



**HAL**  
open science

# Les stratégies et l'environnement dans la performance sportive de haut niveau en triathlon

Thibaut Ledanois

► **To cite this version:**

Thibaut Ledanois. Les stratégies et l'environnement dans la performance sportive de haut niveau en triathlon. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Paris Cité, 2023. Français. NNT : 2023UNIP7101 . tel-04556826

**HAL Id: tel-04556826**

**<https://theses.hal.science/tel-04556826>**

Submitted on 23 Apr 2024

**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.

Université Paris Cité

École doctorale Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain  
(ED 566)

Spécialité : Sciences du sport

Thèse

En vue de l'obtention du grade de Docteur d'Université Paris Cité

---

**LES STRATEGIES ET L'ENVIRONNEMENT DANS LA  
PERFORMANCE SPORTIVE DE HAUT NIVEAU EN TRIATHLON**

---

Par Thibaut LEDANOIS

*Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport – EA 7329*

*Dirigée par Jean-François TOUSSAINT*

Présentée et soutenue publiquement le 18 décembre 2023

Devant le jury composé de :

<b>Romuald Lepers</b>	(Rapporteur)	Professeur des Universités	Université de Bourgogne
<b>Thierry Bernard</b>	(Rapporteur)	Maître de conférence Universitaire	Université de Toulon
<b>Veronica Vleck</b>	(Examineur)	Enseignant-chercheur	Université de Lisbonne
<b>Anne-Marie Heugas De Panafieu</b>	(Examineur)	Maître de conférence Universitaire	Université de Paris-Saclay
<b>Edith Filaire</b>	(Examineur)	Professeur des Universités	Université d'Orléans
<b>Jean-François Toussaint</b>	(Directeur)	PU-PH	Université Paris Cité
<b>Sébastien Libicz</b>	(Membre invité)	Conseiller Technique National - PhD	Fédération Française de Triathlon

---

## LES STRATEGIES ET L'ENVIRONNEMENT DANS LA PERFORMANCE SPORTIVE DE HAUT NIVEAU EN TRIATHLON

---

Ce travail de thèse se concentre sur l'analyse des facteurs interindividuels de la performance et de leurs liens avec les facteurs environnementaux dans la discipline du triathlon, en particulier sur les formats de triathlon présents aux Jeux Olympiques. Les performances dans les courses de triathlon, où les triathlètes interagissent les uns avec les autres, comme c'est le cas sur les parcours de triathlon de courte distance (super-sprint, sprint et standard), dépendent de l'utilisation optimale des capacités individuelles ainsi que de l'adaptation de l'effort à la dynamique de la course.

La discipline du triathlon courte distance a évolué sur le plan réglementaire et technologique au cours des vingt dernières années. Par conséquent, l'objectif de cette recherche était de comprendre les dynamiques de course sur ces formats courts en fonction des profils de triathlètes présents, et de quantifier les niveaux de performance de chacun en tenant compte de la concurrence, qui est le paramètre le plus similaire entre chaque course.

Les premières études (1 et 2) se sont penchées sur le format novateur du relais mixte, qui a été introduit aux Jeux Olympiques de Tokyo 2020. Ce format ultra-court propose une dynamique de course axée sur la préservation de la position et implique une proximité élevée entre les athlètes. Nous avons ainsi observé les stratégies mises en place par les équipes et identifié les profils de triathlètes correspondant à chaque relais.

Dans un second temps, nos recherches se sont orientées vers le format standard (études 3 et 4), également présent aux Jeux Olympiques et obligatoirement concouru par les athlètes du relais. Dans ces études, nous avons cherché à estimer le niveau de chaque athlète en utilisant un système d'échange de points en fonction des probabilités de victoire et de défaite entre chaque paire d'athlètes. Ce système nous a permis d'évaluer la densité de la concurrence lors d'une course et la performance cible d'un athlète. De plus, en le reliant à la typologie des parcours, nous avons pu observer les dynamiques de groupe en course et estimer la probabilité de réussite d'une échappée à l'issue de la natation et de la partie cycliste.

Mots clés : *Triathlon, Analyse de la performance, Olympiques, Dynamique de course, Relais mixte*

---

## STRATEGIES AND THE ENVIRONMENT IN TOP-LEVEL SPORTS PERFORMANCE IN TRIATHLON

---

This thesis work focuses on the analysis of interindividual factors of performance and their relationships with environmental factors in the discipline of triathlon, particularly in the triathlon formats featured in the Olympic Games. Performances in triathlon races, where triathletes interact with each other, as is the case in short-distance triathlon courses (super-sprint, sprint, and standard), depend on the optimal use of individual capabilities as well as the adaptation of effort to the race dynamics. The discipline of short-distance triathlon has evolved in terms of regulations and technology over the past twenty years. Therefore, the objective of this research was to understand the race dynamics in these short formats based on the profiles of triathletes present and to quantify the performance levels of each, considering the competition, which is the most similar parameter in each race. The initial studies (1 and 2) focused on the innovative mixed relay format, which was introduced in the 2020 Tokyo Olympic Games. This ultra-short format offers a race dynamic focused on preserving position and involves high proximity between athletes. We observed the strategies implemented by the teams and identified the triathlete profiles corresponding to each relay. Subsequently, our research shifted towards the standard format (studies 3 and 4), also featured in the Olympics and mandatory for relay athletes. In these studies, we aimed to estimate the level of each athlete using a points exchange system based on the probabilities of victory and defeat between each pair of athletes. This system allowed us to assess the competition density during a race and the target performance of an athlete. Furthermore, by linking it to the course typology, we could observe group dynamics during the race and estimate the probability of a successful breakaway after the swimming and cycling segments.

Keywords: Triathlon, Performance analysis, Olympics, Race dynamics, Mixed relay

## Remerciements

---

*« Veux-tu avoir la vie facile ? Reste toujours près du troupeau,  
et oublie toi en lui. »*

*Friedrich Nietzsche, Ainsi parlait Zarathoustra*

## Communication scientifique

---

### Publications en relecture ou acceptées dans des revues internationales à comité de lecture

**Ledanois T.**, Hamri I., De Larochelambert Q., Libicz S, Toussaint JF. & Sedeaud A. Cut-off value in prediction of success in triathlon mixed team relay. *Frontiers in Sports and Active Living*.2023, 5:1096272. doi: 10.3389/fspor.2023.1096272

Pla R, **Ledanois T**, Simbana ED, et al. Spatial-temporal variables for swimming coaches: A comparison study between video and TritonWear sensor. *International Journal of Sports Science & Coaching*. 2021;16(6):1271-1280. doi:10.1177/17479541211013755

**Ledanois T.**, Fouillot C., Gobe C., Libicz S., Sedeaud A. & Toussaint JF., A Estimation of race scenarios in standard triathlon according to level density. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*. Under review.

### Communications dans des congrès internationaux

**Ledanois T.**, Leroy A., Marc A., Lalire P., Toussaint JF., Dynamique de groupe en triathlon, XII Symposium de l'IRMES – 10ème Congrès SFMES-SFTS, 2017, Marseille.

**Ledanois T.**, Saulière G., Sedeaud A., Toussaint JF., Caractérisation des parcours et des performances en triathlon, XIII Symposium de l'IRMES – 11ème Congrès SFMES-SFTS, 2018, Le Havre.

**Ledanois T.**, Analyse de la concurrence sur la scène internationale, Ma thèse en 180 secondes. Journées de valorisation de la recherche, INSEP-Paris, 2018.

**Ledanois T.**, Les stratégies et l'environnement dans la performance sportive de haut niveau : triathlon, 18<sup>e</sup> Congrès international de l'ACAPS, 2019, Paris

**Ledanois T.**, Fouillot C., Gobe C., Libicz S., Sedeaud A. & Toussaint JF., A Estimation of race scenarios in standard triathlon according to level density, 53èmes Journées de Statistique de la société Française de Statistiques, 2022, Lyon.

**Ledanois T.**, Hamri I., De Larochelambert Q., Libicz S, Toussaint JF. & Sedeaud A. Cut-off value in prediction of success in triathlon mixed team relay. 27<sup>th</sup> congress of *European College of Sport Science*, 2022, Seville

### **Chapitre de livre**

**Ledanois T**, Le développement de la force dans les sports à dominante aérobie comme facteur d'individualisation de l'entraînement in « Individualisation de l'entraînement : exemples dans le sport de haut niveau ». (2022). Collection INSEP.

## Glossaire

---

API : interface de programmation d'application

CIO : Comité international olympique

ConChamp : Championnat continental

ConCup : Coupe continentale

DNF : Non-fini

DSQ : Disqualifié

FFTri : Fédération française de triathlon

OG : Jeux Olympiques

PC1/PC2 : Point de contrôle 1/Point de contrôle 2

REM : Relais-équipe mixte

SL : Seuil de lactate

SV : Seuil ventilatoire

TQO : Tournoi de qualification olympique

VO2max : Consommation maximale d'oxygène

WChamp : Championnat du monde

WCup : Coupe du monde

WTCS : World Triathlon Championship Series

XCO : Cross-country

## Liste des figures

---

Figure 1 - Triathlon International courte distance au calendrier World Triathlon en 2022 ....	16
Figure 2 - Pourcentage de temps par discipline et relais.....	42
Figure 3 - Temps de chaque relayeur par segment au regard du classement final.....	43
Figure 4 - Différence de temps à la tête de course pour chaque groupe.....	46
Figure 5 - Fréquence d'atteindre les états finaux.....	57
Figure 6 - Évolution de la magnitude d'effet du $V'$ de Cramer calculé pour chaque état final. .....	58
Figure 7 - Illustration de la différence de 4" formant l'écart entre 2 groupes .....	68
Figure 8 - Factor Map d'apprentissage non-supervisé (clustering) .....	73
Figure 9 - Indice de dispersion du rating des courses selon le scénario de natation .....	75
Figure 10 - Clustering des segments GPS .....	87
Figure 11 - Clustering des parcours .....	88
Figure 12 – Comparaison des pourcentages d'athlètes dans le groupe de tête. (A) Homme (B) Femme.....	89
Figure 13 - Scénario à l'issue de la première transition en fonction du type de parcours (Homme) .....	91
Figure 14 - Scénario à l'issue de la première transition en fonction du type de parcours (Femme) .....	92
Figure 15 - Scénario à l'issue du vélo en fonction du type de parcours (Homme).....	94
Figure 16 - Scénario à l'issue du vélo en fonction du type de parcours (Femme).....	95
Figure 17 - Histogramme de la répartition des points du classement triathlon dans la population en Aout 2023.....	108
Figure 18 - Tableau de bord de visualisation des classements et des scores calculées sur l'application au jour des Jeux de Tokyo 2020.....	114
Figure 19 - Application de composition des relais semi-automatique .....	115
Figure 20 - Tableau de suivi de performance sur l'ensemble de la carrière pour le format standard, sprint et relais comparé au podium Olympique et le TOP3 de chaque course.....	116
Figure 21 - Description du parcours cycliste sur l'épreuve des championnats d'Europe de Glasgow 2018 .....	117

## Liste des Tableaux

---

Tableau 1 - Temps le plus rapide dans chacune des disciplines du triathlon chez les hommes et les femmes élite lors des courses des championnats du monde 2018 (68).....	28
<i>Tableau 2 - p-value des t.test entre chaque temps par segments des groupes de relayeurs sur chaque portion de leurs relais. ....</i>	<i>44</i>
Tableau 3 - p-value des t.test du temps des triathlètes de même sexe pour chaque portion de relais. ....	45
<i>Tableau 4 - Classement moyen, temps et temps différentiels aux longs du relais .....</i>	<i>56</i>
Tableau 5 - Apprentissage non supervisé (clustering) de la composition du groupe.....	70
Tableau 6 - Nombre, temps total, écart de temps et rating selon le type de course.....	72
Tableau 7 - Classification semi-supervisée par la méthode S4VM avec K=3 .....	74
Tableau 8 - Estimation du scénario de la course olympique de Tokyo 2020.....	76

# Sommaire

---

1.	Introduction générale	15
1.1.	La genèse des courses à l'olympisme	15
1.2.	L'organisation de la saison	15
1.3.	La science et le triathlon	16
1.4.	Structuration du projet de thèse	17
1.5.	Objectifs	18
2.	Cadre théorique	20
2.1.	Dimension Individuelle	22
2.2.	Dimension stratégique	27
2.3.	Dimension tactique	29
3.	Hypothèses et objectifs de travail	35
4.	Cadre expérimental	38
4.1.	Étude 1 : Analyse du triathlon relais mixte	38
	Résumé	38
	Introduction	39
	Méthodes	40
	Résultats	41
	Discussion	46
	Conclusion	48
4.2.	Apports pour le terrain et continuité vers l'étude suivante	49
4.3.	Étude 2 : Impact de la position sur le classement final du relais mixte	50
	Résumé	50
	Introduction	51
	Méthodes	52
	Résultats	53
	Discussion	58
	Conclusion	62
	Applications pratiques	62
4.4.	Apports et continuité vers l'étude suivante	63

4.5.	Étude 3 : Estimation des scénarios de course en triathlon standard en fonction de la densité de niveau -----	64
	Résumé -----	64
	Introduction -----	65
	Méthodes -----	66
	Résultats-----	70
	Discussion -----	76
	Conclusion -----	80
4.6.	Apports, transfert vers le terrain et continuité -----	81
4.7.	Étude 4 : Estimation des scénarios de course selon le parcours et le niveau -	82
	Résumé -----	82
	Introduction -----	84
	Matériel et méthode -----	85
	Résultats-----	89
	Discussion -----	96
	Conclusion -----	98
	Application pratique-----	98
6.	Discussion Générale -----	101
6.1.	Dimension stratégique et individuelle -----	103
6.2.	Concurrence et Densité-----	106
6.3.	L'Impact des caractéristiques des parcours sur les dynamiques de groupe -	109
6.4.	Limites -----	111
6.5.	Application Pratique-----	113
7.	Conclusion -----	119
8.	Références bibliographiques -----	121

---

## **Introduction générale**

---

*« L'ordre ou le désordre dépendent de l'organisation, le courage ou la lâcheté des circonstances, la force ou la faiblesse des dispositions. »*

*Li Ch'uang : « Or, lorsque les troupes parviennent à se placer dans une situation favorable, le lâche est brave ; que la situation devienne désespérée, et les braves deviendront des lâches. Dans l'art de la guerre, il n'existe pas de règles fixes. Ces règles ne peuvent être établies que selon les circonstances ».*

*Sun Tzu, L'art de la Guerre (5,19)*

## 1. Introduction générale

### 1.1. La genèse des courses à l'olympisme

Le triathlon est né en 1975 à Fiesta - Island près de San Diego, (USA) sous sa forme d'enchaînement « Natation – vélo – course à pied » et est rendu populaire à Hawaï en 1978, considéré comme le berceau de la discipline avec la distance « Ironman » (3,8 km de natation, 180 km de cyclisme et 42 km en course à pied) (1). Cette distance sera alors considérée comme la référence et le triathlon sera assimilé à un sport extrême, une étiquette encore bien accrochée actuellement. Le développement du triathlon a été accéléré notamment par la création de « *International Triathlon Union* » en 1989 à Avignon, avec pour objectif de le faire reconnaître comme sport Olympique. Le format dit « Standard » (1,5 km de natation, 40 km de cyclisme et 10 km en course à pied) s'est ensuite imposé comme la distance de référence puisque choisie pour devenir discipline Olympique le 3 Septembre 1994 à partir des Jeux Olympiques de Sydney 2000. Cette ère moderne du triathlon marque le début d'un essor considérable avec une augmentation de la médiatisation et notamment des formats plus attrayants pour le public. Des formats plus courts et plus spectaculaires, comme le super-sprint qui compose le format relais mixte (4x4 : 4x 250-300m de natation, 6-8km de cyclisme, 1.6-2km course à pied), reconnu en 2017 comme épreuve olympique pour les Jeux olympiques de Tokyo 2020 (2). Le triathlon implique des interactions environnementales où le triathlète évolue selon ses sensations et l'auto-évaluation de son état physique (rapport aux corps), lors des différents modes de locomotion définis selon le règlement (rapport aux matériels). Cette évolution est aussi fondamentalement conditionnée par le rapport aux interactions avec les adversaires et les partenaires (rapport aux autres). Ces trois dimensions d'interactions font la complexité même de la compétition.

### 1.2. L'organisation de la saison

A ce jour, la saison sur format courte distance régit par World Triathlon se déroule sur les étapes de World Triathlon Championship Series (WTCS), World Cup (WCup) et Continental Cup (ConCup) (Figure 1). Ces étapes s'échelonnent de mars à novembre sur l'ensemble du territoire mondial, avec une majorité d'épreuves en Europe. A cela s'ajoutent, les compétitions majeures, les championnats du monde se disputant chaque année aux alentours

de septembre – octobre, les championnats continentaux et les Jeux olympiques. Ces deux dernières compétitions permettent d'attribuer le titre de champion du monde ou olympique à l'athlète remportant cette course (il en est de même pour les autres compétitions majeures). Alors que l'ensemble des WTCS, WCup et ConCup permettent de collecter des points (plus ou moins important selon le label) pour décerner le titre de vainqueur du classement Mondial à la fin de la saison.

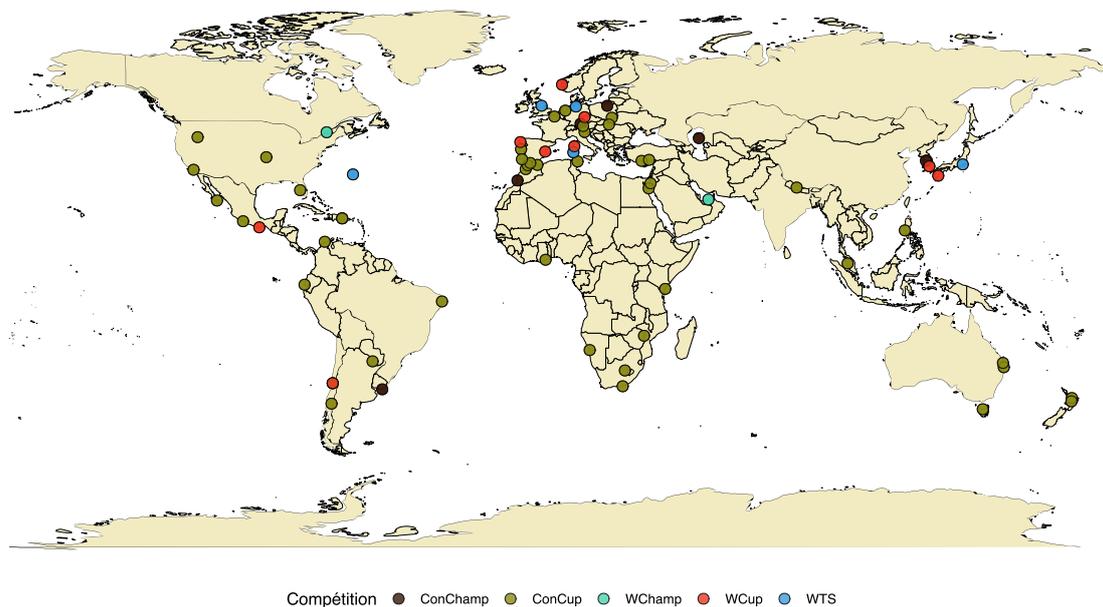


Figure 1 - Triathlon International courte distance au calendrier World Triathlon en 2022

### 1.3. La science et le triathlon

Depuis ses premières années, le triathlon a attiré l'attention des chercheurs et des entraîneurs, créant un lien profond avec la science. L'objectif majeur était d'examiner les aspects physiologiques et biomécaniques qui sous-tendent la performance tri athlétique, autant sur le format long distance que plus récemment sur les formats plus courts.

La consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ) a longtemps été considérée comme une référence en triathlon et en sport de longue durée (3–5). Toutefois, des études ont révélé que des athlètes présentant des valeurs similaires de  $VO_{2max}$  pouvaient avoir des performances très différentes (6). Cela a souligné le fait que d'autres facteurs influent sur la performance. Parmi ces facteurs, on compte l'efficacité énergétique, la capacité neuromusculaire, la stratégie et la dynamique de course. La gestion du rythme de course mise en avant

notamment dans les travaux de thèse de Le Meur (7) s'est avérée cruciale pour la compréhension de l'activité ;

Le triathlon est ainsi devenu un terrain recherche scientifique, où les chercheurs explorent les subtilités de la performance sportive. La valorisation de ces travaux est renforcée grâce à l'organisation de conférences telles que « Science and Triathlon » soutenues par World triathlon (Alicante 2011, Paris 2015, Edmonton 2017) ou encore grâce aux liens forts développés avec les staffs techniques. Cette relation profonde entre la science et le triathlon permet d'améliorer la compréhension de la physiologie et de la biomécanique humaine, tout en aidant les athlètes et les entraîneurs à optimiser leurs stratégies pour performer.

#### *1.4. Structuration du projet de thèse*

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire IRMES (Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport), Unité de recherche - Équipe d'Accueil 7329, à l'INSEP (Institut National du Sport de l'Expertise et de la Performance), en collaboration avec la Fédération Française de Triathlon (FFTri). Il a pour objectif d'optimiser la préparation des Jeux olympiques de Tokyo et de Paris 2024 des athlètes Français. Différents travaux ont été réalisés pour accompagner les équipes de France dans la préparation du relais mixte et des épreuves individuelles. La réalisation de cette thèse a donc été le fruit d'un travail collaboratif initié par la cellule « Mission d'Accompagnement et d'Expertise à la Performance » au sein de la FFTri avec l'appui d'Alexandre Dodu et Sébastien Libicz ainsi que de mon directeur de thèse, Jean- François Toussaint. Aujourd'hui, l'équipe de France fait partie des nations phares du triathlon mondial, notamment en ayant obtenu sa première médaille Olympique à Tokyo (3<sup>e</sup>) en 2021, et figure 6<sup>e</sup> au classement Olympique. Sur le plan individuel, 5 triathlètes masculins font partie du top 30 mondial et 5 triathlètes féminines font partie du top 50 mondial, qui totalisent 21 places sur les podiums internationaux, dont un champion du monde sur la saison 2023. Cet effectif reste toujours en quête d'un titre Olympique.

### *1.5. Objectifs*

Ce travail de thèse s'intéressera aux stratégies et à l'environnement de course en triathlon de haut niveau. C'est dans cette perspective que les questions autour des positions des triathlètes et de leur écart, de la densité sur la ligne de départ et du type de parcours seront abordés au regard de la structure de la course et de son résultat final.

Plus précisément, les écarts de temps entre les équipes se creusent progressivement tout au long du relais, adoptant une dynamique d'élimination progressive des équipes en queue de peloton, et suggérant une importance des relais 2 et 3 sur l'issue de la course. Par ailleurs, la probabilité de nager « groupé », « dispersé » ou avec « une échappée » se trouvera modifiée par le niveau au départ de la course. Le type de parcours cycliste quant à lui aura un effet sur la structure du peloton, offrant des dynamiques de courses différentes.

---

## **Cadre théorique**

---

## 2. Cadre théorique

L'intérêt pour la recherche en triathlon (8,9) s'est accru, mettant l'accent sur l'étude de la performance, des exigences physiologiques (10–13), et des stratégies d'allure (). Cette discipline exige un équilibre délicat entre trois disciplines distinctes : la natation, le cyclisme et la course à pied. Le fait d'enchaîner chacune de ces disciplines sollicite une sollicitation des différents systèmes énergétique (17,18) définis à une intensité de 65 à 80% de VO<sub>2</sub>max (19). La performance globale dépend donc de la capacité physiologique de l'athlète (20), associé à un ensemble de qualité tactique (15,21).

L'identification de la stratégie d'allure optimale (22,23) peut s'avérer plus difficile dans un sport multidisciplinaire que dans les sports à épreuve unique tels que la natation, le cyclisme ou la course à pied (8). Alors qu'il est aujourd'hui mise en avant qu'il faut maintenir une allure prudente et une dépense énergétique continue comme un éléments majeurs (24,25). Cette complexité découle des transitions entre les différentes disciplines du triathlon (nage, cyclisme, course à pied), des effets potentiels de la fatigue cumulative à chaque étape de l'épreuve. De plus, les différences physiques, techniques et tactiques entre ces disciplines ajoutent à la difficulté. De nombreux autres facteurs entrent également en jeu, notamment l'influence de l'aspiration, la distance de la course, les forces individuelles propres à chaque athlète dans chaque discipline, et les dynamiques course (25,26). Tous ces éléments contribuent à la complexité de la gestion de l'effort en triathlon de courte distance.

Les performances en triathlon sont influencées par diverses dimensions clés que nous allons tacher de détailler dans le chapitre suivant sous 3 parties :

**Dimension Individuelle :** Les aptitudes individuelles, telles que la qualité technique en natation, le rendement cycliste, la vitesse de course à pied, les capacités cardiorespiratoires de chaque triathlète, etc. jouent un rôle majeur dans la détermination de leur performance.

**Dimension Stratégique :** La stratégie consiste à planifier la course, en prenant en compte les conditions météorologiques, la topographie du parcours, et la connaissance des forces et

faiblesses de ses adversaires. Il s'agit également de décider quand pousser au maximum, quand économiser de l'énergie, et quand sprinter pour atteindre la ligne d'arrivée.

***Dimension Tactique :*** La tactique dans le triathlon englobe des aspects tels que le positionnement par rapport aux autres, la gestion des transitions, les choix de peloton, la gestion de l'effort sur le parcours en course à pied, la capacité à économiser de l'énergie tout au long de la course.

L'interaction complexe entre ces dimensions crée le paysage compétitif du triathlon. Les triathlètes qui maîtrisent ces aspects individuels, tactiques et stratégiques sont mieux préparés pour réaliser de meilleures performances dans ce sport.

## *2.1. Dimension Individuelle*

Divers facteurs influencent la performance des triathlètes d'élite, notamment leurs caractéristiques physiologiques, morphologiques, cognitives, leur aptitude à prendre des risques, et même leurs qualités physiques. Les recherches en sciences du sport ont souvent privilégié cette approche pour comprendre ce qui distingue les triathlètes de haut niveau.

### 2.1.1. La consommation maximale d'O<sub>2</sub> (VO<sub>2</sub> max)

Dans les sports d'endurance tels que le triathlon, la VO<sub>2</sub>max est largement reconnue comme une mesure essentielle pour évaluer les capacités cardio-respiratoires maximales. Elle correspond à la quantité maximale d'oxygène (O<sub>2</sub>) prélevée au niveau des poumons, transportée par le système cardiovasculaire, et utilisée par les cellules musculaires lors d'exercices intensifs, uniquement par voie oxydative (27,28). Des études ont montré que la VO<sub>2</sub>max était plus importante chez des athlètes entraînés en endurance tels que les cyclistes (29).

Bien que la VO<sub>2</sub>max soit un élément clé, elle ne constitue qu'un aspect parmi d'autres qui influencent la performance dans les épreuves d'endurance. Cette réalité devient évidente lorsqu'on observe des différences marquées de performance au sein de groupes d'athlètes partageant des niveaux de VO<sub>2</sub>max similaires (30,31). En d'autres termes, parmi des triathlètes affichant des niveaux de performance très semblables, on observe des valeurs de VO<sub>2</sub>max différentes. D'autres facteurs, notamment la réaction physiologique lors d'efforts sous-maximaux, peuvent jouer un rôle déterminant en course.

### 2.1.2. Les efforts sous-maximaux

La capacité à maintenir un pourcentage élevé de la VO<sub>2</sub>max pendant des efforts d'endurance est essentielle pour prédire la performance. Cependant, elle ne suffit pas à la prédire de manière fiable et ne paraît pas être le seul indicateur de performance. Les paramètres sous-maximaux tels que le seuil lactique et les seuils ventilatoires jouent un rôle crucial dans la compréhension de la performance dans les activités de longue durée (32), comme le triathlon.

#### 2.1.2.1 Le seuil ventilatoire

Le seuil ventilatoire (SV) est le point où la respiration augmente de manière disproportionnée par rapport à l'absorption d'oxygène (33,34), signalant un mécanisme physiologique visant à éliminer le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en excès dans le sang. Selon la définition de Wasserman et al (35), le seuil anaérobie représente le niveau d'intensité d'exercice au-delà duquel il y a un approvisionnement en oxygène sur le groupe musculaire actif, l'apport deviendrait insuffisant par rapport à leur demande métabolique. Cette accumulation de CO<sub>2</sub> peut refléter l'utilisation importante des voies énergétiques anaérobies pendant l'exercice.

Des études menées auprès de triathlètes de niveau sub-élite (36) ont révélé que le SV était significativement corrélé aux performances en course et en cyclisme, dépassant ainsi la valeur prédictive de la VO<sub>2</sub>max seule. L'analyse sur des formats de distance ont également indiqué que le SV était davantage corrélé à la performance de course que la VO<sub>2</sub>max seule (10).

#### 2.1.2.2 Le seuil de lactate :

Le seuil de lactate (SL), défini comme l'intensité d'exercice minimale où la production de lactate excède la capacité d'oxydation musculaire, est un paramètre crucial (37). Il se caractérise par une augmentation non linéaire de la concentration de lactate sanguin ([BLa]) avec l'augmentation de l'intensité de l'exercice, signalant le recours à l'apport d'énergie anaérobie lorsque la demande énergétique dépasse la capacité aérobie.

La principale détermination du seuil de lactate réside dans la capacité oxydative musculaire (38,39). Ainsi, la concentration de lactate sanguin sert d'indicateur indirect de l'activation des voies anaérobies. En d'autres termes, le SL dévoile le moment où les muscles basculent d'une dépendance à l'oxygène vers une production anaérobie de lactate, soulignant son rôle clé dans la performance sportive, en particulier dans les disciplines exigeant un équilibre délicat entre ces deux systèmes énergétiques.

Des études antérieures ont démontré que le SL (40) mesuré lors d'une épreuve de cyclisme de 40 km pouvait expliquer une grande partie de la variabilité des performances en triathlon. De plus, un SL précoce peut exercer un impact négatif sur la performance neuromusculaire (41). Cette constatation met en évidence l'importance de l'entraînement visant à améliorer la capacité tampon du lactate chez les triathlètes participant à des épreuves de courte distance,

notamment en format Sprint, où la précocité du seuil lactique a été associée à une détérioration de la performance neuromusculaire. Ainsi, une exploration plus approfondie de ces aspects dans le cadre du format REM est nécessaire pour mieux comprendre les exigences spécifiques de cette discipline et planifier des entraînements adaptés.

### 2.1.3. L'économie de course

L'efficacité du mouvement peut être décrite comme la relation entre l'apport d'énergie et le rendement mécanique qui en résulte. On estime qu'au cours de la locomotion humaine, l'efficacité mécanique de la course à pied et du cyclisme se situe entre 20 et 30 % (42), mais qu'elle n'est que de 5 à 9,5 % pour la natation (43).

Il existe toutefois des différences marquées entre les individus, de sorte que ceux qui ont la plus grande efficacité mécanique peuvent aller le plus vite pour la même dépense énergétique (44,45). En d'autres termes, à une vitesse de nage, de cyclisme ou de course à pied égale, l'individu ayant la plus grande économie de mouvement consomme une plus petite fraction de VO<sub>2</sub>max. Par conséquent, tout ajustement de l'entraînement qui améliore l'économie peut se traduire directement par une amélioration des performances.

Lors d'un triathlon la production d'énergie doit être soutenue pendant de longues périodes, l'économie de mouvement est par conséquent très importante pour un triathlète. En natation, une discipline techniquement exigeante, une comparaison a mis en avant que les nageurs ont une meilleure économie de mouvement que les triathlètes (44). Soit une différence de vitesse de nage de 1,17 m/sec pour les nageurs contre 0,95 m/sec pour les triathlètes. La distance parcourue par mouvement, sans différence de cadence, était respectivement de 1,23m contre 0,92m pour la nage en natation et en triathlon (44)

En cyclisme, la cadence peut influencer à la fois la capacité à produire de la puissance et le taux de consommation d'énergie. Les chercheurs ont souligné que la sélection de la cadence peut avoir une influence significative sur la performance des cyclistes (46,47). En général, les cyclistes expérimentés ont tendance à maintenir une cadence supérieure à 90 tour/min, tandis que les cyclistes novices préfèrent des taux de pédalage plus bas. Mais la cadence n'est pas question seulement d'expérience, elle varie également en fonction des braquets utilisés,

se situant généralement entre 70 et 100 tr/min (48). Une production aérobie maximale permet au cycliste d'utiliser une cadence plus élevée, ce qui se traduit dans le même temps par une production de puissance mécanique accrue (49). La cadence est également montrée comme ayant un impact sur l'efficacité de la force (force effectiveness) et l'efficacité brute (gross efficiency) du pédalage. L'efficacité de force est le rapport entre les forces dirigées à 90 degrés sur la manivelle et la force totale sur la pédale. Une technique de pédalage mécaniquement efficace implique qu'une grande partie de la force générée est dirigée perpendiculairement sur la manivelle, ce qui contribue au travail mécanique et limite les coûts énergétiques inutiles (50,51). Ce champ restant à clarifier car les relations sont complexes pour améliorer les performances des cyclistes. Le matériel, la position et la déclivité sont aussi à prendre en compte.

De nombreuses études en course à pied ont montré une relation étroite entre l'économie de course à des intensités sous-maximales et la performance en course. Chez les coureurs de fond, l'économie de mouvement était fortement corrélée à la performance, ainsi qu'à la VO<sub>2</sub>max (52). De plus, il a été observé que les coureurs de longue distance hautement entraînés avaient une meilleure économie de course que ceux de moindre niveau. Chez les triathlètes, l'évaluation de l'économie de course lors d'un test sur tapis roulant à 12km/h était significativement corrélée avec le temps de performance en course lors d'un triathlon demi-Ironman ( $r = 0,64$ ) (53).

Dans un triathlon, l'économie de la natation dépend principalement de la technique de nage du participant et n'est pas significativement affectée par l'exercice précédent, car la natation est généralement la première épreuve de la compétition. Cependant, en ce qui concerne la partie de cyclisme et course à pied, l'économie peut être influencée par plusieurs facteurs, notamment le niveau de technique et l'impact des segments précédents de la course. Sur la partie cycliste, les capacités de pilotage du vélo, de changement de vitesse et d'aérodynamisme sont notamment à considérer. La différence de performance en cyclisme (75 min sur ergocycle) et en course à pied (40min) avec et sans natation en amont (800m) a été étudiée. Les résultats ont montré une baisse de performance de 32 watt en vélo et une augmentation significative de 13% de VO<sub>2</sub>, indiquant une baisse d'économie de course (54).

Le développement des qualités techniques dans les 3 disciplines apparaît comme une évidence pour sauvegarder un maximum d'énergie.

#### 2.1.4. Cognition, Emotion et Expérience

De récentes recherches sur la psychologie du cyclisme élite, ont démontré l'importance des aspects cognitifs chez les sportifs d'endurance pour réguler leur comportement et optimiser leurs performances en compétition (55). Des facteurs tels que l'humeur, l'anxiété, la confiance en soi, la tolérance à la douleur, la concentration et les fonctions cognitives ont été identifiés comme des éléments influençant directement la performance. (55). (56) ont apporté un éclairage supplémentaire à l'importance des compétences cognitives, expliquant que les cyclistes doivent gérer leur dépense énergétique, leur effort et leur rythme, optimiser leur aérodynamisme par rapport à leurs adversaires et prendre des décisions en compétition.

Les athlètes ajustent leur rythme en fonction de leur niveau de fatigue anticipé et accumulé, de la déclivité, du temps de course, de la distance parcourue et de la conjecture de course. Il a été observé que la présence et le comportement des concurrents ont un effet sur la stratégie de course adoptée par un cycliste ; et des études suggèrent l'existence d'une influence liée au genre (57,58). Ces études étayent les arguments de (59,60) selon lesquels les athlètes sont des systèmes adaptatifs complexes dont les comportements sont régis par l'interaction entre la cognition et l'action, et qui régulent leur effort et leur dépense d'énergie en fonction des informations disponibles.

Les triathlètes établissent des stratégies appelées "pacing" (rythme) pour répartir alors subjectivement leurs ressources énergétiques tout au long de la course afin d'améliorer leurs performances (61,62). L'acceptation mentale de la difficulté d'effort perçue, associée à l'intensité d'exercice, doit être continuellement gérée en fonction des efforts encore à consentir sur le plan psycho-perceptuel (63)

Pour combler cela et assumer ces choix, l'expérience est un élément majeur de la gestion. (64) Foster et ses collaborateurs ont étudié la manière dont se construit la pré-programmation de l'intensité d'exercice. Ils ont mis en évidence le rôle essentiel de l'expérience dans l'amélioration de la stratégie de course. Pour un participant, l'augmentation de la confiance en sa capacité à terminer l'épreuve sans atteindre ses limites de tolérance de l'effort est le

moteur initial de cette amélioration de stratégie de course. La façon dont l'athlète gère l'intensité pendant une épreuve est fortement influencée par son expérience passée et les retours d'information qu'il reçoit en cours d'exercice. Cependant, il semble que pour parvenir à une stratégie de course optimale et stabilisée, un nombre considérable de répétitions, généralement plus de 6 essais, soit nécessaire (64).

L'ensemble de ces résultats suggèrent que les choix de course sont un mécanisme complexe où le cerveau de l'athlète ajuste constamment l'intensité de l'exercice en fonction de ses ressources physiologiques et psychologiques, et en anticipant le temps d'épuisement, le temps jusqu'à l'arrivée ainsi que la présence d'adversaire. De plus, l'expérience des situations (entraînement et compétition), aide l'athlète à identifier la stratégie optimale pour une épreuve donnée. L'expérience passée est un facteur clé pour ajuster la stratégie en comparant la difficulté perçue avec le plan prévu.

## *2.2. Dimension stratégique*

Lors des compétitions notamment dans des formats où l'aspiration est autorisée, les triathlètes ajustent constamment leur stratégie en réponse aux actions de leurs adversaires et à l'évolution de la situation ainsi que face à l'environnement (65–67). La dimension tactique fait référence aux caractéristiques découlant de cette interaction entre les concurrents, et aux actions qu'ils entreprennent en réponse à ce qu'il se passe. Il est important de comprendre les effets de la dynamique interpersonnelle sur les prises de décisions tactiques des triathlètes si l'on veut donner un sens à leurs performances dans des épreuves.

### *2.2.1. La durée d'épreuve*

La durée de l'épreuve est un facteur principal dans la gestion de l'allure et de l'intensité de l'effort. Les différences de durée de course influencent significativement les mécanismes responsables de la fatigue et in fine les intensités vitesse de déplacement.

L'influence de la durée d'exercice est primordiale sur l'allure en triathlon, que ce soit dans le choix de l'allure optimale ou dans celle effectivement adoptée (68–70) La demande métabolique engendré par la diversité de format est très différents dû au large éventail de distances, et donc de durée d'exercice (Tableau 1).

Les différences de durée de course semblent avoir un impact important sur les mécanismes de fatigue et, par conséquent, sur l'allure des athlètes (23). Une diminution progressive de la vitesse, ou allure, est observée dans les triathlons de distance olympique à Ironman, mais les raisons sous-jacentes peuvent varier (61,62)

	Swim		Bike		Run		Total	
	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female
Mixed relay	0:03:42	0:03:53	0:09:49	0:10:37	0:04:32	0:04:58	0:18:54	0:20:44
Sprint	0:08:54	0:09:25	0:29:10	0:31:21	0:13:59	0:15:48	0:53:24	0:58:06
Olympic	0:18:32	0:19:27	0:54:03	0:57:16	0:29:44	0:33:44	1:44:34	1:52:00
Half-Ironman	0:21:53	0:23:01	2:04:16	2:15:28	1:06:34	1:15:11	3:36:31	4:01:13
Ironman	0:46:29	0:48:14	4:09:06	4:26:07	2:41:31	2:55:22	7:52:39	8:26:18

*Tableau 1 - Temps le plus rapide dans chacune des disciplines du triathlon chez les hommes et les femmes élite lors des courses des championnats du monde 2018 (71)*

Les athlètes sur courte distance (relais à olympique) adoptent généralement une stratégie de départ rapide, particulièrement en natation, due à la nécessité d'une forte intensité initiale pour le placement (drafting) (11,62). Les études indiquent également que maintenir une allure régulière, malgré des conditions changeantes, est idéal pour les épreuves d'endurance (23,72). Malgré ces stratégies, des variations de puissance sont nécessaires pour faire face aux facteurs externes (conditions climatiques, circonstances de course, etc.), mais ces variations peuvent augmenter la demande physiologique et réduire la performance (73). Ainsi, adapter la vitesse pour équilibrer les ressources énergétiques peut être optimal dans certaines circonstances (25).

Ces différences de format et de distance qui amène à des intensités de travail différentes pourrait laisser à penser qu'il existe des profils différents d'athlètes pour

### 2.2.2. L'environnement

À ce jour aucune étude n'a investigué l'impact des facteurs environnementaux tels que les conditions météorologiques ou de dénivelé. Il semble tout de même tout de même non négligeable pour un sport pratiqué en extérieur de prendre en compte l'exposition aux aléas météorologique qui peuvent influencer les intensités d'effort.

Il a tout de même été mis en avant qu'un ajustement de la puissance développée face à la variation de contraintes extérieures permet d'obtenir de meilleures performances en cyclisme contre la montre, notamment en montée (74) ou face au vent (75). Selon un test effectué en laboratoire, une augmentation de  $\pm 5\%$  de la puissance moyenne face à un élément augmentant la résistance (vent et montée) semble être efficace afin de préserver le même niveau de performance.

Les phases de descente, considérées comme des moments de récupération peuvent être aussi des moments tactiques pouvant créer des différences avec le reste des concurrents. L'importance des habiletés techniques a été mise en avant notamment pour gagner du temps sur une épreuve et maintenir une intensité plus régulière lors de course de cyclo-cross (58). Pendant la partie aquatique en triathlon, le courant marin est aussi susceptible de largement influencer les stratégies d'allure et le positionnement sur le ponton par les triathlètes. Ils doivent donc impérativement être pris en compte dans un but d'optimiser leur tactique de course.

### 2.2.3. Interaction inter-individuelle

Dans les compétitions où les interactions entre adversaires sont possibles, les coureurs doivent constamment s'adapter aux actions de leurs concurrents ainsi qu'aux évolutions de l'environnement de la course (15). Cette dimension tactique est façonnée par les échanges entre les participants et les actions qu'ils mettent en place en fonction de ces interactions. Il est essentiel de saisir les répercussions de cette dynamique inter-individuelle sur les choix comportementaux et tactiques des triathlètes, particulièrement si l'on souhaite analyser de manière approfondie leur performance dans des situations autres que les efforts en solitaire. Ce système de jeux a été étudié plus profondément en cyclisme sur route mais encore peu en triathlon. La notion du dilemme du prisonnier (76) vise à comprendre les actions entreprises dans la relation de collaboration et de défection en course.

## 2.3. Dimension tactique

### 2.3.1. La complexité du peloton

Le terme "peloton" désigne un groupe qui évolue en formation serrée. C'est une pratique coopérative qui émerge en raison des avantages énergétiques offerts par l'aspiration (77,78).

Cette stratégie a été identifiée dans les trois modes de locomotion, mais ayant le plus d'effet en natation et en vélo.

Les observations en course à pied concluent à des gains mineurs dû à une vitesse plus faible et des mouvements parasites. Il a été observé récemment, des gains de puissance métabolique et une diminution du temps de course, notamment dû à l'amélioration de l'économie de course de l'ordre de 3.5% dans une formation optimale (79). Les auteurs signalent quand même les limites de l'étude du au changement de direction du vent, de l'humidité et des pressions atmosphériques ainsi que la vitesse de déplacement.

La résistance à l'air subie par les cyclistes positionnés au milieu et à l'arrière des pelotons importants représente environ 5 à 10 % de celle subie par un cycliste roulant seul à la même vitesse. De plus, elle est d'environ 16 % supérieur à celle subie par le cycliste en tête du peloton, ce dernier bénéficiant d'une réduction de la traînée en raison de l'effet créé par la masse des coureurs qui le suivent (78).

Sur la partie cycliste, on peut observer différents types de courses. Le premier concerne celles avec un groupe massif rassemblant l'entièreté des concurrents ou presque, les suivants représentent des courses avec plusieurs petits groupes (échelons). Il est connu que les positions à l'arrière du peloton permettent une plus grande économie d'énergie, mais elles présentent des inconvénients tactiques. Le risque d'incident (chute, manque d'espace) augmente et il devient plus difficile de manœuvrer pour dépasser des adversaires approchant des zones de transition ou des passages techniques, voir pour répondre à des attaques. En conséquence, les triathlètes doivent chercher à la fois à optimiser leurs placements au sein du peloton pour maximiser le phénomène d'aspiration tout en minimisant les risques. Il a été démontré que l'utilisation de cette technique a un impact sur les chances de succès lors de course cycliste (77). En omnium, course tactique par excellence, il a été démontré que les coureurs les plus performants sont ceux qui se positionnent à l'avant du peloton (avantage tactique) et à des positions plus basses sur la piste (avantage énergétique) tout au long de la course (80).

Le fait d'évoluer en peloton, comme dit précédemment, permet de maintenir une vitesse d'évolution pour un moindre coût énergétique, ainsi qu'un nivellement des capacités physiologiques (77). Un triathlète moins fort sur le plan physique, mais habile dans l'utilisation du placement, pourrait potentiellement battre un concurrent plus puissant qui ne maîtrise pas aussi bien son placement. Par conséquent, la meilleure stratégie en course dépend des

caractéristiques individuelles, des actions des adversaires, du contexte de la course et des opportunités qui se présentent. Pour pallier cela, certains triathlètes choisissent de se replacer en augmentant l'intensité pour prendre l'avantage sur leurs adversaires.

Sachant que l'effort solitaire sur le vélo est fortement énergivore en comparaison à un effort à la même vitesse en groupe (81), il a été remarqué que le début de cette section joue souvent un rôle déterminant sur la performance globale (11,62). Le constat de cette intensité lors d'un triathlon courte distance est un élément contextuel, les plus faibles nageurs doivent regagner du temps sur les triathlètes en tête de la course en adoptant une allure significativement plus élevée que ces derniers lors de la première partie de la section cycliste. Les triathlètes les mieux positionnés à l'issue de la natation ont pour leur part un intérêt à accroître leur avance pour obtenir un avantage décisif au départ de la course à pied (62). Il est à noter que la première phase du segment cycliste, les puissances sont significativement supérieures à celles de la deuxième phase (61) ce qui met en évidence une intensité en deux phases durant ce mode de locomotion. En collaborant et en se relayant pour prendre la tête du peloton, les avantages énergétiques de l'aspiration permettent à un groupe de maintenir une vitesse plus élevée que celle qu'un athlète isolé pourrait soutenir en étant seul et ainsi réduire la dépense énergétique nécessaire pour maintenir une certaine vitesse.

### 2.3.2. Positionnement en natation

En natation, la gestion de son effort revêt un impact sur la performance finale, sur le format courte distance en triathlon l'effet de la natation en peloton peut permettre de réduire sa dépense énergétique (69) et réorienter certaines stratégies de course. Le fait d'évoluer en groupe lors de la phase de natation s'avère plus bénéfique que l'effort solitaire en vue d'une sortie de l'eau en solitaire. Mais les répercussions restent à quantifier, notamment sur les temps et vitesse réalisés en vélo et en course à pied. Concernant la performance dans l'eau, une position favorable à adopter serait de nager à hauteur de hanche à 50cm de la main de l'athlète précédent, cela représente 7% de gain, ou à moins de 50cm des pieds d'un concurrent pour réduire sa propre traînée, soit un gain de 21% (82). Ce qui amène à dire qu'un écart de 5 secondes et plus serait la formation d'un groupe différent dû à la perte de bénéfice à nager derrière un concurrent précédent (83). D'autre part il est montré qu'atteindre la première bouée en première position serait un élément prépondérant à la réalisation du meilleur temps en natation sur format medium (62). Cela révèle donc la complexité de

l'exercice qui serait de nager dans les premières positions tout en gérant son effort en laissant un ou quelques athlètes mener la course.

### 2.3.3. Dynamique de Course

Le triathlon est une discipline où de nombreux facteurs interviennent pour influencer les stratégies d'allure optimales et auto-sélectionnées des athlètes. La gestion efficace de l'énergie est essentielle pour réussir dans ce sport, et cela est particulièrement important dans les épreuves en mass-start (départ groupé), comme le triathlon.

Dans les épreuves avec départ en mass-start, les athlètes ont la possibilité de se mettre à l'abri derrière d'autres concurrents, ce qui leur permet d'économiser de l'énergie. Par exemple, l'aspiration pendant la natation permet aux athlètes de nager plus rapidement en suivant un nageur plus rapide, préservant ainsi leur énergie pour les épreuves de vélo et de course à pied. L'aspiration réduit la traînée dans l'eau, la concentration de lactate dans le sang et l'effort perçu, tout en améliorant l'économie d'oxygène.

La dynamique de la course a un impact significatif sur l'allure adoptée par les athlètes. Au début d'une épreuve courte distance, on observe que les athlètes nagent à une vitesse supérieure à leur moyenne pour se positionner rapidement sur l'avant de la course avec les nageurs les plus rapides, en vue d'atteindre la 1<sup>er</sup> bouée dans les meilleurs position (11).

Les pelotons de cyclistes qui en découlent de l'issue de la natation, vont être un moyen d'évoluer en maintenant les écarts créés lors de cette première sélection tout en cherchant à diminuer le coût énergétique de déplacement. Cependant, le nombre d'athlète constituant le groupe et les positions prises dans le peloton influencera l'intensité et l'utilisation de l'énergie, ce qui affectera la course à pied qui suit le segment cycliste (84).

La course à pied moins dépendante des effets d'aspiration aura tendance à suivre des allures dites parabolique, déjà observées dans de nombreux sports d'endurance (68). Cela correspond à une décomposition en trois phases, un départ rapide suivi d'une diminution de la vitesse et une accélération finale. Cette stratégie signature dépendant en partie de l'expérience des athlètes et du contexte de course (7). Ce schéma de gestion d'allure, n'a pas de définition sur le point d'inflexion de la courbe en fonction du format réalisée. Mais il semblerait que le début d'augmentation de l'intensité soit en partie visualisable par les mouvements à T2 et la recherche de la diminution de perte de temps à T2. Cejuela et al

mettent en avant que ceux perdant le moins de temps à T2 obtiendrait un meilleur résultat final (85).

En somme, les tactiques sont influencées par les stratégies d'allure qui varient selon les disciplines et par individu. En natation, les athlètes adoptent généralement une stratégie d'allure croissante. Alors que pendant le cyclisme, l'allure peut être variable, dite stochastique, créant l'apparition de fatigue prématurée dans l'effort (75), posant un problème sur la tactiques d'économie d'énergie pour la course à pied. Dans cette dernière discipline, la stratégie d'allure en forme de J inversé est souvent observée, avec une partie initiale plus rapide suivie d'une période de maintien de l'allure et d'accélération vers la fin. L'ajustement des dynamiques de course et donc des allures est dépendante de nombreux facteurs, notamment l'aspiration, leur positionnement, les intérêts et le mode de locomotion.

#### ***Le cadre théorique en résumé***

La sélection et la régulation des stratégies de course à travers les différents segments d'un triathlon sont des processus complexes qui dépendent de multiples variables. Ces facteurs comprennent l'influence de l'environnement, les prises de décision, la présence des concurrents, la gestion de la fatigue, la dynamique de la course, la distance à parcourir, le temps imparti, et le contexte général.

De plus, les compétences physiques et techniques spécifiques du triathlète dans chaque discipline du triathlon peuvent également jouer un rôle déterminant dans la manière dont il ou elle aborde chaque segment de la course. Alors que de nombreuses études se sont penchées sur les stratégies d'allure dans les sections de natation, de cyclisme, et de course à pied pour les formats Sprint et Standard, il y a eu peu de recherche jusqu'à présent sur les dynamiques de course optimales et les stratégies vis à vis de la concurrence dans le cadre des compétitions de triathlon. Cette lacune dans la recherche offre des opportunités passionnantes pour mieux comprendre comment les triathlètes adaptent leurs stratégies en fonction de divers paramètres dans des formats de course Olympique, relais et standard.

---

## **Hypothèses et objectifs de travail**

---

### 3. Hypothèses et objectifs de travail

Au regard de l'ensemble des publications et travaux analysés dans la précédente revue de littérature, cette thèse s'articule autour de trois axes :

- Définir et objectiver les capacités des triathlètes féminin et masculin durant leur carrière.
- Déterminer l'impact sur le scénario de course de la présence d'athlète ou de la densité d'athlète ayant les mêmes profils.
- Identifier comment interagissent les profils des triathlètes entre eux et en fonction des spécificités des parcours de compétition.

Le premier objectif est de créer un indicateur de performance assez sensible pour se réajuster au cours de la carrière permettant d'avoir une information objective sur le niveau des triathlètes. L'idée est de savoir si un triathlète n'ayant jamais participé à un niveau de compétition peut espérer y réaliser une performance, en fonction de l'adversité qu'il rencontrera.

En ce sens nous posons l'hypothèse selon laquelle la performance en triathlon de haut niveau est la conséquence de nombreuses compétitions contre des triathlètes de ce niveau. Multiplier les courses à des niveaux intermédiaires, à des niveaux adversités moindres ne permettrait pas de progresser.

Le second objectif est de caractériser l'influence de la présence d'athlètes sur le scénario de course que ce soit sur le format individuel ou sur le format relais mixte en équipe. A l'image du travail réalisé par (86) et (87) , l'idée est de proposer une continuité dans ce raisonnement en analysant la dynamique de course imposée pendant le REM. L'idée est d'établir des profils correspondant à chaque relayeur afin de composer au mieux avec les profils de chaque individu. Concernant les courses individuelles on estime que l'importance des épreuves comme défini par Ofoghi et al. (8) ne serait pas figé mais en relation avec la dynamique de course dépendante des athlètes en confrontation.

L'hypothèse émise est que les triathlètes ont des probabilités de victoire ou en tout cas d'atteindre une position finale différente en fonction de la densité et des profils des adversaires présent le jour de la course.

Le dernier objectif est de confronter la dimension stratégique à la dimension de dynamique de course en amenant la composante de technicité des parcours afin d'établir si celle-ci a un impact sur la course et dans quelle situation.

L'hypothèse par du fais que la natation étant la situation initial, sa réussite est fortement relié aux qualités de nage ainsi qu'au positionnement (11,62,88). Mais souvent la partie cycliste est décrite comme peu discriminante (8,89,90). Il nous semble plus judicieux au vu, des observations empiriques et des nouvelles tendances de course, qu'il existe des parcours propices à maintenir une échappée à l'avant ou au regroupement massif à l'issue de la section cycliste.

Au final, ces sous-objectifs répondent à l'objectif principal de la thèse : **identifier et comprendre les stratégies et l'environnement de course en triathlon de haut-niveau.**

---

## **Cadre expérimental**

---

## 4. Cadre expérimental

### 4.1. Étude 1 : Analyse du triathlon relais mixte

#### Résumé

**Contexte** : Le triathlon Relais en Equipe Mixte (REM) est une néo-discipline du triathlon se disputant sur la scène internationale depuis 2009, année de création des Championnats du Monde. Elle a été ajoutée au programme Olympique par le Comité International Olympique (CIO) en 2017 pour intégrer les Jeux Olympiques de Tokyo 2020. Le principe est celui d'un relais Femmes / Hommes / Femmes / Hommes soit 4 x [250 à 300m de natation, 6 à 8km de course cycliste, 1,6 à 2km de course à pied].

**Objectif** : L'objectif de cette étude est d'analyser le déroulement des épreuves de triathlon REM pour comprendre comment chaque segment de course (temps de réalisation, écarts, etc.) participe de l'issue finale.

**Méthodes** : Les résultats des Championnats du Monde de triathlon et des séries mondiales ont été recueillis sur la période 2009 – 2020, à partir du site officiel de la fédération internationale. Les statistiques descriptives ont été réalisées sur le parcours des vainqueurs, ceux des deuxième et troisième (TOP2-3), ceux des quatrième à huitième (TOP4-8), et sur l'ensemble des participants. L'analyse a pris en compte le temps de chaque équipe, le temps de chaque relayeur et la différence de temps par rapport à la tête de course.

**Résultats** : Les résultats mettent en évidence une différence significative dans les performances de natation et de course à pied lors du premier relais entre le groupe TOP4-8 et les autres ( $p \leq 0,05$ ). Les équipes vainqueurs présentent des temps similaires pour les deux relayeurs de chaque sexe, tandis que les groupes TOP2-3 et TOP4-8 montrent des différences significatives entre les résultats de ces relais, en particulier chez les femmes, où des différences significatives sont observées lors des épreuves cyclistes et de natation.

**Conclusion** : Cette étude montre que les écarts de temps entre équipes se creusent progressivement tout au long du relais, adoptant une dynamique d'élimination progressive des équipes en queue de peloton. Cette étude souligne l'importance des relais féminins, où les écarts entre concurrentes influent significativement sur le résultat final.

## *Introduction*

Le triathlon est un sport individuel alliant natation, cyclisme et course à pied. Plus récemment, une nouvelle variante de ce sport a émergé pour mettre à l'épreuve non seulement les capacités individuelles des athlètes, mais aussi leur capacité à collaborer au sein d'une équipe. Le triathlon Relais en Equipe Mixte (REM), où deux hommes et deux femmes s'alternent pour réaliser les trois segments du triathlon sur la distance super-sprint de (~250m natation, ~7Km de vélo, ~1,5km en course à pied). Ce format a gagné en intérêt depuis son introduction aux Championnats du Monde en 2009 à Des Moines et son inclusion aux programmes Olympiques en 2017. Cette nouvelle formule a attiré l'attention des chercheurs et des staffs, suscitant un intérêt croissant pour comprendre les aspects complexes de cette épreuve.

Le triathlon REM repose sur une dynamique d'équipe renforçant les qualités individuelles. Les stratégies de sélection des athlètes pour chaque segment, les multiples transitions, les distances faibles et les conduites de course sont autant d'éléments innovants qui différencient cette discipline des triathlons traditionnels. Alors que la recherche scientifique a longtemps examiné les performances individuelles dans des disciplines sportives variées, l'étude approfondie du triathlon REM ouvre de nouvelles perspectives pour comprendre comment la collaboration et la coordination entre athlètes contribuent à l'obtention de résultats optimaux. Récemment, des auteurs ont investigué ce champ sur les notions de rang, de vitesse de déplacement et de puissance pour chaque modalité (86). Ils ont montré que la natation et le cyclisme ont un impact plus important que la course à pied sur le résultat final. Les vitesses de nage et les puissances développées sont notablement plus élevées que dans les autres courses dites « sprint » et « standard » de série mondiale (86). De plus, concernant le format individuel du triathlon, il est intéressant de noter que les avis divergent quant au poids de la discipline la plus déterminante au sein de la performance globale. Certains chercheurs ont observé que la natation était le meilleur indicateur de la performance dans le triathlon olympique (91), tandis que d'autres études ont identifié la course à pied comme en étant le facteur prépondérant (8,89,89). Cependant, ces déterminants ne sont pas clairement établis dans le contexte du relais mixte.

Sur le plan stratégique, l'atteinte de la première bouée en tête est fortement corrélée au classement à la sortie de l'eau et plus faiblement au classement final (11). Lors du segment

cycliste, les participants doivent maintenir leur position au sein du peloton (89), afin de conserver un maximum d'énergie en profitant de l'effet d'aspiration (*drafting*) (81,92). La situation est similaire en natation où le fait de nager au contact permet d'économiser son énergie (93). De plus, les triathlètes doivent engager un effort maximal durant la partie de course à pied, qui a un rôle significatif sur la détermination des résultats ultérieurs, comme souligné par Figueiredo et al. (94).

Par conséquent, cette étude vise à fournir des premières informations sur le déroulement du triathlon REM en termes d'écart temporel avec les adversaires directs et la tête de course pour une application pratique sur les courses de niveau international. En particulier, nous avons mesuré les écarts de chaque relayeur et ceux de l'équipe sur chaque segment durant l'ensemble du relais en testant l'hypothèse d'une plus grande importance du cyclisme et des transitions sur le résultat final.

## ***Méthodes***

### ***Les données***

Cette analyse a porté sur les données de course World Triathlon (WT) accessibles publiquement et extraites de la base de données WT ([www.triathlon.org](http://www.triathlon.org)). Toutes les données ont été téléchargées à l'aide d'un script sur R en utilisant une interface de programmation d'application (API) publique (95).

Les résultats des 43 courses, de 2009 à 2020, correspondent à 694 équipes partantes représentant 64 nationalités avec 808 femmes et 849 hommes sur les épreuves internationales, les Championnats du Monde, les séries mondiales, les championnats continentaux et les "*test events*" qui sont les événements permettant d'obtenir des points en vue d'une qualification pour l'épreuve olympique. Le temps de transition entre le passage de relais et le plongeon du relayeur suivant est intégré dans le temps « natation » des relayeurs 2, 3 et 4.

### ***Analyse des données***

Tous les temps de courses, de natation, de cyclisme, de course à pied ainsi que les phases de transition, ont été recueillis dans le but de calculer les temps d'écart des triathlètes de

manière individuelle avec cumul du temps de l'équipe au cours de chaque segment. Les participants qui n'ont pas achevé la course (non-finisateurs dits "DNF", ou disqualifiés dits "DSQ") ont été exclus dès le moment où ils n'interagissaient plus dans la course. Chaque athlète, formant une itération d'un triathlon super-sprint, a été désigné sous la dénomination "Leg" (numéro du relayeur - discipline sportive) pour la codification. Les équipes de relais ont été divisées en quatre groupes en fonction de leur position tout au long de la course : les premières (TOP1), les deuxièmes et troisièmes (TOP2-3), les quatrièmes à huitièmes (TOP4-8) et l'ensemble des équipes de la neuvième place à la dernière place (overTOP8). Les comparaisons ont été réalisées en prenant en compte les différentes étapes du relais (étape 1, 2, 3 ou 4), les disciplines spécifiques (natation, cyclisme et course à pied) ainsi que les catégories (hommes ou femmes). L'ensemble du traitement des données et l'analyse statistique ont été exécutés avec le logiciel R (version 4.1.2)

### *Résultats*

Les données de l'ensemble des équipes ont été recueillies, comprenant un total de 1657 triathlètes ayant réalisé un super sprint lors d'un relais pour un total de 6628 temps de passage. Ces temps ont permis de définir l'importance et le poids de chaque segment sur le temps total (Figure 2).

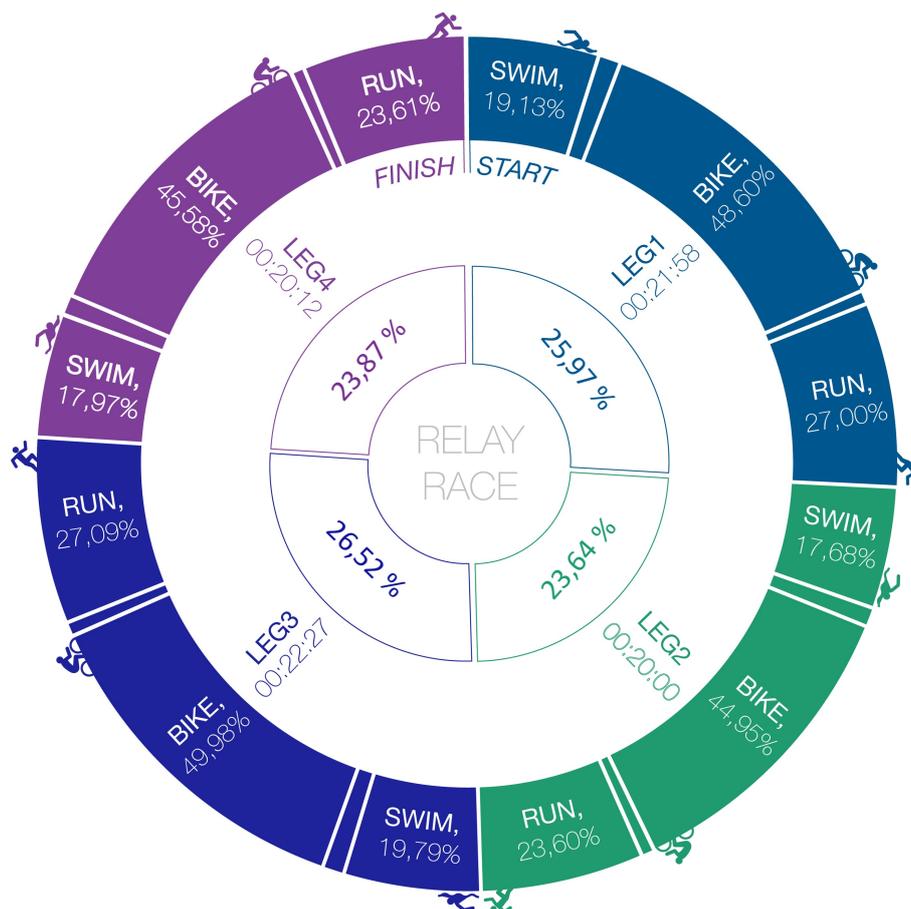


Figure 2 - Pourcentage de temps par discipline et relais

De l'intérieur vers l'extérieur. Le premier cercle indique le pourcentage de temps moyen de chaque relayeur sur la totalité de la course ; le second cercle indique le temps moyen sur chaque segment de chaque relayeur

Le temps passé sur chaque segment est rapporté au temps total de son relais. Aucune différence significative n'a été trouvée entre le pourcentage de temps par segment pour chaque relayeur, homme ou femme, du 1<sup>er</sup> au 4<sup>e</sup> passage (Figure 2). Néanmoins, lorsque l'on considère le sexe, le temps total des relais est significativement différent ( $p\text{-value} \leq 0.05$ ) entre homme et femme pour chaque relais. De plus, il existe une différence significative entre les relais de même sexe (LEG 1 vs LEG3 et LEG2 vs LEG 4 ( $p\text{-value} \leq 0.05$ )) (Figure 2)

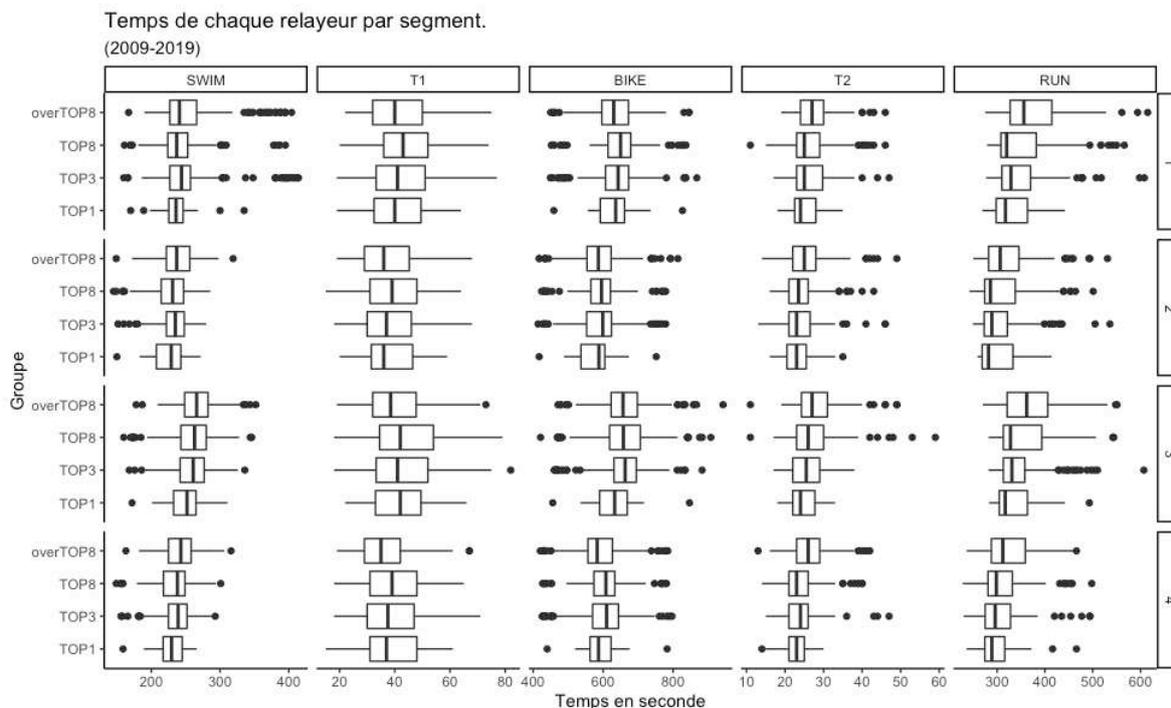


Figure 3 - Temps de chaque relayeur par segment au regard du classement final

Chaque colonne représente un segment de course et chaque ligne un groupe

La discrimination en quatre groupes au vu du classement final permet d'analyser les différences entre les athlètes lors de chaque segment. De plus, nous comparons aussi la différence entre les triathlètes de même sexe du même groupe (Figure 3). Les phases de natation et de course à pied montrent les différences les plus significatives, qui, en revanche, apparaissent, à des moments différents de la course.

Le premier relais illustre la différence la plus significative entre le groupe overTOP8 et les autres groupes, en natation : TOP1 et TOP4-8, en Transition 2 : TOP1 et TOP4-8, en course à pied avec le TOP1, TOP2-3 et TOP4-8 (Figure 3) (Tableau 2).

Le TOP2-3 montre des différences significatives seulement avec le TOP1 sur le LEG1 – SWIM ( $235,79 \pm 32,01$  vs  $239,44 \pm 42,66$  ( $p$ -value  $\leq 0,05$ )). Le résultat est similaire entre TOP2-3 et TOP4-8 sur le LEG1 – SWIM ( $239,44 \pm 42,66$  vs  $243,49 \pm 41,79$  ( $p$ -value  $\leq 0,05$ )).

	<i>SWIM</i>	<i>T1</i>	<i>BIKE</i>	<i>T2</i>	<i>RUN</i>	
<b>LEG 1</b>	<b>TOP1 vs TOP2-3</b>	0,0081	0,5060	0,5729	0,4168	0,3710
	<b>TOP1 vs TOP4-8</b>	0,2840	0,2921	0,2511	0,3655	0,1994
	<b>TOP1 vs overTOP8</b>	0,0034	0,9931	0,6227	0,0380	0,0018
	<b>TOP2-3 vs TOP4-8</b>	0,0258	0,4793	0,3143	0,8243	0,4800
	<b>TOP2-3 vs overTOP8</b>	0,6020	0,2473	0,9086	0,0263	0,0001
	<b>TOP4-8 vs overTOP8</b>	0,0094	0,0720	0,2806	0,0903	0,0069
<b>LEG 2</b>	<b>TOP1 vs TOP2-3</b>	0,1503	0,8493	0,2944	0,7100	0,6290
	<b>TOP1 vs TOP4-8</b>	0,6208	0,5618	0,2981	0,5545	0,3814
	<b>TOP1 vs overTOP8</b>	0,0405	0,8176	0,3582	0,0470	0,0350
	<b>TOP2-3 vs TOP4-8</b>	0,0835	0,5149	0,9684	0,6827	0,5015
	<b>TOP2-3 vs overTOP8</b>	0,1511	0,4773	0,8320	0,0043	0,0051
	<b>TOP4-8 vs overTOP8</b>	0,0055	0,1923	0,8159	0,0203	0,0675
<b>LEG 3</b>	<b>TOP1 vs TOP2-3</b>	0,0599	0,4129	0,0866	0,3594	0,4031
	<b>TOP1 vs TOP4-8</b>	0,1058	0,3003	0,0581	0,0525	0,1250
	<b>TOP1 vs overTOP8</b>	0,0046	0,8459	0,0287	0,0029	0,0027
	<b>TOP2-3 vs TOP4-8</b>	0,7922	0,6981	0,6503	0,0756	0,2076
	<b>TOP2-3 vs overTOP8</b>	0,0361	0,0918	0,3545	0,0002	0,0001
	<b>TOP4-8 vs overTOP8</b>	0,0532	0,0467	0,7153	0,1909	0,0232
<b>LEG 4</b>	<b>TOP1 vs TOP2-3</b>	0,0665	0,7901	0,2378	0,0909	0,9369
	<b>TOP1 vs TOP4-8</b>	0,3619	0,6765	0,2676	0,0766	0,4728
	<b>TOP1 vs overTOP8</b>	0,0109	0,4351	0,7364	0,0001	0,1249
	<b>TOP2-3 vs TOP4-8</b>	0,1183	0,7867	0,9478	0,8001	0,2207
	<b>TOP2-3 vs overTOP8</b>	0,1076	0,0628	0,2173	0,0002	0,0041
	<b>TOP4-8 vs overTOP8</b>	0,0058	0,0391	0,2707	0,0011	0,1576

Tableau 2 - Significativité (*p*-value des *t*.test) entre chaque temps par segments des groupes de relayeurs sur chaque portion de leurs relais.

		<b>SWIM</b>	<b>T1</b>	<b>BIKE</b>	<b>T2</b>	<b>RUN</b>
<b>TOP1</b>	<b>LEG1 vs LEG3</b>	0,1462	0,9963	0,9720	0,7234	0,9527
	<b>LEG2 vs LEG4</b>	0,7803	0,9365	0,6010	0,3017	0,8070
<b>TOP2-3</b>	<b>LEG1 vs LEG3</b>	0,3577	0,7942	0,0311	0,4659	0,9443
	<b>LEG2 vs LEG4</b>	0,1236	0,7321	0,1644	0,8913	0,9482
<b>TOP4-8</b>	<b>LEG1 vs LEG3</b>	0,0022	0,9634	0,2264	0,3647	0,6163
	<b>LEG2 vs LEG4</b>	0,2375	0,9555	0,2787	0,8119	0,6701
<b>overTOP8</b>	<b>LEG1 vs LEG3</b>	0,1240	0,7430	0,0030	0,3340	0,9378
	<b>LEG2 vs LEG4</b>	0,1532	0,4087	0,8913	0,2607	0,9564

Tableau 3 - Significativité (*p*-value des *t*.test) du temps des triathlètes de même sexe pour chaque portion de relais.

Les équipes du TOP1 ne montrent aucune différence statistique entre les deux relayeurs hommes, ni entre les deux relayeuses femmes. Les relais du TOP2-3 montrent une différence significative entre les temps cyclistes femmes du relais 1 et du relais 3 avec des moyennes respectives de  $632,03 \pm 68,89$  vs  $639,98 \pm 75,79$ , *p*-value  $\leq 0,05$  ; de même pour les femmes des équipes terminant overTOP8 ( $647,66 \pm 80,56$  vs  $674,45 \pm 85,74$ , *p*-value  $\leq 0,05$ ). Le TOP4-8 montre une différence significative entre les relais femmes en natation ( $243,49 \pm 41,79$  vs  $258,74 \pm 35,29$ , *p*-value  $\leq 0,05$ ).

Les écarts temporels augmentent durant la course de façon non linéaire pour chaque groupe (Figure 4). En premier lieu, un écart significatif est observé entre les équipes overTOP8 et les autres à la fin du LEG1. Cette différence tend à s'accroître.

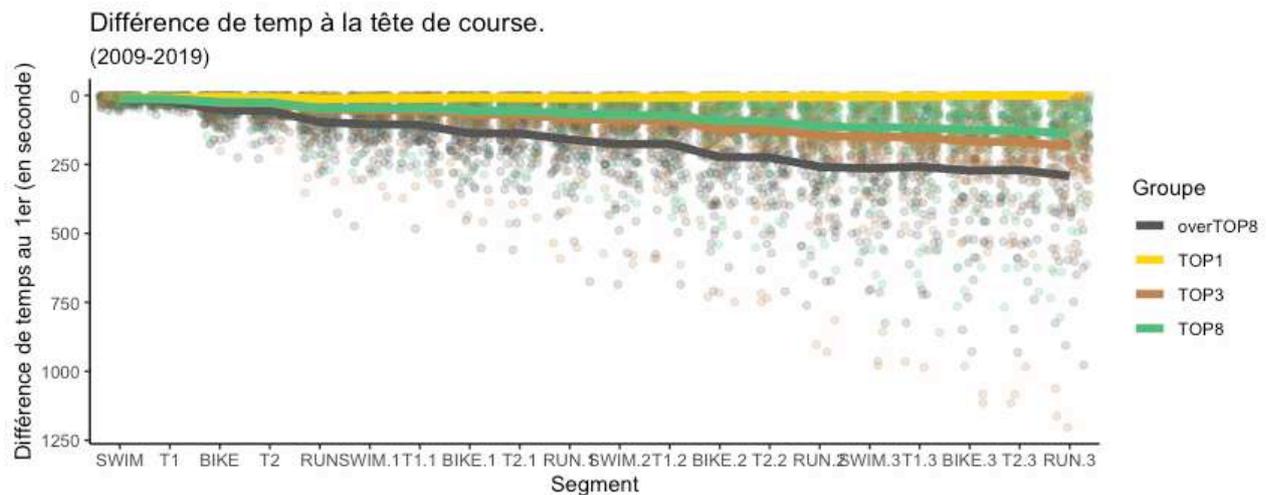


Figure 4 - Différence de temps à la tête de course pour chaque groupe.

L'écart de temps avec la tête de course pour le TOP1 ne montre aucune différence statistique (Figure 3), la moyenne de cet écart ne dépassant pas les 10 secondes (T1 – LEG 1 et RUN – LEG 2). La moyenne des écarts diminue ensuite sur le LEG 3 jusqu'à l'arrivée (Figure 4).

Les groupes TOP2-3 et TOP4-8 se différencient du groupe overTOP8 à l'issue du segment BIKE – LEG3 (TOP2-3 =  $111 \pm 64,61$  ; TOP4-8 =  $54,00 \pm 52,88$  ; overTOP8 =  $209,72 \pm 105,14$  ; p-value  $\leq 0,05$ ) et du TOP1 à l'issue du segment RUN – LEG3 (TOP1 =  $7,16 \pm 11,37$  ; TOP2-3 =  $136,5 \pm 60,1$  ; TOP4-8 =  $72 \pm 55,23$  ; p-value  $\leq 0,05$ ).

### Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'impact des différents segments du relais, en examinant les temps réalisés et les écarts par rapport au leader, sur la performance globale de chaque équipe en triathlon REM.

L'ensemble des données récoltées depuis l'ajout au calendrier de la fédération internationale de triathlon en 2009 jusqu'en 2019 ont révélé que la course se décline avec un décrochage des équipes plus faibles au début du relais. Ce décrochage peut s'expliquer par une natation plus rapide dès le 1er relais, condamnant les équipes ne pouvant pas suivre le rythme aux places overTOP8. Dans un deuxième temps, la création d'un écart à mi-course entre le TOP1, le TOP2-3 et le TOP4-8 dessine l'issue vers la victoire ou le podium. Les différences ont tendance à apparaître lors des relais féminins.

### **Temps de course**

Les temps de course des relais masculins (2 et 4) sont en moyenne de ~20min contre ~22min pour les relais féminins (relais 1 et 3) (Figure 2), dans un format similaire au super-sprint. Or, ces athlètes concourent lors des Jeux Olympiques sur le format 1500m – 40km – 10km, correspondant à des temps de 100 à 120 min (89). La réduction de la durée de course n'entraîne cependant pas de compression de la durée des transitions. Cette durée impose le développement d'habiletés techniques élevées, *a fortiori* quand le nombre de transitions s'élève à 8 dans ces relais. (9) Il semblerait alors que les compétences requises pour exceller en super-sprint, soient considérablement différentes de celles nécessaires pour performer dans la discipline olympique, qui elle dure plus longtemps. En revanche, au vu de la réglementation, les athlètes doivent pouvoir être capables de participer aux deux types de courses (individuelle et relais) lors des Jeux Olympiques.

### **Dynamiques de course**

Ces résultats montrent une dynamique en trois temps : le premier voit la « sortie » du groupe de tête des équipes physiquement plus faibles, qui ne peuvent suivre l'allure lors des relais 1 et 2 (*Tableau 2*). Le second se traduit par une impulsion vers l'avant avec la création d'écart en tête de course sur les adversaires encore en lice lors du 3<sup>e</sup> relais, notamment sur la partie cycliste et la course à pied (Figure 3) (*Tableau 2*). Cela pourrait être associé à la perte de l'effet d'aspiration, lorsque ces adversaires perdent le contact avec le peloton. La dernière phase, lors du dernier relais, voit le futur vainqueur prendre la tête de course et ne plus la concéder (Figure 4).

### **Différence Homme / Femme**

Lorsque l'on compare deux à deux les relais réalisés par les athlètes de même sexe (c'est-à-dire 1-3 et 2-4), les résultats mettent en évidence une différence de performances entre les segments natation et cyclisme pour les femmes, mais pas pour les hommes (*Tableau 2*). Ces résultats sont surprenants et des recherches supplémentaires seront nécessaires pour comprendre cette absence de différence (1,96).

### ***Application terrain***

Cette analyse préliminaire permet de confirmer la tendance selon laquelle il serait pertinent de placer les triathlètes les plus performants sur les segments 1 et 2 (87), afin de profiter du *drafting* puisque ces athlètes sont particulièrement efficaces pour gérer la dynamique de peloton. En revanche, pour les deux derniers membres de l'équipe, il serait préférable de choisir des triathlètes performants dans des situations où le *drafting* n'est pas autorisé (87). Ils devraient également être des tacticiens expérimentés, capables de diriger le rythme de la course, tant en natation que durant la phase de cyclisme.

### ***Limites***

Cette étude se concentre sur le résultat des compétitions officielles de relais mixte en triathlon. Il est important de noter que la configuration des parcours de relais peut varier en termes de distances de transition entre les relayeurs, ce qui peut influencer les temps de déplacement. Pour des recherches futures, il serait bénéfique d'obtenir des données précises sur les distances de ces zones de transition et sur l'ensemble du parcours afin de pouvoir comparer les vitesses de déplacement de manière plus approfondie. Cette étude sert de point de départ pour de futures recherches sur cette discipline olympique nouvelle.

Il est également à noter que World Triathlon a décidé de modifier l'ordre de relais entre les hommes et les femmes pour l'édition 2024 des Jeux Olympiques, passant à un schéma homme-femme-homme-femme. Bien que cela n'affecte pas les conclusions précédentes, cette modification pourrait potentiellement altérer la dynamique de course en retardant la création d'écart entre les équipes.

En outre, il convient de mentionner que cette étude ne tient pas compte de la densité des courses, qui peut varier d'une compétition à l'autre, notamment dans les cas où certaines nations ont pu aligner plusieurs équipes A, B voire C.

### ***Conclusion***

Ainsi, cette étude montre que les triathlètes d'une équipe de relais mixte forment un collectif qui se doit d'être construit dans un ordre bien défini, par rapport aux forces et aux faiblesses des triathlètes qui la composent, ainsi que celles de leurs adversaires, afin de ne pas être à contre-temps de la dynamique de course. Les résultats de cette étude suggèrent également que des instants-clés permettent de maintenir le contact avec la tête de course, du relais 1 au

relais 2. Dans un deuxième temps, un travail de sape pour prendre l'avantage et créer des écarts sur les adversaires encore présents, sur les relais 3 et 4. Les triathlètes féminines ont tendance à créer des écarts ; leurs performances ont inévitablement un impact pour se mettre dans les meilleures conditions. Les temps de réalisation de chaque segment et les écarts entre triathlètes sont des informations primordiales pour les staffs techniques afin de préciser l'exigence de cette néo-discipline.

#### *4.2. Apports pour le terrain et continuité vers l'étude suivante*

Les écarts créés entre les équipes durant le relais permettent d'entrevoir les points-clés de la course. Cependant, cela n'oriente pas directement l'organisation de l'équipe selon le profil des triathlètes et leurs complémentarités. Face à ce constat, l'étude 2 a pour objectif d'analyser les positionnements durant la course, afin d'établir leur impact sur le classement final.

### 4.3. Étude 2 : Impact de la position sur le classement final du relais mixte

#### Résumé

**Objectif** : L'objectif de cette étude est de définir les probabilités d'atteindre une victoire, un podium ou un rang de finaliste dans un triathlon Relais en Equipe Mixte (REM), selon les positions successives obtenues par les quatre relayeurs lors de chacun des quatre segments aussi appelés "étapes" de la course.

**Méthodes** : Tous les résultats REM des séries mondiales, des championnats continentaux, des Championnats du Monde de 2009 à 2021 et des Jeux Olympiques de Tokyo 2020 ont été collectés. Les probabilités d'atteindre un état final donné ont été calculées selon les états transitoires de course. Les résultats sont obtenus via la méthode du V de Cramer.

**Résultats** : La probabilité de victoire est similaire à la fin du relais 1 pour les TOP1 (première position) et les TOP2-3 (deuxième et troisième position). Une différence dans les fréquences associées à la victoire est observée après la phase de cyclisme du deuxième relais, où 47% des athlètes du TOP1 gagnent, contre 13% des TOP2-3. Cette différence augmente ensuite continuellement jusqu'à la fin de la course.

**Conclusion** : Les relais 2 et 3 sont prépondérants sur l'issue de la course. Les gains de position obtenue par chaque triathlète, notamment en natation et en cyclisme, influencent grandement la performance finale de l'équipe. Le premier relais permet de maintenir le contact avec la tête de course, tandis que le dernier fige la position obtenue par le reste de l'équipe.

### *Introduction*

Les Relais en Equipe Mixte (REM) sont effectués consécutivement par les quatre triathlètes du relais dans un ordre défini : femme, homme, femme, homme. La fédération internationale de triathlon a opté pour cet ordre jusqu'en 2021. Le format REM était présent dans le calendrier de la fédération internationale avec des éditions de Championnats du Monde depuis 2009. L'augmentation récente du nombre de course dans les championnats du monde (WTCS) a offert la possibilité d'analyser plus de course. Les enjeux de ce format sont importants car une qualification pour le relais mixte inclut *de facto*, pour les triathlètes constituant le relais, un quota pour la course individuelle des Jeux Olympiques. En conséquence, de nombreuses nations se concentrent stratégiquement sur la constitution d'équipes fortes pendant la période de qualification olympique, afin d'obtenir quatre athlètes pour les courses individuelles (97). Plusieurs études ont mis en évidence des stratégies optimales pour réduire le coût énergétique de la course et augmenter les probabilités de victoire, avec une corrélation entre la position à la sortie de l'eau et la victoire (11,98). Le cyclisme est de son côté, susceptible d'être influencé par le *drafting*, afin de générer une optimisation du coût énergétique en peloton (81), le *drafting* réduisant la dépense énergétique de l'ensemble de l'épreuve (99). Piacentini et al. ont souligné l'importance du maintien de la position dans le premier peloton comme facteur déterminant de la performance finale (89). Il est souvent observé un effort maximal des athlètes dans les phases initiale et finale, un schéma appelé "*parabolic pacing*" (allure parabolique) (84,94). Cependant, l'influence de chaque fractionnement dépend de la longueur du triathlon : plus la distance est courte, plus la natation influence le résultat de course (91). Certains auteurs soulignent que les triathlètes en position de tête avant la course à pied ont un avantage psychologique sur leurs poursuivants (91,98). À ce jour, seuls quelques articles (71,87) ont étudié le format REM. Ces derniers se sont principalement concentrés sur les exigences physiologiques, apportant des applications pratiques pour aider les entraîneurs à planifier et exécuter les tactiques de course ou à développer des stratégies d'entraînement. Les nombreuses phases intermittentes de haute intensité observées dans les trois disciplines, ainsi que l'application de stratégies d'allure dites "*positive pacing*", nécessitent des qualités anaérobies bien développées chez les triathlètes d'élite (71). Récemment, des auteurs ont montré l'importance des compétences de chaque relayeur (87). En particulier, les triathlètes capables de courir en groupe apparaîtraient comme un meilleur choix pour les relais 1 et 2.

Tandis que ceux qui sont capables d'imprimer leurs rythme en course à pied et de rouler dans des situations hors *drafting* semblent être mieux adaptés aux relais 3 et 4. Par conséquent, l'objectif de cette étude est de définir les probabilités d'atteindre une victoire, un podium ou une place de finaliste dans un triathlon relais en fonction de la position lors de chaque segment de course.

## **Méthodes**

### **Collecte de données**

Cette analyse a porté sur les données des équipes nationales élite qui ont concouru de 2009 à 2021. Toutes les performances dans les courses de triathlon mondial ont été collectées : WTCS, Championnat du Monde (WChamp), Championnat continental (ConChamp) et Jeux Olympiques (JO) sur le REM. Sur les 38 épreuves REM, 394 équipes différentes ont terminé la course, ce qui représente 1576 performances réalisées par 2924 athlètes masculins et féminins. Les données de course sont accessibles publiquement et extraites de la base de données du World Triathlon ([www.triathlon.org](http://www.triathlon.org)). Toutes les données ont été téléchargées à l'aide d'un script sur R en utilisant une API publique (95).

### **Analyse des données**

Tous les temps de course ont été collectés (natation, vélo, course à pied et transition) afin de suivre les positions de chaque triathlète pendant les relais. Les non-finisateurs (*DNF*, *DSQ*) ont été considérés comme terminant à la dernière place, classés dans l'ordre d'abandon de la course par les équipes. Chaque coureur étant une itération d'un triathlon super-sprint, ils ont été codés comme Leg (numéro de relayeur - sport). Les phases de transition ont été exclues de l'analyse car les changements de position constituent une redondance d'information avec la phase précédente. En effet, dans notre ensemble de données, les transitions n'ont apporté aucun changement au classement entre l'entrée et la sortie de la transition. Les équipes de relais ont été divisées en quatre groupes en fonction de leurs positions tout au long de la course (état), les premières (TOP1), les deuxièmes et troisièmes (TOP2-3), les quatrièmes à huitième positions (TOP4-8) et les équipes au-delà de la huitième place (overTOP8). Les quatre groupes se sont vu attribuer un état de transition possible vers la position de finaliste,

médailleurs ou vainqueurs. Ces classifications représentent les équipes potentiellement finalistes (places de 1 à 8), médaillées (places de 1 à 3), ou victorieuses (1<sup>ère</sup> place) selon leur chance d'atteindre ces états finaux.

### **Analyse statistique**

La fréquence est exprimée avec un intervalle de confiance (IC) à 95%. Elle représente le nombre d'équipes qui ont atteint l'état final selon tout état transitoire. Un test de Student a été utilisé pour comparer les temps, classement et différence avec la tête de course lors de chaque phase ; les résultats sont exprimés sous forme de moyenne et d'écart-type. Un test d'adéquation du  $\chi^2$  a été effectué pour chaque section de course afin de tester l'hypothèse  $H_0$  : "le rang n'a pas d'influence sur le classement final" et  $H_1$  : "la position est déterminante pour le classement final". En outre, le résultat est complété par un calcul de l'ampleur de l'effet issu du *V de Cramer* (13-15) pour exprimer la probabilité d'atteindre les états finaux. Le seuil de significativité a été fixé à  $p \leq 0,05$  et les *V* ont été considérés ainsi : petit  $\leq 0,06$ , moyen  $\leq 0,17$ , grand  $\leq 0,29$  et très grand effet  $> 0,29$ . Le test d'adéquation du  $\chi^2$  ne remplit pas toutes les conditions d'application, notamment en raison du nombre théorique de participants qui peut être inférieur à 5. Nous n'exprimerons donc la différence entre les groupes qu'avec l'ampleur de l'effet et l'IC à 95%. Toutes les données ont été traitées et analysées sous R version 1.4.1106.

### **Résultats**

#### **Position et temps en tête de course**

Les temps différentiels moyens (différence de temps par rapport au temps du premier triathlète de ce segment) pour chaque catégorie de classement et chaque composante de la course sont indiqués dans le *Tableau*. Par exemple, les coureurs du premier relais (Leg 1) des équipes gagnantes de chaque course enregistrent un temps significativement plus rapide ( $333,45 \pm 45,24$ ) que le premier coureur des équipes finalistes ( $347,59 \pm 53,77$ ) et des équipes Finisher ( $366,27 \pm 98,64$ ) (*Tableau*). Ceci est vérifié par les classements moyens qui suivent la même tendance (*Tableau*). Par exemple, lors de l'étape 2, les athlètes concourant dans les équipes gagnantes atteignent déjà des classements supérieurs en natation, vélo et course à

piéd ( $3,08 \pm 2,64$  ;  $2,58 \pm 2,11$  ;  $2,21 \pm 1,68$ ) par rapport aux autres finalistes ( $6,46 \pm 2,96$  ;  $6,3 \pm 2,73$  ;  $6,21 \pm 2,59$ ) et finisseurs ( $13,04 \pm 4,91$  ;  $13,24 \pm 4,72$  ;  $13,34 \pm 4,6$ ) (*Tableau 4*). La position dans le classement pendant la course est significativement différente entre les vainqueurs et médaillés vs finalistes ou finisseurs. La différence de rang pendant la course devient significative entre vainqueurs et médaillés durant le troisième relais (*Tableau 4*). Si l'on observe uniquement les temps bruts, il est à noter que les temps sur chaque segment ne diffèrent pas significativement entre vainqueurs, médaillés et finalistes, mais chacun de ces trois groupes présente un temps significativement différent du groupe des finisseurs sur chaque segment du relais (*Tableau 4*).

	Premier relais			Deuxième relais			Troisième relais			Quatrième relais			
	Natation	Cyclisme	Course	Natation	Cyclisme	Course	Natation	Cyclisme	Course	Natation	Cyclisme	Couse	
Vainqueurs	rang	5,55 ± 4,33 (c,d)	3,45 ± 3,22 (c,d)	3,18 ± 2,86 (c,d)	3,08 ± 2,64 (c,d)	2,58 ± 2,11 (c,d)	2,21 ± 1,68 (b,c,d)	2,16 ± 1,55 (b,c,d)	1,74 ± 1,37 (b,c,d)	1,47 ± 0,98 (b,c,d)	1,39 ± 0,68 (b,c,d)	1,26 ± 0,5 (b,c,d)	1 ± 0 (b,c,d)
	temps	240 ± 38,86 (d)	625 ± 70,54	333,45 ± 45,24 (d)	225,09 ± 25,47 (d)	574,52 ± 66,49 (d)	296,55 ± 37,32 (d)	247,82 ± 26,94 (d)	629,18 ± 74,27 (d)	334,58 ± 40,6 (c,d)	227,73 ± 23,92 (d)	582,39 ± 64,95 (d)	300,7 ± 46,24
	Diff. 1er.	18,12 ± 54,42 (d)	7,55 ± 11,81 (c,d)	12,94 ± 15,75 (c,d)	10,64 ± 10,57 (c,d)	7,45 ± 11,53 (b,c,d)	8,73 ± 11,97 (b,c,d)	6,64 ± 9,47 (b,c,d)	3,85 ± 8,97 (b,c,d)	4,79 ± 9,25 (b,c,d)	3,48 ± 7,01 (b,c,d)	0,64 ± 1,27 (b,c,d)	0 ± 0 (b,c,d)
Médaillés	rang	5,03 ± 3,72 (c,d)	3,7 ± 2,64 (c,d)	3,28 ± 2,02 (c,d)	3,38 ± 2,41 (c,d)	3,21 ± 1,95 (c,d)	3,2 ± 1,95 (a,c,d)	2,8 ± 1,78 (a,c,d)	2,93 ± 1,59 (a,c,d)	2,67 ± 1,05 (a,c,d)	2,63 ± 1,08 (a,c,d)	2,54 ± 0,96 (a,c,d)	2,5 ± 0,5 (a,c,d)
	temps	238,57 ± 40,07 (d)	628,26 ± 68,78	334,76 ± 43,91 (d)	224,53 ± 25,72 (d)	579,39 ± 63,58 (d)	300,35 ± 39,4 (d)	248,42 ± 28,21 (d)	635,73 ± 71,66 (d)	341,24 ± 49,01 (d)	227,26 ± 24,23 (d)	589,61 ± 71,02 (d)	302,52 ± 44,47
	Diff. 1er.	16,69 ± 53,93 (d)	9,58 ± 13,23 (c,d)	17 ± 18,94 (c,d)	14,14 ± 17,96 (c,d)	15,53 ± 24,29 (a,c,d)	20,59 ± 25,97 (a,c,d)	19,11 ± 27 (a,c,d)	23,05 ± 32,78 (a,c,d)	31,41 ± 36,75 (a,c,d)	29,64 ± 37,18 (a,c,d)	33,94 ± 46,18 (a,c,d)	36,14 ± 37,19 (a,c,d)
Finalistes	rang	7,55 ± 4,4 (a,b,d)	6,85 ± 3,41 (a,b,d)	6,75 ± 3,23 (a,b,d)	6,46 ± 2,96 (a,b,d)	6,3 ± 2,73 (a,b,d)	6,21 ± 2,59 (a,b,d)	6,27 ± 2,42 (a,b,d)	6,08 ± 2,29 (a,b,d)	6,16 ± 2,13 (a,b,d)	6,14 ± 2,04 (a,b,d)	6,04 ± 1,69 (a,b,d)	6 ± 1,42 (a,b,d)
	temps	243,87 ± 41,66 (d)	637,79 ± 73,88	347,59 ± 53,77 (d)	226,48 ± 25,62 (d)	587,06 ± 65,96 (d)	307,08 ± 42,21	256,78 ± 32,7 (d)	654,13 ± 79,13 (d)	353,68 ± 53,22 (a,d)	232,36 ± 27,09 (d)	597,73 ± 65,84 (d)	46,86 311,49 ±
	Diff. 1er.	21,99 ± 55,04 (d)	24,91 ± 31,58 (a,b,d)	45,36 ± 50,74 (a,b,d)	44,44 ± 53,26 (a,b,d)	53,64 ± 65,62 (a,b,d)	66,14 ± 74,3 (a,b,d)	73,01 ± 83,05 (a,b,d)	96,09 ± 103,79 (a,b,d)	118,47 ± 123,06 (a,b,d)	121,8 ± 130,65 (a,b,d)	134,85 ± 144,65 (a,b,d)	146,48 ± 147,83 (a,b,d)
Finisseurs	rang	11,66 ± 5,74 (a,b,c)	12,67 ± 5,19 (a,b,c)	12,87 ± 5,04 (a,b,c)	13,04 ± 4,91 (a,b,c)	13,24 ± 4,72 (a,b,c)	13,34 ± 4,6 (a,b,c)	13,4 ± 4,5 (a,b,c)	13,54 ± 4,31 (a,b,c)	13,59 ± 4,25 (a,b,c)	13,62 ± 4,2 (a,b,c)	13,72 ± 4,09 (a,b,c)	13,79 ± 4 (a,b,c)

temps	258,53 ±	646,52 ±	366,27 ±	237 ± 26,37	602,07 ±	319,62 ±	266,45 ±	670,8 ±	359,2 ±	244,09 ±	610,25 ±	311,92 ±
	51,45 (a,b,c)	83,43 ICI pas abc	98,64 (a,b,c)	(a,b,c)	77,95 (a,b,c)	92,99 (a,b)	34,55 (a,b,c)	85,27 (a,b,c)	51,27 (a,b)	32,47 (a,b,c)	79,31 (a,b,c)	46
Diff.	40,07 ±	50,71 ± 49,5	94,96 ±	101,98 ±	135,13 ±	170,46 ±	184,58 ±	226,34 ±	250,73 ±	260,77 ±	287,31 ±	304,49 ±
1er.	83,33 (a,b,c)	(a,b,c)	127,52 (a,b,c)	123,33 (a,b,c)	144,48 (a,b,c)	249,62 (a,b,c)	248,06 (a,b,c)	239,79 (a,b,c)	188,64 (a,b,c)	198,51 (a,b,c)	233,84 (a,b,c)	237,67 (a,b,c)

Tableau 4 - Classement moyen, temps et temps différentiels durant les relais

(a : diff. Vainqueurs ; b : diff. Podium ; c : diff. Finalistes ; d : diff. Finisseurs - Moyenne ± écart-type).

Le temps différentiel est défini comme la différence entre le temps intermédiaire d'un individu pour une phase de course et la tête de course durant cette même phase. Des tests de significativité ont été effectués : (a,b,c,d) indiquent des différences statistiquement significatives (valeur  $p < 0,05$ ) pour les (a) vainqueurs, (b) médaillés, (c) finalistes et (d) finisseurs.

### **Position et fréquence des gagnants**

Les fréquences de victoire en fin de course sont similaires entre le TOP1 et le TOP2-3 jusqu'à l'épreuve de vélo du deuxième relais. Après cette étape, les fréquences diffèrent significativement entre les deux groupes (Figure 5A). De plus, l'intervalle de confiance à 95% ne fusionne plus à partir de cette étape. Les TOP4-8 et les overTOP8 ont une tendance à la baisse dès l'épreuve de natation du premier relais avec respectivement 8% et 6% de probabilité de finir 1<sup>er</sup> (Figure 5A). En outre, l'ampleur de l'effet montre une première forte augmentation de la différence des probabilités au deuxième relais lors du vélo ( $V' > 0,06$ ) et une deuxième forte augmentation après le vélo du relais 3 ( $V' > 0,13$ ) (Figure 6).

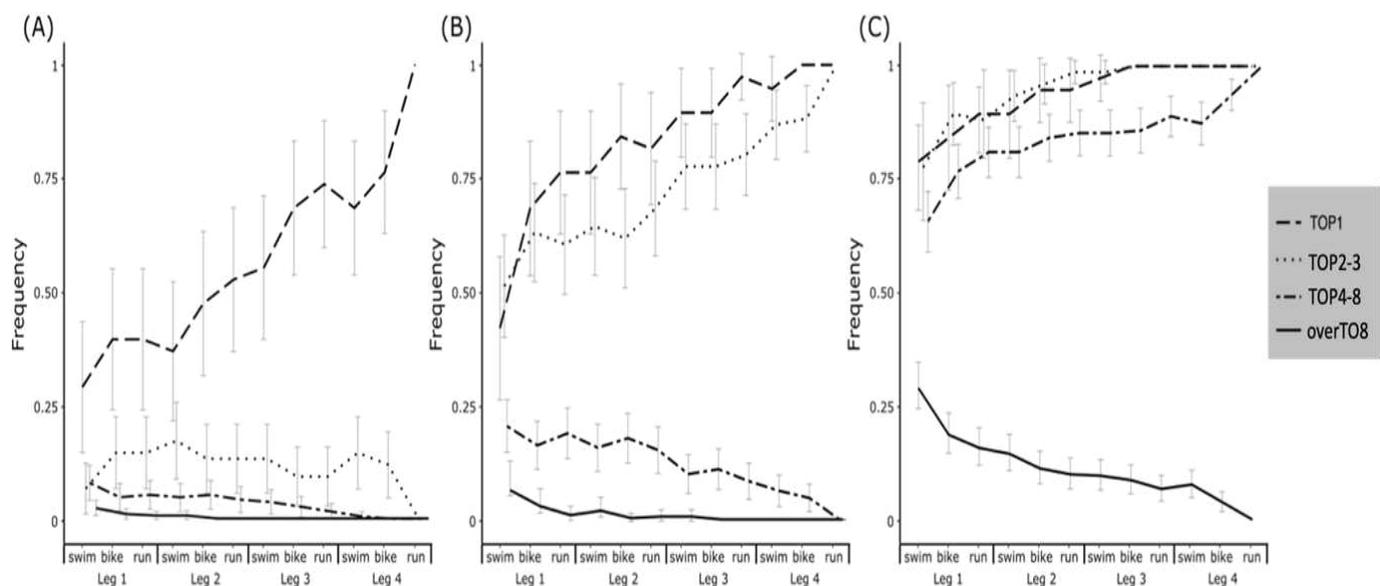


Figure 5 - Fréquence d'atteindre les états finaux

(Vainqueur (A), de médaillé (B) ou de finaliste (C) en fonction de l'état transitoire obtenu lors du REM)

### **Position et fréquences pour les médaillés**

Les fréquences observées pour atteindre le statut de médaillés pour les TOP1 et TOP2-3 sur chaque segment de course sont similaires avec un chevauchement de l'intervalle de confiance à 95% (excepté sur le vélo du relais 2, la course du relais 3 et le vélo du dernier relais (Figure 5B)). Les états transitoires TOP2-3 et TOP4-8 sont différents avec des augmentations et des diminutions respectives de la probabilité d'atteindre le podium à la fin de la course après le vélo du premier relais (Figure 5B). En complément, la méthode du V de Cramer révèle une tendance qui augmente la différence de fréquence d'atteinte du podium en fonction du groupe d'appartenance, avec une forte augmentation après la phase de cyclisme du premier relais (Figure 6). Les fréquences de victoire en fin de course convergent entre le TOP1 et le TOP2-3 jusqu'au vélo du deuxième relais. Après cette étape, les fréquences diffèrent entre les 2 groupes (Figure 5B).

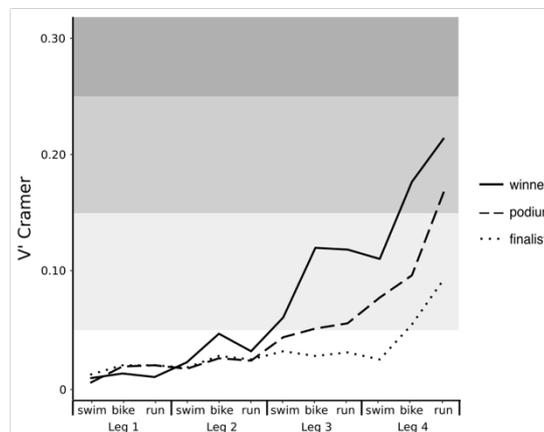


Figure 6 - Évolution de la magnitude d'effet du V' de Cramer calculé pour chaque état final.

Les probabilités d'atteindre l'état final finisseurs sont les mêmes pour les groupes TOP1, TOP2-3 et TOP4-8 mais fortement différentes pour le groupe overTOP8 (Figure 5B). En outre, les équipes dans les états transitoires overTOP8 ont une fréquence observée décroissante afin d'atteindre l'état final vainqueur, médaillé et finaliste au fur et à mesure que la course se poursuit (Figure 5 A,B,C).

### **Discussion**

L'objectif de cette étude était d'analyser la contribution de chaque segment du relais mixte de triathlon à la performance globale depuis l'introduction de ce format au calendrier

international. L'idée principale était de découvrir s'il y avait un moment important sur le résultat de la course le long du relais.

### ***Dynamique de course***

Les différences entre les équipes gagnantes, médaillées, finalistes ou finisseuses sont apparentes tout au long de la course. Si l'on considère uniquement les temps bruts réalisés dans chaque segment, aucune différence n'a pu être observée entre les vainqueurs, les médaillés et les finalistes. Seul le groupe des finisseurs (places 9 au dernier) se distingue de ses homologues plus performants en termes de classement et de temps depuis le début de la course. On peut remarquer que les équipes gagnantes et médaillées se placent rapidement plus en avant que les équipes finalistes (dès le premier segment). Cette stratégie ne viserait pas à créer une différence chronométrique mais seulement à se placer en tête de course, à l'image de ce qui a été observé sur le parcours de natation du format standard, où la natation est un précurseur du placement des triathlètes (62). Dans un deuxième temps, la différence de classement entre la tête de course et les finalistes est créée dès le vélo du deuxième relayeur. Une fois cette différence générée, le fait de stabiliser voire d'augmenter l'écart assure une réelle sécurité (*Tableau 4*). En effet, ce n'est que lors du troisième relais que le rang moyen des vainqueurs diffère de celui des autres concurrents. KG. Thompson fait référence à ce phénomène de temporisation lorsque l'écart est créé avec les poursuivants sur le triathlon individuel, permettant notamment d'économiser de l'énergie (103). L'information-clé réside dans le fait que les deux premiers triathlètes doivent pouvoir se déplacer pour rejoindre le centre du peloton afin de préserver leur chance de finir en tête. Une fois l'écart créé, le troisième coureur prend la tête sur un effort solitaire.

### ***Les étapes 2 et 3 comme points de bascule***

L'un des principaux résultats de cette étude est la forte augmentation de la fréquence des victoires pour l'équipe de l'athlète en tête lors des phases de cyclisme des relais 2 et 3. Ces deux parties de la course sont cruciales dans les stratégies d'équipe (*Figure 5A*), notamment parce qu'il s'agit des phases où l'on passe le plus de temps en course et où il est possible de creuser un plus large écart (71). De plus, la probabilité de gagner avec un athlète en tête dans ces parties augmente avec une force d'association exprimée par le V de Cramer qui s'améliore

également (Figure 6). Ces résultats fournissent des applications pratiques pour composer une équipe REM en fonction des objectifs définis au préalable.

### ***Positions et fréquences pour les médaillés***

De plus, nous pouvons remarquer une différence dans la fréquence d'atteinte du podium entre les TOP2-3 et les TOP4-8 dès le premier relais (Figure 5B). Ceci complète la conclusion de Quagliarotti et al. (87) qui affirment que les relais 3 et 4 sont les plus prédictifs du résultat final, et pour cette raison, la fréquence de victoire et d'atteinte du podium est fortement en faveur des positions TOP1 et TOP2-3 après le deuxième relais (Figure 6). Il est important de mentionner que les équipes positionnées au-delà de la neuvième place dès le premier relais, montrent une faible fréquence de retour et une très faible probabilité de gagner la course (qui diminue tout au long de cette dernière) (Figure 5C). Il est donc important de maintenir très tôt une position en tête de la course (TOP1 – TOP2-3), un mauvais premier relais étant un obstacle majeur pour la victoire comme pour le podium. Il s'agit donc d'une course à élimination "par l'arrière". Cette augmentation de l'adéquation après le deuxième relais est principalement due à la formation de petits pelotons ou même à l'isolement de triathlètes, qui entraînent la suppression de l'effet de traction ; les athlètes effectuent alors un effort de type « contre-la-montre », ce qui augmente le coût énergétique pour combler l'écart créé par les adversaires lors des étapes précédentes (18-20). Les caractéristiques stratégiques de chaque relais mettent en jeu des qualités physiologiques et psychologiques spécifiques à chaque étape du relais avec des exigences particulières liées à la durée plus courte du format super-sprint (87). Ceci est particulièrement vrai pour les deux premiers coureurs pour lesquels l'effort est proche de celui d'un super-sprint individuel, couplé à la promiscuité des autres athlètes, ainsi qu'aux répétitions d'efforts de haute intensité (86,104).

### ***Conséquences sur le profil des relayeurs***

Placer les triathlètes les plus compétents techniquement lors de ces deux premières étapes est une proposition de stratégie (87), afin de répondre à l'exécution de mouvements précis avec une forte contrainte spatio-temporelle, notamment durant les transitions (20). En revanche, les efforts des relayeurs 3 et 4 ont pour but d'ancrer et de sécuriser la position qui leur a été confiée par leurs coéquipiers. Le test d'adéquation qui met en évidence les différences de probabilité d'atteindre le podium pour les TOP4-8 vs TOP1 et TOP2-3 (Figure

6) suggère que les écarts étant déjà créés et les triathlètes s'isolant les uns des autres, l'effort des 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> relayeurs serait plus intense (87) et plus proche d'un effort individuel de type contre la montre. Les résultats de cette étude suggèrent que le REM n'est pas une addition des performances de quatre super-épreuves mais une concordance de la composition du relais en fonction des capacités de chaque relayeur. Il est important d'avoir une bonne connaissance des compétences de chaque relayeur, en particulier de sa puissance sur le vélo et de son habileté technique, ainsi que de sa capacité à ouvrir des brèches, autant d'éléments qui peuvent conduire l'équipe à une victoire ou un podium. Toutefois, sur le plan réglementaire, la composition des équipes de relais est liée à la liste de départ du format individuel de l'épreuve olympique (97). Cela met en jeu des choix stratégiques face aux objectifs de chaque nation pour la course individuelle et pour la course par équipe, au risque de ne pas qualifier d'athlètes avec un profil répondant à chaque relais. En ce qui concerne la composition des équipes de relais, les athlètes des relais 2 et 3 devraient présenter de grandes performances en natation pour maintenir l'équipe au contact de la tête de course, compte tenu des positions moyennes du "Vainqueur" et des "Médailleurs" (*Tableau 4*). Ceci est confirmé par la capacité à créer un écart à ce moment (*Tableau 4*) et par l'augmentation de la magnitude du V de Cramer sur les parties des deuxièmes et troisièmes relayeurs. Pour ces positions, il serait nécessaire de compter sur des compétences spécifiques de "nageur - coureur".

### **Limites**

L'une des limites de cette étude est le faible nombre d'épreuves analysées par olympiade, ce qui explique l'utilisation de l'ampleur de l'effet pour obtenir un indice quantitatif entre les états transitoires et les états finaux. Cette étude prend également en compte les résultats du REM de l'Olympiade 2021, alors que la fédération internationale a fait le choix d'alterner l'ordre de départ entre femmes et hommes pour l'Olympiade 2024 (97). Cela ne remet pas en cause les conclusions précédentes mais pourrait modifier la dynamique de course en retardant la création d'écarts entre les équipes. De plus, l'ensemble des épreuves prises en compte ne tient pas compte de la densité qui, malgré un niveau constant, peut être variable d'une course à l'autre.

### *Conclusion*

L'introduction du relais par équipe mixte de triathlon dans le programme olympique au cours du dernier cycle a révélé un intérêt majeur pour l'amélioration des connaissances sur ce format. La composition et l'ordre de l'équipe de relais est la clé pour atteindre le plus haut niveau de performance. Il semble que la dynamique soit principalement celle d'une course par élimination, c'est-à-dire en commençant la phase de cyclisme avec un groupe de tête suffisamment important dès le premier relais, qui profitera des effets de collaboration. La dynamique favorise ensuite les athlètes qui se distancient des autres sur les relais 2 et 3, les cyclistes les plus forts créant un avantage pour leur équipe. En fin de compte, pour faire la différence entre un podium et la tête de course, le quatrième triathlète du relais doit être capable de fournir des efforts sans l'effet d'entraînement des autres concurrents (hors *drafting*), en particulier pour la natation et le cyclisme. La stratégie consiste à travailler sur les compétences spécifiques des triathlètes, et à les développer à l'entraînement, afin qu'ils se spécialisent dans une étape spécifique.

### *Applications pratiques*

D'après ces résultats, la composition d'une équipe de relais doit être associée aux qualités spécifiques des relayeurs :

- Les athlètes des relais 1 et 2 doivent veiller à rester le plus près possible de la tête de la course.
- Les athlètes des relais 3 et 4 doivent être capables de produire un effort solitaire de type contre-la-montre pour conserver l'avance qui leur a été accordée.
- Les athlètes des relais 2 et 3 doivent avoir d'excellentes performances en natation et en cyclisme.

Le relais par équipe mixte n'est donc pas simplement l'enchaînement de quatre super-épreuves, mais doit bénéficier d'une combinaison de profils complémentaires. La composition de la REM doit être définie avec précision par les entraîneurs afin de connaître le nombre maximal de compositions possibles à partir de leur effectif.

#### *4.4. Apports et continuité vers l'étude suivante*

Les formats « super-sprints » et « relais mixte » disposent de peu d'informations quant au déroulé de course. Leurs analyses sur le plan chronométrique et stratégique permettent de poser les bases d'une dynamique de course sur ces formats très courts. Pour autant, leurs athlètes engagés concourent aussi sur des formats dit « Sprint » et « Standard » et les spécialistes d'une seule de ces distances n'ont pas encore émergé à ce jour. Cette étude a été conçue pour apporter des suggestions pratiques aux entraîneurs et aux cadres techniques afin de former une composition de REM performante et en capacité de s'aligner avec la dynamique de course. Par ailleurs, l'utilisation d'un outil de lecture des potentiels de chaque athlète permet d'avoir un aperçu sur les scénarios de course dans les formats Super-sprint et Standard. Fort de ce constat, la suite de ce travail se porte sur la compréhension des formats Sprint et Standard sur le plan stratégique en analysant les densités de concurrence et les différents scénarios.

#### 4.5. Étude 3 : Estimation des scénarios de course en triathlon standard en fonction de la densité de niveau

##### Résumé

**Contexte** : En triathlon, les stratégies de compétition et les rythmes de course sont sous l'influence du type de compétitions, de la saison, des étapes et du sexe.

**Objectif** : L'objectif de cette étude est de produire des scénarios de course dans le triathlon standard avec *drafting* (1,5 km de natation - 40 km de vélo - 10 km de course à pied) au niveau international selon les densités de performance.

**Méthodes** : A partir des différences de temps, le niveau de chaque triathlète a été estimé via le modèle de *rating* de Stephenson. Des analyses non supervisées, supervisées et statistiques ont été réalisées à partir des données historiques des résultats en compétitions masculines et féminines de l'Union Internationale de Triathlon de 2009 à 2019. Deux niveaux d'épreuve (international et continental) et trois modèles de course (groupé, dispersé et avec échappée) pour chaque sexe à la sortie de la section natation ont été définis.

**Résultats** : Les résultats montrent une différence significative de densité entre les niveaux internationaux (World Triathlon Series (WTS), World Championship (WChamp), Olympic Games (OG) & Test Events (TE)) et les niveaux continentaux [Continental Cup (ConCup) & Continental Championships (ConChamp)]. Les résultats de la Coupe du Monde (WCup) présentent une plus grande variabilité. Le niveau de densité du peloton de départ modifie la probabilité de nager « groupé » (*dispersion de l'indice* = 189,06 pour les hommes ; 176,47 pour les femmes), de nager « dispersé » (*dispersion de l'indice* = 227,48 pour les hommes ; 204,42 pour les femmes) et de nager « avec échappée » (*dispersion de l'indice* = 229,52 pour les hommes ; 219,89 pour les femmes).

**Conclusion** : Cette étude fournit des informations aux athlètes et aux entraîneurs avant la course en fonction de la liste de départ, afin de mieux préparer leur stratégie, ainsi qu'une analyse plus détaillée des objectifs de performance pour chaque athlète.

## Introduction

Les épreuves de triathlon comprennent des phases de natation, de cyclisme et de course à pied, ponctuées par deux transitions (104). Le triathlon est devenu un sport olympique aux Jeux Olympiques de Sydney en 2000, avec pour distance olympique : 1500 m de natation, 40 km de cyclisme et 10 km de course à pied, pour une durée prévue de 1h45 à 2h pour les hommes et les femmes, respectivement. Depuis deux décennies, le WTS (World Triathlon Series) a été créé pour compléter l'offre de compétitions internationales : Jeux Olympiques, WChamp, Coupe du Monde, ConChamp, ConCup. Ces compétitions permettent d'accumuler des points afin d'apparaître dans le classement de World Triathlon, qualificatif pour les Jeux de l'Olympiade. Les points sont distribués en fonction du classement de chaque course et dépendent donc de la performance de chaque individu par rapport aux résultats des autres concurrents (107).

Le format du triathlon olympique a la particularité de permettre les phénomènes d'aspiration (*drafting*), ce qui génère différentes stratégies d'allure tout au long de la course. En natation, l'économie de course avec un positionnement à côté d'un autre nageur prévaut (83,105), afin de profiter de sa vague. Il semble également important de se positionner à l'avant du groupe et de ne pas se faire piéger au milieu de la concurrence (11). Le cyclisme est susceptible d'être influencé par le *drafting*, via le bénéfice énergétique obtenu en peloton (81), qui réduit également la dépense d'énergie pour le reste de l'épreuve (108). Il semblerait donc pertinent de rouler de manière groupée et d'économiser le plus d'énergie possible tout en gérant les autres concurrents présents dans la course.

De plus, la stratégie d'allure dans les triathlons à *drafting* a été définie comme un facteur décisif dans la performance finale (8,25). L'allure adoptée sur la partie natation est dite en "*Positive Pacing*" afin d'atteindre une position stratégique après la transition de phase 1 (11) (91). En revanche, le rythme et l'intensité de l'effort pendant la phase cycliste sont plus stochastiques, en raison des changements de direction, des conditions environnementales et des tactiques adverses. Dans la littérature, ils ne semblent pas corrélés avec la performance finale (91). Une course à pied, avec une phase initiale rapide, suivie d'un ralentissement puis d'une accélération finale intense pour se détacher des athlètes restants, qualifiée de

"parabolique" semble être la stratégie la plus régulièrement adoptée. Cependant, de tels rythmes ont été observés sur des courses d'un jour, mais pas sur des analyses plus larges. Il est donc important d'analyser les différents scénarios de course en fonction des oppositions dans le triathlon avec *drafting*.

En outre, cette approche segmentée du rythme de course est pratique pour comprendre les déterminants de la performance, mais n'est peut-être pas la plus représentative de la performance globale de l'activité. Pour résoudre ce problème, le soutien à la prise de décision par une stratégie holistique s'est avéré efficace (8,90). En ce sens il semblerait intéressant d'étudier la performance en relation avec les interactions entre triathlètes selon leur niveau. Afin d'étudier la densité de la concurrence au début d'un triathlon, le rating de Stephenson peut s'avérer utile (109). Ce type de classement s'inspire de différents modèles déjà mis en œuvre aux échecs (110) et au tennis (111) qui permettent d'estimer la probabilité d'un résultat dans une confrontation. En utilisant cet indicateur fiable, l'objectif est de mesurer la probabilité de gagner une future confrontation, en considérant chaque triathlète inscrit dans un duel contre chaque adversaire.

L'objectif de cette étude consiste ainsi à quantifier la densité du triathlon durant les phases de natation, et les suivantes, afin de mieux comprendre la physionomie des différents scénarios de course.

## ***Méthodes***

### ***Données***

Cette analyse a porté sur les données d'athlètes d'élite ayant participé à des compétitions entre 2009 et 2019. Toutes les performances dans les courses ITU ont été collectées : WTS, WChamp, WCup, ConChamp, ConCup et OG. Dans le cadre de 708 courses au format standard (469 courses ouvertes aux hommes, 239 aux femmes), 27 352 performances ont été réalisées par 3873 athlètes masculins et 2924 athlètes féminines respectivement. Les données de course de l'ITU sont accessibles publiquement et extraites de la base de données du World Triathlon ([www.triathlon.org](http://www.triathlon.org)). Toutes les données ont été téléchargées à l'aide d'un script R interrogeant une API, afin d'obtenir les variables suivantes : identifiant de la course, date de la compétition, identifiant de l'athlète, sexe, format de la course, niveau de compétition,

temps de natation, temps de transition 1, temps de cyclisme, temps de transition 2, temps de course à pied et temps global.

### ***Estimation du niveau à l'aide d'un système de classification***

Afin d'identifier le meilleur système de notation probabiliste, trois méthodes ont été testées : Elo, Glicko et Stephenson (109–111). Le classement final d'une course a été converti en résultats de duels par paires : un athlète terminant à la 4<sup>ème</sup> place a été considéré comme ayant perdu 3 duels contre les 3 premiers mais gagné ses duels contre tous les autres concurrents classés après lui. Les athlètes disqualifiés (*DSQ*) et ceux qui n'ont pas terminé la course (*DNF*) ont été considérés comme étant arrivés en dernier et ayant été battus par tous les autres participants.

Toutes les courses ont été regroupées par périodes de 3 mois sur les dix années d'observation. Cette durée a été choisie pour maintenir un niveau d'athlètes raisonnablement inchangé au cours de chaque phase. Les résultats des courses ont été divisés en trois ensembles : un premier ensemble qui a fourni une initialisation séquentielle de l'évaluation, un ensemble connu sous le nom d'ensemble de "validation" et un dernier ensemble de "test" qui a permis de quantifier la précision du système d'évaluation. Sur l'ensemble "validation", une mesure appelée perte logarithmique a été utilisée pour évaluer la différence entre le résultat observé des duels et la probabilité du résultat attendu, compte tenu des classements des duellistes au début de la phase. Les courses ont été triées par ordre chronologique, puis réparties comme suit : 50 % pour l'ensemble d'initialisation, 25 % pour l'ensemble de validation et 25 % pour l'ensemble test.

Les systèmes Elo, Glicko et Stephenson ont été mis en œuvre à l'aide du package *PlayerRatings* (109). L'optimisation des paramètres de chaque modèle a été réalisée à l'aide de l'algorithme *L-BFGS-B* disponible dans la fonction *optim* du langage R, afin de minimiser la perte logarithmique sur l'ensemble de validation.

### ***Attribution des scénarios***

La description des scénarios est basée sur la définition d'un peloton en triathlon à 2 points de contrôle, la sortie de la première transition (T1) et la sortie de la deuxième transition (T2) :

- 1. Deux athlètes sont considérés comme faisant partie du même peloton s'ils sont séparés par moins de 4 secondes.
- 2. Un peloton est composé d'au moins deux athlètes (62). (Figure 7)

Nous avons défini l'inclusion d'une course dans une classe de scénario en prétraitant l'ensemble des données en trois étapes :

- (i) La mise en œuvre d'un regroupement non supervisé, afin de réduire la part de subjectivité dans l'attribution des scénarios de course. Ce regroupement a été effectué sur les 72 courses représentant le plus haut niveau international (WTS/WC/OG/TE), en utilisant comme variables le pourcentage de concurrents dans les pelotons un à cinq, le pourcentage de concurrents après le peloton numéro cinq et le nombre d'athlètes parmi les 10 premiers au classement de Stephenson en dehors du premier peloton. Le nombre de grappes (K=6) est fixé de manière optimale à l'aide de la méthode statistique de Gap (112)
- (ii) L'idée est de regrouper les clusters les plus similaires, en utilisant le dendrogramme résultant de la classification ascendante hiérarchique, afin de ne former que trois groupes correspondant aux trois types de scénarios définis empiriquement par les experts de la discipline. (Tableau 5)
- (iii) Nous avons ensuite étiqueté les courses en utilisant les scénarios précédemment identifiés afin de catégoriser les 637 courses restantes à l'aide de l'algorithme Safe Semi-Supervised Support Vector Machine (S4VM) (113).

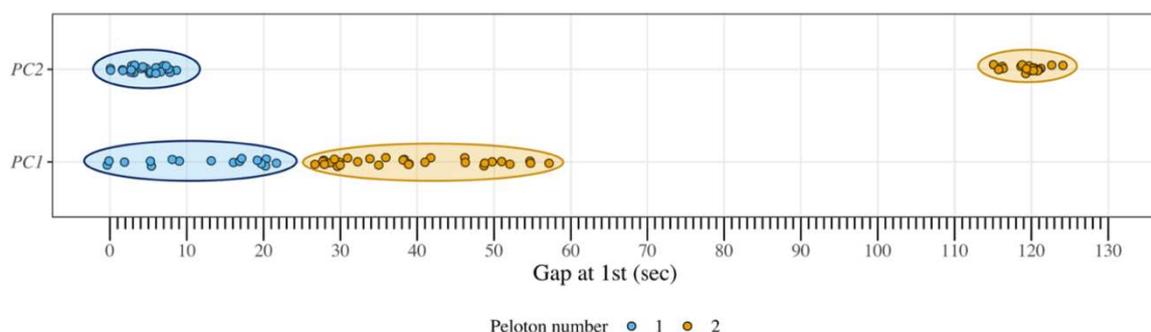


Figure 7 - Illustration de la différence de 4" formant l'écart entre 2 groupes

PC1 (Point de contrôle 1) and PC2 (Point de contrôle 2)

**Dispersion du rating de natation**

Nous avons utilisé le rating de natation des athlètes inscrits pour construire un indicateur  $I$  qui peut expliquer le scénario de natation. Pour construire cet indicateur, nous avons d'abord calculé le rating médian en natation en utilisant les notes de natation de chaque athlète inscrit sur la liste de départ. Ensuite, pour chaque athlète dont le rating de natation était supérieur au rating médian de natation de la course, la différence avec ce rating médian a été calculée. L'indicateur  $I$  est donc la moyenne de ces différences. Nous avons exprimé mathématiquement  $I$  comme suit :

$$I = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n (R_i - R)^2 \times 1_{\{R_i > R\}}$$

avec :

$n$  le nombre d'athlètes inscrits sur la liste de départ

$R_i$  la note de natation de l'athlète  $i$

$R$  la note médiane de la course

et  $m = \sum_{i=1}^n 1_{\{R_i > R\}}$

**Analyse statistique**

Les analyses statistiques ont été effectuées séparément pour les courses masculines et féminines. Le seuil de signification a été fixé à 5 % pour tous les tests. Les probabilités de réalisation de chaque scénario ont été comparées par le test Z de comparaison des proportions. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé afin de comparer les distributions de l'indice de dispersion du rating préalablement calculé en fonction du scénario de natation réalisé. En cas de significativité, le test post hoc de Conover de comparaison des distributions deux à deux a ensuite été utilisé. Toutes les données ont été traitées et analysées à l'aide de R v.1.4.1106.

	% pack n°1	% pack n°2	% pack n°3	% pack n°4	% pack n°5	% after pack n°5	%Top 10 outside pack n°1
1	12.95	81.58	2.71	0	0	0	7.50
2	63.76	26.79	5.02	1.19	0	0	1.38
3	12.56	21.35	41.22	15.69	5.54	0	7.46
4	37.73	40.57	12.16	1.68	2.17	1.70	3.50
5	92.77	3.16	0.59	0.43	0	0	0.33
6	42.96	10.94	33.22	8.52	1.16	0.51	3.45

Tableau 5 - Apprentissage non supervisé (clustering) de la composition du groupe

(En pourcentage à la fin de la natation pour les 72 courses sélectionnées.)

## Résultats

### Analyse descriptive

Le nombre d'athlètes féminines et masculins présents au départ des courses, leurs temps, leurs écarts de temps moyens entre chaque athlète et les ratings par typologie de course sont indiqués dans le Tableau 6. Les épreuves de la Coupe continentale présentent un rating significativement inférieur à celui des autres types de courses pour les femmes comme pour les hommes. Les courses féminines ne montrent pas de différence significative dans le nombre de partants selon les types de course alors que chez les hommes un nombre plus faible de participants est enregistré lors des compétitions continentales (vs *WChamp*, *WTS* et *WCup*). Des différences entre les temps de course apparaissent de manière graduelle selon les types de course (Tableau 6). Pour les hommes, les temps totaux oscillent autour de 6700 secondes ( $6704 \pm 314$ ,  $6687 \pm 175$ ,  $6700 \pm 279$ ) pour les compétitions *WChamp*, *OG/TE*, *WTS* respectivement puis s'accroissent pour les étapes de *WCup*, *ConChamp*, *ConCup* ( $6834 \pm 371$ ,  $6901 \pm 514$ ,  $7058 \pm 485$ ) respectivement, (Tableau 6). Chez les femmes, la même tendance est observée. De plus, la comparaison des temps de course totaux entre les hommes et les femmes est significativement différente indépendamment du type de course.

L'analyse des moyennes des écarts de temps au vainqueur montre une différence significative entre *WTS / OG / TE / WChamp* & *Wcup/ConCup/ConChamp*, sauf entre *OG / WCup* pour les hommes (Tableau 6). De plus, on note des différences significatives avec des moyennes supérieures d'écarts de temps entre les participants pour les *Wcup*, *ConCup* et *ConChamp*

quel que soit le sexe (Tableau 6). A l'instar des temps totaux, une augmentation graduelle des écarts est observée entre les compétitions : WChamp, OG/TE, WTS, WCup, ConChamp, ConCup pour les hommes comme pour les femmes (Tableau 6). La comparaison entre les courses féminines et masculines montre des différences de temps plus faibles pour le vainqueur chez les hommes. Cette différence augmente lorsque le niveau de l'ensemble diminue (diminution de rating (Tableau 6). En effet, le rating de Stephenson montre une compétitivité plus élevée dans les courses internationales par rapport aux courses continentales, avec une tendance à la baisse lors des championnats du Monde et des Jeux olympiques, pour les hommes comme pour les femmes (Tableau 6).

La différence de rating entre les sexes est statistiquement différente avec une moyenne plus élevée pour chaque compétition pour les hommes, avec un effet renforcé pour les courses internationales WTS, OG/TE et WChamp (Tableau 6).

	Hommes						Femmes					
	WChamp	OG/TE	WTS	WCup	ConChamp	ConCup	WChamp	OG/TE	WTS	WCup	ConChamp	ConCup
N	51.17 ±	52.2 ± 5.67	46.25 ±	45.15 ±	41.62±	37.12±	38.42 ±	45.6 ± 8.08	43.22 ±	38.85 ±	39.17 ±	37.28 ±
	11.84 <sup>f</sup>		8.68 <sup>f</sup>	13.41 <sup>f</sup>	11.14	12.52 <sup>a,c,d</sup>	13.10		14.98	13.01	14.33	12.96
Temps	6704 ±	6687 ±	6700 ±	6834 ±	6901 ±	7058 ±	7393 ±	7174 ±	7404 ±	7576 ±	7583 ±	7881 ±
Total Time	314.08	174.99	278.61	371.29	514.09	484.53	333.52	502.70	349.34	504.36	479.53	566.42
(sec)	f	f	d,e,f	c,f	c	a,b,c,d	f	f	d,f	c,f		a,b,c,d
Ecarts												
moyens	12.87 ±	13.37 ±	13.85 ±	17.09 ±	33.53 ±	35.30 ±	16.08 ±	15.02 ±	17.67±	27.01 ±	36.73 ±	50.82 ±
entre	24.41	38.12	28.99	39.39	105.98	81.04	25.25	19.20	27.52	162.25	76.20	84.57
chaque	d,e,f	e,f	d,e,f	a,c,e,f	a,b,c,d,f	a,b,c,d,e	d,e,f	d,e,f	d,e,f	a,b,c,e,f	a,b,c,d,f	a,b,c,d,e
athlète												
(sec)												
Rating de	1982.8 ±	1987.8 ±	1951.6 ±	1785.5 ±	1726.3 ±	1618.9 ±	2124.8	2116.4 ±	2088.1 ±	1849.3 ±	1831.3 ±	1646.5 ±
Stephens	129.9	151.4	102.7	109.8	120	64.57	±206.2	217.4	178.1	155.5	157.2	76.2
	d,e,f	e,f	d,e,f	a,c,f	a,b,c,f	a,b,c,d,e	d,e,f	d,e,f	d,e,f	a,b,c,f	a,b,c,f	a,b,c,d,e

Tableau 6 - Nombre, temps total, écart de temps et rating selon le type de course

(Différence significative : a : avec WChamp, b : avec JO/TQO, c : avec WTS, d : avec Wcup, e : avec ConChamp, f : avec ConCup)

### Regroupement des scénarios de course et propagation des labels

La classification semi-supervisée émet une moyenne de 6 groupes (Tableau 7). Nous constatons une proximité entre les groupes 1 et 3, représentant respectivement 9 et 14 courses.

Ces deux groupes, avec un faible pourcentage d'athlètes dans le groupe de tête et un grand nombre d'athlètes favoris en dehors du groupe de tête, sont les courses dites "d'échappée" (Figure 8). Le groupe n° 5 (Tableau 7) présente un pourcentage élevé d'athlètes dans le groupe de tête (92,8%), avec un nombre relativement faible d'athlètes en dehors du premier groupe formant un "peloton" (4,2%), un tel type de course correspond à une course "groupée". Les autres groupes 6, 4 et 2 (Tableau 7) sont similaires en ce qui concerne la disparité de distribution dans les pelotons et le classement hiérarchique ascendant, ils correspondent à des courses "dispersées" (Figure 8).

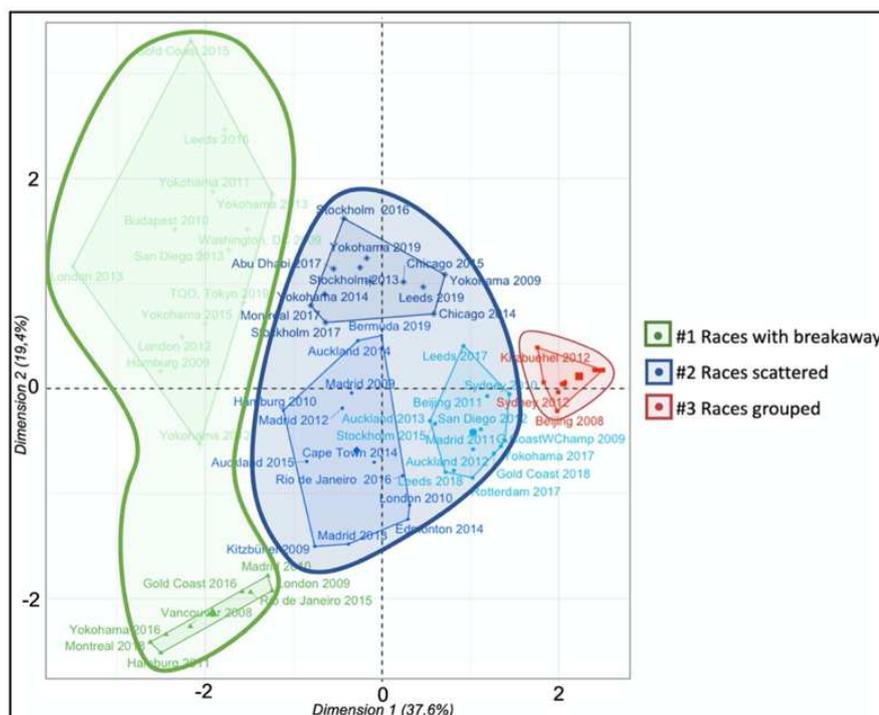


Figure 8 - Factor Map d'apprentissage non-supervisé (clustering)

(Composition du groupe en pourcentage à la fin de la natation pour les 72 courses sélectionnées)

Dans les courses "avec échappée", 12,7% des participants se trouvent dans le groupe de tête (Tableau 7). Les courses "dispersées" comptent 48,7% de leurs participants dans le groupe de tête. Les courses "groupées" comptent 92,8% de leurs participants dans le groupe de tête. Les moyennes du nombre de favoris en dehors du groupe de tête restent similaires entre les deux regroupements hiérarchiques. Ce regroupement permet de mettre en évidence (Tableau 7) un faible nombre de courses avec une sortie de natation groupée, notamment chez les femmes (5%).

Cluster	% pack n°1	% pack n°2	% pack n°3	% pack n°4	% pack n°5	% after pack n°5	Top 10	N race (%)
							favorites outside pack n°1	
<i>grouped swimming</i>	84.10	4.77	1.69	0.41	0	2.06	0.34	♀ 12 (5,02%) ♂ 50 (10,66%)
<i>swimming scattered</i>	35.69	21.04	13.13	5.64	2.34	7.57	3.04	♀ 109 (45,61%) ♂ 229 (48,83%)
<i>swimming with a breakaway</i>	9.52	30.36	18.73	11.33	5.85	11.82	7.05	♀ 118 (49,37%) ♂ 190 (40,51%)

Tableau 7 - Classification semi-supervisée par la méthode S4VM avec K=3

On observe également qu'une course féminine sur deux est classée avec une échappée (49,4%) alors que la proportion la plus élevée chez les hommes concerne le scénario de natation dispersée (48,8%).

### **Comparaison des distributions de rating par scénarios de course**

Le test de Kruskal-Wallis montre des différences significatives entre les distributions de l'indice de dispersion des ratings selon les groupes créés pour les courses féminines et masculines (Figure 9).

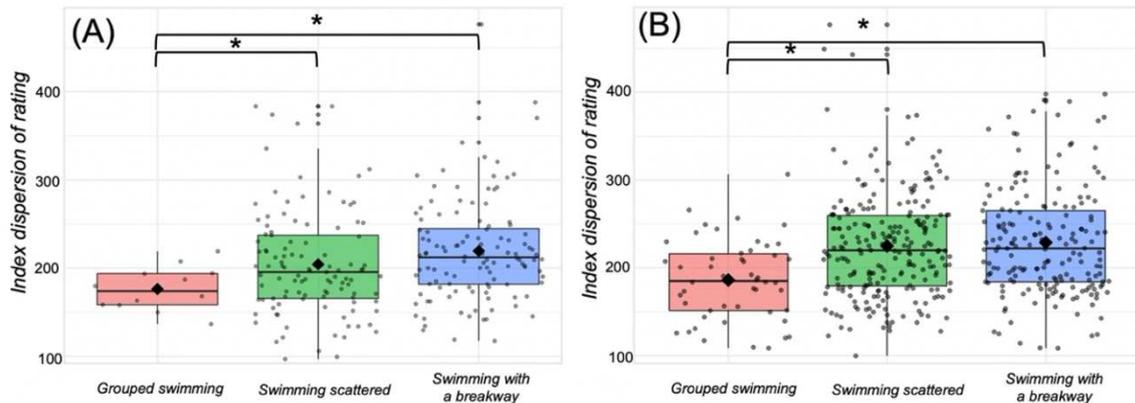


Figure 9 - Indice de dispersion du rating des courses selon le scénario de natation

(Courses masculines (A) et féminines (B))

Pour les courses féminines, on observe une différence significative dans la distribution entre les courses groupées  $176,47 \pm 24,66$  et les courses échappées  $219,55 \pm 57,92$  (Figure 9 B), ainsi qu'entre les courses échappées  $219,55 \pm 57,92$  et les courses dispersées  $204,42 \pm 59,49$  (Figure 9B). La différence entre les scénarios « échappée » et « groupé » obtient une valeur de  $p = 0,069$ .

Le test de Conover indique des différences significatives pour les courses masculines, entre les courses groupées ( $186,19 \pm 45,55$ ) et les courses échappées ( $228,94 \pm 60,87$ ;  $p < 0,05$ ) et entre les courses groupées ( $186,19 \pm 45,55$ ) et les courses dispersées ( $224,94 \pm 60,38$ ;  $p < 0,05$ ).

#### **Probabilité de course & scénario de course**

Pour les femmes, les tests de comparaison de proportions montrent qu'à l'issue de la première transition, la probabilité d'observer une course dispersée ( $P = 0,47$ ) n'est pas significativement différente de la probabilité d'observer une course avec échappée ( $P = 0,48$ ). La probabilité d'observer une course dispersée est significativement supérieure à la probabilité d'observer une course groupée ( $P = 0,04$ ). De même la probabilité d'observer une course avec échappée ( $P = 0,48$ ) est significativement supérieure à la probabilité d'observer une course groupée ( $P = 0,04$ ).

Pour les courses masculines, la probabilité d'observer une course dispersée ( $P = 0,496$ ) est significativement plus élevée que la probabilité d'observer une course avec échappée ( $P =$

0,397). Les probabilités d'observer une course dispersée ( $P = 0,496$ ), ou en échappée ( $P = 0,397$ ) sont significativement plus élevées que la probabilité d'observer une course groupée ( $P = 0,106$ ). De plus, la proportion d'avoir une course groupée sur les courses masculines ( $P = 0,106$ ) est significativement plus élevée que la probabilité d'avoir une course groupée sur les courses féminines ( $P = 0,040$ ).

A des fins de support scientifique auprès des staffs, un test avant les épreuves individuelles masculines et féminines des Jeux Tokyo a été réalisé. L'indice de dispersion calculé pour cette course a été classé parmi les trois groupes définis précédemment (Figure 9). La probabilité la plus élevée d'appartenir au scénario de nage groupée pour la course individuelle masculine était de 0,65 tandis que pour la course individuelle féminine, la probabilité la plus élevée était pour le scénario d'échappée (59 %) (Tableau 8).

		<i>grouped swimming</i>	<i>swimming scattered</i>	<i>swimming with a breakaway</i>	<i>Simulation Scenario of Tokyo 2020</i>
<i>Men</i>	<i>Index of dispersion</i>	189.06	227.48	229.52	226.73
	<i>P</i>	0.02	0.88	0.1	/
<i>Women</i>	<i>Index of dispersion</i>	176.47	204.42	219.89	234.99
	<i>P</i>	0.02	0.39	0.59	/

Tableau 8 - Estimation du scénario de la course olympique de Tokyo 2020

### Discussion

Les principaux résultats de cette étude mettent en avant :

- ✓ des différences de densité de compétitivité entre les types de compétition internationales et continentales,
- ✓ une classification des compétitions selon trois principaux scénarios de course,
- ✓ une dépendance du scénario de course en fonction des résultats à la sortie de la phase de natation.

Couplés, ces résultats permettent de mettre en place un système de quantification du niveau des athlètes, selon les résultats des confrontations antérieures via le système de rating de Stephenson.

Une déclinaison pratique pour les athlètes et le staff réside dans la possibilité de modifier son allure et sa stratégie de course en fonction de la liste de départ, selon le profil des athlètes présents. La stratégie peut être adaptée en fonction de la probabilité du scénario de course : créer rapidement des écarts pour évincer certains adversaires ou, dans d'autres configurations, rester dans une stratégie plus attentiste, en ciblant la phase de course à pied. Ces décisions sont directement liées à la performance finale, et nous estimerons son possible impact sur la qualification et le déroulé de l'épreuve Olympiques (114).

### ***Densité de compétition mesurée par le rating***

La compétitivité de la première phase met en évidence l'impact de la natation sur la performance globale. Une analyse de la Coupe du monde a montré que la sortie de l'eau du premier groupe de nageurs était corrélée avec leur position en fin de course (98). En effet, 90% des vainqueurs masculins et 70% des vainqueurs féminins étaient tous placés dans le premier groupe de nageurs. Sur une coupe du monde, plus de 50% des nageurs en tête à la sortie de la section natation sont en tête à la première bouée. En outre, la performance globale de la course était significativement corrélée à la vitesse moyenne de nage et à la position après l'étape de nage (3). De plus, durant cette phase, la notion de drafting peut apporter un gain important (23) car elle permet de diminuer le coût énergétique. En conséquence, la densité du peloton durant cette épreuve permet d'assurer une performance globale en retardant l'apparition de la fatigue (115). Le grand défi pour les retardataires se situe dans la phase de transition. Cette phase est un moment où le triathlète évalue les écarts avec les autres. L'enjeu à ce moment-là est de faire la transition le plus rapidement possible et de rattraper le groupe qui sort de l'aire de transition ou, pour les premiers, de prendre de l'avance et de générer une pression temporelle sur les autres concurrents. C'est pourquoi la deuxième transition se retrouve directement liée au classement final (85).

L'utilisation d'un classement, via le rating de Stephenson, permet d'estimer le niveau des triathlètes en fonction de leurs homologues au cours de leur carrière. Cette mesure de la compétitivité permet de fournir le niveau moyen et l'écart-type d'une course. L'identification du niveau de course à partir de cette mesure de compétitivité offre également la possibilité d'affiner des stratégies de sortie afin d'optimiser le classement via la collecte de points ITU, qualificatif pour les Jeux Olympiques. Techniquement, le nombre de points apportés par une

course est hiérarchisé dans l'ordre suivant : WChamp, WTS, OG, TE, WCup, ConChamp et ConCup (règles ITU). Il est à noter que le niveau Coupe du Monde n'a pas de différence significative avec les JO et ConChamp. De plus, ces courses ont un écart-type important, ce qui peut s'expliquer par le moment de leur organisation dans la saison ou encore leur situation géographique. Une mauvaise place dans une course de haut niveau vaut autant de points qu'une première place dans une course de bas niveau avec un niveau de densité différent. Par exemple, une première place en Coupe du Monde équivaut à une dixième place aux Championnats du Monde. Cela oriente certainement le choix d'un athlète pour assurer son classement mondial. Deuxièmement, il est intéressant d'établir une stratégie proactive, en confrontant les gains d'énergie au sein d'un groupe par rapport à un scénario plus isolé.

### ***Classification des compétitions***

L'analyse de la densité de niveau sur la ligne de départ influence également l'orientation de la course. Deux types de courses apparaissent : les épreuves internationales (Jeux Olympiques, WTS, WChamp) et celles de niveau inférieur (ConCup, ConChamp). Ces groupes peuvent être anticipés avant la course à partir du calcul de la note moyenne de l'épreuve (tableau 2), de sa densité et de sa compétitivité. Une hypothèse explicative serait que les meilleurs athlètes s'affrontent dans les courses où le rapport de points est le plus élevé. Le classement serait un estimateur du niveau avant la course. Le rating permet de mieux discriminer entre elles les différentes compétitions.

### ***Estimation du profil de course***

Cette étude est la première à estimer les profils de course en fonction de la compétitivité du groupe d'athlètes et du résultat de la phase de natation. Les trois groupes de scénarios permettent d'identifier ces profils (Tableau 8). Les indices de dispersion calculés entre les trois groupes montrent les différences de profil de course entre hommes et femmes, ce qui confirme un impact du niveau de densité sur son déroulement. Les courses masculines se répartissent principalement entre des scénarios de nage dispersée et de nage groupée. Ceci pourrait s'expliquer par la forte densité d'athlètes excellents nageurs dans les courses masculines et par le nombre légèrement plus élevé d'hommes que de femmes sur la ligne de départ (116). Ces différences pourraient étayer les résultats féminins quant aux plus faibles probabilités de voir un groupe « chasseur » combler l'écart lors d'une course d'échappée

féminine. La phase de natation semble avoir une influence encore plus grande sur le profil des courses féminines (90)(11). Il semble en effet plus difficile de rejoindre le groupe de tête lorsque les triathlètes se retrouvent dans un groupe de poursuite (89). Les scénarios de course présentent des probabilités différentes chez les hommes et les femmes (61,62,117) avec une influence différentielle de chaque phase dans la performance finale (8).

### ***Applications pratiques***

Un corolaire de cette étude est d'apporter à la fédération française de triathlon une nouvelle forme d'objectivation des données de compétition. En ce sens, un athlète débutant à un certain niveau de compétition jugera de ses possibilités sur la première phase de course pour éviter d'être mis hors-jeu trop tôt. Il peut également utiliser ces indicateurs afin d'adapter sa stratégie de course. Un expert, quant à lui, pourra utiliser ces outils pour quantifier une performance par rapport à ses attentes et juger la performance avec un support factuel. Toutes ces attentes peuvent être adaptées aux différentes étapes de compétition et permettre ainsi à un débutant de mûrir à travers les étapes, d'accumuler de l'expérience et des points, pour finalement atteindre des courses à haut rendement dans la qualification olympique.

### ***Limites***

Le modèle utilisé n'intègre pas les variables environnementales telles que la température, l'humidité, l'altimétrie ou les courbes du tracé. Ces éléments ont un impact sur la performance globale, comme la chaleur, ou les capacités techniques dans les différents modes de locomotion qui ne sont aujourd'hui pas intégrés. Ensuite, le parcours et la rivalité peuvent parfois être plus déterminants pour la stratégie de course qu'un objectif d'allure (11,118). Troisièmement, la base de données reprend une masse de course importante mais le principal frein à l'analyse des temps et des vitesses reste la connaissance des distances parcourues exactement, à ce jour les organisateurs peuvent faire varier les distances de quelques mètres à plusieurs centaines, ce qui peut altérer les résultats. Quatrièmement, la réglementation en vigueur autorise le port de combinaisons en fonction de la température de l'eau et de l'air. Cette variable n'a pas été prise en compte dans l'étude. Cela pourrait avoir un effet sur certains profils d'athlète en minimisant la perte de temps durant la phase de natation par la diminution de leur coût énergétique (93,119,120). Dans une analyse future, il serait

intéressant d'étendre ce modèle à la partie cycliste quant aux probabilités de rattraper une échappée, avant d'entrer dans la deuxième zone de transition. Cela permettrait de définir l'intérêt ou non de maintenir l'effort d'un groupe en tête de course. (93,119,120).

### *Conclusion*

Cette étude identifie les différents scénarios de performance dans les triathlons de distance standard en estimant le niveau de chaque athlète. Les résultats montrent que la phase de natation peut influencer le parcours de course, son rythme et les positionnements, en fonction de la densité au départ de la course. En particulier, la probabilité d'avoir une échappée dans les courses féminines est plus élevée que dans les courses masculines. Cette étude présente de nouvelles options pour aider les athlètes, les entraîneurs et leurs staffs avant les compétitions et pendant la course afin d'adapter les stratégies compétitives.

#### *4.6. Apports, transfert vers le terrain et continuité*

L'étude 3 a permis de distinguer les différents scénarios de course à la sortie de la phase de natation, en fonction de la densité de concurrence. Cette identification permet d'établir des stratégies en amont de la course ou d'estimer des schémas probables. Déterminer l'influence de concurrents et l'importance de la densité sur le déroulement d'une course est une étape importante dans l'analyse de la performance finale sur ce type d'épreuve.

C'est pourquoi l'étude 4 analysera la phase de cyclisme des triatlons, en prenant toujours en compte la concurrence mais aussi la singularité technique des parcours cyclistes, qui traduit la complexité tactique et les mouvements de course avant la phase de course à pied.

#### 4.7. Étude 4 : Estimation des scénarios de course selon le parcours et le niveau

**Auteurs :** Ledanois T.<sup>1,2</sup>, Fouillot C.<sup>1</sup>, Libicz S.<sup>2</sup>, Toussaint JF.<sup>1,4</sup> & Sedeaud A.<sup>1</sup>

##### Résumé

**Contexte :** Le triathlon suit de nouvelles tendances tant sur le plan des dynamiques de course en fonction de l'évolution des réglementations. En devenant sport olympique, l'aspiration est devenue légale et les stratégies et les allures de course s'en sont vu modifiées.

**Objectif :** L'objectif de cette étude est d'analyser comment les différents types de parcours cyclistes peuvent influencer la situation lors de la deuxième transition, en prenant en compte la position des participants à la fin de la natation (transition 1).

**Méthodes :** Les 23 triathlons distance olympique des séries mondiales, Jeux Olympiques, qualification olympique, et championnats du monde organisés ont été analysés sur les saisons 2016 à 2019, soit 1 885 données de courses, réalisées par 839 femmes et 1 046 hommes. Pour catégoriser les circuits, les sections cyclistes ont été classifiées grâce au tracé GPS. L'affectation des scénarios de course, s'est faite par méthode de clustering semi supervisé.

**Résultats :** Les résultats montrent des dynamiques différentes chez les hommes et les femmes : on constate une absence de corrélation entre le scénario à T1 et T2 pour les hommes ( $p=1$ ) alors que ce dernier est bien corrélé chez les féminines ( $p=0,008$ ).

Indépendamment du type de parcours cycliste, les courses féminines se caractérisent par un scénario de course avec échappée significativement plus probable ( $p= 0,002$ ). Dans les courses masculines, la probabilité d'échappée sur des parcours avec de nombreux virages est plus forte que sur des parcours sans spécificité ( $p=0,039$ ). Sur les parcours sans caractéristique technique, la probabilité d'assister à une échappée à l'issue de la partie cycliste est significativement plus élevée ( $p= 0,029$ ).

**Conclusion :** Cette étude permet au staff encadrant et aux athlètes de définir en amont des stratégies en prenant en compte la probabilité de réalisation de différents scénarios prédéfinis. La définition des types de scénarios, couplés aux analyses statistiques réalisées, permet de déceler certains effets de la densité de concurrence et des typologies de parcours cycliste. Ces résultats permettent d'améliorer la compréhension des facteurs de performance

dans le triathlon individuel et ont vocation à être enrichis par l'analyse de l'influence potentielle d'autres facteurs environnementaux (température, hydrologie) ou de tracé (types de plan d'eau, nombre de bouées, sortie à l'australienne, type de départ, etc.).

**Mots clés** : Triathlon, parcours, performance sportive, cluster

### *Introduction*

Les triathlètes d'élite doivent obtenir un classement de qualification olympique défini par un cumul de points basé sur leur classement dans des compétitions internationales (WT). Malgré son statut olympique, une analyse complète des facteurs qui influencent la stratégie et la dynamique de course dans les différents segments du triathlon reste encore à développer. Ceci demande une investigation plus poussée pour aider les staffs techniques et les triathlètes à comprendre et optimiser leur stratégie en fonction des dynamiques de course et des caractéristiques des parcours.

Le triathlon courte distance se distingue par la possibilité de bénéficier de l'aspiration, ce qui entraîne une grande variété de stratégies tout au long de l'épreuve. Dans la phase de natation, il est essentiel d'éviter de se retrouver piégé au milieu du peloton et d'optimiser son économie de course en se positionnant très rapidement à côté d'un autre nageur dans la tête de course (8,11,31). En ce qui concerne le cyclisme, le *drafting*, qui permet de réduire la dépense d'énergie en roulant dans un peloton, joue un rôle significatif (81). Cette économie d'énergie a des répercussions positives sur le reste de l'épreuve (8,25). Par conséquent, il est judicieux d'évoluer en groupe pour minimiser la dépense énergétique tout en surveillant les autres concurrents (108). La stratégie d'allure revêt une importance capitale dans les triathlons avec *drafting*, tandis que la dynamique de course est fortement influencée par les stratégies et capacités des athlètes concurrents (Cf. étude 3). Ainsi, il semble que les compétences en natation dans la première partie de la course doivent être associées aux compétences en cyclisme pour anticiper l'issue de la transition jusqu'à la fin de la deuxième partie. À titre illustratif, une observation tirée d'une étape de Coupe du Monde (11) a démontré que les nageurs masculins qui n'ont pas réussi à se maintenir dans le groupe de tête durant la phase de natation ont éprouvé de grandes difficultés à entrer dans les deux premiers regroupements cyclistes à la fin du premier tour. Dans la suite de la compétition, ces athlètes ont été contraints d'augmenter leur intensité d'effort pour "combler l'écart" à la fin du troisième tour.

Il est également crucial de ne pas négliger l'impact des facteurs environnementaux (25) tels que la topographie, notamment pour l'étape cycliste. Des études ont révélé que le tracé de la course pouvait entraîner des niveaux de puissance très différents chez les mêmes triathlètes lors d'épreuves de Coupe du Monde, selon que la course se déroule sur terrain plat, vallonné

ou montagneux. De plus, cette sollicitation peut davantage s'apparenter à l'effort requis en VTT cross-country (XCO) et présenter des caractéristiques de sollicitation stochastique. (121,122)

Les travaux de la thèse de Cyrille Grannier dans le domaine du VTT XCO démontre un travail de nivellement physiologique tout au long de la course. Dans d'autres disciplines, comme le BMX, il a été observé que plus la piste est dite « technique », moins il est possible de développer une puissance cyclique élevée (123). Il est donc important de pouvoir maîtriser d'importantes variations du tracé (dénivelé, virages, revêtement, ...) grâce à ses compétences techniques. Les athlètes les plus performants adoptent ainsi une répartition plus homogène de l'allure sur l'ensemble des épreuves (121), ce qui permet de passer moins de temps dans les zones techniques. Ces constatations suggèrent que la technique joue un rôle crucial dans la gestion de l'effort en triathlon, tout comme dans d'autres sports cyclistes. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte ces aspects pour différencier les dynamiques de course.

Les objectifs de cette étude étaient (a) de définir et de classifier les parcours de course en fonction de leur technicité ; (b) de déterminer si les dynamiques de course sont influencées par les parcours vélo ; et (c) d'observer d'éventuelles différences de dynamiques entre hommes et femmes.

### ***Matériel et méthode***

#### ***Données***

Vingt-trois triathlons de distance olympique, dont les Séries mondiales, les Jeux Olympiques, l'épreuve de qualification olympique, et le Championnat du monde ont été étudiés de la saison 2016 à la fin de la saison 2019. Les hommes et les femmes ont été analysés séparément.

L'échantillon total comprenait 1 885 participants, dont 839 femmes et 1 046 hommes. Les données de course, telles que le temps total de course, les temps intermédiaires pour la natation, le cyclisme et la course à pied, ont été converties en secondes. Elles ont ensuite été utilisées pour calculer les dynamiques de regroupement aux points de contrôle PC1 et PC2.

#### ***Scenarior***

L'identification des scénarios de course reprend la même méthode que l'étude n°3.

***Données GPS***

Pour chaque course, les données GPS enregistrées par les athlètes pendant la partie cycliste ont été extraites. Chaque seconde d'enregistrement représente une ligne de données avec les attributs suivants : longitude, latitude, élévation, nombre de mètres parcourus, vitesse.

***Identification des segments et des types de parcours***

L'angle et la différence d'altitude observés pour chaque segment ont été utilisés comme variables de regroupement pour attribuer à chaque segment le type qui lui correspond. L'algorithme utilisé pour effectuer ce regroupement est celui des k-means. La méthode statistique d'écart suggère un nombre optimal de 5 clusters pour la réalisation du regroupement avec la méthode des k-means. Les clusters obtenus sont les suivants (Figure 10)

:

- Les segments du cluster n°1 correspondent aux segments en descente
- Les segments du cluster n°2 correspondent aux virages à droite
- Les segments du cluster n°3 sont en ligne droite et sans dénivelé
- Les segments du cluster n°4 correspondent aux segments en montée
- Les segments du cluster n°5 correspondent aux virages à gauche

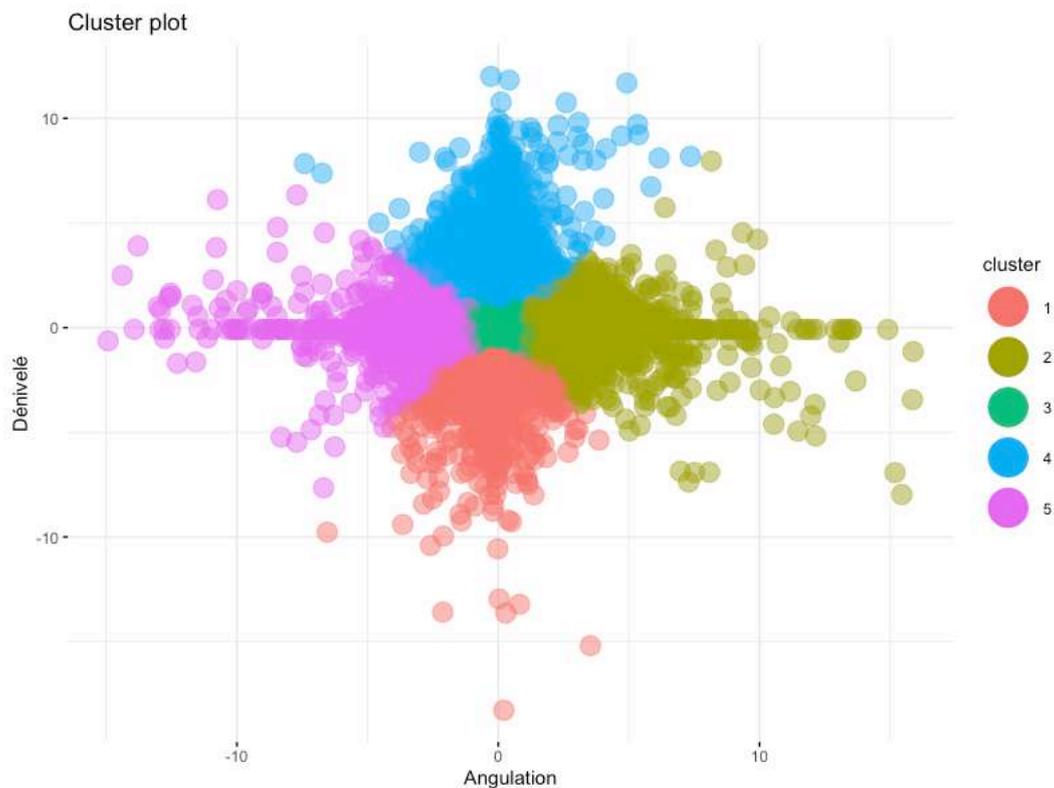


Figure 10 - Clustering des segments GPS

Après avoir catégorisé les différents types de segments, nous calculons les pourcentages de temps passés dans chaque type de segment pour chaque course. Ces pourcentages sont ensuite utilisés comme variables pour effectuer le clustering (Figure 11) visant à catégoriser les différents types de parcours. Pour cela l'algorithme de clustering des k-means est de nouveau utilisé.

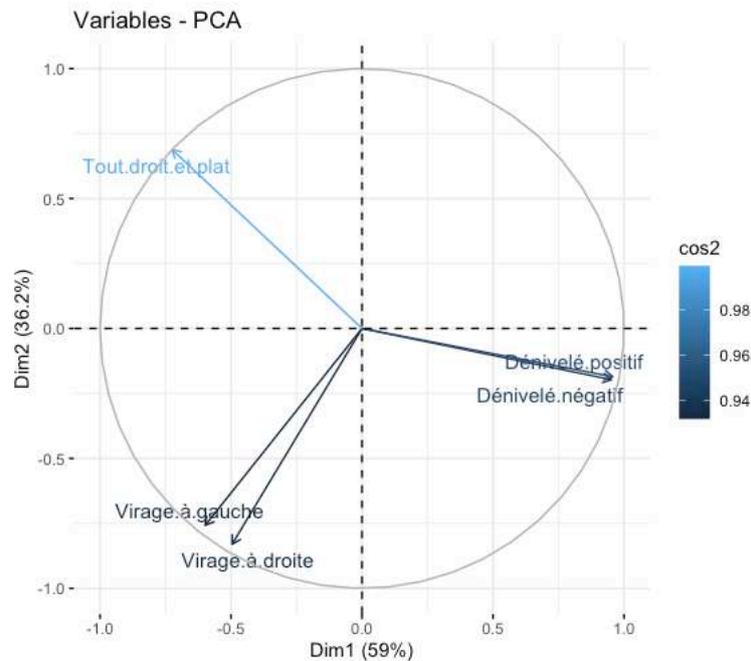


Figure 11 - Clustering des parcours

### **Analyse Statistique**

Dans cette analyse, les courses masculines et féminines seront traitées séparément, avec un seuil de signification de 5%. Le test de Kruskal-Wallis est utilisé pour comparer les pourcentages d'athlètes en tête de course en fonction du type de parcours, à la sortie de la première transition et à la pose du vélo. Si des différences significatives sont détectées, le test posthoc de Conover est appliqué. De plus, le test de Fligner-Kileen compare les écarts-types des pourcentages autour de ces moments-clés.

Pour chaque type de parcours, le test de Student est utilisé pour déterminer si le gain ou la perte d'athlètes entre les deux points de contrôle diffère significativement de zéro.

Les probabilités de réalisation de chaque scénario sont comparées en fonction du type de parcours à l'aide de multiples réalisations du test Z de comparaisons des proportions. Ces comparaisons ont lieu après la première et après la deuxième transition.

Enfin, l'association statistique entre les scénarios observés à l'issue de la première transition et à la pose du vélo est évaluée à l'aide du test exact de Fisher pour déterminer leur indépendance.

## Résultats

### Tête de course

Le test de Kruskal-Wallis visant à comparer les distributions du pourcentage d'athlètes en tête de course à la sortie de la première transition en fonction du type de parcours n'a pas montré de signification statistique ( $p=0,27$ ). De plus, le test de Fligner-Killeen n'a pas révélé de différence significative dans la variabilité de ces pourcentages en fonction du type de parcours ( $p=0,82$ ).

Le test de Kruskal-Wallis, effectué pour comparer les pourcentages d'athlètes en tête de course à la descente du vélo en fonction du type de parcours, a montré une différence statistique ( $p=0,019$ ). Le test post hoc de Conover a révélé que lorsque le parcours ne présente pas de spécificité, le pourcentage d'athlètes en tête à la sortie du vélo est significativement plus faible que lorsque le parcours comporte de nombreux virages ( $p=0,008$ ). Cependant, le test de Fligner-Killeen n'a pas montré de différence significative dans la variabilité des pourcentages en fonction du type de parcours ( $p=0,22$ ) (Figure 12).

Les tests de Student révèlent des différences statistiquement significatives pour deux types de parcours. Lors des courses sans technicité, le pourcentage moyen d'athlètes rétrogradant du groupe de tête vers les groupes suivants est significativement supérieur à zéro, avec une p-value de 0,01. Dans les courses avec dénivelé, le pourcentage moyen d'athlètes rétrogradant du groupe de tête vers les groupes ultérieurs est également significativement supérieur à zéro, avec une p-value de 0,03 (Figure 12).

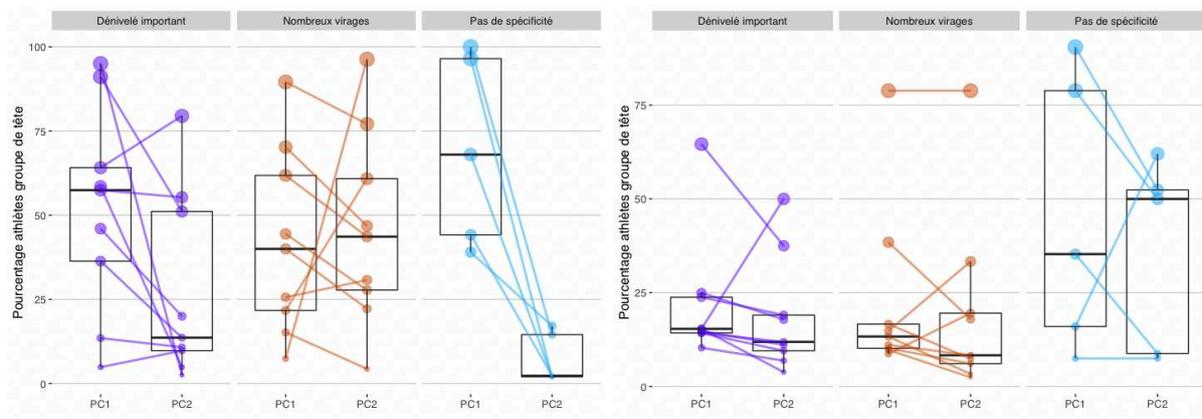


Figure 12 – Comparaison des pourcentages d'athlètes dans le groupe de tête. (A) Homme (B) Femme

Pour les courses féminines (Figure 12B), les analyses statistiques montrent que, quelle que soit la perspective (point de contrôle 1 ou 2), il n'existe pas de différence significative entre les distributions du pourcentage d'athlètes dans le groupe de tête en fonction du type de parcours. Les tests de Kruskal-Wallis ne révèlent pas de distinction significative ( $p=0,31$  pour PC1 et  $p=0,33$  pour PC2). De plus, le test de Fligner-Killeen, qui mesure la variabilité autour de ces pourcentages en fonction du type de parcours, ne montre pas non plus de différence significative ( $p=0,24$  pour PC1 et  $p=0,62$  pour PC2).

De même, indépendamment du type de parcours, les tests de Student successivement réalisés pour évaluer les changements dans le pourcentage d'athlètes dans le groupe de tête entre les deux points de contrôle ne mettent pas en évidence de variations significatives. En d'autres termes, il n'y a pas d'augmentation ou de diminution significative du pourcentage d'athlètes dans le groupe de tête entre ces deux points de contrôle pour les différents types de parcours. (Figure 12)

#### ***Scénario à PC1 en fonction du type de parcours***

Pour les courses hommes, les tests de comparaisons de proportions, deux à deux, révèlent que lorsque le parcours est sans spécificité, la probabilité d'observer une échappée à l'issue de la première transition est significativement plus faible que lorsque le parcours présente de nombreux virages ( $p=0,039$ ). (Figure 13)

Les résultats de ces tests de comparaisons pour les courses féminines révèlent une significativité statistique dans un seul cas : la probabilité d'observer un scénario d'échappée à l'issue de la première transition est significativement plus élevée lorsque le parcours présente un dénivelé important par rapport aux parcours sans spécificité particulière ( $p=0,02$ ). Il est intéressant de noter que la p-value du test comparant cette même probabilité pour les parcours avec de nombreux virages par rapport aux parcours sans spécificité est proche du seuil de significativité ( $p=0,079$ ), ce qui suggère une possible influence de la spécificité liée aux virages du parcours, bien que cela ne soit pas statistiquement concluant (Figure 14).

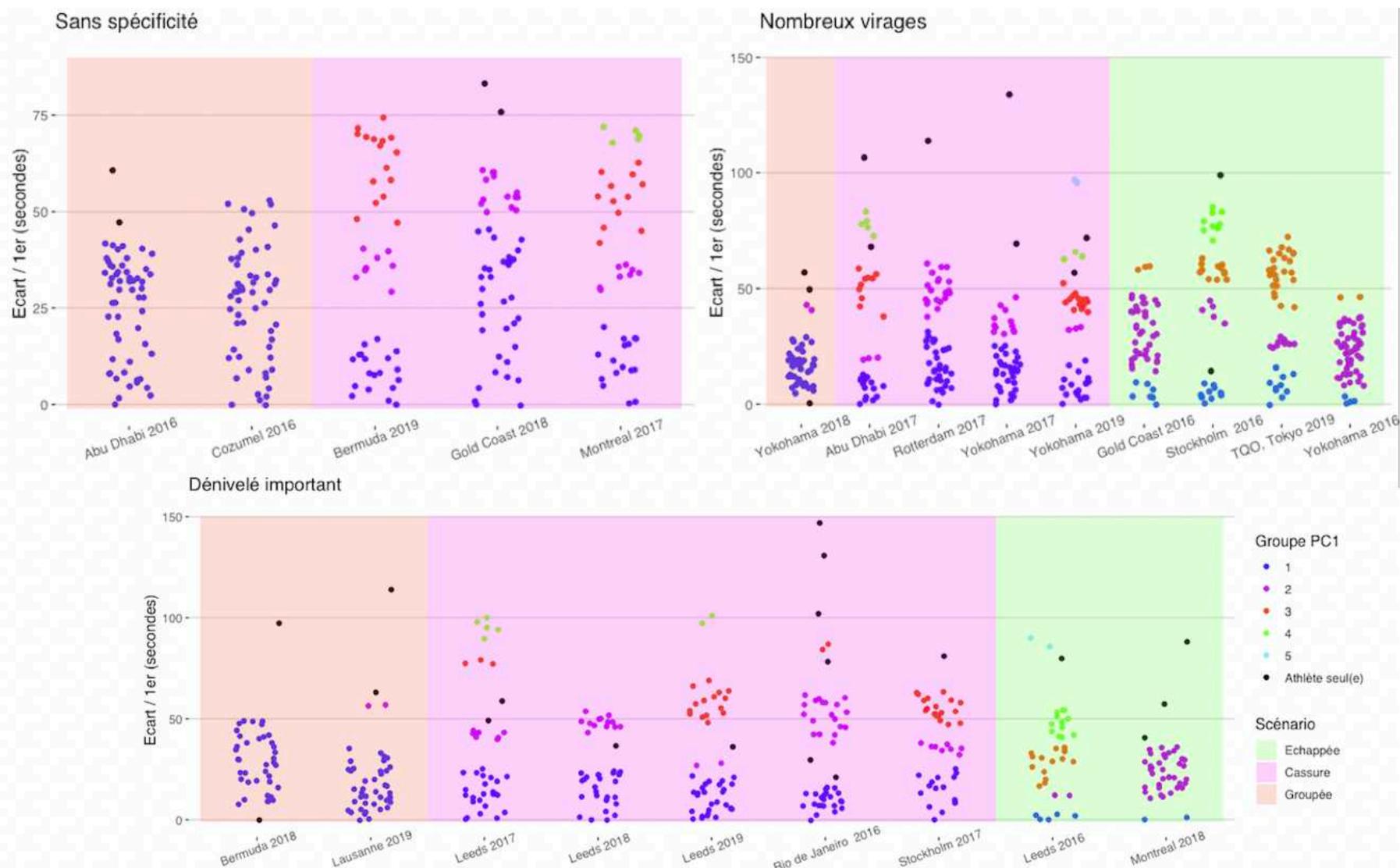


Figure 13 - Scénario à l'issue de la première transition en fonction du type de parcours (Homme)

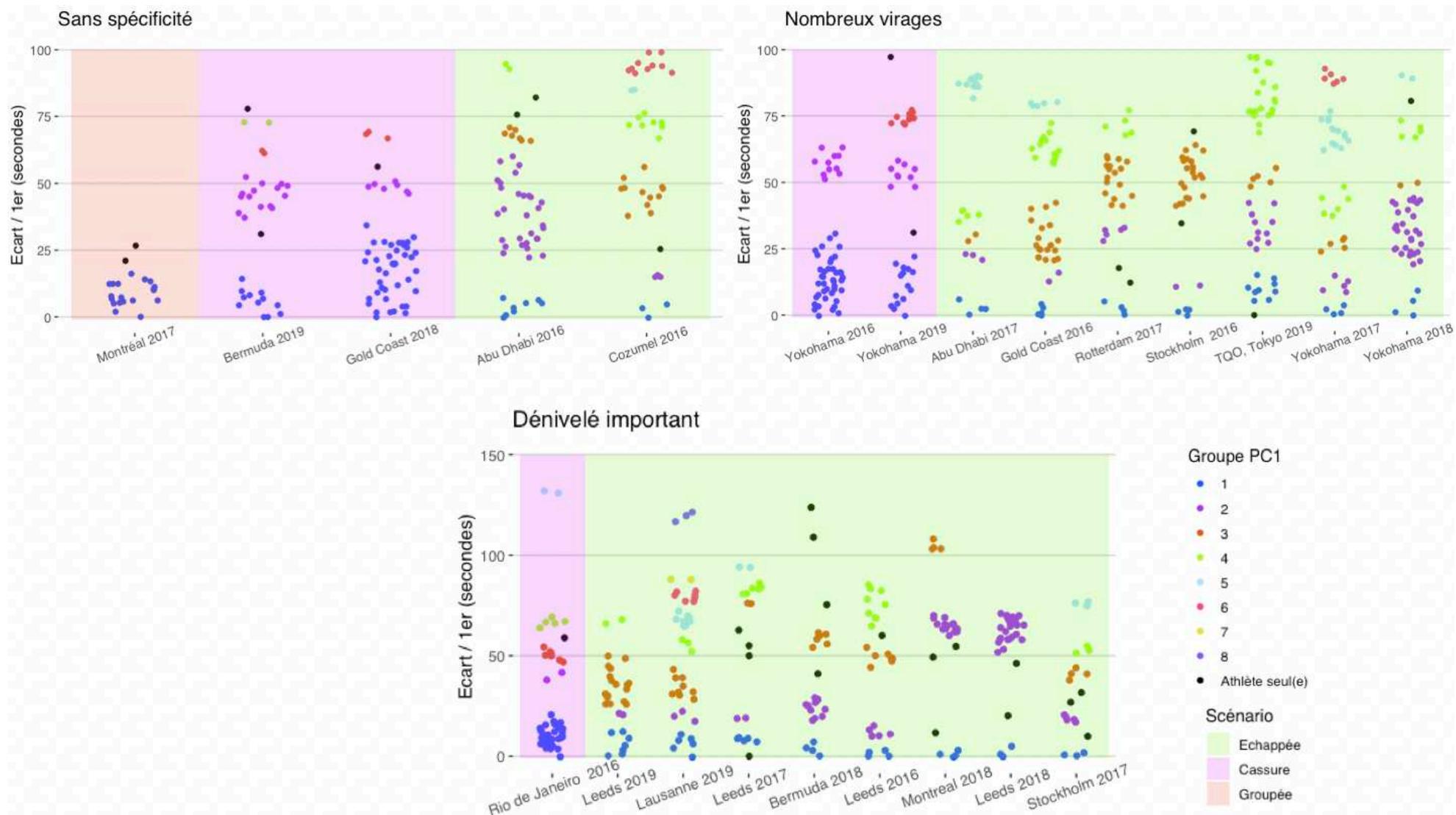


Figure 14 - Scénario à l'issue de la première transition en fonction du type de parcours (Femme)

**Scénario à PC2 en fonction du type de parcours**

De plus, ces tests montrent que lorsque le parcours ne présente pas de particularités, la probabilité d'observer une échappée à l'issue du vélo est significativement plus élevée que lorsque le parcours comporte de nombreux virages ( $p=0,03$ ). Cependant, lorsqu'on compare les probabilités d'observer une échappée à l'issue du vélo, chez les athlètes masculins, entre les parcours avec dénivelé et ceux avec de nombreux virages, la p-value est proche du seuil de significativité ( $p=0,079$ ), ce qui signifie que la différence n'est pas statistiquement significative à ce niveau de seuil. (Figure 15)

Les tests de comparaison sur les courses femmes à l'issue de la partie cycliste permettent d'observer des résultats significatifs. Tout d'abord, la probabilité d'observer une course avec des cassures à la fin de l'épreuve de vélo est significativement plus élevée lorsque le parcours n'a pas de spécificités techniques par rapport à un parcours avec de nombreux virages ( $p=0,026$ ). À l'inverse, la probabilité d'observer une course avec des échappées à la fin du vélo est significativement plus élevée lorsque le parcours présente de nombreux virages par rapport à un parcours sans technicité ( $p=0,026$ ). De plus, lorsque l'on compare ces probabilités pour les parcours sans technicité par rapport à ceux avec un dénivelé important, la valeur de p est proche du seuil de significativité ( $p=0,079$ ). Enfin, quel que soit le type de parcours vélo, la probabilité d'observer une échappée à la fin de celui-ci est significativement plus élevée que celle d'observer tout autre scénario ( $p = 0,002$ ).

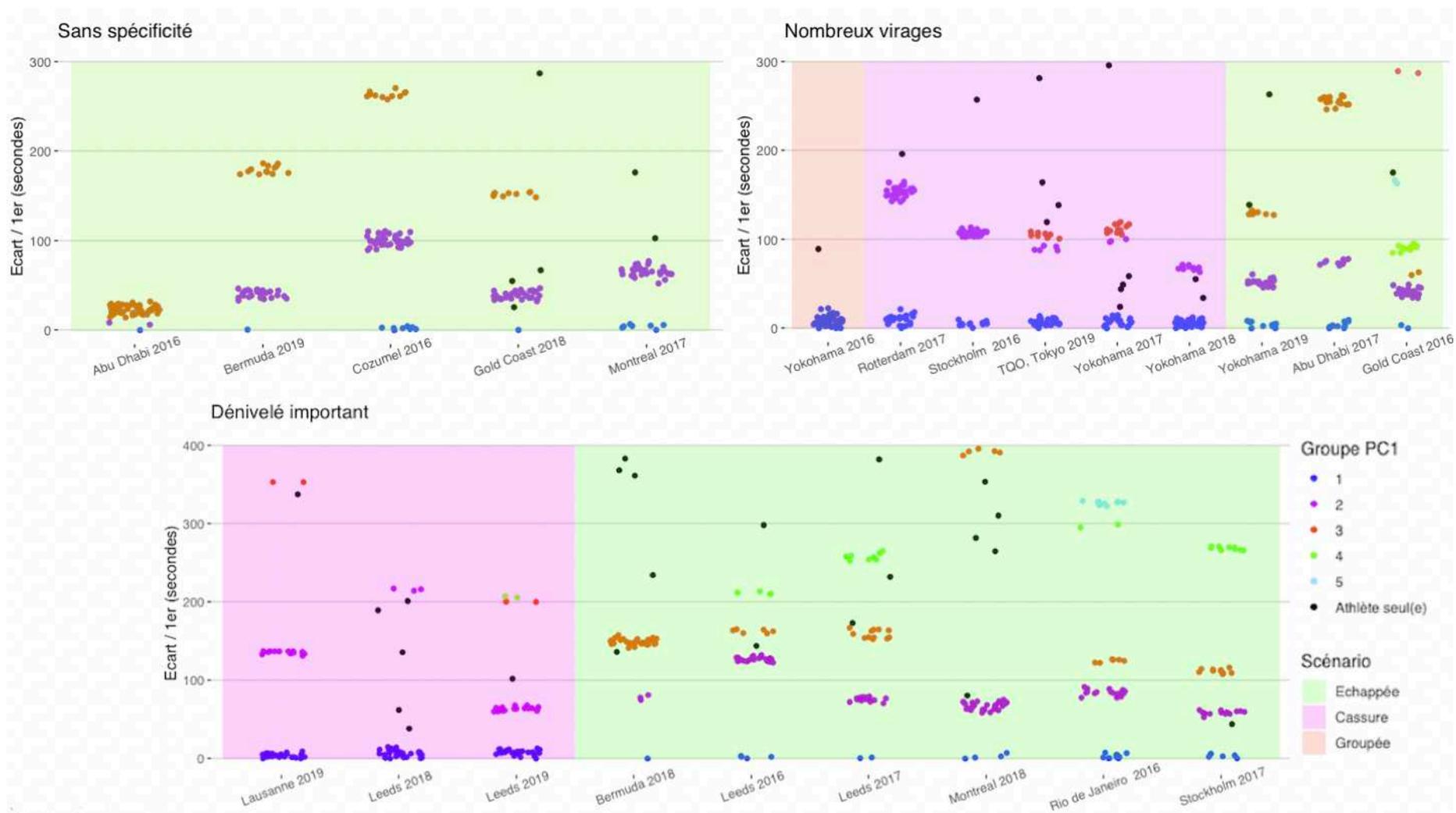


Figure 15 - Scénario à l'issue du vélo en fonction du type de parcours (Homme)

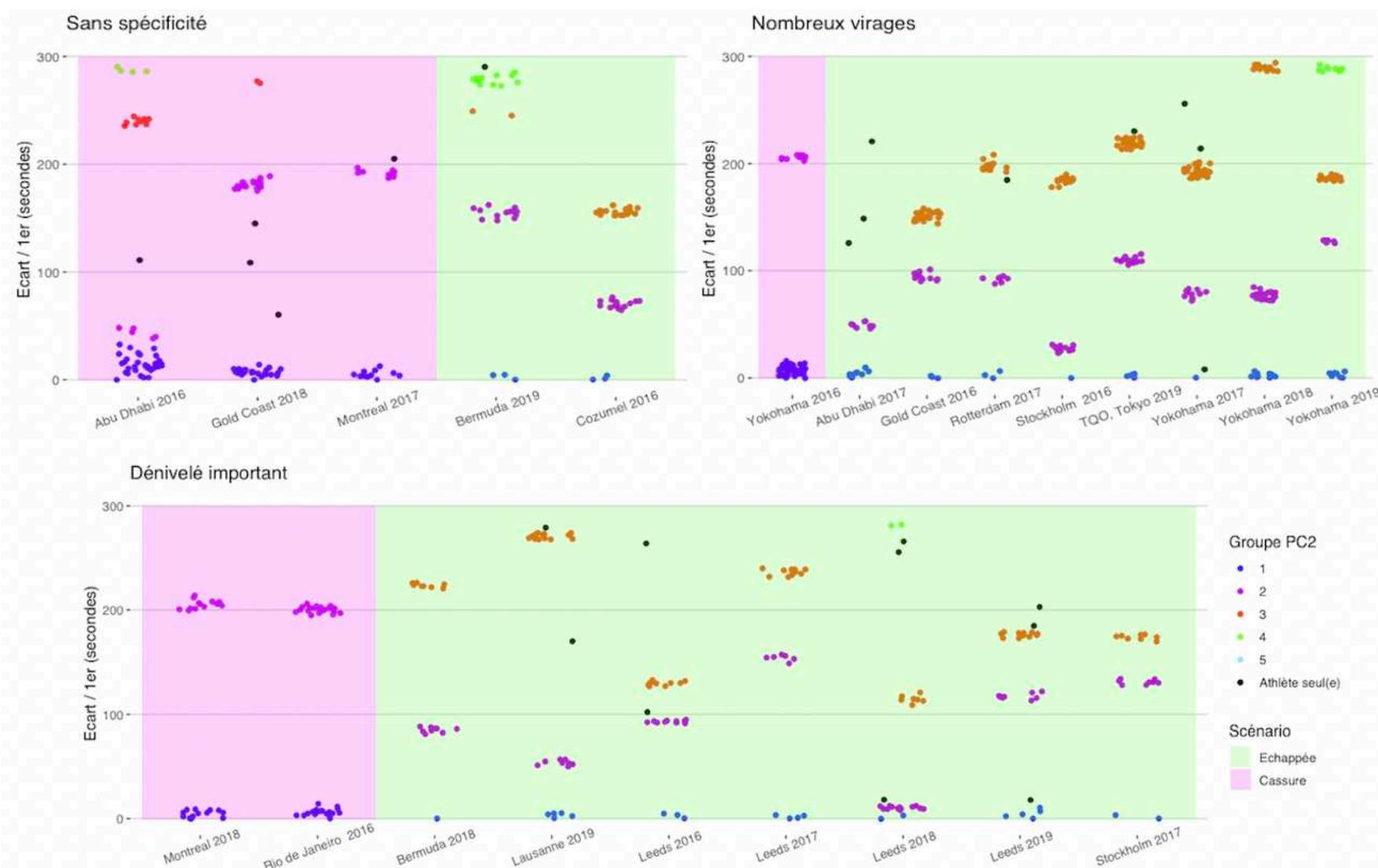


Figure 16 - Scénario à l'issue du vélo en fonction du type de parcours (Femme)

### ***Association des scénarios entre les deux points de contrôle***

Lorsqu'on analyse les résultats des tests exacts de Fisher, il n'y a pas d'association significative ( $p=1$ ) entre le scénario observé à l'issue de la phase de cyclisme et le scénario observé à l'issue de la natation pour les courses masculines. En revanche, pour les courses féminines, il existe une association significative ( $p=0,008$ ) entre le scénario observé à l'issue du vélo et le scénario observé à l'issue de la natation.

### ***Discussion***

L'objectif de cette étude était d'analyser l'impact du parcours cycliste sur les dynamiques de course de la sortie de la natation (T1) à la descente du vélo (T2) en triathlon courte distance. Les résultats majeurs de ce travail mettent en avant trois éléments :

- La différence de dynamique Homme / Femme,
- L'impact de la technicité du parcours sur la probabilité et l'avenir de l'échappée,
- Les stratégies sous-jacentes à la coopération et la concurrence.

Ces résultats revêtent une importance significative pour la planification et la stratégie pré-course des athlètes, ainsi que pour l'appréciation des performances à long terme. Ils permettent d'anticiper les comportements des athlètes en fonction des profils de parcours et des adversaires présents le jour de la course. De plus, cette analyse facilite la réalisation d'objectifs à long terme. Ces travaux sont étroitement liés aux décisions qui peuvent influencer la performance globale, notamment en ce qui concerne la qualification et, potentiellement, la victoire aux Jeux Olympiques. En utilisant ces données, les athlètes et leurs entraîneurs peuvent adapter leurs préparatifs et leurs tactiques afin de maximiser leurs chances de succès, que ce soit lors du processus de qualification ou pour décrocher la médaille d'or olympique.

Les différences entre les courses masculines et féminines sont particulièrement marquées dans cette analyse. Pour les courses masculines, la probabilité d'observer une échappée à l'issue de la première transition est faible (Figure 12), suggérant que les athlètes masculins ont tendance à créer peu d'écart entre eux à l'issue de la section natation et à ne pas créer de réelle cassure dans le peloton, ce qui pousserait les retardataires à déployer plus d'énergie pour rejoindre le groupe de tête. De plus, lors des courses cyclistes masculines sans technicité, on

constate une perte significative d'athlètes du groupe de tête, conduisant à un scénario d'échappée à l'issue du vélo (Figure 12). Cela pourrait s'expliquer par une mauvaise gestion d'énergie pendant la natation. Cette interprétation irait dans le sens de la littérature où l'on considère la natation déterminante pour la suite de course, si ce n'est pour la victoire au moins pour éliminer des éléments les plus faibles. En revanche, pour les courses féminines, le scénario d'échappée est nettement plus probable, que ce soit à l'issue de la première transition ou de la deuxième, indépendamment du type de parcours vélo. Cependant, la probabilité d'observer une échappée après la natation diminue lorsque le parcours vélo est sans spécificité, par rapport aux parcours avec un dénivelé important ou de nombreux virages (Figure 12). Cette observation suggère que, lorsque le parcours vélo semble moins difficile, les athlètes féminines s'engagent plus à se maintenir dans le groupe de tête à l'issue de la natation. Contrairement aux hommes, la probabilité d'observer une échappée à l'issue du vélo est significativement plus faible lors des courses avec un parcours sans spécificité que lors des courses avec de nombreux virages ou un dénivelé important. Cela pourrait être dû à des disparités de niveaux techniques en vélo entre les concurrentes, ainsi que des éléments qui serait bien plus fort physiquement pour rentrer de l'arrière sur les groupes de tête.

Ces résultats suggèrent que, dans la catégorie élite féminine, la performance à vélo peut revêtir une importance accrue, dans le cas où le parcours ne serait pas technique, pour la performance globale en course par rapport à la catégorie élite masculine, ce point de vue a pu être observé lors de la course Coupe du monde de Lausanne en 2002 <sup>25</sup>.

Enfin, la corrélation entre le scénario observé à l'issue du vélo et celui observé à l'issue de la première transition, pourrait amener à penser que le segment vélo ne joue pas un rôle déterminant pour les femmes dans le scénario final de course, mais il serait plus juste de penser que les triathlètes féminines de meilleur niveau sont déjà à l'avant de la course à l'issue de la natation (Figure 15). Cela met en avant l'importance de l'indice de dispersion autour du rating natation afin d'évaluer le potentiel scénario de course dès la sortie de l'eau, cette interprétation mettrait en avant le fait que le profil des triathlètes sur ces observations serait à tendance « Nageuse-Rouleuse ». Ces différences de comportement entre hommes et femmes soulignent l'importance de prendre en compte le sexe des athlètes dans la planification et la stratégie de course.

### *Conclusion*

En résumé, cette étude démontre que les athlètes d'élite en triathlon adoptent des stratégies de course différentes en fonction de leur sexe et du type de parcours. Ces différences modifient la dynamique de course, correspondant davantage à certains profils d'athlètes, avec des efforts plus constants ou plus intermittents. Ces observations suggèrent que le triathlon est influencé par les athlètes au fil des saisons, ce qui peut entraîner des variations dans les stratégies de course selon le terrain et la concurrence. Cependant, certaines constantes demeurent, notamment l'importance d'une solide performance en natation et de rester près de la tête de course pour minimiser les risques de contre-performance, que ce soit chez les hommes ou les femmes. Un adage populaire dit que « *l'on ne gagne pas un triathlon en natation, mais qu'on peut le perdre* ».

### *Application pratique*

Au-delà de l'objectif de développement des connaissances, l'objectif de cette compréhension est de bénéficier concrètement aux athlètes et à leurs équipes.

Afin de répondre à cette demande, nous avons utilisé des algorithmes de Machine Learning pour prédire les scénarios à l'issue de la première transition. De plus, nous avons développé une application via l'interface RShiny pour permettre aux équipes fédérales de réaliser ces suggestions de manière autonome tout en visualisant d'autres indicateurs relatifs à la densité de niveau et à la composition des compétitions.

Nos premières estimations concernant les scénarios lors des Jeux Olympiques de Tokyo, qui se sont déroulés les 26 et 27 juillet 2021, ont été fournies à la Fédération Française de Triathlon. Nous interpréterons également celles-ci à la lumière des connaissances acquises grâce aux études antérieures.

Il peut être tiré de ce travail des suggestions pour optimiser la préparation aux compétitions élites :

- L'importance de la section natation pour ne pas être hors course, notamment lors des courses femmes. Ce qui peut être rattrapé chez les hommes, mais à un certain coût énergétique important.
- Il serait plus crucial pour les femmes de se focaliser sur l'amélioration des compétences technique en cyclisme par rapport à ce qui est habituellement nécessaire chez les hommes.

---

## **Discussion générale**

---

## 6. Discussion Générale

Le triathlon a connu au cours de ses 20 dernières années des changements majeurs avec la modification des durées de course et l'apparition de nouveau format (sprint, relais mixte en équipe et super-sprint) mais aussi des évolutions de fond avec un développement olympique ainsi que le développement d'une série mondiale. La réflexion autour de cette thèse naquit d'un constat assez trivial : repousser les limites de la connaissance de l'activité dans le but d'améliorer les performances en course. De manière générale, les staffs techniques et les chercheurs se sont concentrés sur les facteurs humains ou techniques pour répondre à la question de « comment être performant ? », et ils ont organisé leurs réflexions autour des sportifs, de leurs capacités et de leurs matériels. Nous avons souhaité prendre le problème dans l'autre sens partant de la réalisation de la performance, de la pratique sportive elle-même pour en définir comment elle se construit, dans le but de déterminer certains paramètres et points clés de la performance. Cette recherche sur la compréhension des mouvements de course est la première sur un ensemble de plusieurs grandes épreuves. L'étude de Vleck et al., (11) avait éclairé la voie en faisant une analyse de la dynamique de course, du positionnement et des écarts entre les triathlètes mais sur une seule épreuve. Dans le même esprit, Ofoghi et al., (8) mettait en avant l'importance de segments et leurs aspects prédictifs sur le résultat final.

Ainsi, l'objectif général de cette thèse était de mieux appréhender les niveaux des compétitions et des triathlètes qui prennent le départ, par l'intermédiaire d'un outil de quantification de performances en fonction des confrontations.

Il a été rapporté dans la littérature que le segment cycliste sur le triathlon standard n'était pas ou peu déterminant sur la performance (8,89,118). Nous émettions l'hypothèse que la dynamique de course était un facteur important et que les forces en présence pouvaient influencer sur l'importance des sections. Nos deuxièmes et troisièmes articles répondent à cette question en mettant en avant les estimations de formation d'échappé à l'issue de la natation notamment chez les femmes avec une faible probabilité d'être rattrapées. Ce résultat est variable chez les hommes, dû à une forte densité de niveau et une importance décuplée de coopération chez les athlètes de même profil.

L'analyse de la dynamique de course comme élément majeur de ce travail s'est portée sur un nouveau format Olympique, en par *Tableau 4* tant des travaux initiaux de la fédération allemande de triathlon (86), qui mettait en avant l'importance de la natation et du vélo, sur un seul événement. Les études 1 et 2 visent à prescrire des stratégies en caractérisant, sur un ensemble de courses, la tendance des profils les plus adéquats pour chaque leg du relais mixte par équipe, en fonction de la sollicitation demandée par la dynamique de course.

La compréhension de la qualité de la performance d'un athlète et de potentialisation de sa réalisation révélait, pour la FFTri, un élément majeur. Dans un sport non-chronométrique comme le triathlon, la quantification de la performance et l'objectivation du niveau est cruciale. L'étude 3 répond à ce questionnement avec l'application du modèle de Stephenson qui est un système de classement par échange de point. Qui plus est que nous avons pu mettre évidence une stratification des niveaux de compétition croissante chez les hommes et avec un fort décrochage chez les femmes (*Tableau 4*).

### *6.1. Dimension stratégique et individuelle*

L'objet de notre étude, était d'investiguer les compétitions de triathlon en prenant un point de vue innovant sur la performance individuelle, c'est-à-dire, en la regardant au travers de trois spectres différents.

L'étude de la physiologie et de la biomécanique dans les sports d'endurance, de manière générale, a eu tendance à effacer les autres facteurs de performance. Il en va de soi de dire qu'ils sont mineurs vis-à-vis des deux autres mais ils en sont constitutifs et ne pas les prendre en compte serait un risque. Le défi consiste donc à développer des approches méthodologiques et des techniques permettant de prendre en compte de manière concertée les divers facteurs influant sur la performance, plutôt que de les considérer de manière isolée. Il s'agit également de mieux appréhender les interactions complexes qui existent entre les différentes dimensions et caractéristiques de la course. Dans ce paragraphe, nous développerons donc l'idée que la dimension individuelle, élément majeur d'un sport dit « individuel », ne correspond en fait qu'à un individu évoluant dans la masse qui l'entoure.

#### *Le relais mixte*

Dans notre première étude, nous montrons l'importance de ne pas être décroché et plus particulièrement du gain de position. En d'autres termes, il s'agit de se placer au sein du groupe dans un premier temps. Puis de se replacer à l'avant de celui-ci, dans un second temps, lors des relais mixtes par équipe. Le travail du premier relayeur traduit un certain nombre de capacités techniques (87), mais aussi une bonne capacité d'analyse. Si l'on prend en amont l'instant de positionnement sur le ponton de départ, il est montré que ce moment peut être essentiel sur des formats sprint et standard (88), alors que sur une distance d'environ 300m, il devient plus que nécessaire de choisir convenablement sa position afin, soit d'être dans la vague, soit d'assurer un bon départ pour ne pas être gêné dans sa nage, et sans s'isoler. Ceci permet une économie d'énergie non négligeable sur les premiers instants (82). Le décrochage des équipes qui finiront au-delà du TOP8 est le fruit de l'isolement que l'on met en évidence dans ce premier relais et qui montre dans notre étude 2 l'incapacité à revenir dans la course (Figure 5).

Dans la continuité du relais, le LEG 2 suit la même logique, mise à part en course à pied où il semblerait nécessaire de passer le relais en première position pour assurer au 3<sup>e</sup> relayeur

d'être déjà en tête de course. Cela signifierait que le 2<sup>e</sup> relayeur n'a pas vocation à créer des écarts mais plutôt de prendre la position la plus à l'avant possible du groupe au moment du passage de témoin pour minimiser le risque de décrochage.

Le positionnement lors du LEG3 revêt un intérêt essentiel. Pourtant il ne montre aucun écart chronométrique significatif entre les TOP1 / TOP2-3 / TOP4-8, comme révélé dans l'étude 1. Mais il revêt une importance décisive, lors de ce relais 3 de prendre la tête de course sur le segment natation et cycliste, comme nous l'avons mise avant dans l'étude 2 (Figure 6). Tout au long du reste du relais, il n'apparaît pas de différence statistique sur les temps réalisés (Figure 3). Cependant une différence significative d'écart de temps au 1<sup>er</sup> apparaît notamment lors du deuxième décrochage (Bike - LEG3) important des probabilités d'atteindre le TOP1 pour l'équipe étant première à cet instant. Le positionnement du LEG4 restant quasiment inchangé, notamment dû à des temps similaires sur ces segments pour chaque équipe (Tableau 4). Ces éléments révèlent donc l'importance des profils spécifiques, suggérant de sélectionner des triathlètes en fonction des spécificités de chaque relais (des profils plus à l'aise techniquement pour évoluer et se replacer dans le groupe pour le relais 1). Alors que les LEG3 devront avoir une double mission : créer des écarts et les maintenir (même si cette dernière apparaît non significative).

De manière similaire, le LEG4 a pour but de garder la position acquise en maintenant les écarts. Cela met en avant pour les LEG 3 et 4, l'importance de savoir évoluer seul en maintenant les écarts dans un effort similaire à un contre-la-montre.

#### *Les courses individuelles*

Dans le contexte des courses individuelles, le positionnement et l'écart de chaque athlète avaient été étudié dans les travaux de Vleck et al. (62). Ces travaux, bien que novateurs et sources premières de ce travail, présentent deux limites principales : Ils sont basés sur une seule course de coupe du monde à Lausanne et datent de 2002. Notre étude 3, portant sur la probabilité de formation d'échappé, d'échelon ou d'un seul et même peloton à l'issue de la natation. C'est-à-dire d'identifier les situations propices à la coopération ou la défection des triathlètes au sein de la course. Au regard des résultats de cette étude, il semblerait que pour les courses féminines la section natation soit un élément propice à la coopération dans la majorité des cas (Figure 9) avec une probabilité de 0,59. Cela est en accord avec l'importance que revêt la natation (11,91,118). Cette collaboration entre adversaire en natation, définie

comme coopération, peut permettre à des athlètes ayant des capacités physiologiques et techniques plus fortes de se sortir de la masse de départ en travaillant ensemble à moindre coût énergétique en utilisant une stratégie d'aspiration (16,82,83). Cela crée l'écart suffisant une cassure définie par Chatard (82) ce qui rendrait donc la tâche encore plus complexe pour un retour de l'arrière chez des athlètes plus faibles sur la dimension individuelle. Cette réussite repose sur des choix de position au départ pour avoir « le bon poisson pilote » ainsi que le bon positionnement dans la hanche ou à l'épaule (82,124). Les probabilités entre les différents scénarios de course décrites dans l'étude 3. Il existe une tendance plus élevée à avoir une course à échelon (Figure 9)( $P=0,496$ ). Ainsi nous pouvons voir qu'il y a significativement des courses groupées à l'issue de la natation plus fortes ( $P=0,106$  vs  $P=0,040$ ) que des courses avec échappé. Cela amène donc sur les choix que doivent faire les athlètes sur leurs actions, un choix de positionnement à l'avant du groupe pour maîtriser toute formation échappée peut-être utile mais compte tenu des résultats et de la prédominance des courses à échelon il serait nécessaire de rester en deuxième ligne pour bénéficier des gains d'économie d'énergie qu'offre cette situation (82). De plus un élément ayant tendance à diminuer ces écarts à la sortie d'eau, ainsi à favoriser la sortie groupée est l'autorisation du port de la combinaison (93,119).

Par la suite à la prise du vélo, des études viennent affirmer que les triathlètes les mieux positionnés à l'issue de la natation ont un intérêt à augmenter leur avance pour obtenir un avantage décisif au départ de la course à pied (1). C'est ainsi qu'un choix important de tactiques doit être effectué pour le reste de la course. D'ailleurs sur la première phase de la partie vélo les puissances sont significativement supérieures à celles de la deuxième partie de course (61). Nous observons les mêmes choix tactiques chez les femmes avec une forte proportion à jouer l'échappée à vélo (Figure 12) et une tendance à la réussite, indépendamment de la technicité du parcours (Figure 12). Sur le plan stratégique, il est à noter que l'évolution en groupe peut être un avantage comparativement à rouler de manière isolée (81,125), notamment pour ces athlètes à l'issue de T1. Il semblerait important de mener la meilleure collaboration possible pour maintenir leur avance le plus longtemps possible. Tout en sachant que le degré de coopération de l'échappée dépendra de sa taille (effectif). La coopération augmentant à mesure que la taille du groupe d'échappée diminue et que les différences physiologiques se réduisent entre les coureurs (77). Sur la phase cycliste, on observe une tendance à rouler regroupé chez les hommes (Figure 12). L'observation faite sur

le départ semblerait dépendre du trop grande nombre d'intérêt divergeant des triathlètes (77), une étude la comparer au dilemme du prisonnier que l'athlètes s'efforcera de résoudre, avec le choix d'attaquer, de coopérer ou de se désinscrire (défection) de l'action du groupe (76). Cela reste en adéquation avec la taille et l'hétérogénéité des capacités du groupe (77). Le scénario le plus probable à T2 est le retour des triathlètes ayant du retard. Ceci est rendu possible à cause de la non-collaboration des triathlètes en tête, traduisant une allure de course saccadée. Cette situation demande aux triathlètes en tête de fournir des efforts stochastiques qui sont plus énergivores (61) (Figure 15).

Cejuela et al., (85) affirme que le temps perdu à T2 varie de 1 à 15 secondes et représente un faible pourcentage de la course. Cependant, ce temps perdu peut faire une grande différence dans le résultat final, car les positions de tête sont souvent décidées par des sprints finaux avec des différences de quelques secondes. Il serait donc plus intéressant chez les hommes de se préparer à être à l'avant du groupe massif pour poser le vélo dans les premières positions et en adoptant une course économique à l'abris, tout en restant vigilant à tout action entreprise dans les premières positions de course.

## *6.2. Concurrence et Densité*

Les études 2 et 3 mettent en évidence l'importance de la gestion de la concurrence et de la densité de niveaux en triathlon courte distance, relais mixte et standard.

### *Gestion de la concurrence*

La mesure de la concurrence en triathlon est un axe essentiel pour objectiver le niveau de performance d'un ou d'une athlète dans un sport ou la marque de référence n'existe pas. L'étude 3, en utilisant le rating de Stephenson, fournit un aperçu précieux de la mesure de la concurrence dans le triathlon sur des distances standards, ainsi que les implications de ces mesures sur la stratégie de course.

Tout d'abord, l'étude 3 souligne l'importance de la natation pour les performances globales de course. Des résultats d'étude montrent que position à la position à la sortie de l'eau est corrélée avec la position finale à la fin de la course (62,91). Cela s'applique autant aux hommes qu'aux femmes, mais des nuances entre les sexes existent. Les hommes semblent plus enclins à nager en groupe que les femmes. En utilisant le rating de Stephenson, il est possible

d'évaluer la densité de compétition et d'anticiper la probabilité de scénarios de course. Ces informations peuvent influencer la stratégie des athlètes (Tableau 5).

Ces observations ont des applications pratiques importantes pour les athlètes, les entraîneurs et les équipes techniques. L'aide de cet outil peut amener à développer des stratégies d'accompagnement des U19 vers les U23 et des U23 vers les séniors, voire de transfert des compétitions continentales vers des compétitions internationales de même niveau de rating. L'utilisation du rating de Stephenson permet aux athlètes de sélectionner des compétitions en fonction de leur niveau et de leurs objectifs. Les courses offrant un nombre de points plus élevé attirent les meilleurs athlètes, tandis que les courses de niveau inférieur peuvent offrir des opportunités de gain de points plus simples ou à un moindre coût (investissement énergétique, financier et/ou mentale).

En somme, l'étude 3 montre comment le rating de Stephenson peut être un outil précieux pour mesurer la concurrence en triathlon. Ces informations sont essentielles pour la planification de la stratégie de course, la sélection de compétitions et la préparation des athlètes, en veillant à ce qu'ils soient prêts à faire face à la concurrence sur les distances standards en triathlon.

#### *Différence hommes et femmes*

Il a été mis en évidence dans la littérature une différence de performance entre hommes et femmes dans plusieurs disciplines depuis de nombreuses années et plus spécifiquement au triathlon (62,91,118,126). Sur le RME, les études 1 et 2 soulignent également des différences de performance entre les segments de natation et de cyclisme pour les femmes, mais pas pour les hommes (Figure 5). Cela suggère que la densité de niveaux pourrait être plus éparse chez les triathlètes féminines que chez les triathlètes masculins. Ce qui laisse à penser que la dynamique de course des féminines peuvent ainsi être impacté de manière plus significative, (changement brusque d'état finaux sur la partie cycliste du leg3 (Figure 5)). La gestion de la concurrence et de la densité de niveaux en fonction du genre, devient alors un élément clés dans le résultat du RME. Quand on regarde les résultats de l'études 3 sur le format individuel on peut voir un gap de niveau assez fort entre les épreuves WTCS / JO et les WCup face aux épreuves de ConCup, avec une grande variabilité des épreuves de coupe du monde (Tableau 4) notamment chez la population féminine. La question du niveau des différents plateaux de compétition et le système de rating permet d'avoir une piste de travail, il faudrait avoir un

maximum de confrontation entre les athlètes participant à ces différents niveaux de course. Cependant, qu'il semblerait que les triathlètes féminines courant en WTCS, JO, et Wcup ne fassent pas le transfert de point vers les niveaux inférieurs et inversement. La Figure 17 met en avant la distribution de l'ensemble des points mis en jeu dans l'application de suivi du rating de chaque athlète. Une simple lecture, chez les féminines (Figure 17B) permet d'analyser, de manière plus pratique qu'il y aurait un problème de confrontation entre les différents niveaux, soit peu de triathlète courant sur les deux circuits différents. La densité étant plus large comparativement aux hommes. Sans ces confrontations de sur-classement, les athlètes seront ralentis dans leurs évolutions et donc limités à développer de nouvelles compétences. Cette dispersion traduit deux zones de confrontation : une première entre les triathlètes les moins bien classées (à gauche de la distribution) et une deuxième entre les triathlètes les mieux classées (à droite de la distribution). Ces deux zones bien délimitées reflètent le manque d'interaction entre les triathlètes. Les moins bien classées concourent entre elles lors des compétitions mineures, alors que les triathlètes les mieux classées concourent entre elles lors des compétitions majeures.

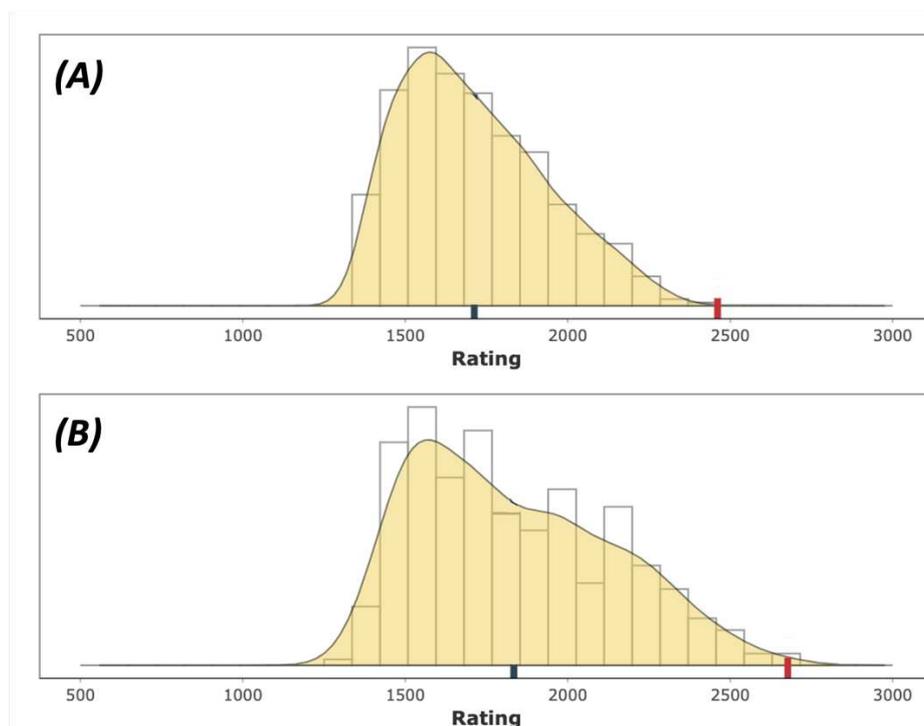


Figure 17 - Histogramme de la répartition des points du classement triathlon dans la population en Aout 2023

(A) Population masculine, (B) Population féminine

En résumé, la gestion de la concurrence et la densité de niveaux sont des éléments cruciaux en triathlon courte distance. Les équipes qui parviennent à maintenir un rythme compétitif dès le début de la course ont un avantage, tandis que la densité de niveaux peut varier en fonction du genre, avec des différences de performance notables entre les segments natation et cyclisme chez les femmes. Ces éléments doivent être pris en compte dans la planification des stratégies d'équipe en triathlon relais mixte. L'ordre du relais ayant changé pour l'olympiade de Paris 2024 (127), ces éléments restent d'actualité car la différence de densité est toujours présente chez les femmes.

### *6.3. L'Impact des caractéristiques des parcours sur les dynamiques de groupe*

La dynamique de la course en triathlon relais mixte montre que les équipes gagnantes se placent rapidement en tête, notamment lors de la natation. Cela indique que la capacité à être compétitif dès le début de la course est cruciale. Les équipes qui ne peuvent pas suivre le rythme dès le début risquent de se faire décrocher rapidement (Figure 5). Par conséquent, la gestion de la concurrence dès le premier relais est essentielle pour ne prendre aucun risque d'être piégé à l'arrière d'un groupe (Figure 4).

Les temps de course varient, avec des relais masculins plus rapides (environ 20 minutes) que les relais féminins (environ 22 minutes), malgré la distance relativement courte de natation, de cyclisme et de course à pied dans le triathlon relais mixte. Cela souligne la nature intense de cette épreuve. Cependant, même avec la compression de la durée de la course, les temps de transition restent constants, ce qui met en lumière l'importance des compétences techniques en transition.

Les variables environnementales restent un élément important à explorer sur ce format pour comprendre en profondeur l'exigence apporté par des distances aussi courtes. De plus un travail sur les sollicitations physiologiques et techniques serait un élément important pour comprendre les leviers possibles d'action sur les dynamiques de course.

La relation entre les caractéristiques des parcours de triathlon individuelles et les dynamiques de groupe est un aspect essentiel pour comprendre comment les triathlètes abordent ces compétitions exigeantes. L'étude 3 et 4 apportent des éclairages significatifs sur cette dynamique, mettant en avant deux résultats majeurs : l'impact de la technicité du parcours et les stratégies sous-jacentes.

Tout d'abord, ces études mettent en évidence l'impact de la technicité du parcours de vélo sur les dynamiques de groupe. Les résultats montrent que sur des parcours techniques avec de nombreux virages ou un dénivelé important, la probabilité d'observer une échappée à l'issue du vélo est plus élevée notamment pour les triathlètes féminines. Ce constat est différent chez les hommes, il semblerait que la densité chez les hommes soit tellement importante qu'il n'y a pas d'écart suffisant et trop d'intérêt croisé pour former un dynamique propice à l'échappé. Cela suggère aussi que des parcours exigeants favorisent la création d'échappées, car les triathlètes plus forts en cyclisme peuvent exploiter leur habileté technique pour creuser des écarts. Cependant, il faudrait avoir la capacité de comprendre les intérêts et motivations de chacun à participer ou non à la dynamique du groupe. Alber (128) décrit dans le cyclisme sur route deux éléments majeurs qui viennent apporter à l'avancement du groupe et une piste de réponse sur le fait que les triathlètes masculins arrivent à T2 en groupe après un début de vélo avec plusieurs groupes de chasse. Il parle d'individualisme dans les règles de la compétition mais en conflit avec le collectivisme du peloton qui est le reflet d'une association entre deux opposants dans un intérêt commun, créant ainsi des règles informelles. A titre d'exemple, V. Luis et L. Bergère s'associent lors de la section cycliste sur la manche de WTCS de Leeds 2022 pour écarter les concurrents ayant de meilleures qualités en course à pied. A cet égard, très peu d'autres sports peuvent offrir une telle complexité de coexistence d'associations et de conflits dans la pratique.

En revanche, sur des parcours sans spécificité technique, les triathlètes féminines ont tendance à rester groupées, car la technicité ne joue pas un rôle déterminant pour les féminines (Figure 12). Alors que chez les hommes, la probabilité que l'échappée ne soit pas rattrapée reste forte. Ce dernier résultat va à l'encontre de ce que l'on peut imaginer de la dynamique de course en comparaison avec le cyclisme (76,129). L'hypothèse que l'on pourrait avancer serait que les capacités techniques n'étant pas mises en jeu, le groupe peut alors s'organiser plus facilement en prenant le rythme choisit par ceux qui ont la capacité de maintenir l'écart avec la poursuite.

Dans une volonté de développement il serait intéressant de coupler ces informations aux données hydrométriques, de température ainsi que le vent. Dans un second temps, il serait aussi intéressant de mesurer les facteurs environnementaux de la partie natation (courant, nombre de bouées, distance entre les bouées, angulation des virages, visibilité) pour mieux comprendre les placements de départ et les risques d'être hors course. Padilla et al. (130) ont

mis en avant les liens entre les capacités individuelles et les choix tactiques réalisés en fonction de l'environnement rencontré au cours de différentes étapes cyclistes.

En résumé, les caractéristiques des parcours de triathlon jouent un rôle majeur dans les dynamiques de groupe. Les différences entre hommes et femmes, l'impact de la technicité du parcours et les stratégies de coopération ou de concurrence sont autant de facteurs qui influencent la formation de pelotons. Comprendre ces liens entre les parcours et les dynamiques de groupe est essentiel pour les triathlètes et leurs staffs, car cela leur permet d'ajuster leurs tactiques en fonction des défis spécifiques de chaque course. En fin de compte, la réussite en triathlon dépend non seulement de la condition physique des athlètes, mais aussi de leur capacité à s'adapter à des situations de course variables.

#### *6.4. Limites*

Les études de ce travail de thèse ont été réalisées avec des données de performance in-situ. Le caractère écologique de ce travail de thèse permet de fournir les réponses les plus précises possibles, en minimisant les différents biais. Toutefois, cette approche présente une limite majeure, celle d'être tributaire du nombre de compétitions officielles.

Dans nos deux premières études le choix d'analyser le RME de 2009 à 2020 représente un format qui s'est organisé avec le temps, les championnats du monde, une série mondiale et l'arrivée au JO de Tokyo 2020. De plus, World Triathlon a choisi de changer l'ordre de départ pour l'olympiade 2020/2024 (hommes/femmes/hommes/femmes). Cela ne remet pas en cause les conclusions précédentes, mais pourrait modifier la dynamique des courses en retardant la création d'écart entre les équipes. Un dernier point qu'il serait intéressant d'investiguer, que nous n'avons pas pu traiter par manque de données, serait la distance de la phase de transmission du témoin, qui peut être parfois très proche du plongeon ou pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

Le rating créé dans l'étude 3 est un outil décrit comme utile et novateur. Il est nécessaire d'identifier et de prendre en compte ses limites pour l'appliquer. Premièrement, il repose sur le principe d'échange de points, il faut donc que ce capital s'équilibre entre le nombre de points entrant avec les nouveaux arrivants et le nombre d'athlètes sortant avec la disparition de leur capital points. Le risque serait de créer une inflation du nombre de point avec une augmentation biaisée du score moyen de la population, ce qui empêcherait une comparaison

au fur et à mesure des années. Si le cas venait à se présenter il serait alors nécessaire de créer un cluster de compétition permettant de définir un indice de rééquilibrage pour ralentir ou accélérer la prise de points.

Dans le cadre de l'étude 4, il y a une absence de données sur les compétences techniques en cyclisme des athlètes. Ces compétences techniques peuvent avoir un impact majeur sur la performance, en particulier sur des parcours techniques. De plus, il existe un potentiel manque de précision des distances parcourues, car les distances des compétitions peuvent varier, ce qui peut altérer les résultats.

Enfin, il convient de noter que les règles du triathlon peuvent évoluer avec le temps (technologie, position sur le vélo, format). De plus, si les conclusions de ce travail et d'autres études similaires influencent les stratégies des triathlètes, cela pourrait potentiellement entraîner des changements dans les schémas de performance. Les recommandations qui en découlent doivent être utilisées avec prudence dans d'autres compétitions, en tenant compte des facteurs environnementaux tels que le vent, la température, les courants et l'humidité.

### *6.5. Application Pratique*

Comme annoncé en introduction de cette thèse, l'ensemble de notre travail a pour but de répondre à une problématique émanant du terrain : quelles sont les dynamiques de course à l'heure actuelle dans le triathlon au format courte distance sur la scène internationale ? Cette réflexion a débuté en association avec des cadres techniques, des athlètes et des entraîneurs. L'idée première étant de participer à l'essor de la performance au plus haut niveau. Cela nous a conduit à développer des outils applicatifs permettant de mettre en valeurs ces résultats mais aussi de les maintenir à jour pour qu'ils puissent être à disposition des acteurs de terrains. Ces outils mettent à disposition des staffs des données objectivées permettant d'apporter une information supplémentaire à moindre coût (gain de temps précieux d'analyse plus complexe et subjective)

Les prescriptions issues des résultats des études se retrouvent aujourd'hui à disposition des cadres fédéraux sous la forme d'applications web développées sous R et déployées sur un serveur de l'INSEP.

#### *6.5.1. Rating Triathlon*

Le premier applicatif (Figure 18) permet de maintenir à jour le classement de Stephenson en recalculant à partir des résultats de chaque compétition, par des requêtes sur l'API de WT. Il permet de visualiser pour chaque triathlète, son score et son incertitude ainsi que sa position sur l'ensemble de la population à instant définie. De plus cela permet de simuler ou de tester une startlist déjà existante, l'idée de cette dernière fonctionnalité est de pouvoir anticiper les objectifs donnés à un triathlète en termes de position vis-à-vis de la concurrence. Cela permet également de pouvoir juger objectivement de la performance réalisée vis-à-vis de ce qui pouvait être attendu.

Une fois la composition de la liste d'athlète définie ainsi que le format de course, une estimation de la probabilité du scénario est faite, sur les 3 proposées dans l'étude 3. Une visualisation graphique des probabilités de chaque scénario est proposée « à la suite de la natation » et « à la suite du vélo » ainsi que sous forme de tableau avec les scores de chaque athlète et leurs incertitudes. Finalement le score moyen et l'écart-type des partants sont calculés pour être comparés aux scores moyens de chaque niveau de compétition (Figure 18

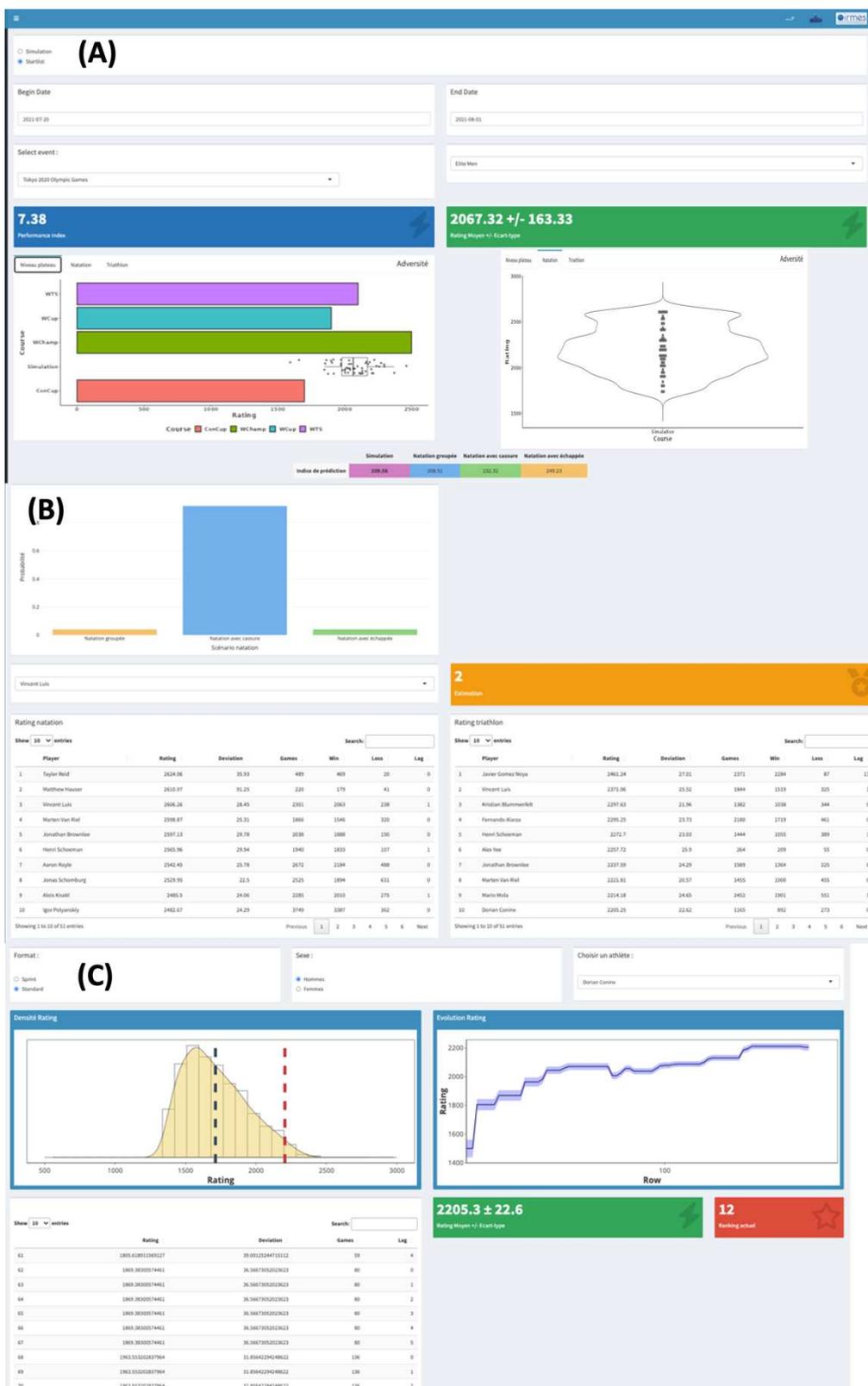


Figure 18 - Tableau de bord de visualisation des classements et des scores calculées sur l'application au jour des Jeux de Tokyo 2020

(A) Visualisation des différents paramètres pour la course individuelle masculine des Jeux de Tokyo 2020. (B) Fiche athlète présentant la position en fonction de la densité de la population, l'historique de l'évolution au classement avec la position actuelle, le score et la déviation standard. (C) La répartition du rating natation sur la course individuelle masculine des Jeux de Tokyo 2020.

### 6.5.2. Composition relais

Ce tableau de bord permet aux équipes techniques de pouvoir construire l'ensemble de la start List prévisionnelle du relais en fonction des athlètes présents le même week-end sur la startlist des courses individuelles. La création et l'ordre des relayeurs se fait automatiquement pour chaque équipe et est réajustable par le technicien en soutien. Dans un deuxième onglet, on retrouve la comparaison des statistiques de compétition de chaque relayeur LEG1 / 2 / 3 / 4 pour pouvoir les comparer avec les équipes adverses. Cette lecture fait suite à l'étude 1 et 2 permettant de définir les maillons forts et faibles de chaque équipe et d'observer s'il peut y avoir une dynamique de course coopérative sur la phase initiale et de définir quand il faut prévoir de s'en désinscrire. (Figure 19).

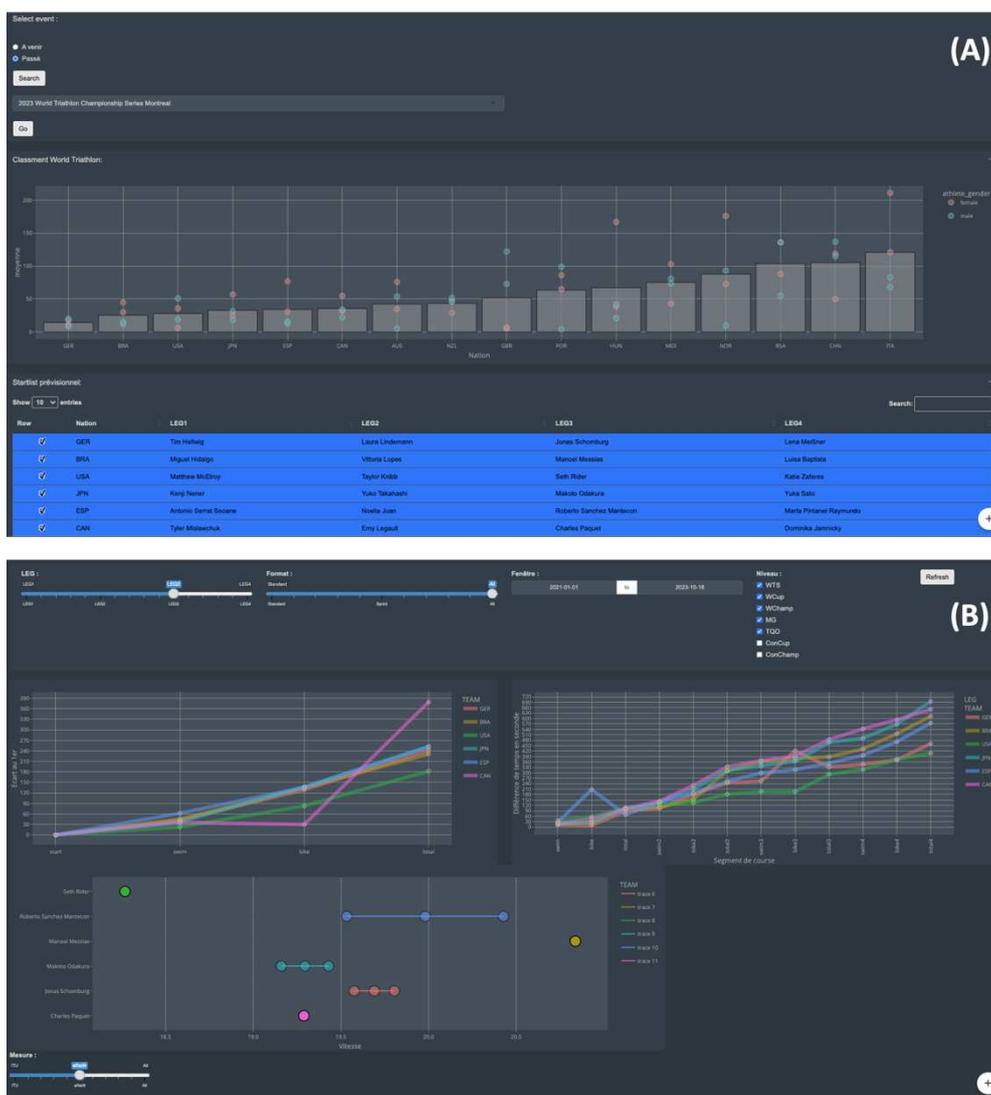


Figure 19 - Application de composition des relais semi-automatique

(A) Sélection des équipes composant la course et visualisation du classement mondial de chaque relayeur, (B) Page de visualisation graphique des écarts et des vitesses moyennes en course de chaque relayeur et la somme des individualités de chaque équipe.

### 6.5.3. Analyse de carrière

Une application permettant de rassembler l'ensemble des résultats de carrière des athlètes sur la base de données de World Triathlon (Figure 20). La mise en évidence des données de course et l'automatisation de leurs traitements rend la tâche plus simple pour le staff technique, cela permet d'autant plus de faire un lien entre les données connues des staffs techniques et les nouvelles métriques apportées dans ces travaux telles que les scores et les probabilités qui peuvent sembler plus complexes.

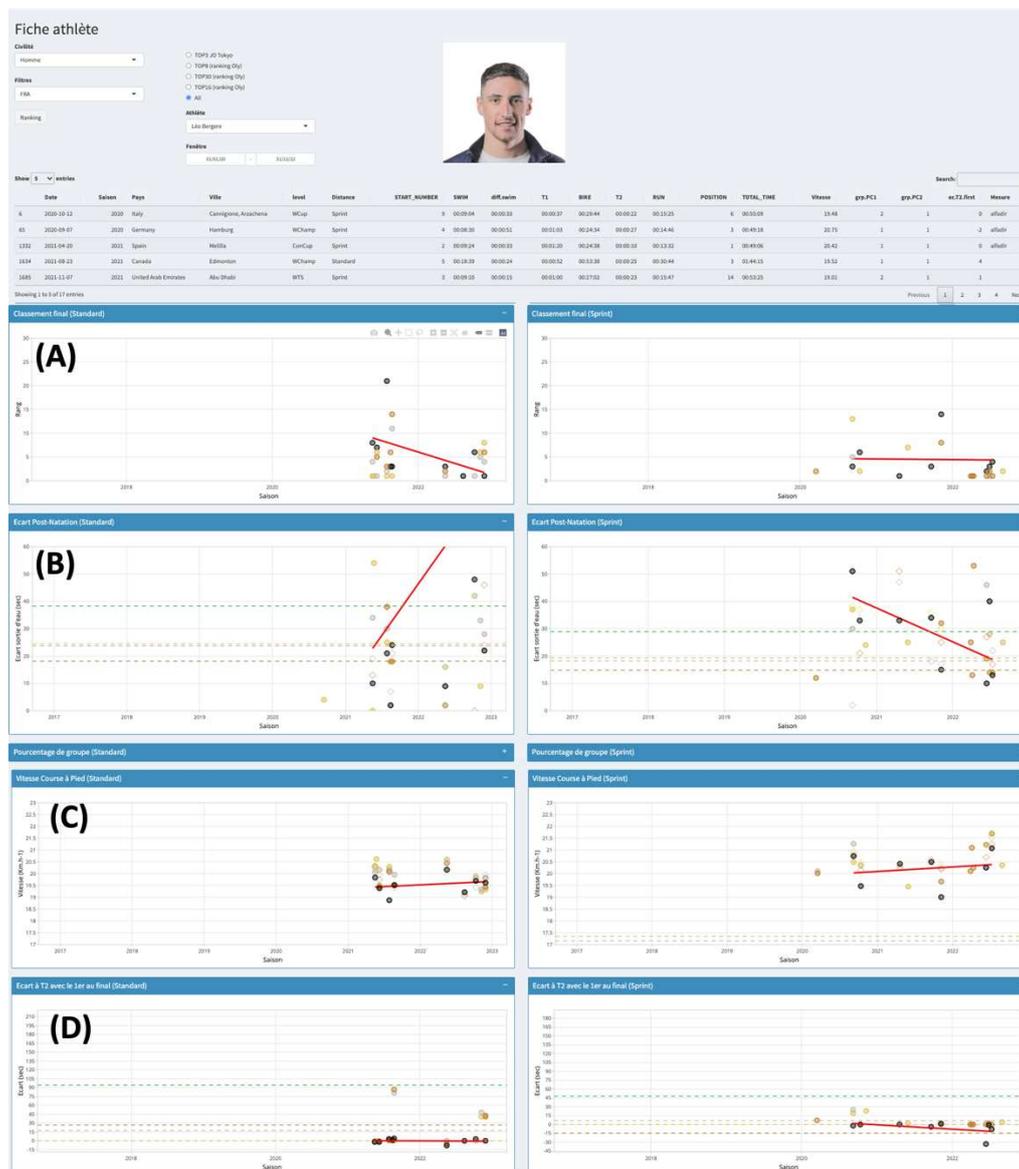


Figure 20 - Tableau de suivi de performance sur l'ensemble de la carrière pour le format standard, sprint et relais comparé au podium Olympique et le TOP3 de chaque course

(A) Position atteinte en carrière ; (B) écart au 1<sup>er</sup> à la sortie de la natation comparé, (C) Vitesse de course à pied et (D) écart à T2 à le 1<sup>er</sup> au final.

### 6.5.4. Description des parcours cycliste

Un quatrième outil de description des parcours est en cours de développement, cet outil reprend le travail de l'étude 4. Il permet de mettre en évidence les éléments techniques des parcours tels que la courbure des virages, leurs classifications, le nombre de virages et l'angulation total du parcours, la pente des montées et des descentes, les changements brusques de pentes et la répartition de celle-ci Figure 21.

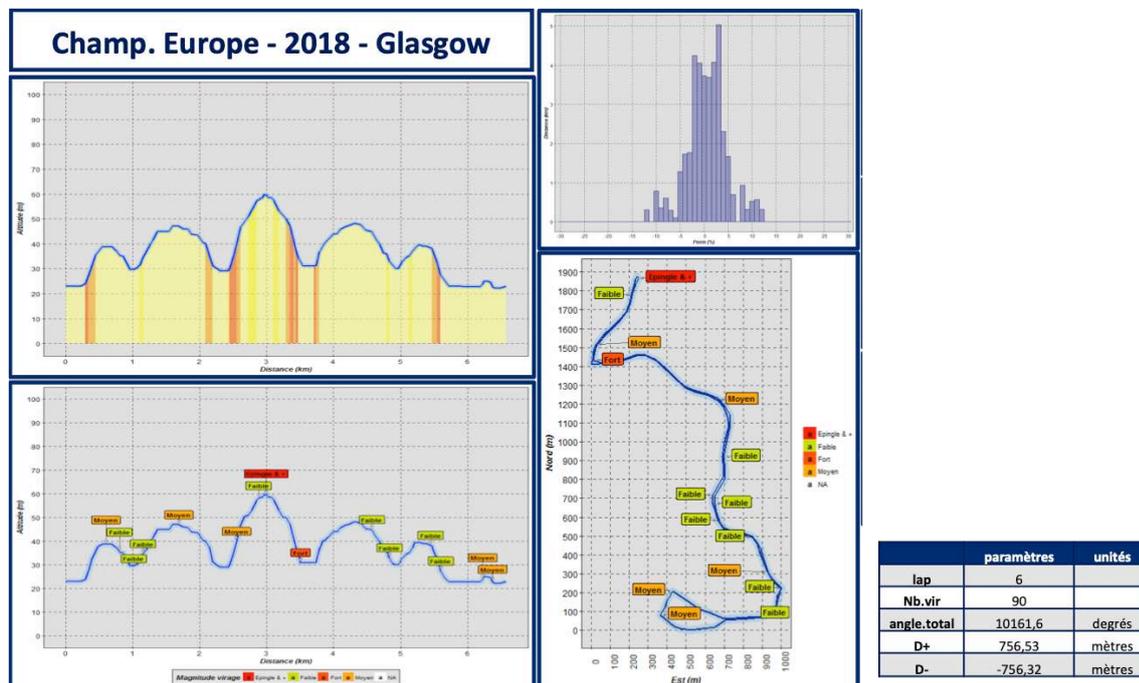


Figure 21 - Description du parcours cycliste sur l'épreuve des championnats d'Europe de Glasgow 2018

(A) Profil altimétrique du parcours et cassure de pente, (B) Distance parcourue par pourcentage de pente, (C) Labellisation des virages sur le profil du parcours, (D) Labellisation des virages du parcours.

---

## **Conclusion**

---

## 7. Conclusion

En conclusion, ce travail de thèse aura permis de consolider la compréhension des facteurs de la performance en triathlon de haut-niveau et mit en lumière la possibilité d'optimiser la performance des triathlètes « Elite » par la définition de stratégie par rapport à une adversité grandissante dans un système ultra compétitif qu'est le triathlon. Les résultats obtenus ont souligné qu'il est nécessaire de s'inscrire dans une approche holistique de l'activité, tenant compte à la fois des dimensions individuelles du triathlète (cognitive, technique et physiologique), de la dimension stratégique (définie par l'athlète) et de la dimension de dynamique (adversaires, enjeux, gestion de l'environnement) pour comprendre les adaptations stratégiques au cours de la course.

Pour aller plus loin, la construction d'un suivi des performances en compétition en prenant en compte la notion d'adversité sur les courses peu importe leurs niveaux et l'âge, pourrait amener à accompagner les triathlètes de façon plus précise et plus objective, dans leurs carrières mais aussi dans leurs entraînements.

Au-delà de l'élaboration de stratégies, la compréhension de la technicité des parcours semble être un élément intéressant à appréhender pour connaître plus précisément les qualités techniques à développer, ainsi que les instants plus propices à utiliser les qualités individuelles (cognitives, physiologique et techniques).

En fin de compte, ces études soulignent que le triathlon est une discipline complexe où la performance individuelle, la tactique de course et la dynamique compétitive évoluent en fonction de divers facteurs. Les athlètes et les équipes techniques doivent s'adapter en permanence pour réussir dans cette discipline exigeante, que ce soit en compétition individuelle ou en relais mixte. Les enseignements tirés de ces études apportent des informations précieuses pour les triathlètes, les entraîneurs et le personnel technique afin d'optimiser leurs stratégies en vue d'atteindre le plus haut niveau de performance.

---

## **Références bibliographiques**

---

## 8. Références bibliographiques

1. Lepers R, Knechtle B, Stapley PJ. Trends in Triathlon Performance: Effects of Sex and Age. *Sports Med.* sept 2013;43(9):851-63.
2. Triathlon W. World Triathlon. [cité 3 oct 2023]. Mixed Team Relay. Disponible sur: [https://www.triathlon.org/multisports/triathlon\\_mixed\\_relay](https://www.triathlon.org/multisports/triathlon_mixed_relay)
3. Butts NK, Henry BA, Mclean D. Correlations between VO<sub>2</sub>max and performance times of recreational triathletes. *J Sports Med Phys Fitness.* sept 1991;31(3):339-44.
4. Kohrt WM, Morgan DW, Bates B, Skinner JS. Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. *Med Sci Sports Exerc.* févr 1987;19(1):51-5.
5. O'Toole ML, Douglas PS. Applied physiology of triathlon. *Sports Med.* avr 1995;19(4):251-67.
6. Foster C, Lucia A. Running economy : the forgotten factor in elite performance. *Sports Med.* 2007;37(4-5):316-9.
7. Le meur Y. LES STRATEGIES D'ALLURE DANS LA PERFORMANCE SPORTIVE DE HAUT NIVEAU : ANALYSE DES VARIABILITES ET EXPOSE DES PHENOMENES EXPLICATIFS.
8. Ofoghi B, Zeleznikow J, Macmahon C, Rehula J, Dwyer DB. Performance analysis and prediction in triathlon. *Journal of Sports Sciences.* 2 avr 2016;34(7):607-12.
9. Walsh JA. The Rise of Elite Short-Course Triathlon Re-Emphasises the Necessity to Transition Efficiently from Cycling to Running. *Sports.* mai 2019;7(5):99.
10. Papavassiliou T, Zacharogiannis E, Soultanakis H, Paradisis G, Dagli Pagotto F. Contribution of select physiological variables to sprint triathlon performance. *J Sports Med Phys Fitness.* août 2019;59(8):1311-8.
11. Vleck VE, Bürgi A, Bentley DJ. The Consequences of Swim, Cycle, and Run Performance on Overall Result in Elite Olympic Distance Triathlon. *International Journal of Sports Medicine.* janv 2006;27(1):43-8.
12. Vleck V, Millet GP, Alves FB. The impact of triathlon training and racing on athletes' general health. *Sports Med.* déc 2014;44(12):1659-92.
13. Aoyagi A, Ishikura K, Nabekura Y. Exercise Intensity during Olympic-Distance Triathlon in Well-Trained Age-Group Athletes: An Observational Study. *Sports (Basel).* 21 janv 2021;9(2):18.
14. Etxebarria N, Mujika I, Pyne DB. Training and Competition Readiness in Triathlon. *Sports (Basel).* 29 avr 2019;7(5):101.
15. Wu SSX, Peiffer JJ, Brisswalter J, Nosaka K, Lau WY, Abbiss CR. Pacing strategies during the swim, cycle and run disciplines of sprint, Olympic and half-Ironman triathlons. *Eur J Appl Physiol.* mai 2015;115(5):1147-54.
16. Bentley DJ, Cox GR, Green D, Laursen PB. Maximising performance in triathlon: applied physiological and nutritional aspects of elite and non-elite competitions. *J Sci Med Sport.* juill 2008;11(4):407-16.
17. Zhou S, Robson SJ, King MJ, Davie AJ. Correlations between short-course triathlon performance and physiological variables determined in laboratory cycle

- and treadmill tests. *J Sports Med Phys Fitness*. juin 1997;37(2):122-30.
18. Cejuela R, Cortell-Tormo JM, Chinchilla-Mira JJ, Pérez-Turpin JA, Villa JG. Gender differences in elite Olympic distance triathlon performances. *JHSE*. 2012;7(2):434-45.
  19. Bernard T, Vercruyssen F, Grego F, Hausswirth C, Lepers R, Vallier JM, et al. Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. :6.
  20. Millet GP. Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *British Journal of Sports Medicine*. 1 oct 2000;34(5):384-90.
  21. Abbiss CR, Quod MJ, Martin DT, Netto KJ, Nosaka K, Lee H, et al. Dynamic Pacing Strategies during the Cycle Phase of an Ironman Triathlon: *Medicine & Science in Sports & Exercise*. avr 2006;38(4):726-34.
  22. Etxebarria N, Wright J, Jeacocke H, Mesquida C, Pyne DB. Running Your Best Triathlon Race. *Int J Sports Physiol Perform*. 1 mai 2021;16(5):744-7.
  23. Abbiss CR, Laursen PB. Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med*. 2008;38(3):239-52.
  24. Vercruyssen F, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM. Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes: *Medicine & Science in Sports & Exercise*. mars 2002;34(3):530-6.
  25. Wu SS, Peiffer JJ, Brisswalter J, Nosaka K, Abbiss CR. Factors influencing pacing in triathlon. *Open Access J Sports Med*. 16 sept 2014;5:223-34.
  26. Etxebarria N, Anson JM, Pyne DB, Ferguson RA. High-intensity cycle interval training improves cycling and running performance in triathletes. *Eur J Sport Sci*. 2014;14(6):521-9.
  27. Bassett DRJ, Howley ET. Maximal oxygen uptake: “classical” versus “contemporary” viewpoints. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. mai 1997;29(5):591.
  28. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. [cité 16 oct 2023]; Disponible sur: <https://physoc.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/JP279963>
  29. Saltin B, Astrand PO. Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol*. sept 1967;23(3):353-8.
  30. Daniels JT. A physiologist’s view of running economy. *Med Sci Sports Exerc*. juin 1985;17(3):332-8.
  31. Sjödén B, Svedenahg J. Applied physiology of marathon running. *Sports Med*. 1985;2(2):83-99.
  32. Costill DL, Thomason H, Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports*. 1973;5(4):248-52.
  33. Poole DC, Rossiter HB, Brooks GA, Gladden LB. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *J Physiol*. févr 2021;599(3):737-67.
  34. Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Ventilatory responses to exercise and their control in man. *Am Rev Respir Dis*. févr 1984;129(2 Pt 2):S17-20.
  35. Wasserman K, McIlroy MB. DETECTING THE THRESHOLD OF ANAEROBIC METABOLISM IN CARDIAC PATIENTS DURING EXERCISE. *Am J Cardiol*. déc 1964;14:844-52.
  36. De Vito G, Bernardi M, Sproviero E, Figura F. Decrease of endurance performance during Olympic Triathlon. *Int J Sports Med*. janv 1995;16(1):24-8.

37. Svedahl K, MacIntosh BR. Anaerobic threshold: the concept and methods of measurement. *Can J Appl Physiol.* avr 2003;28(2):299-323.
38. Coyle EF, Feltner ME, Kautz SA, Hamilton MT, Montain SJ, Baylor AM, et al. Physiological and biomechanical factors associated with elite endurance cycling performance. *Med Sci Sports Exerc.* janv 1991;23(1):93-107.
39. Horowitz JF, Sidossis LS, Coyle EF. High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int J Sports Med.* avr 1994;15(3):152-7.
40. Schabort EJ, Killian SC, Gibson ASC, Hawley JA, Noakes TD. Prediction of triathlon race time from laboratory testing in national triathletes: *Medicine & Science in Sports & Exercise.* avr 2000;32(4):844-9.
41. Pryor SL, Lewis SF, Haller RG, Bertocci LA, Victor RG. Impairment of sympathetic activation during static exercise in patients with muscle phosphorylase deficiency (McArdle's disease). *J Clin Invest.* mai 1990;85(5):1444-9.
42. Vanoverschelde JL, Younis LT, Melin JA, Vanbutsele R, Leclercq B, Robert AR, et al. Prolonged exercise induces left ventricular dysfunction in healthy subjects. *J Appl Physiol* (1985). mars 1991;70(3):1356-63.
43. Toussaint HM, Beek PJ. Biomechanics of competitive front crawl swimming. *Sports Med.* janv 1992;13(1):8-24.
44. Toussaint HM. Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Med Sci Sports Exerc.* juin 1990;22(3):409-15.
45. Chatard JC, Senegas X, Selles M, Dreanot P, Geysant A. Wet suit effect: a comparison between competitive swimmers and triathletes. *Med Sci Sports Exerc.* avr 1995;27(4):580-6.
46. Abbiss CR, Quod MJ, Levin G, Martin DT, Laursen PB. Accuracy of the Velotron Ergometer and SRM Power Meter. *Int J Sports Med.* févr 2009;30(2):107-12.
47. Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and Power Tap Power Monitoring Systems for Bicycling: *Medicine & Science in Sports & Exercise.* juill 2004;36(7):1252-8.
48. Marsh AP, Martin PE. Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Med Sci Sports Exerc.* sept 1997;29(9):1225-32.
49. Nesi X, Bosquet L, Pelayo P. Preferred pedal rate: an index of cycling performance. *Int J Sports Med.* juin 2005;26(5):372-5.
50. Candotti CT, Ribeiro J, Soares DP, De Oliveira AR, Loss JF, Guimarães ACS. Effective force and economy of triathletes and cyclists. *Sports Biomech.* janv 2007;6(1):31-43.
51. Zameziati K, Mornieux G, Rouffet D, Belli A. Relationship between the increase of effectiveness indexes and the increase of muscular efficiency with cycling power. *Eur J Appl Physiol.* févr 2006;96(3):274-81.
52. Conley DL, Krahenbuhl GS. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 1980;12(5):357.
53. Dengel DR, Flynn MG, Costill DL, Kirwan JP. Determinants of success during triathlon competition. *Res Q Exerc Sport.* sept 1989;60(3):234-8.

54. Kreider RB, Boone T, Thompson WR, Burkes S, Cortes CW. Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. août 1988;20(4):385.
55. Spindler DJ, Allen MS, Vella SA, Swann C. The psychology of elite cycling: a systematic review. *J Sports Sci*. sept 2018;36(17):1943-54.
56. Reeth DV, Larson DJ. *The Economics of Professional Road Cycling*. Springer; 2015. 343 p.
57. Rodriguez-Marroyo JA, Garcia-Lopez J, Juneau CE, Villa JG. Workload demands in professional multi-stage cycling races of varying duration. *British Journal of Sports Medicine*. 1 mars 2009;43(3):180-5.
58. Bossi AH, O'Grady C, Ebreo R, Passfield L, Hopker JG. Pacing Strategy and Tactical Positioning During Cyclo-Cross Races. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. avr 2018;13(4):452-8.
59. Seifert L, Araújo D, Komar J, Davids K. Understanding constraints on sport performance from the complexity sciences paradigm: An ecological dynamics framework. *Hum Mov Sci*. déc 2017;56(Pt A):178-80.
60. Noakes TD. Time to move beyond a brainless exercise physiology: the evidence for complex regulation of human exercise performance. *Appl Physiol Nutr Metab*. janv 2011;36(1):23-35.
61. Le Meur Y, Hausswirth C, Dorel S, Bignet F, Brisswalter J, Bernard T. Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition. *Eur J Appl Physiol*. juill 2009;106(4):535-45.
62. Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Bürgi A. Pacing during an elite Olympic distance triathlon: Comparison between male and female competitors. *Journal of Science and Medicine in Sport*. juill 2008;11(4):424-32.
63. Tucker R, Dugas J, Fitzgerald M. *Runner's World The Runner's Body: How the Latest Exercise Science Can Help You Run Stronger, Longer, and Faster*. In 2009 [cité 17 oct 2023]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Runner's-World-The-Runner's-Body%3A-How-the-Latest-Tucker-Dugas/b841026f78ace3a1ed785a20be6348a635a5ed6e# citing-papers>
64. Foster C, Hendrickson KJ, Peyer K, Reiner B, deKoning JJ, Lucia A, et al. Pattern of developing the performance template. *British Journal of Sports Medicine*. 15 sept 2009;43(10):765-9.
65. Konings MJ, Noorbergen OS, Parry D, Hettinga FJ. Pacing Behavior and Tactical Positioning in 1500-m Short-Track Speed Skating. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 1 janv 2016;11(1):122-9.
66. Konings MJ, Hettinga FJ. Objectifying Tactics: Athlete and Race Variability in Elite Short-Track Speed Skating. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 13(2):170-5.
67. Dilger A, Geyer H. The dynamic of bicycle finals: A theoretical and empirical analysis of slipstreaming. *IÖB-Diskussionspapiere* [Internet]. 2009 [cité 31 août 2023]; Disponible sur: <https://ideas.repec.org//p/zbw/ioebdp/409.html>
68. Garland SW. An analysis of the pacing strategy adopted by elite competitors in 2000 m rowing. *Br J Sports Med*. janv 2005;39(1):39-42.

69. Peeling P, Landers G. Swimming intensity during triathlon: a review of current research and strategies to enhance race performance. *J Sports Sci.* août 2009;27(10):1079-85.
70. Zamparo P, Bonifazi M, Faina M, Milan A, Sardella F, Schena F, et al. Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers. *Eur J Appl Physiol.* août 2005;94(5-6):697-704.
71. Sharma AP, Périard JD. Physiological Requirements of the Different Distances of Triathlon. In: Migliorini S, éditeur. *Triathlon Medicine* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2020 [cité 19 juill 2022]. p. 5-17. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-22357-1\\_2](http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-22357-1_2)
72. Foster C, deKoning JJ, Hettinga F, Lampen J, Dodge C, Bobbert M, et al. Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. *Int J Sports Med.* avr 2004;25(3):198-204.
73. Thomas K, Stone M, St Clair Gibson A, Thompson K, Ansley L. The effect of an even-pacing strategy on exercise tolerance in well-trained cyclists. *Eur J Appl Physiol.* déc 2013;113(12):3001-10.
74. Atkinson G, Brunskill A. Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics.* oct 2000;43(10):1449-60.
75. Atkinson G, Peacock O, Passfield L. Variable versus constant power strategies during cycling time-trials: Prediction of time savings using an up-to-date mathematical model. *Journal of Sports Sciences.* juill 2007;25(9):1001-9.
76. Scelles N, Mignot JF, Cabaud B, François A. Temporary organizational forms and cooperation in cycling: What makes a breakaway successful in the Tour de France? *Team Performance Management: An International Journal.* 1 janv 2017;24(3/4):122-34.
77. Trenchard H. Self-Organized Coupling Dynamics and Phase Transitions in Bicycle Pelotons.
78. Kyle CR. Reduction of Wind Resistance and Power Output of Racing Cyclists and Runners Travelling in Groups. *Ergonomics.* avr 1979;22(4):387-97.
79. Schickhofer L, Hanson H. Aerodynamic effects and performance improvements of running in drafting formations. *Journal of Biomechanics.* 9 juin 2021;122:110457.
80. Phillips KE, Hopkins WG. Performance Relationships in Timed and Mass-Start Events for Elite Omnium Cyclists. *International Journal of Sports Physiology and Performance.* mai 2017;12(5):628-33.
81. McCole SD, Clancy K, Conte JC, Anderson R, Hagberg JM. Energy expenditure during bicycling. *Journal of Applied Physiology.* févr 1990;68(2):748-53.
82. Chatard JC, Wilson B. Drafting distance in swimming. *Med Sci Sports Exerc.* juill 2003;35(7):1176-81.
83. Chatard JC, Chollet D, Millet G. Performance and drag during drafting swimming in highly trained triathletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* août 1998;30(8):1276-80.
84. Le Meur Y, Bernard T, Dorel S, Abbiss CR, Honorat G, Brisswalter J, et al. Relationships between triathlon performance and pacing strategy during the run in an international competition. *Int J Sports Physiol Perform.* juin 2011;6(2):183-94.

85. Cejuela R, Cala A, Pérez-Turpin JA, Villa JG, Cortell JM, Chinchilla JJ. Temporal Activity in Particular Segments and Transitions in The Olympic Triathlon. *Journal of Human Kinetics*. 1 mars 2013;36(1):87-95.
86. Pöller S. SUCCESS FACTORS IN THE 2014 TRIATHLON MIXED RELAY WORLD CHAMPIONSHIPS. :2.
87. Quagliarotti C, Gaiola D, Bianchini L, Vleck V, Piacentini MF. How to Form a Successful Team for the Novel Olympic Triathlon Discipline: The Mixed-Team-Relay. *JFMK*. 2 juin 2022;7(2):46.
88. Landers GJ, Blanksby BA, Ackland TR, Monson R. Swim Positioning and its Influence on Triathlon Outcome. *Int J Exerc Sci*. 2008;1(3):96-105.
89. Piacentini M, Bianchini L, Minganti C, Sias M, Di Castro A, Vleck V. Is the Bike Segment of Modern Olympic Triathlon More a Transition towards Running in Males than It Is in Females? *Sports*. 29 mars 2019;7(4):76.
90. Gadelha AB, Sousa CV, Sales MM, dos Santos Rosa T, Flothmann M, Barbosa LP, et al. Cut-Off Values in the Prediction of Success in Olympic Distance Triathlon. *IJERPH*. 18 déc 2020;17(24):9491.
91. Sousa CV, Aguiar S, Olher RR, Cunha R, Nikolaidis PT, Villiger E, et al. What Is the Best Discipline to Predict Overall Triathlon Performance? An Analysis of Sprint, Olympic, Ironman® 70.3, and Ironman® 140.6. *Front Physiol*. 5 mai 2021;12:654552.
92. Blocken B, Van Druenen T, Toparlar Y, Malizia F, Mannion P, Andrienne T, et al. Aerodynamic drag in cycling pelotons: New insights by CFD simulation and wind tunnel testing. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. août 2018;179:319-37.
93. Chatard JC, Wilson B. Effect of Fastskin Suits on Performance, Drag, and Energy Cost of Swimming. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. juin 2008;40(6):1149-54.
94. Figueiredo P, Marques EA, Lepers R. Changes in Contributions of Swimming, Cycling, and Running Performances on Overall Triathlon Performance Over a 26-Year Period. *Journal of Strength and Conditioning Research*. sept 2016;30(9):2406-15.
95. Results • World Triathlon [Internet]. [cité 19 juill 2022]. Disponible sur: <https://triathlon.org/results>
96. Lepers R. Analysis of Hawaii Ironman Performances in Elite Triathletes from 1981 to 2007. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. oct 2008;40(10):1828.
97. World Triathlon Sport Competition Rules.
98. Landers GJ, Blanksby BA, Ackland TR, Monson R. Swim Positioning and its Influence on Triathlon Outcome. :10.
99. Hausswirth C, Vallier JM, Lehenaff D, Brisswalter J, Smith D, Millet G, et al. Effect of two drafting modalities in cycling on running performance: *Medicine and Science in Sports and Exercise*. mars 2001;33(3):485-92.
100. Kim HY. Statistical notes for clinical researchers: Chi-squared test and Fisher's exact test. :4.
101. Tomczak M, Tomczak E. The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. 2014;1:7.
102. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive

- Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. :10.
103. Kevin T. Pacing: Individual Strategies for Optimal Performance. Human Kinetics; 2014. 240 p.
  104. Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR. Specific Aspects of Contemporary Triathlon: Implications for Physiological Analysis and Performance. *Sports Medicine*. 2002;32(6):345-59.
  105. Chollet D, Hue O, Auclair F, Millet G, Chatard JC. The effects of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes. *European Journal of Applied Physiology*. 15 août 2000;82(5-6):413-7.
  106. Chatard JC, Lavoie JM, Lacourl JR. Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. sept 1990;61(1-2):88-92.
  107. World Triathlon Ranking rules.pdf [Internet]. [cité 16 juin 2021]. Disponible sur: [https://www.triathlon.org/uploads/docs/World\\_Triathlon\\_Ranking\\_20171210.pdf](https://www.triathlon.org/uploads/docs/World_Triathlon_Ranking_20171210.pdf)
  108. Hausswirth C, Lehmann D, Drano P, Savonen K. Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon: *Medicine & Science in Sports & Exercise*. avr 1999;31(4):599-604.
  109. Sonas AS and J. PlayerRatings: Dynamic Updating Methods for Player Ratings Estimation [Internet]. 2020 [cité 23 nov 2021]. Disponible sur: <https://CRAN.R-project.org/package=PlayerRatings>
  110. Elo AE. The rating of chessplayers, past and present. New York: Arco Pub; 1978. 206 p.
  111. Glickman ME. Parameter Estimation in Large Dynamic Paired Comparison Experiments. *J R Statist Soc C*. août 1999;48(3):377-94.
  112. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic - Tibshirani - 2001 - *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* - Wiley Online Library [Internet]. [cité 23 juin 2022]. Disponible sur: <https://rss.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-9868.00293>
  113. Yu-Feng Li, Zhi-Hua Zhou. Towards Making Unlabeled Data Never Hurt. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. janv 2015;37(1):175-88.
  114. Rüst CA, Lepers R, Stiefel M, Rosemann T, Knechtle B. Performance in Olympic triathlon: changes in performance of elite female and male triathletes in the ITU World Triathlon Series from 2009 to 2012. *SpringerPlus*. déc 2013;2(1):685.
  115. Delextrat A, Bernard T, Vercruyssen F, Hausswirth C, Brisswalter J. Influence des caractéristiques de la natation sur la performance lors d'un enchaînement natation-cyclisme. *Science & Sports*. août 2003;18(4):188-95.
  116. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, Helou NE, Schaal K, Quinquis L, et al. Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983. :10.
  117. Lepers R, Knechtle B, Stapley P. Trends in Triathlon Performance: Effects of Sex and Age. :34.
  118. Gadelha AB, Sousa CV, Sales MM, dos Santos Rosa T, Flothmann M, Barbosa LP, et al. Cut-Off Values in the

- Prediction of Success in Olympic Distance Triathlon. *Int J Environ Res Public Health*. déc 2020;17(24):9491.
119. Chatard JC, Millet G. Effects of Wetsuit Use in Swimming Events: Practical Recommendations. *Sports Medicine*. août 1996;22(2):70-5.
120. de Lucas RD, Balikian P, Neiva CM, Greco CC, Denadai BS. The effects of wet suits on physiological and biomechanical indices during swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*. mars 2000;3(1):1-8.
121. Abbiss CR, Ross MLR, Garvican LA, Ross N, Pottgiesser T, Gregory J, et al. The distribution of pace adopted by cyclists during a cross-country mountain bike World Championships. *Journal of Sports Sciences*. 1 avr 2013;31(7):787-94.
122. Bernard T, Hauswirth C, Meur YL, Bignet F, Dorel S, Brisswalter J. Distribution of Power Output during the Cycling Stage of a Triathlon World Cup: *Medicine & Science in Sports & Exercise*. juin 2009;41(6):1296-302.
123. Mateo M, Blasco-Lafarga C, Zabala M. Pedaling Power and Speed Production vs. Technical Factors and Track Difficulty in Bicycle Motocross Cycling: *Journal of Strength and Conditioning Research*. déc 2011;25(12):3248-56.
124. Costill D, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D. Energy Expenditure During Front Crawl Swimming: Predicting Success in Middle-Distance Events. *International Journal of Sports Medicine*. oct 1985;06(05):266-70.
125. Mancha-Triguero D, Pérez-Murillo P, Ibáñez SJ, Antúnez A. Does the Physiological Response of a Triathlete Change in the Use or Absence of Drafting? *Int J Environ Res Public Health*. 30 juill 2022;19(15):9366.
126. Lepers R. Sex Difference in Triathlon Performance. *Frontiers in Physiology* [Internet]. 2019 [cité 19 oct 2023];10. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2019.00973>
127. World\_Triathlon\_Sport\_Competition\_Rules\_2020\_201811253.pdf [Internet]. [cité 1 mars 2023]. Disponible sur: [https://www.triathlon.org/uploads/docs/World\\_Triathlon\\_Sport\\_Competition\\_Rules\\_2020\\_201811253.pdf](https://www.triathlon.org/uploads/docs/World_Triathlon_Sport_Competition_Rules_2020_201811253.pdf)
128. Albert E. Riding a Line: Competition and Cooperation in the Sport of Bicycle Racing. *Sociology of Sport Journal*. 1 déc 1991;8(4):341-61.
129. Rebeggiani L, Tondani D. Organisational Forms in Professional Cycling: Efficiency Issues of the UCI Pro Tour [Internet]. *Diskussionsbeitrag*; 2006 [cité 21 oct 2023]. Report No.: 345. Disponible sur: <https://www.econstor.eu/handle/10419/22457>
130. Padilla S, Mujika I, Cuesta G, Goirienea JJ. Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. juin 1999;31(6):878.