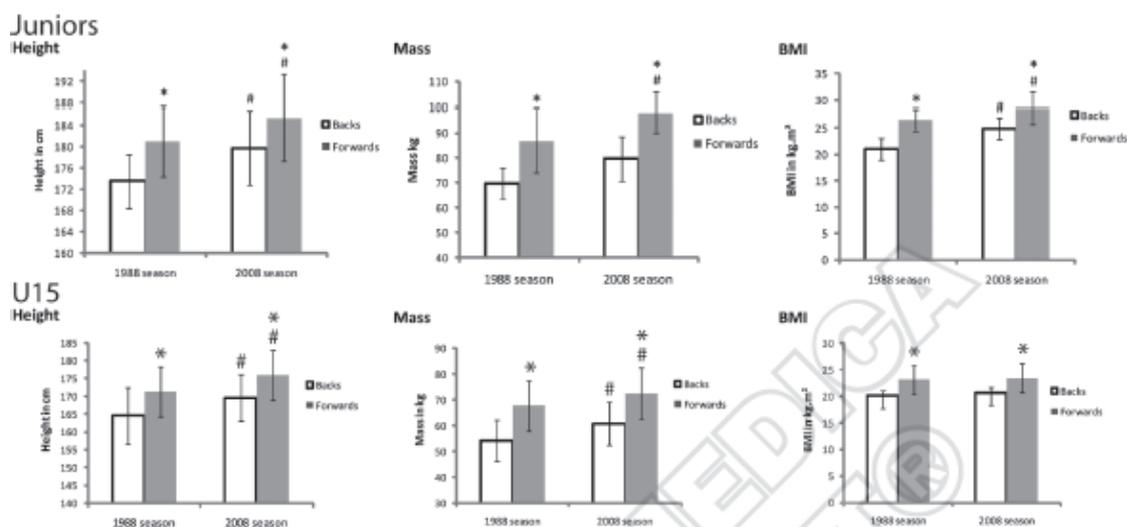


Figure 2.—Evolution of size, mass and BMI of junior and U15 rugby players represented by mean and standard deviation. \* $P < 0.001$  for forwards vs. backs, # $P < 0.001$  for 1988 season vs. 2008 season.

tions under kicks and protection in isolated rucks in wait for the forwards' support).

In this study, we find that between the 1988-1989 and 2008-2009 seasons, the age, height, mass and BMI of backs and forwards increased significantly, which confirms trends observed during the 1990s and the importance of morphological qualities in this sport, especially weight and height.<sup>25</sup> These data highlight a rapid increase of the mass of players subsequent to the introduction of professionalism, as seen in Bledisloe Cup players,<sup>12</sup> or in two Basque teams.<sup>11</sup> This reflects the modernization of Rugby with increased physical confrontation where the most powerful players are selected, as in American football.<sup>17</sup> These evolutions directly turn towards a search for physically oversized players,<sup>11</sup> and for the optimization of build. Olds<sup>15</sup> examined the changes in size of the athletes in 20th century. They report a greater increase in the mass of rugby players compared to the increase in mass of general population in developed countries. In the last twenty years, the French population has grown by 3 kg and 2 cm per decade.<sup>19</sup> The Rugby players studied here outstripped population trends in mass (and height only for backs), with increases of 5.7 kg and 2.7 cm

per decade for backs and of 5.9 kg and 1.51 cm for forwards. This evolution towards a continuous increase in size is also observed in nations in which rugby arrived more recently.<sup>26</sup> It seems logical to see physiques developed given the strong link between morphology and both individual and collective performance,<sup>15, 27</sup> and its impact on the selection of players.<sup>27</sup> Indeed, for 1987 to 2007 Rugby World Cups, the highest performing teams have the tallest backs and heaviest forwards.<sup>25</sup> Therefore, recruitment is directed first toward the pool of French players, but as the physical stereotype sought becomes increasingly distant from that of the average population, the pool of suitable native players is de facto reduced. This phenomenon of recruiting oversized athletes is found globally in various sports: height for basketball, handball and volleyball, body mass for contact sports like American football, weightlifting or throws.<sup>15</sup> This search for large builds quickly consumes the native group, depleting the pool for other sports that participate in the race for recruiting increasingly large athletes.

This development of the rugby player' physiques can find explanations. Today professional rugby players train five to six days per week in addition

to matches and sometimes in two or three sessions daily.<sup>27</sup> As a result the technical and physiological characteristics of the players are emphasized. The number of collisions per training session is 23 on average for forwards and 16 for backs, up to a maximum of 82 and 75 respectively.<sup>9</sup> The intensity of these impacts has increased, as measured by biomechanical analysis<sup>10</sup> and by the impact speed on bags of tackles used in training.

The increases in mass and BMI can be explained by increases in training load and strength training coupled with a nutritional follow-up, and for some and sporadically, through the use of anabolic steroids.<sup>28</sup> Indeed, the World Anti-Doping Agency in its annual report highlights that 39 of the 5725 rugby players were tested positive.<sup>28</sup> This low percentage suggests that this phenomenon is not more prominent in rugby than in other sports. Other aspects, such as evolution in game rules have accompanied this growth of rugby players. In 1997 the authorization of non-injury replacement allowed coaches to turn over their players, decreasing the frequency of individual commitment to exhaustion. According to Quarrie<sup>12</sup> the fact that players spend less time on the field reduces the aerobic demand while increasing the anaerobic load. Morphologies are adapted to activity constraints, and a rule change may cause a player to become more or less suitable to the game.<sup>17</sup> The evolution of the rules may change the nature of the game: increasing the number of rucks and tackles increases the frequency of the use of power phases in contact.<sup>12</sup> Ultimately, greater body mass confers undeniable benefits during these phases. Thus, rules generate the game, which in turn generates the morphology requirements.

Sport follows a rapid evolution, which exerts strong selective pressures according to suitable criteria.<sup>17</sup> Indeed, athletes in many sports (although not all, despite the secular trend of general population) have been getting taller and more massive over time. The "arms race" as shown by Norton and Olds for basketball, which rapidly depletes the pool of large-size players' is emerging in rugby union. Indeed, this trend is visible in France: we show the recruitment of foreign players grew from 1.8% per club in 1988 to 36.2% of rugby players in today Top 14. Moreover, these non-native players are significantly heavier, taller and with larger BMI than French players (104.6

kg vs 96.9 kg and 187.6 cm vs 184.9 cm and 29.7 vs 28.3 kg.m<sup>-2</sup> respectively).

The present morphology of rugby players is the product of a long process of competition and selection, and this study shows in fact that the selection of "super sizes" (ie exceptional physiques) is already present for juniors and U15. Our study highlights a selection from an early age. It is noted also that young backs, like their senior counterparts, are significantly smaller and lighter than young forwards. We also show an increase in height, mass and BMI of young rugby players during these twenty years. It is possible that the mass gains are due to the increased training load and intensity of games. Indeed, the training and game demands are becoming more similar to the adults'.<sup>29</sup> Harting et al reported an average of 7 hours per week in the rugby talent squad and a maximum of 13.54 hours. In this study 91% of reported weekly activity duration was rugby and rugby related activities.<sup>29</sup> Data indicate that selection of large physique already occur among juniors and U15. At the age of selection, boys who have already entered puberty (and hence started their growth spurt) therefore hold a significant advantage over others. Because study shows,<sup>30</sup> maturity status explained a significant portion of variance in body size, and pubertal status was significant effect on jumps and upper limbs strength, which are necessary and important qualities in rugby. As running speed who are also affected by chronological age.<sup>31</sup> All this qualities can confer a benefit to players who have entered or ended earlier puberty. Moreover, even in young players, starters are taller and heavier than substitutes, suggesting that biometric characteristics are associated with the choice of the starters of the junior elite and sub-elite.<sup>32</sup> In addition, a study showed that the adolescents in the elite and talent squad of the rugby union are heavier than other players.<sup>33</sup> However, it could be a disadvantage to develop young players too quickly. They may have the physical attributes, but don't have the experience to play at a senior elite level. Furthermore, the late developers may overtake them as they themselves develop. Nevertheless, increased weights can result from increased in strength training coupled with a nutritional follow-up but their greater height is the result of directional selection.

### Conclusions

In conclusion, in 20 years French rugby players have become heavier and taller. This increase in weight can be explained by the increased height but also by the improvement of training volume, the greater use of weight training, nutrition monitoring, by changing rules and recruitment. The quest for “super sizes” is confirmed by the fact that this trend is not only apparent in the elite adult division, but also in juniors and U15. Their growth in weight may result from training improvement, but their increased height is the result of directional selection; given equal skill level, coaches tend to select the taller players. Thus, the present morphology of rugby players is the product of a long process of competition and selection; data indicated sufficient evidence that the selection of “super builds” is present early in young players.

### References

- Fuller CW, Brooks JHM, Cancea RJ, Hall J, Kemp SPT. Contact events in rugby union and their propensity to cause injury. *Br J Sports Med* 2007;41:862-7.
- Brooks JHM, Kemp SPT. Recent trends in rugby union injuries. *Clin Sports Med* 2008;27:51-73.
- Duthie GM. A framework for the physical development of elite rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform* 2006;1:2-13.
- Mellalieu S, Trewartha G, Stokes K. Science and rugby union. *J Sports Sci* 2008;26:791-794.
- Cunniffe B, Proctor W, Baker JS, Davies B. An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res* 2009;23:1195-203.
- Duthie G, Pyne D, Hooper S. Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Med* 2003;33:973-91.
- Gabbett T, Kelly J, Pezet T. A comparison of fitness and skill among playing positions in sub-elite rugby league players. *J Sci Med Sport* 2008;11:585-92.
- Argus CK, Gill ND, Keogh JWL, Hopkins WG, Beaven CM. Changes in strength, power, and steroid hormones during a professional rugby union competition. *J Strength Cond Res* 2009;23:1583-92.
- Gabbett T, Jenkins D, Abernethy B. Physical collisions and injury during professional rugby league skills training. *J Sci Med Sport* 2010;13:578-83.
- Cazorla G, Godémet M, Miller C. Comment comprendre et organiser la préparation physique du rugbyman de haut niveau? Sur demande de la Commission Médicale de la Ligue Nationale de Rugby; 2004.
- Bauduer F, Monchaux C, Mathieu J-P. Professionnalisme et rugby de haut niveau: Approche anthropobiologique = Professionalism and high-level rugby: an anthropobiological approach. *Bulletins et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris* 2006;18:103-11.
- Quarrie KL, Hopkins WG. Changes in player characteristics and match activities in Bledisloe Cup rugby union from 1972 to 2004. *J Sports Sci* 2007;25:895-903.
- Austin D, Gabbett T, Jenkins D. The physical demands of Super 14 rugby union. *J Sci Med Sport* 2011;14:259-63.
- Eaves S, Hughes M. Patterns of play of international rugby union teams before and after the introduction of professional status. *Int J Perform Anal Sport* 2003;3:103-11.
- Olds T. The evolution of physique in male rugby union players in the twentieth century. *J Sports Sci* 2001;19:253-62.
- Gabbett TJ. Physiological characteristics of junior and senior rugby league players. *Br J Sports Med* 2002;36:334-9.
- Norton K, Olds T. Morphological evolution of athletes over the 20th century: causes and consequences. *Sports Med* 2001;31:763-83.
- Keys A, Fidanza F, Karvonen MJ, Kimura N, Taylor HL. Indices of relative weight and obesity. *J Chronic Dis* 1972;25:329-43.
- De Saint Pol T. L'obésité en France: les écarts entre catégories sociales s'accroissent. Insee; 2007. [Internet]. Available at: [http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref\\_id=ip1123&reg\\_id=0](http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=ip1123&reg_id=0) [cited 2013, Feb 21].
- Maso F. Physiological features of rugby players of French team. *Science Sports* 2002;17:297-301.
- Eaton C, George K. Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I: Empirical movement analysis data. *Phy Ther Sport* 2006;7:22-9.
- Roberts SP, Trewartha G, Higgitt RJ, El-Abd J, Stokes KA. The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci* 2008;26:825-33.
- Quarrie KL, Wilson BD. Force production in the rugby union scrum. *J Sports Sci* 2000;18:237-46.
- Quarrie KL, Handcock P, Waller AE, Chalmers DJ, Toomey MJ, Wilson BD. The New Zealand rugby injury and performance project. III. Anthropometric and physical performance characteristics of players. *Br J Sports Med* 1995;29:263-70.
- Sedeaud A, Marc A, Schipman J, Tafflet M, Hager J-P, Toussaint J-F. How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience. *British Journal of Sports Medicine* 2012 [Internet]. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22348873>. [Cited 2012, Feb 27].
- Babić Z, Misić-Duraković M, Matasić H, Jancić J. Croatian rugby project-Part I. Anthropometric characteristics, body composition and constitution. *J Sports Med Phys Fitness* 2001;41:250-5.
- Gabbett TJ. Influence of physiological characteristics on selection in a semi-professional first grade rugby league team: a case study. *J Sports Sci* 2002;20:399-405.
- World Anti-Doping Agency. Adverse Analytical Findings and Atypical Findings Reported by Accredited Laboratories 2009.
- Hartwig TB, Naughton G, Searl J. Defining the volume and intensity of sport participation in adolescent rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform* 2008;3:94-106.
- Coelho E Silva MJ, Moreira Carvalho H, Gonçalves CE, Figueiredo AJ, Elferink-Gemser MT, Philippaerts RM *et al*. Growth, maturation, functional capacities and sport-specific skills in 12-13 year-old basketball players. *J Sports Med Phys Fitness* 2010;50:174-81.
- Papaiakovou G, Giannakos A, Michailidis C, Patikas D, Bassa E, Kalopisis V *et al*. The effect of chronological age and gender on the development of sprint performance during childhood and puberty. *J Strength Cond Res* 2009;23:2568-73.
- Gabbett T, Kelly J, Ralph S, Driscoll D. Physiological and anthropometric characteristics of junior elite and sub-elite rugby league players, with special reference to starters and non-starters. *J Sci Med Sport* 2009;12:215-22.
- Hartwig TB, Naughton G, Searl J. Load, stress, and recovery in adolescent rugby union players during a competitive season. *J Sports Sci* 2009;27:1087-94.

**Funding.**—This study did not receive any external funding.

**Conflicts of interest.**—The authors state that there are no conflicts of interests to disclose, including any financial or personal relationships which other people or organizations, which could inappropriately influence their work.

**Acknowledgments.**—The authors wish to thank Karine SCHAAL and Dr Julien PISCIONE, research manager of the Fédération Française de rugby, for proofreading the manuscript and providing valuable critique and advice. We thank INSEP teams for their full support.

Received on October 24, 2011.

Accepted for publication on February 21, 2013.



## 14.2. Annexe 2



### How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience

Adrien Sedeaud, Andy Marc, Julien Schipman, et al.

*Br J Sports Med* 2012 46: 580-584 originally published online February 20, 2012

doi: 10.1136/bjsports-2011-090506

---

Updated information and services can be found at:

<http://bjsm.bmj.com/content/46/8/580.full.html>

---

*These include:*

#### References

This article cites 23 articles, 4 of which can be accessed free at:  
<http://bjsm.bmj.com/content/46/8/580.full.html#ref-list-1>

Article cited in:

<http://bjsm.bmj.com/content/46/8/580.full.html#related-urls>

#### Email alerting service

Receive free email alerts when new articles cite this article. Sign up in the box at the top right corner of the online article.

---

#### Topic Collections

Articles on similar topics can be found in the following collections

[Press releases](#) (6 articles)

[Rugby](#) (125 articles)

---

#### Notes



## How they won Rugby World Cup through height, mass and collective experience

Adrien Sedeaud,<sup>1,2</sup> Andy Marc,<sup>1</sup> Julien Schipman,<sup>1</sup> Muriel Tafflet,<sup>3</sup> Jean-Philippe Hager,<sup>4</sup> Jean-François Toussaint<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), Paris, France

<sup>2</sup>Université Paris-Descartes, Sorbonne Paris Cité, Paris, France

<sup>3</sup>Inserm, Unit 970, Paris, France

<sup>4</sup>French Rugby Federation, Marcoussis, France

### Correspondence to

Adrien Sedeaud, IRMES, 11 Avenue du tremblay, Paris 75012 France; adrien.sedeaud@insep.fr

Received 18 August 2011  
Accepted 20 October 2011  
Published Online First  
20 February 2012

### ABSTRACT

**Objectives** To investigate the evolution of anthropometric characteristics in World Cup rugby players and identify elements associated with performance.

**Design** Age, weight and height were collected for 2692 World Cup rugby players as well as rankings in each World Cup, and collective experience of winners, finalists, semifinalists and quarter finalists in comparison to the rest of the competitors. Anthropometric parameters were compared according to age and position (back and forwards).

**Results** From 1987 to 2007, forwards and backs have become heavier by 6.63 and 6.68 kg and taller by 0.61 and 1.09 cm, respectively. The collective experience of the forwards' pack is a value increasing with the final ranking attained, as well as the weight of forwards and the height of backs.

**Conclusions** For all Rugby World Cups, the highest performing teams have the tallest backs and heaviest forwards with the highest percentage of collective experience.

### INTRODUCTION

The advent of professionalism in rugby was accompanied by an increase in the body size of players,<sup>1</sup> observed either in the French championship or international matches during the Bledisloe Cup.<sup>2</sup> This trend follows the evolution of the constraints of this activity, in which the number of tackles or rucks per game increased by a factor of 4 in 30 years.<sup>2</sup> Eaves and Hughes<sup>3</sup> also showed that the incidence of rucks in five and six nations championships had increased from 62.4 events/game in 1988 to 134.4 in 2002. Austin *et al*<sup>4</sup> suggest that the development of modern rugby union has resulted in an increase in high-intensity activity and has become more physically demanding due to increases in total duration and speed of play.<sup>3</sup> Thus, increased mass and height are desirable characteristics, such as in American football where the largest and most powerful players are selected.<sup>5</sup> Indeed, overall size appears as a predictor of efficiency<sup>6</sup>: a strong association exists between mass, height and the individual and collective performances. Teams with the tallest and heaviest players outperform others in the 1999 Rugby World Cup.<sup>6</sup> However, rugby union generates many phases of contact, tackling, ruck, maul and scrum, which necessitate various physical demands<sup>7-9</sup> requiring players to participate in intensive efforts interspersed with some periods of lower intensity.<sup>10</sup> In fact, rugby performance involves a large number of

parameters dependent on the specific constraints of the activity. Among these, strength, speed, aerobic and anaerobic power, ability to change direction and sport-specific attributes are influential.<sup>11</sup> Performance is also related to collective efficacy. Indeed, groups with a strong sense of collective efficacy are more likely to succeed than those who do not share this particular attribute<sup>12</sup> and maintain their group performance longer.<sup>13</sup> In other sports such as soccer, a greater percentage of new recruits is associated with a lower number of points scored per game.<sup>14</sup> In rugby, the score of collective efficacy has been estimated to account for 22% of the variance in positive affect in prematch.<sup>15</sup>

As rugby becomes more physically demanding,<sup>7</sup> we hypothesised that players' mass, height and collective experience are all crucial parameters in World Cup performance progression.

### METHODS

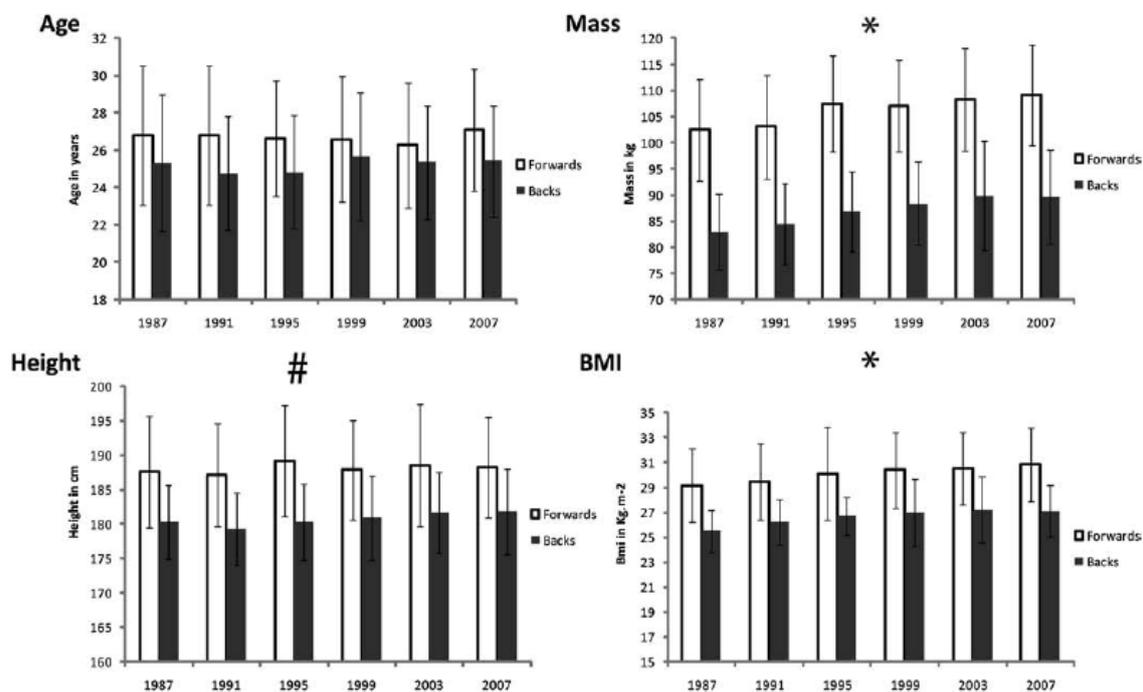
This study aimed to investigate changes in the height and mass of rugby players who took part in all Rugby World Cups and identify elements associated with higher performance.

### Ethics

This study 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). For these reasons, it is not necessary to obtain informed consent from the athletes evaluated. This study is designed and monitored by the IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et Epidémiologique du Sport) scientific committee.

### Data collection

Data for age, mass and height were collected for all players who participated in the Rugby World Cup from 1987 to 2007. Data were collected from official sites of national teams such as [www.ffr.fr](http://www.ffr.fr), [www.allblacks.com](http://www.allblacks.com) and [www.fijirugby.com](http://www.fijirugby.com), and cross-classified by various sources such as [www.itsrugby.fr](http://www.itsrugby.fr), [www.lionsrugby.com](http://www.lionsrugby.com) or [www.rugbyrama.fr](http://www.rugbyrama.fr). The annual version of Rugbyrama website collects official data (for age, mass and sizes) provided by the clubs. These data were derived from the longitudinal follow-up of players, with measurements done by each team physician.



**Figure 1** Evolution of the age, height, mass and BMI represented by mean and SD of new selected World Cups rugby players. ANOVA\*= $p < 0.05$  for forwards and backs, ANOVA#= $p < 0.05$  for backs only. For all World Cups, forwards and backs were significantly different in age, height, mass and BMI.

### Study design

Players were separated in two populations: backs (player numbers 9 through 15), and forwards (player numbers 1 through 8).

Each team performance was analysed according to age (in years), and biometric parameters (height in centimetres, mass in kilograms and body mass index (BMI) in  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) of both categories.

Analysis of the entire team was performed, regrouping all players within a team, both starters and substitutes. We analysed all the selected players (starters and substitutes), as a World Cup is won with the entire team, as players get replaced within matches and from match to match.

Analyses were also carried out for international rookies (international rookies: rugby players participating for the first time at World Cup).

Collective experience was defined as the percentage of players in each team who participated in the previous World Cup:

$$\% \text{ of collective experience for forwards} = \frac{N \text{ forwards who participate in world cup before}}{N \text{ forwards}} \times 100$$

We analysed collective experience, such as mass and height, according to player position (back, forward) and also according to the level reached by each team: winners, finalists, semi-finalists and quarter-finalists of World Cup versus the rest of competitors.

### Statistical analysis

Percentages of collective experience were compared by  $\chi^2$  test. Evolutions of biometric parameters were compared over the six World Cups, between forwards and backs, and according to final ranking. Biometric parameters between categories

were compared by Student's *t* tests. The changes of parameters between World Cups were tested using analysis of variance, and with multiple linear regression to test the time effect. The level of significance was set at  $p = 0.05$ .

### RESULTS

The sample population is composed of 2692 players, including 1457 forwards and 1235 backs. New internationals include 1044 forwards and 866 backs.

#### Evolution of internationals' rookies

For all World Cups age, height, mass and BMI are significantly higher for forwards than for backs (figure 1).

There is a significant evolutionary trend for increased mass and BMI, for forwards and backs as well as increased height in backs. Biometric characteristics of players increase between each World Cup, by 1.34 kg and 0.33  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  on average for forwards, and by 1.46 kg and 0.30  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$  for backs (table 1).

#### Mass as a determinant of performance

For all World Cups, the forwards in winners' teams, finalists, semi-finalists and quarter-finalists are significantly heavier than forwards of the other teams (figure 2). Indeed the mean ( $\pm$ SD) mass of forwards whose teams win the World Cup is 108.5 ( $\pm$ 7.9) kg while the rest of competitors weight only 106.1 ( $\pm$ 9.3) kg. For backs, we also see this significant trend in semi-finalists and quarter-finalists, but the trend did not quite reach significance for winners and finalists ( $p = 0.055$  and 0.072, respectively). Backs whose teams reach quarter-finals weigh 88.3 ( $\pm$ 7.7) kg while backs whose teams do not reach quarter-finals weigh 85.6 ( $\pm$ 8.1) kg.

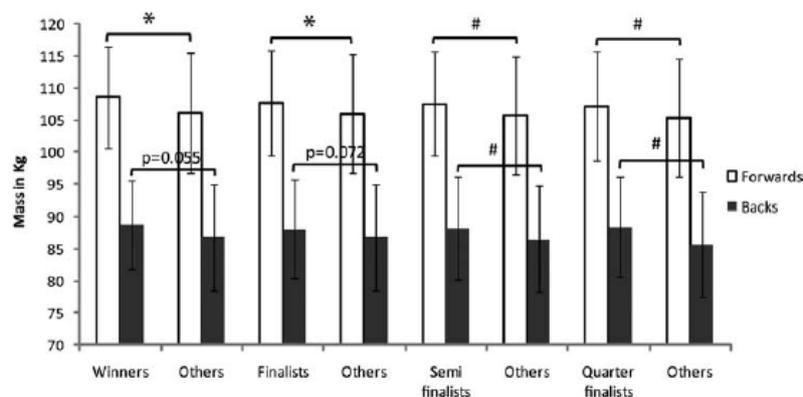
## Original article

**Table 1** ANOVA and linear regression for backs and forwards

	Means						ANOVA		ANOVA Adjusted for age		Trend (adjusted for age) for Rugby World Cup			
	1987	1991	1995	1999	2003	2007	F value	p	F value	p	t value	p	Linear coefficient*	Std (coeff)
<b>Forwards</b>														
N	111	136	137	241	216	203								
Mass	102,42	103,1	107,45	107,03	108,30	109,05	13,17	<0,0001	13,16	<0,0001	57,11	<0,0001	+1,34	0,18
Height	187,6	187,15	189,17	187,89	188,52	188,21	1,29	0,26	1,22	0,3	1,09	0,2746	0,16	0,14
BMI	29,17	29,50	30,10	30,41	30,56	30,85	7,1	<0,0001	7,11	<0,0001	34,12	<0,0001	+0,33	0,06
Age	26,79	26,80	26,62	26,59	26,25	27,08	1,38	0,23						
<b>Backs</b>														
N	95	114	104	196	186	171								
Mass	82,96	84,46	86,88	88,44	89,88	89,64	14,9	<0,0001	15,92	<0,0001	72,5	<0,0001	+1,46	0,17
Height	180,31	179,32	180,27	180,93	181,66	181,84	3,75	0,0023	4,21	0,0009	16,33	<0,0001	+0,48	0,12
BMI	25,50	26,25	26,70	27,01	27,21	27,09	13,9	<0,0001	14,24	<0,0001	57,4	<0,0001	+0,30	0,04
Age	25,33	24,75	24,83	25,67	25,37	25,41	1,75	0,1203						

\*By 4 years unit

ANOVA, analysis of variance; BMI, body mass index

**Figure 2** Mass in mean and SD of World Cups' winners, finalists, semifinalists and quarter-finalists versus rest of competitors.\* $p < 0.05$  and # $p < 0.01$ .**Height as a determinant of performance**

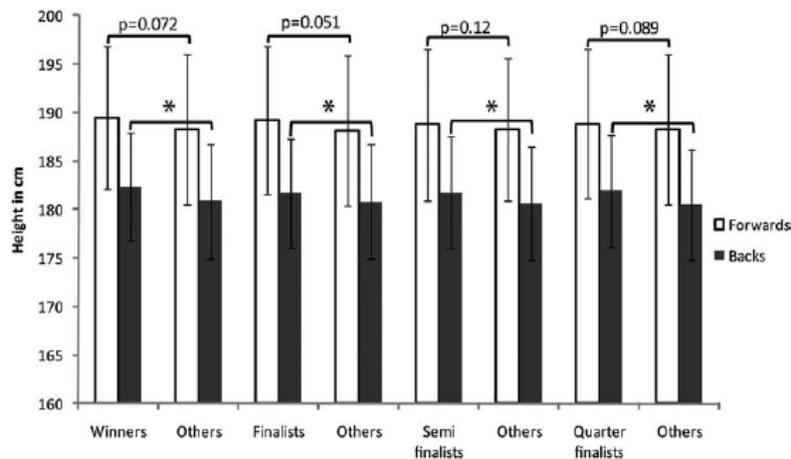
For all World Cups, the backs in winners' teams, finalists, semifinalists and quarter-finalists are significantly taller than backs of the other teams (figure 3). Indeed the height of backs whose teams win World Cup is 182.4 ( $\pm 5.4$ ) cm, while it is only 180.9 ( $\pm 5.8$ ) cm for the rest of competitors. In forwards, we observe a similar trend that did not reach the accepted significance level (winners vs others  $p = 0.072$ , finalists vs others  $p = 0.051$ , semifinalists vs others  $p = 0.12$ , quarter finalist vs others  $p = 0.089$ ).

**Collective experience as a determinant of performance**

For all World Cups, forwards of the winning team have a significantly greater collective experience than forwards of all other teams: 39.6% for victorious teams' forwards and 31.7% for forwards of the other teams (figure 4). In addition, collective experience of forwards whose teams participated in a final, semifinal and quarter-final is also significantly higher than those teams who failed to qualify for these rounds. For example, 38.1% of finalists' forwards have already played a World Cup against 31.1% in forwards of the other teams.

**DISCUSSION**

In this study, we find that between 1987 and 2007, mean mass and BMI of all forwards and backs increased significantly in the Rugby World Cups. This confirms the trends observed since the introduction of professionalism, in French rugby players, or those taking part in the Bledisloe Cup,<sup>2</sup> or emerging teams of international rugby.<sup>16</sup> Given the constraints of the game which directs the play towards more and more physical confrontations, rugby becomes a sport where heavy players become increasingly important: the maximisation of builds and the quest for 'super-sizes' are inherent to international level rugby, as well as in other sports.<sup>5</sup> Indeed, development of lean body mass is desirable in rugby to increase speed, strength and consequently power.<sup>17,18</sup> The increases in mass and BMI can be explained by increases in training load coupled with a nutritional follow-up, and for some and sporadically, through the use of anabolic steroids.<sup>19</sup> Indeed, the World Anti-Doping Agency in its annual report highlights that 39 of the 5725 rugby players were tested positive.<sup>19</sup> This low percentage suggests that this phenomenon is not more prominent in rugby than in other sports.



**Figure 3** Height in mean and SD of World Cups' winners, finalists, semifinalists and quarter-finalists versus rest of competitors. \* $p < 0.05$ .

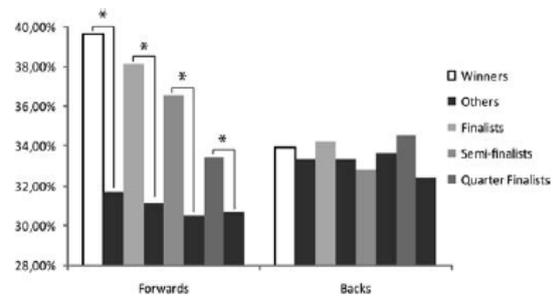
Changing rules also drive changes in the size of players. Rules generate the game, which in turn generates the morphology requirements. Thus, the increase in physical confrontation leads to a quest for super-size players.

For all World Cups studied here, forwards were significantly older, taller, heavier and with larger BMI than backs, a result consistent with previous studies.<sup>1 20 21</sup> This is principally explained by the profile of these positions: forwards spend significantly more time tackling<sup>22 23</sup> and in contact phases<sup>1 22</sup> and high-intensity activities than backs.<sup>23</sup> Moreover, being heavier and larger allows them to generate and tolerate greater impacts and to provide strength and power during the phases of scrums, rucks and mauls.

We show, in all World Cups, that the mass of forwards is one of the determinants of team performance in rugby. Indeed, teams who win a World Cup, or reach finals, semifinals and quarter-finals, have heavier forwards than the other teams, as already observed in the 1999 Rugby World Cup.<sup>6</sup> In addition, we observe the same trend in backs. Rugby performance is of course more complex and multifactorial. In addition to energy resources and physical skills (strength, rate of force development, acceleration, power, endurance) considered as determinants of performance in rugby, some, but not all, of these qualities may be inherent to larger players.<sup>17 18</sup> Indeed, as shown by Bejan *et al*, in many species including humans, force, speed and power increase with mass.<sup>24</sup> Even though other skills such as dexterity, technical address, tactical and psychological qualities may be equally important, a criterion as simple as body mass remains a major parameter associated with success in the final of the World Cup.

Teams that either win a World Cup, or reach finals, semifinals and quarter-finals, are also characterised by taller backs than the others. These data are consistent with a previous study<sup>6</sup> reporting that the 1999 Rugby World Cup finalist squads were taller than other competitors. Finding backs participating in the later matches of the tournament as taller than their counterparts can be explained by the specificities of their positions. Indeed, being taller confers advantages at the highlights of the game (ie, receptions under kicks and protection in isolated rucks in wait for the forwards' support).

Another key result of this study is showing that winners, finalists, semifinalists and quarter-finalists have forwards with a superior collective experience compared with other teams.



**Figure 4** Percentage of collective experience by positions of teams that won, participated in a final, semifinal or quarter-final versus rest of competitors. \* $p < 0.05$ .

Collective experience gained from previous World Cups and the four competition seasons between them is a performance factor for forwards. Moreover, this percentage grows from quarter-finalist teams (33.4%) to the winning teams (39.6%). Collective experience of forwards gives a clear advantage during phases of collective combat. The art of working together, sharing the action either on offence or defence is the essence of rugby. The collective investment and shared effort in all forwards' actions is crucial, whether in rucks to keep the ball, synchronisation during line-out, maul for placement, collective push and orientation in scrums. Containing and guiding teammates during scrums starts with a collective link, placement and work throughout the push. This element of game combines physical skill and a strong complicity, acquired over the years. Collectively adapting to adverse scrums, providing a common effort, direct scrum pressure, meeting together in a difficult situation requires a shared knowledge and combined action. This action knowledge is central to forwards' play and is apparently acquired more slowly. This may be why teams winning the World Cup have forwards with a collective experience significantly higher than those which do not win.

We show that, some factors like size and experience might be predictors of success. However, it is probable that there are other factors that explain why only four countries have ever won the Rugby World Cup. Indeed, winning teams in a Rugby World Cup may also owe their victory to their nation's economic, historical, political and technological investment in this sport.<sup>25</sup>

## Original article

## CONCLUSION

We show that forwards and backs are becoming heavier from one World Cup to the next. Although performance in rugby is complex and multifactorial, simple factors as mass and height are discriminatory in the armament race. In fact, teams with heavier forwards and taller backs perform better than others. In addition, teams that win a World Cup, arrived in finals, semifinals and quarter-finals have forwards with greater collective experience than those who do not participate in these matches.

**Contributors** Designed research: AS, JFT. Performed research: AS, AM, JS, MT, JPH, JFT. Analysed data: AS, AM, JS, MT, JPH, JFT. AS, JFT wrote paper which was critically revised for intellectual content by all co-authors.

**Acknowledgements** The authors thank Karine Schaal for proofreading the manuscript and providing valuable critique and advice. The authors thank INSEP teams for their full support.

**Competing interests** None.

**Provenance and peer review** Not commissioned; externally peer reviewed.

## REFERENCES

1. **Duthie G**, Pyne D, Hooper S. Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Med* 2003;**33**:973–91.
2. **Quarrie KL**, Hopkins WG. Changes in player characteristics and match activities in Bledisloe Cup rugby union from 1972 to 2004. *J Sports Sci* 2007;**25**:895–903.
3. **Eaves S**, Hughes M. Patterns of play of international rugby union teams before and after the introduction of professional status. *Int J Perform Anal Sport* 2003;**3**:103–11.
4. **Austin D**, Gabbett T, Jenkins D. The physical demands of Super 14 rugby union. *J Sci Med Sport* 2011;**14**:259–63.
5. **Norton K**, Olds T. Morphological evolution of athletes over the 20<sup>th</sup> century: causes and consequences. *Sports Med* 2001;**31**:763–83.
6. **Olds T**. The evolution of physique in male rugby union players in the twentieth century. *J Sports Sci* 2001;**19**:253–62.
7. **Brooks JH**, Kemp SP. Recent trends in rugby union injuries. *Clin Sports Med* 2008;**27**:51–73, vii–viii.
8. **Mellalieu S**, Trewartha G, Stokes K. Science and rugby union. *J Sports Sci* 2008;**26**:791–4.
9. **Duthie GM**. A framework for the physical development of elite rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform* 2006;**1**:2–13.
10. **Cunniffe B**, Proctor W, Baker JS, et al. An evaluation of the physiological demands of elite rugby union using Global Positioning System tracking software. *J Strength Cond Res* 2009;**23**:1195–203.
11. **Argus CK**, Gill ND, Keogh JW, et al. Changes in strength, power, and steroid hormones during a professional rugby union competition. *J Strength Cond Res* 2009;**23**:1583–92.
12. **Goncalo JA**, Polman E, Maslach C. Can confidence come too soon? collective efficacy, conflict and group performance over time. *Organ Behav Hum Decis Process* 2010;**113**:13–24.
13. **Greenlees IA**, Graydon JK, Maynard IW. The impact of collective efficacy beliefs on effort and persistence in a group task. *J Sports Sci* 1999;**17**:151–8.
14. **Poli R**, Ravanel L, Besson R. Annual review of the European football players' labour market 2010.
15. **Greenlees IA**, Nunn RL, Graydon JK, et al. The relationship between collective efficacy and precompetitive affect in rugby players: testing Bandura's model of collective efficacy. *Percept Mot Skills* 1999;**89**:431–40.
16. **Babic Z**, Misigoj-Durakovic M, Matasic H, et al. Croatian rugby project—Part I. Anthropometric characteristics, body composition and constitution. *J Sports Med Phys Fitness* 2001;**41**:250–5.
17. **Bell W**. Body composition of rugby union football players. *Br J Sports Med* 1979;**13**:19–23.
18. **Duthie GM**, Pyne DB, Hopkins WG, et al. Anthropometry profiles of elite rugby players: quantifying changes in lean mass. *Br J Sports Med* 2006;**40**:202–7.
19. World Anti-Doping Agency. Adverse Analytical Findings and Atypical Findings Reported by Accredited Laboratories 2009.
20. **Quarrie KL**, Handcock P, Waller AE, et al. The New Zealand rugby injury and performance project. III. Anthropometric and physical performance characteristics of players. *Br J Sports Med* 1995;**29**:263–70.
21. **Maso F**. Exigences physiologiques nécessaires à la pratique de rugby de haut niveau. Physiological features of rugby players of French team. *Science & Sports* 2002;**17**:297–301.
22. **Roberts SP**, Trewartha G, Higgitt RJ, et al. The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci* 2008;**26**:825–33.
23. **Eaton C**, George K. Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I: Empirical movement analysis data. *Physical Therapy in Sport* 2006;**7**:22–9.
24. **Bejan A**, Marden JH. Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying. *J Exp Biol* 2006;**209**:238–48.
25. **Guillaume M**, Helou NE, Nassif H, et al. Success in developing regions: world records evolution through a geopolitical prism. *PLoS ONE* 2009;**4**:e7573.

### 14.3. Annexe 3

*Journal of Sports Sciences*, 2013

Vol. 00, No. 00, 1–9, <http://dx.doi.org/10.1080/02640414.2013.835436>



## 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 reduction 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, Falavero, & Guidi, 2008; Macarthur & North, 2005) and environmental

factors that affect all athletes (El Helou et al., 2012; Ely, Cheuvront, 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,

Correspondence: Andy Marc, Irmes (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), Insep (Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance), 11 avenue du tremblay, Paris, France. E-mail: [andy.marc@insep.fr](mailto:andy.marc@insep.fr)

2 *A. Marc et al.*

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	***		*	*	*	
	Oceania	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	
	Oceania	4.76 ± 0.09	***		***	***	NS	0.14

*Note:*

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).

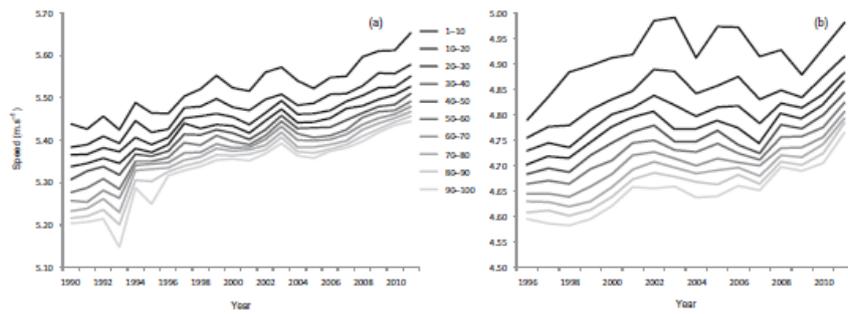
4 *A. Marc et al.*

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  $5.63$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

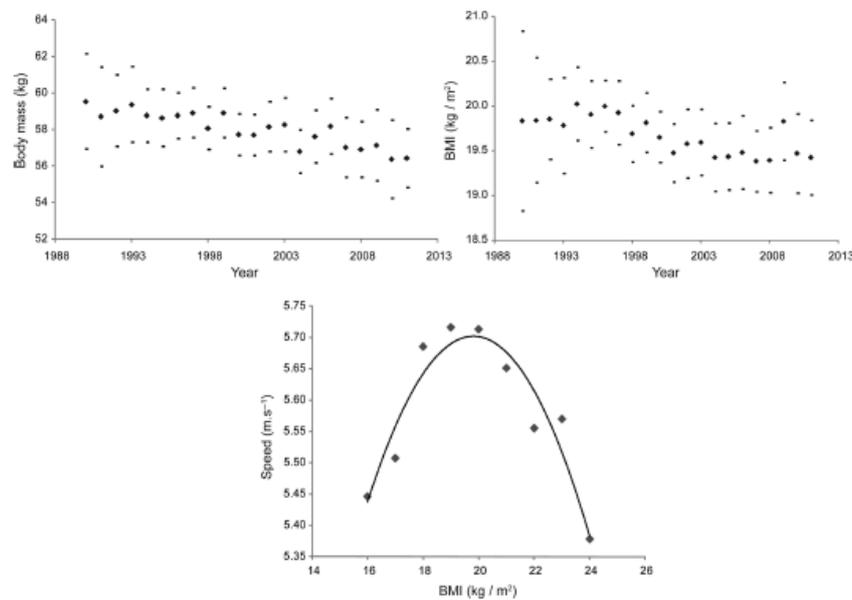


Figure 3. Mean body mass (a) and BMI (b) of the Top 100 men runners and its standard deviation by season (1990 to 2011) (c) Race speed record of the Top 100 men runners by BMI. Modelling function:  $y = -1.4387 + 0.7208x - 0.0182x^2$  and  $R^2 = 0.89$ .

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  $\text{kg}/\text{m}^2$ . 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  $19.8 \text{ kg}/\text{m}^2$  for a maximal speed of  $5.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Equivalents for women were  $18.2 \text{ kg}/\text{m}^2$  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

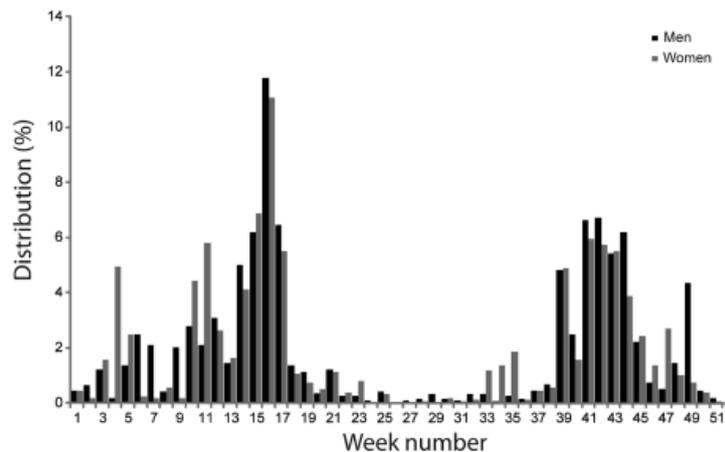


Figure 4. Percentage distributions of the 2200 performances collected from the top 100 of each year of the season (1990 to 2011) for men represented by black columns. Percentage distributions of the 1600 performances collected from the top 100 of each year of the season (1996 to 2011) for women represented 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°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.rrs.net/>
- Berthelot, G., Tafflet, M., El Helou, N., Len, S., Escolano, S., Guillaume, M., et al. (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., Jouven, X., et al. (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., et al. (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., et al. (2012). Impact of environmental parameters on marathon running performance. *PLoS ONE*, 7(5), e37407.
- Ely, M. R., Chevront, 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.). Sage.
- 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., et al. (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., et al. (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., et al. (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., et al. (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.

